

Метод определения частотных зависимостей коэффициентов затухания и связи оптического микрокольцевого резонатора с прямым волноводом

© А.А. Никитин, К.Н. Чекмезов, А.А. Ершов, А.А. Семенов, А.Б. Устинов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина),
197022 Санкт-Петербург, Россия
email: aanikitin@etu.ru

Поступило в Редакцию 4 марта 2024 г.

В окончательной редакции 2 мая 2024 г.

Принято к публикации 31 мая 2024 г.

Предложен оригинальный метод определения параметров базовых компонентов фотонных интегральных схем в широком диапазоне частот. Метод позволяет по измеренным передаточным характеристикам микрокольцевого резонатора, используемого в качестве тестового элемента, находить частотные зависимости коэффициента связи микрокольцевого резонатора с прямым волноводом, а также коэффициента затухания, группового показателя преломления и дисперсионного коэффициента прямоугольных оптических волноводов, из которых изготовлена фотонная интегральная схема. Показана эффективность использования метода для определения перечисленных параметров фотонных интегральных схем, изготовленных по технологии „кремний на изоляторе“, в диапазоне частот 184–197 THz (что соответствует диапазону длин волн 1520–1630 nm). Расчет передаточных характеристик фотонных интегральных схем с использованием найденных параметров волноводов показал хорошее соответствие экспериментально измеренным характеристикам.

Ключевые слова: фотонные интегральные схемы, оптические микроволноводы, кремний на изоляторе, неразрушающие методы.

DOI: 10.61011/JTF.2024.08.58567.72-24

Введение

В настоящее время наблюдается активное развитие технологий фотонных интегральных схем (ФИС) для создания компактных устройств фотоники и радиофотоники. Наиболее перспективными материалами для изготовления ФИС являются нитрид кремния, кремний, фосфид индия и тонкопленочный ниобат лития [1,2]. Одной из основных технологических платформ для создания устройств интегральной фотоники является „кремний-на-изоляторе“ (КНИ) [3]. Такая технология совместима с КМОП (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник) технологией изготовления интегральных схем микроэлектроники. Кроме того, благодаря высокому контрасту показателей преломления радиус изгиба кремниевых волноводов может быть уменьшен до $5\ \mu\text{m}$ при пренебрежимо малых потерях на излучение [4–6], что обеспечивает возможность создания ФИС с высокой плотностью элементов [7–9].

На основе КНИ технологии могут быть изготовлены не только пассивные оптические устройства, такие, как фильтры, направленные ответвители, мультиплексоры и демultipлексоры [10–15], но и модуляторы [16,17], а также кремний-германиевые волноводные фотодетекторы [18,19]. Кроме того, разнообразие нелинейных эффектов в кремниевых волноводах [20] позволяет создавать различные нелинейные устройства, например, ячейки па-

мяти, логические элементы, коммутаторы и транзисторы [21–24], которые находят свое применение для реализации искусственных нейронных сетей [25,26]. Другим материалом, перспективным для создания пассивных интегральных устройств радиофотоники, является нитрид кремния. Ключевым преимуществом этого материала являются рекордно низкие потери на распространение (менее dB/m), недостижимые для кремниевых волноводов [27–29]. Поэтому одним из актуальных направлений развития технологии ФИС является комбинация КНИ с технологией нитрида кремния (англ. SiN-on-SOI) [9,30].

При разработке новых технологических платформ, а также при серийном производстве ФИС необходимы методы определения волноведущих параметров изготовленных оптических волноводов. Ключевыми параметрами волноводов являются коэффициент затухания и постоянная распространения. Кроме того, в ФИС часто применяются связанные волноведущие структуры, поэтому еще одним важным параметром является коэффициент связи, например, между волноводом и микрокольцевым резонатором (МКР). Для передачи излучения между ФИС используются волоконно-оптические линии связи, следовательно, спектральная эффективность ввода/вывода излучения также должна быть известна. В связи с этим актуальной задачей является разработка методов определения частотных зависимостей

вышеперечисленных параметров кремниевых и нитрид-кремниевых ФИС.

Методы исследования микроволноводов можно условно разделить на разрушающие и неразрушающие. Разрушающие методы обычно направлены на прямое измерение геометрии структур. Тогда перечисленные параметры волноводов ФИС могут быть получены путем численного моделирования для известных материальных параметров. Такие методы требуют частичного или полного разрушения покрывного слоя или целого чипа. К ним относят, например, конфокальную, атомно-силовую или сканирующую электронную микроскопию [31]. Другим методом определения волноводящих свойств ФИС является метод укорачивания (от англ. cut-back technique) [4,32,33]. В этом методе происходит измерение вносимых потерь устройства, например, кольцевого резонатора с различной длиной подводящего волновода [34]. Наклон полученной зависимости вносимых потерь от длины волновода определяет декремент затухания. При нулевой длине подводящего волновода затухание определяется только потерями на связь, которые могут быть определены путем экстраполяции полученной зависимости.

В неразрушающих методах волноводящие свойства обычно определяются по измеренным передаточным характеристикам тестового элемента. Для определения параметров ФИС могут быть использованы различные интерференционные схемы [6]. Например, из передаточных характеристик интерферометров Фабри-Перо [34–38] или Маха-Цендера [39] могут быть найдены потери на распространение и дисперсионные свойства микроволноводов, а также геометрия волноводящих структур [31]. Однако такие методы не позволяют определить коэффициенты связи кольцевого резонатора с подводящими микроволноводами, значения которых необходимы при проектировании ФИС. Отметим, что коэффициенты связи и затухания не могут быть выражены в явном виде из экспериментальных передаточных характеристик кольцевого резонатора. Для независимого определения этих коэффициентов, а также дисперсионных свойств ФИС был предложен метод, основанный на измерении передаточных характеристик тестового набора элементов, а именно прямого микроволновода, волноводного ответвителя, микрокольцевого резонатора, а также интерферометра Маха-Цендера. Измерение передаточных характеристик такого набора тестовых элементов позволяет определить каждый из волноводящих параметров ФИС по отдельности [40]. Недостатком такого подхода является то, что он требует использования нескольких элементов, волноводящие свойства которых могут варьироваться из-за неоднородностей, обусловленных технологией изготовления [8,31].

Другим методом определения потерь на распространение и коэффициента связи МКР является метод рефлектометрии обратного рассеяния. В этом случае параметры кольцевого резонатора определяются из рефлектограмм [41–43]. Такой метод позволяет определять как

коэффициенты затухания и связи, так и дисперсионные свойства оптических микроволноводов. Отметим, что указанный метод неприменим при проведении измерений в широком диапазоне частот, особенно в случае сильной частотной зависимости измеряемых параметров.

В работе [44] был предложен метод, в котором из экспериментальных передаточных характеристик кольцевого резонатора, связанного с одним подводящим волноводом, определялись экспериментальные значения ширины и глубины линии резонансного поглощения МКР. Полученные данные использовались для составления системы из двух уравнений, из решения которой находились коэффициенты затухания и связи. Функциональность такого метода может быть значительно увеличена путем включения МКР в одно из плеч интерферометра Маха-Цендера [45], что позволяет определить не только коэффициенты связи и потери, но также затухание в области связи [46]. Однако необходимость определения ширины резонансной кривой ограничивает применимость данного метода как в случае высокого затухания в волноводах, так и при значениях коэффициента связи, близких к предельным [44].

В настоящей работе предложен метод, в котором волноводящие параметры определяются из экспериментальных значений минимумов и максимумов передаточных характеристик тестового микрокольцевого резонатора, симметрично связанного с двумя подводящими волноводами, что позволяет провести локальное определение коэффициентов затухания и связи в ФИС в широком частотном диапазоне.

1. Описание исследуемых структур и методики измерений

В настоящей работе исследовались МКР с диаметрами $d = 20, 100$ и $256 \mu\text{m}$, изготовленные по коммерческой КНИ технологии. Схема установки и топология исследуемых МКР показаны на рис. 1, *a*. Исследуемые структуры были образованы из прямоугольных кремниевых микроволноводов сечением $500 \times 220 \text{ nm}$. Поперечное сечение волноводов показано на рис. 1, *b*. Кроме того, на этом рисунке показан профиль TE-моды на частоте 193.4 THz (длина волны 1550 nm), полученный с помощью метода конечных разностей во временной области (англ. Finite Difference Time Domain, FDTD).

Ширина минимального зазора между прямым волноводом и МКР составляет 200 nm. Измерение передаточных характеристик МКР проводилось в диапазоне частот от 184 до 197 THz при помощи оптического анализатора компонентов высокого разрешения (англ. High Definition Component Analyzer — HDCA) производства Aragon Photonics. Анализатор имеет внутренний перестраиваемый источник, обеспечивающий возможность проведения измерений для TE- и TM-поляризации в S- и L-оптических диапазонах. Измерения, результаты которых

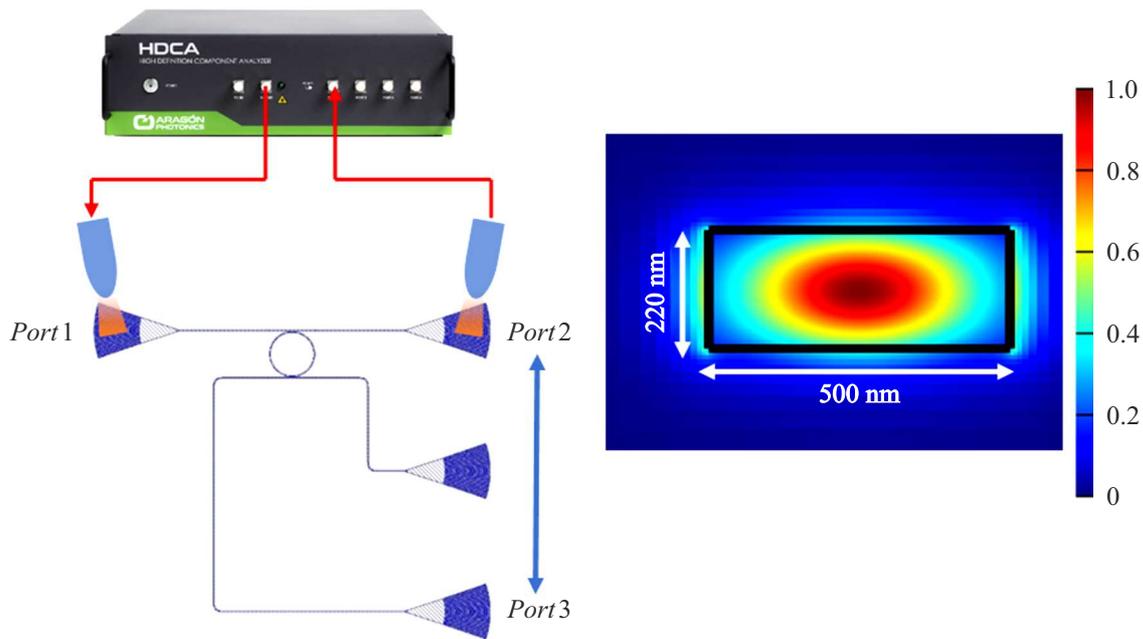


Рис. 1. Схема установки для измерения коэффициента передачи экспериментального образца МКР, изготовленного по технологии КНИ (а). Сечение исследуемого волновода и профиль ТЕ-моды в нем (б).

будут представлены ниже, были получены для случая ТЕ-поляризации.

Ввод и вывод излучения осуществлялся при помощи линзованных волокон OZ Photonics с антибликовым покрытием, размером фокусного пятна $5\ \mu\text{m}$ и фокусным расстоянием $26\ \mu\text{m}$. Волокна закреплялись в линейные трансляторы. В качестве элементов связи на схеме использовались дифракционные решетки. Угол ввода/вывода излучения выбирался таким образом, чтобы обеспечить наибольшую эффективность ввода и соответственно максимальный коэффициент передачи в выбранном диапазоне частот. Для визуального контроля использовался микроскоп с цифровой камерой. Исследуемые резонаторы имеют несколько выходов, поэтому при проведении измерений передаточных характеристик приемное волокно перемещалось между выходами 2 и 3, как показано стрелкой на рис. 1, а. Отметим, что при проведении измерений мощность входного сигнала P_{in} выбиралась таким образом, чтобы обеспечить линейный режим работы исследуемых микрокольцевых резонаторов. Мощность входного сигнала при проведении измерений передаточных характеристик резонатора диаметром $d = 256\ \mu\text{m}$ составляла $P_{in} = 0\ \text{dBm}$, для $d = 100\ \mu\text{m}$ — $P_{in} = -10\ \text{dBm}$ и для $d = 20\ \mu\text{m}$ — $P_{in} = -18\ \text{dBm}$. Для управления мощностью входного сигнала использовался встроенный в HDCA оптический аттенуатор.

Измеренные передаточные характеристики колец диаметрами $d = 20, 100$ и $256\ \mu\text{m}$ показаны на рис. 2 пунктирными линиями. Видно, что область свободной дисперсии (ОСД) на частоте 193 THz для резонатора с $d = 20\ \mu\text{m}$ составляет $\Delta f = 1.14\ \text{THz}$ (рис. 2, а, б).

Увеличение диаметра кольца приводит к уменьшению ОСД при $d = 100\ \mu\text{m}$ до $\Delta f = 228\ \text{GHz}$ (рис. 2, с, d), при $d = 256\ \mu\text{m}$ до $\Delta f = 91\ \text{GHz}$ (рис. 2, е, f). На вставках к рисунку передаточные характеристики показаны в увеличенном масштабе.

2. Модель для определения волноведущих свойств интегральных оптических микроволноводов по экспериментальным передаточным характеристикам МКР

Теперь перейдем к описанию модели, которая позволяет из измеренных передаточных характеристик определить волноведущие свойства интегральных оптических микроволноводов, из которых изготовлены МКР. Рассмотрим кольцевой резонатор, состоящий из микроволновода длиной l , замкнутого в кольцо, и двух прямых подводящих волноводов, используемых для ввода и вывода оптического сигнала (рис. 3). В области связи подводящего волновода и микрокольцевого резонатора часть оптического сигнала переизлучается в соседний волновод. Доля мощности переизлученного сигнала определяется коэффициентом связи κ . Считая потери в области связи пренебрежимо малыми, находим, что в результате одного оборота по кольцу, симметрично связанному с двумя подводящими волноводами, амплитуда сигнала уменьшается в $\kappa \cdot \exp(-\alpha l)$ раз, где α — декремент пространственного затухания. При этом

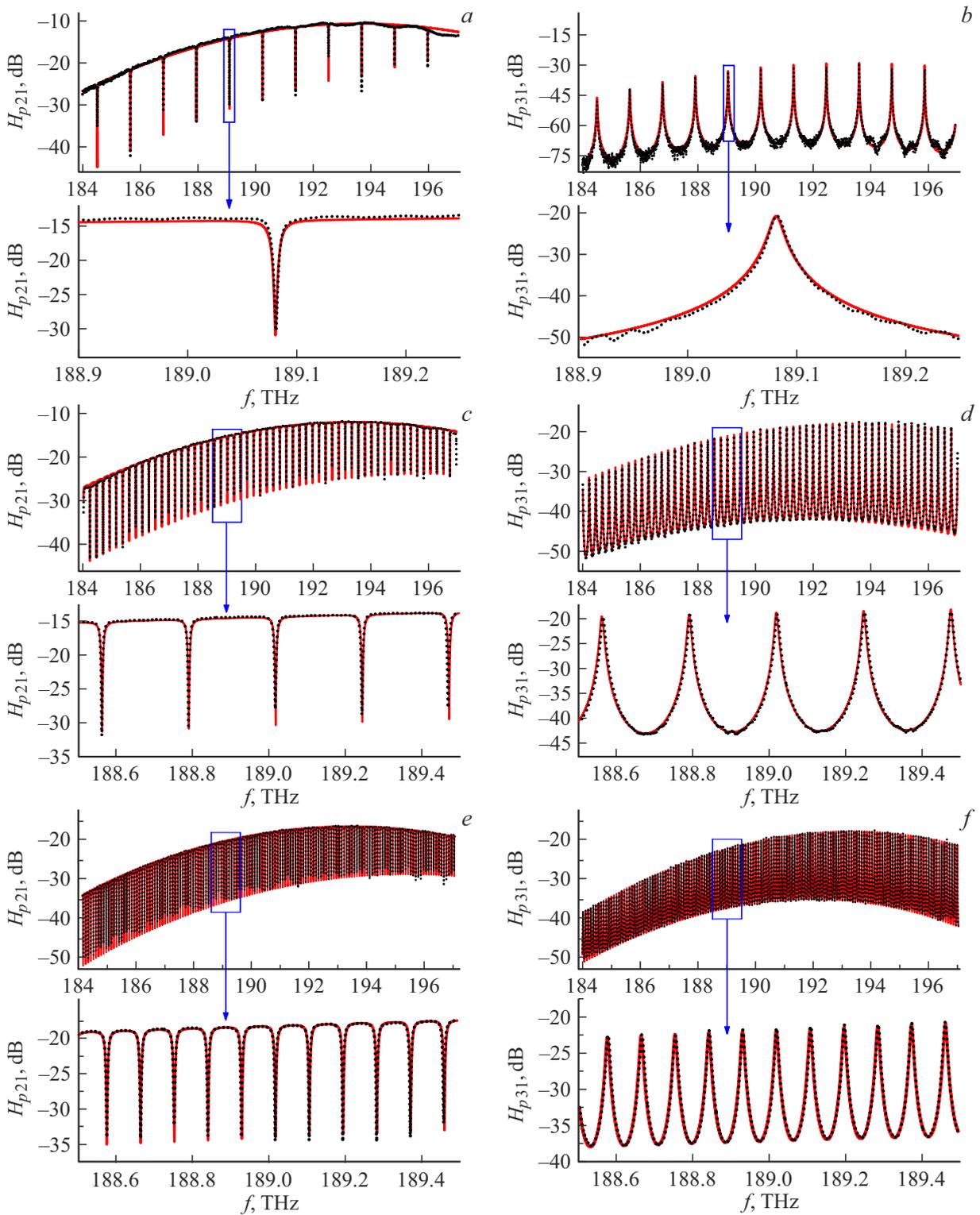


Рис. 2. Экспериментальные (точки) и теоретические (линии) — передаточные характеристики МКР диаметрами $d = 20, 100, 256 \mu\text{m}$. Вкладки (*a, c, e*) показывают характеристики с выхода 2. Вкладки (*b, d, f*) показывают характеристики с выхода 3.

сигнал приобретает дополнительный набег фазы, равный βl . Тогда один оборот сигнала в кольце, представленном на рис. 3, описывается волновым множителем $\kappa \cdot \exp(-\alpha l) \cdot \exp(i\beta l)$. Обозначим коэффициенты пере-

дачи МКР со входа 1 (*port 1* на рис. 1, *a* и 3) на выход 2 (*port 2* на рис. 1, *a* и 3) и на выход 3 (*port 3* на рис. 1, *a* и 3) как H_{p21} и H_{p31} соответственно. Следуя методу парциальных волн, H_{p21} и H_{p31} можем найти

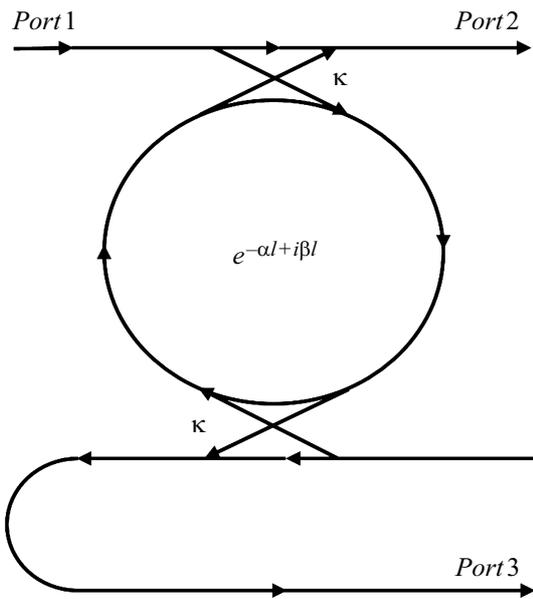


Рис. 3. Схема МКР с двумя подводящими волноводами.

как результат суперпозиции циркулирующих волн на выходах 2 и 3 [6,47]:

$$H_{p21} = \frac{T_{21}t(1 - 2e^{-\alpha l} \cos(\beta l) + e^{-2\alpha l})}{1 - 2te^{-\alpha l} \cos(\beta l) + t^2e^{-2\alpha l}}, \quad (1)$$

$$H_{p31} = \frac{T_{31}e^{-\alpha l} \kappa^2}{1 - 2te^{-\alpha l} \cos(\beta l) + t^2e^{-2\alpha l}}, \quad (2)$$

где коэффициент t означает долю мощности, которая остается в волноводе после прохождения области связи и вычисляется как $t = 1 - \kappa$. В выражениях (1) и (2) T_{21} и T_{31} описывают спектральную эффективность ввода излучения линзованным волокном через входную дифракционную решетку (*port 1*) и вывода излучения линзованным волокном с выходных дифракционных решеток (*port 2* и *3*). Отметим, что для ввода и вывода сигнала в ФИС обычно используются методы, которые требуют юстировки положения волокон относительно дифракционных решеток. Поэтому коэффициенты T_{21} и T_{31} зависят не только от волноведущих свойств, но и от точности позиционирования оптических волокон, а, следовательно, от эффективности ввода/вывода; в общем случае они не равны друг другу, т.е. $T_{21} \neq T_{31}$.

Качественно передаточные характеристики, полученные по выражениям (1) и (2), показаны на рис. 4. Как видно, характеристики демонстрируют многорезонансный отклик, обусловленный синфазным сложением циркулирующих в кольце волн. Запишем резонансное условие как

$$\beta_m = 2\pi m/l, \quad (3)$$

где m — номер резонансной гармоники.

Рассмотрим подробнее коэффициент передачи H_{21} (рис. 4, *a*). Из выражений (1) и (3) следует, что в резонансе $\cos(\beta_m l) = 1$. Тогда на частоте, соответствующей

этому волновому числу, коэффициент передачи минимален. Минимальное значение коэффициента передачи $H_{p21 \min}$ показано звездочкой на рис. 4, *a*. Это значение определяется по формуле:

$$H_{p21 \min} = \frac{T_{21}t(1 - e^{-\alpha l})^2}{(1 - te^{-\alpha l})^2}. \quad (4)$$

Ясно, что коэффициент передачи H_{p21} имеет максимум при условии $\beta = \pi(2m + 1)/l$. Подставив $\cos(\beta l) = -1$ в выражение (1), получим выражение для максимума коэффициента передачи ($H_{p21 \max}$ показано звездочкой на рис. 4, *a*):

$$H_{p21 \max} = \frac{T_{21}t(1 + e^{-\alpha l})^2}{(1 + te^{-\alpha l})^2}. \quad (5)$$

Аналогично запишем выражения для минимума (при $\beta = \pi(2m + 1)/l$) и максимума (при $\beta_m = 2\pi m/l$) коэффициента передачи H_{p31} ($H_{p31 \min}$ и $H_{p31 \max}$ показаны звездочками на рис. 4, *b*):

$$H_{p31 \min} = \frac{T_{31}e^{-\alpha l} \kappa^2}{(1 + te^{-\alpha l})^2}, \quad (6)$$

$$H_{p31 \max} = \frac{T_{31}e^{-\alpha l} \kappa^2}{(1 - te^{-\alpha l})^2}. \quad (7)$$

Далее разделим выражения (5) на (4) и (7) на (6) соответственно. В результате получим следующую систему алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} \frac{H_{p21 \max}}{H_{p21 \min}} = \frac{(1 + e^{\alpha l})^2(1 - \kappa - e^{\alpha l})^2}{(1 - \kappa + \kappa e^{\alpha l} - e^{2\alpha l})^2}, & (a) \\ \frac{H_{p31 \max}}{H_{p31 \min}} = \frac{(1 - \kappa + e^{\alpha l})^2}{(1 - \kappa - e^{\alpha l})^2}. & (b) \end{cases} \quad (8)$$

Допустим, что параметры α и κ слабо меняются в диапазоне частот, соответствующем частотному расстоянию между резонансами. Подставив в левую часть системы уравнений (8) экспериментальные значения максимумов и минимумов коэффициентов передачи H_{p21} и H_{p31} в окрестности выбранной резонансной частоты f_0 , получим систему уравнений относительно неизвестных параметров $\alpha(f_0)$ и $\kappa(f_0)$. Для определения частотных зависимостей $\alpha(f)$, $\kappa(f)$ расчет повторяется для каждой резонансной гармоники.

Перейдем к определению дисперсионных свойств оптических волнопроводов. МКР являются удобным инструментом для решения этой задачи, поскольку положение резонансных частот f_m однозначно связано со значениями резонансных волновых чисел β_m через закон дисперсии $\omega(\beta)$ волн в волноводе, из которого изготовлен МКР. Для начала разложим $\omega(\beta)$ в ряд Тейлора в окрестности частоты ω_0 и запишем это разложение в следующем виде:

$$\omega(\beta) = \omega_0 + \frac{c}{n_g}(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}D(\omega - \omega_0)^2 \dots, \quad (9)$$

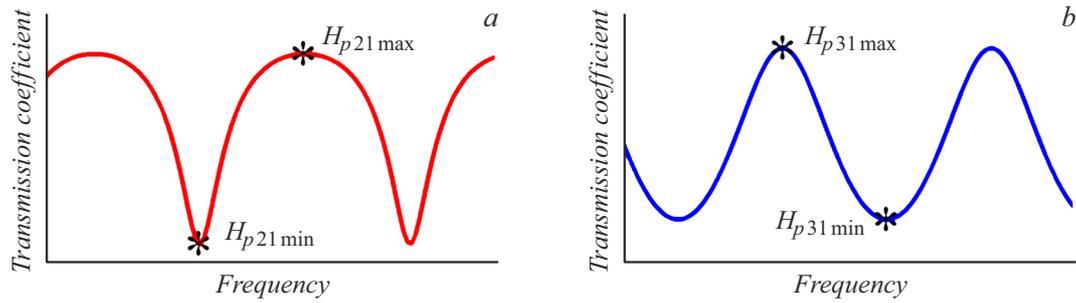


Рис. 4. Передаточные характеристики МКР H_{p21} (a) и H_{p31} (b).

где $\omega_0 = 2\pi f_0$, c — скорость света, n_g — групповой показатель преломления, D — дисперсионный коэффициент. В выражении (9) групповой показатель преломления n_g и дисперсионный коэффициент D определяются как

$$n_g = c \left(\frac{\partial \omega}{\partial \beta} \right)^{-1}, \quad (10)$$

$$D = \frac{\partial^2 \omega}{\partial \beta^2}. \quad (11)$$

Как видно из выражений (10) и (11), частотные зависимости параметров n_g и D могут быть получены из экспериментальных частотных зависимостей расстояния между резонансами Δf , а также расстояния между соседними резонансными волновыми числами $\Delta \beta$, которое определяется исключительно длиной кольца: $\Delta \beta = 2\pi/l$. После определения перечисленных выше параметров, определим коэффициенты T_{21} и T_{31} путем сопоставления теоретических передаточных характеристик, описываемых выражениями (1) и (2), с экспериментальными.

3. Экспериментальное определение волнораспространяющих свойств интегральных оптических микроволноводов

Для проверки адекватности предложенного метода проведем с его помощью описание волнораспространяющих свойств интегральных оптических КНИ микроволноводов. Полученные частотные зависимости представлены на рис. 5. Как известно, основным механизмом затухания в исследуемых кремниевых волноводах является рассеяние на шероховатостях стенок [32,33,48,49], при этом вклад потерь на изгибе для резонаторов диаметром более $10 \mu\text{m}$ пренебрежимо мал [4,5], поэтому представленные на рис. 5, a частотные зависимости коэффициентов затухания демонстрируют схожие зависимости. При этом необходимо отметить, что потери на распространение слабо уменьшаются с ростом частоты от 7 dB/cm на частоте 185 THz до 5 dB/cm на частоте 197 THz. Такое поведение связано с уменьшением влияния шероховатостей стенок волноводов на волновой процесс [4]. Как

видно из рис. 5, b, коэффициент связи также демонстрирует снижение с ростом частоты. При этом уменьшение диаметра кольца приводит к сокращению области связи и уменьшению коэффициента связи. Отметим, что такое поведение наблюдается, пока изменение радиуса изгиба слабо влияет на распределение поля в изогнутом волноводе.

Одной из причин погрешности в определении коэффициентов затухания и связи являются искажения, присутствующие на экспериментальных передаточных характеристиках кольцевого резонатора. При проведении экспериментального исследования МКР малого диаметра использовался аттенюатор, что приводило к возрастанию шума и погрешности в определении коэффициента затухания и связи в случае кольца малого диаметра.

Для определения дисперсионных свойств волноводов воспользуемся выражениями (9) и (10), в которые подставляются частотные зависимости ОСД $\Delta f(f)$, полученные из эксперимента. Результаты расчета показаны на рис. 6. Как видно, все МКР имеют схожие дисперсионные свойства. Групповой показатель преломления приблизительно составляет $n_g = 4.179$ (рис. 6, a), при этом волноводы демонстрируют нулевой наклон дисперсионной характеристики (рис. 6, b). Отметим, что погрешность в определении группового показателя преломления и дисперсионного коэффициента обусловлена точностью измерения расстояния между резонансными частотами. При заданной точности сближение резонансных частот с возрастанием диаметра кольца приводит к увеличению погрешности.

Напомним, что для ввода и вывода излучения использовались преобразователи на основе дифракционных решеток. Известно, что спектральная зависимость эффективности ввода/вывода излучения вблизи максимума через такие преобразователи имеет гауссову форму [50]:

$$T = T_0 \cdot \exp \left(- \left(\frac{f - f_0}{\Delta} \right)^2 \right), \quad (12)$$

где T_0 — максимум коэффициента передачи по мощности, f_0 — частотное положение максимума, Δ — параметр, характеризующий ширину передаточной характеристики. Полученные частотные зависимости $\alpha(f)$,

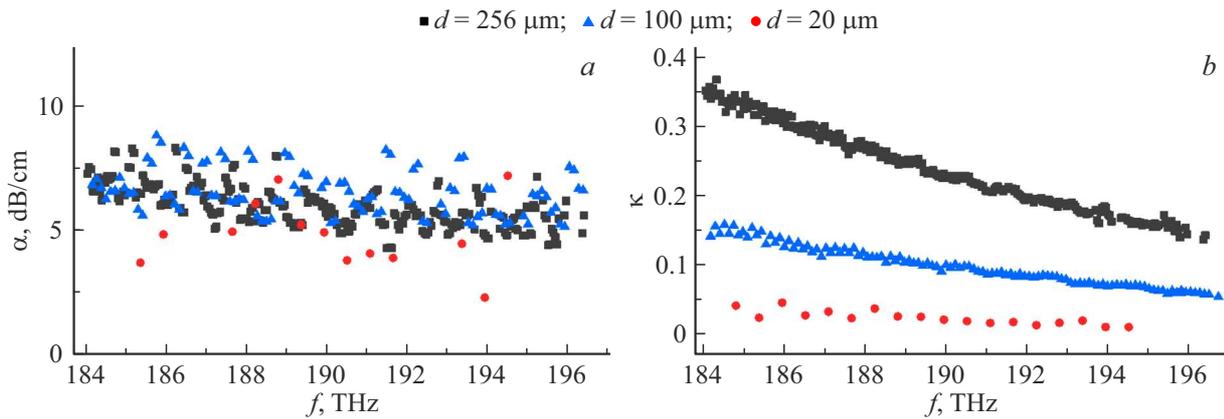


Рис. 5. Зависимость от частоты декремента затухания α (a) и коэффициента связи κ (b) для колец диаметром $d = 256$ (черные квадраты), 100 (синие треугольники), $20 \mu\text{m}$ (красные кружки).

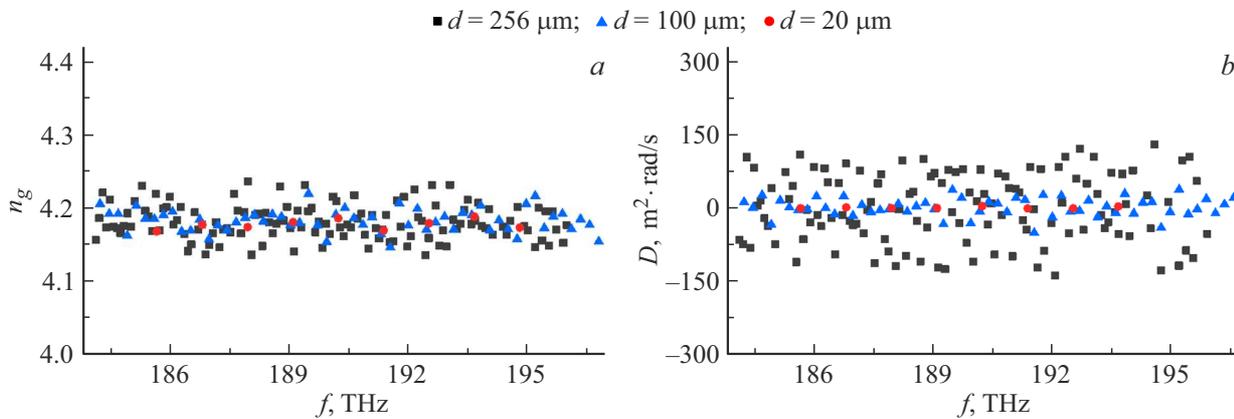


Рис. 6. Зависимость от частоты группового показателя преломления n_g (a) и дисперсионного коэффициента D (b) для колец диаметром $d = 256$ (черные квадраты), 100 (синие треугольники), $20 \mu\text{m}$ (красные кружки).

Параметры эффективности ввода/вывода

Параметр	Диаметр МКР (d), μm					
	256		100		20	
	T_{21}	T_{31}	T_{21}	T_{31}	T_{21}	T_{31}
T_0 , dB	-14.7	-14.8	-11.3	-13.5	-10.7	-14.5
f_0 , THz	193.28	193.7	193.4	194	193.6	194
Δ , THz	4.7	4.3	5	5.2	5	4.6

$n_g(f)$ и $\kappa(f)$ использовались для расчета теоретических передаточных характеристик по выражениям (1) и (2). Параметры, входящие в выражение (12), определялись путем наилучшего совпадения теории и эксперимента. Полученные значения, описывающие частотные зависимости коэффициентов T_{21} и T_{31} , представлены в таблице. Небольшие отличия между T_{21} и T_{31} обусловлены погрешностями ручной юстировки линзованных волокон.

В результате в настоящей работе были получены все основные волноведущие параметры КНИ микроволноводов. Для проверки адекватности предложенного метода проведено сопоставление теоретических и экспериментальных характеристик МКР. Численный расчет передаточных характеристик был выполнен по выражениям (1) и (2) с использованием полученных параметров. Теоретические характеристики показаны на рис. 2 сплошными линиями. Как видно, найденные частотные зависимости $\alpha(f)$, $n_g(f)$, $\kappa(f)$, $T_{21}(f)$ и $T_{31}(f)$ позволяют с высокой точностью описать передаточные характеристики МКР, что подтверждает адекватность разработанного метода.

Заключение

В работе были экспериментально определены волноведущие свойства интегральных оптических микроволноводов и МКР на их основе в широком частотном диапазоне. Разработан аналитический метод, позволяющий найти частотные зависимости коэффициентов затухания и связи, группового показателя преломления,

дисперсионного коэффициента, а также спектральной эффективности ввода/вывода излучения по измеренным передаточным характеристикам МКР. В работе получены зависимости перечисленных параметров кремниевых МКР различного диаметра в диапазоне частот от 184 до 197 THz. Показано, что затухание в экспериментальных образцах кремниевых волноводов не зависит от радиуса резонатора и слабо уменьшается с ростом частоты: от 7 dB/cm на частоте 185 THz до 5 dB/cm на частоте 197 THz. Коэффициент связи возрастает с ростом диаметра резонатора. При этом он демонстрирует обратно пропорциональную зависимость от частоты. В выбранном диапазоне частот кремниевые волноводы демонстрировали слабые дисперсионные свойства. Групповой показатель преломления составлял около 4,179. Отметим, что полученное значение отличается от теоретического, которое на частоте 191.5 THz для кремниевых волноводов сечением 500×220 nm составляет 4,203. Как было показано в работах [31,40], такое отличие может быть обусловлено различием между реальными размерами волновода и проектируемыми. На заключительном этапе путем совмещения экспериментальных и теоретических характеристик были получены частотные зависимости, описывающие эффективность ввода и вывода сигнала. Найденные параметры использованы для моделирования передаточных характеристик кольцевых резонаторов. Из сопоставления экспериментальных и теоретических результатов сделан вывод о применимости предложенного метода. Отметим, что для проведения исследования волноведущих параметров достаточно одного кольцевого резонатора диаметром $20 \mu\text{m}$. Такой малый размер тестовых элементов позволяет равномерно располагать их на поверхности исследуемой пластины, что может быть использовано для локального определения параметров ФИС и построения пространственных распределений волноведущих параметров. Кроме того, предложенный метод может быть расширен путем добавления уравнения для ширины резонансной кривой [44] или включением резонатора в плечо интерферометра Маха-Цендера [45,46], что позволяет увеличить число определяемых волноведущих параметров, например, коэффициентов связи в несимметрично связанном кольцевом резонаторе или затухания в области связи.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации („Госзадание“ грант № FSEE-2022-0017).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов

Список литературы

- [1] D. Marpaung, J. Yao, J. Capmany. *Nature Photonics*, **13** (2), 80 (2019). DOI: 10.1038/s41566-018-0310-5
- [2] D. Zhu, L. Shao, M. Yu, R. Cheng, B. Desiatov, C.J. Xin, Y. Hu, J. Holzgrafe, S. Ghosh, A. Shams-Ansari, E. Puma, N. Sinclair, C. Reimer, M. Zhang, M. Lončar. *Adv. Opt. Photon.*, **13** (2), 242 (2021). DOI: 10.1364/AOP.411024
- [3] S. Shekhar, W. Bogaerts, L. Chrostowski, J.E. Bowers, M. Hochberg, R. Soref, B.J. Shastri. *Nature Commun.*, **15** (1), 751 (2024). DOI: 10.1038/s41467-024-44750-0
- [4] Y.A. Vlasov, S.J. McNab. *Opt. Express*, **12** (8), 1622 (2004). DOI: 10.1364/OPEX.12.001622
- [5] W. Bogaerts, S.K. Selvaraja. *IEEE Photon. J.*, **3** (3), 422 (2011). DOI: 10.1109/JPHOT.2011.2142931
- [6] W. Bogaerts, P. De Heyn, T. Van Vaerenbergh, K. De Vos, S. Kumar Selvaraja, T. Claes, P. Dumon, P. Bienstman, D. Van Thourhout, R. Baets. *Laser Photon. Rev.*, **6** (1), 47 (2012). DOI: 10.1002/lpor.201100017
- [7] L. Vivien, L. Pavesi. *Handbook of Silicon Photonics* (Taylor & Francis, 2016), DOI: 10.1201/b14668
- [8] W. Bogaerts, L. Chrostowski. *Laser Photon. Rev.*, **12** (4), 1700237 (2018). DOI: 10.1002/lpor.201700237
- [9] S.Y. Siew, B. Li, F. Gao, H.Y. Zheng, W. Zhang, P. Guo, S.W. Xie, A. Song, B. Dong, L.W. Luo, C. Li, X. Luo, G.-Q. Lo. *J. Lightwave Technol.*, **39** (13), 4374 (2021). DOI: 10.1109/jlt.2021.3066203
- [10] W. Bogaerts, S.K. Selvaraja, P. Dumon, J. Brouckaert, K. De Vos, D. Van Thourhout, R. Baets. *IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron.*, **16** (1), 33 (2010). DOI: 10.1109/JSTQE.2009.2039680
- [11] W. Bogaerts, S. Pathak, A. Ruocco, S. Dwivedi. *Integrated Optics: Devices, Mater., Technol.* XIX, **9365**, 42 (2015). DOI: 10.1117/12.2082785
- [12] F. Horst, W.M. Green, S. Assefa, S.M. Shank, Y.A. Vlasov, B.J. Offrein. *Opt. Express*, **21** (10), 11652 (2013). DOI: 10.1364/OE.21.011652
- [13] B. Zhang, K. Al Qubaisi, M. Cherchi, M. Harjanne, Y. Ehrlichman, A.N. Khilo, M.A. Popović. *Opt. Lett.*, **45** (11), 3005 (2020). DOI: 10.1364/OL.395203
- [14] K. Jia, W. Wang, Y. Tang, Y. Yang, X. Jiang, Y. Wu, M. Wang, Y. Wang. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **17** (2), 378 (2005). DOI: 10.1109/LPT.2004.839394
- [15] G.B. Cao, F. Gao, J. Jiang, F. Zhang. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **17** (8), 1671 (2005). DOI: 10.1109/LPT.2005.851959
- [16] G.T. Reed, G. Mashanovich, F.Y. Gardes, D. Thomson. *Nature Photon.*, **4** (8), 518 (2010). DOI: 10.1038/nphoton.2010.179
- [17] Q. Xu, S. Manipatruni, B. Schmidt, J. Shakya, M. Lipson. *Opt. Express*, **15** (2), 430 (2007). DOI: 10.1364/OE.15.000430
- [18] L. Vivien, A. Polzer, D. Marris-Morini, J. Osmond, J.M. Hartmann, P. Crozat, E. Cassan, C. Kopp, H. Zimmermann, J.M. Fédéli. *Opt. Express*, **20** (2), 1096 (2012). DOI: 10.1364/OE.20.001096
- [19] L. Chen, M. Lipson. *Opt. Express*, **17** (10), 7901 (2009). DOI: 10.1364/OE.17.007901
- [20] R. Soref, B. Bennett. *IEEE J. Quant. Electron.*, **23** (1), 123 (1987). DOI: 10.1109/JQE.1987.1073206
- [21] R. Dekker, N. Usechak, M. Först, A. Driessen. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **40** (14), R249 (2007). DOI: 10.1088/0022-3727/40/14/R01

- [22] A.A. Nikitin, I.A. Ryabcev, A.A. Nikitin, A.V. Kondrashov, A.A. Semenov, D.A. Konkin, A.A. Kokolov, F.I. Sheyerman, L.I. Babak, A.B. Ustinov. *Opt. Commun.*, **511**, 127929 (2022). DOI: 10.1016/j.optcom.2022.127929
- [23] A.A. Nikitin, A.V. Kondrashov, V.V. Vitko, I.A. Ryabcev, G.A. Zaretskaya, N.A. Cheplagin, D.A. Konkin, A.A. Kokolov, L.I. Babak, A.B. Ustinov, B.A. Kalinikos. *Opt. Commun.*, **480**, 126456 (2021). DOI: 10.1016/j.optcom.2020.126456
- [24] S. Zhuang, J. Feng, H. Liu, S. Yuan, Y. Chen, H. Zeng. *Opt. Commun.*, **507**, 127637 (2022). DOI: 10.1016/j.optcom.2021.127637
- [25] M. Borghi, S. Biasi, L. Pavesi. *Sci. Reports*, **11** (1), 15642 (2021). DOI: 10.1038/s41598-021-94952-5
- [26] H. Zhang, J. Wen, Z. Wu, Q. Wang, H. Yu, Y. Zhang, Y. Pan, L. Yin, C. Wang, S. Qu. *Opt. Commun.*, **558**, 130374 (2024). DOI: 10.1016/j.optcom.2024.130374
- [27] X. Ji, S. Roberts, M. Corato-Zanarella, M. Lipson. *APL Photon.*, **6** (7), 071101 (2021). DOI: 10.1063/5.0057881
- [28] J. Liu, G. Huang, R.N. Wang, J. He, A.S. Raja, T. Liu, N.J. Engelsen, T.J. Kippenberg. *Nature Commun.*, **12** (1), 2236 (2021). DOI: 10.1038/s41467-021-21973-z
- [29] W. Jin, Q.F. Yang, L. Chang, B. Shen, H. Wang, M.A. Leal, L. Wu, M. Gao, A. Feshali, M. Paniccia, K.J. Vahala, J.E. Bowers. *Nature Photon.*, **15** (5), 346 (2021). DOI: 10.1038/s41566-021-00761-7
- [30] W.D. Sacher, J.C. Mikkelsen, Y. Huang, J.C.C. Mak, Z. Yong, X. Luo, Y. Li, P. Dumais, J. Jiang, D. Goodwill, E. Bernier, P.G.-Q. Lo, J.K.S. Poon. *Proceed. IEEE*, **106** (12), 2232 (2018). DOI: 10.1109/JPROC.2018.2860994
- [31] Y. Xing, J. Dong, S. Dwivedi, U. Khan, W. Bogaerts. *Photon. Res.*, **6** (11), 1008 (2018). DOI: 10.1364/PRJ.6.001008
- [32] K.K. Lee, D.R. Lim, H.C. Luan, A. Agarwal, J. Foresi, L.C. Kimerling. *Appl. Phys. Lett.*, **77** (11), 1617 (2000). DOI: 10.1063/1.1308532
- [33] K.K. Lee, D.R. Lim, L.C. Kimerling, J. Shin, F. Cerrina. *Opt. Lett.*, **26** (23), 1888 (2001). DOI: 10.1364/OL.26.001888
- [34] D.G. Rabus. *Integrated Ring Resonators* (Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007)
- [35] I.P. Kaminow, L.W. Stulz. *Appl. Phys. Lett.*, **33** (1), 62 (1978). DOI: 10.1063/1.90191
- [36] T. Feuchter, C. Thirstrup. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **6** (10), 1244 (1994). DOI: 10.1109/68.329652
- [37] A.S.A. Sakai, G.H.G. Hara, T.B.T. Baba. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40** (4B), L383 (2001). DOI: 10.1143/JJAP.40.L383
- [38] V.R. Almeida, R.R. Panepucci, M. Lipson. *Opt. Lett.*, **28** (15), 1302 (2003). DOI: 10.1364/OL.28.001302
- [39] C.J. Oton, C. Manganelli, F. Bontempi, M. Fournier, D. Fowler, C. Kopp. *Opt. Express*, **24** (6), 6265 (2016). DOI: 10.1364/OE.24.006265
- [40] A.A. Ershov, A.I. Eremeev, A.A. Nikitin, A.B. Ustinov. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, **65** (8), 2451 (2023). DOI: 10.1002/mop.33675
- [41] Y. Gottesman, E.V.K. Rao, D.G. Rabus. *J. Lightwave Technol.*, **22** (6), 1566 (2004). DOI: 10.1109/JLT.2004.829216
- [42] Y. Gottesman, D.G. Rabus, E.V.K. Rao, B.-E. Benkelfat. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **21** (19), 1399 (2009). DOI: 10.1109/LPT.2009.2025603
- [43] И.А. Рябцев, А.А. Ершов, Д.В. Ряйккенен, А.П. Буровихин, Р.В. Гапончик, И.Ю. Таценко, А.А. Сташкевич, А.А. Никитин, А.Б. Устинов. *Известия вузов России. Радиоэлектроника*, **25** (6), 79 (2022). DOI: 10.32603/1993-8985-2022-25-6-79-89
- [44] W.R. McKinnon, D.-X. Xu, C. Storey, E. Post, A. Densmore, A. Del age, P. Waldron, J.H. Schmid, S. Janz. *Opt. Express*, **17** (21), 18971 (2009). DOI: 10.1364/OE.17.018971
- [45] J.E. Heebner, V. Wong, A. Schweinsberg, R.W. Boyd, D.J. Jackson. *IEEE J. Quant. Electron.*, **40** (6), 726 (2004). DOI: 10.1109/JQE.2004.828232
- [46] F. Xia, L. Sekaric, Y.A. Vlasov. *Opt. Express*, **14** (9), 3872 (2006). DOI: 10.1364/OE.14.003872
- [47] A.A. Nikitin, V.V. Vitko, M.A. Cherkasskii, A.B. Ustinov, B.A. Kalinikos. *Results Phys.*, **18**, 103279 (2020). DOI: 10.1016/j.rinp.2020.103279
- [48] F. Grillot, L. Vivien, S. Laval, E. Cassan. *J. Lightwave Technol.*, **24** (2), 891 (2006). DOI: 10.1109/JLT.2005.861939
- [49] L. Chrostowski, M. Hochberg. *Silicon Photonics Design: from Devices to Systems* (Cambridge University Press, 2015)
- [50] D. Taillaert, P. Bienstman, R. Baets. *Opt. Lett.*, **29** (13), 2749 (2004). DOI: 10.1364/OL.29.002749