

Исследование оптических свойств микрокольцевых резонаторов, изготовленных по технологии кремний на изоляторе, методом оптической рефлектометрии обратного рассеяния

И. А. Рябцев^{1✉}, А. А. Ершов¹, Д. В. Ряйккенен¹, А. П. Буровихин¹, Р. В. Гапончик¹,
И. Ю. Таценко¹, А. А. Сташкевич², А. А. Никитин, А. Б. Устинов¹

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

²Университет Сорбонна Париж Север, Вилльтанез, Франция

✉ryabcev.ilya@gmail.com

Аннотация

Введение. Одним из перспективных методов определения параметров оптических кольцевых резонансных структур является метод рефлектометрии обратного рассеяния. Он позволяет экспериментально определять коэффициенты связи и потери на распространение. Однако экспериментальная проверка этого метода путем сопоставления данных, полученных в результате рефлектометрии и измерения оптическим векторным анализатором высокого разрешения, до настоящего времени не проводилась.

Цель работы. Определение параметров кремниевого микрокольцевого резонатора (МКР) методом оптической рефлектометрии обратного рассеяния. Расчет характеристик передачи исследуемого резонатора с использованием полученных параметров. Сопоставление результатов расчета передаточных характеристик с экспериментальными результатами измерения оптическим векторным анализатором высокого разрешения.

Материалы и методы. Исследуются характеристики МКР, изготовленного по технологии кремний на изоляторе. Для исследования параметров МКР использовался оптический рефлектометр обратного рассеяния. Для обработки полученной рефлектограммы применялась оригинальная теоретическая модель. Для исследования передаточных характеристик использовался оптический векторный анализатор. Численное моделирование передаточной характеристики с учетом полученных параметров резонатора проводилось с использованием оригинального аналитического подхода, основанного на методе парциальных волн.

Результаты. В результате исследования были получены значения коэффициента связи по мощности $\kappa = 0.167$ и потерь на распространение $\alpha = 3.25$ дБ/см. Полученные величины использовались для численного моделирования передаточных характеристик исследуемого резонатора, которые с высокой точностью совпадали с результатами эксперимента. В работе были определены межмодовый диапазон, который составил 88.8 ГГц, и добротность 45 000.

Заключение. Работа посвящена экспериментальному исследованию параметров интегральных МКР, изготовленных по технологии кремний на изоляторе с использованием метода рефлектометрии обратного рассеяния. Сравнение экспериментальной и теоретической передаточных характеристик показало хорошее соответствие, что свидетельствует о высокой точности определения параметров резонатора и, как следствие, актуальности используемого метода.

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

Для цитирования: Исследование оптических свойств микрокольцевых резонаторов, изготовленных по технологии кремний на изоляторе, методом оптической рефлектометрии обратного рассеяния / 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 // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 6. С. 79–89. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-6-79-89

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках выполнения государственного задания № 075-01438-22-07 и гранта № FSEE-2022-0017.

Статья поступила в редакцию 14.10.2022; принята к публикации после рецензирования 15.11.2022; опубликована онлайн 29.12.2022



Investigation of the Optical Properties of Silicon-on-Insulator Microring Resonators Using Optical Backscatter Reflectometry

Ilya A. Ryabcev¹✉, Alexander A. Ershov¹, Daniil V. Ryaikkenen¹,
Roman V. Haponchik¹, Anton P. Burovikhin¹, Ivan Yu. Tatsenko¹,
Andrey A. Stashkevich², Andrey A. Nikitin¹, Alexey B. Ustinov¹

¹Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

²Université Sorbonne Paris Nord, Villetaneuse, France

✉ryabcev.ilya@gmail.com

Abstract

Introduction. Optical backscatter reflectometry is one of the most promising methods used to examine characteristic parameters relevant to the design of microring resonators. This method paves the way for experimental determination of the coupling coefficient and propagation loss. However, experimental verification of this technique by comparing the transmission characteristics obtained by reflectometry and those directly measured by an optical vector analyzer has not been carried out.

Aim. To determine the parameters of microring resonators by optical reflectometry and to calculate on their basis the transmission characteristics of microring resonators. To compare the calculated transmission characteristics with those obtained experimentally using a high-resolution vector analyzer.

Materials and methods. The characteristic parameters of silicon-on-insulator microring resonators were investigated using an ultra-high resolution reflectometer. An original algorithm was employed to derive the characteristic parameters of microring resonators from reflectograms. An optical vector analyzer was used to study the transmission characteristics of microring resonators. Numerical modeling of transmission characteristics considering the obtained parameters was carried out according an analytical approach based on partial wave analysis.

Results. The obtained values of the power coupling coefficient $\kappa = 0.167$ and propagation losses $\alpha = 3.25$ dB/cm were used for numerical simulation of the transmission characteristics of a microring resonator. These characteristics were found to agree well with those obtained experimentally. The free spectral range of 88.8 GHz and Q-factor of 45 000 were determined.

Conclusion. An experimental study of the characteristic parameters of silicon-on-insulator microring resonators was conducted using an optical backscatter reflectometer. The performed comparison of the experimental and theoretical transmission characteristics showed good agreement, which indicates the high accuracy of the determined resonator parameters and, as a result, the relevance of the described method.

Keywords: microring resonator, reflectometry, silicon on insulator

For citation: Ryabcev I. A., Ershov A. A., Ryaikkenen D. V., Haponchik R. V., Burovikhin A. P., Tatsenko I. Yu., Stashkevich A. A., Nikitin A. A., Ustinov A. B. Investigation of the Optical Properties of Silicon-on-Insulator Microring Resonators Using Optical Backscatter Reflectometry. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 6, pp. 79–89. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-6-79-89

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Acknowledgements. The work was carried out with the support of Ministry of Education and Science of Russian Federation (project no. 075-01438-22-07, grant no. FSEE-2022-0017).

Submitted 14.10.2022; accepted 15.11.2022; published online 29.12.2022

Введение. Микрокольцевые резонаторы (МКР) являются ключевыми элементами для создания интегральных фотонных схем. Основными преимуществами МКР по сравнению с другими элементами являются компактность, возможность изменения спектральных свойств

в широких пределах путем регулировки геометрии волновода и длины резонатора l , снижение порогов нелинейных процессов за счет интерференции циркулирующих волн, а также простота изготовления. В настоящее время наиболее распространенной платформой для

производства фотонных интегральных схем является технология кремний на изоляторе (КНИ). КНИ совместима с КМОП-технологией и позволяет создавать фотонные интегральные схемы с высокой плотностью оптических элементов на чипе [1–4]. МКР, изготовленные по технологии КНИ, находят широкое применение при создании различных пассивных фотонных устройств, таких как высокодобротные фильтры [5–7] и биосенсоры [8], а также электрооптических модуляторов [9, 10]. Кроме того, низкий порог возникновения нелинейных эффектов (двухфотонное поглощение, комбинационное рассеяние, термооптический эффект) позволяет реализовывать нелинейные устройства, например ячейки памяти, логические элементы, коммутаторы и транзисторы [11–14].

Типичная конструкция МКР состоит из кольца, связанного с двумя прямыми микроволноводами, обеспечивающими ввод и вывод оптического сигнала (рис. 1). Оптический сигнал, поступающий на вход 1, распространяется по прямому микроволноводу. В области связи (пунктир на рис. 1) часть мощности переизлучается в волновод, замкнутый в кольцо, оставшаяся часть мощности поступает на выход 3. Часть сигнала, циркулирующего в кольце, ответвляется во второй прямой волновод и поступает на выход 2. На резонансных частотах, на которых набег фазы в кольце кратен 2π , мощность на выходе 3 уменьшается, а на выходе 2 возрастает.

Основными характеристиками, определяющими форму передаточной характеристики МКР, являются дисперсия и потери в волноводящих структурах, а также коэффициенты связи. Дисперсионные свойства волноводящих

структур могут быть определены из эксперимента путем сопоставления положения резонансных гармоник с номером m и резонансных волновых чисел $k_m = 2\pi m/l$. В то же время потери на связь и декремент затухания не могут быть однозначно разделены при измерении передаточных характеристик. Обычно эти параметры определяются путем сопоставления теоретических и экспериментальных зависимостей [15], однако такой метод вызывает затруднения при исследовании высокодобротных резонаторов, так как значительно возрастают требования к разрешению измерительного оборудования, а также к точности используемых теоретических моделей. В этом случае для определения коэффициентов связи и затухания необходим метод, который позволит однозначно разделить эти параметры. Одним из таких методов является метод рефлектометрии обратного рассеяния. В [16, 17] теоретически показано, что данный метод позволяет однозначно определить коэффициент связи и потери на распространение в кольцевых резонансных системах. Позднее в [13, 14] этот метод был использован для определения параметров МКР. Однако экспериментальное сопоставление передаточных характеристик, полученных в результате рефлектометрии обратного рассеяния и измеренных с помощью оптического векторного анализатора высокого разрешения, до настоящего времени не проводилось. Целью данной работы являлось определение параметров МКР, изготовленного по технологии КНИ, путем анализа рефлектограмм. Сопоставление передаточных характеристик, измеренных с помощью оптического векторного анализатора высокого разрешения и рассчитанных с использованием найденных параметров МКР, позволяет экспериментально продемонстрировать применимость метода рефлектометрии обратного рассеяния для определения свойств КНИ МКР.

Исследование МКР методом рефлектометрии обратного рассеяния. Исследуемый МКР изготовлен по технологии КНИ. Толщины нижнего и покрывного слоев SiO_2 составляли 2 и 14 мкм соответственно. Исследуемая структура состояла из кремниевых микроволноводов сечением $500 \times 220 \text{ нм}^2$, что обеспечивало ква-

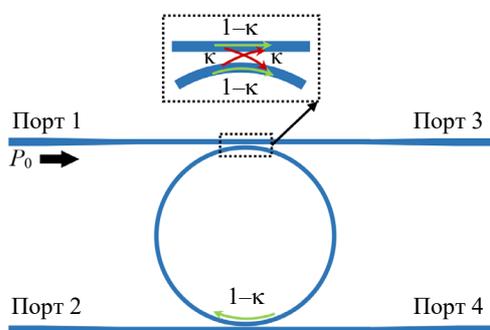


Рис. 1. Схема МКР

Fig. 1. Schematic representation of microring resonators (MRR)

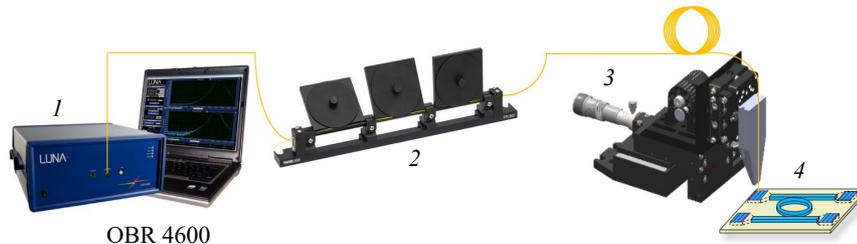


Рис. 2. Измерительный стенд для исследования характеристик МКР методом рефлектометрии обратного рассеяния
 Fig. 2. Experimental setup for studying the characteristics of a MRR by the method of backscattering reflectometry

зидномодовый режим распространения оптического излучения на частоте 193 ТГц. Диаметр МКР составлял 256 мкм, а расстояние между МКР и прямыми микроволноводами – 250 нм. Ввод излучения в микроволноводы и вывод излучения из них осуществлялись с помощью одномодовых сколотых оптических волокон, установленных под углом 82° к плоскости структуры, через брэгговские преобразователи шириной 10 мкм, периодом 630 нм и коэффициентом заполнения 0.5. Для согласования диаметров мод в оптическом волокне и кремниевом микроволноводе использовались сужающиеся волноводы длиной 128 мкм. Минимальные потери на ввод и вывод излучения были получены на частоте 192.5 ТГц и составляли 15.7 дБ.

Измерительный стенд для исследования характеристик резонатора методом рефлектометрии обратного рассеяния представлен на рис. 2. Он состоит из оптического рефлектометра обратного рассеяния Luna OBR 4600 (1), контроллера поляризации (2), трехосевой системы для микропозиционирования оптического волокна (3) и исследуемого МКР (4). Оптический сигнал с рефлектометра подавался на входной порт резонатора при помощи сколотого оптического волокна SMF-28. Отраженный сигнал принимался оптическим волокном и регистрировался рефлектометром. Полоса рабочих частот рефлектометра составляла от 188 до 193 ТГц.

Прохождение входного оптического импульса через исследуемую структуру сопровождается отражениями от неоднородностей в исследуемой структуре. Точка ввода излучения через брэгговский преобразователь в интегральную структуру определялась по положению максимального пика на рефлектограмме. Через расстояние, равное удвоенной длине прямого волновода, на рефлектограмме наблюдалась серия эквидистантных пиков, расстояние

между которыми равно длине кольца $l = 804$ мкм. Эта область рефлектограммы показана на рис. 3. Для удобства в качестве начальной точки выбрано положение первого пика в серии.

Рассмотрим процесс распространения первого пика (рис. 3). Оптический сигнал вводится через брэгговский преобразователь и распространяется по прямому волноводу до противоположного брэгговского преобразователя, затем, отражаясь от него, возвращается на вход и регистрируется рефлектометром. В процессе распространения он дважды проходит область связи между верхним волноводом и кольцом, в которой часть сигнала переизлучается в резонатор. Таким образом, выражение, описывающее мощность сигнала на выходе, можно записать как

$$P_1 = P_0 A^4 (1 - \kappa)^2,$$

где P_0 – мощность входного сигнала; A – коэффициент, описывающий затухание амплитуды сигнала при распространении в прямом волноводу и отражение от брэгговских преобразователей; κ – коэффициент связи по мощности. Опишем процесс распространения следу-

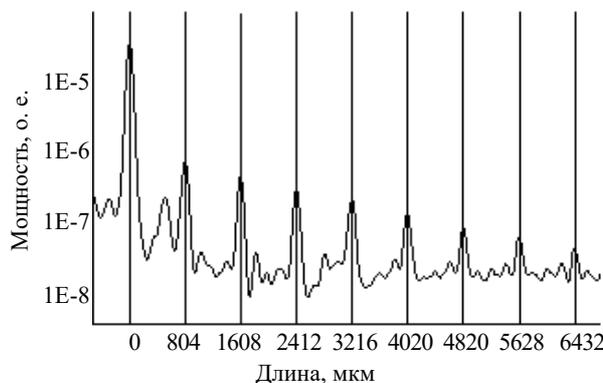


Рис. 3. Рефлектограмма МКР

Fig. 3. Reflectogram of a MRR

ющего пика: входной оптический сигнал через брэгговский преобразователь входит в микроволновод и распространяется по нему до области связи, в которой происходит переизлучение сигнала в МКР. Далее сигнал проходит один оборот по кольцу. Часть мощности сигнала теряется в результате затухания, а часть – в результате переизлучения во второй микроволновод. После полного оборота происходит обратное переизлучение сигнала в подводящий микроволновод. Далее сигнал проходит тот же путь, что и в предыдущем случае. В результате мощность второго импульса описывается следующим выражением:

$$P_2 = P_0 A^4 \kappa^2 (1 - \kappa)^2 e^{-2\alpha l},$$

где α – декремент затухания амплитуды сигнала в кремниевом микроволноводе. Выражение, описывающее мощность сигнала, совершившего два оборота по кольцу, можно записать в виде

$$P_3 = P_0 A^4 \kappa^2 (1 - \kappa)^4 e^{-4\alpha l}.$$

Каждый последующий пик на рефлектограмме уменьшается на величину, равную затуханию за один оборот по кольцу. Согласно методу, предложенному в [16, 17], параметры МКР могут быть найдены из решения системы уравнений, составленной для первых трех пиков:

$$\begin{cases} \kappa^2 e^{-2\alpha l} = \frac{P_1}{P_2}; \\ (1 - \kappa)^2 e^{-2\alpha l} = \frac{P_2}{P_3}. \end{cases}$$

В результате решения системы уравнений были получены следующие параметры МКР: потери на распространение составили $\alpha = 3.25$ дБ/см, коэффициент связи по мощности $\kappa = 0.167$.

Исследование передаточных характеристик МКР. С целью проверки адекватности полученных параметров МКР на следующем этапе было проведено экспериментальное исследование передаточной характеристики МКР. Для этого был собран измерительный стенд, представленный на рис. 4. Он состоял из оптического векторного анализатора Luna OBR 5000 (1), контроллера поляризации (2), двух трехосевых систем позиционирования для ввода и вывода излучения (3) и исследуемого МКР (4). Оптический сигнал с векторного анализатора при помощи оптического волокна SMF-28, сколотого на конце, подавался на вход в МКР (порт 1 на рис. 1). Выходной сигнал с противоположного порта МКР (порт 3 на рис. 1) принимался выводным оптическим волокном и поступал в векторный анализатор. На рис. 5, а черной сплошной линией представлен результат измерения передаточной характеристики МКР. Из полученных передаточных характеристик были определены межмодовый диапазон, который составил 88.8 ГГц, и добротность, равная 45 000.

Теперь рассмотрим принцип расчета передаточных характеристик МКР. Первоначально из результатов эксперимента, представленного на рис. 5, а, была найдена передаточная характеристика прямого микроволновода с брэгговскими преобразователями. Известно, что спектральная зависимость эффективности ввода/вывода излучения через брэгговские преобразователи вблизи максимума имеет гауссову форму [18, 19]. Считая потери в прямом волноводе малыми по сравнению с потерями на ввод и вывод излучения, передаточную характеристику прямого волновода с брэгговскими преобразователями H_{bragg} можно аппроксимировать следующей зависимостью:

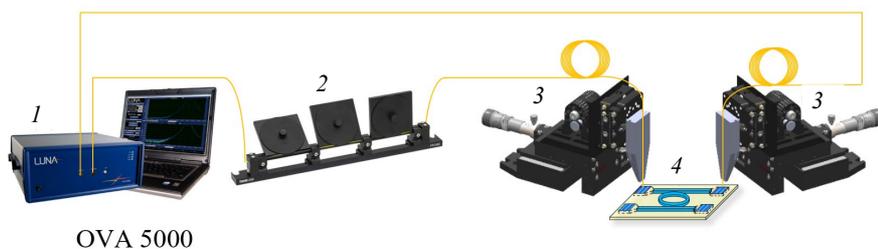


Рис. 4. Экспериментальная установка для исследования передаточных характеристик МКР
 Fig. 4. Experimental setup for studying the transmission characteristics of an MRR

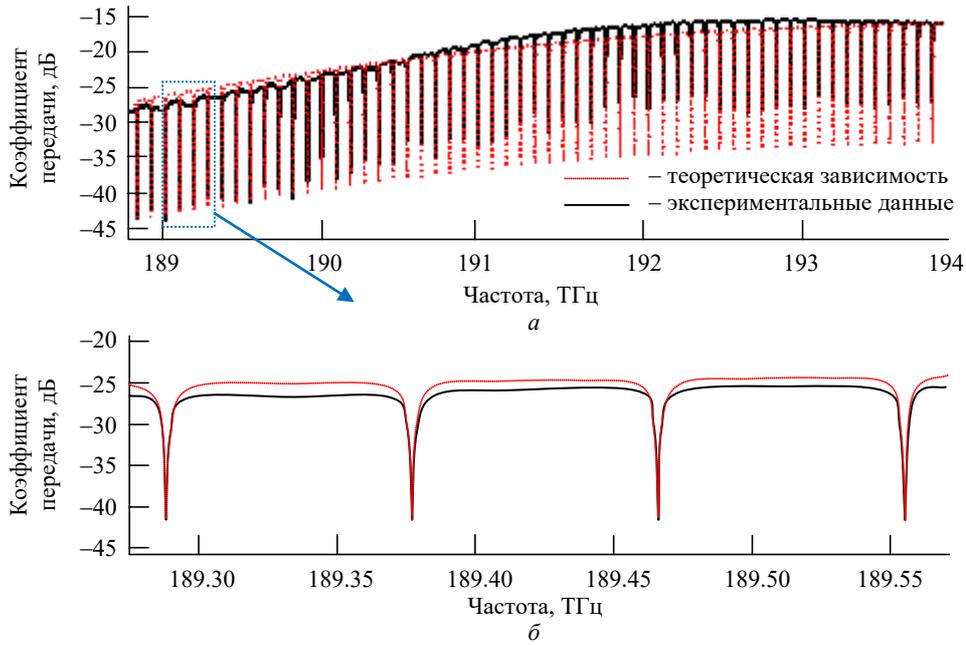


Рис. 5. Экспериментальная и теоретическая передаточные характеристики МКР в широком (а) и узком (б) диапазонах частот

Fig. 5. Experimental and theoretical transmission characteristics of the MRR in wide (a) and narrow (b) frequency bands

$$H_{\text{bragg}} = 0.025 \exp \left[-\frac{(f - 194)^2}{11} \right],$$

где f – частота сигнала, ТГц.

В этом случае передаточная характеристика МКР с учетом потерь на ввод и вывод излучения может быть описана следующим выражением:

$$H_p = H_{\text{ring}} H_{\text{bragg}}.$$

Здесь H_{ring} – коэффициент передачи МКР по мощности, который может быть найден с помощью метода парциальных волн [20] и имеет вид [21]

$$H_{\text{ring}} = \frac{(1 - \kappa) [1 + e^{-2\alpha l} - 2e^{-\alpha l} \cos(kl)]}{1 + (1 - \kappa)^2 e^{-2\alpha l} - 2(1 - \kappa) e^{-\alpha l} \cos(kl)},$$

где k – волновое число микроволновода. Для расчета коэффициента передачи МКР используем параметры $\alpha = 3.25$ дБ/см и $\kappa = 0.167$, по-

лученные методом оптической рефлектометрии. Результаты численного моделирования показаны на рис. 5, а красной пунктирной линией. В увеличенном масштабе видно, что результаты экспериментального исследования и численного моделирования совпадают с высокой степенью точности (рис. 5, б).

Заключение. Проведенное исследование показывает, что метод рефлектометрии обратного рассеяния позволяет определять оптические параметры интегральных МКР. Полученные при помощи рефлектометрии значения параметров $\alpha = 3.25$ дБ/см и $\kappa = 0.167$ были использованы для численного моделирования передаточных характеристик кремниевых МКР, которые с высокой точностью совпадали с результатами, полученными с помощью оптического векторного анализатора высокого разрешения.

Авторский вклад

Рябцев Илья Александрович – подготовка статьи; настройка ввода и вывода излучения в микрокольцевой резонатор.

Ершов Александр Александрович – подготовка статьи; измерение рефлектограмм микрокольцевого резонатора.

Ряйккенен Даниил Витальевич – подготовка программы для расчетов передаточных характеристик МКР; численное моделирование передаточных характеристик микрокольцевого резонатора.

Буровихин Антон Павлович – сопоставление экспериментальных данных с результатами численного моделирования, анализ экспериментальных результатов.

Гапончик Роман Валерьевич – анализ рефлектограмм, подготовка программ для определения параметров МКР.

Таценко Иван Юрьевич – сборка и подготовка измерительных стендов, настройка измерительного оборудования.

Сташкевич Андрей Александрович – анализ литературы по теме исследования, разработка методик проведения экспериментов, обсуждение результатов.

Никитин Андрей Александрович – измерение рефлектограмм и передаточных характеристик МКР; обсуждение результатов.

Устинов Алексей Борисович – постановка задачи; обсуждение результатов; руководство научными исследованиями; подготовка статьи.

Author's contribution

Ilya A. Ryabcev, preparation of the paper text; alignment of optical input and output fibers.

Alexander A. Ershov, preparation of the paper text; optical backscatter reflectometry of MRR.

Daniil V. Ryayknenen, development of a program for numerical simulation and modeling of the transmission characteristics of microring resonators.

Anton P. Burovikhin, comparison of experimental data with the results of numerical simulation; analysis of the experimental results.

Roman V. Haponchyk, analysis of the reflectograms; development of a program for numerical calculating the optical characteristic parameters of microring resonator.

Ivan Yu. Tatsenko, assembly and servicing of measuring setups.

Andrey A. Stashkevich, literature review; development of research methods; discussion of the results.

Andrey A. Nikitin, measuring of reflectograms and transfer characteristics; discussion of the results.

Alexey B. Ustinov, definition of research scopes; discussion of the results; management of the work; preparation of the paper text.

Список литературы

1. Silicon Nitride in Silicon Photonics / D. J. Blumenthal, R. Heideman, D. Geuzebroek, A. Leinse, C. Roeloffzen // Proc. IEEE. 2018. Vol. 106, № 12. P. 2209–2231. doi: 10.1109/JPROC.2018.2861576
2. Marpaung D., Yao J., Capmany J. Integrated microwave photonics // Nature Photon. 2019. Vol. 13, № 2. P. 80–90. doi: 10.1038/s41566-018-0310-5
3. Xu Q., Lipson M. All-optical logic based on silicon micro-ring resonators // Optics Express. 2007. Vol. 15, № 3. P. 924–929. doi: 10.1364/OE.15.000924
4. All-optical nonlinear switching in GaAs-AlGaAs microring resonators / V. Van, T. A. Ibrahim, K. Ritter, P. P. Absil, F. G. Johnson, R. Grover, J. Goldhar, P. T. Ho // IEEE Photonics Technology Letters. 2002. Vol. 14, № 1. P. 74–76. doi: 10.1109/68.974166
5. Naweed A. Photonic coherence effects from dual-waveguide coupled pair of co-resonant microring resonators // Optics Express. 2015. Vol. 23, № 10. P. 12573–12581. doi: 10.1364/OE.23.012573
6. Compact multi-million Q resonators and 100 MHz passband filter bank in a thick-SOI photonics platform / B. Zhang, K. Al Qubaisi, M. Cherchi, M. Harjanne, Y. Ehrlichman, A. N. Khilo, M. A. Popović // Optics Letters. 2020. Vol. 45, № 11. P. 3005–3008. doi: 10.1364/OL.395203
7. A continuously tunable sub-gigahertz microwave photonic bandpass filter based on an ultra-high-Q silicon microring resonator / H. Qiu, F. Zhou, J. Qie, Y. Yao, X. Hu, Y. Zhang, X. Xiao, Y. Yu, J. Dong, X. Zhang // J. of Lightwave Technology. 2018. Vol. 36, № 19. P. 4312–4318. doi: 10.1109/JLT.2018.2822829
8. Label-free technologies for quantitative multiparameter biological analysis / A. J. Qavi, A. L. Washburn, J. Y. Byeon, R. C. Bailey // Analytical and bioanalytical chemistry. 2009. Vol. 394, № 1. P. 121–135. doi: 10.1007/s00216-009-2637-8
9. Electro-optic modulation in integrated photonics / G. Sinatkas, T. Christopoulos, O. Tsilipakos, E. E. Kriezis // J. of Applied Physics. 2021. Vol. 130, № 1. P. 010901. doi: 10.1063/5.0048712
10. Silicon microring modulator for 40 Gb/s NRZ-OOK metro networks in O-band / Z. Xuan, Y. Ma, Y. Liu, R. Ding, Y. Li, N. Ophir, A. Eu-Jin Lim, G.-Q. Lo, P. Magill, K. Bergman, T. Baehr-Jones, M. Hochberg // Optics Express. 2014. Vol. 22, № 23. P. 28284–28291. doi: 10.1364/OE.22.028284
11. Ultrafast nonlinear all-optical processes in silicon-on-insulator waveguides / R. Dekker, N. Usechak, M. Först, A. Driessen // J. of physics D: Applied physics. 2007. Vol. 40, № 14. P. R249. doi: 10.1088/0022-3727/40/14/R01
12. Optical bistable SOI micro-ring resonators for memory applications / 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 // Optics Communications. 2022. Vol. 511. P. 127929. doi: 10.1016/j.optcom.2022.127929
13. Carrier-induced optical bistability in the silicon

micro-ring resonators under continuous wave pumping / 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 // Optics Communications. 2021. Vol. 480. P. 126456. doi: 10.1016/j.optcom.2020.126456

14. Optical multistability in a cross-coupled double-ring resonator system / S. Zhuang, J. Feng, H. Liu, S. Yuan, Y. Chen, H. Zeng // Optics Communications. 2022. Vol. 507. P. 127637. doi: 10.1016/j.optcom.2021.127637

15. Ultrahigh Q SOI ring resonator with a strip waveguide / B. Mou, Y. Boxia, Q. Yan, W. Yanwei, H. Zhe, Y. Fan, W. Yu // Optics Communications. 2022. Vol. 505. P. 127437. doi: 10.1016/j.optcom.2021.127437

16. Gottesman Y., Rao E. V. K., Rabus D. G. New Methodology to Evaluate the Performance of Ring Resonators Using Optical Low-Coherence Reflectometry // J. of Lightwave Technology. 2004. Vol. 22, № 6. P. 1566–1572. doi: 10.1109/JLT.2004.829216

17. An alternative methodology based on spectral analysis for a direct access to ring resonator parameters /

Y. Gottesman, D. G. Rabus, E. V. K. Rao, B. E. Benkelfat // IEEE Photonics Technology Letters. 2009. Vol. 21, № 19. P. 1399–1401. doi: 10.1109/LPT.2009.2025603

18. Compact and Highly Efficient Grating Couplers Between Optical Fiber and Nanophotonic Waveguides / F. Van Laere, G. Roelkens, M. Ayre, J. Schrauwen, D. Taillaert, D. Van Thourhout, F. Thomas Krauss, R. Baets // J. of Lightwave Technology. 2007. Vol. 25, № 1. P. 151–156.

19. Taillaert D., Bienstman P., Baets R. Compact efficient broadband grating coupler for silicon-on-insulator waveguides // Optics Letters. 2004. Vol. 29, № 23. P. 2749–2757. doi: 10.1364/OL.29.002749

20. Nonlinear frequency response of the multi-resonant ring cavities / A. A. Nikitin, V. V. Vitko, M. A. Cherkasskii, A. B. Ustinov, B. A. Kalinikos // Results in Physics. 2020. Vol. 18. P. 103279. doi: 10.1016/j.rinp.2020.103279

21. Gerhard D. Integrated ring resonators: a Compendium. Germany: Springer, 2021. 490 p.

Информация об авторах

Рябцев Илья Александрович – аспирант кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 10 научных публикаций. Сфера научных интересов – радиофотоника; нелинейная динамика; бистабильность.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: ryabcev.ilya@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8158-8827>

Ершов Александр Александрович – аспирант кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 8 научных публикаций. Сфера научных интересов – радиофотоника; интегральная оптика.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: aaershov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3600-4946>

Ряйккенен Даниил Витальевич – студент 1-го курса магистратуры Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 4 научных публикаций. Сфера научных интересов – радиофотоника; нелинейная динамика; бистабильность.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: dvryaykkenen@stud.etu.ru

Буровихин Антон Павлович – аспирант кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 17 научных публикаций. Сфера научных интересов – сегнетоэлектрики; мультиферроики; пироэлектричество; электрокалорика.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: antonburovihhin@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5147-0630>

Гапончик Роман Валерьевич – аспирант кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 10 научных публикаций. Сфера научных интересов – магноника; радиофотоника; нелинейные волновые процессы.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: ferumno33@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-8764-7100>

Ташенко Иван Юрьевич – аспирант кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 10 научных публикаций. Сфера научных интересов – радиофотоника; оптоэлектронные генераторы СВЧ.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: abitur.tatsenko@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6320-9352>

Сташкевич Андрей Александрович – доктор физико-математических наук (1994), заслуженный профессор (2020) Галилеевского института Университета Сорбонна Париж Север, Лаборатория физико-химических свойств материалов LSPM CNRS. Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – спинтроника; магноника; мандельштам-бриллюэновская спектроскопия; радиофотоника.

Адрес: Лаборатория физико-химических свойств материалов LSPM CNRS, авеню Ж. Б. Клемана, д. 99, Витальнез, 93430, Франция

E-mail: stachkevitch@univ-paris13.fr

Никитин Андрей Александрович – кандидат физико-математических наук (2011), доцент (2015) кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 50 научных публикаций. Сфера научных интересов – нелинейные волновые процессы; радиофотоника; спин-волновая электроника.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: aanikitin@etu.com

<https://orcid.org/0000-0002-4226-4341>

Устинов Алексей Борисович – доктор физико-математических наук (2012), доцент (2010) кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 200 научных публикаций. Сфера научных интересов – линейные и нелинейные колебания и волны в магнитных пленках и слоистых структурах; СВЧ-электроника; радиофотоника.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: Ustinov_rus@yahoo.com

<https://orcid.org/0000-0002-7382-9210>

References

1. Blumenthal D. J., Heideman R., Geuzebroek D., Leinse A., Roeloffzen C. Silicon Nitride in Silicon Photonics. *Proc. IEEE*. 2018, vol. 106, no. 12, pp. 2209–2231. doi: 10.1109/JPROC.2018.2861576
2. Marpaung D., Yao J., Capmany J. Integrated Microwave Photonics. *Nature Photon*. 2019, vol. 13, no. 2, pp. 80–90. doi: 10.1038/s41566-018-0310-5
3. Xu Q., Lipson M. All-Optical Logic Based on Silicon Micro-Ring Resonators. *Optics Express*. 2007, vol. 15, no. 3, pp. 924–929. doi: 10.1364/OE.15.000924
4. Van V., Ibrahim T. A., Ritter K., Absil P. P., Johnson F. G., Grover R., Goldhar J., Ho P. T. All-Optical Nonlinear Switching in GaAs-AlGaAs Microring Resonators. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2002, vol. 14, no. 1, pp. 74–76. doi: 10.1109/68.974166
5. Naweed A. Photonic Coherence Effects from Dual-Waveguide Coupled Pair of Co-Resonant Microring Resonators. *Optics Express*. 2015, vol. 23, no. 10, pp. 12573–12581. doi: 10.1364/OE.23.012573
6. Zhang B., Al Qubaisi K., Cherchi M., Harjanje M., Ehrlichman Y., Khilo A. N., Popović M. A. Compact Multi-Million Q Resonators and 100 MHz Passband Filter Bank in a Thick-SOI Photonics Platform. *Optics Letters*. 2020, vol. 45, no. 11, pp. 3005–3008. doi: 10.1364/OL.395203
7. Qiu H., Zhou F., Qie J., Yao Y., Hu X., Zhang Y., Xiao X., Yu Y., Dong J., Zhang X. A Continuously Tunable Sub-Gigahertz Microwave Photonic Bandpass Filter Based on an Ultra-High-Q Silicon Microring Resonator. *J. of Lightwave Technology*. 2018, vol. 36, no. 19, pp. 4312–4318. doi: 10.1109/JLT.2018.2822829
8. Qavi A. J., Washburn A. L., Byeon J. Y., Bailey R. C. Label-Free Technologies for Quantitative Multiparameter Biological Analysis. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2009, vol. 394, no. 1, pp. 121–135. doi: 10.1007/s00216-009-2637-8
9. Sinatkas G., Christopoulos T., Tsilipakos O., Kriezis E. E. Electro-Optic Modulation in Integrated Photonics. *J. of Applied Physics*. 2021, vol. 130, no. 1, p. 010901. doi: 10.1063/5.0048712
10. Xuan Z., Ma Y., Liu Y., Ding R., Li Y., Ophir N., Eu-Jin Lim A., Lo G.-Q., Magill P., Bergman K., Baehr-Jones T., Hochberg M. Silicon Microring Modulator for 40 Gb/s NRZ-OOK Metro Networks in O-Band. *Optics Express*. 2014, vol. 22, no. 23, pp. 28284–28291. doi: 10.1364/OE.22.028284
11. Dekker R., Usechak N., Först M., Driessen A. Ultrafast Nonlinear All-Optical Processes in Silicon-on-Insulator Waveguides. *J. of Physics D: Applied Physics*. 2007, vol. 40, no. 14, p. R249. doi: 10.1088/0022-3727/40/14/R01
12. Nikitin A. A., Ryabcev I. A., Nikitin A. A., Kondrashov A. V., Semenov A. A., Konkin D. A., Kokolov A. A., Sheyerman F. I., Babak L. I., Ustinov A. B. Optical Bistable SOI Micro-Ring Resonators for

Исследование оптических свойств микрокольцевых резонаторов, изготовленных по технологии кремний на изоляторе, методом оптической рефлектометрии обратного рассеяния
Investigation of the Optical Properties of Silicon-on-Insulator Microring Resonators Using Optical Backscatter Reflectometry

Memory Applications. Optics Communications. 2022, vol. 511, p. 127929. doi: 10.1016/j.optcom.2022.127929

13. Nikitin A. A., Kondrashov A. V., Vitko V. V., Ryabcev I. A., Zaretskaya G. A., Cheplagin N. A., Konkina D. A., Kokolov A. A., Babak L. I., Ustinov A. B., Kalinikos B. A. Carrier-Induced Optical Bistability in the Silicon Micro-Ring Resonators under Continuous Wave Pumping. Optics Communications. 2021, vol. 480, p. 126456. doi: 10.1016/j.optcom.2020.126456

14. Zhuang S., Feng J., Liu H., Yuan S., Chen Y., Zeng H. Optical Multistability in a Cross-Coupled Double-Ring Resonator System. Optics Communications. 2022, vol. 507, p. 127637. doi: 10.1016/j.optcom.2021.127637

15. Mou B., Boxia Y., Yan Q., Yanwei W., Zhe H., Fan Y., Yu W. Ultrahigh Q SOI Ring Resonator with a Strip Waveguide. Optics Communications. 2022, vol. 505, p. 127437. doi: 10.1016/j.optcom.2021.127437

16. Gottesman Y., Rao E. V. K., Rabus D. G. New Methodology to Evaluate the Performance of Ring Resonators Using Optical Low-Coherence Reflectometry. J. of Lightwave Technology. 2004, vol. 22, no. 6, pp. 1566–1572. doi: 10.1109/JLT.2004.829216

17. Gottesman Y., Rabus D. G., Rao E. V. K., Benkelfat B. E. An Alternative Methodology Based on Spectral Analysis for a Direct Access to Ring Resonator Parameters. IEEE Photonics Technology Letters. 2009, vol. 21, no. 19, pp. 1399–1401. doi: 10.1109/LPT.2009.2025603

18. Van Laere F., Roelkens G., Ayre M., Schrauwen J., Taillaert, D., Van Thourhout D., Thomas Krauss F., Baets R. Compact and Highly Efficient Grating Couplers Between Optical Fiber and Nanophotonic Waveguides. J. of Lightwave Technology. 2007, vol. 25, no. 1, pp. 151–156.

19. Taillaert D., Bienstman P., Baets R. Compact Efficient Broadband Grating Coupler for Silicon-on-Insulator Waveguides. Optics Letters. 2004, vol. 29, no. 23, pp. 2749–2757. doi: 10.1364/OL.29.002749

20. Nikitin A. A., Vitko V. V., Cherkasskii M. A., Ustinov A. B., Kalinikos B. A. Nonlinear Frequency Response of the Multi-Resonant Ring Cavities. Results in Physics. 2020, vol. 18, p. 103279. doi: 10.1016/j.rinp.2020.103279

21. Gerhard D. Integrated Ring Resonators: a Compendium. Germany, Springer, 2021, 490 p.

Information about the authors

Ilya A. Ryabcev, Postgraduate Student of the Department of Physical Electronics and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 10 scientific publications. Area of expertise: microwave photonics; nonlinear dynamics; bistability.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: ryabcev.ilya@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8158-8827>

Alexander A. Ershov, Postgraduate Student of the Department of Physical Electronics and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 8 scientific publications. Area of expertise: microwave photonics; integrated optics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: aaershov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3600-4946>

Daniil R. Ryayknenen, 1st year Master Degree Student of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 4 scientific publications. Area of expertise: microwave photonics; nonlinear dynamics; bistability.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: dvrayknenen@stud.etu.ru

Anton P. Burovikhin, Postgraduate Student of the Department of Physical Electronics and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 17 scientific publications. Area of expertise: multiferroics; pyroelectric current; electrocaloris.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: antonburovihin@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5147-0630>

Roman V. Haponchik, Postgraduate Student of the Department of Physical Electronics and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 10 scientific publications. Area of expertise: microwave photonics; nonlinear dynamics; spin waves.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: ferumno33@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-8764-7100>

Ivan Yu. Tatsenko, Postgraduate Student of the Department of Physical Electronics and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 10 scientific publications. Area of expertise: microwave photonics; optoelectronic oscillators.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: abitur.tatsenko@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6320-9352>

Andrey A. Stashkevich, Dr Sci. (Eng.) (1994), Emeritus Professor (2020) of Institute Galilee, Université Sorbonne Paris Nord, Laboratoire des Sciences des Procédés et des Matériaux (LSPM CNRS). The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: spintronics; magnonics; Brillouin spectroscopy; radiophotonics. Address: Université Sorbonne Paris Nord, 99, J. B. Clement ave., Villetaneuse 93430, France
E-mail: stachkevitch@univ-paris13.fr

Andrey A. Nikitin, Can. Sci. (Phys.-Math.) (2011), Docent (2015), Associate Professor of the Department of Physical Electronics and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: nonlinear dynamics; microwave photonics; spin wave electronics. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: aanikitin@etu.com
<https://orcid.org/0000-0002-4226-4341>

Alexey B. Ustinov, Dr Sci. (Phys.-Math.) (2012), Docent (2010), Associate Professor of the Department of Physical Electronics and Technologies of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 200 scientific publications. Area of expertise: linear and non-linear properties of magnetic oscillations and waves in ferro-magnetic films and layered structures on their basis; microwave devices; microwave photonics. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: Ustinov_rus@yahoo.com
<https://orcid.org/0000-0002-7382-9210>
