10

Разработка технологии создания фотонных интегральных схем с кольцевыми микрорезонаторами на основе структур $Si/SiO_2/Si_3N_4$

© А.И. Абанин[1,2,3], Р.М. Рязанов[1], А.Д. Голиков[4,5], В.В. Ковалюк[4,6], И.О. Венедиктов[4,6], П.П. Ан[4,5], Д.А. Шимловская[7], Е.П. Кицюк[1], С.С. Косолобов[7], П.И. Лазаренко[3], Г.Н. Гольцман[6,8], В.В. Светухин[1]

[1] Научно-производственный комплекс „Технологический центр“, Москва, Россия
[2] Ульяновский государственный университет, Ульяновск, Россия
[3] Национальный исследовательский университет „МИЭТ“, Москва, Россия
[4] Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия
[5] Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия
[6] Высшая школа экономики, Москва, Россия
[7] Сколковский Институт науки и технологий, Москва, Россия
[8] Российский квантовый центр, Москва, Россия

e-mail: aai-2000@mail.ru

Поступила в редакцию 06.06.2025 г.
В окончательной редакции 09.09.2025 г.
Принята к публикации 10.09.2025 г.

Развитие современных систем обработки информации ограничивается быстродействием электронных схем. Реализация высокоскоростной обработки информации следующего поколения становится крайне сложной задачей при использовании традиционной электронной компонентной базы. Одним из вариантов решения данной проблемы является переход к созданию систем на основе фотонных интегральных схем. В работе представлены результаты изготовления высокодобротных кольцевых микрорезонаторов из нитрида кремния. Для изготовления оптических устройств использовались структуры $Si/SiO_2/Si_3N_4$, сформированные с применением производственного оборудования НПК „Технологический центр“. Исследованы зависимости оптических параметров структур от технологических режимов формирования нитрида кремния и применения дополнительного высокотемпературного отжига. Продемонстрированы образцы кольцевых резонаторов с добротностью $> 10^5$ при радиусе кольца $\approx 64\,\mu$m.

Ключевые слова: нитрид кремния, кольцевой микрорезонатор, LPCVD, добротность.

DOI: 10.61011/OS.2025.09.61763.8228-25

Введение

Фотонные интегральные схемы (ФИС) являются неотъемлемыми компонентами современных фотонных и радиофотонных устройств. Применение ФИС позволяет отказаться от использования дискретных оптических компонентов, обеспечивая миниатюризацию, повышение надежности и снижение стоимости разрабатываемых систем [1–4], что наряду с возможностью их изготовления на существующих производствах микроэлектроники обусловило активное развитие данного направления в последние десятилетия.

Материал интегральной платформы, из которой создаются ФИС, имеет существенное влияние на функционал и массогабаритные характеристики устройств. В настоящий момент наиболее широко применяются такие платформы, как InP [5,6], Si_3N_4 [7–14] и кремний на изоляторе (КНИ) [15–20]. Однако выбор материала для производства ФИС, как правило, всегда представляет собой компромисс. Так, несмотря на то что нитрид кремния обладает значительно меньшим термооптическим коэффициентом и более низким показателем преломления по сравнению с платформой КНИ, что существенно ограничивает реализацию высокоскоростных приложений и осложняет гибридную стыковку, волноводы на его основе демонстрируют меньшие оптические потери на распространение и более высокий порог нелинейности, что позволяет, например, применять ФИС из нитрида кремния для создания перестраиваемых и узкополосных лазеров.

Однако, несмотря на большое число научных работ по данному направлению, существует проблема отсутствия отработанной производственной технологии формирования структур $Si/SiO_2/Si_3N_4$, подходящих для производства ФИС. Проблема заключается в том, что в связи с большой длиной даже отдельных элементов ФИС (десятки и сотни длин волн) исследование потерь в материале стандартным методом эллипсометрии или рефрактометрии, при котором взаимодействие излучения с пленкой происходит под малым углом, не позволяет оптимизировать процессы формирования пленок. Поэтому в рамках работы, помимо исследования материалов, проведено исследование изготовленных оптических структур и определение влияния технологических режимов на их параметры.

В настоящей работе представлены результаты отработки технологических процессов формирования структур $Si/SiO_2/Si_3N_4$ и последующего создания на их основе

интегральных микрорезонаторов для измерения оптических потерь в нитриде кремния.

Отработка режимов формирования слоев SiO_2 и Si_3N_4

Отработка процессов формирования слоев SiO_2 и Si_3N_4 осуществлялась на производстве НПК „Технологический центр“ на кремниевых пластинах марки КЭФ 4,5 (100) диаметром 100 mm. Перед технологическими операциями пластины проходили процесс отмывки в растворах КАРО (H_2SO_5) ПАР (перекисно-аммиачный раствор).

Для формирования слоя SiO_2 был выбран метод термического окисления кремниевых пластин в парах воды под давлением на установке „Термоком-М“. В ходе проведенных исследований было установлено, что термическое окисление Si при 1000 °C и 10 at обеспечивает получение равномерных и высокочистых слоев SiO_2 с наименьшей шероховатостью поверхности и подходящим для ФИС показателем преломления.

После окисления кремния пластины исследовались оптическим профилометром „FRT MicroProf 100“ для определения среднего значения напряженности пластины по восьми осям. Результаты исследования деформации на оптическом профилометре продемонстрировали отсутствие сильных искажений плоскостности кремниевой пластины после формирования толстых слоев SiO_2. К примеру, значения отклонения от плоскостности для пластин диаметром 100 mm до и после формирования слоя SiO_2 с толщиной 2.7 μm составили 5 и 6 μm соответственно. Данный результат был достигнут за счет использования кремниевых пластин с двусторонней полировкой, что обеспечило симметричное формирование оксида на лицевой и тыльной сторонах.

Следующим технологическим этапом являлось формирование слоя нитрида кремния заданной толщины. Формирование производилось методом химического осаждения из газовой фазы при пониженном давлении (LPCVD) на установке HCVD-55. Процесс проводился в газовой смеси дихлорсилана (SiH_2Cl_2) с аммиаком (NH_3). В рамках отработки технологического маршрута изготовления ФИС были опробованы различные температурные режимы осаждения (350 и 750 °C), позволившие сформировать на образцах аморфные слои Si_3N_4 с толщиной 450 nm. Помимо влияния температурного режима осаждения Si_3N_4 исследовалось влияние отжига: для ряда пластин проводился отжиг в термодиффузионной печи в N_2 при температуре 1200 °C для удаления водорода.

Исследование толщины и оптических параметров структур $Si/SiO_2/Si_3N_4$, сформированных в ходе работы, проводилось с применением метода эллипсометрии на установке „SENDURO“ производства „SENTECH“. Данным методом определялись значения показателя преломления для слоев Si_3N_4 и SiO_2. Результат эллипсометрии подтвердил, что в ходе работы удалось получить хорошую воспроизводимость для толщин и показателей преломления формируемых слоев. Результаты расчета показали, что показатель преломления и толщина сформированного слоя SiO_2 равняются 1.47 и $2.7 \pm 0.3\,\mu$m соответственно, в то время как для Si_3N_4 — 2.05 и 450 ± 10 nm.

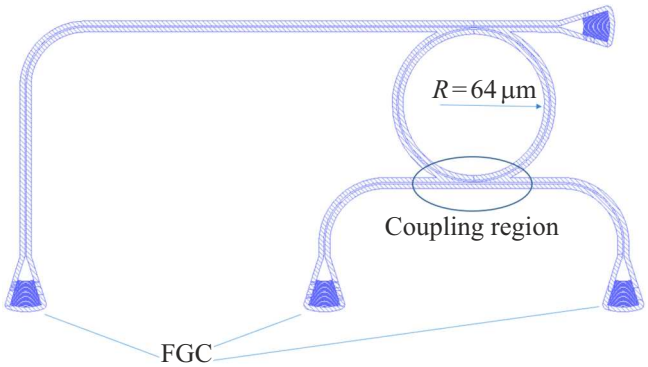

Рис. 1. Разработанный электронно-литографический шаблон для изготовления интегрально-оптических устройств. R — радиус кольца, FGC — фокусирующий решеточный элемент связи, Coupling region — область оптической связи.

Изготовление кольцевых микрорезонаторов

В рамках работы была разработана конструкция, состоявшая из кольцевого резонатора, волноводов и элементов ввода-вывода излучения. Шаблоны для формирования топологии элементов проектировались в среде программирования Python, позволяющей создавать как одиночные элементы, так и матрицу устройств с различными параметрами. На рис. 1 представлено изображение спроектированного шаблона для электронно-лучевого литографа.

На всех образцах кристаллов изготавливались идентичные ряды кольцевых микрорезонаторов с радиусом кольца 64 μm и различной шириной зазора (w_g) между волноводом и кольцом в области связи. Величина зазора варьировала в диапазоне от 0.4 до 1 μm. В качестве элементов ввода использовались дифракционные решетки (FGC на рис. 1). Изготовление структур осуществлялось методом электронно-лучевой литографии с последующим плазмохимическим травлением нитрида кремния в смеси газов Ar и CHF_3 на установке „CORIAL-200R“ (производитель „Plasma-Therm“).

Профиль волноводов представлял собой гребенчатый волновод, протравленный на половину высоты слоя нитрида кремния. Контроль геометрических параметров проводился методами оптической, растровой электронной и атомно-силовой микроскопии. Для проведения сравнительного анализа волноводные элементы с кольцевыми микрорезонаторами были изготовлены как

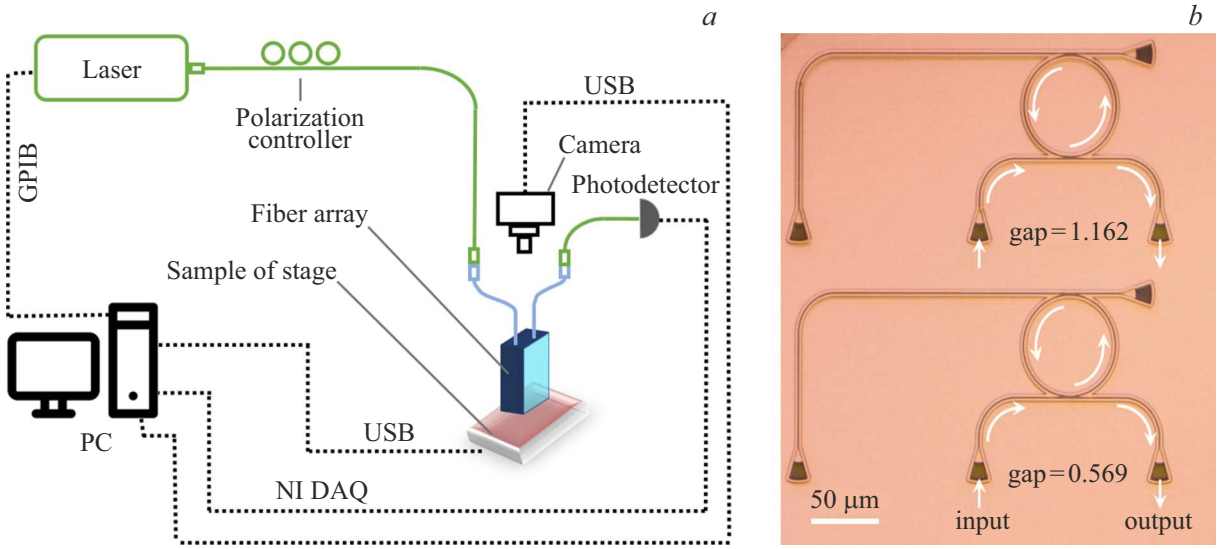

Рис. 2. Схема измерительного стенда (*a*) и изображение сформированных элементов, полученное в оптическом микроскопе (*b*).

на подложках, полученных в НПК „Технологический центр“, так и на образцах подложек $Si/SiO_2/Si_3N_4$ коммерческого производства с аналогичными толщинами слоев.

Методика исследования спектральных характеристик оптических структур резонаторов

Оптические характеристики кольцевых резонаторов рассчитывались из их спектров пропускания, полученных в диапазоне длин волн от 1480 до 1640 nm с использованием экспериментальной установки, представленной на рис. 2, *a*. Свет от узкополосного перестраиваемого лазерного источника („TSL-710“, Santec) через контроллер поляризации („FPC030“, Thorlabs) и массив оптических волокон („SQS Vláknova, 12ch“) направлялся на вход изготовленного нами кольцевого резонатора, расположенного на подвижном столике. Перемещение между элементами вариационной матрицы кольцевых микрорезонаторов осуществлялось при помощи пьезопозиционера („New Focus 8303“), управляемого драйвером, и контролировалось визуально посредством видеокамеры („CMOS CS135MUN“, Thorlabs). Мощность излучения на выходе кольцевого резонатора измерялась фотодетектором („G-9801“, Hamamatsu), что в совокупности с перестройкой длины волны лазерного источника позволило измерить спектральную характеристику образцов.

Полученные спектральные зависимости позволяют определить величину свободного спектрального диапазона (Free Spectral Range, FSR) как расстояние между соседними резонансами (рис. 3, *a*).

Дальнейшее определение параметров изготовленных элементов проводилось по результатам аппроксимации полученных спектральных зависимостей. Резонансные

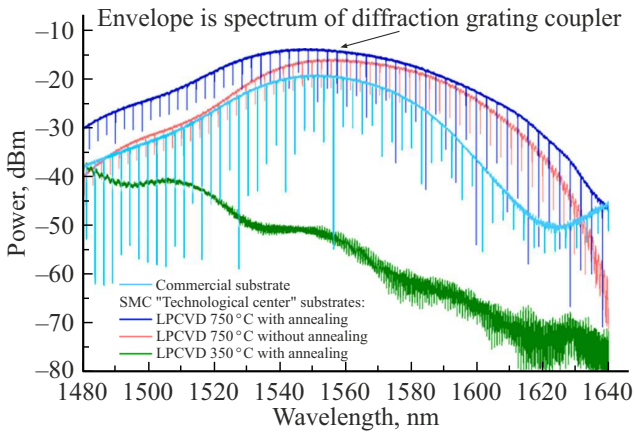

Рис. 3. Сравнение спектральных характеристик кольцевых резонаторов, изготовленных на различных подложках.

пики аппроксимировались функцией Лоренца (рис. 4, *b*), что было использовано для оценки значений нагруженной добротности кольцевого резонатора (Q_{load}), рассчитанной следующим образом:

$$Q_{\text{load}} = \frac{\lambda_0}{FWHM}, \tag{1}$$

где λ_0 — резонансная длина волны, $FWHM$ — (англ. Full width at half maximum) полная ширина на уровне половины высоты.

Добротность Q_{load}, в свою очередь, позволяет определить значение собственной добротности кольцевого резонатора (Q_{int}) с применением формулы [21]

$$Q_{\text{int}} = \frac{2Q_{\text{load}}}{1 + \sqrt{T_0}}, \tag{2}$$

где T_0 — часть оптической мощности, выходящей из кольцевого резонатора на резонансной длине волны λ_0.

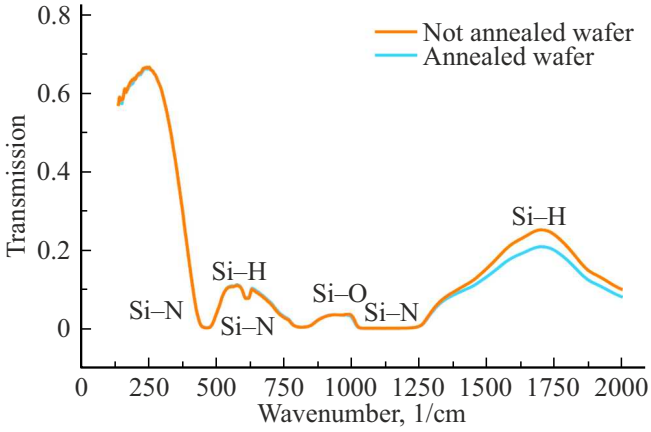

Рис. 4. ИК фурье-спектры структур до и после отжига.

Методы уменьшения потерь в микрокольцевых резонаторах

Способ уменьшения потерь	Достигаемая добротность
Делокализация оптической моды	$8 \cdot 10^7$[23]
	$2.6 \cdot 10^8$ [24]
Уменьшение шероховатости поверхности	$3.7 \cdot 10^7$ [25]
Многоэтапный отжиг волноводов	$8.5 \cdot 10^6$ [26]
Дамасский процесс с отжигом (reflow) SiO_2	$5 \cdot 10^6$ [27]
Оптимизация геометрии микрокольцевого резонатора	$3.2 \cdot 10^7$ [28]
Гибридная схема	$2 \cdot 10^7$[29]
Оптимизация технологии изготовления	$1.1 \cdot 10^7$ [30]
Устранение трещин пленки Si_3N_4 из-за внутренних напряжений	$1.5 \cdot 10^6$ (TM-мода) [31]
Оптимизация геометрии микрорезонатора	$4.57 \cdot 10^7$ [32]

Значение собственной добротности и известных характеристик материала позволяет рассчитать величину оптических потерь α (рис. 4, c) в кольцевом резонаторе:

$$\alpha = \frac{2\pi n_g}{Q_{\text{int}}\lambda_0}, \tag{3}$$

где n_g — групповой показатель преломления.

Обсуждение полученных результатов

В результате исследования спектральных характеристик (рис. 3) и определения параметров кольцевых резонаторов установлено, что низкотемпературное осаждение Si_3N_4 методом LPCVD, выполненное при температуре 350 °C, не позволило получить слои с подходящими для изготовления волноводных элементов оптическими свойствами. Наилучшие результаты в настоящей работе были получены для структур с микрокольцевыми резонаторами, изготовленными на высокотемпературном (750 °C) Si_3N_4.

На следующем этапе были исследованы образцы подложек с высокотемпературным аморфным Si_3N_4, прошедших дополнительный отжиг при 1200 °C в атмосфере N_2. Отжиг выполнялся для удаления остаточного водорода из пленок Si_3N_4 путем разрыва связей N-H. Для оценки влияния отжига на характеристики слоев были проведены исследования методом ИК фурье-спектроскопии на приборе „Bruker VERTEX 70v“ (рис. 4), подтвердившие уменьшение содержания H_2 в аморфном слое Si_3N_4. Также зафиксировано различие в форме спектров, полученных для неотожженной и отожженной пластин, что может быть объяснено снижением содержания водорода в слое нитрида кремния и коррелирует с результатами других опубликованных работ [22,23].

Проведенный анализ результатов измерения спектров пропускания изготовленных волноводных структур позволил установить, что применение отжига в атмосфере азота положительно сказывается на параметрах формируемых структур, в частности на величине оптических потерь (рис. 5, c) и эффективности ввода излучения через дифракционную решетку (рис. 3). Установлено, что применение отжига не влияет на параметр FSR изготовленных структур. Для всех исследуемых образцов FSR составил 2.9 nm.

Проведенное сравнение характеристик микрорезонаторов, изготовленных на сформированных в НПК „Технологический центр“ подложках и на коммерческой подложке зарубежного производства с одинаковыми геометрическими параметрами, показало, что в результате эксперимента были получены структуры с сопоставимыми параметрами, в том числе по величине оптических потерь (рис. 5, c), но при этом удалось обеспечить лучшую эффективность ввода для структур на основе подложек производства НПК „Технологический центр“, что подтверждается положением огибающей спектров, представленных на рис. 3.

Стоит отметить, что в настоящей работе не было достигнуто рекордных значений добротности кольцевых резонаторов (согласно расчетам по формулам (1) и (2), максимальные значения составили $Q_{\text{int}} = 3 \cdot 10^5$) по сравнению с результатами, опубликованными ранее в работах [24–33]. Тем не менее разработанная технология формирования слоев SiO_2 и Si_3N_4 на поверхности 100 mm кремниевых монокристаллических подложек позволяет воспроизводимо реализовывать высокодобротные резонаторы в условиях производства. В таблице представлены подходы, которые используются в работах для улучшения параметров кольцевых резонаторов, в том числе для повышения значений добротности. В случае разработанной технологии дальнейшее улучшение параметров изготавливаемых элементов может быть достигнуто за счет оптимизации процессов травления и геометрии создаваемых элементов.

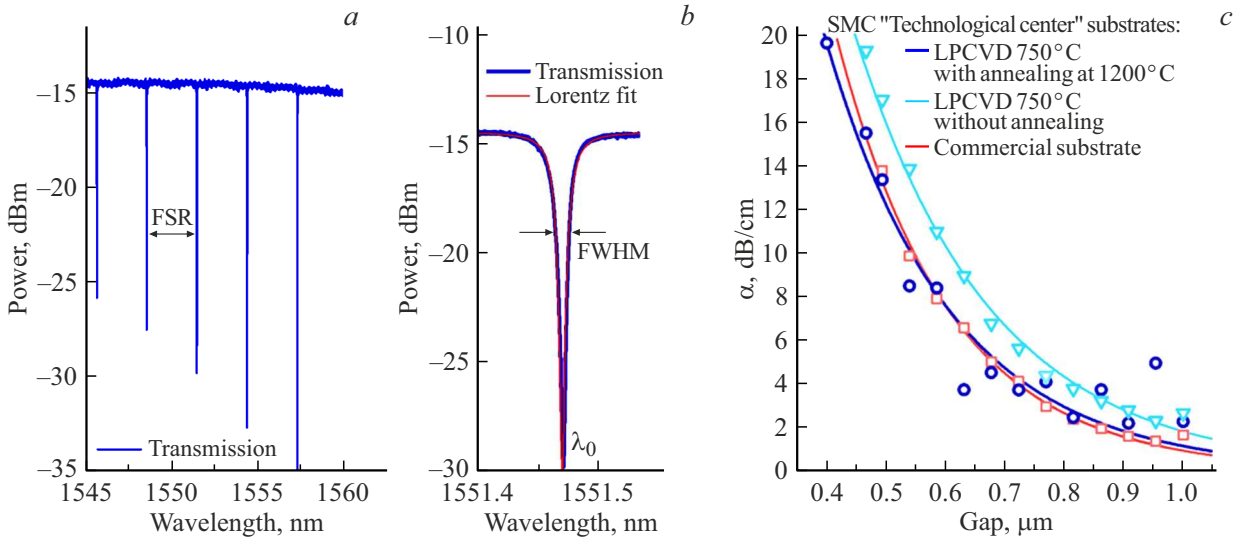

Рис. 5. Спектральная характеристика кольцевого резонатора (*a*), одиночный резонанс с добротностью $Q_{\text{int}} \approx 3 \cdot 10^5$ и его аппроксимация (*b*), сравнение величин оптических потерь для образцов, изготовленных с применением различных подложек (*c*).

Заключение

Таким образом, оптимальные результаты были получены при использовании высокотемпературного осаждения аморфного слоя Si_3N_4 методом LPCVD и проведении последующего отжига. На подложках, изготовленных по данной технологии, были сформированы образцы микрокольцевых резонаторов с добротностями $Q_{\text{int}} \approx 3 \cdot 10^5$ и $FSR \approx 2.9$ nm.

В настоящей работе представлен ряд основных технологических операций последовательного формирования на поверхности 100 mm кремниевых монокристаллических подложек слоев SiO_2 и Si_3N_4 с толщинами 2.7 и 0.45 μm соответственно. С применением сформированных слоев были изготовлены ФИС с тонкопленочными волноводами, элементами ввода-вывода излучения и кольцевыми микрорезонаторами высокой добротности.

Проведенные исследования спектров пропускания изготовленных элементов позволили экспериментально установить зависимости параметров изготовленных кольцевых резонаторов от технологических режимов формирования структур и геометрии кольцевого резонатора. Микрокольцевые резонаторы, изготовленные с применением оптимальных технологических режимов формирования слоев SiO_2 и Si_3N_4, демонстрируют добротность более 10^5. Следует отметить, что элементы, изготовленные в рамках настоящей работы на подложках производства НПК „Технологический центр“, практически не уступают аналогам, изготовленным с применением коммерческих подложек зарубежного производства. Дальнейшее улучшение параметров изготавливаемых элементов, в том числе снижение оптических потерь, может быть достигнуто за счет оптимизации процессов травления и геометрии создаваемых элементов.

Финансирование работы

Отработка технологии, формирование функциональных слоев и изготовление кольцевых резонаторов выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 23-91-06308 (https://rscf.ru/project/23-91-06308/). Моделирование и проектирование фотонных структур выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (FNRM-2025-0014).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] J. Capmany et al. Nat. Phot., **1** (6), 319 (2007). DOI: 10.1038/nphoton.2007.89
[2] Y. Jiao. Master Thesis Work (Polytechnic University of Catalonia (UPC), B., (2015). URL: https://upcommons.upc.edu/entities/publication/37edf1c3-5098-4550-b081-07785d69cf98
[3] R.C. Williamson, R.D. Esman. J. Lightw. Technol., **26** (9), 1145 (2008). DOI: 10.1109/JLT.2008.923627
[4] J.P. Yao. J. Lightw. Technol., **27** (3), 314 (2009). DOI: 10.1109/JLT.2008.2009551
[5] K.A. Williams, E.A.J.M. Bente, D. Heiss, Y. Jiao, K. Ławniczuk, X.J.M. Leijtens, J.J.G.M. van der Tol, M.K. Smit. Photon. Res., **3** (5), B60 (2015). DOI: 10.1364/PRJ.3.000B60
[6] M. Smit et al. Semiconductor Science and Technol., **29** (083001), 1 (2014). DOI: 10.1088/0268-1242/29/8/08300
[7] J. Liu, A.S. Raja, M. Karpov, B. Ghadiani, M.H.P. Pfeiffer, B. Du, N.J. Engelsen, H. Guo, M. Zervas, T.J. Kippenberg. Opt., **5** (10), 1347 (2018). DOI: 10.1364/OPTICA.5.001347
[8] Y.Z. Twayana, K. Andrekson, V.T. Company. Opt. Express, **27** (24), 35719 (2019). DOI: 10.1364/OE.27.035719

[9] H.E. Dirani, L. Youssef, C. Petit-Etienne, S. Kerdiles, P. Grosse, C. Monat, E. Pargon, C. Sciancalepore. Opt. Express, **27** (21), 30726 (2019). DOI: 10.1364/OE.27.030726
[10] Q. Li, M. Davanco, K. Srinivasan. Nat. Photonics, **10**, 406 (2016). DOI: 10.1038/nphoton.2016.64
[11] X. Lu, G. Moille, Q. Li et al. Nat. Photonics, **13** (9), 593 (2019). DOI: 10.1038/s41566-019-0464-9
[12] Y. Xuan et al. Opt., **3** (11), 1171 (2016). DOI: 10.1364/OPTICA.3.001171
[13] X. Ji et al. Opt., **4** (6), 619 (2017). DOI: 10.1364/OPTICA.4.000619
[14] И.В. Ивашенцева, И.В. Третьяков, Н.С. Каурова, А.Д. Голиков, Г.Н. Гольцман. Опт. и спектр., **132** (10), 1076–1086 (2024). DOI: 10.61011/OS.2024.10.59423.7024-24
[15] S. Xiao, M.H. Khan, H. Shen, M. Qi. J. Lightw. Technol., **26** (2), 228 (2008). DOI: 10.1109/JLT.2007.911098
[16] A. Densmore, D. Xu, P. Waldron, S. Janz, P. Cheben, J. Lapointe, A. Delâge, B. Lamontagne, J.H. Schmid, E. Post. IEEE Phot. Technol. Lett., **18** (23), 2520 (2006). DOI: 10.1109/LPT.2006.887374
[17] S.K. Selvaraja, P. Jaenen, W. Bogaerts, D. van Thourhout, P. Dumon, R. Baets. J. Lightw. Technol., **27** (18), 4076 (2009). DOI: 10.1109/JLT.2009.2022282
[18] A. Nikitin, A. Ustinov. ЖТФ, **94** (8), 1382–1390 (2024). DOI: 10.61011/JTF.2024.08.58567.72-24
[19] В.А. Киселевский, К.А. Фетисенкова, А.А. Татаринцев, А.Е. Мельников, О.Г. Глаз. Опт. и спектр., **133** (3), 292–298 (2025). DOI: 10.61011/OS.2025.03.60246.2-25
[20] С.С. Косолобов, И.А. Пшеничнюк, К.Р. Тазиев, А.К. Земцова, Д.С. Земцов, А.С. Смирнов, Д.М. Жигунов, В.П. Драчев. УФН, **194**, 1223–1239 (2024). DOI: 10.3367/UFNr.2024.09.039762
[21] P. An et al. Journal of Physics: Conference Series, **1124**, 51047 (2018). DOI: 10.1088/1742-6596/1124/5/051047
[22] H. El Dirani, L. Youssef, C. Petit-Etienne et al. Opt. Express, **27**, 30726–30740 (2019). DOI: 10.1364/OE.27.030726
[23] A. Chhoker et al. ChemistrySelect, **10** (2025). DOI: 10.1002/slct.202404474
[24] D.T. Spencer, J.F. Bauters, M.J.R. Heck, J.E. Bowers. Optica, **1**, 153 (2014). DOI: 10.1364/OPTICA.1.000153
[25] 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. Nat. Photonics, **15**, 346–353 (2021). DOI: 10.1038/s41566-021-00761-7
[26] X. Ji, F.A.S. Barbosa, S.P. Roberts, A. Dutt, J. Cardenas, Y. Okawachi, A. Bryant, A.L. Gaeta, M. Lipson. Optica, **4**, 619–624 (2017). DOI: 10.1364/OPTICA.4.000619
[27] H.El. Dirani, L. Youssef, C. Petit-Etienne, S. Kerdiles, P. Grosse, C. Monat, E. Pargon, C. Sciancalepore. Opt. Express, **27**, 30726–30740 (2019). DOI: 10.1364/OE.27.030726
[28] M.H.P. Pfeiffer, J. Liu, A.S. Raja, T. Morais, B. Ghadiani, T.J. Kippenberg. Optica, **5**, 884 (2018). DOI: 10.1364/OPTICA.5.000884
[29] X. Ji, J.K. Jang, U.D. Dave, M. Corato-Zanarella, C. Joshi, A.L. Gaeta, M. Lipson. Laser Photonics Rev., **15**, 2000353 (2021). DOI: 10.48550/arXiv.2012.04191
[30] Li Q et al. Opt. Express, **21**, 18236–18248 (2013). DOI: 10.1364/OE.21.018236
[31] Zhichao Ye, et al. Opt. Express, **27**, 35719–35727 (2019). DOI: 10.48550/arXiv.1909.10251
[32] Shuai Wan, Rui Niu, Jin-Lan Peng, Jin Li, Guang-Can Guo, Chang-Ling Zou, Chun-Hua Dong. Chin. Opt. Lett., **20**, 032201 (2022). DOI: 10.3788/COL202220.032201
[33] S. Cui et al. arXiv:2209.01097 (2022). DOI: 10.48550/arXiv.2209.01097