01

Численный анализ технологического решения, позволяющего уменьшить наведенный нагрев в фотонных чипах

© Л.Д. Гальченко,[1,2] М.А. Дрязгов,[1] Н.А. Вовк,[1] М.А. Тархов[1]

[1] Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН,
115487 Москва, Россия
[2] Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет,
119991 Москва, Россия
e-mail: lidgalo@gmail.com

Поступило в Редакцию 19 февраля 2026 г.
В окончательной редакции 9 апреля 2026 г.
Принято к публикации 17апреля 2026 г.

Проведено моделирование процесса наведенного нагрева кольцевых микрорезонаторов из Si_3N_4 в тонком слое SiO_2 на подложке Si. Предложена топология перфорирования чипа, которая позволяет уменьшить эффект наведенного нагрева в 17 раз и повысить эффективность перестройки резонансной длины волны в 1.61 раза по сравнению с чипом без перфорации.

Ключевые слова: наведенный нагрев, нитрид кремния, перфорирование, кольцевые микрорезонаторы.

DOI: 10.61011/JTF.2026.08.63355.33-26

Введение

Кольцевые микрорезонаторы используются для решения задач нелинейной оптики [1], создания сверхчувствительных измерительных приборов в биологии [2] и химии [3], реализации законов квантовой физики [4], создания оптических линий задержки [5,6], узкополосных лазеров [7,8] и др. Основные элементы фотонных интегральных систем — оптические волноводы. Выбор материала волновода связан с контрастом показателей преломления материалов волновода и подложки, а также с малым затуханием сигнала в материале на рабочей длине волны 1550 nm [9], шириной полосы пропускания [10] и нелинейными эффектами в диэлектрике [11,12]. Низкие потери в материале волновода делают возможным создание волноводных кольцевых микрорезонаторов с высокой добротностью [13,14]. Перечисленные выше критерии часто приводят к выбору нитрида кремния Si_3N_4 [15–18] в качестве материала волноводных структур, материалом же подложки выбирают оксид кремния SiO_2 [19–21].

Управление характеристиками кольцевых микрорезонаторов позволяет успешно стабилизировать резонансы, проводить селекцию и тонкую настройку мод в системах, не требующих наносекундного отклика [22,23]. Одним из самых распространенных и надежных методов управления микрорезонаторами является термооптический метод [24,25].

Реализация большого числа резонаторов в рамках одного чипа способствует миниатюризации фотонных устройств и улучшает их характеристики [26,27]. Для точного управления микрорезонаторами возможно создание нагревателей для каждого отдельного микрорезонатора [28]. При наличии множества резонаторов на одном чипе тепло от нагревателя одного из микрорезонаторов влияет на соседние структуры, что приводит к изменению их резонансной длины (явление наведенного нагрева). Уменьшение наведенного нагрева позволит увеличить точность перестройки резонансных длин волн микрорезонаторов, улучшая качество работы системы.

В настоящей работе предложен метод уменьшения наведенного нагрева за счет перфорирования чипа, что позволит значительно уменьшить влияние структур друг на друга. Перфорирование позволит уменьшить эффективную теплопроводность фотонного чипа за счет увеличения пористости и длины путей теплового потока фононов между двумя оптическими структурами. Проведено электротермическое моделирование с параметрическим исследованием перфорации: показаны зависимости изменения резонансной длины волны микрорезонаторов от длины, глубины и числа рядов перфорации при одинаковой тепловой мощности нагревателя. Получено, что добавление перфорации с предложенной топологией при максимальной длине, глубине и количестве рядов перфорации в конструкции чипа позволяет уменьшить эффект наведенного нагрева в 17 раз и увеличить сдвиг резонансной длины волны для микрорезонатора, нагреватель которого подключен к источнику питания, в 1.6 раза при равной тепловой мощности нагревателя. Реализация перфорации возможна с использованием технологии травления Bosch, заключающейся в глубоком плазмохимическом травлении кремния [29].

1. Электротермическая модель

В качестве объекта исследований был выбран фотонный чип размером $2000 \times 1300\,\mu$m, состоящий из подложки Si толщиной $490\,\mu$m, с нанесенным поверх слоем

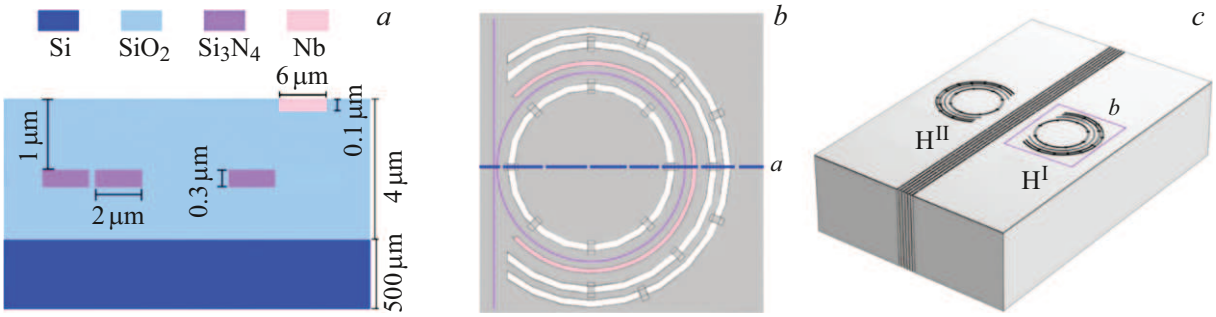

Рис. 1. *a* — послойная структура чипа не в масштабе с обозначенными основными размерами; *b* — перфорация вокруг оптических структур и область расположения микрорезонатора с волноводом; *c* — 3*D*-изображение моделируемой области в масштабе с обозначенными нагревателями H^{I} (активный) и H^{II} (пассивный).

Свойства материалов, используемых при моделировании

Материал	n ($\lambda = 1550\,\text{nm}$)	C, $\frac{1}{\text{kg}\cdot\text{K}}$	k, $\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$	ρ, $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	σ, $\frac{1}{\Omega\cdot\text{m}}$
Si	3.47 [30]	712 [31]	149 [32]	2330 [30]	$0.8\cdot10^{-6}$ [33]
SiO_2	1.43 [34]	709 [30]	1.4 [35]	2203 [30]	$1\cdot10^{-9}$ [36]
Si_3N_4	1.97 [34]	787 [30]	18.5 [30]	3170 [35]	$1\cdot10^{-16}$ [30]
Nb	1.35 [35]	265 [35]	53.7 [32]	8570 [35]	$6.5\cdot10^{6}$ [35]

SiO_2 толщиной $4\,\mu$m. В слое SiO_2 на глубине $1\,\mu$m от поверхности располагается слой Si_3N_4 толщиной $0.3\,\mu$m. В слое Si_3N_4 сформированы оптические волноводы шириной $2\,\mu$m в виде прямой линии и кольцевого резонатора радиусом $175\,\mu$m, минимальное расстояние между кольцом резонатора и волноводом составляет $0.8\,\mu$m. Аналогичная структура расположена зеркально на расстоянии $600\,\mu$m между центрами кольцевых резонаторов для оценки наведенного нагрева. На поверхности SiO_2 расположен слой Nb толщиной $0.1\,\mu$m, в котором сформированы 2 нагревательных элемента шириной $6\,\mu$m и радиусом $183\,\mu$m соосно кольцевым микрорезонаторам. Послойная структура области моделирования не в масштабе показана на рис. 1, *a*.

Для уменьшения наведенного нагрева предложена перфорация между оптическими структурами, состоящая из прямоугольных отверстий размером $200\times10\,\mu$m, расположенных в шахматном порядке на расстоянии $10\,\mu$m друг от друга, как показано на рис. 1, *c*. Для запирания выделяемого тепла в области оптического резонатора предложена перфорация, представленная на рис. 1, *b*. Она состоит из внутреннего полного кольца радиусом $150\,\mu$m, поделенного на 8 равных участков, и двух внешних неполных колец радиусами 210 и $230\,\mu$m с равномерным разбиением на 6 и 5 участков соответственно. Ширина перфорации и расстояние между участками колец перфорации составляет $10\,\mu$m.

В настоящей работе приведены результаты численного 3*D*-моделирования процесса наведенного нагрева двух нагревателей, располагающихся на поверхности чипа. Моделирование проведено в пакете программ „COMSOL Multiphysics“. Для моделирования процесса нагрева чипа выбраны библиотеки, позволяющие рассчитать распространение тепла в твердых телах „Heat Transfer In Solids“ и джоулев нагрев „Joule Heating“. Температура нижней поверхности чипа зафиксирована на значении 293.15 K для учета теплостабилизированного держателя. В таблице [1] представлены используемые в моделировании свойства материалов: n — показатель преломления на длине волны 1550 nm, C — удельная теплоемкость, k — удельная теплопроводность, ρ — плотность, σ — удельная электропроводность.

На активный нагреватель H^{I} подавалось напряжение в пределах от 0 до 20 V, что при подсчитанном сопротивлении $159.8\,\Omega$ соответствует выделяемой на нагревателе тепловой мощности от 0 до 2.5 W. На пассивный нагреватель H^{II}, соответствующий второму микрорезонатору, напряжение не подавалось. Затем оценивалась температура в центре волноводов микрорезонаторов. Изменение температуры материала микрорезонатора приводит к изменению его показателя преломления, влияющего на резонансную длину волны. Изменение резонансной длины волны может быть оценено по формуле (1) [37]:

$$\Delta\lambda = \Delta T\cdot\frac{\lambda_0 L}{n\cdot 2\pi R}\cdot\left(\frac{\Delta n}{\Delta T}\right), \qquad (1)$$

где $\lambda_0 = 1550\,\text{nm}$ — длина волны излучения в волноводе, L — длина нагреваемого участка резонатора, n — эффективный показатель преломления, соответствующий длине волны 1550 nm, ΔT — изменение температуры нагреваемого участка микрорезонатора, $\Delta n/\Delta T = 2.5\cdot10^{-5}\,\text{K}^{-1}$ — термооптический коэффициент Si_3N_4 [34].

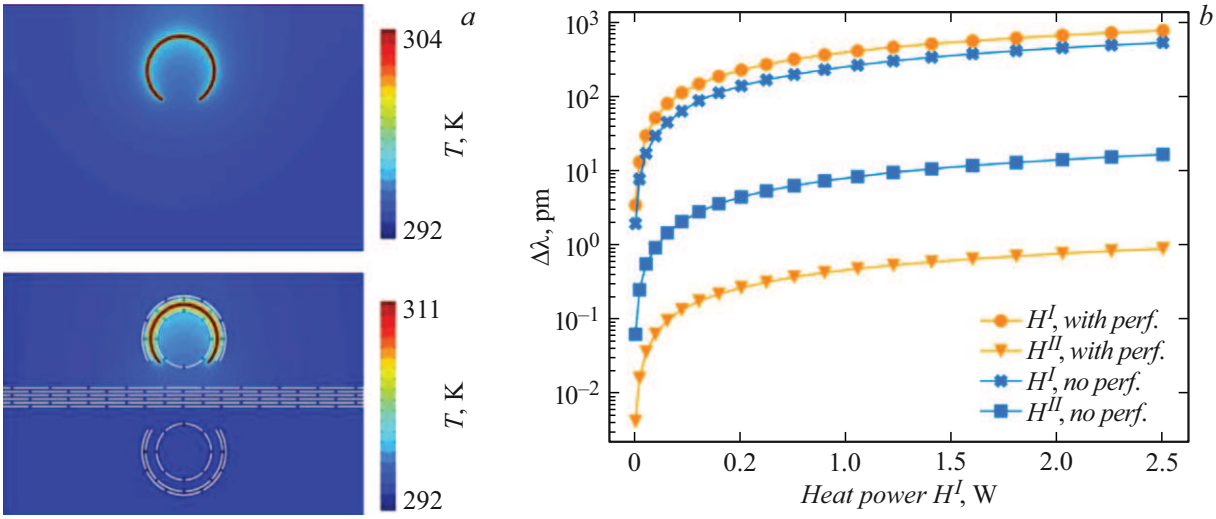

Рис. 2. *a* — тепловые карты слоя чипа с микрорезонаторами без перфорации (верхний рисунок) и с полной перфорацией (нижний рисунок) при тепловой мощности $P_0 = 0.63$ W на H^I; *b* — зависимости сдвига резонансной длины волны микрорезонатора для выключенного H^I для подложки без перфорации и с полной перфорацией.

Изменение резонансной длины волны определялось для микрорезонатора, как соответствующего активному нагревателю H^I, так и соответствующего пассивному нагревателю H^{II}. Изменение резонансной длины волны кольцевого резонатора, соответствующего пассивному нагревателю H^{II}, позволяло численно оценить эффект наведенного нагрева при различных мощностях нагрева и параметрах перфорации.

2. Результаты моделирования

Были получены тепловые карты фотонного чипа без перфорации и со сквозной перфорацией (перфорацией, глубина которой равна полной высоте фотонного чипа) при одинаковой тепловой мощности $P_0 = 0.63$ W, показанные на рис. 2, *a*. Демонстрируется, что температура в области вокруг H^{II} уменьшается при добавлении перфорации в конструкцию чипа. Данный эффект происходит благодаря увеличению длины теплового потока фононов между двумя оптическими структурами: фононам приходится огибать препятствия, в процессе которого происходит рассеяние их энергии из-за столкновений друг с другом. Также показано, что перфорация вокруг оптических структур приводит к более равномерному распределению температуры и увеличивает ее значение за счет запирания тепла: у тепловых фононов уменьшаются пути распространения из зоны вокруг нагревателя, а рассеяния фононов о границы перфорации практически не происходит в связи с тем, что средняя длина свободного пробега фононов в кремнии значительно меньше размеров перфорации ($\lambda \simeq 300$ nm).

На рис. 2, *b* показаны полученные зависимости сдвига резонансной длины волны микрорезонаторов от тепловой мощности, выделяемой на H^I. Представленные данные позволяют численно оценить эффективность сквозной перфорации: так, в случае круговой перфорации эффективность перестройки возрастает в 1.6 раза за счет запирания тепла в области кольцевого резонатора при одинаковой выделяемой тепловой мощности; разделение перфорацией оптических структур уменьшает наведенный нагрев в 17 раз.

Было проведено исследование эффективности нагревателя и величины наведенного нагрева от глубины перфорации для описанной топологии. На рис. 3, *e* представлены тепловые карты в центральном сечении чипа, проходящем через центры нагревателей и пересекающих разделяющую их перфорацию. Черные линии на изображении являются границами геометрических доменов, которые разделяют блоки перфорации. Можно заметить, что с увеличением глубины перфорации тепло изолируется в соответствующем участке объема благодаря увеличению длины пути теплового потока фононов.

На рис. 3, *a* приводится зависимость сдвига резонансной длины волны микрорезонаторов от глубины перфорации при тепловой мощности $P_0 = 0.63$ W на нагревателе H^I. Демонстрируется, что увеличение глубины перфорации позволяет уменьшить эффект наведенного нагрева. Так, при травлении только слоя SiO_2 сдвиг резонансной длины волны для микрорезонатора около H^{II} уменьшается в 1.23 раза, для микрорезонатора около H^I увеличивается в 1.1 раза. Дальнейшее травление слоя Si позволяет уменьшить сдвиг резонансной длины волны микрорезонатора у H^{II} в 15.24 раза в сравнении с травлением только слоя оксида, сдвиг для микрорезонатора у H^I увеличивается в 1.31 раза.

Было оценено влияние длины перфорации на эффект наведенного нагрева. На рис. 3, *b* показана зависимость сдвига резонансной длины волны от длины центральной перфорации, из которой следует, что увеличение длины

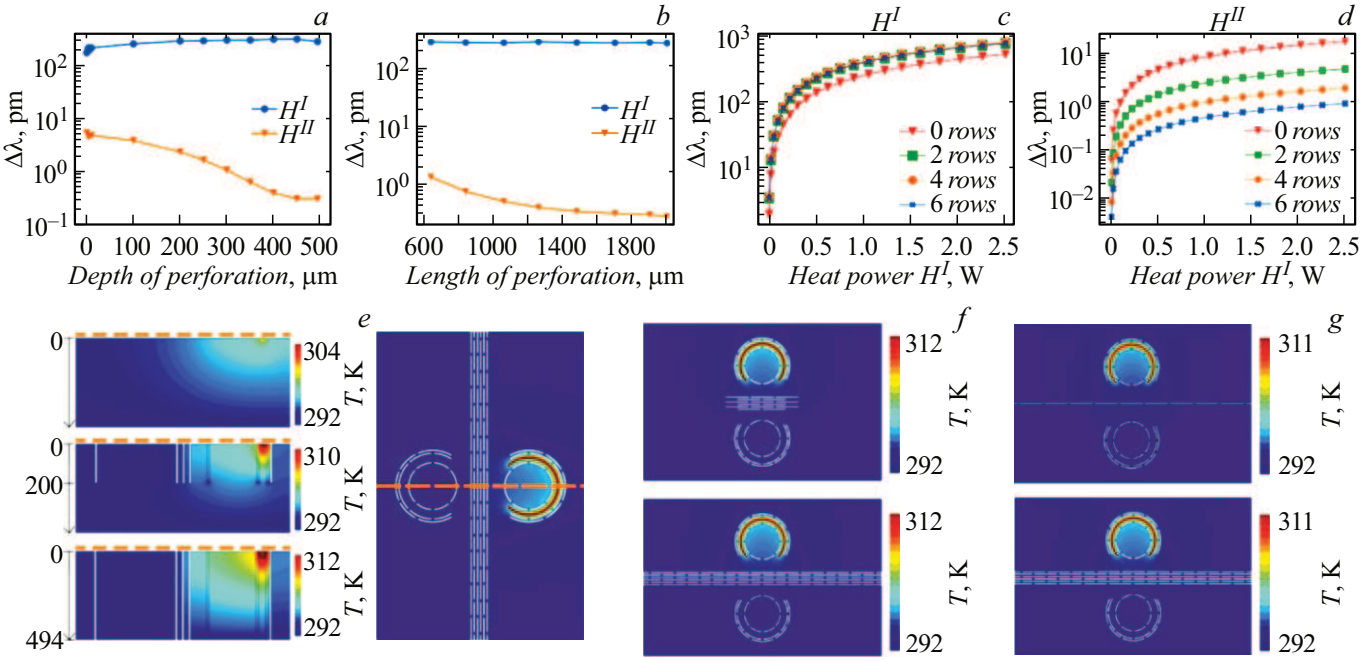

Рис. 3. Зависимости сдвига резонансной длины волны микрорезонатора при тепловой мощности $P_0 = 0.63$ W на H^I (*a*) от глубины перфорации и (*b*) от длины перфорации. Зависимости сдвига резонансной длины волны микрорезонатора у (*c*) H^I и (*d*) H^{II} от тепловой мощности на H^I для разного числа рядов центральной перфорации. Тепловые карты сечения чипа (пунктирная линия) при тепловой мощности $P_0 = 0.63$ W на H^I (*e*) при различной глубине перфорации: перфорация отсутствует (верхний рисунок), глубина перфорации 200 μm (средний рисунок), перфорация сквозная (нижний рисунок); *f* — при различной длине перфорации: длина перфорации 620 μm (верхний рисунок) и 2000 μm (нижний рисунок); *g* — при различном числе рядов перфорации: 1 ряд центральной перфорации (наверху) и 6 рядов центральной перфорации (внизу).

перфорации позволяет уменьшить наведенный нагрев. При длине 2000 μm сдвиг резонансной длины волны уменьшается в 4.8 раза относительно сдвига при длине перфорации 620 μm.

Увеличение длины центральной перфорации оказывает слабое влияние на эффективность смещения резонансной длины волны на микрорезонаторе, соответствующем нагревателю H^I, как показано на тепловых картах на рис. 3, *f*. Длина центральной перфорации почти не уменьшает пространства, через которое тепловые фононы могут распространиться от нагревателя H^I. Отношение сдвига резонансной длины волны при длине перфорации 620 μm к сдвигу резонансной длины волны при длине перфорации 2000 μm составляет 1.04.

Проведено исследование влияния количества рядов перфорации между оптическими структурами на эффект наведенного нагрева. На рис. 3, *g* показаны тепловые карты, соответствующие 1 и 6 рядам перфорации. Демонстрируется, что распространение тепла уменьшается с увеличением числа рядов перфорации благодаря увеличению длины пути теплового потока фононов между оптическими структурами. Большее число рядов не рассматривалось в связи с ограниченным пространством между волноводными структурами в фотонном чипе. С обеих сторон от волноводов до ближайшего ряда перфорации оставлен отступ шириной 70 μm для предотвращения повреждения волноводов в процессе травления перфорации в фотонном чипе.

Зависимости сдвига резонансной длины волны микрорезонаторов от тепловой мощности на H^I показаны на рис. 3, *c,d*. Из полученных данных следует, что увеличение числа рядов перфорации позволяет уменьшить смещение резонансной длины волны микрорезонатора. Два ряда перфорации уменьшают сдвиг резонансной длины волны для микрорезонатора, соответствующего нагревателю H^{II}, в 3.28 раза. Уменьшение эффекта наведенного нагрева для структуры с 4 рядами центральной перфорации выше, чем в структуре с 2 рядами, в 2.47 раза. Сдвиг резонансной длины волны в структуре с 6 рядами центральной перфорации меньше, чем в структуре с 4 рядами, в 2.09 раза.

Заключение

В работе проведено моделирование процесса наведенного нагрева кольцевых микрорезонаторов из Si_3N_4 на подложке Si с тонким слоем SiO_2. По результатам моделирования были определены параметры перфорации, которые позволят уменьшить наведенный нагрев различных областей одного чипа. Для сквозной перфорации, состоящей из 6 рядов между оптическими структурами, пересекающих весь чип, удается уменьшить эффект

наведенного нагрева в 17 раз по сравнению с чипом без перфорации. Добавление сквозной перфорации вокруг оптических структур позволяет увеличить температуру микрорезонатора с подключенным к источнику питания нагревателем, что позволяет сделать перестройку его резонансной длины волны эффективнее в 1.61 раза, что снижает требования к источнику питания. Эффект уменьшения наведенного нагрева и увеличения полезного нагрева происходит благодаря уменьшению эффективной теплопроводности фотонного чипа при перфорировании. Перфорирование чипа позволит размещать множество оптических систем на одном чипе с минимальным влиянием систем друг на друга, что позволит миниатюризировать фотонные устройства.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках проекта № 125020501540-9 Министерства образования и науки РФ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] V. Van, T.A. Ibrahim, P.P. Absil, F.G. Johnson, R. Grover, P.-T. Ho. IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron., **08** (3), 705 (2002). https://doi.org/10.1109/JSTQE.2002.1016376

[2] A. Yalcin, K.C. Popat, J.C. Aldridge, T.A. Desai, J. Hryniewicz, N. Chbouki, B.E. Little, O. King, V. Van, S. Chu, D. Gill, M. Anthes-Washburn, M.S. Unlu, B.B. Goldberg. IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron., **12** (1), 148 (2006).

[3] C.-Y. Chao, W. Fung, L. Guo. IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron., **12** (1), 134 (2006).

[4] I.I. Faruque, G.F. Sinclair, D. Bonneau, J.G. Rarity, M.G. Thompson. Opt. Express, **26** (16), 20379 (2018).

[5] C. Xiang, M. Davenport, J. Khurgin, P. Morton, J. Bowers. IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron., **24** (4), 1 (2017).

[6] D. Lin, X. Xu, P. Zheng, H. Yang, G. Hu, B. Yun, Y. Cui. IEEE Photon. J., **11** (5), 1 (2019).

[7] B. Stern, X. Ji, A. Dutt, M. Lipson. Opt. Lett., **42**, 4541 (2017).

[8] D. Spencer, M. Davenport, T. Komljenovic, S. Srinivasan, J. Bowers. Opt. Express, **24**, 13511 (2016).

[9] J. Guo, G.A. Vawter, M.J. Shaw, G.R. Hadley, P. Esherick, A. Jain, C.R. Alford, C.T. Sullivan. Opt. Components Mater. SPIE, **5350**, 13 (2004).

[10] X. Ji, S. Roberts, M. Corato Zanarella, M. Lipson. APL Photon., **6**, 071101 (2021).

[11] M. Borghi, C. Castellan, S. Signorini, A. Trenti, L. Pavesi. J. Opt., **19** (9), 093002 (2017).

[12] K. Koshelev, S. Kruk, E. Melik-Gaykazyan, J.-H. Choi, A. Bogdanov, H.-G. Park, Y. Kivshar. Science, **367** (6475), 288 (2020).

[13] H. El Dirani, L. Youssef, C. Petit-Etienne, S. Kerdiles, P. Grosse, C. Monat, E. Pargon, C. Sciancalepore. Opt. Express, **27** (21), 30726 (2019).

[14] Y. Xuan, Y. Liu, L.T. Varghese, A.J. Metcalf, X. Xue, P.-H. Wang, K. Han, J.A. Jaramillo-Villegas, A. Al Noman, C. Wang, S. Kim, M. Teng, Y. Lee. Optica, **3** (11), 1171 (2016).

[15] A. Mumlyakov, N. Dmitriev, M. Shibalov, I. Filippov, I. Trofimov, A. Danilin, V. Lobanov, I. Bilenko, M. Tarkhov. Phys. Rev. Appl., **22**, 11 (2024).

[16] D. Bonneville. *Low-cost and versatile fabrication of silicon-compatible photonic integrated circuits for active devices and sensors* (Ph.D. dissertation, McMaster University, Hamilton, Ontario, Department of Engineering Physics, 2022)

[17] P.-H. Wang, H.-Y. Zheng, Y.-H. Liu, N.-L. Hou, C.-H. Chen, H.-W. Chen, C.-M. Wang, APL Photon., **9**, 08 (2024).

[18] Y. Su, Y. Zhang, C. Qiu, X. Guo, L. Sun. Adv. Mater. Technol., **5** (8), 1901153 (2020).

[19] J. Broeng, D. Mogilevstev, S.E. Barkou, A. Bjarklev. Opt. Fiber Technol., **5** (3), 305 (1999).

[20] D. Bulla, B.-H. Borges, M. Romero, N. Morimoto, L. Neto. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, **50** (1), 9 (2002).

[21] K. Suzuki, K. Yamaguchi, Y. Kurata, O. Moriwaki. J. Opt. Society America B, **42**, 2343 (2025).

[22] M. Sumetsky, D.J. DiGiovanni, Y. Dulashko, X. Liu, E.M. Monberg, T.F. Taunay. Opt. Express, **20** (10), 10684 (2012).

[23] U. Levy, K. Campbell, A. Groisman, S. Mookherjea, Y. Fainman. Appl. Phys. Lett., **88** (11), 111107 (2006).

[24] N. Dmitriev, A. Mumlyakov, M. Shibalov, I. Filippov, G. Molodtsova, I. Trofimov, D. Brukvina, I. Bilenko, M. Tarkhov. Phys. Rev. Appl., **24**, 11 (2025).

[25] Z. Li, B. Lopez-Rodriguez, N. Sharma, R. van der Kolk, Th. Scholte, H. Smedes, R. Tufan Erdogan, J. Chang, H. Voncken, J. Gao, A.W. Elshaari, S. Gröblacher, I.E. Zadeh. APL Photon., **10** (10), (2025).

[26] S. Liu, T. Xu, B. Wang, D. Wang, Q. Xiao, L. Fan, C. Huang. Optica, **12** (7), 1113 (2025).

[27] S. Szunerits, D.R. Walt. Analytical Chem., **74** (7), 1718 (2002).

[28] A. Ribeiro, W. Bogaerts. Opt. Express, **25** (24), 29778 (2017).

[29] H. Rhee, H. Kwon, C.-K. Kim, H. Kim, J. Yoo, Y. Kim. J. Vacuum Sci. Technol. B: Microelectronics and Nanometer Structures, **26**, 576 (2008).

[30] B. Pan, J. Bourderionnet, V. Billault, G. Dande, M. Dahlem, J.H. Song, S. Dwivedi, D.C. Altamirano, C. Cummins, S.S. Saseendran, P. Helin, J. Ramirez, D. Néel, E. Soltanian, J. Zhang, G. Roelkens. Photon. Res., **12** (11), 2508 (2024).

[31] P.D. Desai. J. Phys. Chem. Reference Data, **15** (3), 967 (1986).

[32] C.Y. Ho, R.W. Powell, P.E. Liley. J. Phys. Chem. Reference Data, **1** (2), 279 (1972).

[33] K.C. Mills, L. Courtney. ISIJ International, **11**, Suppl, S130 (2000).

[34] A. Arbabi, L.L. Goddard. Opt. Lett., **38** (19), 3878 (2013).

[35] *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (88th Edition, 88th ed. CRC Press, 2007)

[36] J.K. Srivastava, M. Prasad, J.B. Wagner. J. Electrochem. Society, **132** (4), 955 (1985). [Online]. Available: https://doi.org/10.1149/1.2113993

[37] X. Liu, P. Ying, X. Zhong, J. Xu, Y. Han, S. Yu, X. Cai. Opt. Lett., **45**, 6318 (2020).