

# Фотонно-кристаллический резонатор ближнего ИК диапазона на кремнии: численное моделирование и технология формирования

© П.Г. Серафимович<sup>\*+</sup>, М.В. Степихова<sup>♦♦</sup>, Н.Л. Казанский<sup>\*+</sup>, С.А. Гусев<sup>♦♦</sup>, А.В. Егоров<sup>+</sup>,  
Е.В. Скороходов<sup>♦♦</sup>, З.Ф. Красильник<sup>♦♦</sup>

\* Институт систем обработки изображений Российской академии наук,  
443001 Самара, Россия

+ Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королева  
(национальный исследовательский университет),  
443086 Самара, Россия

♦ Институт физики микроструктур Российской академии наук,  
603950 Нижний Новгород, Россия

♦♦ Нижегородский государственный университет им Н.И. Лобачевского,  
603950 Нижний Новгород, Россия

E-mail: mst@ipm.sci-nnov.ru

(Получена 17 декабря 2015 г. Принята к печати 24 декабря 2015 г.)

Изложена технология изготовления фотонно-кристаллического резонатора, выполненного в виде группы отверстий на кремниевом полосковом волноводе, сформированных методом ионно-лучевого травления. Исследован паразитный эффект, связанный с конусностью отверстий, возникающий при их формировании по данной технологии. Путем численного моделирования показано, что уменьшение добротности резонатора вследствие конусности отверстий можно компенсировать с учетом их объема. Выполнен анализ влияния толщины волновода на значения резонансной длины волны и добротность фотонно-кристаллического резонатора.

## 1. Введение

Кремний является наиболее используемым материалом в КМОП (комплементарная структура металл–оксид–полупроводник — англ. CMOS — complementary metal–oxide–semiconductor) технологии построения электронных схем [1]. Однако в качестве материалов для оптоэлектронных компонент, как правило, используются полупроводники III–V групп, например, GaN, InP, GaAs [2]. Монолитное интегрирование кремния и полупроводников III–V групп на кристалле затруднительно вследствие различия периодов кристаллических решеток этих материалов. Использование кремния, в том числе и в оптоэлектронике, упростило бы задачу интегрирования фотонных и электронных компонент. Кремний достаточно легко окисляется. Устойчивый оксид кремния обладает коэффициентом преломления  $\sim 1.5$ , что создает необходимый контраст с кремнием, коэффициент преломления которого составляет  $\sim 3.5$  в телекоммуникационном диапазоне длин волн.

Важным элементом устройств нанофотоники является оптический резонатор [3,4]. Основными параметрами резонатора являются добротность, частота и модовый состав. Высокодобротные резонаторы с малым модовым объемом позволяют усилить взаимодействие света со средой, уменьшить размеры фотонного элемента и оптимизировать его дисперсионные характеристики. Нанорезонаторы формируются на основе фотонных кристаллов [5]. Высокодобротные нанорезонаторы позволяют создавать, например, оптические переключатели,

фильтры, модуляторы, когерентные источники света с низкой пороговой мощностью [6]. Изготовление нанорезонатора внутри трехмерного фотонного кристалла является технологически трудной задачей. Поэтому часто используют двухмерные фотонные кристаллы в виде мембраны. В такой мембране свет распространяется за счет полного внутреннего отражения (ПВО) [7,8]. Дальнейшим упрощением задачи является использование гребенчатых (ridge) фотонно-кристаллических (ФК) волноводов. В таких волноводах ПВО препятствует распространению света в поперечных направлениях. В продольном направлении локализацию света в нанорезонаторе обеспечивает фотонный кристалл [9,10].

В данной работе исследуется резонатор на основе гребенчатого ФК волновода. Структура такого волновода состоит из трех частей. Во-первых, это — ФК зеркала, представленные одинаковыми, равноотстоящими друг от друга отверстиями в волноводе, формирующими решетку фотонного кристалла. Вторым элементом структуры является переходная зона между ФК волноводом и областью собственно резонатора. Эта зона используется для уменьшения потерь энергии в резонаторе. Переходная зона содержит несколько отверстий, радиусы и положение которых оптимизированы с точки зрения возможности уменьшения потерь. Третьим элементом структуры является сам резонатор. Повышение добротности гребенчатого ФК резонатора достигается уменьшением потерь как в продольном, так и в поперечных направлениях. К уменьшению потерь в продольном направлении приводит простое увеличение числа периодов

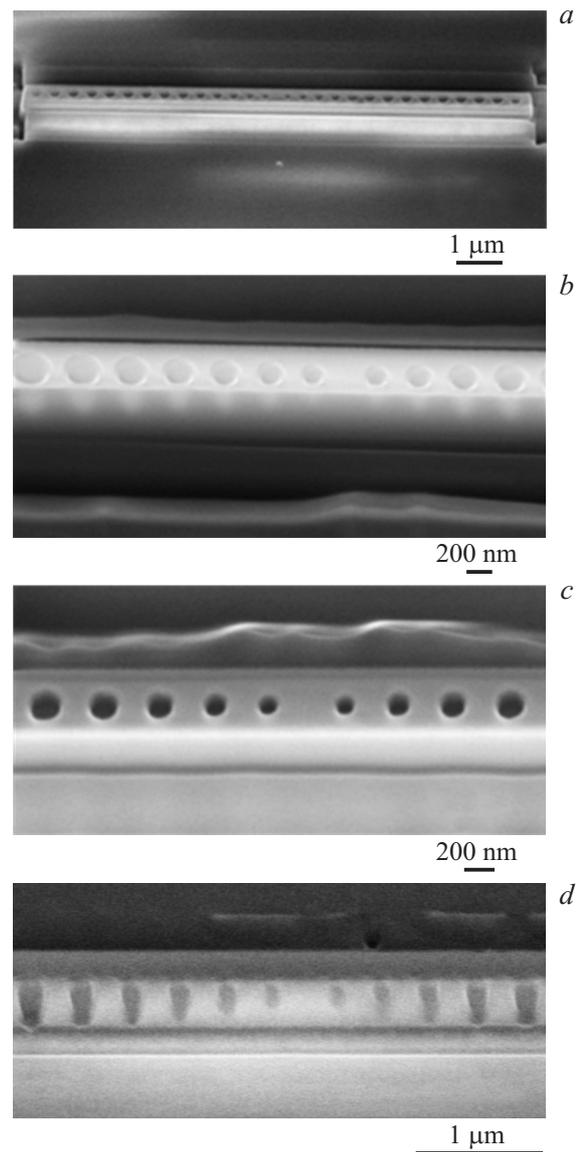
фотонного кристалла [11,12]. Чтобы уменьшить потери в поперечных направлениях, необходима более тонкая оптимизация структуры нанорезонатора.

В работе приводятся результаты численного моделирования фотонно-кристаллического резонатора на базе гребенчатого волновода на кремнии, продемонстрирована технология формирования резонаторов такого типа. Как показали результаты технологических экспериментов, использование для этих целей методики ионно-лучевого травления может приводить к формированию отверстий ФК резонатора не цилиндрической (конической) формы. В работе проведено моделирование конусности формы отверстий, показана возможность компенсации последствий отклонения формы отверстий от цилиндрической. Рассмотрено влияние высоты гребенчатого волновода на параметры фотонно-кристаллического резонатора.

## 2. Технологии изготовления ФК резонаторов

Структуры ФК резонаторов формировались в несколько этапов с применением электронно-лучевой и ионно-лучевой литографии. На предварительном этапе методами электронно-лучевой литографии в сочетании с ионным травлением формировались волноводы. Затем прецизионным травлением остро сфокусированным ионным пучком формировались торцевые поверхности волноводов и сами фотонно-кристаллические резонаторы в виде последовательности отверстий разного диаметра на поверхности волновода, позиционируемых на определенном расстоянии друг от друга.

Резонаторы формировались на стандартных подложках SOI (Silicon On Insulator) фирмы Soitec с толщинами „захороненного“ слоя оксида кремния  $d_{\text{SiO}_2} \sim 1 \mu\text{м}$  и верхнего, „несущего“ слоя кремния  $h_{\text{Si}} \sim 220 \text{ нм}$ . Для формирования рисунка на подложку предварительно наносился двухслойный позитивный резист (PMMA 495 и PMMA 950), суммарная толщина которого составляла  $\sim 200 \text{ нм}$ . После экспонирования электронным пучком и проявления в растворе MIBK : IPA (1 : 3) на резист наносился слой ванадия толщиной  $\sim 20 \text{ нм}$  и проводилась процедура „вскрытия окон“ (lift-off) в ацетоне с ультразвуковой активацией. В результате взрывной литографии формировалась ванадиевая маска в виде полосок размерами  $20 \times 2 \mu\text{м}$ , которая впоследствии использовалась при травлении кремниевого слоя с помощью ионно-лучевого травления. Первичное ионное травление проводилось на толщину кремниевого слоя в атмосфере аргона в установке с горячим катодом (установка Кауфмана, энергия ионов  $\text{Ag}^+ \sim 1000 \text{ эВ}$ ). Остатки ванадиевой маски удалялись жидкостным травлением в растворе перекиси водорода. В результате этих процедур формировались кремниевые полоски — заготовки для волноводов, с размерами несколько больше требуемых.



**Рис. 1.** Микрофотографии ФК резонатора волновода с разным увеличением: *a* — резонатор целиком, *b* — центральная часть резонатора, снятая при угле наклона образца  $54^\circ$ , *c* — центральная часть резонатора — вид сверху, *d* — поперечный срез резонатора вдоль центральной оси волновода.

Окончательная обработка сформированных волноводов, а именно — формирование полосок требуемых размеров, отверстий в них и торцевых поверхностей с заданными параметрами, проводилась локальным травлением с помощью остро сфокусированного ионного пучка. Травление проводилось ионами  $\text{Ga}^+$  с энергией  $30 \text{ кэВ}$  в двухлучевом микроскопе Neon 40 (ZEISS, Германия). Величина тока ионного пучка варьировалась от 1 до  $10 \mu\text{А}$ , диаметр пучка при этом составлял  $\sim 7\text{--}15 \text{ нм}$ . На рис. 1 приведены микрофотографии ФК резонаторов, сформированных по этой методике, полученные сразу после финального этапа травления в том

же сканирующем микроскопе. Изображения получены во вторичных электронах с помощью электронного зонда при разных углах наклона образца. Длина волновода составляла 11.5 мкм, ширина 0.5 мкм, диаметр отверстий варьировался, увеличиваясь от центра волновода к его краям. Как показано на рисунке, на изображениях резонаторов, полученных при угле наклона образца  $54^\circ$  (рис. 1, *b*), проявляется характерный цветовой контраст, свидетельствующий о конусной форме отверстий резонатора. Это отчетливо видно на микрофотографии поперечного среза резонатора, сделанного с помощью остро сфокусированного ионного пучка (рис. 1, *d*). В данном случае можно детально рассмотреть форму отверстий и определить их размеры.

### 3. Моделирование ФК резонаторов

Моделирование ФК резонаторов проводилось методом конечных разностей во временной области (FDTD — Finite Difference Time Domain method) [13,14]. В работе использовался параллельный 3-мерный метод FDTD. ФК резонаторы рассчитывались для телекоммуникационного диапазона длин волн  $\sim 1.5$  мкм. На границах трехмерной расчетной области использовался поглощающий слой в соответствии с методом PML (Perfectly Matched Layers). Толщина этого слоя составляла половину резонансной длины волны. В качестве источника излучения использовался гауссов импульс. Ширина данного импульса в частотной области составляла около 10% от значения резонансной частоты. Разрешение вычислительной сетки выбиралось из условия сходимости результатов [11,12].

#### 3.1. Параметры ФК резонатора

На рис. 2 показаны геометрические параметры моделируемого ФК резонатора. Здесь  $a_1, a_2$  — радиусы отверстий,  $b_1, b_2$  — расстояние от центра и между соседними отверстиями соответственно. В табл. 1 приведены значения этих параметров. Приводимые значения близки к параметрам ФК резонатора, изготовленного в работе. Моделируемый ФК резонатор содержит 8 отверстий в центральной переходной зоне и 8 регулярных отверстий с каждой стороны от центральной зоны.

ФК волновод имеет ширину  $w = 500$  нм, высоту  $h = 260$  нм, состоит из кремния с показателем преломления 3.45, лежит на слое оксида кремния с показателем

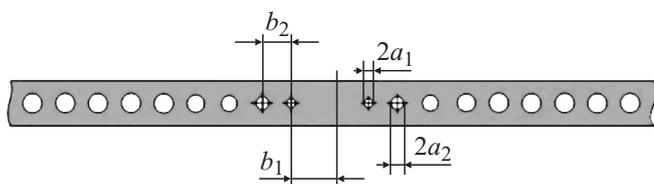


Рис. 2. Геометрические параметры ФК резонатора.

Таблица 1. Значения (нм) радиусов отверстий в ФК волноводе и расстояний между ними

$b_1$	$a_1$	$b_2$	$a_2$	$b_3$	$a_3$	$b_4$	$a_4$	$b_5$
200	65	290	82	310	90	305	85	345

Таблица 2. Зависимости параметров ФК резонатора от высоты волновода

Высота $h$ , нм	Длина волны, нм	Добротность
220	1423.59	54482
240	1439.17	62153
260	1457.41	69064
280	1476.52	74530
300	1493.63	75365
330	1516.72	79201
370	1541.73	75742
410	1562.43	73472
450	1579.71	60487
490	1594.31	45135
510	1451.56	6768

преломления 1.45 и окружен воздухом. Отверстия в регулярной части волновода заполнены воздухом, имеют диаметр 185 нм и отстоят друг от друга на  $a = 350$  нм. Длина волны резонансной моды в резонаторе с такими параметрами соответствует  $\lambda = 1457.41$  нм (здесь и далее приводятся значения длины волны в вакууме). Добротность резонатора с 8 регулярными отверстиями с каждой стороны равна 69 064.

#### 3.2. Зависимость добротности и длины волны резонансной моды от высоты волновода

Можно показать, что изменение высоты ФК волновода ( $h$ ) приводит к изменению ширины „запрещенной зоны“ фотонного кристалла и, как следствие, частотной области резонатора. Результаты численного моделирования показывают, что существует оптимальная величина  $h$ , для которой размер „запрещенной зоны“ максимален. Полученные в результате теоретических расчетов значения добротности и длины волны резонансной моды ФК резонатора, описанного выше, в зависимости от высоты волновода приведены в табл. 2. Добротность резонатора рассчитывалась в соответствии с методом, описанным в работе [9].

Результаты моделирования, приведенные в табл. 2, показывают, что максимальные значения добротности ФК резонатора достигаются при условии, что отношение  $h$  к периоду решетки фотонного кристалла ( $a$ ) примерно равно 1. Резонансная длина волны возрастает с увеличением высоты ФК волновода и при больших значениях  $h$  выходит за пределы „запрещенной зоны“ ФК. Так, значению  $h = 510$  нм, приведенному в табл. 2,

соответствует уже другая резонансная мода с добротностью существенно (на порядок) ниже добротности предшествующей моды.

### 3.3. Зависимость добротности и длины волны резонатора от степени конусности отверстий

Как показано в предыдущем разделе, в ходе ионного травления могут возникать нежелательные эффекты, связанные с изменением параметров ФК резонатора. В частности, отверстия в ФК волноводе в процессе травления могут приобретать коническую форму. Как известно, на конусность отверстия при травлении ионным пучком влияет ряд параметров: соотношение между диаметром ионного пучка и размером области травления, режим сканирования, энергия ионов и др. [15]. Рассмотрим влияние конусности отверстий на параметры ФК резонатора.

Коническое отверстие характеризуется высотой конуса  $h$ , равной высоте волновода, радиусами нижнего ( $r$ ) и верхнего ( $R$ ) оснований, а также точкой пересечения конуса с цилиндром заданного диаметра ( $R_c$ ). Данная точка задается расстоянием  $L$ , отсчитываемым от верхней поверхности волновода. Схематически отверстие конусной формы и проекция его пересечения с идеальным цилиндром в волноводе показаны на рис. 3.

В численном эксперименте значение  $L$  выбиралось в долях высоты волновода [ $3h/4, h/2, h/4$ ], а радиус нижнего основания конуса определялся через отношение к диаметру искажаемого цилиндрического отверстия [ $5d/12, d/3, d/4$ ]. Таким образом, значение  $h$  составило 260 нм, а значение  $d$  соответствовало диаметру каждого искажаемого цилиндра. Полагалось, что все отверстия в ФК резонаторе искажались одинаковым образом. Полученные значения длины волны резонансной моды ( $\lambda$ ), отношения объемов конусного отверстия к цилиндрическому ( $V_{cn}/V_{cl}$ ), и добротности резонатора ( $Q$ ) в зависимости от параметров  $r$  и  $L$  приведены в табл. 3.

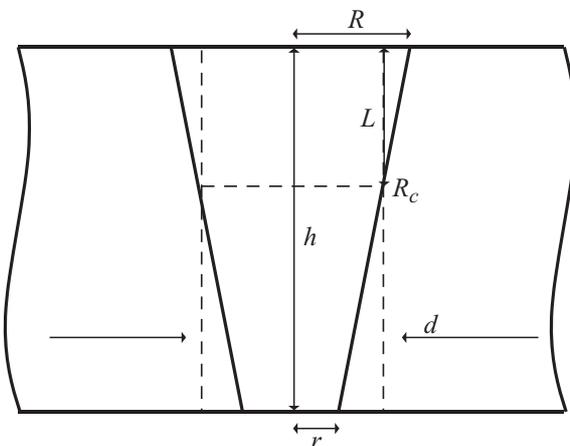


Рис. 3. Проекция пересечения отверстия конической формы с идеальным цилиндром в волноводе.

Таблица 3. Параметры ФК резонатора, рассчитанные в зависимости от конусности отверстий

$L$	$r$		
	$5d/12$	$d/3$	$d/4$
$h/4$	$\lambda = 1461.35$ нм $V_{cn}/V_{cl} = 0.896$ $Q = 49816$	$\lambda = 1476.15$ нм $V_{cn}/V_{cl} = 0.806$ $Q = 28089$	$\lambda = 1490.51$ нм $V_{cn}/V_{cl} = 0.731$ $Q = 11197$
$h/2$	$\lambda = 1484.52$ нм $V_{cn}/V_{cl} = 1.009$ $Q = 8311$	$\lambda = 1466.16$ нм $V_{cn}/V_{cl} = 1.037$ $Q = 18968$	$\lambda = 1483.17$ нм $V_{cn}/V_{cl} = 1.083$ $Q = 13272$
$3h/4$	$\lambda = 1426.14$ нм $V_{cn}/V_{cl} = 1.398$ $Q = 5186$	$\lambda = 1450.91$ нм $V_{cn}/V_{cl} = 1.925$ $Q = 10020$	$\lambda = 1472.59$ нм $V_{cn}/V_{cl} = 2.583$ $Q = 12951$

Как следует из таблицы, добротность и длина волны резонансной моды зависят от объема и степени конусности отверстий. Максимальная добротность соответствует в данном случае отверстию с минимальной конусностью ( $L = h/4, r = 5d/12$ ). В конечном счете конусность отверстий влияет на эффективный показатель преломления среды. Как следует из результатов численного моделирования, оптимизируя объем и конусность отверстий, можно настраивать резонатор на нужную длину волны, сохраняя достаточно высоким значение его добротности.

## 4. Заключение

В работе обсуждена процедура формирования резонаторов ближнего ИК диапазона на основе кремниевых гребенчатых волноводов на подложке SOI с использованием ионного травления, в том числе фокусирующими ионными пучками.

Достаточно высокие значения добротности можно ожидать в резонаторах на основе одномерных фотонных кристаллов, сформированных на базе гребенчатых волноводов путем вытравливания отверстий нанометрового масштаба с определенным периодом в кремнии. Приведены результаты численного моделирования ФК резонаторов, формируемых на базе кремниевых нановолноводов. Оценено влияние неидеальности (конусности) отверстий на параметры резонаторов, указано на возможность их коррекции с учетом оптимизации объема отверстий. В рамках численного моделирования показано влияние высоты кремниевого нановолновода на параметры ФК резонатора, отмечается высокая чувствительность спектрального отклика резонатора к изменению высоты волновода.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант #15-02-05272) и Программ фундаментальных исследований ОНИТ РАН и Министерства образования и науки РФ.

## Список литературы

- [1] T. Baba. IEEE J. Select. Topics Quant. Electron., **3** (3), 808 (1997).
- [2] P. Pottier, C. Scassal, X. Letartre, J.L. Leclercq, P. Viktorovitch, D. Cassagne, C. Jouanin. J. Lightwave Technol., **17** (11), 2058 (1999).
- [3] B.E. Little, S.T. Chu, H.A. Haus, J. Foresi, J.P. Laine. J. Lightwave Technol., **15** (6), 998 (1997).
- [4] Y. Yamamoto, R.E. Slusher. In: *Confined Electrons and Photons: New Physics and Applications*, ed. by E. Burstein, C. Weisbuch, NATO ASI Series, v. 340 (New York, Springer US, 1995) p. 871.
- [5] D. Labilloy, H. Benisty, C. Weisbuch, T.F. Krauss, V. Bardinal, U. Oesterle. Electron. Lett., **33** (23), 1978 (1997).
- [6] M.M. Beaky, J.B. Burk, H.O. Everitt, M. Haider, S. Venakides. IEEE Trans. Microw. Theory Techn., **47** (11), 2085 (1999).
- [7] O. Painter, R.K. Lee, A. Scherer, A. Yariv, J.D. O'Brien, P.D. Dapkus, I. Kim. Science, **284**, 1819 (1999).
- [8] E. Chow, S.Y. Lin, S.G. Johnson, P.R. Villeneuve, J.D. Joannopoulos, J.R. Wendt, G.A. Vawter, W. Zubrzycki, H. Hou, A. Alleman. Nature, **407**, 983 (2000).
- [9] Н.Л. Казанский, П.Г. Серафимович, С.Н. Хонина. Компьютерная оптика, **36** (2), 199 (2012).
- [10] N.L. Kazanskiy, P.G. Serafimovich. Opt. Express, **22** (11), 14004 (2014).
- [11] N.L. Kazanskiy, P.G. Serafimovich, S.N. Khonina. Appl. Optics, **52** (23), 5830 (2013).
- [12] Н.Л. Казанский, П.Г. Серафимович, С.Н. Хонина. Компьютерная оптика, **36** (4), 127 (2012).
- [13] K. Yee. IEEE Trans. Antennas Propag., **14** (3), 302 (1966).
- [14] A. Taflove. Computational Electrodynamics (Norwood, MA, Artech House, 1995).
- [15] W.C. Hopman, F. Ay, W. Hu, V.J. Gadgil, L. Kuipers, M. Pollnau, R.M. de Ridder. Nanotechnology, **18** (19), 195 305 (2007).

Редактор А.Н. Смирнов

## Photonic crystal resonator for the near-IR range on silicon: numerical modeling and formation technology

P.G. Serafimovich<sup>\*+</sup>, M.V. Stepikhova<sup>♦♦</sup>,  
N.L. Kazanskiy<sup>\*+</sup>, S.A. Gusev<sup>♦♦</sup>, A.V. Egorov<sup>+</sup>,  
E.V. Skorokhodov<sup>♦♦</sup>, Z.F. Krasilnik<sup>♦♦</sup>

\* Image Processing Systems Institute  
of the Russian Academy of Sciences,  
443001 Samara, Russia

+ S.P. Korolyov Samara State Aerospace University  
(national research university),  
443086 Samara, Russia

♦ Institute for Physics of Microstructures,  
Russian Academy of Sciences,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia

♦♦ N.I. Lobachevsky State University  
of Nizhny Novgorod,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract** The paper describes manufacturing technology of photonic crystal resonators represented in a form of the group of holes formed in silicon strip waveguide by the ion beam etching. A parasitic effect associated with the holes obliquity that occurs during their formation by this technology is considered. Numerical simulations show that the decrease of the resonators quality factor related with the holes obliquity can be compensated taking into account their volume. An analysis of the influence of the waveguide thickness on the resonance wavelength and quality factor of photonic crystal resonator is carried out.