

# ДИФРАКЦИОННАЯ ОПТИКА, ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

## ОПТИЧЕСКИЙ НАНОРЕЗОНАТОР В ПЕРЕСЕЧЕНИИ ГРЕБЕНЧАТЫХ ФОТОННОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ

*Казанский Н.Л., Серафимович П.Г., Хонина С.Н.  
Институт систем обработки изображений РАН,  
Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)*

### Аннотация

Предложена и численно исследована новая структура оптических резонаторов в пересечении гребенчатых фотоннокристаллических волноводов. Исследованы свойства симметрии возбуждаемых резонансных мод ТЕ-поляризации. Установлено, что резонансная мода обладает одной осью симметрии в цилиндрическом резонаторе и двумя осями симметрии в кольцевом резонаторе. Показано, что резонансная мода с двумя осями симметрии позволяет реализовать эффективный оптический резонатор в пересечении гребенчатых фотоннокристаллических волноводов. Исследованы способы оптимизации предложенных резонаторов. Во-первых, рассмотрена оптимизация с помощью введения дополнительной щели в область резонатора. Во-вторых, исследованы возможности нелинейных материалов с различным индексом рефракции. Рассчитанные резонаторы имеют добротность около  $10^4$  и малый модовый объём.

*Ключевые слова:* нанофотоника, оптический нанорезонатор, добротность резонатора, гребенчатый фотоннокристаллический волновод.

### Введение

Оптические резонаторы широко применяются в современной нанофотонике для локализации света [1]. Основными параметрами, которые характеризуют такие резонаторы, являются добротность и модовый объём. Высокодобротные нанорезонаторы с малым модовым объёмом позволяют усилить различные виды взаимодействия света со средой распространения, уменьшить размеры нанофотонного элемента и оптимизировать его дисперсионные характеристики. Нанорезонаторы, в свою очередь, являются элементами новых нанофотонных устройств, например, фильтров, переключателей, детекторов, источников света, оптической памяти. Компактность этих устройств позволяет интегрировать их в микросхемы. Учитывая то, что процесс миниатюризации в производстве электронных микросхем почти достиг теоретического предела, разработка интегральных схем на основе нанофотонных элементов является перспективным направлением развития современной наноиндустрии.

#### 1. Структура оптического нанорезонатора

В качестве простого примера рассмотрим резонатор Фабри–Перо. Добротность резонатора  $Q$  определяется как отношение ширины полосы угловой резонансной частоты к величине этой резонансной частоты, т.е.  $Q = \Delta\omega/\omega_0$ . Можно показать, что  $Q$  пропорциональна времени жизни фотона и обратно пропорциональна размеру резонатора. Поэтому уменьшение расстояния между зеркалами в резонаторе Фабри–Перо приводит к уменьшению величины добротности резонатора. В этом случае, чтобы поддерживать величину добротности постоянной,

необходимо увеличивать отражающую способность зеркал резонатора.

В современных оптических нанорезонаторах зеркалами часто служат фотонные кристаллы. Изготовление нанорезонатора внутри трёхмерного фотонного кристалла является трудной задачей. Поэтому часто используют двухмерные фотонные кристаллы в виде мембраны. В такой мембране свет распространяется за счёт полного внутреннего отражения (ПВО) [2]. Дальнейшим упрощением данной структуры является использование гребенчатых (ridge) фотоннокристаллических волноводов. В таких волноводах ПВО препятствует распространению света в поперечных направлениях. В продольном направлении отражение света в нанорезонаторе обеспечивает фотонный кристалл [3].

Повышение добротности гребенчатого фотоннокристаллического резонатора может достигаться уменьшением потерь как в продольном направлении, так и в поперечных направлениях. К уменьшению потерь в продольном направлении приводит простое наращивание количества слоёв фотонного кристалла. Чтобы уменьшить потери в поперечных направлениях, необходима более тонкая оптимизация структуры нанорезонатора.

Одним из способов оптимизации формы резонансной моды является введение дополнительной переходной области между зоной резонатора и зоной фотонного кристалла [4]. Оптимизация формы резонансной моды позволяет также усилить электрическое поле в заданных областях резонатора. Например, использование щелевого резонатора [5] даёт возможность усилить электрическое поле в щели резонатора на величину  $n_{wg}^2/n_{sl}^2$ , где  $n_{wg}$  – индекс рефракции

волновода,  $n_{sl}$  – индекс рефракции материала, который заполняет щель. С одной стороны, такой подход позволяет уменьшить потери энергии внутри волновода, например, вследствие двухфотонного поглощения света в кремнии. С другой стороны, усиливается взаимодействие света с материалом, которым заполнена щель. Это позволяет эффективно использовать, например, нелинейные оптические материалы.

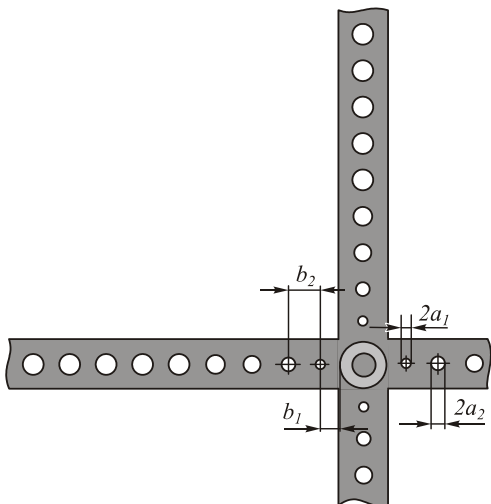


Рис. 1. Структура рассматриваемого оптического нанорезонатора

Рассмотрим связь между количеством энергии, которое регистрируется на выходе нелинейного резонатора, с характеристиками этого резонатора – добротностью и модовым объёмом. Пусть используется нелинейный материал, индекс рефракции которого зависит от интенсивности света следующим образом:

$$n = n_0 + n_2 I, \tag{1}$$

где  $I$  – интенсивность,  $n_2$  – коэффициент нелинейности Керра.

Для нелинейного резонатора значение резонансной частоты зависит от количества энергии в резонаторе в соответствии с соотношением

$$\omega_{res} = \omega_0 + \eta P_{res}, \tag{2}$$

где  $\omega_0$  – резонансная частота линейного резонатора,  $P_{res}$  – энергия, которая содержится в резонаторе,  $\eta$  – константа, которая зависит от коэффициента Керра и обратно пропорциональна величине объёма резонансной моды  $V$ . Понятие объёма резонансной моды  $V$  определено, например, в работе [6].

Согласно теории связанных волн во временной области [7], можно записать следующее выражение для количества энергии в резонаторе:

$$P_{res} = \frac{1/\tau}{(\omega - \omega_{res}) + (1/\tau)^2} P_{in}, \tag{3}$$

где  $P_{in}$  – энергия, подаваемая в резонатор,  $\tau$  – время жизни фотона в резонаторе. Отметим, что добротность резонатора может быть определена как

$Q = \omega_0 \tau / 2$ . Для прямого резонатора количество прошедшей через резонатор энергии равно  $P_{trans} = P_{res} / \tau$ . Выражение (3) может быть преобразовано к следующему виду:

$$\frac{P_{trans}}{P_{in}} = \frac{1}{1 + \left( \frac{P_{trans}}{P_0} + \delta \right)^2}, \tag{4}$$

где  $\delta = (\omega - \omega_0) \tau$  определяет нормализованную величину рассогласования между частотой сигнала и резонансной частотой, величина  $P_0 = 1/(\eta \tau^2)$  определяет коэффициент масштабирования энергии. Таким образом, количество энергии на выходе нелинейного резонатора пропорционально величине  $Q^2/V$ . Это соотношение иллюстрирует важность создания высокодобротных оптических нанорезонаторов с малым модовым объёмом.

В данной работе предлагается новый вид оптического нанорезонатора в пересечении гребенчатых фотоннокристаллических волноводов. В работах [8, 9] были выполнены исследования для пересечений двумерных фотоннокристаллических волноводов мембранного типа. Чтобы получить оптически активное устройство, определённая часть резонатора может быть заполнена нелинейным материалом. В дальнейшем в качестве привнесённого (infiltrated) в резонансную камеру материала мы исследуем использование материалов с различным индексом рефракции.

В данной работе будем считать, что часть резонатора заполнена халькогенидным (chalcogenide) стеклом (ХС). Стёкла этого семейства имеют индекс рефракции в диапазоне 2,3-2,8 для длины волны 1,5 мкм. ХС демонстрируют коэффициент нелинейности на 3 порядка выше, чем у кремния, низкий уровень двухфотонного поглощения и высокое время отклика (<100 фемтосекунд).

На рис. 1 представлен резонатор, который исследовался в данной работе. Резонатор состоит из трёх частей. Во-первых, это гребенчатый фотоннокристаллический волновод. Он имеет ширину  $w = 500$  нм и высоту  $h = 220$  нм. Отверстия в этом волноводе заполнены воздухом, имеют радиус 100 нм и отстоят друг от друга на 385 нм. В расчётной зоне содержится по пять отверстий в каждом из 4 рукавов резонатора. Данный волновод состоит из кремния ( $n = 3,48$ ), лежит на подложке из стекла ( $n = 1,45$ ) и сверху окружён воздухом. Во-вторых, это переходная зона между фотоннокристаллическим волноводом и областью резонансной камеры. Эта зона использована для уменьшения потерь энергии в резонаторе. Положения и радиусы отверстий в этой зоне оптимизированы. Переходная зона содержит 4 отверстия, которые заполнены воздухом. Радиусы этих отверстий и расстояния между ними приведены в табл. 1. В табл. 1 отверстие, ближайшее к резонансной камере, имеет радиус  $a_1$  и отстоит от резонансной

камеры на расстояние  $b_1$ . В-третьих, рассматриваемый нами резонатор содержит собственно резонансную камеру, некоторая часть которой заполнена ХС. На рис. 1 показан резонатор с кольцевой областью ХС. Эта область описывается внешним  $r_2$  и внутренним  $r_1$  радиусами. Данный кольцевой резонатор переходит в цилиндрический резонатор, когда внутренний радиус  $r_1$  становится равным нулю.

Табл. 1. Положения и радиусы отверстий переходной зоны, нм

$a_1$	$b_1$	$a_2$	$b_2$	$a_3$	$b_3$	$a_4$	$b_4$
62	380	74	390	84	390	92	395

**2. Исследование оптического нанорезонатора**

На рис. 2а, б представлены распределения амплитуды электромагнитного поля для цилиндрического и кольцевого резонаторов, соответственно. В резонаторе возбуждалась ТЕ-мода. Расчёты выполнялись с помощью программного параллельного пакета Meep [10], который реализует метод FDTD. По краям трёхмерной расчётной зоны были размещены поглощающие слои. Разрешение вычислительной сетки выбиралось из условия сходимости результатов. Добротность резонатора рассчитывалась с помощью встроенного в Meep гармонического решателя Harminv. На суперкомпьютере с пиковой вычислительной мощностью ~1 ТФлопс время расчёта одной структуры составило ~10 часов.

Отметим, что на обоих распределениях на рис. 2 энергия концентрируется в областях с низким индексом рефракции. Резонансная мода цилиндрического резонатора обладает одной осью симметрии. Это значит, что при подаче энергии в один из рукавов резонатора происходит локализация энергии в областях ХС, которые соответствуют только этому направлению в резонаторе. Свет, распространяющийся в перпендикулярном направлении, эта локализация почти не затрагивает. Данная ситуация меняется, когда мы используем кольцевой резонатор. В кольцевом резонаторе резонансная мода обладает двумя осями симметрии. Причём локализация света происходит в диагональных направлениях. Это позволяет использовать, в частности, нелинейные оптические эффекты, при которых изменение интенсивности света, распространяющегося, например, в горизонтальном направлении, позволяет влиять на свет, распространяющийся в вертикальном направлении. Эта возможность будет подробно рассмотрена в следующей работе.

На рис. 3а показана зависимость величины добротности резонатора от радиуса области ХС для цилиндрического резонатора. Рис. 3б демонстрирует зависимость добротности резонатора от внутреннего радиуса  $r_1$  кольцевого резонатора для нескольких значений внешнего радиуса  $r_2$ . Сравнивая рис. 3, отметим, что кольцевой резонатор позволяет получить большие значения добротности при меньшем модовом объёме.

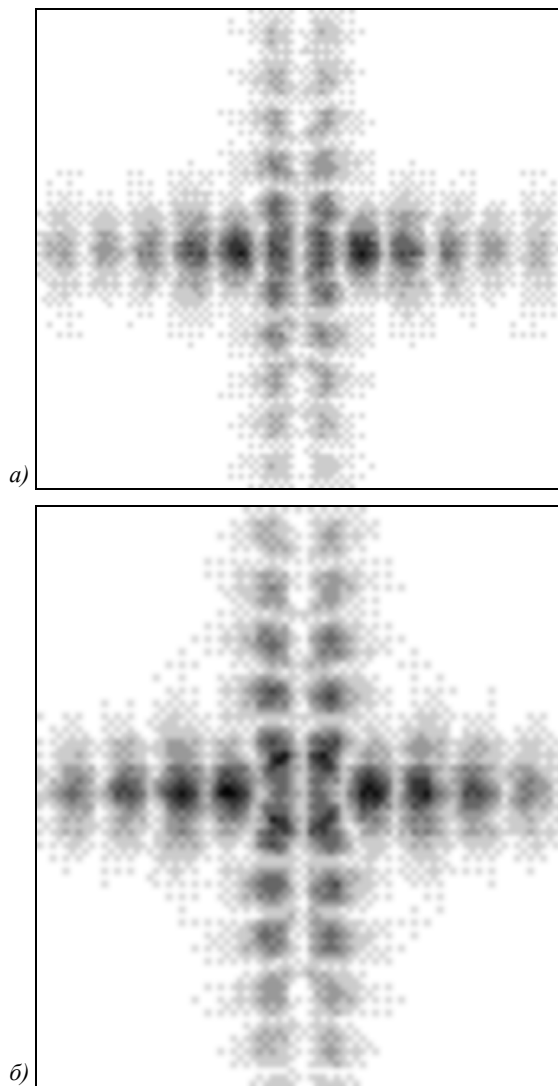


Рис. 2. Распределения амплитуды электромагнитного поля резонансной моды ТЕ-поляризации для цилиндрического (а) и кольцевого (б) нанорезонаторов (негативное изображение)

В работе [8] рассматривался эллиптический резонатор в пересечении фотоннокристаллических волноводов мембранного типа. Для этого случая были получены значения добротности около 1000. Переходная зона между волноводом и резонансной камерой не использовалась.

**3. Оптимизация кольцевого нанорезонатора**

Выполним дальнейшую оптимизацию предложенного нами кольцевого резонатора. Введём вертикальные и горизонтальные разрывы в кольцо области ХС внутри резонатора, как показано на рис. 4. Параметром оптимизации положим ширину этих разрывов  $s$ .

На рис. 5 показана зависимость добротности резонатора от ширины разрывов для нескольких значений  $r_1$  и  $r_2$ . Попытаемся интерпретировать увеличение добротности резонатора при увеличении ширины разрывов кольца.

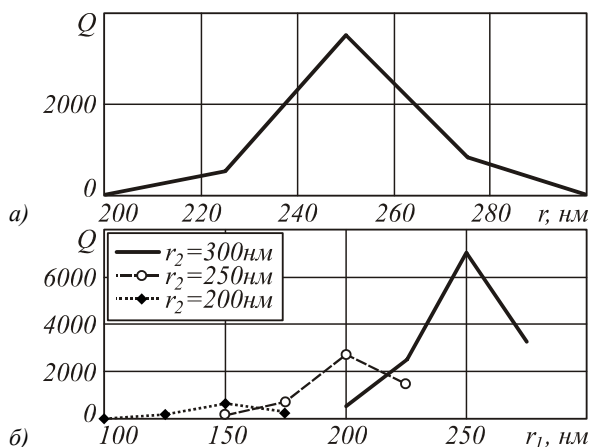


Рис. 3. Зависимость добротности нанорезонатора  $Q$  от радиуса области ХС для цилиндрического резонатора (а) и внешнего  $r_2$  и внутреннего  $r_1$  радиусов области ХС для кольцевого резонатора (б)

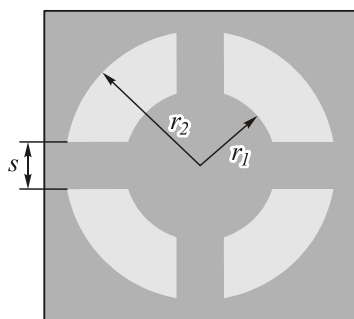


Рис. 4. Структура резонансной камеры кольцевого резонатора с дополнительной щелью

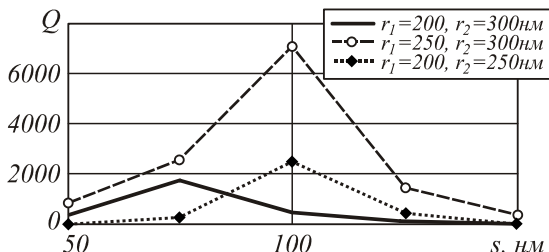


Рис. 5. Зависимость добротности кольцевого резонатора  $Q$  от ширины щели  $s$  для нескольких значений внешнего  $r_2$  и внутреннего  $r_1$  радиусов

Согласно работе [11], в высокодобротном резонаторе эффективный индекс рефракции  $n_{eff}$  резонансной моды должен совпадать с эффективным индексом рефракции волноводной моды зеркал резонатора. Это условие эквивалентно условию равенства волнового вектора резонансной моды и действительной части комплексного волнового вектора волноводной моды. При увеличении ширины разрывов кольца увеличивается доля материала с высоким показателем рефракции в резонаторе. До тех пор, пока это существенно не влияет на первоначальную геометрию резонансной моды, происходит увеличение добротности резонатора.

Ещё одним способом изменения  $n_{eff}$  является варьирование индекса рефракции ХС в резонаторе. Рис. 6 демонстрирует зависимость добротности резонатора от индекса рефракции семейства ХС (2,3-2,8).

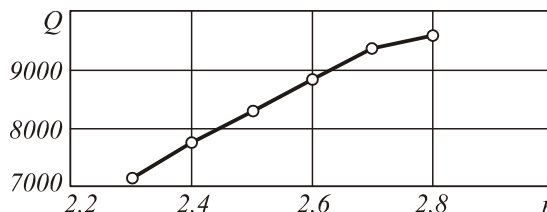


Рис. 6. Зависимость добротности кольцевого резонатора  $Q$  от индекса рефракции ХС  $n$

### Заключение

В работе исследована новая структура оптических нанорезонаторов в пересечении гребенчатых фотоннокристаллических волноводов. Данная структура позволяет сконцентрировать энергию электромагнитного поля в тех областях резонатора, которые содержат материал с низким индексом рефракции. Численно исследовано возбуждение резонансной моды с двумя осями симметрии в пересечении фотоннокристаллических волноводов. Показано, что с помощью дополнительной щели в области привнесённого в резонансную камеру материала можно добиться дополнительной локализации энергии резонансной моды. Исследованы возможности привнесённых материалов с различным индексом рефракции для оптимизации величины показателя добротности нанорезонатора. Предложенные в работе резонаторы имеют добротность около  $10^4$  и малый модовый объём. Полученные значения добротности в несколько раз превышают показатели добротности для пересечений фотоннокристаллических волноводов мембранного типа, приведённые в работе [8].

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 10-07-00109-а, 10-07-00438-а и гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ НШ-7414.2010.9, а также государственных контрактов 07.514.11.4060, 07.514.11.4055.

### Литература

1. **Lalanne, P.** Photon confinement in photonic crystal nanocavities / P. Lalanne, C. Sauvan, J.P. Hugonin // *Laser & Photon.* – 2008. – Rev. 2, N 6. – P. 514–526.
2. **Vuckovic, J.** Optimization of the Q Factor in Photonic Crystal Microcavities / J. Vuckovic, M. Loncar, H. Mabuchi, A. Scherer // *IEEE JQE.* – 2002. – Vol. 38, N 7. – P. 850–856.
3. **Fan, S.** Guided and defect modes in periodic dielectric waveguides / S. Fan, J.N. Winn, A. Devenyi, J.C. Chen, R.D. Meade and J.D. Joannopoulos // *J. Opt. Soc. Am. B.* – 1995. – Vol. 12(7). – P. 1267–1272.
4. **Velha, P.** Ultra-high-reflectivity photonic-bandgap mirrors in a ridge SOI waveguide / P. Velha, J.C. Rodier, P. Lalanne, J.P. Hugonin, D. Peyrade, E. Picard, T. Charvolin, E. Hadji // *New Journal of Physics.* – 2006. – Vol. 8. – P. 1–13.
5. **Almeida, V.R.** Guiding and confining light in void nanostructure / V.R. Almeida, Q. Xu, C.A. Barrios, M. Lipson // *Opt. Letters.* – 2004. – Vol. 29, N 11. – P. 1209–1211.
6. **Coccioli, R.** Smallest possible electromagnetic mode volume in a dielectric cavity / R. Coccioli, M. Boroditsky, K.W. Kim, Y. Rahmat-Samii, E. Yablonovitch // *IEE Proc. Opto.* – 1998. – Vol. 145. – P. 391–397.

7. **Fan, S.** Temporal coupled mode theory for Fano resonances in optical resonators / S. Fan, W. Suh, J.D. Joannopoulos // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 2003. – Vol. 20. – P. 569-573.
8. **Yanik, M.F.** All-optical transistor action with bistable switching in photonic crystal cross-waveguide geometry / M.F. Yanik, S. Fan, M. Soljacic, J.D. Joannopoulos // *Opt. Lett.* – 2003. – Vol. 28. – P. 2506-2508.
9. **Казанский, Н.Л.** Расчёт оптимальных пересечений фотоннокристаллических волноводов методом передаточной матрицы / Н.Л. Казанский, П.Г. Серафимович, С.И. Харитонов // *Известия Самарского научного центра РАН.* – 2002. – Т. 4, № 2. – С. 300-307.
10. **ab-initio.mit.edu/meep/** [Электронный ресурс]. – Проверено 15.08.2011.
11. **Sauvan, M.** Modal-reflectivity enhancement by geometry tuning in photonic crystal microcavities / C. Sauvan, G. Lecamp, P. Lalanne, J. Hugonin // *Opt. Express.* – 2005. – Vol. 13. – P. 245–255.

### References

1. **Lalanne, P.** Photon confinement in photonic crystal nanocavities / P. Lalanne, C. Sauvan, J.P. Hugonin // *Laser & Photon.* – 2008. – Rev. 2, N 6. – P. 514–526.
2. **Vuckovic, J.** Optimization of the Q Factor in Photonic Crystal Microcavities / J. Vuckovic, M. Loncar, H. Mabuchi, A. Scherer // *IEEE JQE.* – 2002. – Vol. 38, N 7. – P. 850-856.
3. **Fan, S.** Guided and defect modes in periodic dielectric waveguides / S. Fan, J.N. Winn, A. Devenyi, J.C. Chen, R.D. Meade and J.D. Joannopoulos // *J. Opt. Soc. Am. B.* – 1995. – Vol. 12(7). – P. 1267-1272.
4. **Velha, P.** Ultra-high-reflectivity photonic-bandgap mirrors in a ridge SOI waveguide / P. Velha, J.C. Rodier, P. Lalanne, J.P. Hugonin, D. Peyrade, E. Picard, T. Charvolin, E. Hadji // *New Journal of Physics.* – 2006. – Vol. 8. – P. 1-13.
5. **Almeida, V.R.** Guiding and confining light in void nanostructure / V.R. Almeida, Q. Xu, C.A. Barrios, M. Lipson // *Opt. Letters.* – 2004. – Vol. 29, N 11. – P. 1209-1211.
6. **Coccioli, R.** Smallest possible electromagnetic mode volume in a dielectric cavity / R. Coccioli, M. Boroditsky, K.W. Kim, Y. Rahmat-Samii, E. Yablonovitch // *IEE Proc. Opto.* – 1998. – Vol. 145. – P. 391-397.
7. **Fan, S.** Temporal coupled mode theory for Fano resonances in optical resonators / S. Fan, W. Suh, J.D. Joannopoulos // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 2003. – Vol. 20. – P. 569-573.
8. **Yanik, M.F.** All-optical transistor action with bistable switching in photonic crystal cross-waveguide geometry / M.F. Yanik, S. Fan, M. Soljacic, J.D. Joannopoulos // *Opt. Lett.* – 2003. – Vol. 28. – P. 2506–2508.
9. **Kazanskiy, N.L.** Calculation of optimal crosssections of photonic crystals waveguides by transfer matrix method / N.L. Kazanskiy, P.G. Serafimovich, S.I. Kharitonov // *Izvestia of Samara Science Center RAS.* – 2002. – V. 4, N 2. – P. 300-307. – (in Russian).
10. **ab-initio.mit.edu/meep/** Controlled 15.08.2011.
11. **Sauvan, M.** Modal-reflectivity enhancement by geometry tuning in photonic crystal microcavities / C. Sauvan, G. Lecamp, P. Lalanne, J. Hugonin // *Opt. Express.* – 2005. – Vol. 13. – P. 245–255.

## OPTICAL NANORESONATOR IN THE RIDGE OF PHOTONIC CRYSTAL WAVEGUIDES CROSSING

*N.L. Kazanskiy, P.G. Serafimovich, S.N. Khonina  
S.P. Korolev Samara State Aerospace University,  
Image Processing Systems Institute RAS*

### Abstract

A new geometry of nonlinear optical resonators in the ridge photonic crystal waveguides is suggested and numerically studied. The symmetry features of resonance modes are explored. It is established that the resonance mode has one axis of reflection symmetry axis for the cylindrical resonator and two axes of reflection symmetry for the ring resonator. It is demonstrated that the resonance mode with two axes of symmetry permits to construct an effective optical resonator. Two ways of optimization of the suggested resonators are explored. First, the optimization with the slit is considered. Second, the different infiltrated materials are investigated. The calculated resonators have the quality factor value about  $10^4$  and a small mode volume.

**Key words:** nanophotonics; optical nanoresonator; quality factor; ridge photonic crystal waveguide.

### Сведения об авторах



**Казанский Николай Львович**, 1958 года рождения. В 1981 году с отличием окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне – Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ) по специальности «Прикладная математика». Доктор физико-математических наук (1996 год), профессор, работает заместителем директора по научной работе и заведующим лабораторией дифракционной оптики Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН), профессором кафедры технической кибернетики СГАУ. Руководитель научно-образовательного центра компьютерной оптики, созданного совместно ИСОИ РАН и СГАУ, заведующий базовой (СГАУ в ИСОИ РАН) кафедрой высокопроизводительных вычислений. Является членом международных научных обществ *SPIE* и *IAPR*. Н.Л. Казанский – специалист в области дифракционной оптики, математиче-

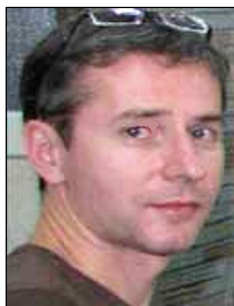


ского моделирования, обработки изображений и нанофотоники. В списке научных работ Н.Л. Казанского 240 статей, 7 монографий, 35 авторских свидетельств и патентов.

Страница в интернете: <http://www.ipsi.smr.ru/staff/kazansky.htm>.

E-mail: [kazansky@smr.ru](mailto:kazansky@smr.ru).

**Nikolay Lvovich Kazanskiy** (b. 1958) graduated with honours (1981) from the S. P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute (presently, S. P. Korolyov Samara State Aerospace University (SSAU)), majoring in Applied Mathematics. He received his Candidate in Physics & Maths (1988) and Doctor in Physics & Maths (1996) degrees from Samara State Aerospace University. He is the vice-director for research and the head of Diffractive Optics laboratory at the Samara Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences (IPSI RAS), holding a part-time position of professor at SSAU's Technical Cybernetics sub-department. He is the manager of the Research & Education Center of Computer Optics established jointly by SSAU and IPSI RAS, holding the chair of SSAU's base sub-department of High-Performance Computing at IPSI RAS. He is a SPIE and IAPR member. He is co-author of 240 scientific papers, 7 monographs, and 35 inventions and patents. His current research interests include diffractive optics, mathematical modeling, image processing, and nanophotonics.



**Серафимович Павел Григорьевич**, кандидат физико-математических наук; старший научный сотрудник Учреждения Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН. Области научных интересов: моделирование и проектирование нанооптических устройств, методы исследования фотонных кристаллов, разработка и исследование программных средств распределенной и параллельной обработки крупноформатных изображений.

E-mail: [serp@smr.ru](mailto:serp@smr.ru).

**Pavel Grigorievich Serafimovich**, Candidate in Physics and Mathematics; senior researcher at the Image Processing Systems Institute of RAS. His areas of research are nanooptics, simulation and design of photonic crystals, parallel and distributed image processing.



**Хонина Светлана Николаевна**, доктор физико-математических наук, профессор Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва; ведущий научный сотрудник Учреждения Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН. Области научных интересов: дифракционная оптика, сингулярная оптика, модовые и поляризационные преобразования, оптическое манипулирование, оптическая и цифровая обработка изображений.

E-mail: [khonina@smr.ru](mailto:khonina@smr.ru).

**Svetlana Nikolaevna Khonina**, Doctor of Physics & Math; Professor of the Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov; Leading researcher at the Image Processing Systems Institute of the RAS. Research interests: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing.

*Поступила в редакцию 15 ноября 2011 г.*