

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЯЗАННЫХ ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА

Егоров А.В., Казанский Н.Л., Серафимович П.Г.

Институт систем обработки изображений РАН,

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет) (СГАУ)

### Аннотация

Предложен и численно исследован способ двукратного повышения чувствительности оптического резонансного датчика. В качестве иллюстрации предложенного подхода рассчитан датчик на основе одного и двух связанных фотонно-кристаллических резонаторов. Продемонстрировано соответствие между аналитическим и численным подходами к моделированию. Исследованы допуски погрешностей изготовления предложенного устройства на основе связанных фотонно-кристаллических резонаторов. Показаны причины, которые приводят к тому, что погрешности изготовления уменьшают добротность резонансной системы, состоящей из двух резонаторов. Рассмотрены возможности компенсации погрешностей изготовления предложенного устройства.

**Ключевые слова:** интегрированные на кристалле устройства, чувствительность, оптический резонансный датчик, массивы фотонно-кристаллических резонаторов.

### Введение

Разработка датчиков показателя преломления материалов на основе оптических микрорезонаторов привлекает большое внимание [1]. Такие датчики используются, например, в биологических [2] и химических [3] исследованиях, при измерениях температуры, механического напряжения, в акустике. Достигнуты величины добротности оптических резонаторов на уровне  $10^6$  и выше. Данные значения добротности могут быть увеличены путём использования активных резонаторов [4] с оптической или электронной накачкой. Столь большие величины добротности оптических резонаторов обеспечивают датчикам на их основе высокую чувствительность.

Кроме этого, особенности функционирования резонансных датчиков допускают возможность получения динамического отклика в режиме реального времени. Также допускается использование широкого диапазона исследуемых образцов. Это могут быть, например, различные химические соединения в жидкой и газообразной форме или исследуемые биомолекулы. Оптические резонансные датчики демонстрируют хорошую совместимость с требованиями микрофлюидики. Это делает их хорошими кандидатами для использования в составе интегрированных решений в виде биочипов или «лаборатории на кристалле» (*lab-on-a-chip*). Ещё одним преимуществом оптических резонансных датчиков по сравнению с традиционными датчиками является то, что устраняется необходимость в использовании флуоресцентных меток.

Существуют примеры использования различных видов оптических резонаторов в датчиках показателя преломления. Например, были предложены датчики на основе сферических резонаторов [5]. Дисковые резонаторы в качестве компонентов оптических датчиков рассмотрены в работе [6].

Датчики показателя преломления на основе кольцевых резонаторов [7] являются, пожалуй, наиболее распространённым решением. Они легко интегриру-

ются на кристалле, и для них существуют отработанные технологии изготовления. Оптические датчики на основе фотонно-кристаллических резонаторов рассматриваются, в частности, в работе [8].

В оптических датчиках, как правило, свет подаётся в резонансную камеру через одномодовый волновод. Спектр пропускания резонатора имеет форму кривой Лоренца. Кривизна склона этой кривой зависит от величины добротности резонатора и определяет чувствительность датчика.

Оптические датчики на основе кольцевых резонаторов более компактны, чем, например, датчики на основе сферических или дисковых резонаторов. Их размеры составляют десятки микрон по обоим направлениям плоскости кристалла.

Предлагаемые в данной работе решения демонстрируются на наиболее компактных на сегодняшний день оптических датчиках показателя преломления материалов на основе фотонно-кристаллических резонаторов (ФК) [9, 10]. Их размеры, как правило, не превышают величины нескольких длин волн используемого света.

### 1. Постановка задачи

На рис. 1 показана предлагаемая схема оптической системы из двух связанных резонаторов. Фазовая задержка связи резонаторов составляет величину  $\theta$ . Здесь переменные  $\kappa_j$ ,  $j = \{1, 2\}$ , обозначают коэффициенты связности  $j$ -го резонатора с волноводом,  $r_j$ ,  $j = \{1, 2\}$  – коэффициенты энергетических потерь  $j$ -го резонатора в пространство,  $p_{in}$ ,  $p_{rf}$ ,  $p_{tr}$  – амплитуды входного, отражённого и прошедшего полей соответственно.

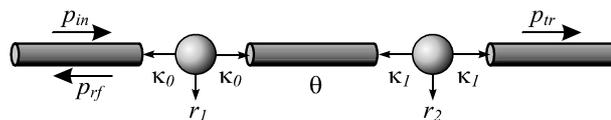


Рис. 1. Схема оптической системы из двух связанных с фазовой задержкой резонаторов

Согласно временной теории связанных мод (СМТ) [11], функцию пропускания одного резонатора можно записать в виде

$$T_1(s_j) = \frac{2\kappa_j}{s_j + 2\kappa_j}, s_j = \mathbf{i}(\omega - \omega_j) + r_j, j = \{1, 2\}, \quad (1)$$

где  $\omega_j, j = \{1, 2\}$  – резонансная частота  $j$ -го резонатора. Добротность  $j$ -го резонатора  $Q_j$  определяется соотношением  $1/Q_j = 1/Q_{jk} + 1/Q_{jr}$ , где  $Q_{jk} = \omega_j/(4\kappa_j)$  и  $Q_{jr} = \omega_j/(2r_j)$ .

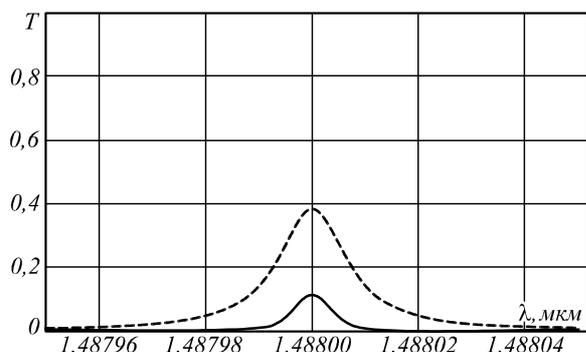


Рис. 2. Функции пропускания одного резонатора (штриховая линия) и двух связанных резонаторов при  $\theta = \pi/2$  (сплошная линия)

Функция пропускания системы из двух резонаторов, которая изображена на рис. 1, при  $\theta = \pi/2$  записывается в виде

$$T_2(s) = \frac{\mathbf{i}2\kappa_0\kappa_1}{(s + \kappa_0)^2 + \kappa_1^2}. \quad (2)$$

Дисперсией волновода мы здесь пренебрегаем. Набег фазы  $\theta = \pi/2$  соответствует ситуации, при которой связывающий волновод отсутствует.

На рис. 2 показаны штриховой линией функция пропускания одного резонатора согласно формуле (1) и сплошной линией функция пропускания двух таких же связанных резонаторов согласно формуле (2). Видно, что использование двух резонаторов вместо одного позволяет повысить добротность системы. Добротность системы с одним резонатором составила  $Q_1 = 1,5 \times 10^5$ , резонансная длина волны  $\lambda_0 = 1,488$  мкм. Внешние потери данного резонатора определяются величиной  $Q_{jr} = 2,5 \times 10^5$ .

## 2. Расчёт оптической системы на основе связанных фотонно-кристаллических резонаторов

В качестве конкретного ФК-резонатора рассчитаем резонатор на основе двумерного гребенчатого ФК-волновода. Такие резонаторы обладают малой площадью и естественным образом интегрируются в волноводную геометрию соединений на кристалле. На рис. 3а показан резонатор на основе гребенчатого ФК-волновода. Дефект, в котором возбуждается резонансная мода, формируется уменьшением радиуса отверстий в окрестности резонансной камеры.

На рис. 3б приведены геометрические параметры отверстий в окрестности резонансной камеры. Эти геометрические параметры обеспечивают для заданной длины волны света возникновение энергетиче-

ской запрещённой зоны (*bandgap*) для ТЕ-поляризации в волноводе.

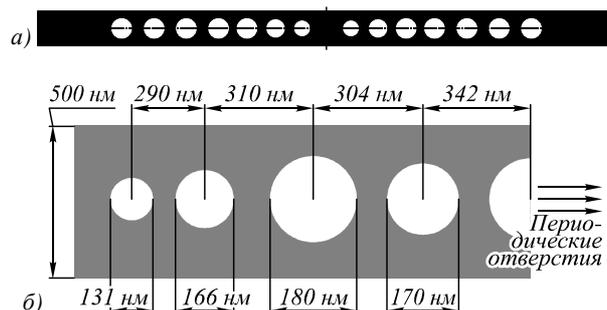


Рис. 3. Резонатор на основе гребенчатого ФК-волновода в кремнии (а), геометрические параметры резонансной камеры (б)

Для расчёта характеристик резонатора использовался двумерный метод FDTD [12]. Волновод имеет ширину  $w = 500$  нм и состоит из материала с показателем преломления, равным 2,97. Такая величина соответствует эффективному показателю преломления волновода из кремния толщиной 270 нм, который лежит на стеклянной подложке и окружён воздухом.

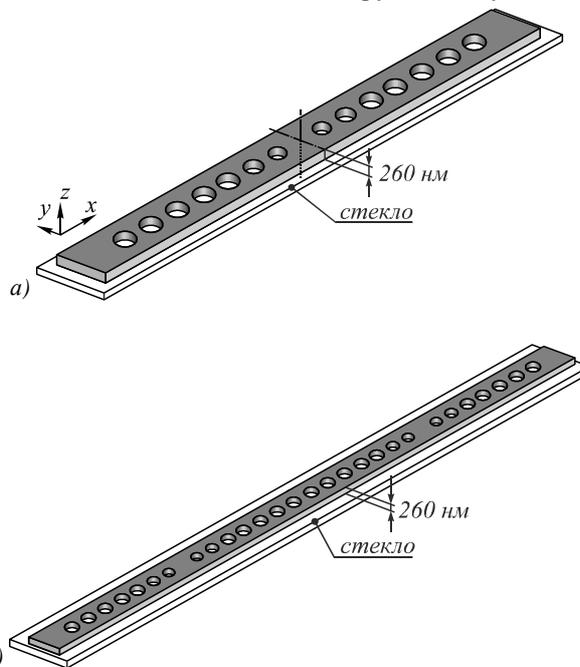


Рис. 4. Пример трёхмерного резонатора с тремя регулярными отверстиями на основе ФК-волновода на подложке (а), система, состоящая из двух связанных трёхмерных резонаторов (б)

На рис. 4а изображён трёхмерный резонатор с тремя регулярными отверстиями на основе ФК-волновода на подложке. На рис. 4б показана система из двух таких резонаторов. Отверстия в регулярной части волновода заполнены воздухом, имеют диаметр 185 нм и отстоят друг от друга на  $a = 350$  нм. Длина волны резонансной моды равна 1488,27 нм. Добротность одного резонатора с 8 регулярными отверстиями с каждой стороны равна 156413. Внешние потери данного резонатора определяются величиной  $Q_{jr} = 2,56 \times 10^5$ . Эти величины примерно соответству-

ют параметрам резонатора, функция пропускания которого изображена на рис. 2.

### 3. Результаты вычислительного эксперимента

На рис. 5 показаны отсчёты функции пропускания для систем из одного и двух резонаторов. Отсчёты функции рассчитаны с использованием метода FDTD. Параметры базового резонатора соответствуют параметрам, которые приведены на рис. 4б. Видно, что кривые на рис. 5 соответствуют кривым на рис. 2 с хорошей степенью точности.

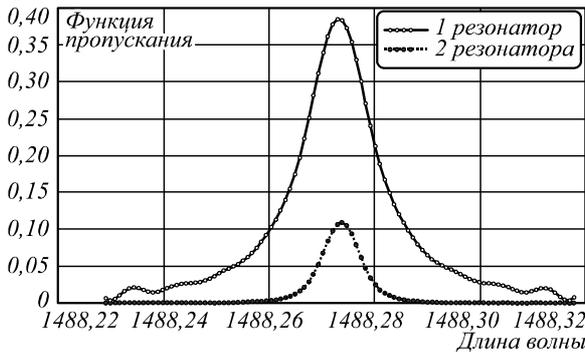


Рис. 5. Отсчёты функции пропускания одного (интерполированы точечной линией) и двух (интерполированы сплошной линией) резонаторов, рассчитанные методом FDTD

На рис. 6 показаны функции пропускания для систем из двух резонаторов, рассчитанные аналитически (сплошная линия) и методом FDTD (отсчёты интерполированы точечной линией). Период регулярной части ФК-волновода составляет 350 нм. Поэтому отсутствие связывающего волновода ( $\theta = \pi/2$ ) соответствует значению  $d = 350$  нм. Однако на рис. 6 видно, что почти полное соответствие между кривой, заданной аналитическим выражением (2) при  $\theta = \pi/2$ , и результатом FDTD-моделирования достигается при  $d = 354$  нм. Это может быть объяснено тем, что брэгговская частота фотонно-кристаллического волновода не совпадает с резонансной частотой. В этом случае, чтобы реализовать условие  $\theta = \pi/2$ , требуется дописать фрагмент волновода между резонаторами [3].

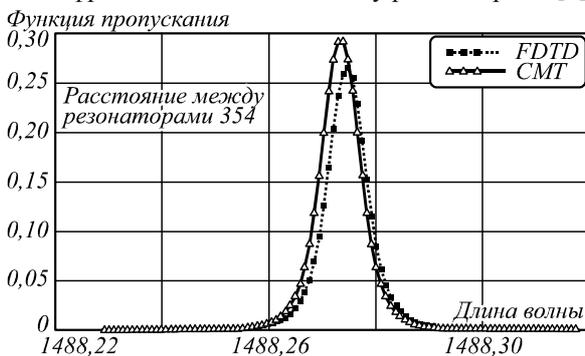


Рис. 6. Функции пропускания для систем из двух резонаторов при  $\theta = \pi/2$ , рассчитанные при помощи теории связанных мод (сплошная линия) и методом FDTD (отсчёты интерполированы точечной линией)

Чувствительность резонансной системы может быть наглядно оценена крутизной склона спектраль-

ного пика. Например, в датчиках показателя преломления крутизна склона спектрального пика соответствует скорости изменения функции пропускания при изменении показателя преломления окружающей среды. На рис. 7 показаны производные спектральных пиков функций пропускания систем из одного (точечная линия) и двух (сплошная линия) резонаторов, полученные FDTD-моделированием.

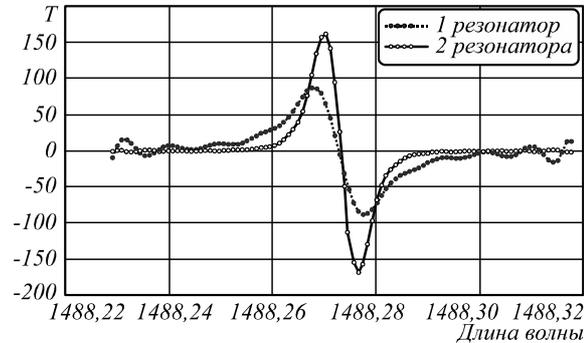


Рис. 7. Производные спектральных пиков функций пропускания систем из одного (точечная линия) и двух (сплошная линия) резонаторов

Из рис. 7 видно, что максимальное значение производной спектрального пика функции пропускания для системы из двух связанных резонаторов примерно в два раза больше соответствующего значения для одного резонатора. Это приводит к лучшей чувствительности системы из двух резонаторов по сравнению с одним резонатором. Для используемых параметров резонаторов это улучшение чувствительности достигается, однако, увеличением требуемого уровня энергии входного сигнала, что можно видеть на рис. 5. Тем не менее, очевидные аналитические расчёты показывают, что различие между максимумами функций пропускания одного и двух резонаторов может быть уменьшено путём сокращения внешних энергетических потерь. Например, для  $Q_1 = 1,5 \times 10^5$  и  $Q_{jr} = 2,5 \times 10^6$  это различие составляет 3 %.

### 4. Численный анализ погрешностей изготовления резонаторов

С помощью численного моделирования покажем, как погрешности при изготовлении одинарных и связанных резонаторов влияют на смещение частот резонансных мод резонаторов и на добротность резонансной системы.

В табл. 1 приведены результаты моделирования влияния погрешностей изготовления одного ФК-резонатора. Варьировались радиусы отверстий в ФК-волноводе. Погрешность радиуса каждого отверстия полагалась случайным числом, которое равномерно распределено в интервале  $\pm 1$ ,  $\pm 2$ ,  $\pm 3$ ,  $\pm 4$  или  $\pm 5$  нм. Столь упрощённая схема моделирования влияния погрешностей изготовления обусловлена, прежде всего, тем, что расчёт характеристик одного резонатора методом FDTD занимает несколько часов машинного времени на вычислительном кластере пиковой мощностью 1 ТФлопс. Из табл. 1 видно, что при погрешности  $\pm 5$  нм сдвиг резонансной частоты может достигать 3 нм. При этом с ростом погрешности значение

добротности резонатора может как уменьшиться, так и увеличиться.

Табл. 2 демонстрирует результаты моделирования влияния погрешностей изготовления системы из двух связанных ФК-резонаторов. Здесь изменения функции пропускания обусловлены, прежде всего, рассогласованием двух резонаторов по резонансным длинам волн. При таком рассогласовании резонансные моды резонаторов перестают быть вырожденными, что приводит к уширению спектрального пика функции пропускания.

Табл. 1. Значения резонансной длины волны и добротности при различных величинах погрешности для системы из одного ФК-резонатора

Погрешность, нм	Длина волны, нм	Добротность
±0	1488,2	156413
±1	1488,2	156435
±2	1488,3	153050
±3	1489,2	183318
±4	1490,7	110346
±5	1491,2	97482

Табл. 2. Значения резонансной длины волны и добротности при различных величинах погрешности для системы из двух связанных ФК-резонаторов

Погрешность, нм	Длина волны, нм	Добротность
±0	1488,2	252739
±1	1487,1	172461
±2	1484,8	110686
±3	1483,6	312560
±4	1482,8	180881
±5	1482,5	297793

Таким образом, индивидуальная подстройка резонансной длины волны каждого резонатора позволит хотя бы частично компенсировать невырожденность резонансных мод. Динамическая подстройка резонансной длины волны каждого резонатора может быть реализована изменением показателя преломления волновода. Для этого может быть использован, например, эффект Керра, инъекция свободных носителей (*free carriers*) или температурное воздействие. Среди этих способов температурное воздействие допускает реализацию на наименьшей частоте. Однако для описанной здесь резонансной системы высокая скорость изменения резонансной длины волны не требуется.

В последнее время в качестве способа изменения показателя преломления в ФК-резонаторе часто используется инъекция свободных носителей. Возможны оптическая или электронная накачки свободных носителей в ФК-резонатор. Если сравнивать с оптической накачкой, то возможность электронной накачки рассмотренного резонатора обеспечивает способы практи-

ческой реализации предложенного в данной работе устройства.

### Заключение

В работе рассмотрен способ двукратного повышения добротности оптической резонансной системы. Рассчитано устройство на основе одного и двух связанных фотонно-кристаллических резонаторов. Показано хорошее соответствие между аналитическим и численным моделированием. Исследованы допуски погрешностей изготовления предложенного устройства на основе фотонно-кристаллических резонаторов. Предложены методы компенсации погрешностей изготовления предложенного датчика.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №№ 13-07-97002, 13-07-13166, 14-07-97008, 14-07-97009, Программ №№ 2 и 5 фундаментальных исследований ОНИТ РАН и Министерства образования и науки РФ.

### Литература (References)

1. **Quan, Q.** Single particle detection in CMOS compatible photonic crystal nanobeam cavities / Q. Quan, D.L. Floyd, I.B. Burgess, P.B. Deotare, I.W. Frank, S.K. Tang, M. Loncar // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21. – P. 32225-32233.
2. **Vollmer, F.** Protein detection by optical shift of a resonant microcavity / F. Vollmer, D. Braun, A. Libchaber, M. Khoshshima, I. Teraoka, S. Arnold // *Applied Physics Letters*. – 2002. – Vol. 80. – P. 4057-4059.
3. **Robinson, J.T.** On-chip gas detection in silicon optical microcavities / J.T. Robinson, L. Chen, M. Lipson // *Optics Express*. – 2008. – Vol. 16. – P. 4296-4301.
4. **Yang, J.** Optical sensors based on active microcavities / J. Yang, L.J. Guo // *IEEE Electronics Letters*. – 2006. – Vol. 12. – P. 143-147.
5. **Arnold, S.** Shift of whispering-gallery modes in microspheres by protein adsorption / S. Arnold, M. Khoshshima, I. Teraoka, S. Holler, F. Vollmer // *Optics Letters*. – 2003. – Vol. 28. – P. 272-274.
6. **Boyd, R.W.** Sensitive disk resonator photonic biosensor / R.W. Boyd, J.E. Heebner // *Applied Optics*. – 2001. – Vol. 40. – P. 5742-5747.
7. **White, I.M.** Liquid-core optical ring-resonator sensors / I.M. White, H. Oveys, X. Fan // *Optics Letters*. – 2006. – Vol. 31. – P. 1319-1321.
8. **Lee, M.R.** Two-dimensional silicon photonic crystal based biosensing platform for protein detection / M.R. Lee, P.M. Fauchet // *Optics Express*. – 2007. – Vol. 15. – P. 4530-4535.
9. **Akahane, Y.** Fine-tuned high-Q photonic-crystal nanocavity / Y. Akahane, T. Asano, B.-S. Song, S. Noda // *Optics Express*. – 2005. – Vol. 13(4). – P. 1202-1214.
10. **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, and E. Hadji // *New Journal of Physics (IOP)*. – 2006. – Vol. 8(204). – P. 1-13.
11. **Haus, H.A.** *Waves and Fields in Optoelectronics* / H.A. Haus. – Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1984.
12. **Taflove, A.** *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method* / A. Taflove, S.C. Hagness. – 3rd ed. – Norwood, MA: Artech House, 2005.

**USING COUPLED PHOTONIC CRYSTAL CAVITIES FOR INCREASING OF SENSOR SENSITIVITY**

*A.V. Egorov, N.L. Kazanskiy, P.G. Serafimovich  
Image Processing Systems Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
Samara State Aerospace University*

**Abstract**

A two-fold way to increase the sensitivity of the optical sensor is proposed and numerically investigated. The sensor based on the coupled photonic crystal cavities is calculated as an illustration of the proposed approach. The correspondence between analytical and numerical modeling approach is demonstrated.

*Keywords:* integrated on chip devices, optical sensor, coupled photonic crystal cavities.

**Сведения об авторах**

**Егоров Александр Валериевич**, студент Самарского государственного аэрокосмического университета (национальный исследовательский университет). Области научных интересов: методы FDTD и FEM, моделирование и проектирование нанооптических устройств, методы исследования фотонных кристаллов, массивы фотонно-кристаллических резонаторов.

E-mail: [avegrv@gmail.com](mailto:avegrv@gmail.com).

**Alexander Valerievich Egorov**, student of Samara State Aerospace University. His areas of research are nanooptics, simulation and design of photonic crystals, FDTD and FEM methods, photonic crystal cavities arrays.

**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. Врио директора Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН), профессор 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 OSA, SPIE и IAPR. Н.Л. Казанский – специалист в области дифракционной оптики, математического 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 honors (1981) from 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 director 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 OSA-, 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.

*Сведения об авторе Серафимович Павел Григорьевич – см. стр. 151 этого номера.*

*Поступила в редакцию 1 апреля 2015 г.  
Окончательный вариант – 15 апреля 2015 г.*