

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФОТОННОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ ПО ВРЕМЕНИ

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

Продемонстрирована способность оптических резонаторов общего вида выполнять дифференцирование временных оптических сигналов по времени. Получены аналитические зависимости характеристик таких резонаторов на основе временной теории связанных мод. Рассчитан компактный дифференцирующий нанорезонатор на основе гребенчатых фотоннокристаллических волноводов.

Ключевые слова: оптический нанорезонатор, фотоннокристаллический волновод, резонансная мода, оптическое дифференцирование.

Введение

Оптическая реализация базовых вычислительных операций способна повысить уровень аналоговой обработки сигналов [1]. В последнее время были предложены оптические дифференциаторы на основе решёток Брэгга [2], интерферометра [3], кольцевого резонатора [4], дифракционных решёток с волноводным резонансом [5, 6].

В данной работе для исследования оптических резонаторов мы будем использовать временную теорию связанных мод (ВТСМ) [7]. Согласно этой теории исследуемая система представляется набором основных взаимосвязанных компонентов и анализируется исходя из общих принципов, таких как закон сохранения энергии. Поэтому результаты, полученные с использованием ВТСМ, применимы к целому классу рассматриваемых устройств.

1. Постановка задачи и предложенный подход

Описание работы оптического резонатора общего вида основывается на двух компонентах. Во-первых, на элементе резонатора, который содержит локализованные моды, возбуждаемые в резонаторе. Во-вторых, на элементах резонатора, которые содержат распространяющиеся моды, закачивающие энергию в резонатор или забирающие её через каналы ввода/вывода. На рис. 1 схематично показан резонатор с двумя каналами ввода/вывода. В данной работе мы ограничимся этой конфигурацией, хотя приведённый анализ аналогичным образом может быть выполнен для резонаторов с любым количеством каналов ввода/вывода. Резонансная камера характеризуется резонансной частотой ω_0 и временем затухания τ_1, τ_2 ($\tau_w = \tau_1 + \tau_2$), вызванного потерями в каждом из каналов ввода/вывода. Время затухания τ_r определяет потери на рассеяние в самой камере. Приходящие в резонатор моды и исходящие из него моды описываются комплексными амплитудами $s_{l\pm}, l=1, 2$. Комплексная амплитуда A характеризует энергию, содержащуюся в резонаторе. Для случая слабого взаимодействия между компонентами системы, при котором A убывает экспоненциально, можно записать следующие уравнения [7]

$$\frac{dA}{dt} = -i\omega_0 A - \frac{A}{\tau_r} - \sum_{l=1}^2 \frac{A}{\tau_l} - \sum_{l=1}^2 \sqrt{\frac{2}{\tau_l}} s_{l+}, \quad (1)$$

$$s_{l-} = -s_{l+} + \sqrt{\frac{2}{\tau_l}} A. \quad (2)$$

Для гармонически осциллирующего электромагнитного поля при условии, что $s_{2+} = 0$, можно получить комплексную амплитуду отражённого поля в одном из каналов

$$R(\omega) = \frac{s_{1-}}{s_{1+}} = - \frac{i(\omega - \omega_0) - \frac{1}{\tau_r}}{i(\omega - \omega_0) + \frac{1}{\tau}}, \quad (3)$$

где $1/\tau = 1/\tau_w + 1/\tau_r$.

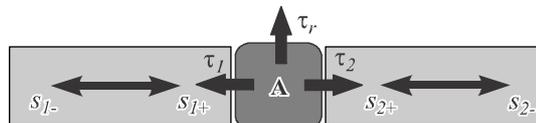


Рис. 1. Схема резонатора с двумя каналами ввода/вывода.

Потери в каждом из каналов ввода/вывода характеризуются временем затухания τ_1, τ_2 ($\tau_w = \tau_1 + \tau_2$). Потери на рассеяние в самой камере характеризуются величиной τ_r . Комплексные амплитуды $s_{l\pm}, l=1, 2$ определяют энергию, приходящую в резонатор и исходящую из него. Комплексная амплитуда A характеризует энергию, содержащуюся в резонаторе

Для определения коэффициентов при производных различных порядков огибающей входного сигнала воспользуемся процедурой, которая аналогична описанной в работах [5, 8]. Разложим комплексную амплитуду отражённого поля в ряд Тейлора. Коэффициенты этого ряда выражаются в виде

$$R(\omega_0) = \frac{\tau}{\tau_r},$$

$$R^{(n)}(\omega_0) = -(-1)^n n! \tau^n \left(1 + \frac{\tau}{\tau_r}\right), \quad n > 0. \quad (4)$$

Учёт энергетических потерь резонатора приводит к тому, что в отличие от коэффициентов разложений в работах [5, 8] $R(\omega_0) \neq 0$. Для минимизации значения $R(\omega_0)$ необходимо, чтобы потери на рассеяние в

резонаторе были значительно меньше потерь через каналы ввода/вывода, т.е. $\tau_r \gg \tau_w$.

Для оценки качества дифференцирования используем сигнал с гармонической огибающей, как описано в работе [5], в которой исследовались дифракционные решётки с волноводным резонансом. В отражённом сигнале вес слагаемого, соответствующего производной n -го порядка, равен

$$E_n = \sqrt{\frac{\Omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\Omega} \left(\tau^n \left(1 + \frac{\tau}{\tau_r} \right) \cos^{(n)}(\Omega t) \right)^2 dt}, \quad n > 0. \quad (5)$$

Здесь величина Ω задаёт период сигнала с гармонической огибающей.

После вычисления интеграла данное выражение можно записать в виде

$$E_0 = \frac{\tau}{\sqrt{2\tau_r}}, \quad E_n = \frac{\tau + \tau_r}{\sqrt{2\tau_r}} \tau^n \Omega^n, \quad n > 0. \quad (6)$$

Критерием оптимизации резонатора, формирующего первую производную, является максимизация коэффициента E_1 по отношению к сумме остальных коэффициентов. При условии $\tau_r \gg \tau_1 + \tau_2$ это отношение можно записать в виде

$$\frac{E_1}{\sum_{n \neq 1} E_n} \approx \frac{1}{\tau^2 \Omega^2 - (\tau/\tau_r)(1 - \tau\Omega)}. \quad (7)$$

Данное выражение позволяет оценить минимальную длительность импульса, для которой обеспечивается приемлемое качество дифференцирования. Например, если потери на рассеяние меньше потерь на излучение в каналы ввода/вывода на два порядка, т.е. $\tau/\tau_r = 10^{-2}$, то при длительности импульса ~ 100 пс отношение $E_1/\sum_{n \neq 1} E_n$ составляет примерно 100.

2. Резонатор на основе гребенчатых фотоннокристаллических волноводов

Для иллюстрации вышеописанного подхода к реализации дифференцирующих резонаторов рассчитаем резонатор на основе гребенчатых фотоннокристаллических волноводов (ГФВ) (ridge photonic crystal waveguide) [9]. Резонатор на основе ГФВ представляет из себя плоский волновод, который в области резонансной камеры пронизывают вертикальные отверстия (верхняя вставка на рис. 2). Такой резонатор компактен по сравнению с дифференцирующими резонаторами на основе решёток Брэгга. В отличие от дифракционных решёток с волноводным резонансом поперечные размеры резонатора на основе ГФВ составляют порядка одной длины волны. Кроме этого, резонатор на основе ГФВ легко интегрируется в плоские нанофотонные устройства.

В ГФВ полное внутреннее отражение препятствует распространению света в поперечных направлениях. В продольном направлении отражение света в нанорезонаторе обеспечивает фотонный кристалл [10].

Для создания оптического резонатора с высокой добротностью Q ($Q = \omega_0 \tau / 2$) используем структуру, состоящую из двух частей (верхняя вставка на

рис. 2). Во-первых, это фотоннокристаллические зеркала, которые содержат одинаковые равноотстоящие друг от друга отверстия в волноводах. Чем больше этих отверстий, тем меньше потерь в каналах ввода/вывода и, соответственно, больше Q_w ($Q_w = \omega_0 \tau_w / 2$). Волновод имеет ширину $w = 710$ нм и высоту $h = 230$ нм. Отверстия в волноводе заполнены воздухом, имеют радиус $R = 88$ нм и отстоят друг от друга на $a = 330$ нм. Эти геометрические параметры обеспечивают возникновение энергетической запрещённой зоны (bandgap) для ТЕ-поляризации в волноводе. Данный волновод состоит из кремния ($n = 3,46$) и окружён воздухом.

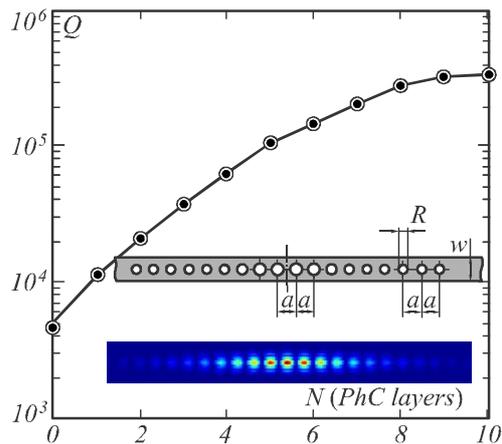


Рис. 2. Зависимость добротности резонатора от количества фотоннокристаллических слоёв в зеркалах резонатора. Верхняя вставка на рисунке изображает структуру рассчитанного нанорезонатора. Нижняя вставка на рисунке показывает распределение модуля электрического поля в рассчитанном резонаторе

Вторым элементом структуры является переходная зона между фотоннокристаллическим волноводом и областью резонансной камеры. Эта зона использована для уменьшения потерь на рассеяние в резонаторе. Величина Q_r ($Q_r = \omega_0 \tau_r / 2$) может быть увеличена минимизацией тех Фурье-гармоник резонансной моды, которые находятся внутри светового конуса волновода [11]. Это достигается изменением коэффициента заполнения ячейки f ($f = \pi R^2 / (aw)$) по квадратичной зависимости. При этом обеспечивается затухание резонансной моды по гауссовой кривизне. Первые 10 отверстий (считая от центра) обеспечивают изменение коэффициента заполнения ячейки от 0,2 до 0,1. При этом радиус отверстий меняется от 155 до 88 нм. Импульсный источник излучения располагается в левой части волновода на рис. 2. Центральная частота импульса составляет $1,2 \cdot 10^6$ ГГц (длина волны 1,55 мкм) и соответствует положению запрещённой зоны фотоннокристаллического волновода.

Расчёт характеристик резонансных камер выполнялся с помощью параллельного 3D метода FDTD [12]. По краям трёхмерной расчётной зоны были размещены поглощающие слои. Разрешение вычислительной сетки выбиралось из условия сходимости результатов.

Параметры времени затухания резонатора $\tau = \tau_1 + \tau_2$, τ , рассчитывались путём наращивания количества фотоннокристаллических слоёв в зеркалах резонатора. На рис. 2 показана зависимость добротности резонатора от количества данных слоёв. Предел насыщения даёт нам значение $\tau = 10^{-10}$. Для пяти фотоннокристаллических слоёв в зеркалах резонатора $\tau = 10^{-12}$. Дифференцирующий резонатор должен обладать сравнительно невысокой совокупной добротностью Q по сравнению с резонаторами для других приложений [11]. Это позволяет охватывать достаточно широкий спектральный диапазон при обработке коротких импульсов. Небольшая величина добротности резонатора приводит к малой величине отражённого сигнала на резонансной частоте. Используя выражение (4), получим для данного резонатора $|R(\omega_0)|^2 = 10^{-4}$.

На рис. 3 показаны коэффициенты E_n и результаты дифференцирования импульса, огибающая которого задана функцией $\exp(-x^2/(2\sigma^2))$. График на рис. 3а показывает первые шесть коэффициентов E_n для сигнала длительностью ~ 10 пс. Результат дифференцирования такого сигнала рассчитанным нанорезонатором показан на рис. 3б. Среднеквадратическое отклонение (СКО) между аналитическим (сплошная линия) и численным (линия с длинным пунктиром) результатами составила 21%. Линия с коротким пунктиром показывает исходный импульс. Рис. 3в, г демонстрируют аналогичные результаты для сигнала длительностью ~ 50 пс. СКО между аналитическим и численным результатами в этом случае составила 12%. На рис. 3д, е представлены результаты для сигнала длительностью ~ 100 пс. СКО составила 2%.

3. Анализ результатов

В работе [13] приведена классификация ранее предложенных дифференциаторов временных сигналов по максимальной частоте дифференцируемых импульсов. Оптоволоконные решётки с большим периодом позволяют дифференцировать сигналы с частотой более терагерца [14, 15]. Оптоволоконные решётки Брэгга способны дифференцировать сигналы с частотой до 10-100 ГГц [8, 16]. Кольцевые резонаторы качественно дифференцируют сигналы с частотой до 10 ГГц. Например, в работе [4] был изготовлен кольцевой резонатор радиусом 40 мкм. Предлагаемый нами нанорезонатор на основе гребенчатых фотоннокристаллических волноводов способен дифференцировать сигналы с частотой до 10 ГГц. При этом размеры данного нанорезонатора (ширина – менее 1 мкм, длина – около 7 мкм) в десятки раз меньше, чем любого из вышеперечисленных устройств. Таким образом, преимуществом рассчитанного нанорезонатора по сравнению с предлагавшимися ранее дифференцирующими устройствами является его компактность и удобство реализации в составе интегральных фотонных устройств.

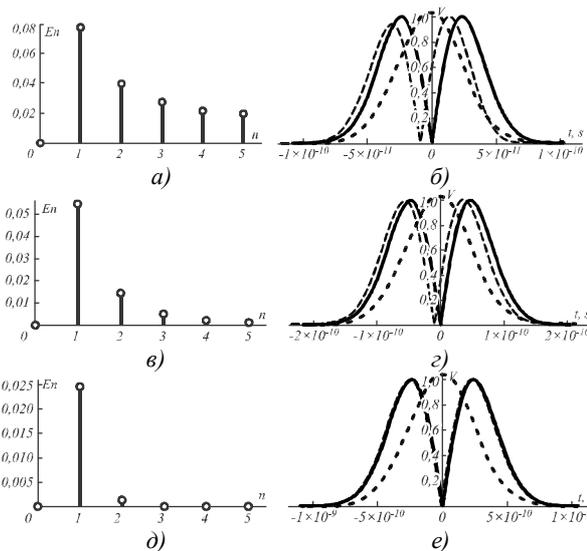


Рис. 3. Коэффициенты E_n и результаты дифференцирования импульса, огибающая которого задана функцией $\exp(-x^2/(2\sigma^2))$. Пояснения – в тексте

Заключение

В работе рассчитан нанорезонатор на основе гребенчатых фотоннокристаллических волноводов, который позволяет с малой погрешностью дифференцировать сигналы длительностью более 100 пс. Полученные аналитические выражения общего вида позволяют оценить качество дифференцирования сигнала для различных параметров нанорезонатора и дифференцируемого сигнала.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 10-07-00109-а, 10-07-00438-а, 10-07-00553-а, 11-07-00153-а, 11-07-12051, 11-07-13164-офи-м-2011-РЖД и гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ НШ-4128.2012.9 и ФЦП «Кадры» Минобрнауки (соглашение 8231).

Литература

1. Гаврилов, А.В. Перспективы создания оптических аналоговых вычислительных машин / А.В. Гаврилов, В.А. Соيفер // Компьютерная оптика. – 2012. – Т. 36, № 2. – С. 140-150.
2. Kulishov, M. Design of terahertz-bandwidth arbitrary-order temporal differentiators based on long-period fiber gratings / M. Kulishov, D. Krcmarik, and R. Slavik // Opt. Lett. – 2007. – Vol. 32, N 20. – P. 2978-2980.
3. Park, Y. Ultrafast all-optical first- and higher-order differentiators based on interferometers / Y. Park, J. Azaña, and R. Slavik // Opt. Lett. – 2007. – Vol. 32, N 6. – P. 710-712.
4. Liu, F. Compact optical temporal differentiator based on silicon microring resonator / F. Liu, T. Wang, L. Qiang, T. Ye, Z. Zhang, M. Qiu and Y. Su // Opt. Express – 2008. – Vol. 16, N 20. – P. 15880-15886.
5. Bykov, D. Temporal differentiation of optical signals using resonant gratings / D. Bykov, L. Doskolovich, V. Soifer // Opt. Lett. – 2011. – Vol. 36. – P. 3509-3511.
6. Головастиков, Н.В. Резонансные дифракционные решётки для дифференцирования оптических импульсов в отражении / Н.В. Головастиков, Д.А. Быков,

- Л.Л. Досколович, В.А. Соифер // Компьютерная оптика. – 2012. – Т. 36, № 2. – С. 151-157.
7. **Joannopoulos, J.** Photonic Crystals – Molding the Flow of Light / J. Joannopoulos [et al.]. – 2nd ed. – Princeton, 2008.
 8. **Li, M.** Arbitrary-order all-fiber temporal differentiator based on a fiber Bragg grating: design and experimental demonstration / M. Li, D. Janner, J. Yao and V. Pruneri // Opt. Express. – 2009. – Vol. 17, N 22. – P. 19798-19807.
 9. **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.
 10. **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.
 11. **Quan, Q.** Deterministic design of high Q, small mode volume photonic crystal nanobeam cavities / Q. Quan and M. Loncar // Opt. Express – 2011. – Vol. 19, N 5. – P. 18529-18542.
 12. **Taflove, A.** Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method / A. Taflove and S.C. Hagness. – 3rd ed. – Norwood, MA: Artech House, 2005.
 13. **Ashrafi, R.** Figure of merit for photonic differentiators / R. Ashrafi and J. Azaña // Optics Express. – 2012. – Vol. 20, N 3. – P. 2626-2639.
 14. **Ashrafi, R.** Ultrafast optical arbitrary-order differentiators based on apodized long period gratings / R. Ashrafi, M.H. Asghari and J. Azaña // IEEE Photon. J. – 2011. – Vol. 3, N 3. – P. 353-364.
 15. **Slavík, R.** Terahertz-bandwidth high-order temporal differentiators based on phase-shifted long-period fiber gratings / R. Slavík, Y. Park, M. Kulishov and J. Azaña // Opt. Lett. – 2009. – Vol. 34, N 20. – P. 3116-3118.
 16. **Rivas, L.M.** Experimental demonstration of ultrafast all-fiber high-order photonic temporal differentiators / Luis M. Rivas, Sylvain Boudreau, Yongwoo Park, Radan Slavik, Sophie LaRochelle, Alejandro Carballar, José Azaña // Opt. Letters. – 2009. – Vol. 34(12). – P. 1792-1794.
- References**
1. **Gavrilov, A.V.** Perspectives of development of analogous computers / A.V. Gavrilov, V. Soifer. // Computer Optics. – 2012. – V. 36, N 2. – P. 140-150. – (In Russian).
 2. **Kulishov, M.** Design of terahertz-bandwidth arbitrary-order temporal differentiators based on long-period fiber gratings / M. Kulishov, D. Krmarik and R. Slavík // Opt. Lett. – 2007. – Vol. 32, N 20. – P. 2978-2980.
 3. **Park, Y.** Ultrafast all-optical first- and higher-order differentiators based on interferometers / Y. Park, J. Azaña and R. Slavík // Opt. Lett. – 2007. – Vol. 32, N 6. – P. 710-712.
 4. **Liu, F.** Compact optical temporal differentiator based on silicon microring resonator / F. Liu, T. Wang, L. Qiang, T. Ye, Z. Zhang, M. Qiu and Y. Su // Opt. Express – 2008. – Vol. 16, N 20. – P. 15880-15886.
 5. **Bykov, D.** Temporal differentiation of optical signals using resonant gratings / D. Bykov, L. Doskolovich, V. Soifer // Opt. Lett. – 2011. – Vol. 36. – P. 3509-3511.
 6. **Golovastikov, N.V.** Resonance diffractive gratings for differentiation of optical impulses in reflection / N.V. Golovastikov, D. Bykov, L. Doskolovich, V. Soifer // Computer Optics. – 2012. – V. 36, N 2. – P. 151-157. – (In Russian).
 7. **Joannopoulos, J.** Photonic Crystals - Molding the Flow of Light / J. Joannopoulos [et al.]. – 2nd ed. – Princeton, 2008.
 8. **Li, M.** Arbitrary-order all-fiber temporal differentiator based on a fiber Bragg grating: design and experimental demonstration / M. Li, D. Janner, J. Yao and V. Pruneri // Opt. Express – 2009. – Vol. 17, N 22. – P. 19798-19807.
 9. **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.
 10. **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.
 11. **Quan, Q.** Deterministic design of high Q, small mode volume photonic crystal nanobeam cavities / Q. Quan and M. Loncar // Opt. Express – 2011. – Vol. 19, N 5. – P. 18529-18542.
 12. **Taflove, A.** Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method / A. Taflove and S.C. Hagness. – 3rd ed. – Norwood, MA: Artech House, 2005.
 13. **Ashrafi, R.** Figure of merit for photonic differentiators / R. Ashrafi and J. Azaña // Optics Express. – 2012. – Vol. 20, N 3. – P. 2626-2639.
 14. **Ashrafi, R.** Ultrafast optical arbitrary-order differentiators based on apodized long period gratings / R. Ashrafi, M.H. Asghari and J. Azaña // IEEE Photon. J. – 2011. – Vol. 3, N 3. – P. 353-364.
 15. **Slavík, R.** Terahertz-bandwidth high-order temporal differentiators based on phase-shifted long-period fiber gratings / R. Slavík, Y. Park, M. Kulishov and J. Azaña // Opt. Lett. – 2009. – Vol. 34, N 20. – P. 3116-3118.
 16. **Rivas, L.M.** Experimental demonstration of ultrafast all-fiber high-order photonic temporal differentiators / Luis M. Rivas, Sylvain Boudreau, Yongwoo Park, Radan Slavik, Sophie LaRochelle, Alejandro Carballar, José Azaña // Opt. Letters. – 2009. – Vol. 34(12). – P. 1792-1794.

USE OF PHOTONIC CRYSTAL RESONATORS FOR DIFFERENTIATION OF OPTICAL IMPULSES IN TIME

N.L. Kazanskiy, P.G. Serafimovich, S.N. Khonina

Image Processing Systems Institute of the RAS,

S.P. Korolyov Samara State Aerospace University (National Research University)

Abstract

The ability of general optical resonators to perform differentiation of optical signals in time. Analytical dependencies for such resonators are obtained with temporal coupled wave theory. A compact nanocavity-aided differentiator based on ridged photonic-crystal waveguide is designed.

Key words: optical nanoresonator; photonic crystal waveguide; resonance mode; optical differentiation.

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, математического моделирования, обработки изображений и нанопластики. 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.

Nikolay Lvovich Kazansky (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 распределённой и параллельной обработки крупноформатных изображений.

E-mail: 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.

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 11 октября 2012 г.