

ФОРМИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЁХМЕРНЫХ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

Дьяченко П.Н., Карпеев С.В., Павельев В.С.

Учреждение Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН,
Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Аннотация

Разработан способ формирования трёхмерных металлодиэлектрических фотонных кристаллов на основе изготовления полимерных структур методом интерференционной литографии с последующим нанесением нанослоя золота методом магнетронного напыления. Запись полимерной матрицы осуществлялась излучением гелий-кадмиевого лазера на длине волны 442 нм в фоторезисте SU-8. Исследованы спектры отражения полученных фотонных кристаллов в инфракрасном диапазоне. На основе данных спектрометрии сделан вывод о появлении фотонной запрещённой зоны с центром на длине волны 2,6-2,8 мкм.

Ключевые слова: фотонные кристаллы, интерференционная литография.

Фотонными кристаллами принято называть среды, у которых диэлектрическая проницаемость периодически меняется в пространстве с периодом, допускающим брэгговскую дифракцию света [1]. Фотонные кристаллы могут быть использованы для создания устройств прикладной оптики, таких как оптические фильтры, демультимплексоры, волноводы, лазеры и т. д. [1, 2].

Синтез трёхмерных фотонных кристаллов представляет собой сложную технологическую задачу, что связано с малым размером деталей, их большим количеством и трёхмерным характером расположения, а также с ограниченностью выбора материала. На сегодняшний день известно несколько способов решения данной задачи, каждый из которых обладает существенными недостатками для успешной реализации концепции фотонных кристаллов на практике. Один из способов – многократное повторение хорошо отработанных методов традиционной (двумерной) литографии [3]. С помощью электронной литографии, например, сначала формируются двумерные периодические структуры путём селективного травления с использованием шаблонов, затем новые слои последовательно наносятся поверх существующих. Недостатком таких структур является высокая трудоёмкость и сложность изготовления большого числа слоёв (периодов).

Трёхмерно-периодическая структура может быть получена сверлением материала в трёх направлениях. В частности, так может быть получена структура, известная как «яблоновит» (“yablonovite”), предложенная Е. Яблоновичем и имеющая симметрию, аналогичную симметрии решётки алмаза и структуре «поленицы» [4]. Для оптического диапазона длин волн структура яблоновита была реализована при помощи сверления материала сфокусированным ионным пучком [5].

Другим методом является использование двухфотонной стереолитографии. При помощи этого метода в объёме фоторезиста последовательной, «точечной», записью сфокусированным излучением фемтосекундного лазера могут формироваться произвольные трёхмерные структуры с разрешением

около 100 нм [6, 7]. Поглощение света фоторезистом на определённой длине волны приводит к реакции полимеризации. Двухфотонный характер поглощения излучения позволяет добиться того, что этот процесс локализован трёхмерно только областью перетяжки пучка, а не распределён вдоль оси пучка, что обеспечивает возможность формирования трёхмерных структур.

Одним из перспективных методов в настоящее время является метод интерференционной литографии, состоящий в экспонировании фоторезиста трёхмерной интерференционной картиной [8]. В результате, при такой записи решётки можно обеспечить почти идеальную периодичность структуры. Данный метод отличается также высокой скоростью изготовления – весь объём решетки экспонируется одновременно, низкая стоимость (для реализации не требуется систем точного позиционирования) и возможность получения достаточно больших образцов. К недостаткам метода следует отнести невысокое разрешение, которое ограничено длиной волны излучения, используемого для экспонирования фотоматериала, а также отсутствием гибкости при выборе формы узла решётки.

Полимерные матрицы фотонных кристаллов не могут иметь полные запрещённые зоны в силу недостаточного значения показателя преломления полимера. Для того, чтобы обойти данную проблему, в ряде работ предложено наносить нанослой металла на полимерную матрицу [9-12]. В работе [11] был нанесён слой меди на полимерную матрицу фотонного кристалла, полученную методом двухфотонной полимеризации. В работе [10] методом электроосаждения на полимерную матрицу, полученную методом двухфотонной полимеризации, был нанесён слой никеля толщиной 300 нм. Авторами работы [10] были измерены коэффициенты отражения таких фотонных кристаллов; было экспериментально обнаружено, что на длине волны, равной примерно периоду решётки, у фотонного кристалла возникает запрещённая зона.

Таким образом, неисследованными являются задачи разработки методов синтеза и исследования

трёхмерных металлодиэлектрических фотонных кристаллов на основе комбинации методов интерференционной литографии и магнетронного напыления отражающего металлического слоя.

Результаты

Для формирования трёхмерной решётки из фоторезиста методом интерференционной литографии использовалось трёхкратное экспонирование плёнки фоторезиста картиной интерференции двух волн аналогично тому, как это было сделано в работе [13].

На рис. 1 представлены электронные фотографии полученного фотонного кристалла. Период решётки составил 2,5 мкм. Представленные на рис. 1 решётки не позволяют существовать фотонной запрещённой зоне, поэтому в дальнейшем производилось нанесение нанослоя золота на сформированную полимерную решётку. Полученные полимерные матрицы

фотонных кристаллов не могут иметь полные запрещённые зоны в силу недостаточного значения показателя преломления полимера. Для того чтобы обойти проблему недостаточного значения показателя преломления полимера, необходимо нанести на поверхность полимера другой материал, обладающий высоким показателем преломления. В качестве такого материала было выбрано золото по причине того, что оно имеет небольшое поглощение в видимой и инфракрасной областях спектра.

Методом магнетронного распыления (SPI-Module Sputter Coater (США)) на фотонные кристаллы был нанесён слой золота толщиной 50 нм. Толщина слоя определялась при помощи кварцевого датчика толщины (SPI Quartz Crystal Thickness Monitor Model 12161). Электронные фотографии полученных образцов представлены на рис. 2.

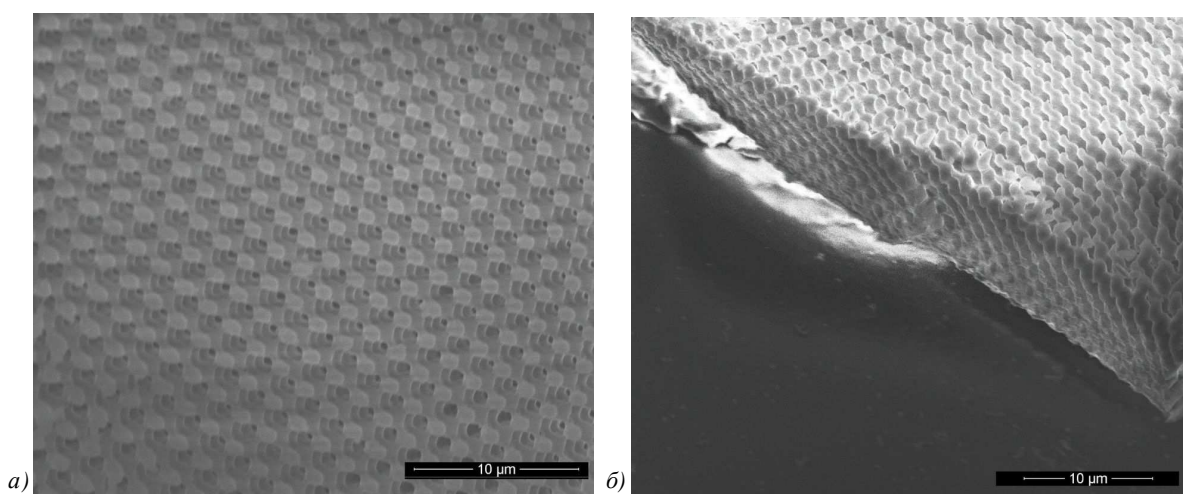


Рис. 1. Электронные фотографии поверхности полимерной трёхмерной решётки (а) и её среза (б)

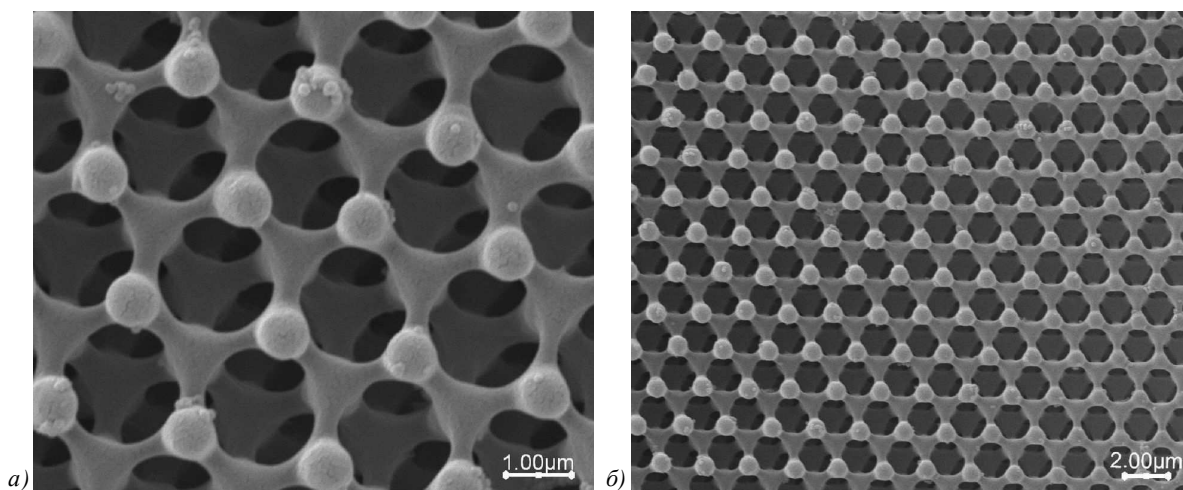


Рис. 2. Электронные фотографии фотонного кристалла с напылённым на него слоем золота толщиной 50 нм

Изображение, полученное при наклоне подложки на 60°, представлено на рис. 3.

Для исследования оптических свойств фотонных кристаллов использовался инфракрасный микроскоп Nuperion 1000 (Bruker Optics (Германия)) с фурье-

спектрометром Tensor 27 (Bruker Optics (Германия)), при помощи которого измерялись коэффициенты отражения структур. Коэффициенты отражения фотонных кристаллов получались путём нормирования полученных спектров структур к спектрам золотого

зеркала. Полученные спектры отражения представлены на рис. 4. Кривой 1 обозначен спектр отражения фотонного кристалла, полученный при помощи объектива скользящего падения $15\times$. Данный объектив позволяет получать интегральные спектры отражения для пучка, сходящегося под углами от 52° до 84° к нормали.

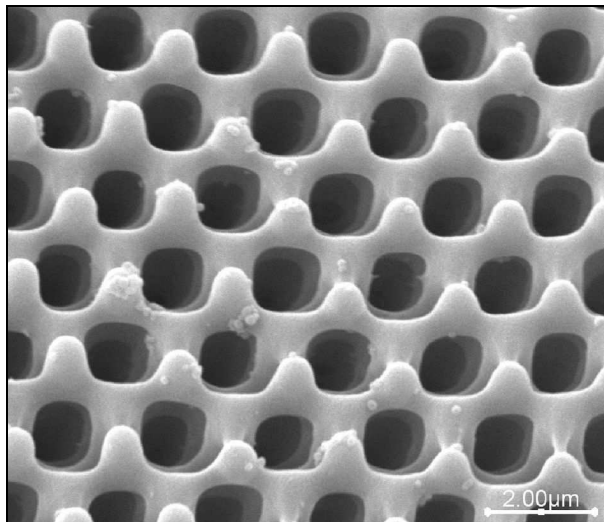


Рис. 3. Электронная фотография фотонного кристалла с напылённым на него слоем золота 50 нм. Изображение получено под углом 60°

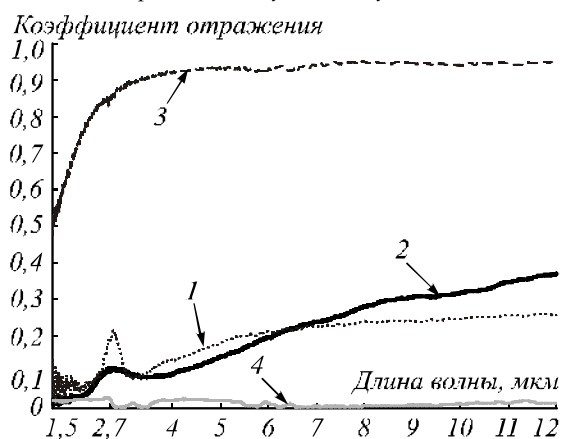


Рис. 4. Спектры отражения фотонного кристалла с периодом 2,6 мкм. Кривая 1 – спектр от объектива скользящего падения $15\times$, кривая 2 – спектр от ИК-объектива Schwarzschild $15\times$, кривая 3 – спектр отражения плёнки золота на фотополимере SU-8, кривая 4 – спектр отражения фотонного кристалла без нанесённого слоя золота

Кривой 2 обозначен спектр отражения фотонного кристалла, полученный при помощи ИК-объектива Schwarzschild $15\times$. Данный объектив позволяет получать интегральные спектры отражения для пучка, сходящегося под углами от 15° до 30° к нормали. Кривой 3 отмечен спектр отражения плёнки золота на фотополимере SU-8, полученный от объектива Schwarzschild $15\times$. Кривой 4 отмечен спектр отражения фотонного кристалла без нанесённого слоя золота, полученный от объектива Schwarzschild $15\times$. Как

можно заметить из кривых 1 и 2 на рис. 4, в спектре отражения фотонного кристалла присутствует пик на длине волны 2,6-2,8 мкм, что соответствует периоду решётки фотонного кристалла. Данный пик в спектре отражения указывает на появление фотонной запрещённой зоны с центром на длине волны 2,6-2,8 мкм. Кроме того, можно заметить разницу в величине пика на кривых 1 и 2, что объясняется различием в углах падения пучка и неоднородностью напыления слоя золота по глубине. Относительно небольшая интенсивность пика может объясняться неоднородностью слоя золота или недостаточным числом периодов фотонного кристалла. Данные результаты спектрометрии хорошо согласуются с результатами работы [10], в которой методом конечных разностей было показано появление фотонной запрещённой зоны у трёхмерного фотонного кристалла с периодом решётки 3 мкм, покрытого слоем никеля. Положение запрещённой зоны примерно соответствовало периоду фотонного кристалла [10].

Заключение

Разработан и исследован способ формирования металлодиэлектрических фотонных кристаллов на основе применения метода интерференционной литографии с последующим нанесением нанослоя золота. Исследованы спектры отражения полученных фотонных кристаллов в инфракрасном диапазоне. На основе данных спектрометрии сделан вывод о появлении фотонной запрещённой зоны с центром на длине волны 2,6-2,8 мкм.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (госконтракты № 14.740.11.0016 и № 14.740.11.0041), российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (грант CRDF PG08-014-1), грантов Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-7414.2010.9), фонда некоммерческих программ «Династия» и РФФИ 10-07-00438.

Литература

1. **Johnson, S.J.** Photonic Crystals: The Road from Theory to Practice / S.J. Johnson, J.D. Joannopoulos. – London: Kluwer Academic Publishers, 2003. – 156 p.
2. **Сойфер, В.А.** Дифракционные оптические элементы в устройствах нанофотоники / В.А. Сойфер, В.В. Котляр, Л.Л. Досколович // Компьютерная оптика – 2009. – Т. 33, № 4. – С. 352-368.
3. Дифракционная компьютерная оптика / под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2007. – 736 с.
4. **Yablonoich, E.** Photonic band structure: The face-centered-cubic case employing nonspherical atoms / E. Yablonoich, T.J. Gmitter, K.M. Leung, // Phys. Rev. Lett. – 1991. – Vol. 67 – P. 2295-2298.
5. **Chelnokov, A.** Near-infrared Yablonovite-like photonic crystals by focused-ion-beam etching of macroporous silicon / A. Chelnokov, K. Wang, S. Rowson, P. Garoche,

- and J.-M. Lourtioz // *Appl. Phys. Lett.* – 2000. – Vol. 77. – P. 2943-2945.
6. **Maruo, S.** Three-dimensional microfabrication with two-photon absorbed photopolymerization / S. Maruo, O. Nakamura, and S. Kawata // *Optics Letters* – 1997. – Vol. 22, No. 2. – P. 132–134.
 7. **Ostendorf, A.** Two-Photon Polymerization: A new Approach to Micromachining / A. Ostendorf, B. Chichkov // *Photonics Spectra*. – 2006. – No. 10. – P. 72-80.
 8. **Campbell, M.** Fabrication of photonic crystals for the visible spectrum by holographic lithography / M. Campbell, D.N. Sharp, M.T. Harrison, R.G. Denning, A.J. Turberfield // *Nature*. – 2000. – Vol. 404. – P. 53-56.
 9. **Kaneko, K.** Metal-nanoshelled three-dimensional photonic lattices / K. Kaneko, K. Yamamoto, S. Kawata, H. Xia, J.-F. Song, and H.-B. Sun // *Opt. Lett.* – 2008. – Vol. 33. – P. 1999-2001.
 10. **Mizeikis, V.** Fabrication and properties of metallo-dielectric photonic crystal structures for infrared spectral region / V. Mizeikis, S. Juodkakis, R. Tarozaitė, J. Juodkazyte, K. Juodkakis, H. Misawa // *Opt. Express*. – 2007. – Vol. 15. – P. 8454-8464.
 11. **Tal, A.** Fabrication and characterization of three-dimensional copper metallodielectric photonic crystals / A. Tal, Y.-S. Chen, H.E. Williams, R.C. Rumpf, S.M. Kuebler // *Opt. Express*. – 2007. – Vol. 15. – P. 18283-18293.
 12. **Walsh, T.A.** High-temperature metal coating for modification of photonic band edge position / T.A. Walsh, J.A. Bur, Y.-S. Kim, T.-M. Lu, and S.-Y. Lin // *J. Opt. Soc. Am. B*. – 2009. – Vol. 26(7). – P. 1450-1455.
 13. **Микляев, Ю.В.** Интерференционно-литографический синтез трехмерных фотонных кристаллов с использованием излучения, слабо поглощаемого фоторезистом / Ю.В. Микляев, С.В. Карпеев, П.Н. Дьяченко, В.С. Павельев, С.Д. Полетаев // *Компьютерная оптика*. – 2008. – Т. 32, № 4. – С. 357-360.
 3. **Diffraction Computer Optics** / edited by V.A. Soifer. – Moscow: “Fizmatlit” Publisher, 2007. – 736 p. – (in Russian).
 4. **Yablonovich, E.** Photonic band structure: The face-centered-cubic case employing nonspherical atoms / E. Yablonovich, T.J. Gmitter, K.M. Leung, // *Phys. Rev. Lett.* – 1991. – Vol. 67. – P. 2295-2298.
 5. **Chelnokov, A.** Near-infrared Yablonovite-like photonic crystals by focused-ion-beam etching of macroporous silicon / A. Chelnokov, K. Wang, S. Rowson, P. Garoche, and J.-M. Lourtioz // *Appl. Phys. Lett.* – 2000. – Vol. 77. – P. 2943-2945.
 6. **Maruo, S.** Three-dimensional microfabrication with two-photon absorbed photopolymerization / S. Maruo, O. Nakamura, and S. Kawata // *Optics Letters*. – 1997. – Vol. 22, No. 2. – P. 132-134.
 7. **Ostendorf, A.** Two-Photon Polymerization: A new Approach to Micromachining / A. Ostendorf, B. Chichkov // *Photonics Spectra*. – 2006. – N. 10. – P. 72-80.
 8. **Campbell, M.** Fabrication of photonic crystals for the visible spectrum by holographic lithography / M. Campbell, D.N. Sharp, M.T. Harrison, R.G. Denning, A.J. Turberfield // *Nature*. – 2000. – Vol. 404. – P. 53-56.
 9. **Kaneko, K.** Metal-nanoshelled three-dimensional photonic lattices / K. Kaneko, K. Yamamoto, S. Kawata, H. Xia, J.-F. Song, and H.-B. Sun // *Opt. Lett.* – 2008. – Vol. 33. – P. 1999-2001.
 10. **Mizeikis, V.** Fabrication and properties of metallo-dielectric photonic crystal structures for infrared spectral region / V. Mizeikis, S. Juodkakis, R. Tarozaitė, J. Juodkazyte, K. Juodkakis, H. Misawa // *Opt. Express*. – 2007. – Vol. 15. – P. 8454-8464.
 11. **Tal, A.** Fabrication and characterization of three-dimensional copper metallodielectric photonic crystals / A. Tal, Y.-S. Chen, H.E. Williams, R.C. Rumpf, S.M. Kuebler // *Opt. Express*. – 2007. – Vol. 15. – P. 18283-18293.
 12. **Walsh, T.A.** High-temperature metal coating for modification of photonic band edge position / T.A. Walsh, J.A. Bur, Y.-S. Kim, T.-M. Lu, and S.-Y. Lin // *J. Opt. Soc. Am. B*. – 2009. – Vol. 26(7). – P. 1450-1455.
 13. **Микляев, Ю.В.** Интерференционно-литографический синтез трехмерных фотонных кристаллов с использованием излучения, слабо поглощаемого фоторезистом / Ю.В. Микляев, С.В. Карпеев, П.Н. Дьяченко, В.С. Павельев, С.Д. Полетаев // *Компьютерная оптика*. – 2008. – Т. 32, № 4. – С. 357-360.

References

1. **Johnson, S.J.** Photonic Crystals: The Road from Theory to Practice / S.J. Johnson, J.D. Joannopoulos. – London: Kluwer Academic Publishers, 2003. – 156 p.
2. **Soifer, V.A.** Diffractive optical elements in nanophotonics devices / V.A. Soifer, V.V. Kotlyar, L.L. Doskolovich // *Computer Optics*. – 2009. – Vol. 33, No. 4. – P. 352-368. – (in Russian).

FABRICATION AND INVESTIGATION OF THREE-DIMENSIONAL METALLODIELECTRIC PHOTONIC CRYSTALS FOR INFRARED RANGE

*P.N. Dyachenko, S.V. Karpeev, V.S. Pavelyev
Image Processing Systems Institute of the RAS,
S.P. Korolyov Samara State Aerospace University*

Abstract

We report on the fabrication of metallodielectric photonic crystals by means of interference lithography and subsequent coating by the gold nanolayer by the use of magnetron deposition. The polymer grating is realized in a SU-8 photoresist using a He-Cd laser of wavelength 442 nm. A reflection spectrum from three-dimensional metallodielectric photonic crystals is investigated. The occurrence of the photonic band gap with the center on wavelength 2.6-2.8 microns on the basis of spectroscopy data is shown.

Key words: photonic crystals, interference lithography.

Сведения об авторах



Дьяченко Павел Николаевич, 1984 года рождения, окончил Южно-Уральский государственный университет в 2007 году по специальности «Прикладная математика и физика». Работает в Институте систем обработки изображений РАН в должности инженера. Соавтор 17 работ. Область научных интересов: нанофотоника и синтез оптических метаматериалов.

E-mail: dyachenko@ssau.ru

Pavel Nikolaevich Dyachenko, (b. 1984), received his Masters degree in «Applied mathematics and physics» from South Ural State University in 2007. Dyachenko P.N. works as a researcher at Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences. Co-author of 17 papers. Research interests: nanophotonics, optical metamaterials synthesis.



Карпеев Сергей Владимирович, 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. Область научных интересов: дифракционная оптика, модовые и поляризационные преобразования, волоконная оптика, оптическая обработка изображений.

E-mail: karp@smr.ru

Sergei Vladimirovich Karpeev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Professor of the Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov. Leading researcher of 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.



Павельев Владимир Сергеевич, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой наноинженерии Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва; главный научный сотрудник Учреждения Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: дифракционная микрооптика и оптические волноводы, нанофотоника и синтез оптических метаматериалов, технологии формирования микро- и наноструктур.

E-mail: pavelyev@smr.ru

Vladimir Sergeevich Pavelyev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Head of Nanoengineering Department of the Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov, chief researcher of the Image Processing Systems Institute of the RAS. Research interests: diffractive microoptics, optical waveguides, nanophotonics, optical metamaterials synthesis, technologies for forming of micro- and nanostructures.

Поступила в редакцию 15 ноября 2010 г.