

УЗКОПОЛОСНЫЕ ФИЛЬТРЫ В ВИДИМОМ СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА

В.С. Горелик^{1,2}
М.М. Яшин²

gorelik@sci.lebedev.ru
ixkamax@mail.ru

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Российская Федерация

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Представлены результаты экспериментального и теоретического исследований вторичного излучения, возникающего в синтетических опаловых матрицах под действием лазерного излучения на заданной длине волны. Получено сравнение экспериментальных и теоретических исследований трехмерного фотонного кристалла на основе наноглобул кремнезема. Рассчитаны значения параметров узкополосного светофильтра, в котором использован глобулярный фотонный кристалл. Определена зависимость сужения стоп-зоны от соотношения показателей преломления n_1 и n_2 двух сред трехмерной опаловой матрицы

Ключевые слова

Фотонный кристалл, стоп-зона, отражение, узкополосный фильтр, поры, коэффициент отражения, наноглобулы

Поступила в редакцию 05.04.2016
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

Введение. В настоящее время известно несколько видов светофильтров, предназначенных для выделения определенной области спектра в видимом диапазоне. К таким светофильтрам относятся:

- абсорбционные фильтры, характеризующиеся резким изменением коэффициента поглощения в определенном спектральном диапазоне;
- интерференционные фильтры, отражающие или пропускающие определенную область спектра за счет многолучевой интерференции;
- поляризационные светофильтры, в которых осуществляется управление интенсивностью поляризованного электромагнитного излучения при различных поляризационных установках;
- поляризационные светофильтры с линейной поляризацией, пропускающие свет с поляризацией в плоскости, совпадающей с направлением плоскости поляризации;
- Notch-фильтры, представляющие собой объемные голограммы, обеспечивающие сильное подавление электромагнитного излучения в очень узкой полосе частот.

По типу выделяемой спектральной части электромагнитного излучения светофильтры подразделяют на узкополосные, односторонние, двухсторонние и корректирующие [1–4].

Notch-фильтры являются узкополосными [5–7], что позволяет использовать их для подавления лазерного излучения при регистрации спектров вторич-

ного излучения: фотолюминесценции, комбинационного рассеяния, оптических гармоник. Однако Notch-фильтр является довольно дорогостоящим и сложным при изготовлении. Этот фильтр способен отражать определенную спектральную полосу излучения, зависящую от угла падения. Альтернатива Notch-фильтрам — пористые фотонные кристаллы.

В настоящей работе поставлена задача исследования возможности создания нового типа светофильтра, основанного на использовании пористых глобулярных фотонных кристаллов. В качестве такого кристалла предложено применять опаловую матрицу, представляющую собой трехмерный фотонный кристалл, построенный из сферических наноглобул кремнезема (SiO_2).

Описание структуры фотонных кристаллов. Фотонными кристаллами называют среды, диэлектрическая проницаемость которых периодически изменяется в пространстве с периодом, допускающим брэгговскую дифракцию света [8]. Фотонные кристаллы подразделяют на одно-, дву- и трехмерные. Структуры фотонных кристаллов приведены на рис. 1. Характерное свойство фотонных кристаллов — присутствие в их структуре сверхрешетки, период которой существенно превышает атомные размеры и может быть сравним с длиной волны электромагнитного излучения видимой области спектра.

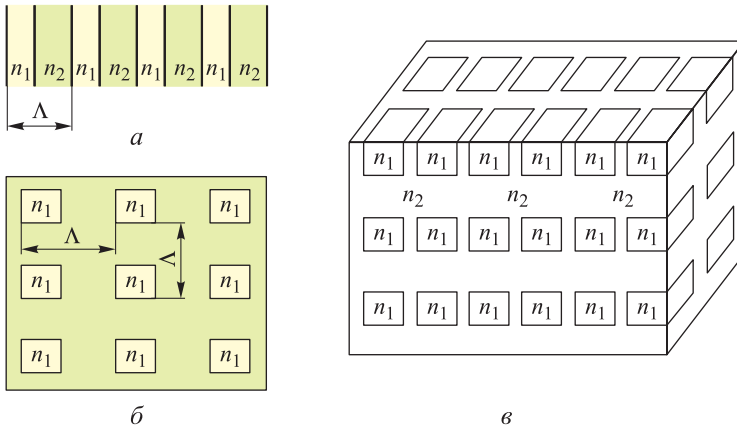


Рис. 1. Структуры одномерных (а), двумерных (б) и трехмерных (в) фотонных кристаллов с различными показателями преломления n_1 и n_2 двух сред и периодом кристаллической решетки Λ

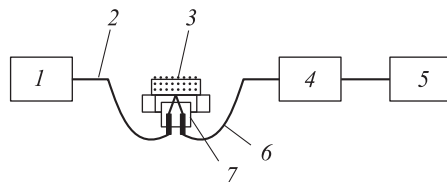
Важная особенность фотонного кристалла — присутствие в его спектре так называемых запрещенных зон (стоп-зон), представляющих собой интервал частот, в пределах которого свет, распространяющийся в определенных направлениях, экспоненциально затухает. В области стоп-зон наблюдается сильное отражение электромагнитного излучения от поверхности фотонного кристалла [9]. Физический механизм образования стоп-зоны для фотонов в кристаллах такой же, как и для электронов в твердых телах. В его основе лежит дифракция электромагнитной волны в среде с периодическим потенциалом [10–12].

Пример трехмерного фотонного кристалла — глобулярный фотонный кристалл, формирующийся в результате плотной упаковки моноразмерных шаров (наноглобул), размер которых варьируется в разных кристаллах в диапазоне значений 200...600 нм. В глобулярном фотонном кристалле коэффициент преломления периодически изменяется в трех пространственных направлениях. Исследованиям композитных фотонных кристаллов на основе искусственных опалов с различными внедрениями посвящены работы [13–16].

Методика эксперимента. Были проведены экспериментальные исследования спектров отражения широкополосного излучения от поверхности (111) глобулярного фотонного кристалла. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2. В качестве источника широкополосного излучения использована галогенная лампа 1. Излучение от этой лампы с помощью световода 2 подводилось к исследуемому образцу — фотонному кристаллу 3, размещенному на фторопластовой пластине 7. Угол падения излучения на поверхность (111) фотонного кристалла был близок к нормальному. Излучение, отраженное от поверхности фотонного кристалла в обратном направлении, собиралось световодом 6 и направлялось к малогабаритному волоконно-оптическому спектрометру 4. Цифровая обработка сигналов отраженного излучения осуществлялась с помощью компьютера 5.

Рис. 2. Схема экспериментальной установки с использованием светофильтра на основе глобулярного фотонного кристалла:

1 — галогенная лампа; 2, 6 — световоды; 3 — фотонный кристалл; 4 — волоконно-оптический спектрометр; 5 — компьютер; 7 — фторопластовая пластина



Исследованы характеристики узкополосного светофильтра, созданного на основе глобулярного фотонного кристалла. Экспериментально получен спектр отражения исследуемого фотонного кристалла в области первой стоп-зоны (первой оптической гармоники) (рис. 3). Максимум интенсивности экспериментальный спектр отражения достигает при длине волны $\lambda = 537$ нм.

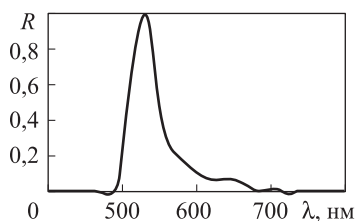


Рис. 3. Экспериментально полученный спектр отражения широкополосного излучения поверхностью (111) опаловой матрицы

В связи с этим необходимо создать узкополосный светофильтр на основе глобулярного фотонного кристалла для отражения излучения на длине волны ($\lambda = 532$ нм), соответствующей первой оптической гармонике лазера на алюмоиттриевом гранате (YAG: Nd³⁺). Схема экспериментальной установки для исследования вторичного излучения (фотолюминесценции, комбинационного рассеяния и др.)

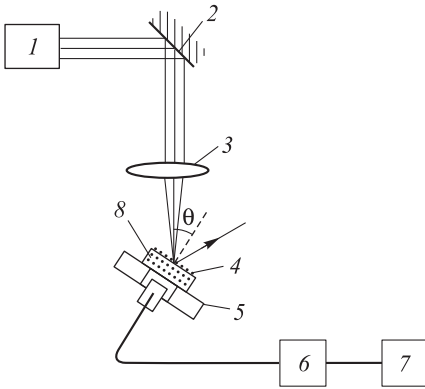


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для исследования вторичного излучения с использованием узкополосного светофильтра на основе глобулярного фотонного кристалла:
 1 — лазер; 2 — отражающий элемент; 3 — линза; 4 — исследуемый образец; 5 — подложка; 6 — спектрометр; 7 — компьютер; 8 — фотонный кристалл

в диэлектрических средах с использованием такого светофильтра приведена на рис. 4.

Теоретическая часть. Для кристаллографического направления (111) глобулярный фотонный кристалл приближенно можно рассматривать как одномерную структуру, эквивалентную двухслойному фотонному кристаллу с двумя показателями преломления n_1 и n_2 [17]. С учетом условий периодичности кристаллической решетки фотонного кристалла, состоящей из двух веществ с различными показателями преломления, и граничных условий дисперсионная зависимость электромагнитных волн в рассматриваемом фотонном кристалле может быть представлена в виде

$$(\cos k_1 a_1)(\cos k_2 a_2) - \frac{1}{2} \left(\frac{n_1}{n_2} + \frac{n_2}{n_1} \right) (\sin k_1 a_1)(\sin k_2 a_2) = \cos ka. \quad (1)$$

Здесь $k_1 = (\omega n_1) / c$; $k_2 = (\omega n_2) / c$, ω — циклическая частота электромагнитной волны; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света в вакууме; $a_1 = (1 - \eta)a$, $a_2 = \eta a$ — эффективные толщины слоев; $n_1 = 1,36$ — показатель преломления первой среды (кремнезема); n_2 — показатель преломления второй среды (вещества, введенного в поры фотонного кристалла). С учетом известных структурных характеристик искусственных опалов показатель преломления равен $n_1 = 0,26$. На основе полученной зависимости $k(\omega)$ определен эффективный показатель преломления $n(\omega) = (ck) / \omega$. Коэффициент спектра отражения фотонного кристалла находим по формуле

$$R(\omega) = \left| \frac{\frac{ck(\omega)}{\omega} - 1}{\frac{ck(\omega)}{\omega} + 1} \right|^2. \quad (2)$$

Для того чтобы управлять оптическими свойствами фотонного кристалла, необходимо в его поры вводить вещества с различными показателями преломления. Спектральное положение стоп-зоны для одномерного фотонного кристалла при наклонном падении излучения на его поверхность задают соотношением [18]

$$2a\sqrt{n_{ef}^2 - \sin^2 \theta} = \lambda_B; \quad n_{ef}^2 = n_1^2 \eta + n_2^2 (1 - \eta). \quad (3)$$

Здесь n_{ef} — эффективный показатель преломления; θ — угол падения светового излучения на поверхность фотонного кристалла (или угол поворота опаловой матрицы). Для нормального падения излучения на поверхность глобулярного фотонного кристалла с диаметром глобул D справедлива формула [19]

$$2an_{ef} = 2\sqrt{\frac{2}{3}} Dn_{ef} = \lambda_B. \quad (4)$$

Обсуждение результатов. Далее решалась задача оптимизации характеристик фильтра на основе фотонного кристалла для подавления излучения лазера с длиной волны генерации $\lambda = 532$ нм. По первой формуле из (3) было рассчитано значение угла поворота θ исследуемой опаловой матрицы для смещения стоп-зоны опала от 624 нм (при нормальном падении) на заданную длину волны 532 нм (при наклонном падении). Угол равен $\theta = 26^\circ$.

Для расчета характеристик узкополосного фильтра показатель среды, вводимой в поры фотонного кристалла, должен быть близок к значению показателя преломления аморфного кварца (кремнезема), т. е. 1,36. С учетом формул (3), (4) было получено значение показателя преломления второй среды $n_2 = 1,36416$. В соответствии с формулой (4) для длины волны 532 нм при нормальном падении излучения диаметр глобул должен составлять 250 нм.

Значения диаметра глобул D , показателя преломления второй среды, спектральной ширины брэгговского максимума, рассчитанной по формуле (1), для заданной длины волны 532 нм приведены ниже:

D , нм.....	249	250
n_2	1,7189	1,36416
n_{ef}	0,954	0,946

Зависимости коэффициента отражения R возбуждающего излучения от длины волны λ при различных значениях диаметра глобул и показателя преломления второй среды представлены на рис. 5, а, б. Наблюдается область отражения (стоп-зона) на заданной длине волны интенсивного лазерного излучения (см. рис. 5, б); значение ширины стоп-зоны при этом равно 0,5 нм (5 Å). Чем меньше разность значений n_1 и n_2 , тем уже ширина стоп-зоны фотонного кристалла. В соответствии с изложенным была построена модель согласования экспериментальных и теоретических зависимостей коэффициентов отражения от длины волны (рис. 5, в).

Максимум интенсивности экспериментального спектра отражения соответствует длине волны $\lambda = 537$ нм (кривая 1, см. рис. 5, в). Теоретическая кривая 2 была получена для бесконечного кристалла без учета затухания. Наблюдается качественное согласование экспериментальной и теоретической зависимостей. Имеющиеся отличия кривой 1 от кривой 2 обусловлены тем, что в процессе от-

ражения реальный вклад дает лишь конечное число слоев вследствие присутствия дефектов и неоднородностей в опаловой матрице. Теоретическая кривая 2 (см. рис. 5, в) спектра отражения фотонного кристалла была рассчитана в соответствии с одномерной моделью исследуемого фотонного кристалла, справедливой для нормального падения излучения на поверхность (111). При этом в расчетах указанных зависимостей использованы формулы (2)–(4). Диаметр глобул кремнезема $D = 250$ нм, показатель преломления первой среды (глобул кремнезема) $n_1 = 1,36$, показатель преломления введенного в поры кристалла вещества (в данном случае воздуха) $n_2 = 1,0$.

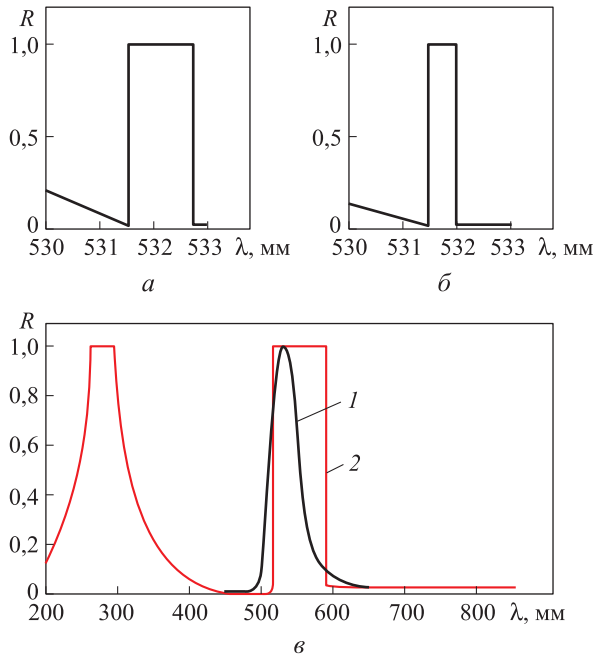


Рис. 5. Зависимости коэффициента отражения R возбуждающего излучения от длины волны λ при значениях $D = 249$ нм, $n_2 = 1,37189$ (а) и $D = 250$ нм, $n_2 = 1,36416$ (б), экспериментальная (1) и теоретическая (2) зависимости коэффициента отражения R искусственного опала от длины волны λ (в)

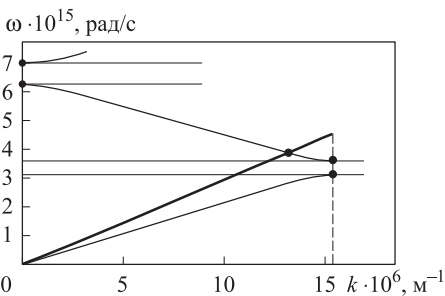


Рис. 6. Зависимость частоты электромагнитного излучения ω от волнового вектора k

Зависимость частоты электромагнитного излучения ω от волнового вектора k , на которой присутствует стоп-зона в определенной области частот, приведена на рис. 6.

Выводы. Установлены условия создания узкополосного оптического фильтра на основе глобулярного фотонного кристалла. Исследованный фотонный кристалл состоит из двух сред с различными показателями преломления n_1 и n_2 . Фо-

тонный кристалл сформирован из глобул кремнезема (SiO_2), плотно упакованных в виде кубической гранцентрированной решетки с показателем преломления n_1 . Между глобулами имеются поры, заполняемые второй средой с показателем преломления n_2 .

Рассчитанный диаметр глобул для отражения лазерного излучения при длине волны 532 нм и нормальном падении равен $D = 250$ нм. Показатель преломления глобул (первой среды) составляет $n_1 = 1,36008$, второй среды — $n_2 = 1,36416$. Такой показатель преломления имеет 24%-ный водный раствор глицерина, $n_p = 1,3649$. С точностью до третьего знака после запятой значение показателя n_p совпадает со значением n_2 . Спектральная ширина отражения светофильтра составляет 0,5 нм. Исследованные узкополосные светофильтры могут быть использованы в экспериментальных установках для регистрации спектров комбинационного рассеяния света диэлектрических сред в области низких частот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хеймен Р. Светофильтры. М.: Мир, 1988. 216 с.
2. Ярославский Л.П., Мерзляков Н.С. Методы цифровой голографии. М.: Наука, 1977. 192 с.
3. Иофис Е.А. Фотокинотехника. М.: Сов. Энциклопедия, 1981. 447 с.
4. Вестон К. Фильтры в фотографии. Программные и оптические системы. М.: Арт-родник, 2010. 192 с.
5. Carr P. N4PC: How to build the "Synthetic" crystal filter. 1990. Ex. 215. P. 18.
6. Подгорный И. N4PC: Низкочастотный фильтр // Радиолюбитель. 1996. № 2. С. 29.
7. Попов С.И. Активный низкочастотный CW/Notch-фильтр // Радио-Дизайн. 1993. № 1. С. 6–10.
8. Горелик В.С. Оптические и диэлектрические свойства наноструктурированных фотонных кристаллов, заполненных сегнетоэлектриками и металлами // Физика твердого тела. 2009. Т. 51. № 7. С. 1252–1257.
9. Белотелов В.И., Звездин А.К. Фотонные кристаллы и другие метаматериалы. Сер. Библиотечка «Квант». М.: Бюро Квантум, 2006. 140 с.
10. Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics // Phys. Rev. Lett. 1987. No. 58. P. 2059.
11. Блохин С.А., Усов О.А. Оптические исследования двумерного фотонного кристалла с квантовыми точками InAs/InGaAs в качестве активной области // Физика и техника полупроводников. 2006. Т. 40. № 7. С. 833–838.
12. Ивченко Е.Л., Поддубный А.Н. Резонансные трехмерные фотонные кристаллы // Физика твердого тела. 2006. № 48 (3). С. 540–547.
13. Войнов Ю.П., Горелик В.С., Злобина Л.И., Филатов В.В. Спектры отражения опалов с порами, заполненными золотом или серебром // Неорганические материалы. 2009. Т. 45. № 10. С. 1211–1216.

14. Горелик В.С., Филатов В.В. Закон дисперсии акустических волн в фононных кристаллах, заполненных диэлектриком или металлом // Краткие сообщения по физике. 2010. № 2. С. 42–44.
15. Горелик В.С., Пудовкин А.В. Резонансные глобулярные фотонные кристаллы, заполненные наночастицами $\text{Al}_2\text{O}_3:(\text{Cr}^{3+})$ // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2013. № 2. С. 43–49.
16. Горелик В.С., Воицкий Е.А. Конверсионное отражение света от поверхности глобулярных фотонных кристаллов с люминесцирующими центрами // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2012. № 3. С. 20–30.
17. Быков В.П. Спонтанное излучение в периодической структуре // ЖЭТФ. 1972. Т. 62. Вып. 2. С. 505–513.
18. Берестецкий В.Б., Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Теоретическая физика. Т. IV. Квантовая электродинамика. М.: Физматлит, 2002. 720 с.

Горелик Владимир Семенович — д-р физ.-мат. наук, заведующий лабораторией «Комбинационное рассеяние» Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинский пр-т, д. 53), профессор кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Яшин Максим Михайлович — студент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Горелик В.С., Яшин М.М. Узкополосные фильтры в видимом спектральном диапазоне на основе пористого фотонного кристалла // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2016. № 5. С. 105–114. DOI: 10.18698/1812-3368-2016-5-105-114

**NARROW-BAND FILTERS IN THE VISIBLE SPECTRAL RANGE
BASED ON POROUS PHOTONIC CRYSTAL**

V.S. Gorelik^{1,2}

M.M. Yashin²

gorelik@sci.lebedev.ru

ixkamax@mail.ru

¹ Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

We studied the secondary radiation produced in synthetic opal matrices under the influence of laser light at a given wavelength. This article presents the results of our experimental and theoretical studies of three-dimensional photonic crystal-based nanoglobul silica. We compared the experimental and theoretical approaches and determined the parameters of a narrow-band filter involving the use of a globular photonic crystal. We established the dependence of the contraction stop band on the ratio of the refractive indices of the two media n_1 and n_2 of a three-dimensional opal matrix

Keywords

Photonic crystal, stop-band, reflection, narrow-band filter, pores, reflectance, nanoglobul

REFERENCES

- [1] Hayman R. Filters. London & Boston, Focal Press, 1984.
- [2] Yaroslavskiy L.P., Merzlyakov N.S. Metody tsifrovoy golografii [Methods of digital holography]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 192 p.
- [3] Iofis E.A. Fotokinotekhnika [Photographic and cinematographic technology]. Moscow, Sov. Entsiklopediya Publ., 1981. 447 p.
- [4] Weston Chris. Mastering filters for photography. Switzerland, Mies, Rotovision, 2009.
- [5] Carr P. N4PC: How to build the “Synthetic” crystal filter. 1990. Ex. 215, p. 18.
- [6] Podgornyy I. N4PC: Low-pass filter. *Radiolyubitel*, 1996, no. 2, p. 29 (in Russ.).
- [7] Popov S.I. The active low-frequency CW/Notch-filter. *Radio-Design*, 1993, no. 1, pp. 6–10 (in Russ.).
- [8] Gorelik V.S. Optical and dielectric properties of nanostructured photonic crystals loaded by ferroelectrics and metals. *Physics of the Solid State*, 2009, vol. 51, iss. 7, pp. 1321–1327. DOI: 10.1134/S1063783409070014
- [9] Belotelov V.I., Zvezdin A.K. Fotonnye kristally i drugie metamaterialy [Photonic crystals and other metamaterials]. Moscow, Byoro Kvantum Publ., 2006. 140 p.
- [10] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, no. 58, p. 2059.
- [11] Blokhin S.A., Usov O.A. Optical studies of a two-dimensional photonic crystal with the InAs/InGaAs quantum-dot structure as an active region. *Semiconductors*, 2006, vol. 40, no. 7, pp. 812–817. DOI: 10.1134/S1063782606070141
- [12] Ivchenko E.L., Poddubnyy A.N. Resonant three-dimensional photonic crystals. *Physics of the Solid State*, 2006, iss. 3, vol. 48, pp. 581–588. DOI: 10.1134/S1063783406030279
- [13] Voynov Yu.P., Gorelik V.S., Zlobina L.I., Filatov V.V. Reflectivity spectra of gold- and silver-infiltrated opals. *Inorganic Materials*, 2009, vol. 45, no. 10, pp. 1133–1138. DOI: 10.1134/S0020168509100100
- [14] Filatov V.V., Gorelik V.S. Dispersion relation of acoustic waves in phononic crystals filled with dielectric or metal. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2010, vol. 37, no. 2, pp. 56–57. DOI: 10.3103/S1068335610020053
- [15] Gorelik V.S., Pudovkin A.V. Resonance globular photonic crystals filled with $\text{Al}_2\text{O}_3:(\text{Cr}^{3+})$ nanoparticles. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2013, no. 2, pp. 43–49 (in Russ.).
- [16] Gorelik V.S., Voshchinskiy E.A. Conversional light reflectance from the surface of globular photonic crystals. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2012, no. 3, pp. 20–30 (in Russ.).
- [17] Bykov V.P. Spontaneous emission in a periodic Structure. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1972, vol. 35, iss. 2, pp. 269–273.
- [18] Berestetskiy V.B., Lifshits E.M., Pitaevskiy L.P. Teoreticheskaya fizika. T. IV. Kvantovaya elektrodinamika [Theory of physics. Vol. IV. Quantum electrodynamics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2002. 720 p.

Gorelik V.S. — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head of Raman Scattering Laboratory, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences (Leninskiy prospekt 53, Moscow, 119991 Russian Federation); Professor of Physics Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Yashin M.M. — student of Physics Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Gorelik V.S., Yashin M.M. Narrow-Band Filters in the Visible Spectral Range Based on Porous Photonic Crystal. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2016, no. 5, pp. 105–114.

DOI: 10.18698/1812-3368-2016-5-105-114