

Спектроскопия стоп-зон в пористых фотонных кристаллах

В.С. Горелик^{1,2}, А.А. Лобойко¹

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва,
Российская Федерация
e-mail: gorelik@sci.lebedev.ru

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

Исследованы спектры отражения пористых фотонных кристаллов с использованием различных источников излучения (галогенной лампы, белого диода и ультрафиолетовых диодов). Обнаружено резкое увеличение интенсивности в пористом фотонном кристалле для возбуждающего излучения 566 нм. Установлено, что в случае галогенного источника излучения на спектре наблюдается один пик. При монохроматическом излучении возникают дополнительные пики, связанные с явлением люминесценции. Проведено исследование красного опала с помощью монохроматических источников излучения. На спектрах обнаружены пики интенсивности на длинах волн, соответствующих красному диапазону излучения. Выполнен расчет угла поворота фотонного кристалла, используемого в качестве селективного зеркала для лазеров.

Ключевые слова: конверсия, опал, ультрафиолетовый диод, белый диод, пористый фотонный кристалл, селективное зеркало, лазер, спектр.

Spectroscopy of Stop Zones in Porous Photon Crystals

V.S. Gorelik^{1,2}, A.A. Loboyko¹

¹ Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow,
Russian Federation
e-mail: gorelik@sci.lebedev.ru

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

The aim of this research is to investigate the spectra of porous photon crystals reflection, using various sources of radiation: halogenous lamp, white diode and ultraviolet diodes. We find a big intensity increase in a porous photon crystal for the stimulating radiation of 566 nanometers and establish that when a halogenous source of radiation is used, we can observe one peak on the spectrum. In case of monochromatic radiation, there occur additional peaks related to the luminescence phenomenon. We conduct a research into a red opal by means of monochromatic sources of radiation and we find the intensity peaks on the wavelength corresponding to the red range of radiation. Consequently, we calculate the rotation angle of the photon crystal used as the selection mirror for lasers.

Keywords: conversion, opal, ultraviolet diode, white diode, porous photon crystal, selection mirror, laser, spectrum.

Введение. Пористые фотонные кристаллы являются перспективными материалами, открывающими небывалые возможности для создания новых типов лазеров, мониторов, солнечных батарей, ламп и любых высокотехнологичных устройств, работающих со светом (селективных зеркал, светофильтров и эффективных сред для лазерной генерации и наблюдения нелинейно-оптических процессов) [1, 2]. Несмотря на большое число работ, посвященных фотонным кристаллам, до настоящего времени остаются вопросы, связанные с установлением закономерностей спектров отражения от поверхности пористых фотонных кристаллов при использовании различных источников излучения. В спектрах отражения проявляются особенности так называемых стоп-зон фотонных кристаллов, а также характеристики вторичного излучения.

В связи с этим в настоящей работе была поставлена задача экспериментального изучения спектров отражения пористых фотонных кристаллов с использованием различных источников излучения (галогенной лампы, белого диода и ультрафиолетовых диодов), заполненных различными средами.

Особый класс фотонных структур составляют так называемые пористые фотонные кристаллы, характеризующиеся периодическим расположением пор, размер которых можно изменять в диапазоне значений 10...50 нм. В поры фотонного кристалла могут быть введены различные соединения, что позволяет управлять оптическими свойствами фотонных кристаллов и создавать гибридные материалы: диэлектрики-сегнетоэлектрики, диэлектрики-полупроводники, диэлектрики-металлы и т. д. С помощью электронной микроскопии была установлена зависимость расположения фотонных кристаллов относительно друг друга и размеры в различных опалах. Опал, как правило, состоит из глобул разного диаметра, располагающихся в объеме хаотично. В благородных опалах глобулы имеют равный диаметр и расположены правильными слоями, образующими пространственную структуру [3]. Между глобулами находятся поры октаэдрического и тетраэдрического типа, что характерно для пустот в плотнейших шаровых упаковках. В неблагородных опалах в некоторой части этих пор находится гидратированный аморфный кремнезем, делающий соединение между глобулами более прочным. Отношение заполненных пор к пустым порам для разных типов опалов также различно. Во многих опалах глобулы вследствие деформации структуры приобретают отличную от сферической, многогранную (в проекциях на плоскость — полигональную) форму.

Во многих опалах присутствует деформация глобул и упакованных слоев. В результате у опалов с деформированными глобулами меньше возможностей для поглощения влаги. Очевидно, что в идеальной структуре недеформированных сферических глобул все поры сообщаются между собой и с окружающей средой. Однако при деформации глобул возникают поры, изолированные от соседних пор. Чем выше

степень деформации, тем больше таких изолированных пор, и тем меньше возможности опала для поглощения влаги.

В настоящее время ведутся активные работы в целях создания на основе синтетических опалов различных устройств и материалов, например, нанокомпозитов на основе опаловых матриц с 3D-структурой, устройств на основе оптико-акустических эффектов опаловых матриц, композитных материалов с управляемыми оптическими свойствами [3–9]. Кроме того, появилась возможность производства нанокомпозитов на основе синтетических опалов, заполняя межглобулярное пространство сверхпроводящими, полупроводниковыми, ферромагнитными и оптически активными материалами [7].

Экспериментальная часть. В качестве образцов для исследования были использованы опаловые матрицы, состоящие из плотно упакованных глобул кремнезема диаметром 200...400 нм.

Исследование оптических свойств пористых фотонных кристаллов проводилось на экспериментальной установке (рис. 1). Образец фотонного кристалла (опал) 4 с поверхностью (111) размещался на тефлоновой пластине 2.

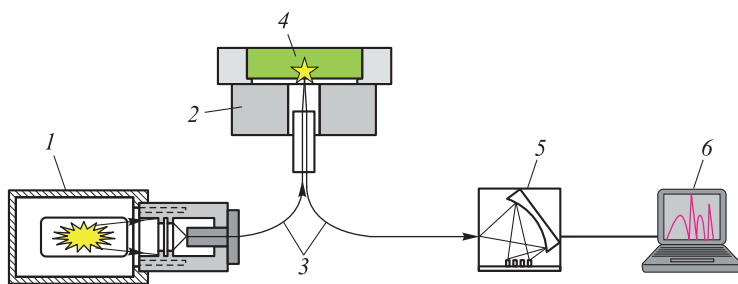


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для получения спектров отражения от широкополосных и квазимонохроматических источников излучения:

1 — галогенная лампа; 2 — тефлоновая пластина; 3 — световоды; 4 — фотонный кристалл (опал); 5 — спектрометр; 6 — компьютер

Свет от источника опорного излучения (светодиода или галогенной лампы) 1 по оптоволоконному каналу подавался на входной канал двухжильного световода 3. После отражения от поверхности (111) фотонного кристалла по другому оптоволоконному каналу излучение поступало на вход цифрового спектрометра 5, подключенного к компьютеру 6.

Зарегистрированные спектры посредством специального программного обеспечения переводились в табличную форму и заносились в базу данных для последующего хранения и обработки. В силу высокой чувствительности установки спектры имели зашумленный характер, поэтому для выделения сигнала использовались специальные алгоритмы

фильтрации шумов, основанные на нелинейной аппроксимации данных, встроенные в пакет численного анализа данных Origin [10].

Спектр отражения излучения галогенной лампы, который получен от поверхности (111) опаловой матрицы, заполненной воздухом, представлен на рис. 2, *а*. На длине волны $\lambda = 566$ нм наблюдается характерный пик интенсивности (кривая 1), соответствующий положению первой стоп-зоны рассматриваемого кристалла. Кривая 2 соответствует спектру галогеновой лампы.

Спектр отражения излучения белого диода от поверхности опаловой матрицы приведен на рис. 2, *б*. При этом спектральное положение наблюдаемого пика интенсивности ($\lambda = 566$ нм) оказывается близким к соответствующему максимуму (см. рис. 2, *а*).

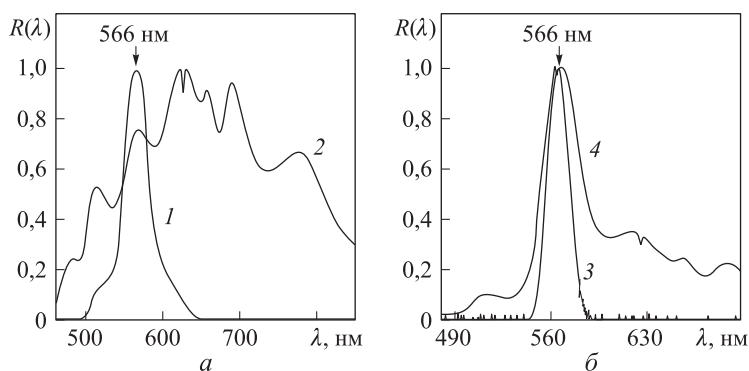


Рис. 2. Спектры отражения излучения галогенной лампы (*а*) от поверхности (1) опаловой матрицы, галогенной лампы (2), спектры отражения излучения белого диода (*б*) от поверхности опаловой матрицы (3) и белого диода (4)

Спектры излучения галогенной лампы (кривая 1), конверсии монохромного излучения (кривая 2), а также спектры монохромного диода (385 и 410 нм, кривые 3 и 4 соответственно) представлены на рис. 3. На длине волны $\lambda = 566$ нм наблюдается характерный пик интенсивности (кривые 1 и 2). Возникающие дополнительные пики связаны с люминесценцией (кривая 2). При этом спектральные положения наблюдаемого пика интенсивности ($\lambda = 566$ нм), показанные на рис. 3, *б*, оказываются близкими к соответствующему максимуму, приведенному на рис. 3, *а*.

Нормированные спектры отражения от поверхности красной опаловой матрицы светодиода $\lambda = 382$ нм и широкополосного излучения галогенной лампы от поверхности (111) опаловой матрицы приведены на рис. 4, *а*. Максимумы интенсивности идентичны при длине волны излучения около 605 нм. Нормированные спектры отражения от поверхности красной опаловой матрицы светодиода $\lambda = 410$ нм и широкополосного излучения галогенной лампы от поверхности (111)

опаловой матрицы представлены на рис. 4, б. При этом спектральные положения наблюдаемых пиков интенсивности ($\lambda = 605$ нм) оказываются близкими к соответствующим максимумам, показанным на рис. 4, а.

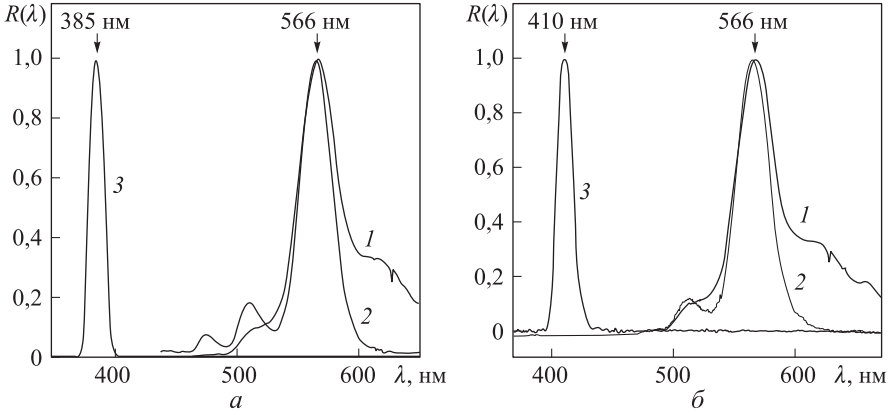


Рис. 3. Спектры (а, б) излучения галогенной лампы (1), конверсии монокромного излучения (2), спектры 385 нм (3) и 410 нм (4) монокромного диода

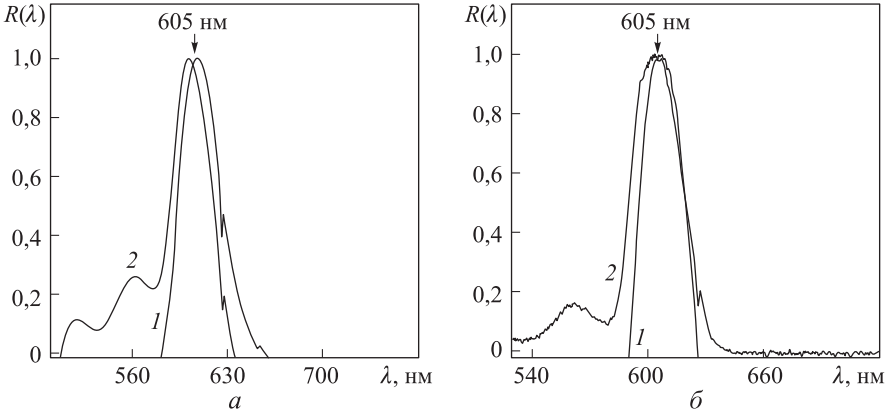


Рис. 4. Нормированные спектры отражения от поверхности красной опаловой матрицы светодиода при 382 нм (а) и 410 нм (б) (2) и отражения широкополосного излучения галогенной лампы от поверхности (111) опаловой матрицы (1)

Один из примеров практического применения фотонных кристаллов — использование на их основе селективных зеркал для лазеров определенной длины волны.

Для нахождения длины волны максимума интенсивности широкополосного излучения, отраженного от поверхности (111) фотонного кристалла, используем известную формулу Брегга — Вульфа:

$$m\lambda_0 = 2a\sqrt{n_{ef}^2 - \sin^2\theta}. \tag{1}$$

Здесь $m = 1, 2, 3$; $a = \sqrt{\frac{2}{3}}D$; D — диаметр глобул; θ — угол падения излучения на поверхность;

$$n_{ef}^2 = n_1^2 \eta + n_2^2 (1 - \eta). \quad (2)$$

В случае глобулярного фотонного кристалла, состоящего из глобул кремнезема, $n_1 = 1,36$; $n_2 = 1$; $\eta = 0,74$. В соответствии с формулой (2) для нормального падения излучения ($\theta = 0$) при $m = 1$ и $\lambda_0 = 0,566$ мкм (см. рис. 2 и рис. 3) получаем, что $n_{ef} = 1,276$.

Для расчета значения угла θ , при котором фотонный кристалл может быть использован как селективный светофильтр, отражающий лазерное излучение с длиной волны $\lambda_L = 0,532$ мкм, с учетом (1) запишем формулу

$$\theta = \arcsin \left(n_{ef} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_L}{\lambda_0} \right)^2} \right) \right). \quad (3)$$

В соответствии с (3) имеем $\theta = 26,6^\circ$.

Заключение. Установлено, что при отражении излучения галогенной лампы и белого диода от поверхности (111) фотонного кристалла в спектре отражения наблюдается максимум интенсивности излучения при длине волны около 566 нм. При отражении коротковолнового монохроматического излучения имеется характерный максимум интенсивности излучения с этой же длиной волны. Такой эффект соответствует конверсии коротковолнового излучения в видимый спектральный диапазон. В случае галогенного источника излучения на спектре наблюдается один пик, в случае монохроматического излучения — дополнительные пики, связанные с люминесценцией.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Третьяков Ю.Д.* Нанотехнологии. Азбука для всех. М.: Физматлит, 2010. 368 с.
2. *Photonic crystal and quantum dot technologies for all-optical switch and logic device / Kiyoshi Asakawa, Yoshimasa Sugimoto, Yoshinori Watanabe, Nobuhiko Ozaki, Akio Mizutani, Yoshiaki Takata, Yoshinori Kitagawa, Hiroshi Ishikawa, Naoki Ikeda, Koichi Awazu, Xiaomin Wang, Akira Watanabe, Shigeru Nakamura, Shunsuke Ohkouchi, Kuon Inoue, Martin Kristensen, Ole Sigmund, Peter Ingo Borel and Roel Baets // New Journal of Physics. 2006. Vol. 8. P. 208.*
3. *Ринкевич А.Б., Устинов В.В., Самойлович М.И., Белянин А.Ф., Клещева С.М., Кузнецов Е.А.* Нанокompозиты на основе опаловых матриц с 3D-структурой, образованной магнитными наночастицами // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре.* 2008. № 4. С. 55–63.
4. *Чернега Н.В., Кудрявцева А.Д., Самойлович М.И., Белянин А.Ф., Клещева С.М.* Оптико-акустические эффекты в решетчатых упаковках (опаловые матрицы

как метаматериал) // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2010. № 1. С. 49–57.

5. *Самойлович М.И., Ринкевич А.Б., Бовтун В., Белянин А.Ф., Кемпа М., Нужный Д., Цветков М.Ю., Клещева С.М.* Оптические, магнитные и диэлектрические свойства опаловых матриц с заполнением межсферических нанополостей редкоземельными манганитами // *Нано- и микросистемная техника*. 2012. № 10. С. 31–36.
6. *Самойлович М.И.* Особенности метаматериалов (нанокомпозитов) на основе регулярных упаковок наносфер SiO₂ // *Наука и технологии в промышленности*. 2009. № 3. С. 61–68.
7. *Самойлович М.И., Клещева С.М., Белянин А.Ф., Житковский В.Д., Цветков М.Ю.* Трехмерные нанокомпозиты на основе упорядоченных упаковок наносфер кремнезема // *Микросистемная техника*. 2004. № 6. С. 3–7.
8. *Самойлович М.И.* Фотонные кристаллы и нанокомпозиты на основе опаловых матриц. М.: ОАО ЦНИТИ «Техномаш», 2007. 303 с.
9. *Камашев Д.В.* Экспериментальное изучение процессов образования надмолекулярных структур кремнезема // *Кристаллогенезис и минералогия: Тез. докл. Международ. конф. Санкт-Петербург*. 2007. С. 386–388.
10. *OriginLab* — Origin and Origin Pro — Data Analysis and Graphing Software. URL: <http://www.originlab.com> (дата обращения: 09.01.2015).

REFERENCES

- [1] Tret'yakov Yu.D. *Nanotekhnologii. Azbuka dlya vseh* [Nanotechnology. ABC for Everybody]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010. 368 p.
- [2] Kiyoshi Asakawa, Yoshimasa Sugimoto, Yoshinori Watanabe, Nobuhiko Ozaki, Akio Mizutani, Yoshiaki Takata, Yoshinori Kitagawa, Hiroshi Ishikawa, Naoki Ikeda, Koichi Awazu, Xiaomin Wang, Akira Watanabe, Shigeru Nakamura, Shun-uke Ohkouchi, Kuon Inoue, Martin Kristensen, Ole Sigmund, Peter Ingo Borel, Roel Baets. Photonic crystal and quantum dot technologies for all-optical switch and logic device. *New Journal of Physics*, 2006, vol. 8, p. 208.
- [3] Rinkevich A.B., Ustinov V.V., Samoilovich M.I., Belyanin A.F., Klescheva S.M., Kuznetsov E.A. Nanocomposites based on opal matrixes with 3D-structure formed by magnetic nanoparticles. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature* [Technology and design in electronic equipment], 2008, no. 4, pp. 55–63 (in Russ.).
- [4] Cherniega N.V., Kudryavtseva A.D., Samoylovich M.I., Belyanin A.F., Klescheva S.M. Optic acoustic effects in lattice packings (opal matrices as metamaterial). *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature* [Technology and design in electronic equipment], 2010, no. 1, pp. 49–57 (in Russ.).
- [5] Samoylovich M.I., Rinkevich A.B., Bovtun V., Belyanin A.F., Kempa M., Nuzhnyy D., Tsvetkov M.Yu., Klescheva S.M. Optical, Magnetic and Dielectric Properties of Opal Matrices with the Filling of Rare-Earth Manganites in Interspherical Nanospacing. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [J. of Nano and Microsystem Technique], 2012, no. 10, pp. 31–36 (in Russ.).
- [6] Samoylovich M.I. Characteristics of Metamaterials (Nanocomposites) Based on Regular Packages of SiO₂ Nanospheres. *Nauka i tekhnologii v promyshlennosti* [Science and Technology in the Industry], 2009, no. 3, pp. 61–68 (in Russ.).
- [7] Samoylovich M.I., Klescheva S.M., Belyanin A.F., Zhitkovskiy V.D., Tsvetkov M.Yu. 3D-Nanocomposites Based on Ordered Packing of Silica Nanospheres. *Mikrosistemnaya tekhnika* [J. of Nano and Microsystem Technique], 2004, no. 6, pp. 3–7 (in Russ.).

- [8] Samoylovich M.I. Fotonnye kristally i nanokompozity na osnove opalovykh matrits [Photonic Crystals and Nanocomposites Based on Opal Matrices]. Moscow, TsNITI Tekhnomash, 2007. 303 p.
- [9] Kamashev D.V. Experimental Study of the Formation of Supramolecular Silica Structures. *Kristallogenezis i mineralogiya: Tez. dokl. Mezhdunarod. konf.* [Abstracts. Intern. Conf. Crystallogenesi and Mineralogy]. St.-Petersburg, 2007, pp. 386–388 (in Russ.).
- [10] OriginLab — Origin and Origin Pro — Data Analysis and Graphing Software. Available at: <http://www.originlab.com> (accessed 9.01.2015).

Статья поступила в редакцию 27.01.2015

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).

Gorelik V.S. — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head of Raman Scattering Laboratory of 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).

Лобойко Алексей Андреевич — аспирант Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинский пр-т, д. 53).

Loboyko A.A. — post-graduate student of Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences (Leninskiy prospekt 53, Moscow, 119991 Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Горелик В.С., Лобойко А.А. Спектроскопия стоп-зон в пористых фотонных кристаллах // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2016. № 3. С. 102–109. DOI: 10.18698/1812-3368-2016-3-102-109

Please cite this article in English as:

Gorelik V.S., Loboyko A.A. Spectroscopy of stop zones in porous photon crystals. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2016, no. 3, pp. 102–109. DOI: 10.18698/1812-3368-2016-3-102-109