

## КОНВЕРСИОННОЕ ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА В ГЛОБУЛЯРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫМИ СВЕТОДИОДАМИ

В. С. Горелик, Л. С. Лепнев, А. А. Лобойко

*Исследованы спектры отражения пористых фотонных кристаллов с использованием различных источников излучения: галогенной лампы, белого диода и ультрафиолетовых диодов. Обнаружено, что в случае галогенного источника излучения в спектре отраженного излучения возникает полоса, соответствующая стоп-зоне.*

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

*Введение.* Пористые фотонные кристаллы являются перспективными материалами для создания новых типов лазеров, солнечных элементов, селективных зеркал и светофильтров [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.

Глобулярные фотонные кристаллы представляют собой опаловые матрицы и состоят из плотноупакованных глобул (шариков)  $\text{SiO}_2$ . Между глобулами присутствуют октаэдрические и тетраэдрические пустоты (поры) размером 10–50 нм. Внутри пор фотонного кристалла могут быть введены различные соединения, что позволяет управлять оптическими свойствами таких фотонных кристаллов и создавать гибридные материалы: диэлектрики–сегнетоэлектрики, диэлектрики–полупроводники, диэлектрики–металлы и т.д. С помощью электронной микроскопии было установлено расположение этих пор относительно друг друга и их размеры в различных опалах. В искусственных опалах

<sup>1</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: gorelik@sci.lebedev.ru.

глобулы имеют близкие диаметры и расположены регулярными слоями, образующими кристаллическую решетку [3]. В реальных опалах глобулы вследствие деформации структуры приобретают несколько отличную от сферической форму. В идеальной структуре недеформированных сферических глобул все поры сообщаются между собой и с окружающей средой. Однако при деформации глобул возникают изолированные от соседних поры. Чем больше степень деформации, тем больше таких изолированных пор, и тем меньше возможность насыщения опала жидкостью. В настоящее время ведутся активные работы с целью разработки на основе синтетических опалов целого ряда различных устройств [4–9]. В частности, открывается возможность для создания нанокompозитов на основе синтетических опалов, заполненных сверхпроводящими, полупроводниковыми и оптически-активными материалами.

Как выяснилось в результате экспериментальных и теоретических исследований [10–14], важным свойством фотонных кристаллов является существование в них разрешённых и запрещённых зон для фотонов благодаря наличию в веществе периодической структуры с периодом, близким к длине электромагнитной волны. Исследования спектров отражения и пропускания электромагнитного излучения глобулярными фотонными кристаллами подтвердили это общее свойство фотонных кристаллов. Отметим также, что ранее [1] сообщалось об обнаружении в глобулярных фотонных кристаллах вторичного излучения в сине-голубой области спектра, возникающего под действием гигантского импульса лазера на рубине (694.3 нм) и наблюдаемого в виде послесвечения в течение нескольких секунд после лазерного импульса. При этом измерения проводились при температуре образца, близкой к точке кипения жидкого азота (77 К).

В данной работе была поставлена задача экспериментального изучения спектров отражения и вторичного излучения глобулярных пористых фотонных кристаллов с использованием различных источников излучения: галогенной лампы и ультрафиолетовых светодиодов.

В качестве образцов для исследования использовались опаловые матрицы, состоящие из плотноупакованных глобул кремнезёма диаметром 200–400 нм. Исследование оптических свойств пористых фотонных кристаллов проводилось на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 1. Образец фотонного кристалла (4) размещался на тефлоновой пластине (2) перпендикулярно направлению [111]. Свет от источника опорного излучения (светодиода или галогенной лампы) (1) по оптоволокну подавался на входной канал двухжильного световода (3). После отражения от поверхности (111) фотонного кристалла по другому оптоволоконному каналу излучение

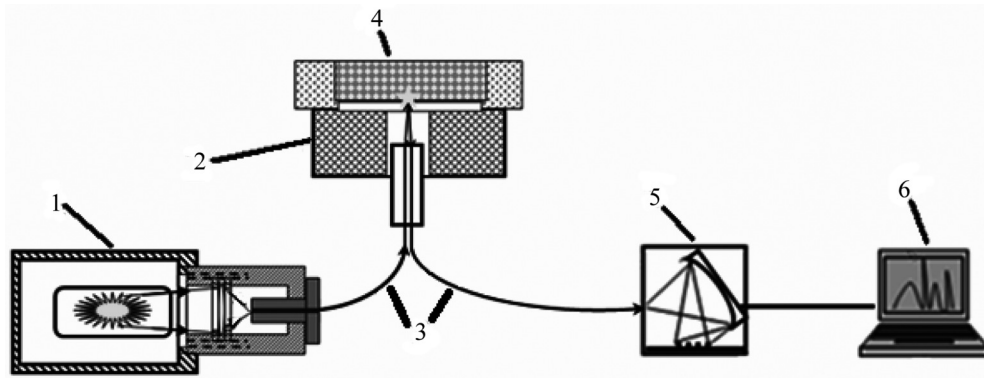


Рис. 1: Схема экспериментальной установки для получения спектров отражения от широкополосных и квазимонохроматических источников излучения. Цифрами обозначены: 1 – галогенная лампа; 2 – тефлоновая пластина; 3 – световоды; 4 – опал; 5 – спектрометр; 6 – компьютер.

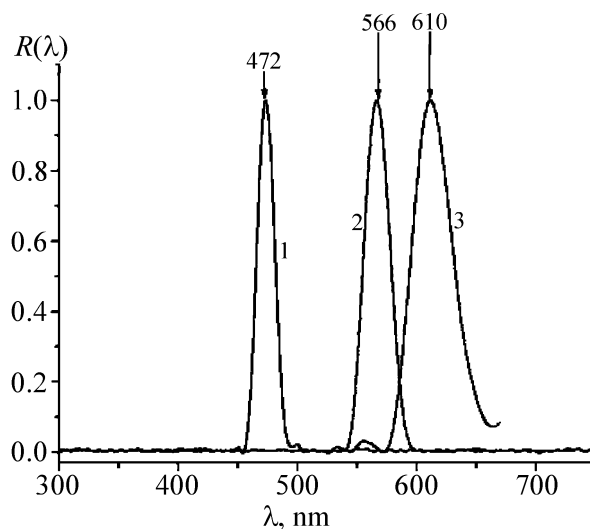


Рис. 2: Нормированные спектры отражения широкополосного излучения галогенной лампы от поверхности (111) опаловых матриц; кривая (1) соответствует диаметру глобул  $D = 226$  нм; (2) 271 нм; (3) 292 нм.

поступало на вход цифрового спектрометра (5), подключенного к компьютеру (6). За-регистрированные спектры посредством специального программного обеспечения пере-водились в табличную форму и заносились в базу данных для последующего хранения и обработки. Для выделения сигнала использовались специальные алгоритмы филь-трации шумов, основанные на нелинейной аппроксимации данных.

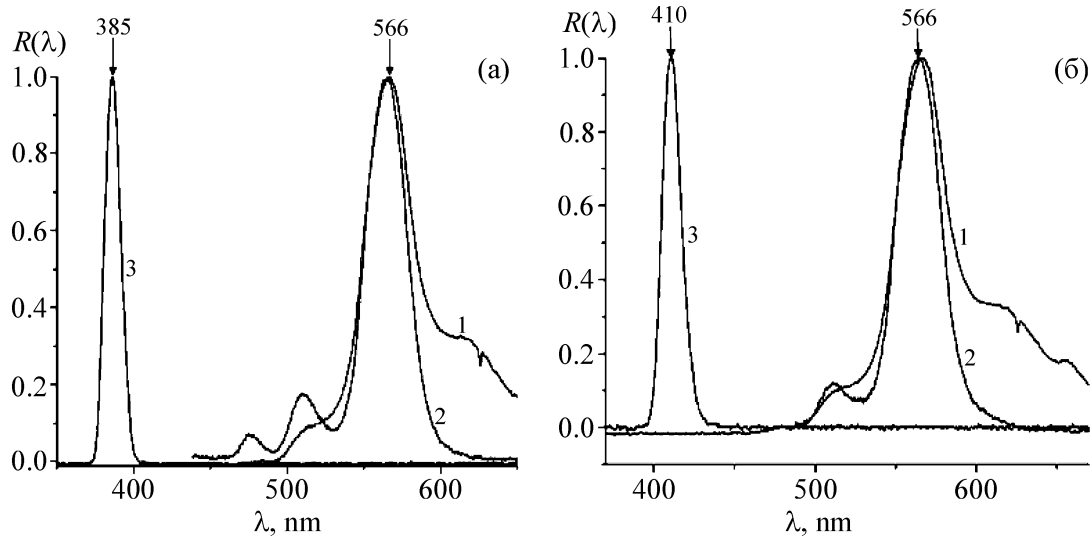


Рис. 3: Нормированный спектр конверсионного отражения излучения светодиодов от поверхности (111) опаловой матрицы (2) при диаметре глобул  $D = 271$  нм; (а) возбуждение светодиодом с длиной волны  $\lambda = 385$  нм (кривая 3(а)); (б) возбуждение светодиодом с длиной волны  $\lambda = 410$  нм (кривая 3(б)); кривые 1 соответствуют нормированным на максимум интенсивности спектрам отражения широкополосного излучения галогенной лампы от поверхности (111) опаловых матриц.

На рис. 2 приведены результаты измерений спектров отражения для трёх образцов с различными диаметрами глобул.

Как видно из этого рисунка, в спектрах отражения проявляются резкие полосы, соответствующие первой стоп-зоне исследуемых фотонных кристаллов. С увеличением диаметра глобул наблюдается спектральный сдвиг максимумов интенсивности обсуждаемых полос в длинноволновую область. Это согласуется с известным соотношением Брэгга–Вульфа (для нормального падения на поверхность (111) глобулярного фотонного кристалла):

$$m\lambda_0 = 2\sqrt{\frac{2}{3}}Dn_{\text{eff}}; \quad n_{\text{eff}} = \sqrt{n_1^2\eta + n_2^2(1-\eta)}. \quad (1)$$

Здесь  $m = 1, 2, 3, \dots$  номер стоп-зоны. В случае глобулярного фотонного кристалла, состоящего из глобул кремнезема;  $n_1 = 1.36$ ;  $n_2 = 1$ ;  $\eta = 0.74$ ;  $D$  – диаметр глобул;  $n_{\text{eff}}$  – эффективный показатель преломления кристалла.

На рис. 3 ((а), (б)) приведены нормированные спектры вторичного излучения (кривые 2), полученные при возбуждении светодиодами ((а) 385 нм, (б) 410 нм) глобулярного фотонного кристалла по схеме, представленной на рис. 1. На этих рисунках приведе-

ны также нормированные спектры светодиодов (кривые 3) и спектры отражения от поверхности (111) излучения галогенной лампы (кривые 1), соответствующие полосе с максимумом на длине волны 566 нм (см. рис. 2). Как видно из рис. 3, 4, наблюдаемые спектры, полученные при освещении поверхности фотонного кристалла галогенной лампой и светодиодами, очень близки по форме; длина волны максимумов интенсивности в обсуждаемых спектрах практически совпадают. Эффект возникновения полосы вторичного излучения в области стоп-зоны фотонного кристалла с преобразованием частоты возбуждающего излучения в длинноволновый диапазон спектра классифицируется как конверсионное отражение – “даун-конверсия”.

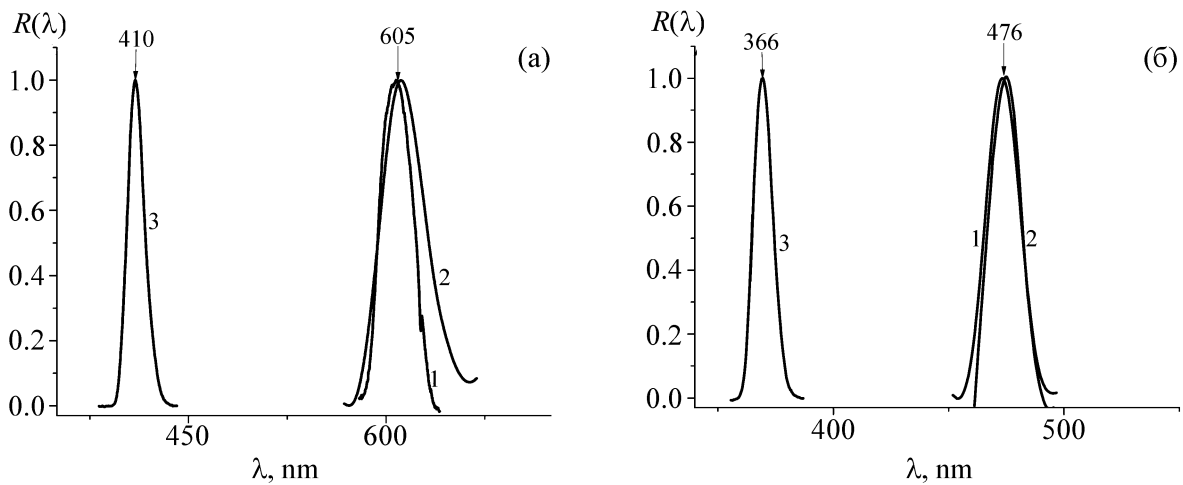


Рис. 4: Конверсионные спектры отражения от поверхности (111) опаловой матрицы излучения светодиодов; (а)  $\lambda = 410$  нм,  $D = 292$  нм и (б)  $\lambda = 366$  нм,  $D = 226$  нм (2) и нормированный спектр отражения широкополосного излучения галогенной лампы от этой поверхности (1).

На рис. 4 ((а), (б)) представлены конверсионные спектры отражения от поверхности (111) опаловой матрицы излучения светодиодов; (а) с длиной волны  $\lambda = 410$  нм для опала с диаметром глобул  $D = 292$  нм (кривая 2), (б) с длиной волны  $\lambda = 366$  нм для опала с диаметром глобул  $D = 226$  нм (кривая 2). Кроме того, на этом рисунке приведены нормированные спектры отражения широкополосного излучения галогенной лампы от поверхности (111) опаловых матриц (кривая 1) и нормированные спектры излучения светодиодов (кривые 3). Как видно из этого рисунка, длины волн максимумов интенсивности конверсионного отражения света светодиодов близки к длинам волн максимумов интенсивности отраженного излучения галогенной лампы ( $\lambda = 476$  и  $605$  нм).

Таким образом, нами установлено, что при освещении образцов опаловых матриц излучением полупроводниковых светодиодов наблюдается конверсионное отражение возбуждающего излучения в виде полосы, спектральная форма которой близка к полосе отражения широкополосного излучения от поверхности опаловых матриц.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] В. С. Горелик, Квантовая электроника **37**(5), 409 (2007).
- [2] К. Asakawa, Y. Sugimoto, New Journal of Physics **8**, 208 (2006).
- [3] P. Russell, Phys. Rev. **33**(5), 3232 (1986).
- [4] А. Ф. Белянин, Технология и конструирование в электронной аппаратуре **4**, 55 (2008).
- [5] М. И. Самойлович, Технология и конструирование в электронной аппаратуре **1**, 49 (2010).
- [6] А. Ф. Белянин, Нано- и микросистемная техника **10**, 31 (2012).
- [7] М. И. Самойлович, Наука и технологии в промышленности **3**, 61 (2009).
- [8] М. И. Самойлович, Микросистемная техника **6**, 3 (2004).
- [9] H. Yokoyama, Science **256**, 66 (1992).
- [10] E. Yablonovich, Phys. Rev. Lett. **58**, 2059 (1987).
- [11] В. П. Быков, ЖЭТФ **62**, 505 (1972).
- [12] S. John, Phys. Rev. Lett. **58**, 2486 (1987).
- [13] В. Г. Голубев, В. А. Кособукин, Д. А. Курдюков, ФТП **35**, 710 (2001).
- [14] Y. A. Vlasov, V. N. Astratov, A. V. Baryshev, Phys. Rev. **61**, 5784 (2000).

Поступила в редакцию 17 июня 2015 г.