

**РЕЗОНАНСНЫЕ ГЛОБУЛЯРНЫЕ ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ,
ЗАПОЛНЕННЫЕ НАНОЧАСТИЦАМИ $\text{Al}_2\text{O}_3:(\text{Cr}^{3+})$** **В.С. Горелик^{1,2}, А.В. Пудовкин¹**¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

e-mail: gorelik@sci.lebedev.ru

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Решена задача теоретического и экспериментального исследования резонансных глобулярных фотонных кристаллов на примере опаловых матриц, заполненных наночастицами $\text{Al}_2\text{O}_3 : (\text{Cr}^{3+})$. Объектом исследования являлись искусственные опалы, с различными диаметрами глобул (200, 290 и 340 нм) при фиксированной концентрации ионов хрома. Присутствие ионов хрома приводило к резонансу диэлектрической проницаемости нанокompозитной среды на длине волны 694,3 нм. Установлено, что в зависимости от диаметра изменяется положение резонансной дисперсионной ветви в исследуемых кристаллах. В частности, при диаметре глобул, равном 290 нм, резонансный уровень находится в стоп-зоне нанокompозитного фотонного кристалла.

Ключевые слова: фотонный кристалл, хром, ион, резонанс, запрещенная зона, групповая скорость, спектр, коэффициент преломления.

**RESONANCE GLOBULAR PHOTONIC CRYSTALS FILLED
WITH $\text{Al}_2\text{O}_3:(\text{Cr}^{3+})$ NANOPARTICLES****V.S. Gorelik^{1,2}, A.V. Pudovkin¹**¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

e-mail: gorelik@sci.lebedev.ru

²Lebedev Physical Institute, RAS, Moscow, Russia

A problem of theoretical and experimental research of resonance globular photonic crystals is solved by example of opal matrices filled with $\text{Al}_2\text{O}_3 : (\text{Cr}_3^+)$ nanoparticles. The artificial opals with different-diameter globules (200, 290, and 340 nm) at fixed concentration of chromium ions were objects for investigations. The presence of chromium ions led to a resonance of the nanocomposite medium permittivity at a wavelength of 694.3 nm. It is found that a position of the resonance dispersion branch in the crystal under study changes depending on a diameter of the globules. In particular, the resonant level is in the bandgap of the nanocomposite photonic crystal at a globule diameter of 290 nm.

Keywords: photonic crystal, chromium, ion, resonance, bandgap, group velocity, spectrum, refractive index.

Фотонные кристаллы — это особый тип структур с периодически изменяющейся диэлектрической проницаемостью в пространстве. Характерным свойством фотонных кристаллов является наличие в их спектре так называемых запрещенных зон, в спектральной области которых электромагнитные волны испытывают полное отражение.

В данной работе решалась задача анализа спектров глобулярных фотонных кристаллов, заполненных резонансной средой, характеризу-

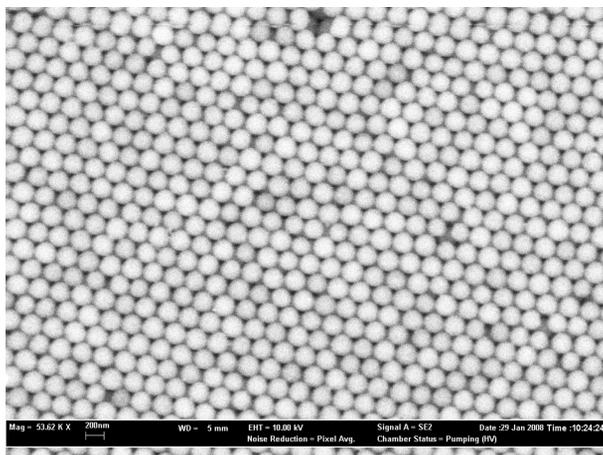


Рис. 1. Вид поверхности (111) глобулярного фотонного кристалла, полученный с помощью электронного микроскопа

ющейся наличием полюса диэлектрической проницаемости в видимой области спектра.

Глобулярные фотонные кристаллы представляют собой объемные среды, состоящие из плотно упакованных шарообразных элементов одинакового диаметра (200–600 нм.). Примером такого типа фотонных кристаллов являются опаловые матрицы (искусственные опалы), сформированные из шаров (глобул) аморфного кварца в виде гранцентрированной кубической кристаллической решетки [1–3]. Характерный вид поверхности глобулярного фотонного кристалла, полученный с помощью электронного микроскопа, представлен на рис. 1.

Ранее исследования фотонных кристаллов в оптическом диапазоне проводились лишь для одномерных и двумерных структур [4], а также для глобулярных фотонных кристаллов с заданными значениями показателей преломления в видимой области спектра. Особый интерес представляют так называемые резонансные фотонные кристаллы, характеризующиеся аномальным возрастанием диэлектрической проницаемости и показателя преломления среды, введенной в поры фотонного кристалла, в определенных областях спектра.

Резонансные фотонные кристаллы характеризуются тем, что в них присутствуют дефекты или введены вещества, у которых диэлектрическая проницаемость имеет полюс на определенной частоте, соответствующей инфракрасному, видимому или ультрафиолетовому диапазонам [5].

Объектом исследования являлись искусственные опалы, в порах которых присутствовали наночастицы $\text{Al}_2\text{O}_3 : (\text{Cr}^{3+})$, характеризующиеся присутствием резкого резонанса на длине волны 694,3 нм.

Был рассчитан вид дисперсионных кривых и получены зависимости коэффициента преломления от частоты падающего излучения

для глобулярного фотонного кристалла, поры которого имеют диаметр 200, 290, 340 нм и заполнены наночастицами $\text{Al}_2\text{O}_3 : (\text{Cr}^{3+})$ с концентрацией хрома 1021 см^{-3} .

Методика расчета вида спектра трехмерного резонансного фотонного кристалла состоит в следующем. При описании оптических свойств исследуемых кристаллов для заданного кристаллографического направления вдоль [111] может быть использована одномерная модель фотонного кристалла. При этом дисперсионное уравнение для электромагнитных волн имеет вид [6]

$$\cos k_1 a_1 \cdot \cos k_2 a_2 - \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{\sqrt{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}} \sin k_1 a_1 \cdot \sin k_2 a_2 = \cos ka. \quad (1)$$

Величины, входящие в (1), имеют следующий физический смысл: индекс $i = 1$ относится к SiO_2 (опаловой матрице); $i = 2$ — индекс, соответствующий пустотам, заполненным веществом; $\varepsilon_1 = (n_1)^2 = (1,46)^2 = 2,13$ — диэлектрическая проницаемость кварца; $\varepsilon_2 = \varepsilon_2(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 - \omega^2}$ — диэлектрическая проницаемость области с ионами хрома (Cr^{3+}); $\omega_0 = 2\pi c/\lambda_0 = 2715 \text{ ТГц}$ — частота, соответствующая основному переходу в ионе хрома; $\omega_p^2 = \frac{e^2 N_e}{m\varepsilon_0} = 1784 \text{ ТГц}$ — плазменная частота области с ионами хрома; $\varepsilon_\infty = 1$; $\eta = 0,26$ — коэффициент эффективной пористости образцов; $D = 200, 290, 340 \text{ нм}$ — диаметры глобул кварца; $a = D\sqrt{\frac{2}{3}}$ — период структуры изучаемых образцов опалов; $a_1 = (1 - \eta)a$, $a_2 = \eta a$ — пространственные доли заполнения SiO_2 и ионами хрома соответственно; ω_i — циклическая частота электромагнитной волны; $k_i = \frac{\omega}{c} n_i$ — волновой вектор в i -й среде.

Уравнение (1) — трансцендентное, что не позволяет получить в явном виде дисперсионную зависимость $\omega = \omega(k)$, поэтому в дальнейших вычислениях рассчитывали зависимость $k = k(\omega)$. Получены следующие результаты для опала, заполненного наночастицами $\text{Al}_2\text{O}_3 : (\text{Cr}^{3+})$, характеризующимися наличием полюса диэлектрической проницаемости, соответствующего первому возбужденному электронному состоянию ионов хрома (694,3 нм).

Рассчитан вид дисперсионных кривых для опала с пустыми порами диаметром 200, 290, 340 нм и порами, заполненными $\text{Al}_2\text{O}_3 : (\text{Cr}^{3+})$ (рис. 2); установлен закон дисперсии коэффициента преломления для опала, заполненного $\text{Al}_2\text{O}_3 : (\text{Cr}^{3+})$ (рис. 3); рассчитаны значения коэффициента отражения широкополосного излучения от поверхности (111) в зависимости от частоты (рис. 4) и длины волны (рис. 5) для опала, заполненного $\text{Al}_2\text{O}_3 : (\text{Cr}^{3+})$.

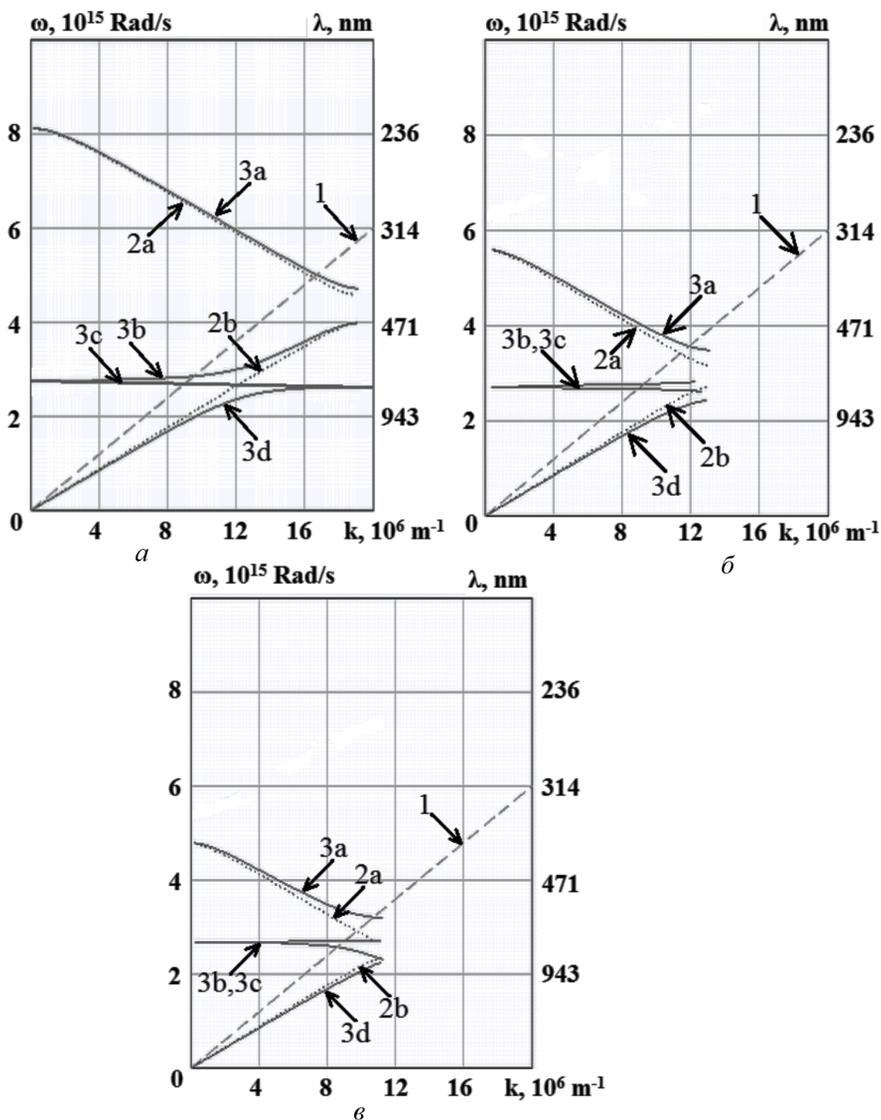


Рис. 2. Дисперсионные кривые для опалов с различными диаметрами глобул, заполненных $\text{Al}_2\text{O}_3 : (\text{Cr}^{3+})$ на длине волны 200 (а), 290 (б) и 340 нм (в): прямая 1 соответствует дисперсионной зависимости электромагнитных волн в вакууме ($\omega = ck$); кривые 2 соответствуют незаполненным опалам; кривые 3 соответствуют опалам, заполненным $\text{Al}_2\text{O}_3 : (\text{Cr}^{3+})$

Как видно из рис. 2, на дисперсионных кривых для опала, заполненного $\text{Al}_2\text{O}_3 : (\text{Cr}^{3+})$, имеются практически горизонтальные ветви (3b и 3c), что свидетельствует об аномально низкой групповой скорости света для соответствующих частот.

В представленных на рис. 5 зависимостях коэффициента отражения от длины волны присутствует узкая линия благодаря наличию хрома Cr^{3+} в порах фотонного кристалла, что дает возможность получать узкополосное излучение.

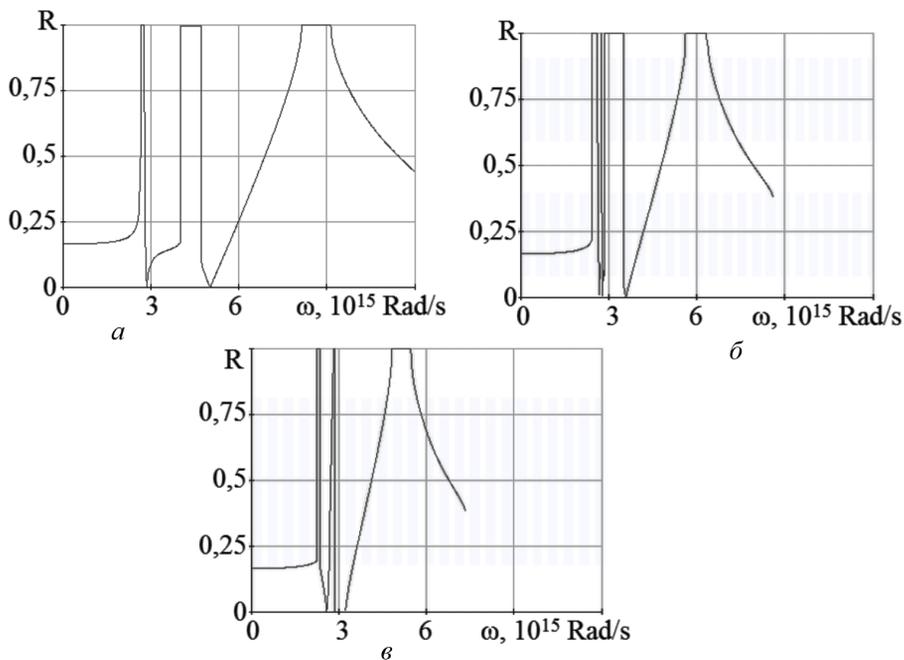


Рис. 3. Дисперсия коэффициента преломления для опала с диаметрами глобул 200 (а), 290 (б) и 340 нм (в), заполненного хромом $\text{Al}_2\text{O}_3 : (\text{Cr}^{3+})$ ($\omega_0 = 2,7 \cdot 10^{15}$, $\epsilon_\infty = 1$)

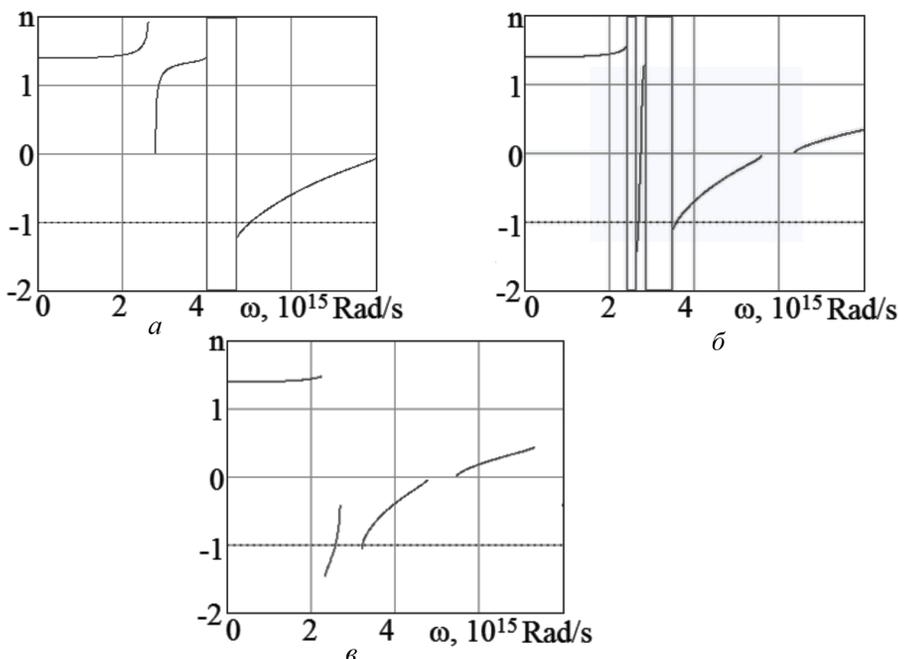


Рис. 4. Зависимость коэффициента отражения от частоты падающего излучения для опала с диаметрами глобул 200 (а), 290 (б) и 340 нм (в), заполненного $\text{Al}_2\text{O}_3 : (\text{Cr}^{3+})$

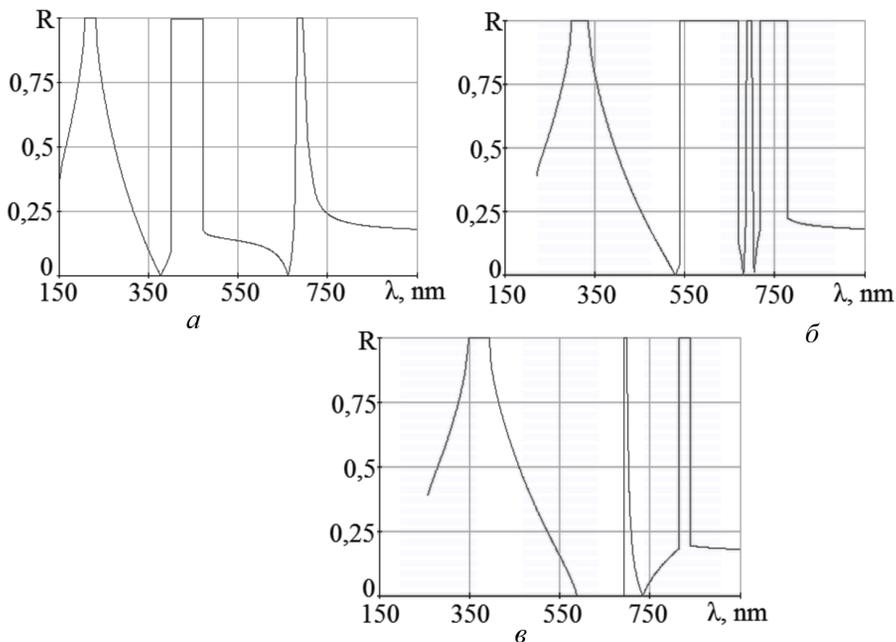


Рис. 5. Зависимость коэффициента отражения от длины волны падающего излучения для опала с диаметрами глобул 200 (а), 290 (б) и 340 нм (в), заполненного $\text{Al}_2\text{O}_3 : (\text{Cr}^{3+})$

Таким образом, в результате теоретического анализа дисперсионных зависимостей заполненного $\text{Al}_2\text{O}_3 : (\text{Cr}^{3+})$ фотонного кристалла установлено, что в спектре отражения рассматриваемого резонансного фотонного кристалла возникает дополнительный максимум, параметры которого зависят от концентрации наполнителя. Рассчитанные дисперсионные зависимости показывают, что в резонансном фотонном кристалле могут быть реализованы селективное отражение света и аномальное замедление скорости электромагнитного излучения в области частот резонансной моды. Такие свойства фотонных кристаллов могут быть использованы для создания узкополосных отражающих фильтров и селективных зеркал для лазерных резонаторов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 10-02-00293, 11-02-00164, 11-02-12092, 12-02-00491, 12-02-90422, 12-02-90021, 12-02-90025).

ЛИТЕРАТУРА

1. Горелик В.С. Комбинационное рассеяние — 80 лет исследований. М.: ФИАН, 2008. 604 с.
2. Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics // Phys. Rev. Lett. 1987. No. 58. С. 2059.
3. John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices // Phys. Rev. Lett. 1987. No. 58. С. 2486.

4. Горелик В.С., Злобина Л.И., Свербиль П.П., Фадюшин А.Б., Червяков А.В. Комбинационное рассеяние света в трехмерных фотонных кристаллах (препринт 2). М.: ФИАН, 2005. 28 с.
5. Ивченко Е.Л., Поддубный А.Н. // ФТТ. 2006. № 48 (3). С. 540–547.
6. Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. М.: Мир, 1987. 616 с.

REFERENCES

1. Gorelik V.S. Kombinatsionnoe rasseyaniye — 80 let issledovaniy. [Raman scattering: 80 years of study]. Moscow, FIAN Publ., 2008. 604 p.
2. Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, no. 58, pp. 2059.
3. John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, no. 58, pp. 2486.
4. Gorelik V.S., Zlobina L.I., Sverbil' P.P., Fadyushin A.B., Chervyakov A.V. Kombinatsionnoe rasseyaniye sveta v trekhmernykh fotonnykh kristallakh [Raman scattering of light in 3D photon crystals]. Moscow, FIAN Publ., 2005. 28 p.
5. Ivchenko E.L., Poddubnyi A.N. Resonant three-dimensional photonic crystals. *Phys. Solid State*, 2006, vol. 48, no. 3, pp. 581–588. doi: 10.1134/S1063783406030279
6. Yariv A., Yeh P. Optical waves in crystals: propagation and control of laser radiation. New York, Wiley, 2003. 589 p. (Russ. ed.: Yariv A., Yuhk P. Opticheskie volny v kristallakh. Moscow, Mir Publ., 1987. 616 p.).

Статья поступила в редакцию 24.01.2013

Владимир Семенович Горелик — д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана, заведующий лабораторией “Комбинационное рассеяние” Физического института им. П.Н. Лебедева РАН.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991, Москва, Ленинский пр-т, 53.

V.S. Gorelik — Dr. Sci. (Phys.-Math.), professor of “Physics” department of the Bauman Moscow State Technical University, head of “Raman Scattering” laboratory of the Lebedev Physical Institute of the RAS.

Lebedev Physical Institute, RAS, Leninskii pr., 53, Moscow, 119991 Russia.

Александр Владимирович Пудовкин — студент кафедры “Физика” МГТУ им. Н.Э. Баумана.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул. 5.

A.V. Pudovkin — student of the Bauman Moscow State Technical University. Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul., 5, Moscow, 105005 Russia.