

УДК 535.361

Резонансные фотонные кристаллы

08, август 2012

Пудовкин А.В.

*Студент,
кафедра «Физика»*

*Научный руководитель: Горелик В.С.,
доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Физика»*

МГТУ им. Н.Э. Баумана
bauman@bmstu.ru

Фотонные кристаллы – периодически структурированные среды, основным свойством которых является наличие запрещенных зон, т.е. диапазонов частот, в которых полностью подавляется распространение электромагнитных волн через структуру. Особый интерес представляют трехмерные кристаллы, построенные из глобул (шаров) одинакового радиуса. Такие структуры называют глобулярными фотонными кристаллами. Типичным примером глобулярного фотонного кристалла является искусственный опал, основным «строительным элементом» которого являются шары амфорного кварца, образующие ГЦК решетку [1–3]. Фотонные кристаллы – идеальные кандидаты для компонентов лазеров, так как они имеют внешние дефекты, способствующие пропусканию только определенных частот световых волн [4].

Виды поверхностей трёхмерных фотонных кристаллов, полученные с помощью электронного микроскопа, представлены на рис. 1,2. Также на рис. 3 изображена структура фотонного кристалла с порами, заполненными веществом.

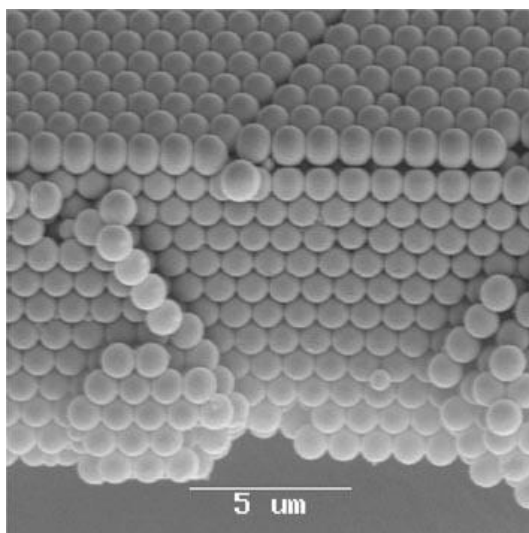


Рис. 1. Электронная фотография

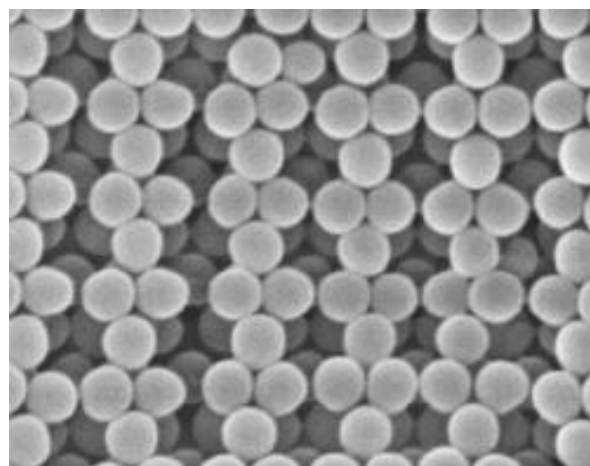


Рис. 2. Увеличенное изображение поверхности (111) фотонного кристалла [5].

поверхности (111) фотонного кристалла [4].

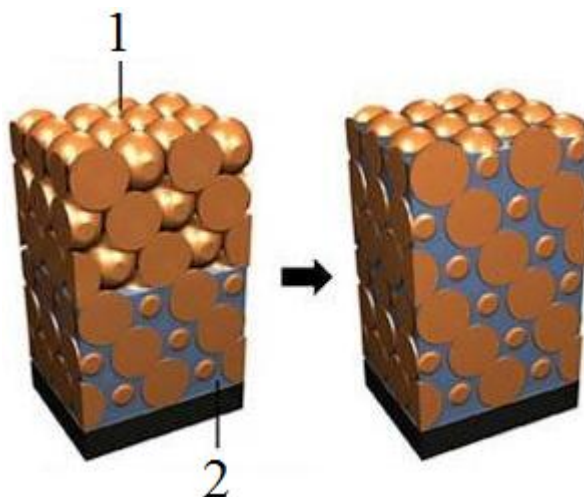


Рис. 3. Схематический вид фотонного кристалла с наполнителем: 1 – глобулы кремнезема, 2 – наполнитель

Ранее исследования фотонных кристаллов в оптическом диапазоне проводились лишь для одномерных и двумерных структур [7], а также для трёхмерных фотонных кристаллов с заданными значениями показателей преломления в видимой области спектра. Особый интерес представляют так называемые резонансные фотонные кристаллы, характеризующиеся резкими изменениями показателя преломления среды, введённой в поры фотонного кристалла в определённых 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 диапазону [6].

В данной работе ставилась задача теоретического и экспериментального исследования резонансных фотонных кристаллов. Объектом исследования являлись искусственные опалы, в порах которых присутствовали ионы хрома, характеризующиеся присутствием резкого резонанса на длине волны 694,3 нм. Рассчитывался вид дисперсионных кривых и зависимости коэффициента преломления от частоты падающего излучения для глобулярного фотонного кристалла, поры которого имеют диаметр 200 нм и заполнены ионами $\text{Al}_2\text{O}_3:(\text{Cr}^3)$ с концентрацией хрома 10^{21} см^{-3} .

Методика расчета вида спектра трехмерного резонансного фотонного кристалла состоит в следующем. В случае описания оптических свойств исследуемых образцов вдоль кристаллографического направления [111] дисперсионное уравнение имеет вид [8]:

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

Величины, входящие в (1), имеют следующий физический смысл: $i = 1$ – индекс, относящийся к SiO_2 (опаловой матрице); $i = 2$ – индекс, соответствующий пустотам, заполненным веществом; $\varepsilon_1 = \varepsilon_1(\omega)$ – 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+}); $\omega_0 = \frac{2\pi c}{\lambda_0}$, $\omega_p^2 = \frac{e^2 \cdot N_e}{m\epsilon_0}$ – частота, соответствующая основному переходу в ионе хрома и плазменная частота области с ионами хрома соответственно; $\eta = 0,26$ – коэффициент эффективной пористости образцов; $D = 200$ нм – диаметр 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 – циклическая частота электромагнитной волны; $k_i = \frac{\omega}{c} \cdot n_i$ – волновой вектор в i -ой среде.

Уравнение (1) носит трансцендентный характер, что не позволяет получить в явном виде дисперсионную зависимость $\omega = \omega(k)$, поэтому в дальнейших вычислениях рассчитывается зависимость $k = k(\omega)$. Для расчета параметров фотонных кристаллов была написана программа в системе автоматического проектирования Mathcad и получены следующие результаты.

1. Рассчитан вид дисперсионных кривых для опала с пустыми порами и порами заполненными $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{Cr}^{3+})$ (Рис. 4).

2. Рассчитана дисперсия коэффициента преломления для опала, заполненного $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{Cr}^{3+})$ (Рис. 5).

3. Рассчитаны зависимости коэффициента отражения от частоты (Рис. 6) и длины волны (Рис. 7) для опала, заполненного $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{Cr}^{3+})$.

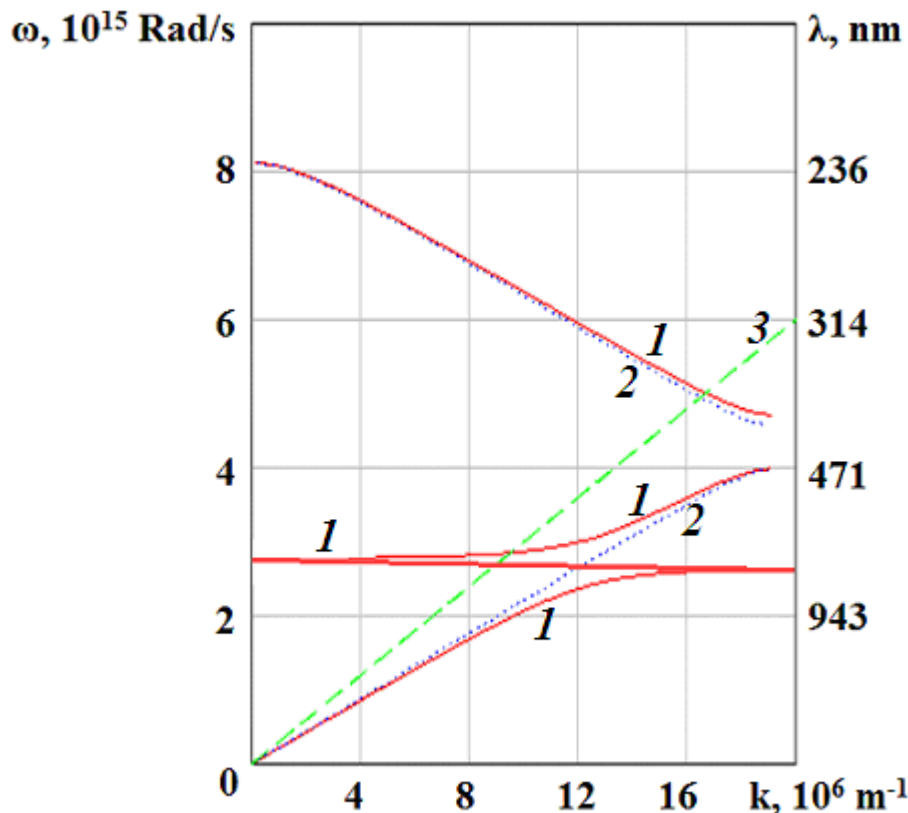


Рис.4. Дисперсионные кривые для опала, заполненного $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{Cr}^{3+})$ (1) ($\omega_0 = 2,7 \cdot 10^{15}$, $\epsilon_\infty = 1$), для незаполненного опала (2) ($\omega_p = 0$, $\epsilon_\infty = 1$) и кривая 3 соответствует дисперсионной зависимости $\omega = ck$

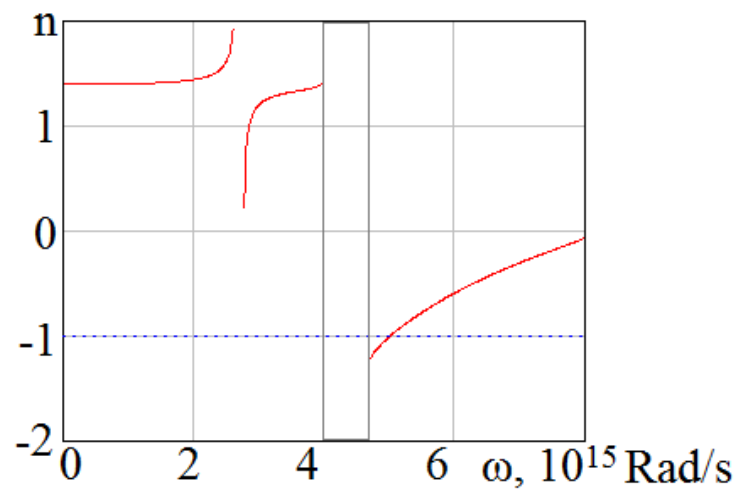


Рис. 5. Дисперсия коэффициента преломления для опала, заполненного хромом $\text{Al}_2\text{O}_3:(\text{Cr}^{3+})$ ($\omega_0 = 2,7 \cdot 10^{15}$, $\varepsilon_\infty = 1$).

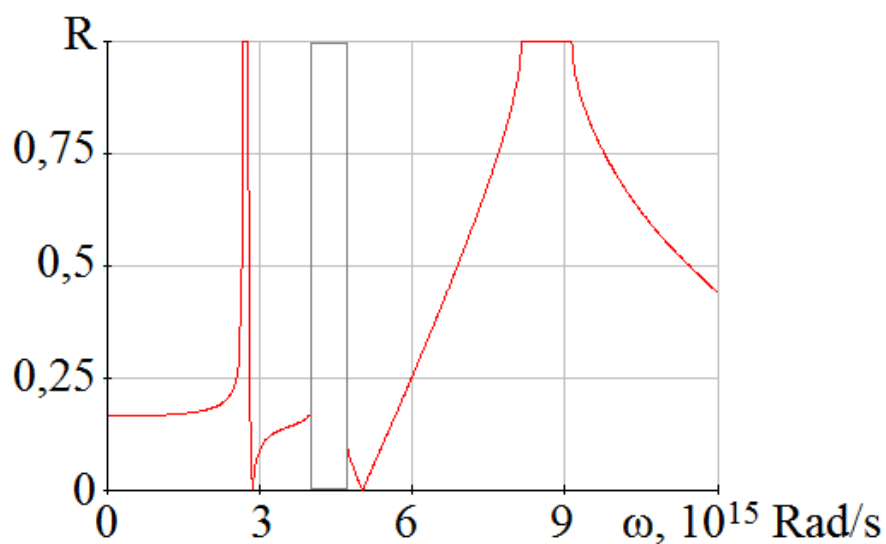


Рис. 6. Зависимость коэффициента отражения от частоты падающего излучения для опала, заполненного $\text{Al}_2\text{O}_3:(\text{Cr}^{3+})$.

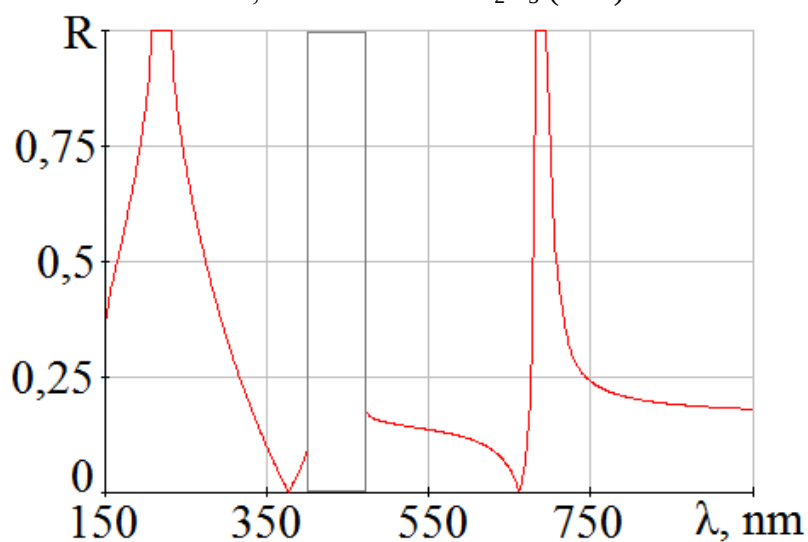


Рис. 7. Зависимость коэффициента отражения от длины волны падающего излучения для опала, заполненного $\text{Al}_2\text{O}_3:(\text{Cr}^{3+})$

В процессе выполнения была разработана и отлажена компьютерная программа для расчета оптических свойств резонансных фотонных кристаллов. Вычислены дисперсионные зависимости распространения электромагнитных волн в резонансных фотонных кристаллах, а также зависимости показателя преломления от частоты как в исходных опалах, так и в образцах, заполненных $\text{Al}_2\text{O}_3:(\text{Cr}^{3+})$ для диаметра пор 200 нм.

Получены зависимости коэффициента отражения R от частоты $R(\omega)$ и длины волны $R(\lambda)$ для возможности экспериментальной проверки.

У дисперсионной кривой для опала, заполненного $\text{Al}_2\text{O}_3:(\text{Cr}^{3+})$ (рис. 4) обнаружилось практически «горизонтальные» ветви, что говорит об аномально низкой групповой скорости света для соответствующих частот.

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

Таким образом, в результате теоретического анализа дисперсионных зависимостей фотонного кристалла, заполненного ионами хрома установлено, что в спектре отражения рассматриваемого резонансного фотонного кристалла возникает дополнительный разрыв, параметры которого зависят от концентрации ионов хрома. Установленные дисперсионные зависимости показывают, что в резонансном фотонном кристалле может быть реализовано аномальное замедление скорости света, представляющее большой практический интерес.

Литература

1. В.С. Горелик. Комбинационное рассеяние – 80 лет исследований. – Москва: ФИАН, 2008. – 604с.
2. E. Yablonovitch. Phys. Rev. Lett., **58**, 2059, (1987).
3. S. John. Phys. Rev. Lett., **58**, 2486. (1987).
4. ФНМ МГУ. Нанометр, (2011).
5. Ю. Свидиненко, Nanotechnology News Network, (2009).
6. Е. Л. Ивченко, А. Н. Поддубный. Физика твёрдого тела, **48**, вып. 3, стр. 540-547, (2006).
7. В.С. Горелик, Л.И. Злобина, П.П. Свербиль, А.Б. Фадюшин, А.В. Червяков. Комбинационное рассеяние света в трехмерных фотонных кристаллах (препринт 2). – Москва: ФИАН, 2005. – 28с.
8. А. Ярив, П. Юх. Оптические волны в кристаллах. – Москва: Мир, 1987. – 616с.