

**Глобулярные фотонные кристаллы, заполненные  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$  с малой концентрацией хрома**

**Пудовкин А.В., студент**

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Физика»*

*Научный руководитель: Горелик В.С., профессор*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана  
[amor@bmstu.ru](mailto:amor@bmstu.ru)*

Фотонные кристаллы – это особый тип структур с периодически изменяющейся диэлектрической проницаемостью в пространстве, характеризующийся наличием частотных диапазонов, на которых электромагнитные волны испытывают полное отражение, так называемых запрещенных зон. В данной работе рассматриваются глобулярные фотонные кристаллы, представляющие из себя объемные среды с периодической структурой, состоящие из шарообразных элементов наноразмеров (200–350 нм) одинакового радиуса. Искусственный опал, один из таких объектов, образован из шаров амфорного кварца, объединенных в ГЦК решетку [1–3].

Ранее исследования фотонных кристаллов в оптическом диапазоне проводились лишь для одномерных и двумерных структур [4], 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, введенной 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 [5].

В данной работе ставилась задача теоретического исследования резонансных фотонных кристаллов. Объектом исследования являлись искусственные опалы, в порах

которых присутствовали ионы хрома  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$ , 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  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

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 [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:  $i = 1$  – индекс, относящийся к  $\text{SiO}_2$  (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 ( $\text{Cr}^{3+}$ );

$\omega_0 = \frac{2\pi c}{\lambda_0}$ ,  $\omega_p^2 = \frac{e^2 \cdot N_e}{m \varepsilon_0}$  – 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  $\text{SiO}_2$  и ионами хрома соответственно;  $\omega$  – 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  $\omega(k)$ , поэтому в дальнейших вычислениях рассчитывается зависимость  $k = k(\omega)$ . Были получены следующие результаты.

1. Рассчитан вид дисперсионных кривых для опала с порами 200 нм, заполненными  $\text{Al}_2\text{O}_3:(\text{Cr}^{3+})$  с концентрацией хрома  $10^{19} \text{ см}^{-3}$  (Рис. 1).

2. Рассчитана дисперсия коэффициента преломления для опала, заполненного  $\text{Al}_2\text{O}_3:(\text{Cr}^{3+})$  с концентрацией хрома  $10^{19} \text{ см}^{-3}$  (Рис. 2).

3. Рассчитаны зависимости коэффициента отражения от частоты (Рис. 3) и длины волны (Рис. 4) для опала, заполненного  $\text{Al}_2\text{O}_3:(\text{Cr}^{3+})$  с концентрацией хрома  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

Как видно из рис. 1, на дисперсионной кривой для опала, заполненного  $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{Cr}^{3+})$  имеются практически «горизонтальные» ветви, что свидетельствует об аномально низкой групповой скорости света для соответствующих частот.

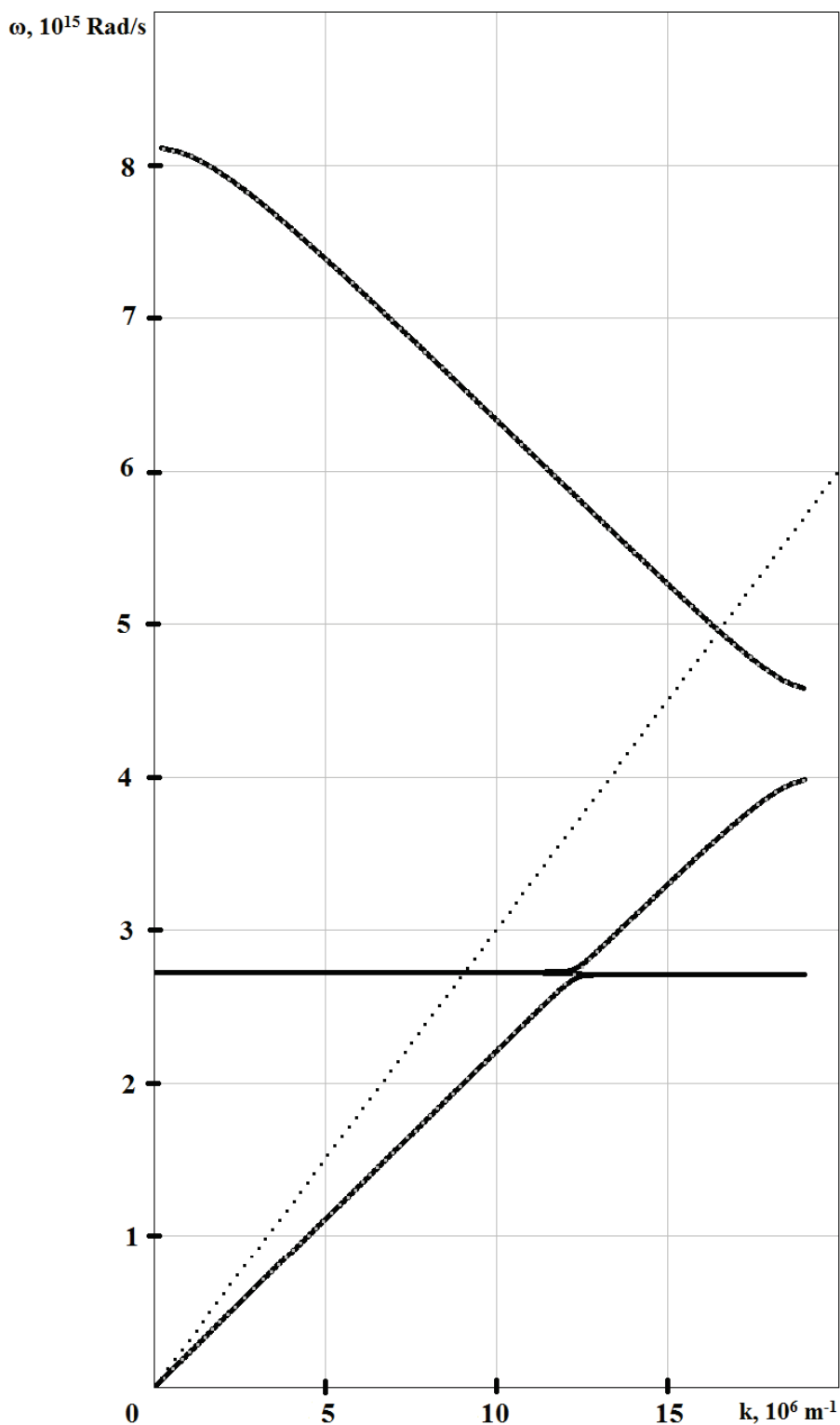


Рис.1. Дисперсионные кривые для опала с диаметром пор 200 нм, заполненного  $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{Cr}^{3+})$  с концентрацией хрома  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ , прямая соответствует дисперсионной зависимости  $\omega = ck$

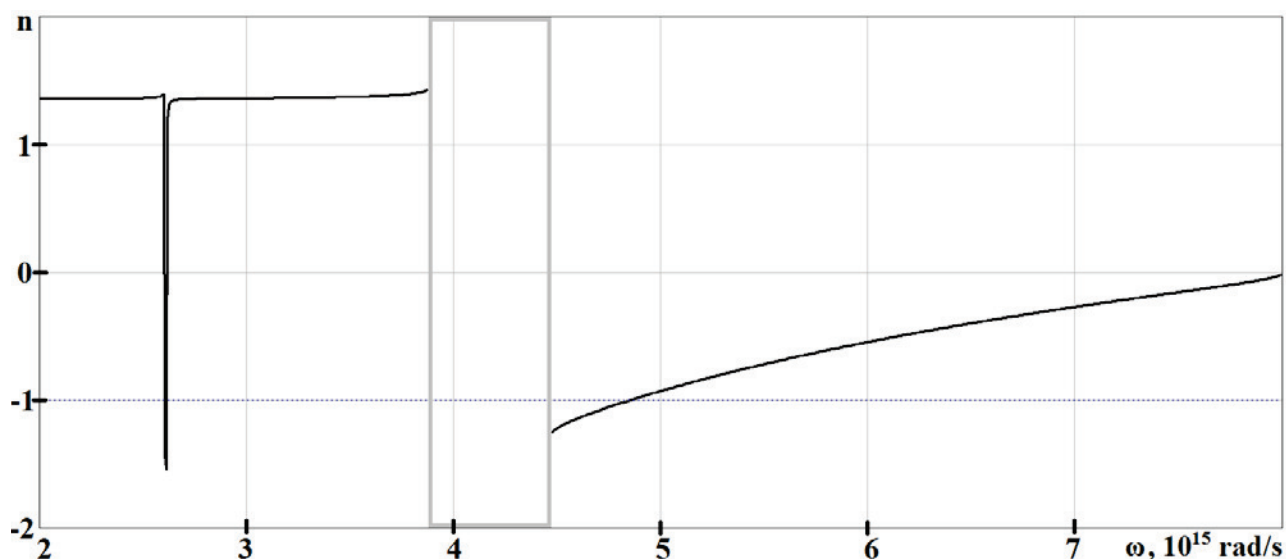


Рис. 2. Дисперсия коэффициента преломления для опала с диаметром пор 200 нм, заполненного хромом  $\text{Al}_2\text{O}_3:(\text{Cr}^{3+})$  с концентрацией хрома  $10^{19} \text{ см}^{-3}$

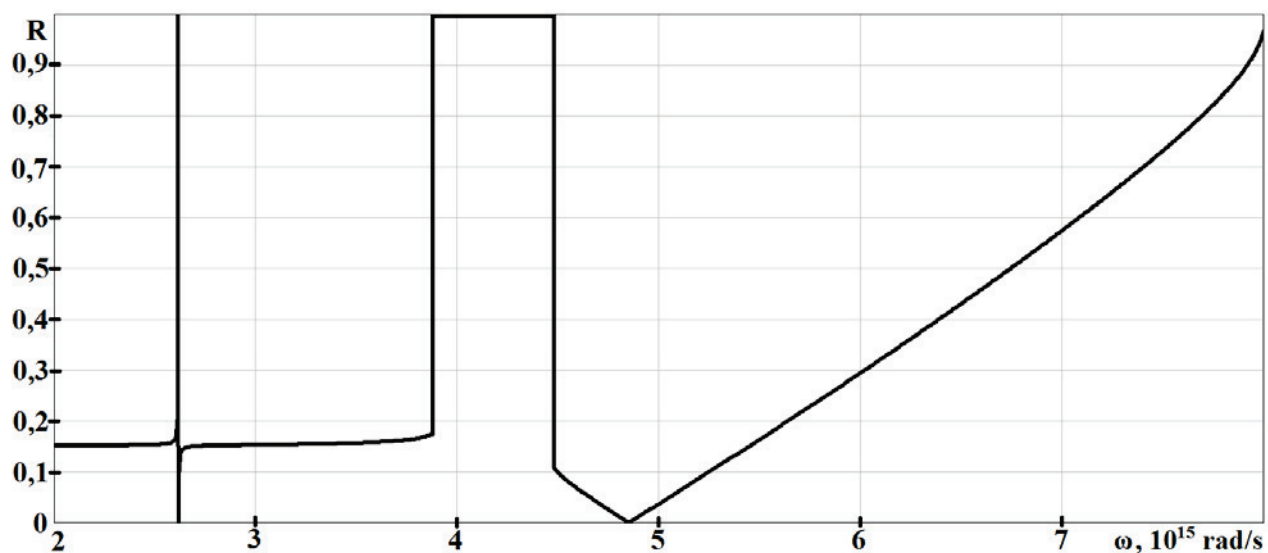


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения от частоты падающего излучения для опала с диаметром пор 200 нм, заполненного  $\text{Al}_2\text{O}_3:(\text{Cr}^{3+})$  с концентрацией хрома  $10^{19} \text{ см}^{-3}$

В представленной на рис. 4 зависимости коэффициента отражения от длины волны присутствует узкая линия благодаря наличию хрома  $\text{Cr}^{3+}$  в порах фотонного кристалла, что дает возможность получать узкополосное излучение.

Таким образом, в результате теоретического анализа дисперсионных зависимостей заполненного фотонного кристалла установлено, что в спектре отражения рассматриваемого резонансного фотонного кристалла возникает дополнительный разрыв, параметры которого зависят от концентрации наполнителя.

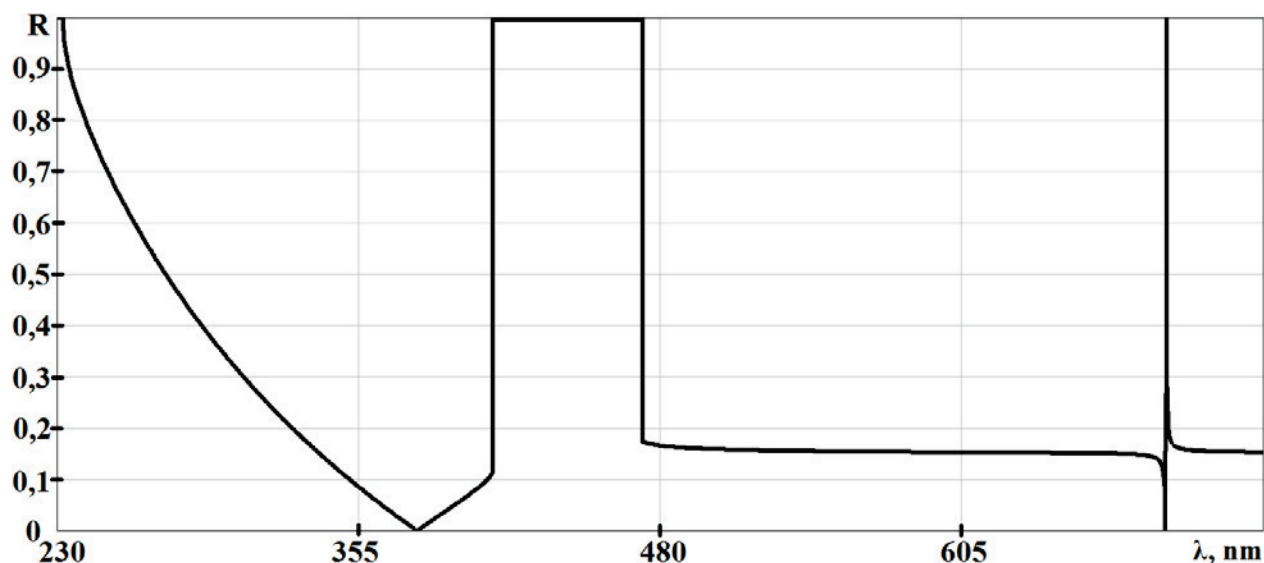


Рис. 4. Зависимость коэффициента отражения от длины волны падающего излучения *для* опала с диаметром пор 200 нм, заполненного  $\text{Al}_2\text{O}_3:(\text{Cr}^{3+})$

Установленные дисперсионные зависимости показывают, что в резонансном фотонном кристалле может быть реализовано аномальное замедление скорости света, представляющее большой практический интерес.

#### Список литературы

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. В.С. Горелик, Л.И. Злобина, П.П. Свербиль, А.Б. Фадюшин, А.В. Червяков. Комбинационное рассеяние света в трехмерных фотонных кристаллах. – Москва: ФИАН, 2005. – 28с.