

УДК 535.012

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕТОВОГО ПОЛЯ В
НАНОКОМПОЗИТЕ С ПРОСТОЙ КУБИЧЕСКОЙ СВЕРХРЕШЕТКОЙ, ОБРАЗОВАННОЙ
МОНОДИСПЕРСНЫМИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ГЛОБУЛАМИ**

Филатов Владимир Викторович, к.ф.-м.н., доцент,

Волкова Вероника Валерьевна, студент,

Гавриловец Дарья Александровна, студент,

Кузьмина Катерина Андреевна, студент,

Кулагина Мария Алексеевна, студент,

Чебакова Софья Александровна, студент

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

**SIMULATION OF LIGHT FIELD INTENSITY DISTRIBUTION INSIDE
A NANOCOMPOSITE WITH A SIMPLE CUBIC SUPERLATTICE FORMED BY
MONODISPERSE DIELECTRIC GLOBULES**

Vladimir Filatov, PhD, vvfilatov@bmstu.ru

Veronika Volkova, volkovavv1@student.bmstu.ru

Daria Gavrilovets, gavrilovetsda@student.bmstu.ru

Catherina Kuzmina, kuzminaka2@student.bmstu.ru

Maria Kulagina, kulaginama@student.bmstu.ru

Sofia Chebakova, chebakovasa@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Russia

Методом лучевых оптических матриц переноса получено распределение электромагнитного поля в трехмерном фотонном кристалле с простой кубической сверхрешеткой из монодисперсных диэлектрических глобул.

Ключевые слова: фотонный кристалл, световое поле, оптическая матрица переноса, получе-
вое сканирование, запрещенная фотонная зона, поверхностное состояние.

The paper reports ray-by-ray optical-transfer-matrix based simulation results for electromagnetic field distribution in a 3D photonic crystal with a simple cubic super-lattice formed by mono-disperse dielectric globules.

Keywords: photonic crystal, light field, optical transfer matrix, ray-by-ray scan, photonic bandgap, surface state.

Фотонные кристаллы – оптические композиционные материалы, обладающие периодической анизотропией показателя преломления с характерным периодом порядка нескольких сотен нанометров [1]. Электромагнитные волны видимого диапазона в таких структурах испытывают многократные переотражения, формируя вдоль некоторых кристаллографических направлений области полной деструктивной интерференции – запрещенные фотонные зоны (стоп-зоны). Отметим, что присутствие стоп-зон в видимой области спектра представляет большой практический интерес, позволяя воспроизвести полупроводниковые эффекты на новой – оптической – материальной базе, что открывает прямой путь к созданию оптического транзистора [2]. В настоящей работе представлены результаты моделирования распространения электромагнитного поля в фотонном кристалле с простой кубической сверхрешеткой из монодисперсных диэлектрических глобул.

На сегодняшний день существует три основных методики расчета оптических полей в фотонном кристалле: 1) аналитическая, в которой работа ведется с дисперсионным соотношением $\omega = \omega(\mathbf{k})$, 2) численная, основанная на конечноразностном (FDTD) решении системы уравнений Максвелла, и 3) полуаналитическая, задействующая трансляционные матрицы. Аналитический подход (1) прекрасно работает для толстых (в идеале бесконечных) образцов, в то время как для тонких пленок следует использовать (медленный) прямой численный счет (2). Полуаналитическая методика (3) применима как для кристаллов, так и для пленок, однако ограничивается приближением малоуглового рассеяния, при котором отклонением светового луча от прямолинейного распространения можно пренебречь. Этого, однако, достаточно для решения многих практически-важных задач, таких, например, как определение положения стоп-зон в образце, поиск оптимального дизайна сверхструктуры и/или оптимальной технологии допирования и т.п., поэтому в данной работе применялась модифицированная полуаналитическая малоугловая парадигма.

Рассмотрим световой луч, распространяющийся в образце вдоль некоторого кристаллографического направления, по которому направим ось x . Внутри фотонного кристалла на пути луча встретятся области с различным показателем преломления, которые будем нумеровать индексом j , их толщины обозначать как a_j , а показатели преломления как n_j . Тогда амплитуда оптического поля E вдоль луча может быть найдена послойным решением волнового уравнения

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

причем представляет собой в каждой области j суперпозицию проходящей и отраженной волн:

$$E_j(x, t) = A_j \exp\{i[k_j(x - x_j) - \omega t]\} + B_j \exp\{-i[k_j(x - x_j) + \omega t]\}. \quad (2)$$

Здесь ω – циклическая частота, $k = \omega n/c$ – волновое число, $n = n(x)$ – локальный показатель преломления, A и B – амплитуды проходящей и отраженной волн, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в пустоте, а $x = x_j$ есть координата левой границы области j , от которой отсчитывается локальная фаза.

Уравнение (1) требует от (2) непрерывности и гладкости всюду, в том числе и на стыке j -й области с $(j+1)$ -й. Таким образом, в точке $x = x_{j+1} = x_j + a_j$ должны выполняться следующие условия:

$$\begin{cases} E_j(x_{j+1}, t) = E_{j+1}(x_{j+1}, t) \\ \left. \frac{\partial E_j(x, t)}{\partial x} \right|_{x_{j+1}} = \left. \frac{\partial E_{j+1}(x, t)}{\partial x} \right|_{x_{j+1}} \end{cases}. \quad (3)$$

Подстановка (2) в (3) дает систему уравнений

$$\begin{cases} A_j \exp(ik_j a_j) + B_j \exp(-ik_j a_j) = A_{j+1} + B_{j+1} \\ ik_j A_j \exp(ik_j a_j) - ik_j B_j \exp(-ik_j a_j) = ik_{j+1} A_{j+1} - ik_{j+1} B_{j+1} \end{cases},$$

определяющую искомую связь амплитуд в соседних слоях:

$$\begin{pmatrix} A_{j+1} \\ B_{j+1} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \left(1 + \frac{k_j}{k_{j+1}} \right) e^{ik_j a_j} & \frac{1}{2} \left(1 - \frac{k_j}{k_{j+1}} \right) e^{-ik_j a_j} \\ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{k_j}{k_{j+1}} \right) e^{ik_j a_j} & \frac{1}{2} \left(1 + \frac{k_j}{k_{j+1}} \right) e^{-ik_j a_j} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} A_j \\ B_j \end{pmatrix} \equiv M_{j \rightarrow j+1} \begin{pmatrix} A_j \\ B_j \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Здесь $M_{j \rightarrow j+1}$ – лучевая матрица перехода от j -й области к $(j+1)$ -й, задающая распределение амплитуд светового поля в каждой точке на пути луча.

Указанным способом (4) луч за лучом был просканирован весь объем фотонного кристалла, что дало распределение интенсивности светового поля во всем образце (см. рис. 1).

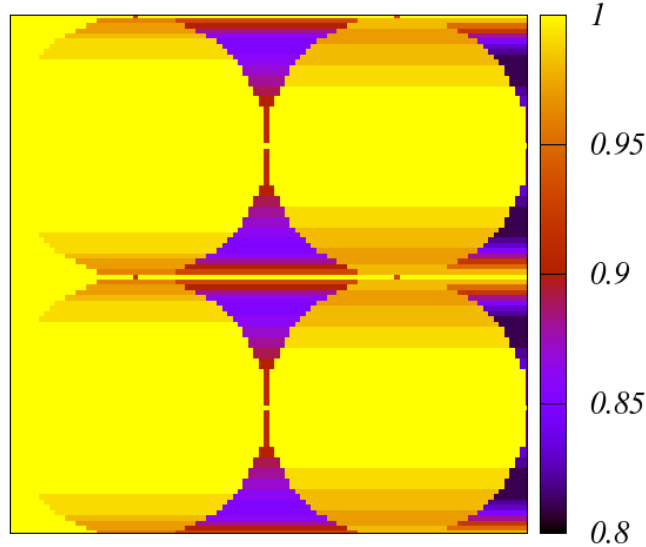


Рисунок – Распределение интенсивности (в единицах интенсивности источника) распространяющегося «вперед» оптического излучения ($|A_j|^2$, см. (2)) на длине волны $\lambda = 500$ нм в фотонном кристалле, сверхрешетка которого образована монодисперсными глобулами диаметра $D = 250$ нм из вещества с показателем преломления $n = 1,5$. В решеточных пустотах воздух

Нами была проведена серия расчетов аналогичных представленному на рис. 1 для различных образцов (варьировался диаметр глобул, их материал, вещество в решеточных пустотах и его возможное распределение по объему, вызванное различными методиками допирования). Для каждого случая было получено распределение интенсивности оптического поля и установлены границы стоп-зон, на краях которых наблюдалась поверхностная локализация поля в оптические состояния высокой интенсивности – поляритонные сингулярности типа ван Хова [3]. Методика продемонстрировала широкие возможности, что позволяет использовать ее в связке с нейросетью для автоматизации поиска оптимальных параметров синтеза и допирования фотонных кристаллов под конкретные задачи, такие как, например, поляритонная ячейка памяти [4] или фотонное арифметико-логическое устройство [5] для фотонного коомпьютера.

Список использованных источников

1. Горелик В.С.. Оптика глобулярных фотонных кристаллов // Квантовая электроника. 2007. Т. 37, № 5. С. 409-432.
2. Алексеенко П.О., Волкова В.В., Д.А. Гавриловец, А.Д. Котова, В.В. Филатов. Дисперсия, рефракция и хиральность электромагнитных волн в фотонном кристалле // Сборник научных трудов XIV Международной конференции по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ, 2025. С. 375-376.
3. Волкова В.В., М.А. Кулагина, В.В. Филатов. Формирование сингулярностей типа ван Хова при распространении волнового поля в одномерной стратифицированной среде // Тезисы докладов VII Школы-конференции молодых ученых «Прохоровские недели». М.: ИОФ РАН, 2024. С. 83-85.

4. Волкова В.В., Д.А. Гавриловец, А.Д. Котова, М.А. Кулагина, В.В. Филатов. Перспективная оптическая ячейка памяти на основе одномерного фотонного кристалла // Тезисы докладов XXIX симпозиума «Нанопфизика и наноэлектроника». Нижний Новгород, 2025. – С. 565.

5. Волкова В.В.. Численное моделирование пленения электромагнитного поля фотонным кристаллом с керровской нелинейностью // Тезисы докладов XXIX симпозиума «Нанопфизика и наноэлектроника». Нижний Новгород, 2025. – С. 566.