

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ОДНОМЕРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ С ДЕФЕКТАМИ

А.В. Шабанов¹, М.А. Коршунов¹, Е.Р. Буханов²

¹Институт физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия,

²ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

Аннотация

Проведены расчеты с использованием метода трансфер матриц одномерных фотонных кристаллов с элементами беспорядка и наличием дефектов. Амплитуда сигнала электромагнитного поля внутри структуры при частоте дефектной моды выше, чем в случае с другими частотами. Если дефект расположен в центре кристалла, сохраняется вероятность усиления амплитуды сигнала, несмотря на наличие разупорядоченности по толщинам слоев. При увеличении числа слоев в кристалле поле на дефекте усиливается в несколько раз.

Ключевые слова: фотонный кристалл, дефектная мода, фотонная запрещенная зона, слоистые периодические структуры.

Цитирование: Шабанов, А.В. Исследование электромагнитного поля в одномерных фотонных кристаллах с дефектами / А.В. Шабанов, М.А. Коршунов, Е.Р. Буханов // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 5. – С. 680-686. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-5-680-686.

Введение

Фотонные кристаллы (ФК) – это структуры с характерным масштабом периодичности диэлектрической проницаемости порядка длины волны электромагнитного излучения [1].

Спектр электромагнитных волн в таких структурах имеет зонный характер. Наличие фотонных зон (стоп-зон) дает возможность управлять скоростью оптического излучения атомов [2].

Уникальная комбинация локализации света и изменения радиационной динамики открыли широкие возможности управления оптическими свойствами фотонно-кристаллических сред [2–6].

Введение дефектов, нарушающих периодичность фотонно-кристаллической структуры, приводит к возникновению дефектных частот, лежащих в запрещенных зонах (так называемых дефектных мод). Плотность фотонных состояний этих мод значительно больше, чем плотность мод на краях запрещенной зоны [3, 4]. Подобные структуры находят применение в лазерах, волноводах, разветвителях и потенциально могут использоваться при создании оптических микросхем. Классификация дефектов и их влияние на спектры традиционных ФК-структур с широкой стоп-зоной большей, чем осцилляции, представлены в работе [7]. Количество публикаций, посвященных изучению ФК с высоким диэлектрическим контрастом и дефектами, непрерывно растет с выявлением новых интересных свойств [8–13]. Между тем свойства сверхрешеток с малым диэлектрическим контрастом отличаются от свойств ФК с высоким диэлектрическим контрастом [14, 15]. Работы, в которых бы исследовались неупорядоченные ФК структуры с низким диэлектрическим контрастом, практически отсутствуют.

Между тем биофотонно-кристаллические структуры (БФС) растений и животных [16, 17], встречающиеся в природе, например, в крыльях бабочек [18], в чешуе рыб [17] и в растительных клетках [19], имеют небольшое число слоев (до нескольких десятков) с

низким диэлектрическим контрастом и отклонения в распределении толщин компонентов.

Скрытая периодичность в них была найдена на основе метода синтеза сверхрешеток, используя известное множество Кантора [17].

Целью работы было проведение исследования и анализа спектров пропускания фотонных кристаллов и локализации поля в слоях при нарушенной упорядоченности.

Внимание исследователей к таким объектам возросло после прямого экспериментального обнаружения ФК-структуры в растении бегония [19].

В данной работе проведено исследование поведения электромагнитного поля в ограниченных фотонных кристаллах с дефектами. Для расчетов использовались показатели преломления, близкие к биологическим, а структурные единицы обладали разупорядоченностью по толщинам. Также была решена обратная задача нахождения скрытой упорядоченности на основе множества Кантора.

Математическая модель

Расчеты проводились с использованием метода трансфер матриц [3, 20]. Этот метод позволяет рассчитывать спектр пропускания и отражения периодических, квазипериодических и неупорядоченных структур. ФК представлял собой чередующиеся слои с фиксированными толщинами и показателями преломления. Увеличив в два раза толщину одного из слоев, получали дефект. Разупорядоченность структуры достигалась изменением толщин слоев от первоначально заданных (L_{i0}) при случайном искажении толщин. $L_i = L_{i0}(1-S)$, S – случайное число в диапазоне $[-R/100; R/100]$ при равномерном распределении, R – степень разупорядоченности (%).

Рассматриваемая структура приведена на рис. 1.

В среде, состоящей из слоев толщиной Z_N и показателем преломления n_N , распространяется плоская электромагнитная волна. Плоскость её падения уг. Амплитуды волн (А и В), идущих в правом и левом

направлении соответственно, в предыдущем слое зависят от этих же значений в текущем [16]:

$$\begin{aligned} A_{N-1} &= \frac{1}{2}((1+C)A_N e^{-ik_N z_N} + (1-C)B_N e^{ik_N z_N}), \\ B_{N-1} &= \frac{1}{2}((1-C)A_N e^{-ik_N z_N} + (1+C)B_N e^{ik_N z_N}). \end{aligned} \quad (1)$$

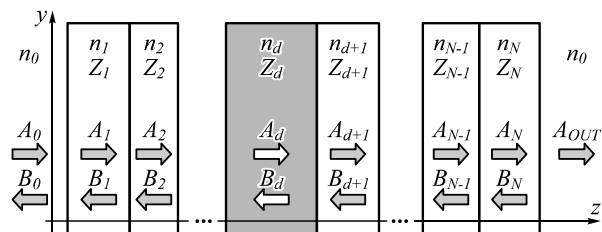


Рис. 1. Фотонно-кристаллическая разупорядоченная слоистая структура с распространяющимися вдоль оси z плоскими электромагнитными волнами. Заштрихованный прямоугольник – дефект по толщине в центре структуры

Для ТЕ-волны (электрическая составляющая перпендикулярна плоскости падения):

$$\begin{aligned} E(z, N) &= (A_N^{TE} e^{-ik_N z} + B_N^{TE} e^{ik_N z}), \\ H(z, N) &= ik_N (A_N^{TE} e^{-ik_N z} - B_N^{TE} e^{ik_N z}), C = \frac{k_N}{k_{N-1}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Для ТМ-волны:

$$\begin{aligned} H(z, N) &= (A_N^{TM} e^{-ik_N z} + B_N^{TM} e^{ik_N z}), \\ E(z, N) &= i \frac{n_N^2}{k_N} (A_N^{TM} e^{-ik_N z} - B_N^{TM} e^{ik_N z}), C = \frac{k_{N-1} n_N^2}{k_N n_{N-1}^2}, \\ k_N &= \frac{\omega}{c} \sqrt{n_N^2 - n_0^2 \sin^2 \theta}, \end{aligned} \quad (3)$$

где z – локальная для каждого слоя переменная, начало отсчета по ней помещаем на правую границу слоя; θ – угол падения луча из внешней среды.

При нормальном падении света $k_N = \omega n_N / c$ выражения (2) и (3) становятся тождественными.

Зная, что на выходе из структуры существует только исходящая волна ($A_{out}; B_{out} = 0$), можно получить массив относительных значений амплитуд в каждом из слоев ФК путем компьютерных вычислений.

Коэффициент пропускания:

$$T = 1 - \left| \frac{B_0}{A_0} \right|^2. \quad (5)$$

Эти вычисления позволили найти распределение электромагнитного поля в слоистой структуре.

Результаты расчетов и обсуждение

В комплекс из 39 чередующихся слоев с показателями преломления $n_1 = 1,5$ (типичный для органической материи) и $n_2 = 1,3$ (характерный для цитоплазмы) [21] и толщинами $L_1 = 1 \cdot L, L_2 = 2 \cdot L$ был внедрен дефект, расположенный в центре ($N_d = 20, n_d = n_2 = 1,3, L_d = 2 \cdot L_2 = 4 \cdot L$). Для видимого диапазона света $L \sim 50-100$ nm (характерный линейный размер для гран

(БФС) [14]). Рассматривалось нормальное (перпендикулярно слоям) падение света.

На рис. 2 представлены рассчитанные частотные зависимости коэффициента пропускания T для ряда фотонных кристаллов с числом слоев $N = 39, \omega$ – в единицах $2\pi\nu L / c, L$ – линейный размер слоев, ν – частота, c – скорость света.

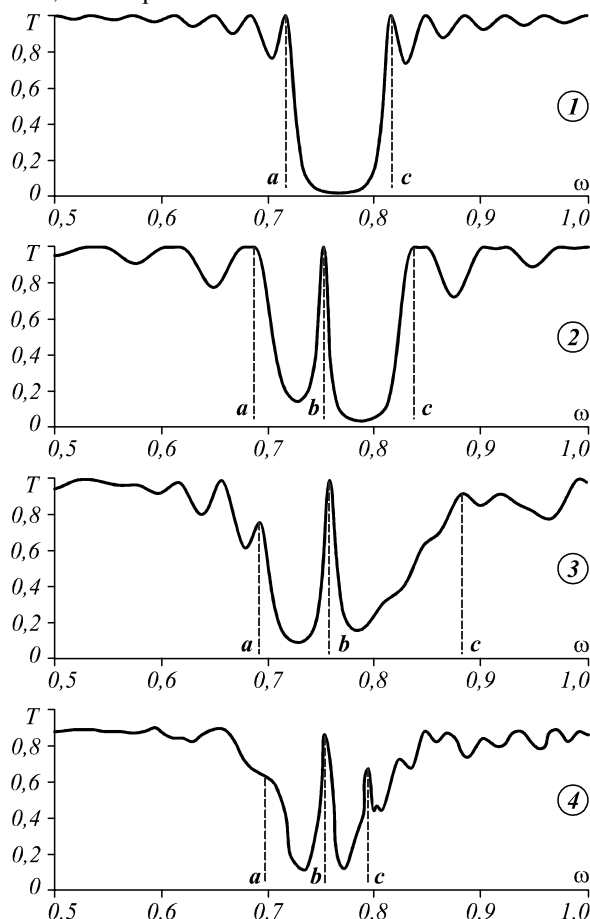


Рис. 2. Частотная зависимость коэффициента пропускания T для фотонного кристалла. (1 – пример бездефектной структуры, 2 – фотонная структура с дефектным слоем в центре, 3 – дефектный слой в центре кристалла, до него и после него разупорядоченная структура при случайном искажении толщин, 4 – разупорядоченная структура, как и на 3 графике, рассчитанная с использованием фрактала Кантора.) a и c – края стоп-зоны, b – дефектная мода

Первоначальный спектр (до внедрения дефекта) показан на рис. 2(1). Изменения, произошедшие в спектре после увеличения толщины центрального слоя, показаны на рис. 2(2).

При случайном разбросе толщин слоев частотная зависимость коэффициента пропускания изменяется. Для 20 % разброса имеет вид рис. 2(3). Следует особо упомянуть, что толщина центрального слоя неизменна ($L_d = 4L$). Частоты a и c отмечают края стоп-зоны, b – расположение линии пропускания, обусловленной дефектом.

Как видим, при учете разупорядоченности отмечается нарушение в периодичности спектра отраже-

ния фотонного кристалла. Но дефектная мода остается ярко выраженной.

На рис. 2(4) представлена частотная зависимость коэффициента пропускания T для фотонного кристалла с дефектом и разупорядоченная структура, как и на графике 3 рассчитанная с использованием фрактала Кантора. Как видим, эти графики подобны.

На рис. 3 представлена частотная зависимость максимума электромагнитного поля в зависимости от особенностей структуры фотонного кристалла.

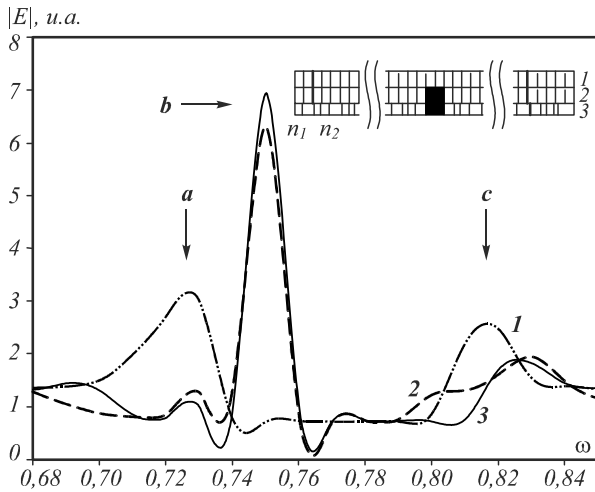


Рис. 3. Частотная зависимость квадрата модуля электрического поля E в дефектном слое. 1 – упорядоченная структура без дефекта. 2 – дефектный слой расположен в центре структуры. 3 – дефект в центре разупорядоченной структуры. a и c – края стоп-зоны, b – дефектная мода. На вставке изображены слоистые структуры (номера которых соответствуют номерам рассчитанной частотной зависимости модуля электрического поля E). Темным изображено положение дефектного слоя

В бездефектном кристалле поле увеличивается на краях стоп-зоны (рис. 3(1)). При наличии дефекта локальное поле увеличивается на частоте дефектной моды (b). Это происходит как в упорядоченной структуре с дефектом в центре, так и при наличии неупорядоченности по толщинам слоев на дефекте в центре.

В работе было рассмотрено, как изменяется величина поля на краях стоп-зоны и на дефекте в зависимости от числа слоев N . При увеличении числа слоев от 40 и выше интенсивность поля на дефекте возрастает в десятки раз. На краях стоп-зоны интенсивность также увеличивается, но в меньшей степени (рис. 4).

Для природных объектов характерна вариативность подструктур по линейным размерам. На рис. 5 приведены среднеинтегральные спектры слоистых сред с дефектом при различных коэффициентах разупорядоченности. На рис. 6 представлена карта модуля амплитуды электрической составляющей ЭМ-волны в одной из случайных конфигураций фотонного кристалла с дефектом и неоднородными подрешетками на частотах, вызывающих максимальное усиление. Легко заметить, что существуют такие длины волн, при которых в дефектном слое сохраняется усиление, хотя на общеинтегральном спектре (рис. 5) отдельные

линии пропускания и полосы отражения уже не отслеживаются.

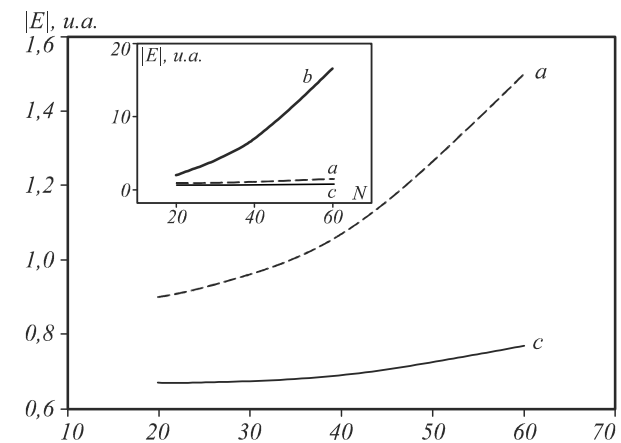


Рис. 4. Зависимость величины поля на краях стоп-зоны a , c и на дефекте b от количества слоев фотонного кристалла (от $N = 20$ до $N = 60$)

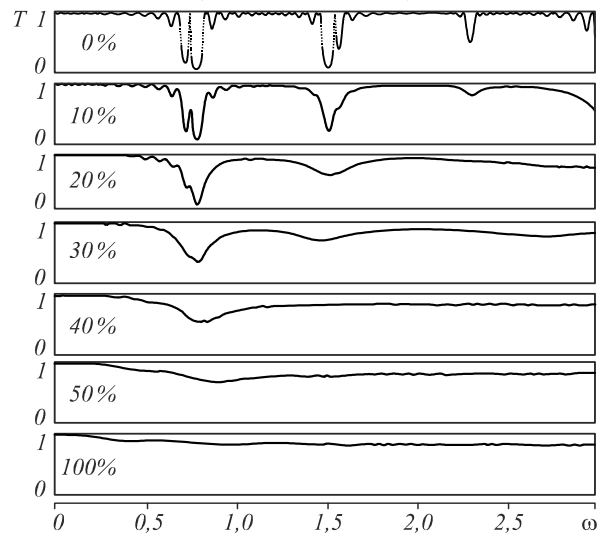


Рис. 5. Среднеинтегральные спектры пропускания ФК-решетки с варьируемой толщиной слоев в зависимости от максимальной амплитуды случайных отклонений линейных размеров от первоначально заданных (39 слоев, 20-й – дефектный с двойной толщиной, нечетные $n = 1, 5$, $L = 1$; четные $n = 1, 3$, $L = 2$)

Аналогичная картина наблюдается и при наклонном падении света. Но степень локализации на дефекте у ТЕ- и ТМ-мод различна (например, при угле Брюстера на ТМ-моде происходит 100% пропускание). На рис. 7 показаны изменения амплитуд волн в среде при частотах, соответствующих краям стоп-зоны и дефектной моде. Значения взяты для слоев с максимальным усилением электромагнитной волны. a_{TM} , s_{TM} , a_{TE} , s_{TE} – квадрат амплитуд для частот на границе зон селективного отражения; b_{TM} , b_{TE} – амплитуда волн, локализованных в центральном уширенном слое при частоте дефектной моды.

В работе [4] проанализированы особенности коэффициентов пропускания и распределения поля в конечной слоисто-периодической структуре. Показано, что значение электромагнитного поля в центре структуры для максимума пропускания, ближайшего

к запрещенной зоне, может превышать амплитуду падающего поля более, чем на порядок. При этом максимальная величина поля линейно возрастает с увеличением количества слоев. Эти результаты были получены для идеальной структуры фотонного кристалла. В данной работе проведено аналогичное исследование поведения электромагнитного поля в ограниченных одномерных фотонных кристаллах с элементами беспорядка и дефектами.

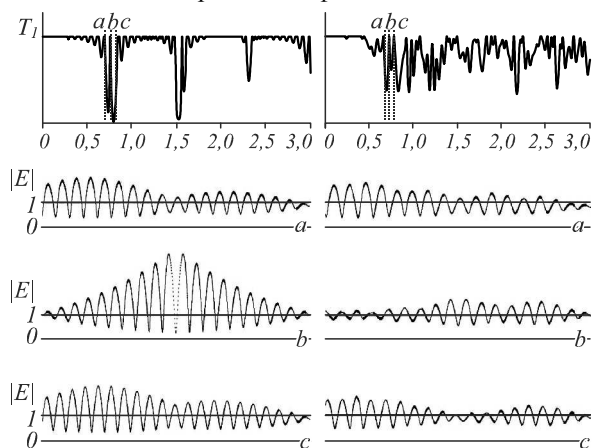


Рис. 6. Спектр пропускания (сверху) слоистых сред; ниже – распределение амплитуды электрической составляющей электромагнитного поля в неискаженной (слева) и искаженной слоистой среде (степень разупорядоченности 50%) при различной частоте (а, с – можно отождествить с краями зоны селективного отражения, б – дефектная мода). Слоистые структуры на рисунке в реальности имеют разную общую толщину

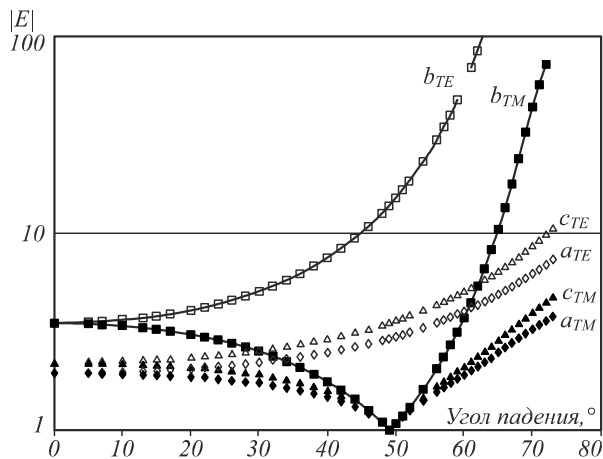


Рис. 7. Максимум модуля амплитуды электромагнитных волн, локализованных внутри слоистой среды при разных углах падения света. (а, с – при частотах на краях зоны селективного отражения, б – дефектная мода)

В согласии с работой [4] для упорядоченной структуры без дефекта получено увеличение величины поля на концах стоп-зоны (рис. 3(1)) для исследуемой структуры. При введении дефектного слоя в центре структуры наблюдается значительное усиление в нем амплитуды волн при частотах, соответствующих дефектным модам (рис. 3(2), 3(3)), причем это увеличение больше, чем на краях стоп-зоны, во всех рассматриваемых случаях.

В работе [17] для разупорядоченных структур предложен метод нахождения скрытой упорядоченности, позволяющий изучать их как фотонные кристаллы. Авторы считают, что в основе «хаотичности» должен быть порядок. Они не только объяснили серебристость рыб с помощью фрактальной геометрии, но и теоретически воспроизвели такие отражатели. Для представления разупорядоченной структуры был использован один из старейших фракталов – множество Кантора. Они сконструировали структуры с заданными оптическими свойствами. Для этого к фракталу Кантора был использован генетический алгоритм [22] поиска оптимального решения, моделирующий естественный эволюционный процесс. Алгоритм включает скрещивание, селекцию лучших решений и формирование нового поколения с нужными свойствами.

В данной работе также использовался подобный метод. Структура моделировалась, используя множество Кантора.

На первом этапе из образца с показателем преломления n_1 длиной, соответствующей 39 слоям рассматриваемого ФК, вырезалась 1/3 в центре и заменялась средой с показателем преломления n_2 . После этого для каждого участка с показателем преломления n_1 проводилось аналогичное преобразование. Получаем структуру, подобную упорядоченному ФК. При случайном изменении толщин слоев возникают объекты, более похожие на природные. После этого проводился расчет спектра отражения полученной структуры. Для получения спектра, аналогичного заданному (который может быть получен для экспериментального объекта), проводилась оптимизация разупорядоченной структуры (полученной при использовании множества Кантора), используя генетический алгоритм. Генетический алгоритм позволяет найти оптимальное решение к аналитически неразрешимым проблемам через периодический подбор и комбинирование изначальных данных с использованием методов, напоминающих биологическую эволюцию. Это позволило получить искомую структуру. Найденная структура представляла фотонный кристалл с дефектами. Сравнение результатов расчетов спектров разупорядоченного образца с 20% разбросом толщин слоев с дефектом (рис. 2(3)) и расчета аналогичной структуры, полученной методом с использованием множества Кантора (рис. 2(4)), показало, что характер спектров сходен в обоих случаях. При этом параметры решетки составляли $L_1^k = 68$ нм и $L_2^k = 130,2$ нм. Таким образом, идентичность этих спектров подтверждает возможность использования метода с множеством Кантора для нахождения скрытых структур.

Изменение угла падения света не приводит к смене характера локализации электромагнитных волн: усиление на частоте дефектной моды больше, чем на границах зоны селективного отражения. При этом усиление поля на дефекте наблюдается для ТМ- и ТЕ-моды при наклонном падении луча света выше угла Брюстера.

Выводы

Проведено исследование ограниченных одномерных фотонных сверхрешеток с малым диэлектрическим контрастом, содержащих элементы беспорядка и дефекты. Выявлено, что, несмотря на низкий диэлектрический контраст линейных размеров слоев и неупорядоченность (до 50%), такие структуры обладают уникальными оптическими свойствами, присущими ФК. Центральное расположение дефекта способствует возможности усиления амплитуды электромагнитных волн в нем. Общая разупорядоченность окружающих слоев также оставляет эту вероятность. При увеличении числа слоев в кристалле поле на дефекте усиливается в несколько раз (на пороге пропускания внутри стоп-зоны).

Литература

1. **Joannopoulos, J.D.** Photonic crystals: Molding the flow of light / J.D. Joannopoulos, R.D. Meade, J.N. Winn. – Princeton, NJ: Princeton University Press, 1995. – 137 p. – ISBN: 978-0-691037448.
2. **Быков, В.П.** Спонтанное излучение в среде с полосным спектром / В.П. Быков // Квантовая электроника. – 1974. – Т. 1, № 7. – С. 1557-1577.
3. **Шабанов, В.Ф.** Оптика реальных фотонных кристаллов. Жидкокристаллические дефекты, неоднородности. / В.Ф. Шабанов, С.Я. Ветров, А.В. Шабанов. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2005. – 209 с. – ISBN: 5-7692-0737-X.
4. **Горелик, В.С.** Усиление электромагнитного поля в ограниченных одномерных фотонных кристаллах / В.С. Горелик, В.В. Капаев // ЖЭТФ. – 2016. – Т. 150, № 3(9). – С. 435-444.
5. **Russell, P.** Photonic crystal fibers / P. Russell // Science. – 2003. – Vol. 299, Issue 5605. – P. 358-362. – DOI: 10.1126/science.1079280.
6. **Vigneron, J.-P.** Natural photonic crystals / J.-P. Vigneron, P. Simonis // Physica B: Condensed Matter. – 2012. – Vol. 407, Issue 20. – P. 4032-4036.
7. **Елисеева, С.В.** Поля и спектры одномерного фотонного кристалла с дефектом инверсионного типа / С.В. Елисеева, В.А. Остаточников, Д.И. Семенов // Компьютерная оптика. – 2012. – Т. 36, № 1. – С. 14-20.
8. **Doskolovich, L.L.** Spatial differentiation of optical beams using phase-shifted Bragg grating / L.L. Doskolovich, D.A. Bykov, E.A. Bezus, V.A. Soifer // Optics Letters. – 2014. – Vol. 39, Issue 5. – P. 1278-1281. – DOI: 10.1364/OL.39.001278.
9. **Bykov, D.A.** Optical computation of the Laplace operator using phase-shifted Bragg grating / D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, E.A. Bezus, V.A. Soifer // Optics Express. – 2014. – Vol. 22, Issue 21. – P. 25084-25092.
10. **Golovastikov, N.V.** Spatial optical integrator based on phase-shifted Bragg gratings / N.V. Golovastikov, D.A. Bykov, L.L. Doskolovich, E.A. Bezus // Optics Communications. – 2015. – Vol. 338. – P. 457-460. – DOI: 10.1016/j.optcom.2014.11.007.
11. **Nasedkina, Y.F.** Transformation of a Gaussian pulse when interacting with a one-dimensional photonic crystal with an inversion defect / Y.F. Nasedkina, S.V. Eliseeva, D.I. Sementsov // Photonics and Nanostructures: Fundamentals and Applications. – 2016. – Vol. 19. – P. 31-38. – DOI: 10.1016/j.photonics.2016.02.002.
12. **Dadoenkova, Yu.S.** Reshaping of Gaussian light pulses transmitted through one-dimensional photonic crystals with two defect layers / Yu.S. Dadoenkova, N.N. Dadoenkova, I.L. Lyubchanskii, D.I. Sementsov // Applied Optics. – 2016. – Vol. 55, Issue 14. – P. 3764-3770. – DOI: 10.1364/AO.55.003764.
13. **Abram, R.A.** A study of a phase formalism for calculating the cumulative density of states of one-dimensional photonic crystals / R.A. Abram, A.A. Greshnov, S. Brand, M.A. Kalitchevski // Journal of Modern Optics. – 2017. – Vol. 64, Issue 15. – P. 1-9. – DOI: 10.1080/09500340.2017.1296597.
14. **Рыбин, М.В.** Экспериментальное исследование фотонной зонной структуры синтетических опалов в условиях низкого диэлектрического контраста / М.В. Рыбин, К.Б. Самусев, М.Ф. Лимонов // Физика твёрдого тела. – 2007. – № 12. – С. 2174-2183.
15. **Rybin, M.V.** Dimensionality effects on the optical diffraction from opal-based photonic structures / M.V. Rybin, I.S. Sinev, A.K. Samusev, K.B. Samusev, E.Yu. Trofimova, D.A. Kurdyukov, V.G. Golubev, M.F. Limonov // Physical Review B. – 2013. – Vol. 87. – 125131 (8 p.). – DOI: 10.1103/PhysRevB.87.125131.
16. **Vukusic, P.** Photonic structures in biology / P. Vukusic, J.R. Sambles // Nature. – 2003. – Vol. 424. – P. 852-855. – DOI: 10.1038/nature01941.
17. **Bossard, J.A.** Evolving random fractal Cantor superlattices for the infrared using a genetic algorithm / J.A. Bossard, L. Lin, D.H. Werner // Journal of the Royal Society Interface. – 2016. – Vol. 13, Issue 114. – 20150975 (11 p.). – DOI: 10.1098/rsif.2015.0975.
18. **Kinoshita, S.** Physics of structural colors / S. Kinoshita, S. Yoshioka, J. Miyazaki // Reports on Progress in Physics. – 2008. – Vol. 71, Issue 7. – 076401 (30pp.). – DOI: 10.1088/0034-4885/71/7/076401.
19. **Jacobs, M.** Photonic multilayer structure of Begonia chloroplasts enhances photosynthetic efficiency / M. Jacobs, M. Lopez-Garcia, O.-P. Phrathep, T. Lawson, R. Oulton, H.M. Whitney // Nature Plants. – 2016. – Vol. 2, Issue 11. – 16162 (6 p.). – DOI: 10.1038/NPLANTS.2016.162.
20. **Yeh, P.** Electromagnetic propagation in periodic stratified media. I. General theory / P. Yeh, A. Yariv, Ch.-Sh. Hong // Journal of the Optical Society of America. – 1977. – Vol. 67, Issue 4. – P. 423-438. – DOI: 10.1364/JOSA.67.000423.
21. **Aas, E.** Refractive index of phytoplankton derived from its metabolite composition / E. Aas // Journal of Plankton Research. – 1996. – Vol. 18, Issue 12. – P. 2223-2249. – DOI: 10.1093/plankt/18.12.2223.
22. **McKenzie, D.R.** Silvery fish skin as an example of a chaotic reflector / D.R. McKenzie, Y. Yin, W.D. McFall // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 1995. – Vol. 451, Issue 1943. – P. 579-584. – DOI: 10.1098/rspa.1995.0144.

Сведения об авторах

Шабанов Александр Васильевич. К.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Институт физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН, Лаборатория молекулярной спектроскопии. Область научных интересов: физика, программирование. E-mail: alexch_syb@mail.ru.

Коршунов Михаил Анатольевич. К.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Институт физики им. Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН, Лаборатория молекулярной спектроскопии. Область научных интересов: физика, программирование. E-mail: kors@iph.krasn.ru.

Буханов Евгений Романович. Магистерская степень, инженер, ФИЦ КНЦ СО РАН, отдел молекулярной электроники. Область научных интересов: программирование, физика, дендрохронология. E-mail: k26tony@ya.ru.

ГРНТИ: 29.31.27.

Поступила в редакцию 27 апреля 2017 г. Окончательный вариант – 4 июня 2017 г.

INVESTIGATION OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD IN ONE-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTALS WITH DEFECTS

A.V. Shabanov¹, M.A. Korshunov¹, E.R. Bukhanov²

¹Kirensky Institute of Physics Federal Research Center KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia,

²Federal Research Center KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

Abstract

Using a transfer matrix method, we calculate the electromagnetic field in one-dimensional photonic crystals with disorder elements and in the presence of defects. It is found that the amplitude of the signal of the electro-magnetic field inside the structure is higher at the frequency of the defect mode than at all other frequencies. If the defect is located in the center of the crystal, the possibility of amplifying the signal amplitude is still preserved despite the presence of the disorder across the thicknesses of the layers. With an increase in the number of layers in the crystal, the field on the defect gets several times stronger.

Keywords: photonic crystal, defect mode, photonic band gap, layered periodic structures.

Citation: Shabanov AV, Korshunov MA, Bukhanov ER. Investigation of the electromagnetic field in one-dimensional photonic crystals with defects. *Computer Optics* 2017; 41(5): 680-686. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-5-680-686.

References

- [1] Joannopoulos JD, Meade RD, Winn JN. Photonic crystals: Molding the flow of light. Princeton, NJ: Princeton University Press; 1995. ISBN: 978-0-691037448.
- [2] Bykov VP. Spontaneous emission from a medium with a band spectrum. *Soviet Journal of Quantum Electronics* 1975; 4(7): 861-6. DOI: 10.1070/QE1975v004n07ABEH009654.
- [3] Shabanov VF, Vetrov SYa, Shabanov AV. Optics of real photonic crystals. Liquid crystal defects, irregularities [In Russian]. Novosibirsk: "Izdatelstvo SB RAS" Publisher; 2005. ISBN: 5-7692-0737-X.
- [4] Gorelik VS, Капаев VV. Electromagnetic-field amplification in finite one-dimensional photonic crystals. *JETP* 2016; 123(3): 373-381. DOI: 10.7868/S0044451016090017.
- [5] Russell P. Photonic crystal fibers. *Science* 2003; 299(5605): 358-362. DOI: 10.1126/science.1079280.
- [6] Vigneron JP, Simonis P. Natural photonic crystals. *Physica B: Condensed Matter* 2012; 407(20): 4032-4036. DOI: 10.1016/j.physb.2011.12.130.
- [7] Eliseeva SV, Ostatochnicov VA, Sementsov DI. Field and spectra of one-dimensional photonic crystal with inversion type defect. *Computer Optics* 2012; 36(1): 14-20.
- [8] Doskolovich LL, Bykov DA, Bezus EA, Soifer VA. Spatial differentiation of optical beams using phase-shifted Bragg grating. *Opt Lett* 2014; 39(5): 1278-1281. DOI: 10.1364/OL.39.001278.
- [9] Bykov DA, Doskolovich LL, Bezus EA, Soifer VA. Optical computation of the Laplace operator using phase-shifted Bragg grating. *Opt Express* 2014; 22(21): 25084-25092. DOI: 10.1364/OE.22.025084.
- [10] Golovastikov NV, Bykov DA, Doskolovich LL, Bezus EA. Spatial optical integrator based on phase-shifted Bragg gratings. *Optics Communications* 2015; 338: 457-460. DOI: 10.1016/j.optcom.2014.11.007.
- [11] Nasedkina YF, Eliseeva SV, Sementsov DI. Transformation of a Gaussian pulse when interacting with a one-dimensional photonic crystal with an inversion defect. *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications* 2016; 19: 31-38. DOI: 10.1016/j.photonics.2016.02.002.
- [12] Dadoenkova YuS, Dadoenkova NN, Lyubchanskii IL, Sementsov DI. Reshaping of Gaussian light pulses transmitted through one-dimensional photonic crystals with two defect layers. *Appl Opt* 2016; 55(14): 3764-3770. DOI: 10.1364/AO.55.003764.
- [13] Abram RA, Greshnov AA, Brand S, Kaliteevski MA. A study of a phase formalism for calculating the cumulative density of states of one-dimensional photonic crystals. *J Mod Opt* 2017; 64(15): 1-9. DOI: 10.1080/09500340.2017.1296597.
- [14] Rybin MV, Samusev KB, Limonov MF. Experimental study of the photonic band structure of synthetic opals at a low dielectric contrast. *Physics of the Solid State* 2007; 49(12): 2280-2289. DOI: 10.1134/S1063783407120116.
- [15] Rybin MV, Sinev IS, Samusev AK, Samusev KB, Trofimova EYu, Kurdyukov DA, Golubev VG, Limonov MF. Dimensionality effects on the optical diffraction from opal-based photonic structures. *Phys Rev B* 2013; 87: 125131. DOI: 10.1103/PhysRevB.87.125131.
- [16] Vukusic P, Sambles JR. Photonic structures in biology. *Nature* 2003; 424: 852-855. DOI: 10.1038/nature01941.
- [17] Bossard JA, Lin L, Werner DH. Evolving random fractal Cantor superlattices for the infrared using a genetic algorithm. *J R Soc Interface* 2016; 13(114): 20150975. DOI: 10.1098/rsif.2015.0975.
- [18] Kinoshita S, Yoshioka S, Miyazaki J. Physics of structural colors. *Reports on Progress in Physics* 2008; 71(7): 076401. DOI: 10.1088/0034-4885/71/7/076401.

- [19] Jacobs M, Lopez-Garcia M, Phrathep OP, Lawson T, Oulton R, Whitney HM. Photonic multilayer structure of Begonia chloroplasts enhances photosynthetic efficiency. *Nature Plants* 2016; 2(11): 16162. DOI: 10.1038/NPLANTS.2016.162.
- [20] Yeh P, Yariv A, Chi-Shain Hong. Electromagnetic propagation in periodic stratified media. I. General theory. *J Opt Soc Am* 1977; 67(4): 423-438. DOI:10.1364/JOSA.67.000423.
- [21] Aas E. Refractive index of phytoplankton derived from its metabolite composition. *Journal of Plankton Research* 1996; 18(12): 2223-2249. DOI: 10.1093/plankt/18.12.2223.
- [22] McKenzie DR, Yin Y, McFall WD. Silvery Fish Skin as an Example of a Chaotic Reflector. *Proc R Soc Lond A* 1995; 451(1943): 579-584. DOI: 10.1098/rspa.1995.0144.

Authors' information

Alexandr Vasilievich Shabanov, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Senior Research Officer, Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS, Laboratory of Molecular Spectroscopy. His research interests are currently focused on computer physics. E-mail: alexch_syb@mail.ru.

Mikhail Anatolievich Korshunov, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Senior Research Officer, Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center KSC SB RAS, Laboratory of Molecular Spectroscopy. His research interests are currently focused on computer physics. E-mail: kors@iph.krasn.ru.

Eugene Romanovich Bukhanov, Master degree, Engineer, Federal Research Center KSC SB RAS, Molecular Electronic department. His research interests are currently focused on computer physics and dendrochronology. E-mail: k26tony@ya.ru.

Received April 27, 2017. The final version – June 4, 2017.
