

УДК 519.6

СИНТЕЗ ВОЛНОВЕДУЩИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

Ю. С. Дементьева¹

Рассматривается задача синтеза волноведущих систем на основе фотонных кристаллов. Синтезируется конфигурация фотонного кристалла, при которой достигаются заданные характеристики спектра рассеянного таким кристаллом поля. Приводятся примеры решения конкретных задач.

Ключевые слова: фотонные кристаллы, математическое моделирование, задача синтеза, параллельные вычисления.

Введение. Фотонный кристалл — это материал, структура которого характеризуется периодическим изменением коэффициента преломления [1]. Как известно, кристаллы всех типов могут эффективно рассеивать некоторые виды излучения при условии, что параметры решетки кристалла имеют тот же порядок, что и длина волны излучения. Аналогичным образом, будучи прозрачными для широкого спектра электромагнитного излучения, фотонные кристаллы не пропускают свет с длиной волны, сравнимой с периодом структуры фотонного кристалла. Эти спектральные диапазоны получили название “фотонные запрещенные зоны” (photonic bandgap, PBG). Благодаря наличию таких запрещенных зон на основе фотонных кристаллов можно создавать различные волноведущие системы: волноводы различной формы (прямые, в виде изгибов и разветвителей), фильтры и др.

Для реализации потенциала фотонно-кристаллических волноводов важно, чтобы их волноведущие свойства были перестраиваемыми, что достигается изменением параметров кристалла. Результаты расчетов волноведущих систем на основе фотонных кристаллов показывают, что спектр рассеянного поля зависит от конфигурации кристалла — расположения элементов кристалла и значений диэлектрической проницаемости. Небольшие изменения этих параметров влекут смещение запрещенных зон и изменение коэффициента пропускания на заданных частотах, т.е. за счет этого можно синтезировать волноведущие системы с заданными спектральными свойствами. В этой связи задача синтеза таких волноведущих систем на основе фотонных кристаллов чрезвычайно актуальна.

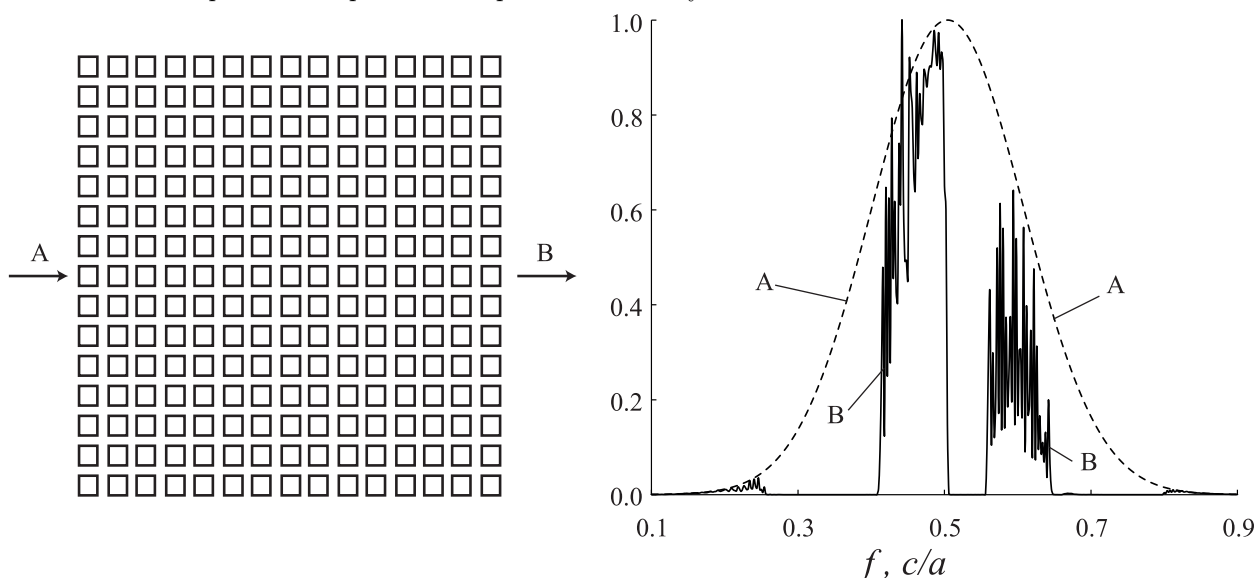


Рис. 1. Модель двумерного фотонного кристалла и его спектральная характеристика: А — спектр падающего импульса, В — спектр рассеянного импульса, c — скорость света, a — период фотонно-кристаллической решетки

¹ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, физический факультет, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, 119991, Москва; аспирант, e-mail: julia-dementieva@rambler.ru

1. Решение прямой задачи. Для исследования распространения электромагнитных импульсов через фотонные кристаллы построен численный алгоритм [2], который основан на решении уравнений Максвелла с помощью конечно-разностного метода во временной области (FDTD-метод, Finite-Difference Time-Domain method) [3], метода идеально согласованного слоя (PML-метод, Perfectly Matched Layer method) для реализации граничных условий [4] и метода общего и рассеянного полей (TF/SF-метод, Total-Field/Scattered-Field method) для возбуждения поля [5]. Алгоритм позволяет рассчитывать спектральные характеристики рассеянного поля для заданной конфигурации фотонного кристалла (рис. 1). Для сокращения времени вычислений прямой задачи используется распараллеливание алгоритма. Численные расчеты проводились на суперкомпьютере СКИФ МГУ “Чебышев”.

Рассмотрим конфигурацию фотонного кристалла, изображенную на рис. 2. Эта конфигурация представляет собой прямой волновод со вставкой из диэлектрического материала.

Результаты вычислений прямой задачи показали, что изменения размера вставки и ее диэлектрической проницаемости существенно влияют на спектральные характеристики такой системы. На рис. 3 показаны спектры рассеянного поля для волновода с различными вставками. Изменения диэлектрической проницаемости приводят к сдвигу частотного диапазона, в котором коэффициент пропускания равен нулю. На основе этого можно создавать фильтры, пропускные способности которых можно регулировать за счет изменения параметров вставки. Например, на рис. 3 показаны спектры пропускания фильтра на основе фотонного кристалла для вставки с размером $p_1 = p_2 = 3a$ и с величинами диэлектрической проницаемости $\varepsilon = 8$ (график 1) и $\varepsilon = 8.5$ (график 3). В первом случае для частоты $f = 0.36c/a$ (здесь c — скорость света, a — период фотонно-кристаллической решетки) волновод “открыт”, а во втором случае для этой частоты волновод “закрит”.

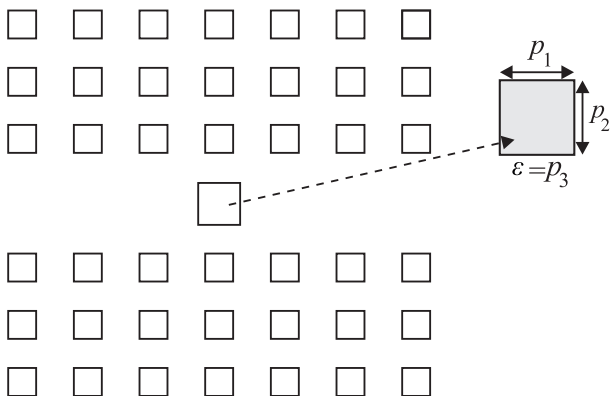


Рис. 2. Модель фильтра на основе фотонного кристалла

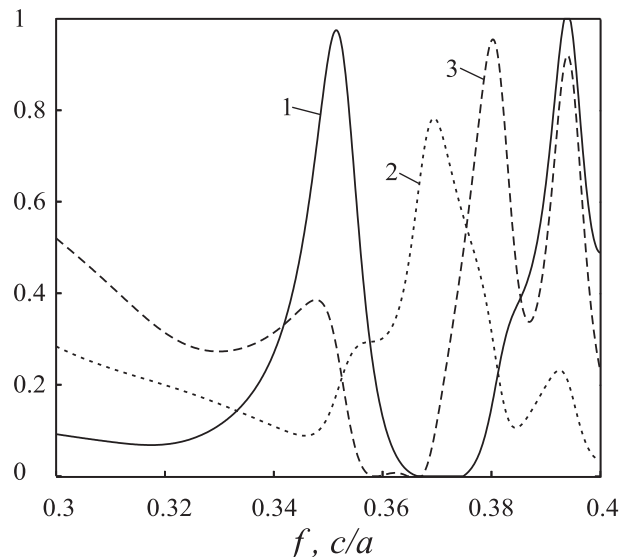


Рис. 3. Коэффициенты пропускания для волновода с различными вставками: 1) коэффициент пропускания для волновода со вставкой с параметрами $p_3 = 8$, $p_1 = p_2 = 3a$; 2) коэффициент пропускания для волновода со вставкой с параметрами $p_1 = a$, $p_2 = 3a$, $p_3 = 8$; 3) коэффициент пропускания для волновода со вставкой с параметрами $p_1 = p_2 = 3a$, $p_3 = 8.5$

2. Методы и результаты решения обратной задачи. Рассмотрим задачу синтеза фильтра на основе фотонного кристалла, конфигурация которого изображена на рис. 2. В качестве параметров будем использовать диэлектрическую проницаемость вставки и ее размер. Можно рассматривать несколько вариантов постановки задачи синтеза: подбор параметров вставки, при которых для определенной частоты волновод будет “закрит”; подбор параметров вставки, при которых для определенного частотного диапазона волновод будет “закрит”; подбор параметров вставки, при которых ширина частотной зоны непропускания будет наибольшей.

При решении задач синтеза возникает необходимость минимизации функционалов в ограниченных областях. Для этой цели применяется метод скользящего допуска. Данный метод позволяет искать мини-

мум функции при наличии ограничений на область как в виде неравенств, так и в виде равенств. Метод скользящего допуска основан на методе Нелдера и Мида, который в свою очередь является модификацией симплекс-метода. Эти методы целесообразно применять в тех случаях, когда градиентные методы не применимы из-за невозможности вычисления производных функционала [6, 7].

В качестве примера задачи синтеза рассмотрена задача построения фильтра, который для заданной частоты работает в режиме непропускания. Параметрами оптимизации выбраны диэлектрическая проницаемость вставки (p_3) и ее размер ($p_1 = p_2$). Рассматриваемый фотонный кристалл имеет следующие характеристики: размер кристалла — 100×50 стержней, их диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 8$ и диэлектрическая проницаемость среды ε_0 , в которую они помещены, равна 1. Функционалом, который минимизируется, выбран коэффициент пропускания для заданной частоты: $F = T(f_0)$. На параметры наложены следующие ограничения: $0 < p_1, p_2 \leq 5a$, $1 \leq p_3 \leq 20$. Случай параметров $p_1, p_2 > a$ реализуется в расчетах наложением вставки на стержни кристалла. Начальные значения параметров выбраны следующими: $p_1 = p_2 = 3a$, $p_3 = 8$. Значение частоты, для которой фильтр должен работать в режиме непропускания, задано следующим: $f_0 = 0.36c/a$. Критерием остановки поиска решения является выполнение неравенства

$$r^{(n)}(p_1, p_2, \dots) = \left\{ \frac{\sum_i (p_i^{(n)} - p_i^{(n-1)})^2}{\sum_i (p_i^{(n)})^2} \right\}^{1/2} \leq \varepsilon.$$

Индекс n соответствует шагу поиска решения, индекс i соответствует номеру параметра. Значение ε выбрано равным 0.001.

Поиск решения задачи синтеза был остановлен в соответствии с критерием на 32-м шаге. В результате решения получены следующие значения параметров: $p_1 = 2.55a$, $p_3 = 6.649$. На рис. 4 и 5 представлены значения параметров на каждом шаге решения задачи и спектр для конфигурации с полученными параметрами.

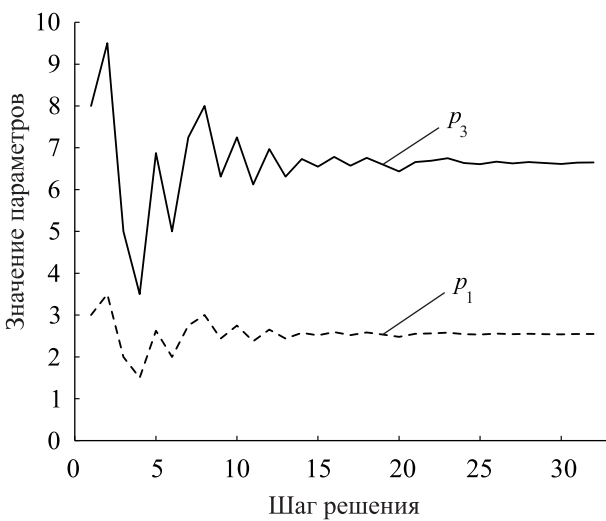


Рис. 4

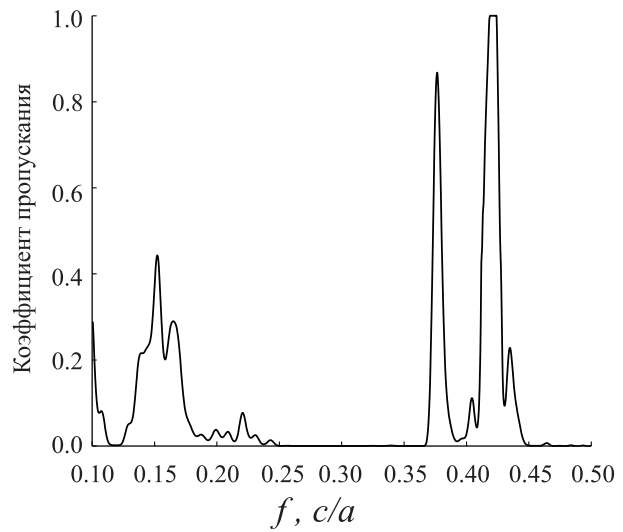


Рис. 5

В качестве второго примера решена задача синтеза волновода с параметрами вставки, при которых для определенного частотного диапазона волновод будет “закрит”. Минимизируемым функционалом в этом случае выбран интеграл коэффициента пропускания в заданном диапазоне частот $f \in [f_1, f_2]$:

$$F = \int_{f_1}^{f_2} T(f) df.$$

Начальные значения параметров выбраны, как и в предыдущем примере, следующими: $p_1 = 3a$, $p_3 = 8$. Диапазон частот, для которых фильтр должен работать в режиме непропускания, задан следующим: $f \in [0.36c/a, 0.38c/a]$.

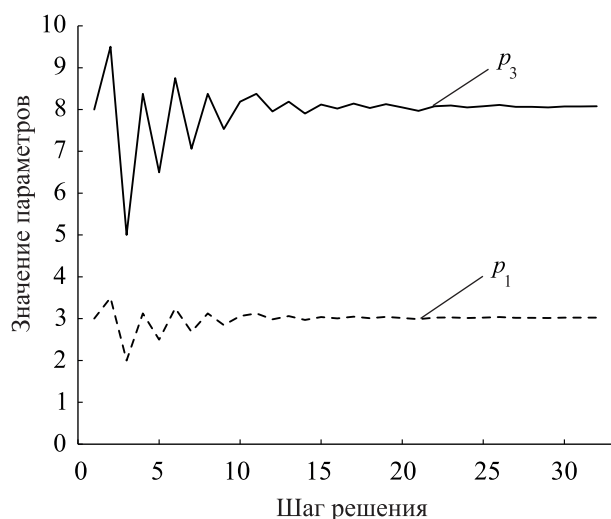


Рис. 6

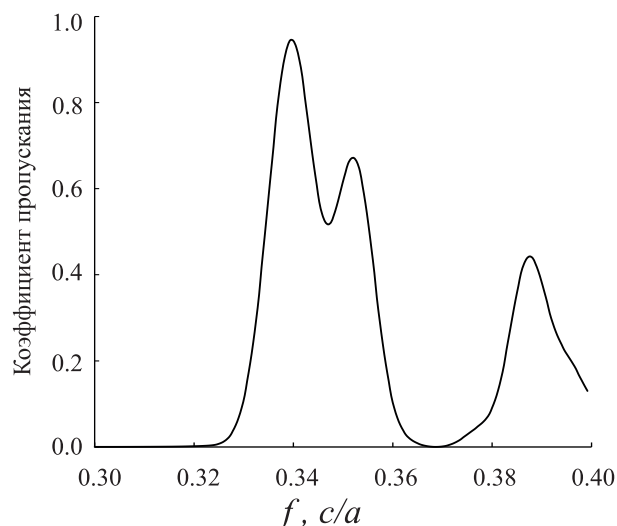


Рис. 7

Поиск решения задачи синтеза был остановлен в соответствии с критерием на 31-м шаге. В результате решения получены следующие значения параметров: $p_1 = 3.027a$, $p_3 = 8.08$. На рис. 6 и 7 представлены значения параметров на каждом шаге решения задачи и спектр для конфигурации с полученными параметрами.

Заключение. Построен и реализован алгоритм, позволяющий решать задачи синтеза волноведущих систем на основе фотонных кристаллов. Получены результаты для задачи синтеза конкретной волноведущей системы-фильтра на основе фотонно-кристаллического волновода с диэлектрической вставкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Yablonovitch E.* Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics // *Phys. Rev. Lett.* 1987. **58**. 2059–2062.
2. *Боголюбов А.Н., Буткарев И.А., Дементьева Ю.С.* Исследование распространения электромагнитных импульсов через фотонные кристаллические структуры // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон.* 2010. № 6. 3–8.
3. *Taflove A., Hagness S.C.* Computational electrodynamics. Norwood: Artech House, 2000.
4. *Berenger J.-P.* Three-dimensional perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves // *J. of Comput. Phys.* 1996. **127**. 363–379.
5. *Anantha V., Taflove A.* Efficient modeling of infinite scatterers using a generalized Total-Field/Scattered-Field FDTD boundary partially embedded within PML // *IEEE Trans. of Antennas and Propagation.* 2002. **50**, N 10. 1337–1349.
6. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986.
7. *Химмельблау Д.* Прикладное нелинейное программирование. М.: Наука, 1975.

Поступила в редакцию
09.09.2011