

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра информатики и программирования

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЛИНИИ
ПЕРЕДАЧИ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ НА ОСНОВЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ
РАЗНОСТЕЙ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 4 курса 441 группы

направления 02.03.03 Математическое обеспечение и администрирование
информационных систем

факультета компьютерных наук и информационных технологий

Фисенко Ольги Сергеевны

Научный руководитель:

доцент, к.ф.-м.н.

К. П. Вахлаева

подпись, дата

Зав. кафедрой:

к.ф.-м.н.

М. В. Огнева

подпись, дата

Саратов 2017

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Анализ и проектирование электродинамических систем, представляющих распространение электромагнитных волн в различных средах, связаны с решением уравнений Максвелла, составляющих основу классической электродинамики [1].

Метод конечных разностей во временной области (Finite-Difference Time-Domain, FDTD), основанный на дискретизации уравнений Максвелла, записанных в дифференциальной форме, является одним из распространенных численных методов решения задач электродинамики. Базовый алгоритм был предложен Кейном Йи в 1966 году [2], а название и аббревиатуру FDTD методу дал Аллен Тафлов в 1980 году [3]. Метод FDTD позволяет проследить динамику распространения электромагнитных волн во времени при прохождении через разного рода сложные среды, например, такие как фотонные кристаллы.

Фотонные кристаллы являются очень удобными объектами для управления распространением электромагнитных волн оптического диапазона. В общем случае фотонный кристалл – это материал, структура которого характеризуется периодическим изменением диэлектрической проницаемости. 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 *запрещенные зоны*. Если спектральные диапазоны для всех без исключения направлений в кристалле перекрываются, то можно говорить о полной запрещенной зоне.

Развитие технологии изготовления фотонно-кристаллических структур и увеличение производительности вычислительной техники открывают возможности для численного моделирования и экспериментальной реализации устройств, использующих фотонные кристаллы. Численное моделирование дает возможность во многом заменить трудоемкие и затратные практические эксперименты на начальном этапе исследований.

Распространение электромагнитного поля в фотонных кристаллах описывается уравнениями Максвелла. Для исследования свойств фотонных кристаллов и устройств, основанных на них, используются численные методы, позволяющие вычислять распространение электромагнитного импульса через такую структуру. Метод FDTD позволяет получить решение задачи в зависимости от времени. Также он может быть применен для расчета зонных структур фотонных кристаллов.

В настоящее время используется целый ряд программ моделирования высокочастотных электромагнитных полей, как коммерческих, например, Ansoft HFSS, CST Microwave Studio, так и бесплатных, например, EMTL, MEEP. Грамотное и эффективное использование этих программ требует от пользователя понимания численных методов, которые в этих программах используются.

Цель бакалаврской работы – изучить метод FDTD и его применение для моделирования распространения электромагнитных волн в фотонных кристаллах на основе использования свободно распространяемого пакета EMTL.

Поставленная цель определила **следующие задачи**:

1. изучить метод FDTD, решающий систему уравнений Максвелла, записанную в дифференциальной форме, посредством конечно-разностной аппроксимации;
2. освоить работу с пакетом Electromagnetic Template Library (EMTL);
3. получить в процессе расчета картины распространения электромагнитных волн в различных фотонных кристаллах.

Методологические основы представлены в работах Н.А. Семенова [4], С. В. Баскакова [5], А. Д. Григорьева [7], А. В. Дейнега и др. [12-18].

Практическая значимость бакалаврской работы. В ходе выполнения бакалаврской работы были решены все поставленные задачи, что позволило достигнуть заявленной цели – изучить метод FDTD и его применение для моделирования распространения электромагнитных волн в

фотонных кристаллах на основе использования свободно распространяемого пакета EMTL.

Основное достоинство свободно распространяемого пакета EMTL в том, что это не просто готовая программа для использования и получения ограниченного набора определенных расчетов, EMTL – это рабочая программа, в которой реализованы такие алгоритмы, как расчет спектра прохождения и отражения от конечных фотонно-кристаллических пластинок, итерационный метод для расчета наклонного падения плоской волны на периодическую структуру, метод подсеточного сглаживания для металлических сред, позволяющий увеличить точность отображения тел произвольной формы на сетку и другие. Используя данные алгоритмы можно задавать нужные параметры, получать различные результаты, сравнивать их, анализировать. С помощью выходных текстовых данных можно строить двумерные и трехмерные графики.

EMTL является открытым пакетом, что позволяет модифицировать имеющиеся в наборе алгоритмы и добавлять новые, участвовать в развитии EMTL.

В бакалаврской работе рассматриваются вопросы, связанные с установкой и использованием EMTL для выполнения расчетов методом FDTD.

Структура и объём работы. Бакалаврская работа состоит из введения, 3 разделов, заключения, списка использованных источников и одного приложения. Общий объём работы – 48 страниц, из них 41 страница – основное содержание, включая 14 рисунков, список использованных источников информации – 20 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первый раздел «Основы электромагнетизма» посвящен краткому описанию теории электромагнитного поля.

Подраздел «Понятия теории электромагнитного поля» описывает напряженности электрического и магнитного полей, электрической и магнитной индукции. Данные величины определяют электромагнитное поле в каждой точке пространства.

Подраздел «Основные уравнения классической электродинамики» включает в себя описание уравнений Максвелла, а также объяснение возникновения электромагнитной волны.

Подраздел «Материальные уравнения» содержит в себе описание уравнений, которые устанавливают связь между напряженностью электрического и магнитного полей, электрической и магнитной индукцией [4-6].

Данная теория является базой для изучения метода конечных разностей во временной области.

Второй раздел «Метод конечных разностей во временной области» посвящен численному методу решения уравнений Максвелла.

Метод конечных разностей во временной области – один из популярных методов численной электродинамики. Данный метод может успешно применяться для моделирования широкополосных сигналов, так как он работает во временной области и позволяет получить результат для широкого спектра длин волн за один расчет. Недостатком метода является то, что величина шага дискретизации по пространству должна быть значительно меньше исследуемых длин волн и типичных размеров исследуемой структуры, что в некоторых случаях может потребовать сеток с меньшим шагом, из-за чего увеличатся затраты памяти и для расчета потребуются значительно большее время.

Подраздел «Конечно-разностные уравнения» содержит в себе аппроксимацию первого и второго уравнений Максвелла (закон Ампера-Максвелла и закон индукции Фарадея) конечными разностями.

В подразделе «Дискретизация уравнений Максвелла в прямоугольных координатах» рассматривается электромагнитное поле в трехмерной области, заполненной изотропным диэлектриком, поэтапно объясняется процесс равномерной дискретизации с заданием начальных значений. Для трехмерного случая описывается куб Йи, который представляет собой одну ячейку сетки, используемой в методе FDTD, когда все компоненты электромагнитного поля $E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z$ берутся в разных точках. Компоненты магнитного поля \vec{H} находятся в центрах граней куба, а электрического поля \vec{E} – посередине ребер [8-10].

Описывается критерий устойчивости Куранта-Фридрихса-Леви [7, 10].

Третий раздел «Численное решение уравнений Максвелла с использованием Electromagnetic Template Library (EMTL)» посвящен изучению программы EMTL и получению в процессе расчета картины распространения электромагнитных волн в различных фотонных кристаллах [11].

Первый подраздел «Установка программы EMTL» включает в себя шаги по установке программы, а также описание программы gnuplot, которая используется для визуализации результатов, полученных в программе EMTL.

Второй подраздел «Параметры численного расчета в EMTL» описывает основные элементы численного расчета методом FDTD: материальные тела, граничные условия, источник волны, детекторы.

Описывается метод полного и рассеянного поля TF/SF (Total Field / Scattered Field). Метод TF/SF состоит в разделении вычислительного объема на две области: области полного поля и области рассеянного поля. Граница, разделяющая эти две области, служит для генерации плоской волны в область полного поля.

Описываются граничные условия, называемые идеально согласованным слоем – PML (Perfectly Matched Layer), поглощающим всю падающую на него волну без отражений. Таким образом, все падающие на границу вычислительного объема волны вне зависимости от угла падения поглощаются этим материалом [13-18].

Третий подраздел «Моделирование электромагнитного поля при падении плоской волны на фотонно-кристаллическую структуру» содержит в себе три пункта.

Пункт «Фотонно-кристаллическая пластинка» включает в себя краткое описание фотонных кристаллов, их особенность либо полностью отражать, либо поглощать электромагнитную волну. Также, описывается нормальное падение электромагнитной волны на фотонно-кристаллическую пластинку [19-20].

Пункт «Выполнение численного моделирования EMTL» включает в себя описание функций: указание размера вычисляемого пространства, установка шага сетки, установка граничных условий, объекта в вычислительную область, моделирование наклонного падения на периодическую структуру, генерация плоской волны, задание количества шагов. Также, в данном пункте, визуализируется наклонное падение электромагнитной волны на фотонно-кристаллическую пластинку, состоящую из сфер серы (диэлектрическая проницаемость = 4, магнитная проницаемость = 1, электропроводность = 2), упакованных в квадратную решетку. Описываются команды, которые используются для получения визуализации трехмерной фотонно-кристаллической пластинки в программе gnuplot.

Пункт «Определение спектров прохождения и отражения для фотонно-кристаллической пластинки» содержит в себе результаты проведенных расчетов, а именно: визуализация спектров отражения и прохождения для фотонно-кристаллической пластинки, состоящей из сфер серы, золота и серебра. Проанализированы соответствующие результаты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выпускной квалификационной работы было изучено решение системы уравнений Максвелла конечно-разностным методом FDTD для трехмерной области, освоен расчет различных фотонно-кристаллических структур с использованием открытого пакета EMTL, реализующим указанный метод.

Результатом практической работы стало моделирование наклонного падения плоской волны на фотонно-кристаллическую пластинку, состоящую из упакованных в квадратную решетку сфер, для трех различных материалов. В каждом из рассматриваемых случаев получены коэффициенты отражения от структуры и прохождения через нее в широком частотном диапазоне. Сгенерирован скрипт на языке C++ для расчета фотонно-кристаллических структур в EMTL.

По тематике бакалаврской работы была опубликована статья:

Вахлаева К. П., Савин А. Н., Глотова Ю. В., Дорошенкова Т. А., Фисенко О. С. Изучение технологий параллельных вычислений на графических процессорах NVIDIA на примере метода FDTD решения уравнений Максвелла. Информационные технологии в образовании. Материалы VIII Международной научно-практической конференции, 2-3 ноября 2016 г., Саратов. – Саратов: Издательский центр «Наука», 2016. – С. 106-110.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Джексон Дж. Классическая электродинамика. Перевод с английского Г. В. Воскресенского и Л. С. Соловьева. Под редакцией Э. Л. Бурштейна. – М.: Мир, 1965. – 703 с.
2. Yee K. S. Numerical solution of the initial boundary problems involving Maxwell's equations in isotropic media // IEEE Trans. Antennas Propagat. – 1966. – Vol. 14, no. 3. – Pp. 302-307.
3. Taflove A. Application of the finite-difference time-domain method to sinusoidal steady-state electromagnetic-penetration problems // IEEE Trans. Electromagn. Compat. –1980. – Vol. 22 – Pp. 191-202.
4. Семенов Н. А. Техническая электродинамика. Учебное пособие для вузов – М.: «Связь», 1973. – 480 с.
5. Баскаков С. В. Электродинамика и распространение радиоволн: Учеб. пособие для вузов по спец. «Радиотехника». – М.: Высш. шк., 1992. – 416 с.
6. Татур Т. А. Основы теории электромагнитного поля: Справочн. пособие для электротехн. спец. вузов. – М.: Высш. шк., – 1989. – 271 с.
7. Григорьев А. Д. Методы вычислительной электродинамики – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 430 с.
8. Уравнения Максвелла для электромагнитного поля. [Электронный ресурс]. – URL: <http://dl2kq.de/ant/3-74.htm> (дата обращения: 30.05.2017)
9. Самарский А. А. Введение в теорию разностных схем. – М.: Наука, 1971. – 553 с.
10. Gedney S. D. Introduction to the Finite-difference Time-domain Method for Electromagnetics [Электронный ресурс]. URL: [http://ftp.yazd.ac.ir/FTP/E-Book/Electronic/Communication/field/2011---Introduction%20to%20the%20Finite-DifferenceTime-Domain\(FDTD\)%20Method%20for%20Electromagnetics.pdf](http://ftp.yazd.ac.ir/FTP/E-Book/Electronic/Communication/field/2011---Introduction%20to%20the%20Finite-DifferenceTime-Domain(FDTD)%20Method%20for%20Electromagnetics.pdf) (дата обращения: 20.05.2017).
11. Electromagnetic Template Library [Электронный ресурс]. URL: <http://fdtd.kintechlab.com/ru/fdtd> (дата обращения: 30.05.2017)

12. Deinega A., Valuev I. Subpixel smoothing for conductive and dispersive media in the FDTD method. – Opt. Lett. 32, 3429, 2007.
13. Valuev I., Deinega A., Belousov S. Iterative technique for analysis of periodic structures at oblique incidence in the finite-difference time-domain method. – Opt. Lett. 33, 1491, 2008.
14. Deinega A., Valuev I. Long-time behavior of PML absorbing boundaries for layered periodic structures. – Comp. Phys. Comm. 182, 149, 2011.
15. Deinega A., S. John Effective optical response of silicon to sunlight in the finite-difference time-domain method. – Opt. Lett. 37, 112, 2012.
16. Deinega A., Belousov S., Valuev I. Transfer matrix approach for finite-difference time-domain simulation of periodic structures – Phys. Rev. E 88, 053305, 2013.
17. Deinega A., Seideman T. New, self-interaction-free approaches for self-consistent solution of the Maxwell-Liouville equations. – Phys. Rev. A 89, 022501, 2014.
18. Valuev I., Deinega A., Belousov S. Implementation of the iterative finite-difference time-domain technique for simulation of periodic structures at oblique incidence – Comp. Phys. Comm 185, pp.1273-1281, 2014.
19. Вахлаева К. П., Савин А. Н., Глотова Ю. В., Дорошенкова Т. А., Фисенко О. С. Изучение технологий параллельных вычислений на графических процессорах NVIDIA на примере метода FDTD решения уравнений Максвелла. Информационные технологии в образовании. Материалы VIII Международной научно-практической конференции, 2-3 ноября 2016 г., Саратов. – Саратов: Издательский центр «Наука», 2016. – С. 106-110.
20. Закиров А.В., Левченко В.Д. Эффективный алгоритм для трехмерного моделирования распространения электромагнитных волн в фотонных кристаллах, Препринты ИПМ им.М.В.Келдыша. 2008. № 21. 20 с. [Электронный ресурс]. – URL:[http://keldysh.ru/papers/2008/source/prep2008_21.pdf/](http://keldysh.ru/papers/2008/source/prep2008_21.pdf) (дата обращения: 30.05.2017).