

На правах рукописи



ШУЮПОВА Яна Олеговна

**МЕТОДЫ РАСЧЕТА МОД ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ФОТОННО-
КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СВЕТОВОДАХ**

Специальность 01.04.05 – Оптика

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

САМАРА - 2008

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» и в Институте систем обработки изображений РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Котляр Виктор Викторович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Захаров Валерий Павлович;
кандидат физико-математических наук,
доцент Козлов Николай Петрович

Ведущее предприятие: Самарский филиал Физического института
им. П.Н. Лебедева РАН

Защита состоится « 13 » июня 2008г., в ____ ч.
на заседании диссертационного совета Д. 212.215.01 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» (СГАУ) по адресу: 443086, Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГАУ.

Автореферат разослан « 29 » апреля 2008 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
профессор

В.Г. Шахов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена разработке двух методов расчета пространственных мод однородных в продольном направлении и неоднородных по поперечным осям оптических световодов и применению этих методов для расчета мод фотонно-кристаллических световодов.

Актуальность работы. Создание лазеров и их широкое применение привело к появлению ряда новых направлений науки и техники. Одним из таких направлений является современная волоконная оптика.

Практический интерес к оптическим световодам и волокнам породил необходимость разработки методов их исследования, позволяющих численно анализировать свойства уже существующих образцов и прогнозировать перспективы применения синтезируемых средствами компьютерного моделирования волноводных структур.

Фотонно-кристаллические световоды (ФКС) – это относительно новый класс оптических волокон, использующих свойства фотонных кристаллов (J. C. Knight, 1996). Способность ФКС удерживать и направлять свет зависит от множества физических и геометрических параметров, поэтому с их созданием появились дополнительные степени свободы для управления характеристиками света, распространяющегося внутри световода.

Актуальной задачей остается разработка эффективных методов расчета мод ФКС, то есть электромагнитных волн, которые способны возбуждаться и распространяться в сердечнике световода. Любой пучок излучения, направляемый в световод, будет «раскладываться» в нем по совокупности пространственных мод и распространяться в виде линейной суперпозиции мод.

Исторически первым методом, примененным для расчета мод ФКС, стал метод эффективного индекса (Т.А. Birks, 1997). Являясь одним из самых быстрых, он при этом уступает конкурентам по точности.

Методы декомпозиции. Основная идея, эксплуатируемая в данной группе методов, – это возможность представления поля моды световода в виде разложения по некоторому базису. Разложение по плоским волнам (А. Ferrando, 1999) с периодическими граничными условиями дает решение для бесконечного, периодически повторяющегося в поперечной плоскости световода, что делает принципиально невозможным получение данным методом мнимой части константы распространения, соответствующей потерям при распространении вытекающей или несобственной моды. Метод разложения по модам Гаусса-Эрмита (Т.М. Монго, 2000) ограничен применением только к ФКС с отверстиями в оболочке, расположенными в узлах правильной гексагональной решетки. Метод мультиполя был обобщен на случай ФКС в работе (Т.Р. White, 2002). Основным его недостатком является обязательное требование округлости микроотверстий в оболочке.

Метод согласованных синусоидальных мод (ССМ-метод) (А. S. Sudbo, 1993) наиболее универсален среди методов этой группы и свободен от

перечисленных выше недостатков. Характерной чертой метода согласованных синусоидальных мод (ССМ-метод) является техника разбиения неоднородного сечения световода на прямоугольные области с постоянным значением показателя преломления среды. В каждой из таких областей поле моды аппроксимируется суперпозицией факторизованных гармонических функций. А константы распространения мод находятся из условия минимизации невязки представлений поля на границах соседних областей. Однако и в ССМ-методе имеются проблемы. Процедуры поиска корней (нулей функции), как на начальном этапе отыскании локальных мод, так и при определении константы распространения, обладают существенным недостатком, а именно: возможен пропуск корней в том случае, если они располагаются вблизи друг друга или вблизи разрыва. Кроме того ССМ-метод не был ранее применен для расчета мод ФКС.

Интегральные методы. Интегральные методы являются сеточными в отличие от методов предыдущей группы. В этой группе можно выделить метод конечных элементов (F. Brechet, 2000). Он представляет собой мощный инструмент векторного анализа, достаточно быстрый и гибкий. Среди недостатков: требовательность к ресурсам памяти, а также необходимость вмешательства человека в работу алгоритма для лучшего определения граничных условий и сетки дискретизации. Метод граничных элементов (N. Guan, 2003) отличается меньшей требовательностью к ресурсам памяти. Однако существенным недостатком является возможность возникновения ложных решений.

Конечно-разностные методы. Конечно-разностные методы, также как и названные методы интегральные, дают сеточное решение. Метод конечных разностей (КР-метод) широко используется для решения разного рода уравнений. Благодаря простоте реализации, этот метод стал удобным инструментом для расчета мод оптических световодов, особенно тех, для которых не существует аналитического решения, например, таких как ФКС. За основу рассматриваемого дифференциального метода был взят подход, предложенный в работе Янг (R. Yang, 2004), где для расчета мод использовалась техника применения конечно-разностных аппроксимаций к стационарным векторным волновым уравнениям для монохроматического света. КР-метод выигрывает по скорости работы алгоритма у ССМ-метода, поскольку задача отыскания констант распространения и отсчетов сеточных решений напрямую сводится к линейной матричной задаче на собственные числа и вектора. Янг описывает метод расчета только для электрической составляющей электромагнитного поля и не приводит явный вид элементов матрицы. Задача расчета напряженности магнитного поля мод не рассматривалась вовсе.

Обычно при расчете мод ФКС ограничиваются применением одного метода и не обсуждается вопрос о правильности или точности этого расчета.

Сравнение результатов расчета мод двумя принципиально разными методами, например, ССМ- и КР-методами, позволит говорить о достоверности результатов расчета.

Целью диссертации является разработка двух методов расчета пространственных мод лазерного излучения фотонно-кристаллических световодов, а также сравнение между собой пространственных мод, рассчитанных этими методами.

В соответствии с поставленной целью определены **основные задачи диссертации**:

- Разработать метод согласованных синусоидальных мод для расчета поперечных мод лазерного излучения в фотонно-кристаллических световодах, основанный на итеративном методе Крылова решения нелинейной задачи поиска констант распространения мод.
- Разработать метод расчета мод лазерного излучения в фотонно-кристаллических световодах, основанный на применении конечно-разностных аппроксимаций к стационарным волновым уравнениям и независимом решении задач расчета электрических и магнитных составляющих электромагнитного поля.
- Рассчитать численные значения характеристик мод лазерного излучения, распределения их компонент в сечении фотонно-кристаллических световодов и провести сравнение результатов, полученных разными методами.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработан метод согласованных синусоидальных мод для расчета электромагнитных мод фотонно-кристаллических световодов, в котором задача поиска констант распространения мод без пропусков решается как нелинейная задача на собственные значения с помощью итеративного метода Крылова.
2. Разработан метод расчета электромагнитных мод фотонно-кристаллических световодов, основанный на независимом решении двух линейных матричных задач на собственные значения, получаемых в результате применения конечно-разностных аппроксимаций к векторным волновым уравнениям относительно электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля.
3. С помощью разработанных методов проведено численное исследование модового состава оптических световодов с оболочкой в виде двумерного фотонного кристалла с круглыми и квадратными отверстиями, расположенными в узлах гексагональной и квадратной решеток, с заполненным и полым сердечниками. Показано, что оба метода дают сходные результаты: значения рассчитанных констант распространения отличаются на величину порядка 10^{-3} , а среднеквадратическое отклонение распределений амплитуд

компонент поля по области сечения составляет менее одного процента.

4. Рассчитана зависимость дисперсионного параметра фотонно-кристаллических световодов от длины волны, и показано, что при выбранных параметрах световод с заполненным сердечником обладает нормальной дисперсией, а аналогичный световод с полым сердечником – аномальной. Световод из плавленого кварца с полым сердечником может обладать дифракционными потерями (0,1 дБ/км) меньшими, чем потери за счет поглощения света (0,2 дБ/км) в световоде с заполненным сердечником.

Защищаемые положения:

- Метод согласованных синусоидальных мод, усовершенствованный итеративным алгоритмом Крылова, позволяет без пропусков рассчитывать константы распространения пространственных мод фотонно-кристаллических световодов.
- Независимый расчет поперечных составляющих электрического и магнитного векторов электромагнитных полей мод фотонно-кристаллических световодов с помощью метода конечно-разностных аппроксимаций, применяемых к стационарным волновым уравнениям, позволяет получать одни и те же константы распространения мод, отличные друг от друга на доли процента.
- Основная мода модельного фотонно-кристаллического световода с квадратными отверстиями, расположенными в шахматном порядке вокруг сердечника, рассчитанная двумя разработанными методами отличается в среднем по сечению не более чем на один процент, а константа распространения отличается в третьем знаке после запятой.
- Предложенная реализация ССМ-метода в среде Matlab дает более устойчивую и монотонную сходимость, а также существенно меньшую величину ошибки при малом числе локальных мод (менее 20), чем коммерческая программа FIMMWAVE.

Практическая ценность работы:

- Разработанный ССМ-метод позволяет получить в виде Фурье гармоник аналитическое непрерывное описание любой составляющей любой собственной моды фотонно-кристаллического световода с произвольно заданным поперечным сечением.
- Разработанный КР-метод позволяет быстро получать отсчеты амплитуд электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля мод световода с произвольным поперечным сечением.
- Оба метода позволяют рассчитывать дисперсионные кривые для ФКС с полым и заполненным сердечниками и определять области нормальной и аномальной дисперсии групповой скорости света.

- Оба разработанных метода также позволяют с помощью дополнительного оптимизационного алгоритма проектировать профиль показателя преломления в сечении световода, который бы обеспечил заданный модовый состав ФКС.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях и семинарах: IV и V международных конференция молодых ученых и специалистов «Оптика - 2005» и «Оптика - 2007», проводимых Санкт-Петербургским государственным университетом информационных технологий, точной механики и оптики (г. Санкт-Петербург, октябрь 2005 и 2007гг.); третьем Самарском региональном конкурсе-конференции научных работ студентов и молодых исследователей по оптике и лазерной физике, проводимом Самарским филиалом Физического института РАН (г. Самара, ноябрь 2005г.); Всероссийском семинаре по моделированию, дифракционной оптике и обработке изображений, проводимом Самарским государственным аэрокосмическим университетом (г. Самара, июнь 2006г.); международном конгрессе «Оптика 21 века» на конференции «ICO Topical Meeting on Optoinformatics», проводимой Санкт-Петербургским государственным университетом информационных технологий, точной механики и оптики (г. Санкт-Петербург, сентябрь 2006г.).

Публикации. По результатам диссертационной работы опубликовано 11 печатных работ, 8 из которых опубликованы в научных журналах, определенных Высшей аттестационной комиссией.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы (95 наименований) и приложения, изложенных на 149 страницах, и содержит 45 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертации. Сформулированы цель и задачи, сделан обзор научных работ по рассматриваемым вопросам. Изложена научная новизна, практическая значимость, защищаемые положения, описаны содержание и структура диссертации.

В **Главе 1** содержатся сведения о современном состоянии сферы проектирования, производства и применения ФКС. Стекланные или кварцевые ФКС в своем поперечном сечении имеют периодическую или аperiodическую структуру включений или микроотверстий цилиндрической формы, ориентированных вдоль оси волокна. Дефект микроструктуры служит сердечником световода, обеспечивая волноводный режим распространения электромагнитного излучения.

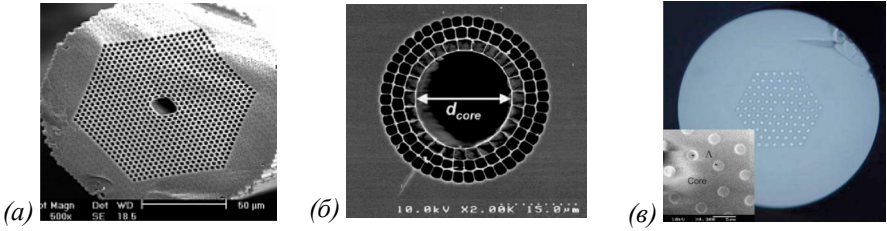
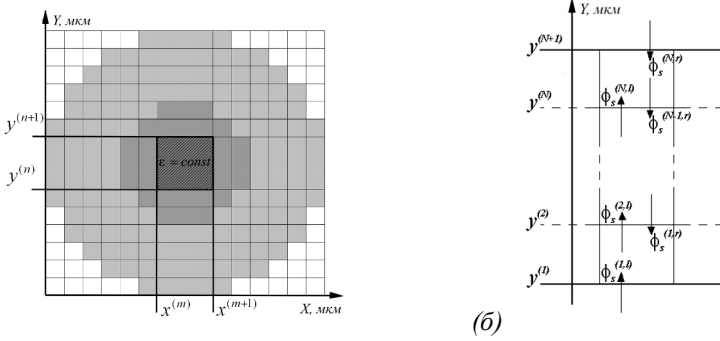


Рис. 1 – Различные типы ФКС: (а) – с полым сердечником и гексагональной решеткой микроотверстий, (б) – волокно Брэгга, (в) – твердотельный

Благодаря оболочке в виде фотонного кристалла ФКС обладают рядом свойств, отличающих их от обычных световодов. Так, ФКС могут быть одномодовыми в очень широком диапазоне длин волн. Величина и наклон кривой дисперсии групповой скорости может сильно меняться в зависимости от геометрических параметров ФКС, что позволяет, например, получить требуемое значение дисперсии на заданной длине волны. Структура ФКС позволяет достигать больших, порядка 10^{-2} , значений параметра двулучепреломления $dn = |n_{eff}^x - n_{eff}^y|$, где n_{eff}^x и n_{eff}^y – эффективные модовые индексы ортогонально поляризованных мод, что привлекательно в плане использования в оптических сенсорах. Для целей передачи информации наиболее важным является создание ФКС, в которых удастся снизить затухание до величины меньшей фундаментального предела затухания обычных кварцевых световодов, порядка 0,2 дБ/км. Основной задачей исследования ФКС, как и световода любого другого типа, является проблема отыскания его мод – электромагнитных полей, способных в нем распространяться. Существует несколько методов, предназначенных для расчета мод ФКС. Все их можно условно разделить на три группы: приближенно-аналитические методы или методы декомпозиции, интегральные методы и дифференциальные методы. Подробно рассматривается пара методов расчета мод световодов из двух принципиально разных групп: приближенно-аналитический метод согласованных синусоидальных мод и дифференциальный сеточный метод, основанный на применении конечно-разностных аппроксимаций к стационарным волновым уравнениям.

Во **Главе 2** рассмотрен метод согласованных синусоидальных мод, скалярный и векторный варианты. ССМ-метод основан на представлении решения для пространственной моды в виде суперпозиции локальных синусоидальных мод, которые являются собственными модами однородных, с постоянным показателем преломления, прямоугольных частей световода с неоднородным сечением (Рис. 2а). Результирующая пространственная мода удовлетворяет в скалярном случае уравнению Гельмгольца, в векторном – уравнениям Максвелла, и граничным условиям.



(а) Рис. 2 – Схема разбиения неоднородного поперечного сечения световода на однородные прямоугольные области (а), схема обозначения полей на границах разбиения (б)

Однородность световода вдоль оси позволяет осуществить разделение переменных и представить поле монохроматической моды в виде:

$$\bar{E}_j(x, y, z, t) = \bar{E}_j(x, y) \exp(-ik_z z) \exp(i\omega t), \quad (1)$$

$$\bar{H}_j(x, y, z, t) = \bar{H}_j(x, y) \exp(-ik_z z) \exp(i\omega t),$$

где $\bar{E}_j(x, y, z, t)$ – вектор напряженности электрического поля; $\bar{H}_j(x, y, z, t)$ – вектор напряженности магнитного поля; k_{zj} – константа распространения, собственное значение j -й моды, или проекция на продольную ось z волнового вектора, ω – частота излучения, (x, y) – поперечные координаты.

В каждой прямоугольной ячейке разбиения локальные y - и x -моды задаются известными выражениями:

$$f(y) = f_s^{(n,l)} \cos[k_y^{(n)}(y - y^{(n)})] + \frac{f_a^{(n,l)}}{k_y^{(n)}} \sin[k_y^{(n)}(y - y^{(n)})], \quad (2)$$

где $k_y^{(n)} = \sqrt{\varepsilon^{(m,n)} k_0^2 - k_z^2}$ – константа распространения локальной y -моды, k_0 – волновое число в вакууме, $\varepsilon^{(m,n)}$ – диэлектрическая проницаемость в ячейке (m, n) , $f_s^{(n,l)} = f(y^{(n)} + 0)$ – нижнее или левое значение y -моды $f(y)$ в данном прямоугольном фрагменте, $f_a^{(n,l)} = f'(y^{(n)} + 0)$ – нижнее или левое значение производной $f'(y)$ в той же ячейке сечения. Аналогично определяются правые значения $f(y)$. Иллюстрация расположения $f_s^{(n,l)}$, $f_a^{(n,l)}$, $f_s^{(n,r)}$, $f_a^{(n,r)}$ приводится на Рис. 2б. Аналогичное (2) выражение можно задать для локальной k -ой x -моды в m -ом столбце.

$$u_k^{(m)}(x) = u_{sk}^{(m,l)} \cos[k_{xk}^{(m)}(x - x^{(m)})] + \frac{u_{ak}^{(m,l)}}{k_{xk}^{(m)}} \sin[k_{xk}^{(m)}(x - x^{(m)})], \quad (3)$$

где $k_{xk}^{(m)} = \sqrt{k_k^{(m)2} - k_z^2}$ – константа распространения локальной x -моды, а $u_{sk}^{(m,l)}$, $u_{ak}^{(m,l)}$ – левые значения локальной x -моды и ее производной соответственно.

Из требования равенства левых и правых значений y -моды на границах соседних ячеек возникает характеристическое уравнение относительно константы ее распространения $k_y^{(n)}$:

$$f_s^{(n',r)} f_a^{(n'+1,l)} - f_a^{(n',r)} f_s^{(n'+1,l)} = 0. \quad (4)$$

На этапе решения уравнения (4) предложен статистический алгоритм адаптивного выбора шага дискретизации, позволяющий повысить точность вычислений для обнаружения расположенных вблизи друг друга корней.

В скалярном случае поле в m -ом столбце представляется в виде:

$$x^{(m)}(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} u_k^{(m)}(x) f_k^{(m)}(y), \quad (5)$$

где суммирование идет по всем локальным модам в m -ом столбце.

Принципиальное отличие векторного случая состоит в том, что необходимо рассматривать локальные моды двух различных поляризаций – ТЕ и ТМ, поскольку обе они вносят свой вклад в формирование гибридной моды световода. Поэтому выражение для векторной моды имеет вид:

$$F^{(m)}(x, y) = \sum_{p=e,h} \sum_{k=1}^{\infty} [u_{pk}^{(m)}(x) F_{spk}^{(m)}(y) + v_{pk}^{(m)}(x) F_{apk}^{(m)}(y)], \quad (6)$$

где $F^{(m)}(x, y)$ представляет собой любую из электрических или магнитных компонент поля моды, а внешняя сумма соответствует суммированию по поляризациям: ТЕ – $p = h$, ТМ – $p = e$. Функции $F_{spk}^{(m)}(y)$ и $F_{apk}^{(m)}(y)$ выражаются через локальные y -моды. В обоих скалярном и векторном случаях из условия минимизации невязки поля на границах соседних столбцов вытекает нелинейная матричная задача на собственные значения относительно константы распространения пространственной моды k_z :

$$\Lambda(k_z)U = 0, \quad (7)$$

где U – вектор, содержащий некоторые левые значения локальных x -мод, Λ – квадратная блочная матрица, элементы которой нелинейно (через тригонометрические функции) зависят от k_z . В скалярном случае Λ имеет размерность $(M-1)K \times (M-1)K$, где M – число столбцов разбиения, K – число локальных мод в разложениях, в векторном – в четыре раза большую.

Чтобы избежать пропуска искомым констант распространения, возможного в случае применения метода нулей функции, предложенного в работе

(A.S. Sudbo, 1993), в диссертации было предложено использовать метод Крылова (A. Ruhe, 2000) для решения задачи (7).

Интерполируя нелинейный матричный оператор $\Lambda(k_z)$ между двумя произвольными значениями S и m следующим образом:

$$\Lambda(k_z) \approx \tilde{\Lambda}(k_z) = \frac{k_z - S}{m - S} \Lambda(m) + \frac{m - k_z}{m - S} \Lambda(S), \quad (8)$$

получаем линейную задачу на собственные значения, которую решаем итеративно в виде:

$$\left[\frac{m_{k+1} - S}{m_k - S} \Lambda(m_k) + \frac{m_k - m_{k+1}}{m_k - S} \Lambda(S) \right] U_k = 0, \quad (9)$$

где m_{k+1} – приближенное значение искомого k_z , получаемое на (k+1)-ом шаге итерации. Рассчитываем оценку для собственного значения k_z на (k+1)-ом шаге итерации:

$$m_{k+1} = m_k + \frac{q}{1 - q} (m_k - S), \quad \text{где } q = \frac{m_{k+1} - m_k}{m_{k+1} - S}. \quad (10)$$

Итерации повторяются до тех пор, пока последовательность оценок $\{m_k\}$ не сойдется. Показано (E. Jarlebring, 2005), что итерационная процедура в методе Крылова сходится к искомому собственному значению.

Как следует из диаграммы (Рис. 3), показывающей количество найденных корней на интервале единичной длины, метод Крылова существенно лучше обнаруживает искомые значения параметра k_z , чем два других метода: метод нулей функции и комбинированный метод, сочетающий итерации метода Крылова и метода нулей функции.

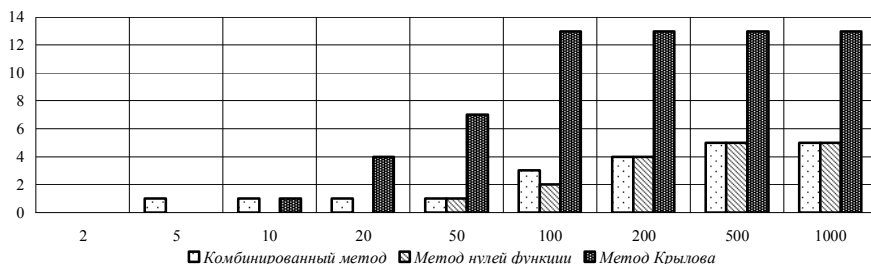


Рис. 3 – Диаграмма зависимости количества найденных констант распространения тринадцати первых мод ФКС от величины $1/h$, обратно пропорциональной точности разделения корней

В Главе 3 рассматривается КР-метод, основанный на конечно-разностных аппроксимациях производных, примененных к стационарным волновым уравнениям для монохроматического светового поля:

$$\nabla^2 \bar{E} + \nabla(\nabla \ln n^2 \cdot \bar{E}) + n^2 k_0^2 \bar{E} = 0, \quad (11)$$

$$\nabla^2 \bar{H} - (\nabla \times \bar{H}) \times \nabla \ln n^2 + n^2 k_0^2 \bar{H} = 0, \quad (12)$$

где $n(x,y)$ – неоднородный показатель преломления в поперечном сечении ФКС.

Однородность световода вдоль оптической оси позволяет произвести разделение переменных и записать уравнения (11) и (12) в матричном виде относительно поперечных составляющих электромагнитного поля E_x, E_y, H_x, H_y :

$$\begin{bmatrix} P_{xx} & P_{xy} \\ P_{yx} & P_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = k_z^2 \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} \\ Q_{yx} & Q_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} = k_z^2 \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Заменяя в (13) непрерывные дифференциальные операторы $P_{xx}, P_{xy}, Q_{xx}, Q_{xy}$ и др., конечно-разностными, получаем две независимые линейные задачи на собственные значения относительно квадрата константы распространения:

$$RE_i^h = k_z^2 E_i^h, \quad SH_i^h = k_z^2 H_i^h, \quad (14)$$

где R и S – квадратные разреженные матрицы, состоящие из линейных комбинаций отсчетов функции $n(x,y)$. В Приложении в явном виде приводятся все элементы матрицы R . Вектора E_i^h и H_i^h содержат все отсчеты в узлах заданной сетки поперечных компонент электрической и магнитной составляющих поля соответственно. При этом продольные компоненты могут быть рассчитаны по известным формулам.

Независимый расчет поперечных составляющих электрического и магнитного векторов фундаментальной моды ФКС с заполненным сердечником из плавленого кварца (Рис. 4) с помощью КР-метода дает значения

эффективного индекса $n_{eff} = \frac{k_z}{k_0}$, отличные друг

от друга на 0,008 %: $n_{eff}^{za} = 1,4509$ и

$n_{eff}^{max} = 1,4508$. На рисунке 4 d – диаметр

отверстия в оболочке ФКС (белые круги), Λ –

расстояние между центрами соседних отверстий,

черным цветом показан плавленый кварц с

показателем преломления $n = 1,46$, коэффициент

заполнения – $d/\Lambda = 0,85$. Для расчетом было

выбрано значение параметра $\Lambda = 1$ мкм, длина

волны при этом равнялась $\lambda_0 = 0,6$ мкм. На Рис. 5

показаны в полутонах модули амплитуд всех

шести компонент фундаментальной моды для ФКС, изображенного на Рис. 4.

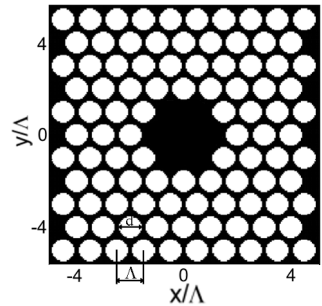


Рис. 4 – Сечение ФКС

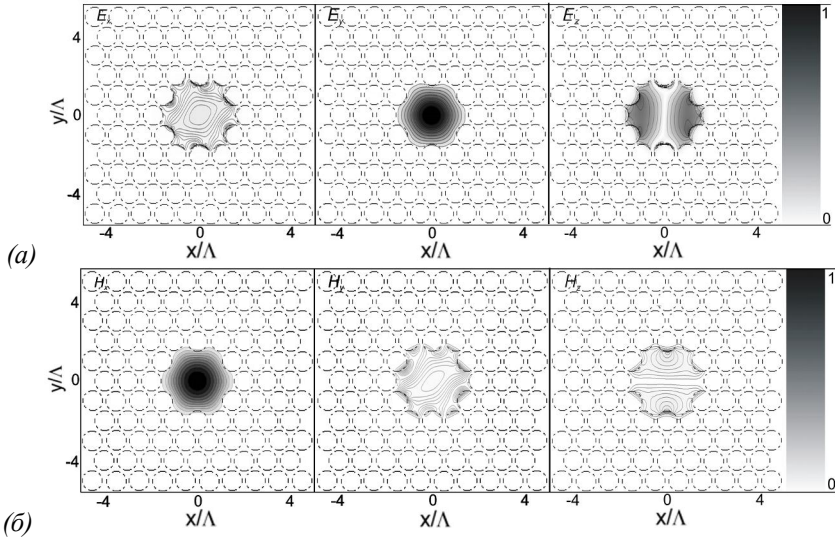


Рис. 5 – Распределение абсолютных значений амплитуды электрических E_x , E_y , E_z (а) и магнитных компонент H_x , H_y , H_z (б) фундаментальной моды ФКС, изображенного на Рис. 4, при $\lambda_0/\Lambda = 0,6$, где λ_0 – длина волны в вакууме

В Главе 4 рассматривается численное сравнение двух разработанных методов расчета пространственных мод друг с другом и коммерческой программой FIMMWAVE. Показано, что для ФКС с заполненным сердечником из плавяного кварца (Рис. 6) ССМ- и КР-метод дают решения, совпадающие с точностью до 0,86 % в смысле среднеквадратического отклонения по области сечения 9×9 мкм (100×100 отсчетов). На рисунке ба серым цветом показан плавяный кварц с $n = 1,47$, черным – микроотверстия с $n = 1$.

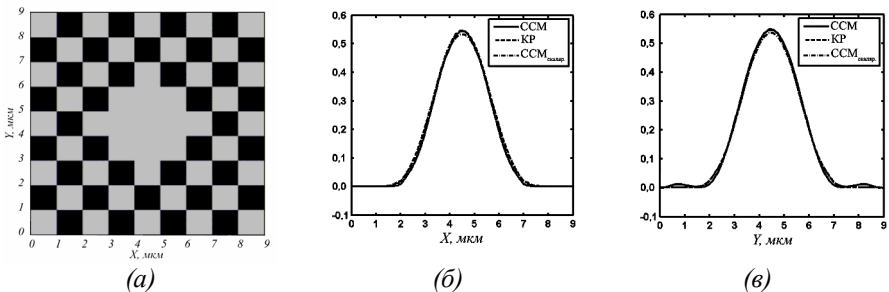


Рис. 6 – Сечение ФКС (а), центральные сечения вдоль осей x – (б) и y – (в) распределений квадрата модуля амплитуды скалярного поля и основных векторных компонент H_z фундаментальной моды, рассчитанных ССМ- и КР-методами

Из сравнения двух реализации ССМ-метода (Рис. 7): предложенной в диссертации и коммерческой программы FIMMWAVE (Оксфорд, Англия), следует, что первая имеет более устойчивую и монотонную сходимость относительной ошибки при увеличении числа используемых локальных мод в разложении (6), а также дает существенно меньшую величину ошибки при малом числе локальных мод, чем коммерческая программа FIMMWAVE.

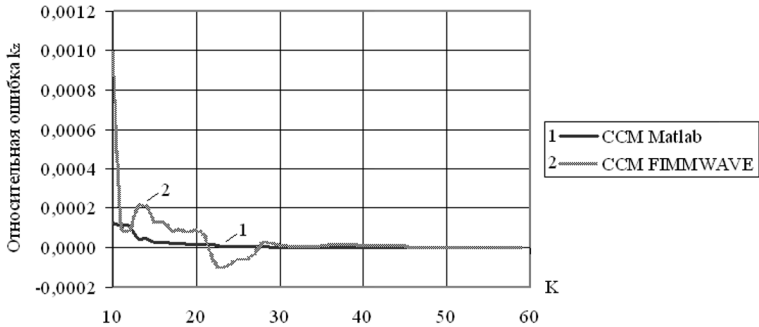


Рис. 7 – Графики зависимости относительной ошибки вычисления константы распространения фундаментальной моды ФКС (Рис. 6а) от числа локальных мод для двух реализаций ССМ-метода

Проводятся другие вычислительные эксперименты по расчету модовых характеристик ФКС обоими методами. Так, например, показано, что ФКС с заполненным сердечником (Рис. 4) может обладать нормальной дисперсией, а аналогичный ФКС с полым сердечником – аномальной (Рис. 8). То есть ФКС с полым сердечником может быть использован для компенсации дисперсии обычных кварцевых волокон и ФКС с заполненным сердечником.

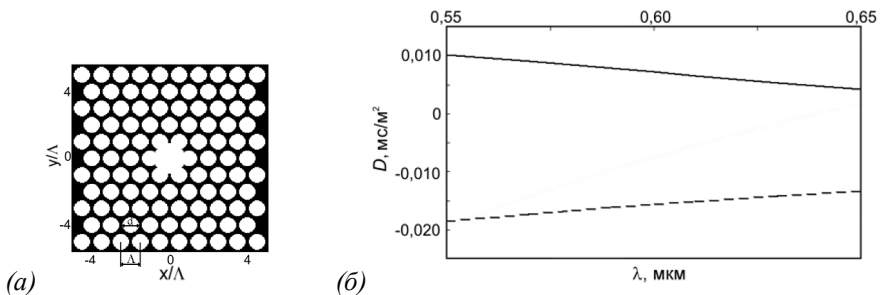


Рис. 8 – Сечение ФКС с полым сердечником (а), график дисперсионного параметра (б) для ФКС (Рис. 8а) – сплошная линия, для аналогичной модели ФКС с заполненным сердечником (Рис. 4) – пунктирная линия

Дисперсионный параметр $D = -(I_0 / c) d^2 n_{eff} / d\lambda_0^2$, где c – скорость света, характеризует дисперсию групповой скорости света в ФКС.

Рассчитанные модовые дифракционные потери ФКС с полым сердечником (Рис. 8а) и $\Lambda = 1$ мкм равняются 0,1 дБ/км для $\lambda_0 = 0,6$ мкм, что ниже фундаментального предела затухания для кварцевых волокон.

В **Приложении А** приводятся формулы для расчета элементов матрицы линейной задачи на собственные значения для поперечных компонент вектора напряженности электрического поля из третьей Главы 3.

В ЗАКЛЮЧЕНИИ приводятся основные результаты, полученные в работе.

1. Разработан метод синусоидальных согласованных мод, позволяющий без пропусков рассчитывать моды фотонно-кристаллических световодов, основанный на применении итеративного метода Крылова решения нелинейной задачи на собственные значения.
2. Разработан метод расчета мод фотонно-кристаллических световодов на основе независимого решения двух линейных задач на собственные значения для электрической и магнитной компонент светового поля, полученных с помощью конечно-разностных аппроксимаций соответствующих стационарных волновых уравнений.
3. Проведено сравнение двух разработанных методов расчета мод фотонно-кристаллических волноводов и показано, что оба метода дают почти одинаковые результаты (отличие менее 1 %) , если в методе согласованных синусоидальных мод выбирать более 15 локальных мод в каждой ячейке разбиения, а в конечно-разностном методе выбирать шаг сетки отсчетов меньше, чем десятая доля длины волны.
4. Для ФКС с полым сердечником доля энергии электрической составляющей, распространяющейся в сердечнике, составляет 50 %. Эффективный индекс несобственной фундаментальной моды комплексный и по модулю меньше единицы. Мнимая часть эффективного индекса составляет незначительную величину ($10^{-10} \div 10^{-9}$ мкм⁻¹) в диапазоне длин волн от 0,55 мкм до 0,65 мкм. Показано, что энергетические потери составляют порядка 0,1 дБ/км для длины волны 0,6 мкм, это меньше фундаментального предела затухания в обычных кварцевых волокнах (0,2 дБ/км).
5. Расчет зависимости дисперсионного параметра от длины волны КР-методом для ФКС показал, что ФКС с полым сердечником в диапазоне длин волн от 0,55 мкм до 0,65 мкм обладает аномальной и меньшей по абсолютному значению дисперсией, по сравнению с нормальной дисперсией аналогичного ФКС с заполненным сердечником.
6. Предложенная реализация ССМ-метода в среде Matlab дает более устойчивую и монотонную сходимость, а также существенно меньшую величину ошибки при малом числе локальных мод, чем коммерческая программа FIMMWAVE.

Основные положения диссертации отражены в следующих публикациях:
в научных изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией

1. Котляр В.В., Шуупова Я.О.. Расчет пространственных мод оптических волноводов с неоднородным поперечным сечением методом согласованных синусоидальных мод // Компьютерная оптика № 25, 2003.–с.41-48.
2. Kotlyar V.V., Shuyupova Y.O.. Calculating the Modes in Microstructured Optical Fibers // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics), Vol. 13, 2004.–p.27-36.
3. Котляр В.В., Шуупова Я.О.. Расчет векторных мод оптического волновода // Компьютерная оптика № 27, 2005.–с.89-94.
4. Котляр В.В., Шуупова Я.О.. Практическое применение метода согласованных синусоидальных мод для моделирования некоторых распространенных типов волноводов // Компьютерная оптика № 27, 2005.–с.84-88.
5. Котляр В.В., Шуупова Я.О.. Сравнение аналитического и полученного конечно-разностным методом решений для круглого волокна // Компьютерная оптика № 28, 2005.–с.41-44.
6. Котляр В.В., Шуупова Я.О.. Расчет мод фотонно-кристаллического световода разностным методом // Оптический журнал, том 74, № 9, 2007.–с.600-608.
7. Шуупова Я.О., Котляр В.В.. Нахождение констант распространения методом Крылова при расчете мод фотонных волноводов // Компьютерная оптика Т. 31, № 1, 2007.–с.27-30.
8. Котляр В.В., Шуупова Я.О.. Расчет мод полого фотонно-кристаллического световода разностным методом // Известия СНИЦ РАН, том 9, № 3, 2007.–с.592-597.

в других изданиях

9. Шуупова Я.О.. Применение метода согласованных синусоидальных мод для расчета полей в волноводах на фотонных кристаллах // Вестник СГАУ "Вторая летняя школа молодых ученых по дифракционной оптике и обработке изображений", 2004,–с.63-64б СГАУ, Самара.
10. Шуупова Я.О.. Сравнение двух методов расчета пространственных мод волноводов на фотонных кристаллах // Сборник трудов. Всероссийский семинар по моделированию, дифракционной оптике и обработке изображений, 2006,–с. 9-11, Самара, СГАУ.
11. Kotlyar V.V., Shuyupova Y.O.. Calculating spatial modes in photonic crystal fibers based on applying finite-difference method to wave equations // Proceedings of ICO Topical Meeting on Optoinformatics/Information Photonics 2006, September 4-7, 2006, St. Petersburg, Russia,–p. 483-485.

Подписано в печать 18.04.08

Формат 60 x 84 1/16

Отпечатано в типографии ООО «Август»

Тираж 100 экз.