

РАСЧЕТ МОД ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СВЕТОВОДА РАЗНЫМИ МЕТОДАМИ

Я.О. Шуяпова¹, В.В. Котляр²

¹Учреждение Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН,

²Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва

Аннотация

Результаты расчета эффективного индекса для фундаментальной моды фотонно-кристаллического световода с заполненным сердечником, полученные с помощью нового конечно-разностного метода и коммерческой программы FIMMWAVE 4.6, совпадают с точностью до 0,2 %. Новая реализация метода согласованных синусоидальных мод в среде Matlab 7.0 дает более устойчивую и монотонную сходимость, а также существенно меньшую величину ошибки при малом числе локальных мод (до 20 мод), чем коммерческая программа FIMMWAVE. В работе сделан обзор и приведена обширная литература по методам расчета мод фотонно-кристаллических световодов.

Ключевые слова: фотонно-кристаллические световоды, моды световода, численные методы расчета мод.

Введение

Коммерческая программа моделирования процессов распространения света FIMMWAVE v.4.6 (<http://www.photon.com/products/fimwave.htm>) позволяет рассчитывать моды диэлектрических световодов с произвольным поперечным сечением однородных в продольном направлении, в том числе фотонно-кристаллических световодов (ФКС), с помощью реализации векторного метода согласованных синусоидальных мод (FMM Solver (real)) и метода эффективного индекса (Eff. Idx. Solver (real)).

Основной целью статьи является сравнение двух реализаций метода FMM с помощью программы FIMMWAVE 4.6 и программы в среде Matlab 7.0 для расчета мод ФКС.

Фотонно-кристаллические световоды – это относительно новый класс оптических волокон, использующих свойства фотонных кристаллов [1]. ФКС представляют собой кварцевую или стеклянную микроструктуру с периодической либо аperiodической системой микровключений, чаще цилиндрических микроотверстий, ориентированных вдоль оси волокна. Дефект микроструктуры, соответствующий отсутствию одного или нескольких элементов в центре структуры, служит сердечником световода, обеспечивая волноводный режим распространения электромагнитного излучения. Существуют световоды со сплошным сердечником или сердечником с более высоким усредненным показателем преломления относительно микроструктурированной (дырчатой) оболочки, которые используют эффект полного внутреннего отражения, так же как и обычные оптические волокна, но в отличие от последних могут обладать лучшей способностью удерживать свет в сердечнике при его распространении за счет большей локальной разницы показателей преломления в сердечнике и оболочке. Другой тип ФКС для заключения в себе света использует эффект фотонных запрещенных зон (брэгговское отражение), создаваемый микроструктурированной оболочкой, за счет этого свет может удерживаться и распространяться даже в сердечнике с более низким по отношению к оболочке показате-

лем преломления, в том числе и в полном сердечнике. Фотонная запрещенная зона, возникающая в спектре пропускания (зависимость коэффициента пропускания от длины волны) двумерной периодической оболочки световода данного типа, обеспечивает высокий коэффициент отражения для излучения, распространяющегося вдоль полого сердечника, позволяя существенно снизить потери, присущие модам обычных полых световодов со сплошной оболочкой и быстро растущие [2] с уменьшением диаметра полого сердечника. Среди световодов второго типа выделяется несколько групп. Световоды с полым сердечником – центральное отверстие, как правило, большего радиуса, окружается «кольцами» микроотверстий. Волокно Брэгга [3-7] имеет полый сердечник, окруженный оболочкой, образованной чередующимися кольцами с низким и высоким показателями преломления. В работе [8] демонстрируется волокно Брэгга с заполненным материалом (твердым) сердечником, рабочая область которого может быть смещена в видимый диапазон путем варьирования толщины оболочки из брэгговских отражающих колец. Твердотельные световоды [9, 10], оболочка которых содержит стержни с высоким показателем преломления, размещенные в основном материале световода с низким показателем преломления. Кроме того, в обоих типах световодов может варьироваться целый ряд параметров (рис.1), таких как форма микроотверстий (круглые, квадратные, эллиптические) [11], схема локализации микроотверстий (правильные шестиугольная и прямоугольная решетки, неправильные решетки) [12, 13], количество сердечников [14, 15], количество дефектов, образующих сердечник [16, 17], материал, заполняющий микроотверстия [18, 19]. Так, например, в работе [20] полости в оболочке ФКС заполнялись жидкими кристаллами, что породило гибридный механизм распространения света: эффект полного внутреннего отражения и эффект фотонных запрещенных зон действуют соответственно на ортогонально поляризованные моды. О применении ФКС, заполненных жидкими кристаллами, в оптических свечах говорится в работах [21-23].

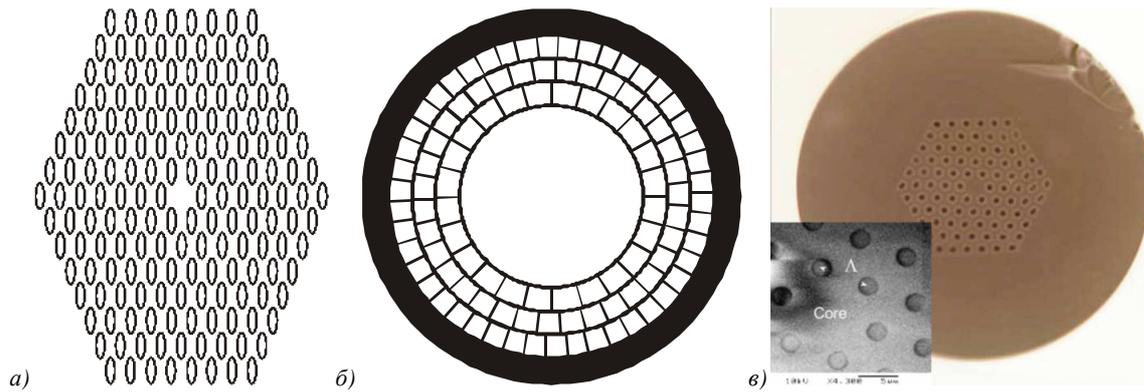


Рис. 1. Сечения различных типов ФКС: (а) – схема сплюснутой шестиугольной решетки с эллиптическими отверстиями [12], (б) – схема сечения волокна Брэгга с тремя concentрическими цилиндрическими слоями кварца [6], (в) – оптический микроснимок сечения твердотельного световода, светлые и темные области на снимке соответствуют областям с низким и высоким показателями преломления [10]

С созданием ФКС появились новые степени свободы для управления характеристиками световода, позволившие эффективно управлять дисперсией, делать волокна с очень высокой или очень низкой нелинейностью, с большой или малой эффективной площадью моды и т.д.

Теоретический интерес к ФКС вызван в большей степени фактом наличия в их структуре больших контрастов показателя преломления, чем в обычных слабонаправляющих волокнах, и, как следствие, необходимости создания специальных работоспособных методов их исследования. Стоит отметить, что способность ФКС заключать в себе свет зависит от множества факторов, таких как количество микровключений, их местоположение, соотношение диаметра и расстояния между центрами. Это дает широкое поле деятельности для проектирования световодов с заранее заданными свойствами.

С общей точки зрения, фотонный кристалл является сверхрешеткой (crystal superlattice) – средой, в которой искусственно создана периодическая модуляция какой-либо внутренней характеристики вещества, на порядки превышающая период основной атомной решетки вещества. Для фотонов такую модуляцию получают периодическим изменением коэффициента преломления среды в одном, двух или трех измерениях (1D-, 2D-, 3D-фотонные структуры соответственно). Если период оптической сверхрешетки сравним с длиной электромагнитной волны, то поведение фотонов кардинально отличается от их поведения в решетке обычного кристалла, узлы которого находятся друг от друга на расстоянии, много меньшем длины волны света. Поэтому такие решетки и получили особое название – фотонные кристаллы.

Понятие разрешенных и запрещенных энергетических зон является основным в твердотельной электронике. В оптике твердого тела схожие понятия появились лишь в 1987 году [24]. Как и электрические среды, в зависимости от ширины запрещенных зон фотонные кристаллы можно разделить на проводники – вещества, способные проводить свет

на большие расстояния с малым поглощением, диэлектрики – практически идеальные зеркала, полупроводники – вещества, способные, например, выборочно отражать фотоны определенной длины волны, и сверхпроводники, в которых благодаря коллективным явлениям фотоны распространяются практически на неограниченные расстояния.

Аналогично примесному атому, нарушающему трансляционную симметрию атомного потенциала, изменения диэлектрической проницаемости в определенной области фотонного кристалла нарушают трансляционную симметрию и приводят к появлению разрешенной моды внутри фотонной запрещенной зоны, локализованной в пространственной окрестности дефекта.

Изготавливаемые путем набора однородных стержней или трубок в заготовки и последующей вытяжки их в волокна, имеющие полости (неоднородности) по всей длине, ФКС по аналогии с кристаллами имеют зонную энергетическую структуру, т. е. у них существуют разрешенные и запрещенные энергетические зоны, в которых свет с определенной длиной волны либо может, либо не может распространяться вдоль волокна. Такой световод в поперечном сечении является двумерным кристаллом с зонной структурой фотонного изолятора. При этом в продольном направлении волокно является идеальным проводником.

Заготовки для производства ФКС могут выполняться из различных диэлектрических материалов, таких как кварц, полимеры, легкоплавкие стекла. Кварц используется часто по причине прозрачности в широком диапазоне длин волн. Заготовки обычно имеют длину порядка 400–600 мм, внешний диаметр – 20–40 мм и содержат исходные элементы (стержни, трубки), формирующие затем микроструктуру размерами порядка 0,5–5 мкм [25]. Впоследствии заготовки вытягиваются в волокна диаметром около 100 мкм с конечными размерами структуры порядка одного микрометра и меньше. В процессе вытягивания геометрия исходной микроструктуры может деформироваться, исследованию влия-

ния ее искажения на дисперсию и свойство двулучепреломления посвящены работы [26, 27].

Благодаря оболочке в виде фотонного кристалла ФКС обладают рядом свойств, отличающих их от обычных световодов. Так, ФКС могут быть одно-модовыми в очень широком диапазоне длин волн [28]. Величина и наклон кривой дисперсии групповой скорости может сильно меняться в зависимости от геометрических параметров ФКС, что позволяет, например, сместить ее нулевое значение в область более коротких длин волн, чем у стекла, получить дисперсию с малым наклоном в достаточно широком диапазоне длин волн или требуемое значение дисперсии на заданной длине волны [29-33]. В работе [34] исследуется связь между эффективной площадью моды и дисперсией. ФКС, дисперсия которого может изменяться в широких пределах за счет незначительного изменения показателя преломления материала, производимого фоточувствительным германием, присутствующим в составе в качестве добавки, предложен в работе [35]. Обладающие аномальной дисперсией групповой скорости ФКС могут быть использованы в качестве компенсаторов дисперсии [36]. Анизотропия формы сечения ФКС, связанная, например, с использованием множественного дефекта для образования сердечника [17] или геометрически неправильных решеток периодической структуры оболочки, приводит к возникновению двулучепреломления. Ортогонально поляризованные моды в таких световодах различаются постоянными распространения, т.е. проекциями на оптическую ось волнового вектора моды, эффективными модовыми индексами, групповыми скоростями, значениями дисперсии групповой скорости и другими параметрами. Структура ФКС позволяет достигать больших, порядка 10^{-2} , значений параметра двулучепреломления $\delta n = \left| n_{eff}^x - n_{eff}^y \right|$, где n_{eff}^x и

n_{eff}^y – эффективные модовые индексы ортогонально поляризованных мод [12]. ФКС со значительным двулучепреломлением привлекательны для использования в оптических сенсорах. В таких световодах удается осуществить преобразование частоты лазерных импульсов и поляризационное управление явлением генерации суперконтинуума – искусственного белого света, получаемого в результате нелинейно-оптического преобразования сверхкоротких лазерных импульсов [37].

Масштабное преобразование геометрии одно-модового ФКС позволяет изменять эффективную площадь моды в широких пределах (практически на два порядка), что дает возможность управления величиной нелинейных эффектов в ФКС [31, 38]. ФКС с большой площадью моды позволяют достигать высоких энергий лазерных импульсов в волоконных лазерах и усилителях [15].

Оптические солитоны – важный класс объектов нелинейной оптики, используемых для передачи оптических сигналов на большие расстояния и позволяющих наблюдать новые нелинейно-оптические

явления [39]. ФКС с полым сердечником позволяют сформировать устойчивые изолированные моды (солитоны) мощных сверхкоротких световых импульсов и осуществлять эффективные нелинейно-оптические преобразования таких полей [40]. Полые ФКС открывают широкие возможности для передачи нано- и пикосекундных импульсов высокой мощности для биомедицинских и технологических приложений [41].

Для целей передачи информации наиболее важной задачей является создание световодов, в которых удастся снизить затухание до величины меньше фундаментального предела затухания обычных кварцевых световодов, порядка 0,2 дБ/км, определяемого рэлеевским рассеянием в материале волокна. Сердечники ФКС обычно изготавливаются из кварца, поэтому уменьшение затухания в них ниже фундаментального предела невозможно так же, как в обычных волокнах. Для ФКС, в основе действия которых лежит эффект фотонных запрещенных зон, в случае падения света с длиной волны, лежащей в запрещенной зоне полубесконечной периодической структуры оболочки, должно происходить полное отражение падающего света, но так как в реальных световодах количество периодических слоев ограничено, происходит частичное вытекание света из волокна. В работе [42] показано, что данные потери можно сократить до уровня ниже 0,01 дБ/км. Оптимизации слоев оболочки брэгговских волокон с точки зрения минимизации потерь посвящена работа [43]. Установлено [44], что значительный вклад в потери ФКС с полым сердечником вносит механизм рассеяния, основанный на перекачке энергии направляемых мод в поверхностные моды оболочки [45], которых нет в обычном кварцевом волокне, поэтому необходимо обеспечить отсутствие самих поверхностных мод [46, 47] или, как минимум, чтобы в спектральной области фотонных запрещенных зон отсутствовал волновой синхронизм между направляемыми и поверхностными модами. Для волокон Брэгга, как показано в работе [48], общие потери можно снизить до уровня от 0,01 до 0,1 дБ/км при использовании в оболочке материала с затуханием 10 дБ/км. Твердотельные световоды, обладающие лучшей устойчивостью к механическим воздействиям по сравнению с полыми световодами, демонстрируют большие потери при распространении света, составляющие порядка 2 дБ/км в случае использования вокруг каждого стержня дополнительного слоя с еще более низким показателем преломления, нежели основной материал оболочки [10].

В данной работе приведен краткий обзор существующих методов расчета мод ФКС, а также проведено сравнение между некоторыми из них. В работе показано, что значения эффективного индекса для фундаментальной моды, полученные с помощью КР-метода и коммерческой программы FIMMWAVE для двух моделей ФКС с заполненным

сердечником совпадают с точностью до 0,2 %. Показано также, что разработанная авторами реализация ССМ-метода в среде Matlab [80] дает более устойчивую и монотонную сходимость, а также существенно меньшую величину ошибки при малом числе локальных мод (до 20 мод), чем коммерческая программа FIMMWA VE.

Методы расчета мод фотонно-кристаллических световодов

Основной задачей исследования ФКС, как и световода любого другого типа, является проблема отыскания его мод – электромагнитных полей, способных в нем распространяться. Исторически первым методом, примененным для расчета мод ФКС, стал метод эффективного индекса [28, 49-51]. Метод эффективного индекса является одним из самых быстрых, суть его состоит в замене сложной модели сечения ФКС с множеством микроотверстий на адекватную модель обычного круглого световода со ступенчатым профилем показателя преломления. При этом метод уступает конкурентам по точности.

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 конечно-разностные методы.

Методы декомпозиции

Основная идея, эксплуатируемая в данной группе методов, – это возможность представления поля моды световода в форме разложения по некоторому базису. В результате чего отыскание мод сводится к задаче на собственные значения и собственные вектора некоторой матрицы.

Разложение по плоским волнам [32] 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 [29, 30] оказывается более пригодным для описания сложной структуры сечения ФКС, нежели метод разложения по плоским волнам, однако данный метод ограничен применением только к ФКС с отверстиями в оболочке, расположенными в узлах правильной гексагональной решетки, так как расстояние между центрами любых двух соседних отверстий должно быть фиксировано, и это значение входит в выражение для базисных функций.

Обобщением метода мультиполя, применяемого обычно для световодов с несколькими сердечниками, на случай ФКС можно считать работу [52]. Ключевым аспектом предлагаемого авторами метода мультиполя является то, что он с выгодой использует факт округлости включений и свойства симметрии, присущие многим ФКС, в связи с регу-

лярностью расположения микроотверстий [53]. Сильная сторона метода также состоит в том, что он позволяет вычислять как действительную, так и мнимую части константы распространения. В отличие от подхода мультиполя для световодов с несколькими сердечниками, продемонстрированного в работе [54], использующего технику поточечной стыковки поля на границах включений, метод [52] обрабатывает граничные условия путем разложения компонент поля по ортонормальному базису. Авторы утверждают, что применение метода может быть расширено также на световоды с произвольной формой включений, в соответствии со стратегией, предложенной в работе [55].

Характерной чертой метода согласованных синусоидальных мод (ССМ-метод) [56] является техника разбиения неоднородного сечения волноводной структуры 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, для чего используется интегральный подход. Метод согласованных синусоидальных мод использует процедуры поиска корней уравнений, и потому проигрывает по скорости методам, основанным исключительно на отыскании собственных чисел матриц.

Интегральные методы

Интегральные методы являются сеточными, то есть в отличие от методов предыдущей группы в данном случае решением задачи отыскания поля моды является сеточная функция, а не заданная аналитически.

Среди этой группы можно выделить метод конечных элементов [57, 58]. Он представляет собой мощный инструмент векторного анализа, способный учитывать все особенности геометрии микроотверстий и расположение их в структуре сечения. Достаточно быстрый и гибкий, он часто используется для моделирования свойств ФКС. Среди недостатков метода конечных элементов можно назвать требовательность к ресурсам памяти, так как для описания структуры сечения ФКС требуется подробная дискретизация и большое количество переменных, а также необходимость вмешательства человека в работу алгоритма для лучшего определения граничных условий (Perfectly matched layer) и сетки дискретизации.

Метод граничных элементов [59], где сечение разбивается на однородные области, а задача на собственные значения получается в результате применения теоремы Грина, отличается меньшей требовательностью к ресурсам памяти. Однако существенным недостатком является возможность возникновения ложных решений.

В методе функции Грина [60] задача отыскания констант распространения мод также сводится к

задаче на собственные числа матрицы, для решения которой разработан специальный быстрый алгоритм. Этот метод работоспособен в случае сложных геометрических форм микроотверстий, хотя и с меньшей скоростью сходимости, чем в случае круглых отверстий.

Конечно-разностные методы

Конечно-разностные методы так же, как и 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. Наличие больших контрастов показателя преломления в структуре сечения ФКС требует использования полностью векторного подхода при расчете мод вместо часто используемого для слабонаправляющих световодов скалярного подхода. Однако, как было продемонстрировано в работе [61], скалярный конечно-разностный метод может использоваться для получения как минимум качественной оценки распределения мод ФКС, в том числе на основе эффекта фотонных запрещенных зон.

Для более точного анализа были предложены векторные конечно-разностные схемы [62]. Дискретизации подвергаются дифференциальные операторы и функции, входящие в уравнение Гельмгольца или волновые уравнения. В работе [63] представлен конечно-разностный пространственно-временной подход (FDTD-метод) расчета мод ФКС с использованием сдвинутых сеток (ячеек Йи). Усовершенствованному конечно-разностному пространственно-временному методу, учитывающему дисперсию материала, посвящена публикация [64].

Результатом применения специальных конечно-разностных схем к нестационарным волновым уравнениям или уравнениям Максвелла является семейство методов распространения пучка [65-67]. Суть методов состоит в моделировании распространения когерентного пучка света вдоль световода, в результате чего получают моды данной структуры как бы апостериорно. С помощью метода удобно исследовать энергетические потери при прохождении излучения по световоду, хотя это может быть и затруднительно в связи с проблемой сходимости метода к устойчивому состоянию, а плохо сходящиеся результаты для многомодового световода будут получаться всякий раз, когда более одной моды достигают устойчивого состояния одновременно.

Модернизация ССМ-метода

Базовая идея ССМ-метода, близкая к идее другого метода - метода поперечного резонанса [68, 69], была впервые сформулирована в работе [70]. Последующее развитие метод получил в работе [71], где его применяли для расчета потерь излучения за счет вытекающих мод в ступенчатых световодах. Затем в

работах [56, 72] был введен описательный термин «согласование синусоидальных мод» и дана точная математическая формулировка. Близость метода поперечного резонанса и другого широко используемого метода – метода линий [73, 74], отмечалась уже неоднократно [75, 76]. Подход бинаправленного распространения собственной моды [77] и метод бинаправленного распространения, основанный на методе линий [78], позволяют вычислять распределение любых (не только модовых) полей в оптических световодах. Оба они могут рассматриваться как частные случаи метода поперечного резонанса. Несмотря на преимущества данного подхода, связанные с возможностями полного векторного анализа и непрерывным характером результирующего поля, ССМ-метод до публикации авторов [79] не применялся для моделирования ФКС. Кроме того, в ССМ-методе процедуры поиска корней (нулей функции) как на начальном этапе отыскания 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 функции на расстоянии меньше шага дискретизации. Пропуск корней в первом случае ведет к неверному решению для пространственной моды, а во втором – и вовсе к ошибочному отрицанию факта существования моды световода с некоторым значением константы распространения. Поэтому в работе [80] ССМ-метод был модифицирован на этапе отыскания констант распространения с помощью итеративного метода Крылова решения нелинейной матричной задачи на собственные значения и вектора. А на этапе поиска локальных мод авторами предложен оригинальный «статистический» алгоритм нахождения нулей непрерывной функции.

Модернизация КР-метода

За основу конечно-разностного метода, рассматриваемого в настоящей работе, был взят подход, предложенный в работе [11], где для расчета мод использовалась техника применения конечно-разностных аппроксимаций к стационарным векторным волновым уравнениям для монохроматического света. КР-метод выигрывает (в несколько раз) по скорости работы алгоритма у ССМ-метода, поскольку задача отыскания константы распространения и отсчетов сеточных решений для поперечных компонент электрической или магнитной составляющих напрямую сводится к линейной матричной задаче на собственные числа и вектора. В работе [11] приводится вывод только для электрической составляющей электромагнитного поля. Компоненты магнитной составляющей могут быть рассчитаны через компоненты электрической составляющей путем численного их дифференцирования, что влечет возникновение дополнительных ошибок. В работе [81] формулируется математическая задача расчета магнитной составляющей светового поля и строится алгоритм ее решения. Полностью расписа-

на структура матрицы линейной задачи на собственные значения и вектора для электрической составляющей, которая не показана в [11]. Совместное решение двух аналогичных, но независимых задач для электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля позволяет произвести контроль правильности работы метода путем сравнения значений констант распространения.

Сравнение реализаций ССМ- и КР-метода с программой FIMMWAVE

Для модели ФКС, сечение которого изображено на рис.2, и длины волны $\lambda = 1,3$ мкм в FIMMWAVE с применением FMM Solver (real) с числом локальных у-мод равным шестидесяти была получена фундаментальная мода с эффективным индексом 1,4477.

Полученные авторами ранее [82] результаты с помощью реализаций модернизированных ССМ- и КР-методов для данной модели сравниваются с результатом работы FIMMWAVE в Таблице 1.

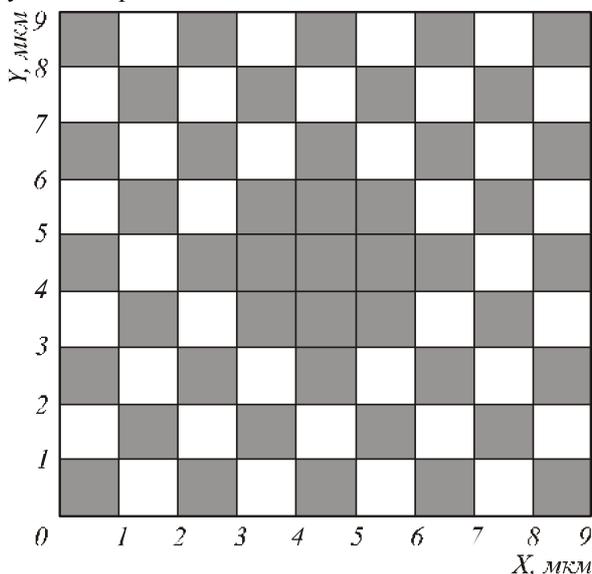


Рис. 2. Модель сечения фотонно-кристаллического световода: темным показаны области со значением показателя преломления $n_1=1,47$, светлым – с $n_2 = 1$

Таблица 1. Абсолютное и относительное отклонения значений эффективного индекса фундаментальной моды ФКС (рис. 2.), рассчитанных разными методами, от результата, полученного FIMMWAVE

Метод	Эффективный индекс, n_{eff}	Абсолютное отклонение, Δ	Относительное отклонение, δ
КР-метод, $n_x \times n_y = 52 \times 52$	1,4480	0,0003	0,02%
ССМ-метод (векторный)	1,4473	0,0004	0,03%
ССМ-метод (скалярный)	1,4491	0,0014	0,10%
FMM Solver	1,4477	0	0

(real)

Как следует из Таблицы 1, результаты трех рассмотренных методов отличаются от результата FMM Solver (real) не более чем на одну десятую процента. На рис.3 показаны распределения интенсивности моды, рассчитанной программой FIMMWAVE (г), скалярной моды, полученной ССМ-методом (а), и основной векторной компоненты магнитного поля, полученной ССМ-методом (б) и КР-методом (в). Из рис. 3 видно, что все четыре картины основной моды очень близки.

Для другой модели ФКС (рис. 4) с круглыми отверстиями и заполненным сердечником, расчет фундаментальной моды которого в работе [83] производился с помощью только КР-метода, также было проведено сравнение с коммерческой программой FIMMWAVE.

При прочих равных параметрах модели и количестве локальных у-мод FMM Solver (real) равно тридцати было получено значение эффективного индекса $n_{eff}^{FIMMWAVE} = 1,4533$. Таким образом, относительное отклонение значения, полученного КР-методом $n_{eff}^{KP} = 1,4509$, составляет 0,17 %.

На рис.4 показаны два аналогичных сечения ФКС, но рядов отверстий в модели на рис.4б на один меньше, чем на рис.4а. Это сделано для того, чтобы показать, что увеличение числа рядов отверстий в оболочке ФКС больше трех не приводит к заметному влиянию на параметры основной моды.

На рис.5 показаны распределения модулей амплитуд поперечных электрических составляющих фундаментальной моды, рассчитанных для ФКС (рис.4) КР-методом (а, б) и программой FIMMWAVE (в, г). Из рис. 5 видно, что оба метода дают почти одинаковые картины фундаментальной моды, и что эта мода почти вся сосредоточена в сердечнике ФКС.

В сопровождающей документации к программному продукту FIMMWAVE рекомендовано использовать минимальное число локальных мод, равное тридцати, что согласуется с исследованиями сходимости метода, проведенными в [79]. Сравним две реализации ССМ-метода: предложенную в работе [80] и коммерческую программу FIMMWAVE – на сходимость относительно числа локальных мод. Изменение относительной ошибки расчета одного из выходных параметров – константы распространения, от числа локальных мод в диапазоне от 10 до 60 для ФКС (рис. 2) показано на рис. 6.

Из сравнения графиков на рис.6 следует, что предложенная в работе [80] реализация в среде Matlab 7.0 дает более устойчивую и монотонную сходимость, а также существенно меньшую величину ошибки при малом числе локальных мод (до 20), чем коммерческая программа FIMMWAVE. Если выбрать число локальных мод при расчете ССМ-методом больше 30, но

меньше 60, то обе реализации будут давать практиче-

ски одинаковые результаты (рис. 6).

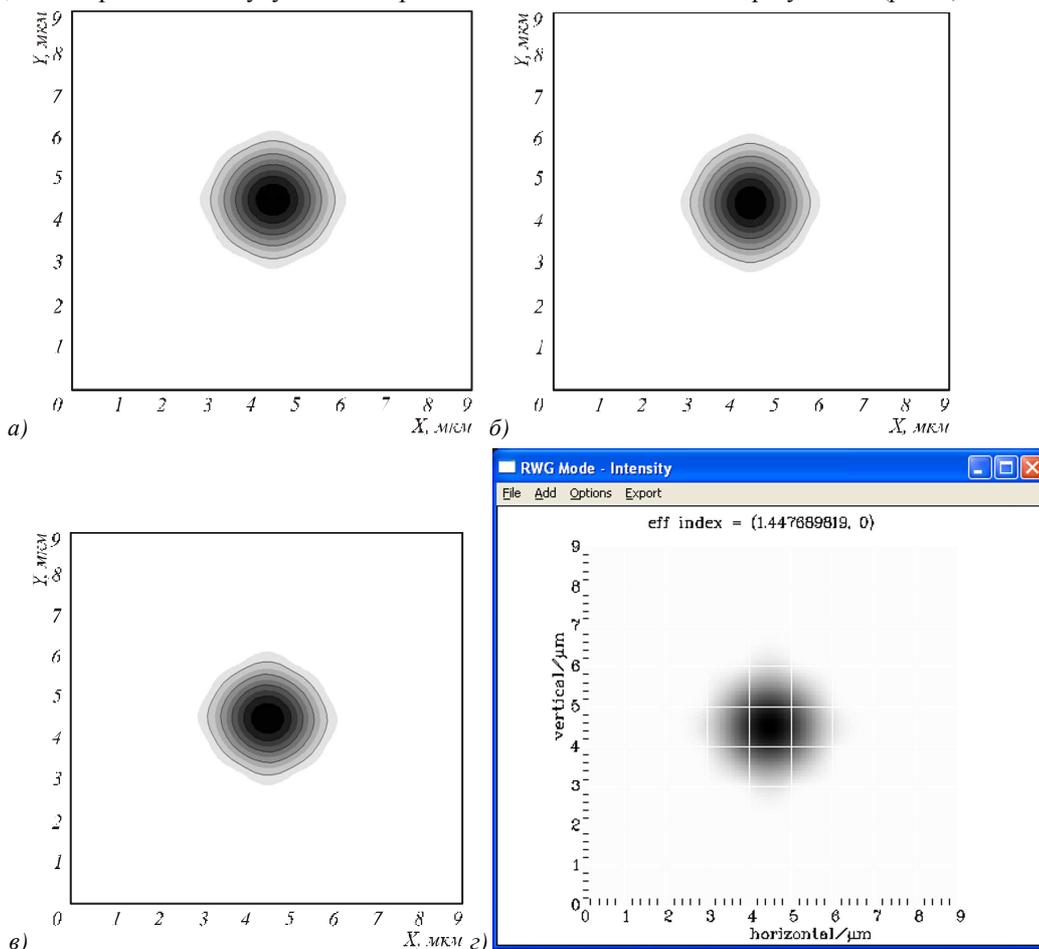


Рис 3. Для модели ФКС (рис. 2) распределения квадрата модуля амплитуды скалярного поля фундаментальной моды, рассчитанное ССМ-методом (а), распределения квадрата модуля амплитуды наибольшей векторной компоненты N_y фундаментальной моды, рассчитанное ССМ-методом (б), распределения квадрата модуля амплитуды наибольшей векторной компоненты N_y фундаментальной моды, рассчитанное КР-методом (в), и распределения интенсивности фундаментальной моды, полученное в программе FIMMWAVE (г)

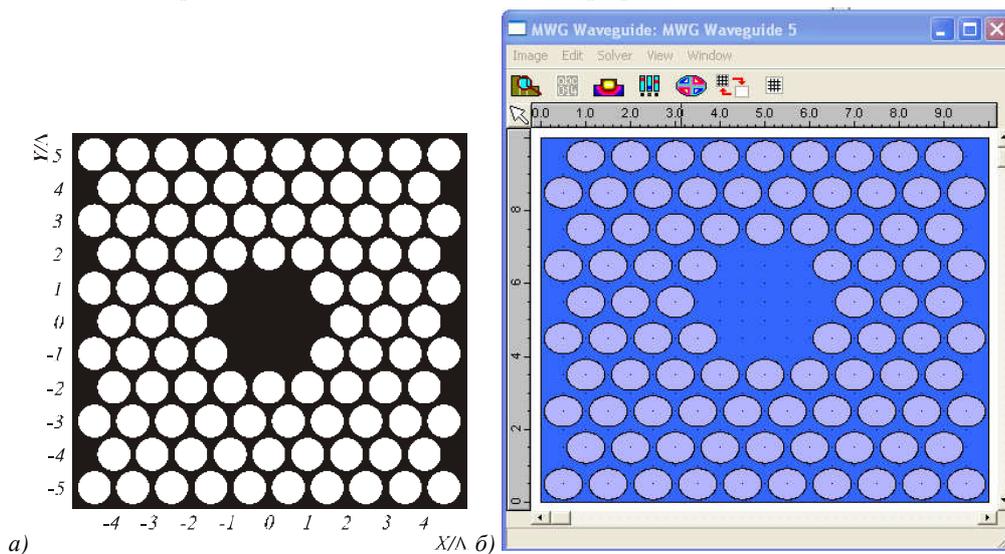


Рис. 4. Модель сечения ФКС (а): темным показаны области со значением показателя преломления $n_1 = 1,46$, светлым – отверстия, заполненные воздухом $n_2 = 1$; окно программы FIMMWAVE с моделью сечения аналогичного световода (б), но количество рядов отверстий по вертикали на один меньше

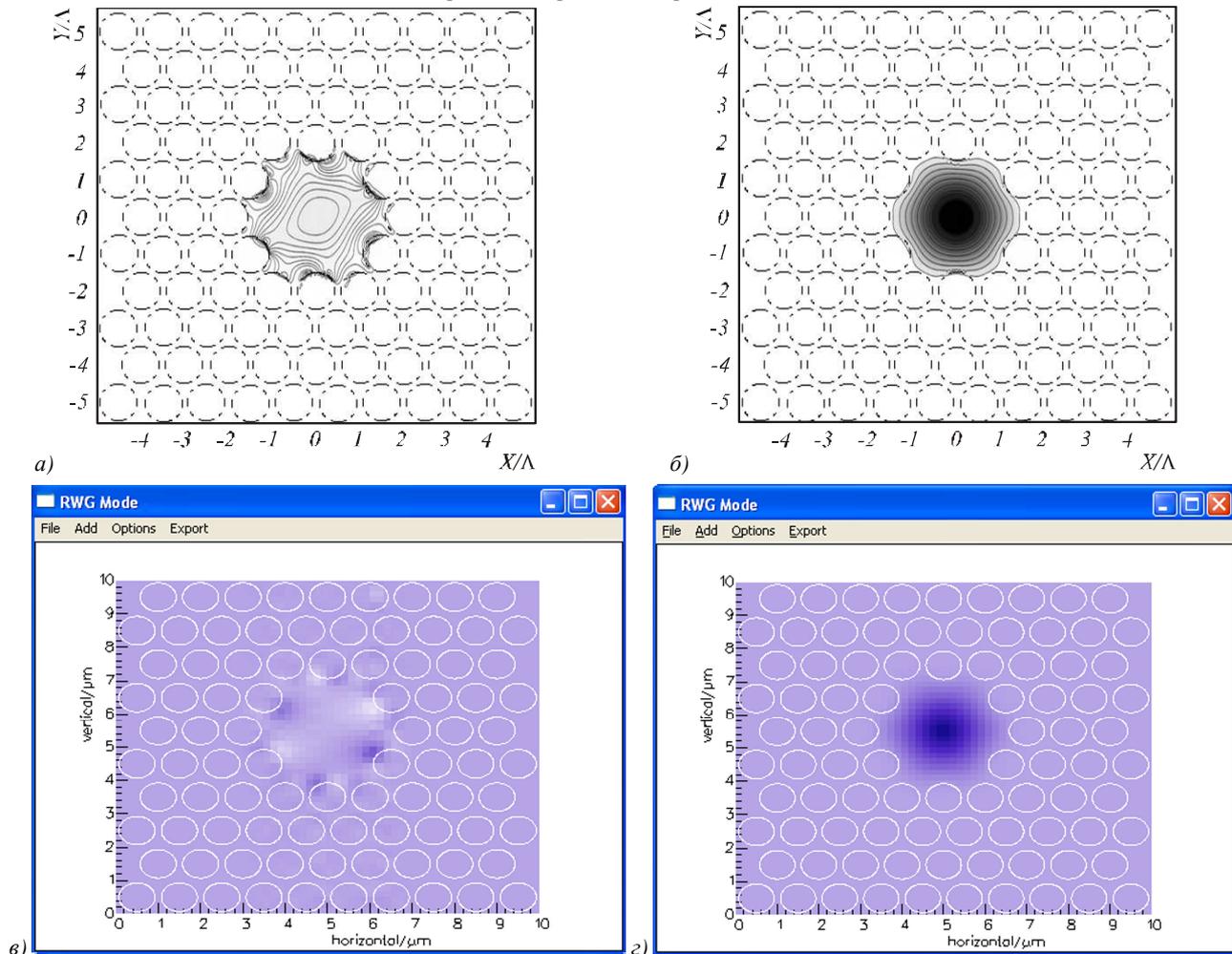


Рис. 5. Для модели ФКС (рис. 4а) распределения абсолютных значений амплитуды поперечных электрических составляющих фундаментальной моды: E_x (а) и E_y (б), рассчитанные КР-методом, и для модели ФКС (рис.4б) – E_x (в) и E_y (г), полученные программой FIMMWAVE

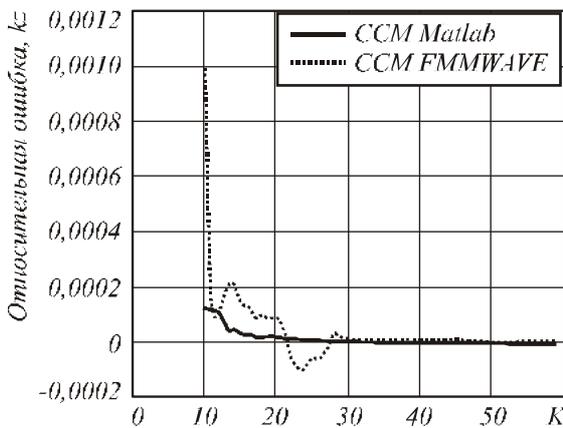


Рис. 6. Зависимость относительной ошибки константы распространения фундаментальной моды ФКС (рис. 2) от числа локальных мод для двух реализаций CCM-метода

Заключение

В работе дан обзор методов расчета мод фотонно-кристаллических световодов и получены следующие результаты:

1. Значения эффективного индекса для фундаментальной моды, полученные с помощью КР-метода и коммерческой программы FIMMWAVE для двух моделей ФКС с заполненным сердечником совпадают с точностью до 0,2% .
2. Разработанная авторами реализация CCM-метода в среде Matlab [80] дает более устойчивую и монотонную сходимость, а также существенно меньшую величину ошибки при малом числе локальных мод, чем коммерческая программа FIMMWAVE.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (грант CRDF PG08-014-1), гранта РФФИ 08-07-99007 и гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-3086.2008.9).

Литература

- Knight, J.C.** All-silica single mode optical fiber with photonic crystal cladding / J.C. Knight, T.A. Birks, P.S.J. Russell, and D.M. Atkin // *Opt. Lett.*, 1996. – Vol. 21(19) – p. 1547-1549.
- Adams, M.J.** An Introduction to Optical Waveguides / M.J. Adams – New York, Wiley, 1981.
- Yeh, P.** Theory of Bragg fiber / P. Yeh, A. Yariv, and E. Marom // *J. Opt. Soc. Am.*, 1978. – Vol. 68 – p. 1196-1201.
- Ibanescu, M.** All-dielectric coaxial waveguide / M. Ibanescu, Y. Fink, S. Fan, E.L. Thomas, and J.D. Joannopoulos // *Science* 2000. – N. 289 – p. 415-419.
- Cojocaru, E.** Dispersion analysis of hollow-core modes in ultralarge-bandwidth all-silica Bragg fibers, with nanosupports / E. Cojocaru // *Appl. Opt.*, 2006. – Vol. 45(9) – p. 2039–2045.
- Foroni, M.** Confinement loss spectral behavior in hollow-core Bragg fiber / M. Foroni [and other] // *Opt. Lett.*, 2007. – Vol. 32(21) – p. 3164–3166.
- Zhelticov, A.M.** Ray-optic analysis of the (bio)sensing ability of ring-cladding hollow waveguides / A.M. Zhelticov // *Appl. Opt.*, 2008. – Vol. 47(3) – p. 474-479.
- Dupuis, A.** Guiding in the visible with “colorful” solid-core Bragg fiber / A. Dupuis [and other] // *Opt. Lett.*, 2007. – Vol. 32(19) – p. 2882-2884.
- Fang, Q.** Dispersion design of all-solid photonic bandgap fiber / Q. Fang [and other] // *J. Opt. Soc. Am. A.*, 2007. – Vol. 24(11) – p. 2899-2905.
- Ren, G.** Low-loss all-solid photonic bandgap fiber / G. Ren [and other] // *Opt. Lett.* 2007 – Vol. 32(9) – p. 1023-1025.
- Yang, R.** Research of the effects of air hole shape on the properties of microstructured optical fibers / R. Yang [and other] // *Opt. Eng.* 2004 – Vol. 43(11) – p. 2701-2706.
- Yue, Y.** Highly birefringent elliptical-hole photonic crystal fiber with squeezed hexagonal lattice / Y. Yue [and other] // *Opt. Lett.* 2007 – Vol. 32(5) – p. 469-471.
- Choi, H.-G.** Dispersion and birefringence of irregularly microstructured fiber with elliptical core / H.-G. Choi [and other] // *Appl. Opt.* 2007 – Vol. 46(35) – p. 8493-8498.
- Mafi, A.** Shaping Modes in Multicore Photonic Crystal Fiber / A. Mafi and J.V. Moloney // *IEEE Photonics Tech. Lett.* 2005 – Vol. 17 – p. 348-350.
- Michaille, L.** Characteristics of a Q-switched multicore photonic crystal fiber laser with a very large mode field area / L. Michaille [and other] // *Opt. Lett.* 2008 – Vol. 33(1) – p. 71-73.
- Szpulak, M.** Experimental and theoretical investigations of birefringent holey fibers with a triple defect / M. Szpulak [and other] // *Appl. Opt.* 2005 – Vol. 44 – p. 2652-2658.
- Eguchi, M.** Geometrical birefringence in square-lattice holey fibers having a core consisting of multiple defect / M. Eguchi, Y. Tsuji // *J. Opt. Soc. Am. A.* 2007 – Vol. 24(4).
- Zhang, Ch.** Design of tunable bandgap guidance in high-index filled microstructure fibers / Ch. Zhang [and other] // *J. Opt. Soc. Am. A.* 2006 – Vol. 23(4) – p. 782-786.
- Sun, J.** Refractive index measurement using photonic crystal fiber / J. Sun [and other] // *Opt. Eng.* 2007 – Vol. 46(1).
- Sun, J.** Hybrid guiding in liquid-crystal photonic crystal fibers / J. Sun, Ch.Ch. Chan // *J. Opt. Soc. Am. A.* 2007 – Vol. 24(10) – p. 2640-2646.
- Larsen, T.** Optical devices based on liquid crystal photonic bandgap fibres / T. Larsen [and other] // *Opt. Express* 2003 – Vol. 11(20) – p. 2589-2596.
- Haakestad, M. W.** Electrically tunable photonic bandgap guidance in a liquid-crystal-filled photonic crystal fiber / M.W. Haakestad [and other] // *IEEE Photon. Technol. Lett.* 2005 – Vol. 17(4) – p. 819-821.
- Domachuk, P.** Transverse probed microfluidic switchable photonic crystal fiber devices / P. Domachuk, H.C. Nguyen, B.J. Eggleton // *Photon. Technol. Lett.*, 2004. – Vol. 16(8) – p. 1900-1902.
- Yablonovitch, E.** **Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics** / E. Yablonovitch // *Phys. Rev. Lett.*, 1987. – Vol. 58 – p. 2059-2062.
- Wynne, R.M.** A Fabrication Process for Microstructured Optical Fibers / R.M. Wynne // *J. Lightwave Tech.*, 2006. – Vol. 24(11).
- Lui, J.** Impact of imperfect geometry structure on nonlinear and chromatic dispersion properties of microstructure fiber / J. Lui [and other] // *Appl. Opt.*, 2007. – Vol. 46(31) – p. 7771-7775.
- Zghal, M.** Impact of small geometrical imperfections on chromatic dispersion and birefringence in photonic crystal fiber / M. Zghal, R. Cherif // *Opt. Eng.*, 2007. – Vol. 46(12).
- Birks, T.A.** Endlessly single-mode photonic crystal fiber / T.A. Birks, J.C. Knight, P.St.J. Russell // *Opt. Lett.*, 1997. – Vol. 22(13) – p. 961-963.
- Mogilevtsev, D.** Group-velocity dispersion in photonic crystal fibers / D. Mogilevtsev, T.A. Birks, P.St.J. Russell // *Opt. Lett.*, 1998. – Vol. 23 – p. 1662-1664.
- Broderick, AN.G.R.** Modeling Large Air Fraction Holey Optical Fiber / AN.G.R. Broderick [and other] // *J. Opt. Tech.*, 2000. – Vol. 18 – p. 50-56.
- Broderick, AN.G.R.** Nonlinearity in holey optical fibers: measurement and future opportunities / AN.G.R. Broderick [and other] // *Opt. Lett.*, 1999. – Vol. 24 – p. 1395.
- Ferrando, A.** Full-vector analysis of a realistic photonic crystal fiber / A. Ferrando [and other] // *Opt. Lett.*, 1999. – Vol. 24, p. 276-278.
- Ferrando, A.** Nearly zero ultraflattened dispersion in photonic crystal fibers / A. Ferrando [and other] // *Opt. Lett.*, 2000. – Vol. 25 – p. 790-792.
- Moester, M.** Analytical relation between effective mode field area and waveguide dispersion in microstructure fibers / M. Moester [and other] // *Opt. Lett.*, 2006. – Vol. 31(22) – p. 3249-3251.
- Zhang, L.** Photosensitivity-enabled dispersion controllability for quasi-phase-matching in photonic crystal fibers / L. Zhang [and other] // *Opt. Lett.*, 2007. – Vol. 32(24) – p. 3498-3500.
- Riishede, J.** Inverse design of dispersion compensating optical fiber using topology optimization / J. Riishede and O. Sigmund // *J. Opt. Soc. Am. B.*, 2008. – Vol. 25(1) – p. 88-97.
- Желтиков, А.М.** Да будет белый свет: генерация суперконтинуума сверх короткими лазерными импульсами / А.М. Желтиков // *Успехи физических наук*, 2006. – Т. 176, №6. – С. 623-649.
- Knight J.C.** Large mode area photonic crystal fiber / J.C. Knight, T.A. Birks, R.F. Gregan, P. St. J. Russell, de Sandro J.-P. // *Electron. Lett.*, 1998. – Vol. 13. – p. 1347.
- Hasegawa, A.** Optical solitons in fibers / A. Hasegawa – Heidelberg, Springer, 1990.
- Федотов, А.Б.** Полые фотонно-кристаллические волокна для передачи мегаваттных фемтосекундных импульсов в солитонном режиме / А.Б. Федотов [и др.] // *Российские нанотехнологии*, 2007. – Т. 2, № 3-4. – С. 134-139.
- Желтиков, А.М.** Микроструктурированные световоды для нового поколения волоконно-оптических источников и преобразователей световых импульсов /

- А.М.Желтиков // Успехи физических наук, 2007. – Т. 177, №7. – С. 738-762.
42. **Xu, Y.** Loss analysis of air-core photonic crystal fibers / Y. Xu, and A. Yariv // *Opt. Lett.*, 2003. – Vol. 28. – PP. 1885-1887.
 43. **Богданович, Д.В.** Минимизация потерь и расчет оптических свойств брэгговских волоконных световодов с поллой сердцевинной / Д.В. Богданович // *Письма в ЖЭТФ*, 2007. – Т. 86, № 4. – С. 265-269.
 44. **Павлова, Е.Г.** Механизм потерь в фотонно-кристаллических волокнах / Е.Г. Павлова // *Lightwave Russian Edition*, 2005. – № 3. – С. 54-56.
 45. **Saito, K.** Air-core photonic band-gap fibers: the impact of surface modes / K. Saito, N.A. Mortensen, and M. Koshiba // *Opt. Express*, 2004. – Vol. 12(3). – PP. 394-400.
 46. **Kim, H.K.** Designing air-core photonic-bandgap fibers free of surface modes / H.K. Kim [and other] // *IEEE J. of Quantum Electronics*, 2004. – Vol. 40(5). – PP. 551-556.
 47. **Digonnet, M.J.F.** Simple geometric criterion to predict the existence of surface modes in air-core photonic-bandgap fiber / M.J.F. Digonnet [and other] // *Opt. Express*, 2004. – Vol. 12(9). – PP. 1864-1872.
 48. **Sakai, J.** Optical loss estimation in Bragg fiber / J. Sakai // *J. Opt. Soc. Am. A*, 2007. – Vol. 24(4).
 49. **Adibi, A.** An Approximate Effective Index Model for Efficient Analysis and Control of Beam Propagation Effects in Photonic Crystals / A. Adibi [and other] // *J. Lightwave Technology*, 2005. – Vol. 23(3). – PP. 1522-1532.
 50. **Park, K. N.** Improved effective-index method for analysis of photonic crystal fibers / K.N. Park and K.S. Lee // *Opt. Lett.*, 2005. – Vol. 30(9). – PP. 958-960.
 51. **Li, Y.** Improved fully vectorial effective index method for photonic crystal fibers: evaluation and enhancement / Y. Li [and other] // *Appl. Opt.*, 2008. – Vol. 47(3). – PP. 399-406.
 52. **White, T.P.** Multipole method for microstructured optical fibers / T.P. White [and other] // *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002. – Vol. 19(10). – PP. 2322-2330.
 53. **Steel, M.J.** Symmetry and degeneracy in microstructured optical fibers / M.J. Steel [and other] // *Opt. Lett.*, 2001. – Vol. 26. – PP. 488-490.
 54. **Yamashita, E.** Modal analysis method for optical fibers with symmetrically distributed multiple cores / E. Yamashita, S. Ozeki and K. Atsuki // *J. Lightwave Technol.*, 1985. – Vol. 3. – PP. 341-346.
 55. **Tayed, G.** Scattering by a random set of parallel cylinders / G. Tayed [and other] // *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994. – Vol. 11. – PP. 2526-2538.
 56. **Sudbo, A.S.** Film mode matching: A versatile method for mode field calculations in dielectric waveguides / A.S. Sudbo // *Pure Appl. Opt. (J. Europ. Opt. Soc. A)*, 1993. – Vol. 2. – PP. 211-233.
 57. **Cucinotta, A.** Holey fiber analysis through the finite element method / A. Cucinotta [and other] // *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002. – Vol. 14. – PP. 1530-1532.
 58. **Brechet, F.** Complete analysis of characteristics of propagation into photonic crystal fibers by the finite element method / F. Brechet [and other] // *Opt. Fiber Technol.*, 2000. – Vol. 6(2). – PP. 181-191.
 59. **Guan, N.** Boundary Element Method for Analysis of Holey Optical Fibers / N. Guan [and other] // *J. Lightwave Technol.*, 2003. – Vol. 21(8).
 60. **Cheng, H.** Fast, accurate integral equation methods for the analysis of photonic crystal fibers / H. Cheng [and other] // *Opt. Express*, 2004. – Vol. 12(16) – PP. 3791-3805.
 61. **Riishede, J.** A "Poor Man's Approach" to Modeling Micro-Structured Optical Fibers / J. Riishede, N.S. Mortensen and J. Legsgaard // *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2003. – Vol. 5. – PP. 534-538.
 62. **Hardley, G.R.** Full-vector waveguide modeling using an iterative finite-difference method with transparent boundary conditions / G.R. Hardley and R.E. Smith // *J. Lightwave Technol.*, 1994. – Vol. 13. – PP. 465-469.
 63. **Zhu, Z.** Full-vectorial finite-difference analysis of microstructured optical fibers / Z. Zhu and T.G. Brown // *Opt. Express*, 2002. – Vol. 10(17). – PP. 853-864.
 64. **Jiang, W.** An Extended FDTD Method With Inclusion of Material Dispersion for the Full-Vectorial Analysis of Photonic Crystal Fibers / W. Jiang [and other] // *J. Lightwave Technol.*, 2006. – Vol. 24(11). – PP. 4417-4423.
 65. **Xu, C.L.** Full-vectorial mode calculations by finite difference method / C.L. Xu [and other] // *Inst Elec. Eng., Proc.-J.*, 1994. – Vol. 141. – PP. 281-286.
 66. **Huang, W.P.** The finite-difference vector beam propagation method. Analysis and Assessment / W.P. Huang [and other] // *J. Lightwave Technol.*, 1992. – Vol. 10. – PP. 295-305.
 67. **Xu, C.L.** Efficient and accurate vector mode calculations by beam propagation method / C.L. Xu // *J. Lightwave Technol.*, 1993. – Vol. 11(9). – PP. 1209-1215.
 68. **Itoh, T.** Numerical techniques for microwave and millimeter-wave passive structures / T. Itoh – New York, Wiley, 1988.
 69. **Sorrentino, R.** Transverse resonance technique / R. Sorrentino // Ch. 11 in Itoh's book [68].
 70. **Schlosser, W.** Partially filled waveguides and surface waveguides of rectangular cross section / W. Schlosser and H.G. Unger – New York, Advances in Microwaves - Academic, 1966.
 71. **Peng, S.T.** Guidance and leakage properties of a class of open dielectric waveguides: Part I – Mathematical formulations / S.T. Peng and A.A. Oliner // *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.*, 1981. – Vol. MTT-29. – PP. 843-855.
 72. **Sudbo, A.S.** Improved formulation of the film mode matching method for mode field calculations in dielectric waveguides / A.S. Sudbo // *Pure Appl. Opt. (J. Europ. Opt. Soc. A)*, 1994. – Vol. 3. – PP. 381-388.
 73. **Pregla, R.** The method of lines / R. Pregla and W. Pascher // Ch. 6 in Itho's book [68].
 74. **Rogge, U.** Method of lines for the analysis of dielectric waveguides / U. Rogge and R. Pregla // *J. Lightwave Technol.*, 1993. – Vol. 11. – PP. 2015-2020.
 75. **Sudbo, A.S.** Problems in vector mode calculations for dielectric waveguides / A.S. Sudbo // *Linear and Nonlinear Integrated Optics, SPIE Europto Series Proceedings*, 1994. – Vol. 2212. – PP. 26-35.
 76. **Dreher, A.** New Aspects of Method of lines / A. Dreher and T. Rother // *IEEE Microw. Guided Wave Lett.*, 1996. – Vol. 5. – PP. 451-453.
 77. **Szefka, G.** Bidirectional eigenmode propagation for large refractive index steps / G. Szefka and H.P. Nolting // *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993. – Vol. 5. – PP. 554-557.
 78. **Gerdes, J.J.** Bidirectional eigenmode propagation analysis of optical waveguides based on the method of lines / J.J. Gerdes // *Electron. Lett.*, 1994. – Vol. 30. – PP. 550-551.
 79. **Kotlyar, V.V.** Calculating the Modes in Microstructured Optical Fibers / V.V. Kotlyar, Y.O. Shuyupova // *Optical Memory & Neural Networks (Information Optics)*, 2004. – Vol. 13. – PP. 27-36.
 80. **Котляр, В.В.** Нахождение констант распространения методом Крылова при расчете мод фотонных волноводов / В.В. Котляр, Я.О. Шуюпова // *Компьютерная оптика, ИСОИ РАН*, 2007. – Т. 31. – С. 27-30.
 81. **Котляр, В.В.** Сравнение аналитического и полученного конечно-разностным методом решений для круглого волокна / В.В. Котляр, Я.О. Шуюпова // *Компьютерная оптика, ИСОИ РАН*, 2005. – Т. 28. – С. 41-44.
 82. **Шуюпова, Я.О.** Сравнение двух методов расчета пространственных мод волноводов на фотонных кристаллах / Я.О. Шуюпова // *Сборник трудов. Всероссийский семинар по моделированию, дифракционной оптике и обработке изображений*, 3-7 июля 2006. – С. 9-11.

83. **Котляр, В.В.** Расчет мод фотонно-кристаллического световода разностным методом / В.В. Котляр,

Я.О. Шуюпова // Оптический журнал, 2007. – Т. 74, № 9. – С. 600-608.

В редакцию поступила 29.01.2009г.

CALCULATING THE MODES IN PHOTONIC CRYSTAL FIBER USING FIMMWAVE SOFTWARE

Y. O. Shuyupova¹ (researcher, e-mail volosiha@bk.ru),

V. V. Kotlyar² (professor, e-mail: kotlyar@smr.ru)

¹Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences,

²Samara State Aerospace University

Abstract

Results received for effective mode index using new finite-difference method and commercial software product FIMMWAVE for fundamental mode of photonic crystal fiber with solid core are shown to be coincident up to 0.2%. Implementation of new film mode matching method in Matlab gives faster and more monotonic convergence with less deviation at small number of 1D modes than commercial software product FIMMWAVE.

Key words: photonic crystal fiber, fiber modes, numerical methods of calculating fiber modes.

Citation: Shuyupova YO, Kotlyar VV. Calculating the Modes in Photonic Crystal fiber using fimmwave software. *Computer Optics* 2009; 33(1): 27-36.

Acknowledgements: The work was supported by the Russian-American program "Basic Research and Higher Education" (grant CRDF PG08-014-1), RFBR grant 08-07-99007 and grant of the President of the Russian Federation for support of leading scientific schools (NSH-3086.2008.9).

References

- [1] Knight JC, Birks TA, Russel PSJ, and Atkin DM. All-silica single mode optical fiber with photonic crystal cladding. *Opt Lett*, 1996; 21(19): 1547-49.
- [2] Adams MJ. *An Introduction to Optical Waveguides*. New York: John Wiley & Sons, Inc; 1981.
- [3] Yeh P, Yariv A, and Marom E. Theory of Bragg fiber. *J Opt Soc Am* 1978; 68(9): 1196-201.
- [4] Ibanescu M, Fink Y, Fan S, Thomas EL, and Joannopoulos JD. All-dielectric coaxial waveguide. *Science*, 2000; 289: 415-9.
- [5] Cojocaru E. Dispersion analysis of hollow-core modes in ultralarge-bandwidth all-silica Bragg fibers, with nanosupports. *Appl Opt*, 2006; 45(9): 2039-45.
- [6] Foroni M, Passaro D, Poli F, Cucinotta A, Selleri S, Laegsgaard J, and Bjarklev A. Confinement loss spectral behavior in hollow-core Bragg fiber. *Opt Lett*, 2007; 32(21): 3164-6.
- [7] Zhelticov AM. Ray-optic analysis of the (bio)sensing ability of ring-cladding hollow waveguides. *Appl Opt*, 2008; 47(3): 474-9.
- [8] Dupuis A, Guo N, Gauvreau B, Hassani A, Pone E, Boismenu F, and Skorobogatiy M. Guiding in the visible with "colorful" solidcore Bragg fiber. *Opt Lett*, 2007; 32(19): 2882-4.
- [9] Fang Q, Wang Z, Jin L, Liu J, Yue Ya, Liu Ya, Kai G, Yuan S, and Dong X. Dispersion design of all-solid photonic bandgap fiber. *J Opt Soc Am A*, 2007; 24(11): 2899-905.
- [10] Ren G, Shum P, Zhang L, Yu X, Tong W, and Luo J. Low-loss all-solid photonic bandgap fiber. *Opt Lett*, 2007; 32(9): 1023-5.
- [11] Yang R, Xue W, Huang T, Zhou G. Research of the effects of air hole shape on the properties of microstructured optical fibers. *Opt Eng*, 2004; 43(11): 2701-6.
- [12] Yue Y, Kai G, Wang Z, Sun T, Jin L., Lu Yu, Zhang C, Liu J, Li Ya, Liu Ya, Yuan S, and Dong X. Highly birefringent elliptical-hole photonic crystal fiber with squeezed hexagonal lattice. *Opt Lett*, 2007; 32(5): 469-71.
- [13] Choi H-G, Kee C-S, Hong K-H, Sung JH, Kim S, Ko D-K, Kim J-Eu, and Park HYO. Dispersion and birefringence of irregularly microstructured fiber with elliptical core. *Appl Opt*, 2007; 46(35): 8493-8.
- [14] Mafi A and Moloney JV. Shaping Modes in Multicore Photonic Crystal Fiber. *IEEE Photonics Tech Lett*, 2005; 17(2): 348-50.
- [15] Michaille L, Taylor DM, Bennett CR, Shepherd T.J, and Ward BG. Characteristics of a Q-switched multicore photonic crystal fiber laser with a very large mode field area. *Opt Lett*, 2008; 33(1): 71-3.
- [16] Szpulkak M, Statkiewicz G, Olszewski J, Martynkien T, Urbaczyk W, Wojcik J, Makara M, Klomek J, Nasilowski T, Berghmans F, and Thienpont H. Experimental and theoretical investigations of birefringent holey fibers with a triple defect. *Appl Opt*, 2005; 44(13): 2652-8.
- [17] Eguchi M, Tsuji Y. Geometrical birefringence in square-lattice holey fibers having a core consisting of multiple defect. *J Opt Soc Am A*, 2007; 24(4): 750-5.
- [18] Zhang C, Kai G, Wang Z, Sun T, Wang C, Liu Ya, Liu J, Zhang W, Yuan S, and Dong X. Design of tunable bandgap guidance in high-index filled microstructure fibers. *J Opt Soc Am A*, 2006; 23(4): 782-6.
- [19] Sun J, Chan CC, Dong XY. Refractive index measurement using photonic crystal fiber. *Opt Eng*, 2007; 46(1): 014402.
- [20] Sun J, Chan CC. Hybrid guiding in liquid-crystal photonic crystal fibers. *J Opt Soc Am A*, 2007; 24(10): 2640-6.
- [21] Larsen TT, Bjarklev A, Hermann DS, Broeng J. Optical devices based on liquid crystal photonic bandgap fibres. *Opt Express*, 2003; 11(20), 2589-96.
- [22] Haakestad MW, Alkeskjold TT, Nielsen MD, Scolari L, Riishede J, Engan HE, Bjarklev A. Electrically tunable photonic bandgap guidance in a liquid-crystal-filled photonic crystal fiber. *IEEE Photon Technol Lett*, 2005; 17(4): 819-21.
- [23] Domachuk P, Nguyen HC, Eggleton BJ. Transverse probed microfluidic switchable photonic crystal fiber devices. *Photon Technol Lett*, 2004; 16(8): 1900-2.
- [24] Yablonovitch E. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics. *Phys Rev Lett*, 1987; 58: 2059-62.
- [25] Wynne RM. A Fabrication Process for Microstructured Optical Fibers. *J Lightwave Tech*, 2006; 24(11): 4304-13.

-
- [26] Lui J, Xue L, Wang Y, Kai G, and Dong X. Impacts of imperfect geometry structure on the nonlinear and chromatic dispersion properties of microstructure fiber. *Appl Opt*, 2007; 46(31): 7771-5.
- [27] Zghal M., Cherif R. Impact of small geometrical imperfections on chromatic dispersion and birefringence in photonic crystal fiber. *Opt Eng*, 2007; 46(12): 128002.
- [28] Birks TA, Knight JC, Russell PSJ. Endlessly single-mode photonic crystal fiber. *Opt Lett*, 1997; 22(13): 961-3.
- [29] Mogilevtsev D, Birks TA, Russell PSJ. Group-velocity dispersion in photonic crystal fibers. *Opt Lett*, 1998; 23(21): 1662-4.
- [30] Monro T.M, Richardson DJ, Broderick NGR, and Bennett PJ. Modeling Large Air Fraction Holey Optical Fiber. *J Opt Tech*, 2000; 18(1): 50-6.
- [31] Broderick NGR, Monro TM, Bennett PJ, and Richardson DJ. Nonlinearity in holey optical fibers: measurement and future opportunities. *Opt Lett*, 1999; 24(20): 1395-7.
- [32] Ferrando A, Silvestre E, Miret JJ, Andres P, and Andres MV. Full-vector analysis of a realistic photonic crystal fiber. *Opt Lett*, 1999; 24(5): 276-8.
- [33] Ferrando A, Silvestre E, Miret JJ, and Andres P. Nearly zero ultraflattened dispersion in photonic crystal fibers. *Opt Lett*; 2000, 25(11): 790-2.
- [34] Moester M, Steinmeyer G, Illiew R, Lederer, and Petermann K, Analytical relation between effective mode field area and waveguide dispersion in microstructure fibers. *Opt Lett*, 2006; 31(22): 3249-51.
- [35] Zhang L, Luo T, Yue Ya, Yu C, and Willner E.A. Photosensitivity-enabled dispersion controllability for quasi-phase-matching in photonic crystal fibers. *Opt Lett*, 2007; 32(24): 3498-500.
- [36] Riishede J. and Sigmund O. Inverse design of dispersion compensating optical fiber using topology optimization. *J Opt Soc Am B*, 2008; 25(1): 88-97.
- [37] Zhelticov AM. Let there be white light: supercontinuum generation by ultrashort laser pulses. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 2006; 176(6): 623-49.
- [38] Knight JC, Birks TA, Gregan RF, Russell PSJ, de Sandro J-P. Large mode area photonic crystal fiber. *Electron Lett*, 1998; 34(13): 1347-8.
- [39] Hasegawa A. *Optical solitons in fibers*. Berlin.; Springer Berlin Heidelberg; 1990.
- [40] Fedotov AB, Sidorov-Birukov DA, Ivanov AA, Alfimov MV, Zhelticov AM. Hollow-core Photonic-crystal Fibres for a Soliton Transmission of Megawatt Femtosecond Pulses. *Nanotechnologies of Russia*, 2007; 2(3-4): 134-9.
- [41] Zhelticov AM. Microstructure optical fibres for a new generation of fibre-optic sources and converters of light pulses *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 2007; 177(7): 738-62.
- [42] Xu Y. and Yariv A. Loss analysis of air-core photonic crystal fibers. *Opt Lett*, 2003; 28(20): 1885-7.
- [43] Bogdanovich DV. Minimization of losses and calculation of the optical properties of Bragg fiber waveguides with a hollow core. *JETP Letters*, 2007; 86(4): 265-9.
- [44] Pavlova EG. The mechanism of losses in photonic crystal fibers. *Lightwave Russian Edition*, 2005; 3: 54-6.
- [45] Saito K, Mortensen NA, and Koshiha M. Air-core photonic band-gap fibers: the impact of surface modes. *Opt Express*, 2004; 12(3): 394-400.
- [46] Kim HK, Shin J, Fan S, Dignonnet MJF, Kino GS. Designing air-core photonic-bandgap fibers free of surface modes. *IEEE J. of Quantum Electronics*, 2004; 40(5): 551-6.
- [47] Dignonnet MJF, Kim HK, Shin J, Fan S, and Kino GS. Simple geometric criterion to predict the existence of surface modes in air-core photonicbandgap fiber. *Opt. Express*, 2004; 12(9): 1864-72.
- [48] Sakai J. Optical loss estimation in a Bragg fiber. *J Opt Soc Am A*, 2007; 24(4): 763-72.
- [49] Momeni B, and Adibi A. An Approximate Effective Index Model for Efficient Analysis and Control of Beam Propagation Effects in Photonic Crystals. *J. Lightwave Technology*, 2005; 23(3): 1522-32.
- [50] Park KN, and Lee KS Improved effective-index method for analysis of photonic crystal fibers. *Opt Lett*, 2005; 30(9): 958-60.
- [51] Li Y, Yao Yu, Hu M, Chai L, and Wang C. Improved fully vectorial effective index method for photonic crystal fibers: evaluation and enhancement. *Appl Opt*, 2008; 47(3): 399-406.
- [52] White TP, Kuhlmeier BT, McPhedran RC, Maystre D, Renversez G, de Sterke CM, and Botten LC. Multipole method for microstructured optical fibers. I Formulation. *J Opt Soc Am A*, 2002; 19(10): 2322-30.
- [53] Steel MJ, White TP, de Sterke CM, McPhedran RC, and Botten LC, Symmetry and degeneracy in microstructured optical fibers. *Opt Lett*, 2001; 26(8): 488-90.
- [54] Yamashita E, Ozeki S, and Atsuki K. Modal analysis method for optical fibers with symmetrically distributed multiple cores. *J Lightwave Technol*, 1985; 3(2): 341-6.
- [55] Felbacq D, Tayeb G, and Maystre D, Scattering by a random set of parallel cylinders. *J Opt Soc Am A*, 1994; 11(9): 2526-38.
- [56] Sudbo, A.S. Film mode matching: A versatile numerical method for vector mode field calculations in dielectric waveguides. *Pure Appl Opt*, 1993; 2: 211-33.
- [57] Cucinotta A, Selleri S, Vincetti L, Zoboli M.. Holey fiber analysis through the finite element method. *IEEE Photon Technol Lett*, 2002; 14(11): 1530-2.
- [58] Brechet F, Marcou J, Pagnoux D, Roy P. Complete analysis of the characteristics of propagation into photonic crystal fibers by the finite element method. *Opt Fiber Technol*, 2000, 6(2): 181-91.
- [59] Guan N, Habu S, Takenaga K, Himeno K, and Wada A. Boundary Element Method for Analysis of Holey Optical Fibers. *J Lightwave Technol*, 2003; 21(8): 1787-92.
- [60] Cheng H, Crtchfield WY, Doery M, and Greengard L. Fast, accurate integral equation methods for the analysis of photonic crystal fibers I: Theory. *Opt Express*, 2004; 12(16): 3791- 805.
- [61] Riishede J, Mortensen NS and Legsgaard J. A "Poor Man's Approach" to Modeling Micro-Structured Optical Fibers. *J Opt A: Pure Appl Opt*, 2003; 5: 534-8.
- [62] Hardley GR and Smith RE. Full-vector waveguide modeling using an iterative finite-difference method with transparent boundary conditions. *J Lightwave Technol*, 1994; 13(3): 465-9.

-
- [63] Zhu Z and Brown TG. Full-vectorial finite-difference analysis of microstructured optical fibers. *Opt Express*, 2002; 10(17): 853-64.
- [64] Jiang W, Shen L, Chen D, and Chi H. An Extended FDTD Method With Inclusion of Material Dispersion for the Full-Vectorial Analysis of Photonic Crystal Fibers. *J Lightwave Technol*, 2006; 24(11): 4417-23.
- [65] Xu CL, Huang WP, Stern MS, Chaudhuri SK Full-vectorial mode calculations by finite difference method. *Inst Elec Eng, Proc-J*, 1994; 141(5): 281-6.
- [66] Huang W, Xu C, Chu S-T, Chaudhuri SK. The finite-difference vector beam propagation method. *Analysis and Assessment. J Lightwave Technol*, 1992;10(3): 295-305.
- [67] Xu CL. Efficient and accurate vector mode calculations by beam propagation method. *J Lightwave Technol*, 1993; 11(9): 1209-15.
- [68] Itoh T. Numerical techniques for microwave and millimeterwave passive structures. New York: John Wiley & Sons, Inc; 1988.
- [69] Sorrentino R, and Mongiardo M. Transverse resonance techniques. M: John Wiley & Sons, Inc; 2005.
- [70] Schlosser W. and Unger HG. Partially filled waveguides and surface waveguides of rectangular cross section. New York: Advances in Microwaves - Academic; 1966.
- [71] Peng ST, and Oliner AA. Guidance and leakage properties of a class of open dielectric waveguides: Part I – Mathematical formulations. *IEEE Trans Microwave Theory Techn*, 1981; MTT-29, 843-55.
- [72] Sudbo AS. Improved formulation of the film mode matching method for mode field calculations in dielectric waveguides. *Pure Appl Opt*, 1994; 3: 381-8.
- [73] Pregla R. The method of lines. Chichester: John Wiley & Sons, Inc; 2008.
- [74] Rogge U, and Pregla R. Method of lines for the analysis of dielectric waveguides. *J Lightwave Techn*, 1993; 11(12): 2015-20.
- [75] Sudbo AS. Problems in vector mode calculations for dielectric waveguides. *Linear and Nonlinear Integrated Optics*, SPIE Europto Series Proceedings, 1994; 2212: 26-35.
- [76] Dreher A, and Rother T. New Aspects of the Method of lines. *IEEE Microw Guided Wave Lett*, 1996; 5(11): 451-3.
- [77] Sztafka G, and Nolting HP. Bidirectional eigenmode propagation for large refractive index steps. *IEEE Photonic Technol Lett*, 1993; 5(5): 554-7.
- [78] Gerdes JJ. Bidirectional eigenmode propagation analysis of optical waveguides based on the method of lines. *Electron Lett*, 1994; 30(7): 550-1.
- [79] Kotlyar VV, Shuyupova YO. Calculating the Modes in Microstructured Optical Fibers. *Optical Memory & Neural Networks*, 2004; 13: 27-36.
- [80] Kotlyar VV, Shuyupova YO. Finding the propagation constants of the photonic waveguide modes by the Krylov's method. *Computer optics*, 2007; 31(1): 27-30.
- [81] Kotlyar VV, Shuyupova YO. Comparison of the analytical and the numerical solutions calculated by finite-difference method for a round fiber. *Computer optics*, 2005; 28: 41-4.
- [82] Shuyupova YO. Comparison of two methods of calculating the spatial modes of waveguides on photonic crystals / Proceedings. Russian seminar on modeling diffractive optics and processing image, 2006; 9-11.
- [83] Kotlyar VV, Shuyupova YO. Calculation of the photonic crystal fiber modes by difference method. *Journal of Optical Technology*, 2007; 74(9): 600-8.