

На правах рукописи

Гаврилов Андрей Вадимович

**АНАЛИЗ ВОЗБУЖДЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ
МОД ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ
СО СТУПЕНЧАТЫМ ПРОФИЛЕМ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ**

Специальность 01.04.05 – Оптика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Самара 2009

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

Научный руководитель: доктор технических наук,
член-корреспондент РАН, профессор
Сойфер Виктор Александрович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
доцент
Ежов Евгений Григорьевич

кандидат физико-математических наук, доцент
Курушина Светлана Евгеньевна

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Самарский государственный
университет» (СамГУ)

Защита состоится «17» апреля 2009 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.215.01 в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королева» по адресу: 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, д. 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королева».

Автореферат разослан 16 марта 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., профессор

В.Г. Шахов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена анализу возбуждения и распространения мод лазерного излучения в оптическом волокне со ступенчатым профилем показателя преломления и дифракционным оптическим элементом (ДОЭ) на торце на основе решения однонаправленных уравнений Гельмгольца с применением численного метода распрощающегося уравка.

Актуальность темы

Оптические волокна имеют широкое распространение в телекоммуникациях и информационно-измерительной технике. Это обуславливается высоким качеством производимого по современным технологиям волокна, которое обладает высокими эксплуатационными характеристиками и устойчивостью к помехам. В зависимости от области применения и предъявляемых требований используются волокна с различными профилями показателя преломления (ступенчатым и градиентным). В данной работе рассматриваются волокна со ступенчатым профилем показателя преломления в силу их широкого распространения и массовости производства.

Важной характеристикой ступенчатого оптического волокна является т.н. число отсечки, определяющее количество различных мод, распространяющихся в волокне. Само число отсечки обуславливается длиной волны излучения и параметрами профиля показателя преломления волокна. В зависимости от конкретной задачи применяются одномодовые, маломодовые или многомодовые волокна. В телекоммуникационной сфере преимущественно используются одно- или маломодовые ступенчатые волокна, а в волоконных датчиках интерференционного типа применяются мало- и многомодовые волокна (S.A. Kingsley, A.D. Kersey, B. Culshaw).

В случаях применения маломодовых и многомодовых ступенчатых волокон важной задачей является возбуждение в волокне мод, отличных от фундаментальной (моды низшего порядка, распространяющейся в волокне для любой длины волны). В частности, решение этой задачи лежит в основе модового уплотнения каналов связи (В.С. Павельев, В.А. Сойфер, S. Berdagué, A.M.J. Koopen) и повышения чувствительности волоконных датчиков (И.Н. Сисакян, В.А. Сойфер, С.В. Карпеев, F.W. Suomo, N. Lagakos). Существует ряд подходов к решению данной задачи, однако простые способы возбуждения мод высоких порядков оказываются неэффективными, поскольку их применение приводит к возбуждению целого набора мод.

Эффективным решением задачи селективного возбуждения мод является использование ДОЭ, позволяющих сформировать заданную моду лазерного излучения (М.А. Голуб, В.А. Сойфер, A.W. Lohmann, L.B. Lesem, J.P. Kirk, W.H. Lee). В настоящее время существуют различные подходы к расчету дифракционного микро-рельефа, включая оптимизационные методы (С.Н. Хонина, В.С. Павельев, J.R. Fienup, D.E. Goldberg). В конкретных случаях может быть достигнута достаточно высокая эффективность возбуждения, однако такой подход обладает недостатком, заключающимся в сложности обеспечения необходимого взаиморасположения волокна и оптического элемента в процессе эксплуатации.

Развитие микро- и нанотехнологий существенно расширяет возможности создания ДОЭ. В частности, метод двухфотонной полимеризации (В. Chichkov, Н.-В. Sun) позволяет формировать диэлектрические структуры с шагом дискретизации порядка нескольких нанометров, при этом оптические свойства могут регулироваться за счет выбора используемого полимера. Эта технология, а также ряд других позволяют рассматривать задачу формирования дифракционных элементов, селективно возбуждающих моды волокна, непосредственно на поверхности волокна в виде рельефа на его торце (В.С. Павельев).

Таким образом, актуальными являются задачи исследования процессов возбуждения мод с помощью дифракционных фазовых рельефов на торце волокна со ступенчатым профилем показателя преломления и распространения в волокне получаемых таким образом пучков. При этом необходимо исследование зависимостей характеристик возбуждения от технологических параметров формирования микро-

рельефа, смещения освещающего пучка и т.д., что позволяет сформулировать требования к точности формирования оптического элемента на торце волокна.

Также актуально исследование распространения сформированных с помощью ДОО на торце волокна лазерных пучков в волокнах с микроизгибами (т.е. волокон, центральная линия которых отлична от прямой). Во-первых, результатом такого исследования станет использование селективного возбуждения мод в волоконных преобразователях микроперемещений (С.Г. Кривошлыков, Г.В. Уваров, С.В. Карпеев). Во-вторых, это позволит определить устойчивость пучков к внешнему воздействию на волокно, что является важным с точки зрения определения эксплуатационных характеристик волоконных систем.

Основным средством исследования устройств является математическое и компьютерное моделирование. Наиболее точные результаты в общем случае дает численное решение уравнений Максвелла (FDTD-подход) (Д.Л. Головашкин, А. Taflov, S.C. Hagnes), однако такие методы требуют значительных вычислительных ресурсов, и их применение для моделирования распространения лазерных пучков в волокнах в трехмерном случае крайне затруднительно.

В волоконной и интегральной оптике традиционно применяется метод распространяющегося пучка (Beam propagation method, BPM), который позволяет за счет введения разумных допущений значительно упростить расчет электромагнитного поля. Метод основан на решении уравнений Гельмгольца изначально с помощью преобразований Фурье (M.D. Feit, J.A. Fleck), в дальнейшем – конечно-разностными методами (W. Huang, H.J.W.M. Hoekstra, Y.Y. Lu). В настоящее время известно большое количество модификаций метода, обладающих различными преимуществами. Существенным недостатком метода является накладываемое требование малости изменения профиля показателя преломления в направлении распространения, что, в частности, делает затруднительным применение метода для моделирования распространения в волокнах с изгибами. Рассмотрение таких задач требует разработки модификации метода, не накладывающей подобного требования.

Цель работы

Анализ возбуждения мод лазерного излучения в оптическом волокне со ступенчатым профилем показателя преломления на основе применения фазового дифракционного оптического элемента, реализованного в виде микро рельефа на торце волокна, и исследование распространения лазерных пучков в волокнах с микроизгибами.

Задачи диссертации

1. Разработка модифицированного метода распространяющегося пучка (BPM), учитывающего взаимодействие компонент электрического и магнитного полей и позволяющего моделировать распространение электромагнитного излучения в средах с изменяющимся профилем показателя преломления.

2. Расчет общей мощности пучка и мощностей отдельных мод в процессе возбуждения и определение эффективности возбуждения мод слабонаправляющего ступенчатого волокна с бинарным фазовым рельефом на торце при освещении когерентным монохроматическим излучением.

3. Оценка влияния погрешностей реализации бинарного рельефа и погрешностей ввода излучения в волокно на характеристики возбуждения мод.

4. Исследование влияния микроизгиба волокна на мощность и модовый состав пучков, формирующихся при распространении пучков с высоким содержанием мод, отличных от фундаментальной моды волокна.

5. Исследование возможности применения фазовых ДОО на торце волокна для селективного возбуждения мод в волоконных преобразователях микроперемещений и разработка новых схем преобразователей.

Научная новизна работы

В диссертации получены следующие новые научные результаты.

1. Получены модифицированные однонаправленные уравнения Гельмгольца, учитывающие изменение профиля показателя преломления в направлении распространения излучения и описывающие взаимодействие компонент электромагнитного поля.

2. Определена энергетическая эффективность возбуждения и модовый состав пучков, возбуждаемых в ступенчатом оптическом волокне, на торец которого нанесен дифракционный оптический микрорельеф.

3. Исследованы зависимости характеристик возбуждения от параметров формирования дифракционного микрорельефа, на основе которых сформулированы требования к точности формирования ДОО на торце оптического волокна.

4. Проведено численное решение задачи распространения лазерных пучков, сформированных с помощью рельефа на торце волокна, в волокнах с микроизгибами.

5. Установлена зависимость чувствительности поперечных мод с пространственной асимметрией к изменению формы центральной линии волокна от ориентации моды относительно искажения центральной линии.

На защиту выносятся:

1) модифицированная модель распространения электромагнитного излучения в диэлектрической среде (на основе уравнения Гельмгольца) для метода распространяющегося пучка (ВРМ), не требующая условия малости изменения показателя преломления и учитывающая взаимодействие компонент электромагнитного поля;

2) результаты численного исследования характеристик возбуждения мод в слабонаправляющем оптическом волокне со ступенчатым профилем показателя преломления с помощью фазового элемента на торце;

3) количественные зависимости характеристик возбуждения мод от параметров, определяемых технологическими погрешностями формирования рельефа на торце и ввода излучения в волокно, полученные в результате численного исследования;

4) схема преобразования микроперемещений в электрический сигнал на основе применения оптического волокна, включающая элемент селективного возбуждения в виде рельефа на торце волокна, а также не требующая анализа поперечно-модового состава излучения на выходе волокна;

5) полезная модель преобразования микроперемещений в электрический сигнал на основе применения оптического волокна, позволяющая определять направление микроперемещения, основанная на эффекте чувствительности мод с пространственной асимметрией к ориентации относительно изгиба волокна.

Апробация работы

Основные результаты работы были изложены в докладах, представленных на Международной конференции ICO Topical Meeting on Optoinformatics / Information Photonics' (Санкт-Петербург, сентябрь 2006); на IV Международной конференции «Оптические технологии в телекоммуникациях» ОТТ 2006 (Самара, ноябрь 2006); на V Летней школе молодых ученых по дифракционной оптике и обработке изображений (Самара, июнь 2007); на VI Летней школе молодых ученых по дифракционной оптике и обработке изображений (Самара, июнь 2008); семинарах кафедры технической кибернетики Самарского государственного аэрокосмического университета и НОЦ «Математические основы дифракционной оптики и обработки изображений» (2006-2008). По материалам исследования опубликовано 8 работ.

Структура и объем работы

Материал диссертации, состоящий из введения, 3 глав, заключения, списка использованных источников (110 наименований) и приложений, изложен на 139 страницах машинописного текста, включая 57 рисунков и 10 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** сформулирована и обоснована цель и актуальность работы, приведены положения, выносимые на защиту.

Глава 1 «Метод распространяющегося пучка, модифицированный для сред с изменяющимся показателем преломления» посвящена методам численного моделирования распространения электромагнитного излучения в среде. Обоснована необходимость моделирования распространения электромагнитного излучения в средах с изменяющимся профилем показателя преломления (раздел 1.1). Рассмотр-

рен метод распространяющегося пучка (Beam propagation method – BPM), широко применяющийся для моделирования в интегральной и волоконной оптике, выявлены его достоинства и недостатки (раздел 1.2). Рассмотрены процессы, возникающие при распространении в средах с изменяющимся профилем показателя преломления, показана неприменимость классического BPM к задачам этого вида (раздел 1.3). Выведены обобщенные однонаправленные уравнения Гельмгольца, снимающие часть ограничений классического BPM (раздел 1.4). Предложены модификации метода распространяющегося пучка на основе выведенных уравнений (раздел 1.5). Рассмотрены принципиальные различия между классическими и обобщенными однонаправленными уравнениями, выявлены факторы, определяющие необходимость применения обобщенных уравнений (раздел 1.6).

Метод распространяющегося пучка основан на т.н. однонаправленных уравнениях Гельмгольца, которые можно получить из системы уравнений Максвелла при следующих предположениях: электромагнитные характеристики среды постоянны во времени, отсутствуют источники поля, среда является магнитно-однородной. В декартовой системе координат уравнения могут быть записаны в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial z} \mathbf{E}_r = -i\sqrt{\mathbf{A}_r} \mathbf{E}_r, \quad \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{H}_r = -i\sqrt{\mathbf{B}_r} \mathbf{H}_r, \quad (1)$$

где $\mathbf{E}_r = E_x, E_y^T$ и $\mathbf{H}_r = H_x, H_y^T$ – вектора комплексных амплитуд поперечных компонентов электрического и магнитного полей, соответственно, матрицы \mathbf{A} и \mathbf{B} являются матричными дифференциальными операторами:

$$\mathbf{A}_r = \begin{pmatrix} \nabla_{x,y}^2 + \frac{\partial \ln n^2}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial^2 \ln n^2}{\partial x^2} + k_0^2 n^2 & \frac{\partial \ln n^2}{\partial y} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial^2 \ln n^2}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial \ln n^2}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial^2 \ln n^2}{\partial y \partial x} & \nabla_{x,y}^2 + \frac{\partial \ln n^2}{\partial y} \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial^2 \ln n^2}{\partial y^2} + k_0^2 n^2 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{B}_r = \begin{pmatrix} \nabla_{x,y}^2 + \frac{1}{n^2} \frac{\partial n^2}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} + k_0^2 n^2 - \frac{\nabla_{y,z}^2 n^2}{n^2} & \frac{1}{n^2} \left(\frac{\partial n^2}{\partial y} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial^2 n^2}{\partial x \partial y} \right) \\ \frac{1}{n^2} \left(\frac{\partial n^2}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial^2 n^2}{\partial y \partial x} \right) & \nabla_{x,y}^2 + \frac{1}{n^2} \frac{\partial n^2}{\partial y} \frac{\partial}{\partial y} + k_0^2 n^2 - \frac{\nabla_{x,z}^2 n^2}{n^2} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

оператор $\nabla_{\alpha,\beta}$ означает дифференцирование по координатам α и β , $n = n(x, y, z)$ – показатель преломления среды, k_0 – волновое число в вакууме. При этом корень из матричной функции определен на основе собственных чисел этой функции.

Для решения уравнений (1) традиционно используются конечно-разностные методы, перед применением которых степенная функция матричного оператора заменяется своим приближением (разложением в ряд Тейлора или разложением Паде). Виды аппроксимации и конечно-разностной схемы определяют характеристики конкретного численного метода из семейства BPM.

Основным достоинством метода является то, что вычисление характеристик поля в каждом следующем слое вдоль оси z (считающейся основным направлением распространения) требует знания значений комплексных амплитуд только на предыдущем слое, что позволяет проводить расчеты для значительных размеров вычислительной области. К основным недостаткам метода относятся: отсутствие учета отражения энергии в случае резкого изменения показателя преломления; рассмотрение скалярного или полувекторного случая за счет введения требования поляризации (ТЕ и ТМ); отсутствие взаимосвязи между компонентами магнитного и электрического полей; требование малости изменения показателя преломления во всей вычислительной области. И если первый недостаток является неизбежной платой за возможность расчета распространения в существенно протяженных средах (впрочем, суще-

ствуют итерационные модификации ВРМ, позволяющие частично решить и эту проблему), то остальные связаны с допущениями, сделанными ради получения удобной для вычислений формы дифференциальных уравнений. Отдельно следует отметить, что требование неизменности профиля показателя преломления в направлении распространения при решении практических задач не всегда удовлетворяется.

На основе анализа используемой в методе математической модели распространения излучения в среде, а также накладываемых в рамках этой модели ограничений, предложена модификация модели и метода, позволяющая проводить численное моделирование для общего случая изменяющегося профиля показателя преломления. В ее основу положены полученные в работе модифицированные однонаправленные уравнения Гельмгольца:

$$\frac{\partial}{\partial z} \mathbf{E}_r = -i \left[\mathbf{A}_r^{1/2} \mathbf{E}_r + \mathbf{A}_r^{-1/2} \mathbf{C} \mathbf{H}_r \right], \quad \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{H}_r = -i \left[\mathbf{B}_r^{1/2} \mathbf{H}_r + \mathbf{B}_r^{-1/2} \mathbf{D} \mathbf{E}_r \right], \quad (4)$$

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \ln n^2}{\partial z} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial^2 \ln n^2}{\partial x \partial z} \\ \frac{\partial \ln n^2}{\partial z} \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial^2 \ln n^2}{\partial y \partial z} \end{pmatrix} \frac{\mu i}{n^2 k_0} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \begin{pmatrix} -\frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} \frac{1}{n^2} \left(\frac{\partial n^2}{\partial z} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial^2 n^2}{\partial x \partial z} \right) \\ \frac{1}{n^2} \left(\frac{\partial n^2}{\partial z} \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial^2 n^2}{\partial y \partial z} \right) \end{pmatrix} \frac{-i}{k_0 \mu} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \begin{pmatrix} -\frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{pmatrix}.$$

Данные уравнение не накладывают ограничений на изменение профиля показателя преломления, а также в явном виде связывают компоненты электрического и магнитного полей. При этом уравнения также не содержат значений продольных компонент полей и их производных, что позволяет применять для их решения стандартные методы, использующиеся для решения уравнений (1). В частности, в случае малых углов распространения излучения можно применять следующие следствия уравнений (4):

$$\frac{\partial}{\partial z} \mathbf{E}_r = -\frac{i}{2} \left[\left(\frac{1}{k_0 n_*} \mathbf{A}_r + k_0 n_* \right) \mathbf{E}_r + \left(-\frac{1}{k_0^3 n_*^3} \mathbf{A}_r + \frac{3}{k_0 n_*} \right) \mathbf{C} \mathbf{H}_r \right], \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \mathbf{H}_r = -\frac{i}{2} \left[\left(\frac{1}{k_0 n_*} \mathbf{B}_r + k_0 n_* \right) \mathbf{H}_r + \left(-\frac{1}{k_0^3 n_*^3} \mathbf{B}_r + \frac{3}{k_0 n_*} \right) \mathbf{D} \mathbf{E}_r \right],$$

полученные разложением степенных функций в ряд Маклорена до второго члена.

Для демонстрации различия между традиционными (1) и модифицированными (4) уравнениями рассмотрено распространение ТЕ-поляризованного Гауссова пучка с длиной волны λ , амплитудой E_0 и радиусом перетяжки σ в среде, показатель преломления которой для $z \geq 0$ изменяется по закону $n(z) = \exp(0,5\alpha \cdot z)$, где α характеризует скорость изменения показателя преломления. При данных условиях для слоя $z=0$ уравнения (6) будут описывать производные четырех поперечных компонент поля, причем производные будут складываться из двух частей: описываемой классическими уравнениями (1) и добавлением, возникающим в уравнениях (4). При этом в выражениях для компонент E_y и H_z , по сравнению с выражениями для классического ВРМ, просто добавляется новая составляющая производной, а выражения для E_x и H_y имеют характер, принципиально отличный от аналогичных выражений в классическом ВРМ. Действительно, для выбранной поляризации

вводимой в среду волны при рассмотрении в рамках классического метода производные этих компонент тождественно равны нулю, что и приводит к рассмотрению задачи в скалярном приближении. Применение такого приближения в рассматриваемом случае (с изменяющимся показателем преломления), вообще говоря, некорректно, поскольку при этом, даже если входящая в среду волна была поляризована, в процессе распространения поляризация будет нарушена.

Добавки в выражениях для производных имеют вид:

$$\alpha \lambda^2 \cdot \frac{E_0}{\sigma^m} \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\sigma^2}\right) \cdot P \alpha, \lambda, \sigma, x, y,$$

где $m = 12$ или $m = 8$, соответственно, в уравнениях для компонент электрического и магнитного полей, а $P \alpha, \lambda, \sigma, x, y$ – полином относительно указанных переменных (причем степени переменных неотрицательны, а максимальная степень σ меньше m). На величину выражений для производных в целом оказывают влияние два фактора.

1. Отношение амплитуды поля к степени радиуса перетяжки. При относительно малом значении амплитуды и существенном значении радиуса перетяжки данное отношение будет довольно мало и, следовательно, значение выражения будет мало. В предельном случае ($\sigma \rightarrow \infty$) выражение обратится в бесконечно малую величину, а сами уравнения примут вид, совпадающий с уравнениями для классического ВРМ. Т.е. чем меньше распространяющийся в среде (с изменяющимся вдоль направления распространения показателем преломления) пучок схож с плоской волной с равномерным распределением интенсивности, тем меньше для моделирования его распространения применим классический ВРМ.

2. Произведение квадрата длины волны и параметра скорости изменения показателя преломления. Предельный случай $\alpha \rightarrow 0$ очевидно приводит к вырождению уравнений к классической форме однонаправленных уравнений Гельмгольца. Однако добавление величины λ^2 к фактору позволяет выявить новые закономерности. В частности, в рассматриваемом случае при фиксированном значении α уменьшение значения λ приводит к уменьшению значимости добавок в правой части уравнений. Т.е. при фиксированной скорости изменения показателя преломления уменьшение длины волны приводит к переходу от векторного случая к скалярному. Т.е. если значительное изменение показателя преломления происходит на расстоянии, много большем длины волны, то острой необходимости использования модифицированных уравнений (4) нет, и достаточно применения классического ВРМ. В противном же случае его применение некорректно, а уравнения (4) позволяют учесть возникающие при распространении эффекты.

Суть влияния рассмотренных факторов и характеризует принципиальные отличия и ограничения применимости методов ВРМ, основанных на классических и модифицированных однонаправленных уравнениях Гельмгольца.

В Главе 2 «Возбуждение мод высоких порядков в ступенчатом оптическом волокне с помощью фазового дифракционного оптического элемента на торце волокна» рассматривается задача возбуждения оптического волокна со ступенчатым профилем показателя преломления с помощью дифракционного оптического элемента (ДОЭ), реализованного в виде микрорельефа на торце волокна. Рассмотрены подходы к возбуждению мод высоких порядков, применение для этого ДОЭ, а также технологии, позволяющие сформировать фазовый ДОЭ на торце волокна (раздел 2.1). Поставлена задача моделирования возбуждения волокна с микрорельефом на торце, обоснованы методы моделирования (раздел 2.2). Исследовано возбуждение мод LP-11 и LP-22 Гауссовым пучком (раздел 2.3), а также влияние технологических погрешностей формирования микрорельефа и ввода излучения в волокно на процесс возбуждения (раздел 2.4). Аналогичное исследование проведено для случая возбуждения пучком с плоским волновым фронтом и равномерным распределением мощности (разделы 2.5 и 2.6). Рассмотрены гибридные волоконно-

дифракционные элементы для возбуждения мод (раздел 2.7). Исследована возможность применения технологий изменения показателя преломления оптического волокна для возбуждения мод высоких порядков (раздел 2.8).

Одним из способов возбуждения мод высоких порядков является применение ДОЭ. Проведенные ранее оптические эксперименты подтвердили высокую эффективность данного подхода с точки зрения формирования заданного распределения, однако в случае необходимости возбуждения мод оптического волокна при использовании такого подхода возникает задача взаимной юстировки оптического элемента и волновода. Развитие технологий позволяет рассматривать задачу формирования ДОЭ непосредственно на торце волокна. Наиболее перспективными технологиями формирования рельефа на торце представляются электронно-лучевая литография, фокусировка ионного пучка и двухфотонная полимеризация, для которых на сегодняшний день достижимы разрешения порядка 100 нм и выше.

В проводившихся ранее оптических экспериментах использовалось оптическое волокно со ступенчатым профилем показателя преломления ComingGlass SMF-28, являющееся для используемой длины волны ($\lambda = 0,63 \text{ мкм}$) маломодовым и обладающее следующими параметрами: показатель преломления сердечника $n_{core} = 1,4619$, показатель преломления оболочки $n_{cladding} = 1,457$, диаметр сердечника $d = 8,3 \text{ мкм}$. Эти параметры были использованы в ходе дальнейшего численного моделирования.

Фазовые элементы, использующиеся для возбуждения мод LP-11 и LP-21, являются бинарными (фазовая функция принимает два значения – 0 и π), поэтому рельеф принимает вид «ступенек» или «площадок» (см. рисунок 1), размещенных на торце и имеющих высоту $h = 0,5 \cdot \lambda \cdot n_{core}^{-1}$, которая при рассматриваемых параметрах будет составлять $h \approx 0,682 \text{ мкм}$.

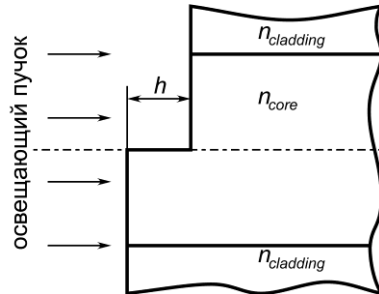


Рисунок 1 – Схематичное изображение бинарного микрорельефа на торце ступенчатого волокна

Показано, что при рассматриваемых параметрах возбуждение мод можно моделировать в два этапа: прохождение излучения через микрорельеф (в приближении тонкого оптического элемента) и распространение пучка в волокне (скалярным методом BPM). В качестве реализации метода в диссертации используется инструментальный пакет OlympIOs (Concept to Volume, версия 5.2).

Результаты моделирования возбуждения мод LP-11 и LP-21 Гауссовым пучком (радиус перетяжки $\sigma = 3,46 \text{ мкм}$, обеспечивает эффективность 99% возбуждения фундаментальной моды) представлены на рисунке 2 и в таблице 1. Возбуждение мод высоких порядков с помощью микрорельефа на торце позволяет добиться высокой эффективности возбуждения (правда, вполне закономерно падающей с ростом порядка возбуждаемой моды) при достаточно малых размерах устройства (обуславливаемым расстоянием смешанного распространения каналируемых и неканалируемых мод). Содержание возбуждаемых мод в результирующем излучении достаточно высоко, что означает возможность применения ДОЭ на торцах волокон для селективного возбуждения мод высоких порядков.

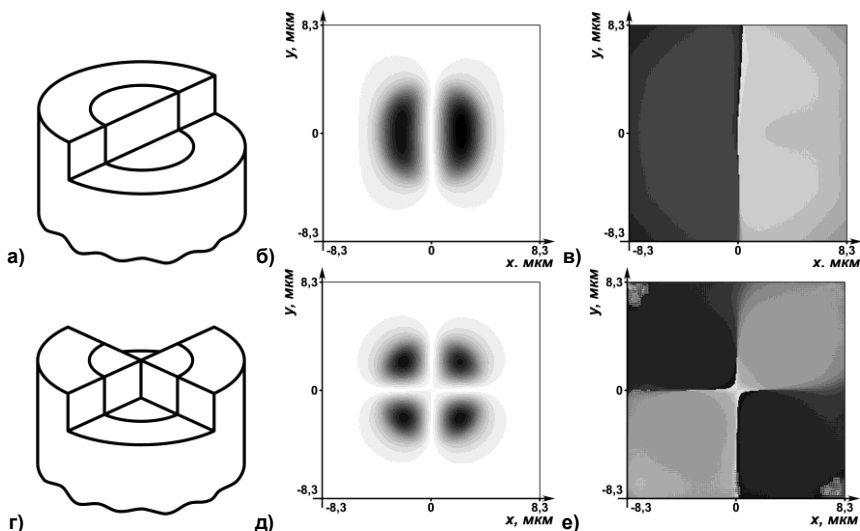


Рисунок 2 – Возбуждение мод с помощью микрорельефа на торце: схематичное изображение торца с микрорельефом а) для моды LP-11 и г) для моды LP-21, амплитуда б) LP-11 и д) LP-21 и фаза в) LP-11 и е) LP-21 пучка в области сердечника после выхода неканализуемых мод

Таблица 1 – Характеристики возбуждения мод

Мода	Эффективность возбуждения в процентах начальной мощности, %	Приблизительная длина области смешанного распространения, МКМ	Процент мощности канализуемого пучка, приходящийся на моду, %
LP-11	72,84	450	92,5
LP-21	55,14	250	93,47

Рассмотрены следующие виды отклонений в процессе возбуждения заданной моды Гауссовым пучком: изменение радиуса перетяжки освещающего пучка, сдвиг освещающего пучка относительно центральной линии волокна, смещение микрорельефа на торце относительно центральной линии волокна, искажение высоты формируемого микрорельефа.

Показано, что в случае моды LP-11 увеличение радиуса перетяжки на 24,2% приводит к увеличению мощности возбуждаемой моды на 7,6%, а в случае моды LP-21 увеличение радиуса перетяжки на 44,1% приводит к увеличению мощности возбуждаемой моды на 25,42% при той же мощности входного излучения. Такой эффект возникает за счет того, что увеличение радиуса перетяжки приводит к увеличению значения интеграла перекрытия для начального пучка и формируемой моды и, следовательно, к увеличению эффективности возбуждения. Т.о. увеличение радиуса перетяжки относительно используемого для возбуждения фундаментальной моды является действенным способом повышения эффективности возбуждения.

Смещение освещающего пучка от оси волновода приводит к изменению модового состава и мощности возбуждаемого пучка. Получены зависимости полной мощности пучка и мощностей возбуждаемых мод для следующих случаев: возбуждение моды LP-01 (сдвиг в произвольном направлении), возбуждение моды LP-11 (сдвиг в направлении вдоль границы раздела фаз и перпендикулярно ей), возбуждение моды LP-21 (сдвиг вдоль границы раздела фаз и под углом 45° к ней).

В качестве оценки допустимой потери эффективности возбуждения использовался критерий потери возбуждаемой модой не более 5% мощности по сравнению со случаем отсутствия сдвига. Результаты анализа полученных зависимостей представлены в таблице 2. Анализ таблицы показывает, что требования по точности позиционирования освещающего пучка в случае наличия микрорельефа не превос-

хотя требования в случае отсутствия микрорельефа, а частично даже снижают их (это связано с дополнительным возбуждением мод высоких порядков из-за смещения освещающего пучка). В целом при заданном пороге являются допустимыми сдвиги вплоть до 0,8 мкм, что составляет приблизительно 20% радиуса сердечника или 1,25 длины волны освещающего пучка.

Таблица 2 – Оценка допустимых сдвигов освещающего пучка

Мода	Мощность моды в случае без сдвига, отн. ед.	Направление сдвига освещающего пучка	Величина сдвига освещающего пучка, мкм	Мощность моды в случае со сдвигом, отн. ед.
LP-01	0,9833	-	0,7781	0,9404
LP-11	0,6736	по линии раздела фаз	0,7781	0,6434
		от линии раздела фаз	1,2968	0,6396
LP-21	0,5156	по линии раздела фаз	1,2968	0,4850
		под углом к линии раздела фаз	1,1	0,4925

Смещение микрорельефа на торце относительно центральной линии волокна также приводит к изменению характеристик возбуждения. Получены зависимости полной мощности пучка и мощностей возбуждаемых мод для следующих случаев: возбуждение моды LP-11 (сдвиг в произвольном направлении), возбуждение моды LP-21 (сдвиг вдоль границы раздела фаз и под углом 45° к ней). На рисунке 3 в качестве примера приведены зависимости мощности пучка и отдельных мод для случая возбуждения моды LP-21 со сдвигом микрорельефа под углом к линии раздела фаз. В таблице 3 приведен численный анализ зависимостей с использованием критерия потери возбуждаемой модой 5% мощности. При заданном пороге допустимы сдвиги микрорельефа на величины порядка 0,6 мкм, что составляет приблизительно 15% радиуса сердечника волокна или 0,83 длины волны освещающего пучка.

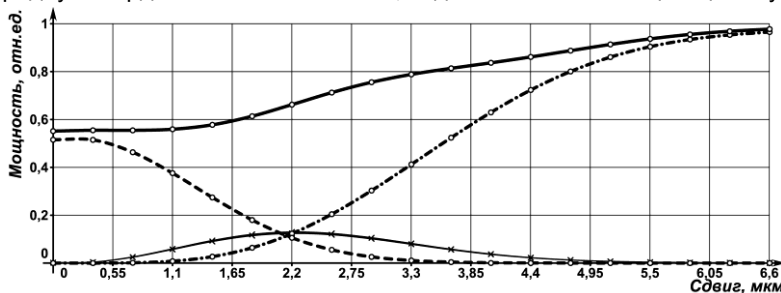


Рисунок 3 – Полная мощность пучка (—) и мощность мод LP-21 (---), LP-00 (— · —) и двух ориентаций LP-11 (-/-) и (-\-) в зависимости от сдвига микрорельефа от центра торца (возбуждение моды LP-21)

Таблица 3 – Оценка допустимых сдвигов микрорельефа

Мода	Мощность моды в случае без сдвига, отн. ед.	Направление сдвига микрорельефа	Величина сдвига микрорельефа, мкм	Мощность моды в случае со сдвигом, отн. ед.
LP-11	0,6736	-	0,5187	0,6375
LP-21	0,5156	по линии раздела фаз	0,5187	0,4872
		под углом к линии раздела фаз	0,7336	0,4633

Полученные в результате исследования зависимости характеристик возбуждения от искажения высоты формируемого микрорельефа показали, что изменение высоты микрорельефа определяет соотношение возбуждаемой и фундаментальной мод в формируемом пучке. При этом если исходить из использовавшегося ранее критерия,

допустимыми являются отклонения высоты в 0,11 мкм, что соответствует примерно в 17% общей высоты рельефа, или 0,18 длины волны освещающего пучка.

Аналогичные эксперименты были проведены для случая возбуждения пучком с плоским волновым фронтом и равномерным распределением мощности (пучки приблизительно такого вида можно получить при применении лазерных диодов с коллиматорами). Характеристики возбуждения в случае без искажений микрорельефа приведены в таблице 4. Общая эффективность оказывается ниже, чем при освещении Гауссовым пучком (это объясняется тем, что основная часть мощности освещающего пучка приходится не на область сердечника, а на область оболочки, и преимущественно излучается из волновода как неканализуемая, при этом также возбуждаются моды оболочки). Также по сравнению со случаем возбуждения Гауссовым пучком увеличилось расстояние, требуемое для выхода неканализуемых мод: если раньше требовалось расстояние существенно меньшее 1 мм, то теперь требуется порядка 5 мм (для возбуждения моды LP-01), 4 мм (для возбуждения моды LP-11) и 3 мм (для возбуждения моды LP-21). Общая закономерность при этом сохранилась: чем выше порядок возбуждаемой моды, тем меньше расстояние.

Таблица 4 – Возбуждение равномерным плоским пучком

	LP-01	LP-11	LP-21
Общая мощность канализуемого пучка, <i>отн. ед.</i>	0,1192	0,0836	0,0802
Мощность, переносимая модой, <i>отн. ед.</i>	0,0587	0,06	0,0752
Процент мощности пучка, переносимый модой, %	49,3	71,78	93,75

Проведенные исследования зависимостей характеристик возбуждения от отклонения параметров микрорельефа от заданных показали, что зависимости носят сходный характер с зависимостями для случая возбуждения Гауссовым пучком, требования по точности формирования микрорельефа также совпадают с требованиями для случая возбуждения Гауссовым пучком. Полученные результаты оценок требуемой точности формирования микрорельефа позволяют утверждать, что для рассматриваемой длины волны и оптического волокна критическим требованием к разрешению является 0,1 мкм. Т.о. для нанесения микрорельефа в рассматриваемом случае могут применяться технологии электронно-лучевой литографии, фокусирования ионного пучка и двухфотонной полимеризации.

Полученные результаты моделирования возбуждения мод оптического волокна с помощью фазового микрорельефа на торце позволяют ввести в рассмотрение класс оптических преобразователей, формирующих одномодовые пучки. То, что элемент реализован непосредственно на торце оптического волокна, оказывает существенное влияние на процесс формирования пучка: участок оптического волокна, расположенный за микрорельефом, выступает в качестве фильтра, т.к. не все паразитные моды сформированного пучка являются канализуемыми для используемого волокна. Т.о. волоконно-дифракционный элемент (состоящий из фрагмента волокна с нанесенным на один из его торцов микрорельефом) в сочетании с источником когерентного излучения может использоваться для эффективного возбуждения одномодовых пучков и ввода их в другие оптические системы. Применение гибридных элементов дает ряд преимуществ: высокая эффективность, возможность использования лазерных диодов в качестве источника излучения, а также возможность пространственного разнесения источника излучения и оптической системы.

Также в работе исследован подход, когда требуемая для селективного возбуждения моды разница набегов фаз формируется при прохождении излучения через участок волокна, в котором был изменен показатель преломления (это возможно, например, при применении технологии модифицирования показателя преломления кварца под воздействием излучения эксимерного лазера). На примере планарного ступенчатого волокна показано, что при этом увеличивается энергетическая эффективность возбуждения, однако кроме заданной моды возбуждается также ряд паразитных, что уменьшает эффективность возбуждения в целом.

В Главе 3 «Анализ распространения лазерного пучка в волокне с микроизгибом» изложены результаты исследования распространения лазерных пучков, сформированных с помощью микрорельефов, в оптических волноводах, центральная линия которых отлична от прямой. Рассмотрены подходы к применению волокон с микроизгибами в датчиках микроперемещений (раздел 3.1). Определена модель волокна с микроизгибом (раздел 3.2) и обоснована процедура моделирования распространения пучка в таком волокне (раздел 3.3). Определены зависимости характеристик распространяющихся пучков от величины микроизгиба (раздел 3.4). Проведено сравнение чувствительности к микроизгибам для случаев одномодового и многомодового волокон (раздел 3.5). Определен векторный характер зависимости мощности выходного пучка от микроизгиба в случае пучков с пространственной асимметрией, предложена схема векторного волоконно-оптического преобразователя микроперемещений (раздел 3.6).

Одними из недостатков предлагавшихся ранее волоконно-оптических преобразователей микроперемещений на основе селективного возбуждения мод высоких порядков с помощью ДОЭ являются сложность конструкции и необходимость решения задачи совмещения оптических осей оптических элементов и волновода. Исследованный в главе 2 подход к возбуждению заданных мод высоких порядков позволяет пересмотреть подходы к созданию преобразователей микроперемещений, при этом возникает задача исследования характеристик возбужденных с помощью фазового ДОЭ на торце пучков при их распространении в волокне с микроизгибом.

В работе рассмотрена модель участка волокна с микроизгибом, основанная на дифференциальном уравнении, описывающем центральную линию волокна, незакрепленные концы которого находятся на опорах, а между опорами на волокно действует внешняя сила, приводящая к возникновению прогиба.

На основе результатов, полученных в Главе 1, показано, что, несмотря на то, что профиль показателя преломления среды изменяется (из-за изгиба волокна), использование скалярного ВРМ даст достаточно точный результат. Причиной этого является малая разница показателей преломлений сердечника и оболочки рассматриваемого волокна Corning Glass SMF-28. Для моделирования в Главе 3 также используется пакет OlympIOs.

В ходе исследования моделировалось распространение пучков, полученных в Главе 1, в участке волокна с микроизгибом, при этом расстояние между опорами, на которых находится волокно, бралось равным 1 мм, а величина прогиба варьировалась. Полученные зависимости для мод LP-01 и LP-21 приведены на рисунке 4. Анализ показывает, что для фундаментальной моды потери энергии при прохождении микроизгиба сравнительно малы даже при существенных значениях глубины прогиба. В свою очередь мода LP-21 показывает большую чувствительность. Этот факт объясняется высоким порядком моды (и, следовательно, большей ее чувствительностью к изменениям характеристик волокна).

Также анализ рисунка 4 показывает, что в процессе прохождения пучка через микроизгиб модовый состав изменяется, но мощность при этом преимущественно переносится основной модой пучка, сформированного с помощью микрорельефа: графики общей мощности и мощности моды повторяют характер друг друга. Т.о. можно сделать важный вывод о том, что при величине прогиба волокна можно характеризовать, анализируя лишь суммарный световой поток на выходе из волокна, в том числе при использовании мод высоких порядков. Следовательно, поскольку анализ модового состава пучка не требуется, также не требуется изготовление и использование корреляционных фильтров, выполняющих этот анализ.

На основе полученных результатов предлагается схема волоконно-оптического преобразователя микроперемещений, включающая элемент селективного возбуждения в виде рельефа на торце волокна, а также не требующая анализа поперечно-модового состава излучения на выходе волокна. Общая структурная схема такого преобразователя приведена на рисунке 5.

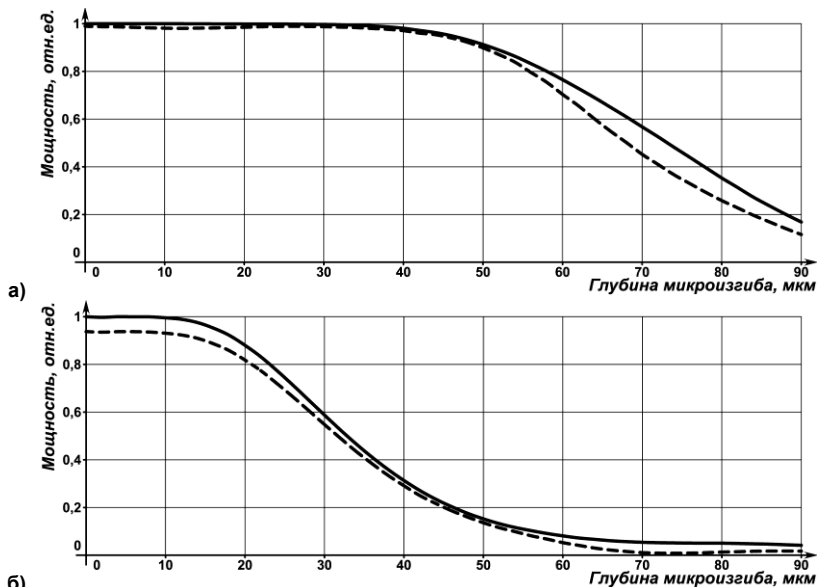


Рисунок 4 – Зависимость мощности а) фундаментальной моды и б) моды LP-21 после прохождения микроизгиба от величины микроизгиба (общая мощность пучка (—) и мощность моды (---))

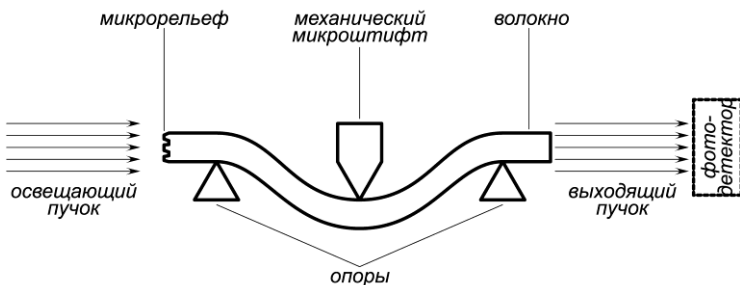


Рисунок 5 – Структурная схема высокочувствительного преобразователя микроперемещений

Также в работе проведено сравнение чувствительности к микроизгибам волокна мод высокого порядка в маломодовом волокне и фундаментальной моды одномодового волокна (в качестве одномодового рассматривалось волокно с теми же параметрами, но для длины волны $\lambda = 1,55 \text{ мкм}$). Сравнение показало, что мода, порядок которой наиболее близок к числу отсечки, обладает наибольшей чувствительностью, а чувствительность мод высоких порядков приближается к ней по мере увеличения порядка моды.

В отличие от фундаментальной моды, моды высоких порядков могут обладать существенной пространственной асимметрией. Данная особенность позволяет рассматривать задачу исследования характеристик пучка при прохождении через микроизгиб в зависимости от взаиморасположения моды при ее вхождении в микроизгиб и плоскости центральной линии волокна. Например, рассмотренная в Главе 2 мода LP-11 обладает ярко выраженной ориентацией, определяемой направлением линии раздела фазы пучка. С точки зрения техники возбуждения с помощью микрорельефа моды с различной ориентацией в целом не отличаются: единственное различие заключается в расположении микрорельефа на торце, при этом нужная

ориентация может быть достигнута простым поворотом волокна вокруг его центральной линии.

Однако с точки зрения прохождения через участок волокна с микроизгибом такие моды существенно различаются. Были рассмотрены две ориентации моды: случай, когда линия раздела фаз лежит в плоскости микроизгиба, и случай, когда линия раздела фаз перпендикулярна плоскости микроизгиба. На рисунке 6а и 6б, соответственно, приведены амплитуды в поперечном сечении пучка в области сердечника волокна на выходе из микроизгиба. Нетрудно заметить, что амплитуды существенно различаются по структуре, и, следовательно, модовый состав выходящего из волокна пучка также должен различаться.

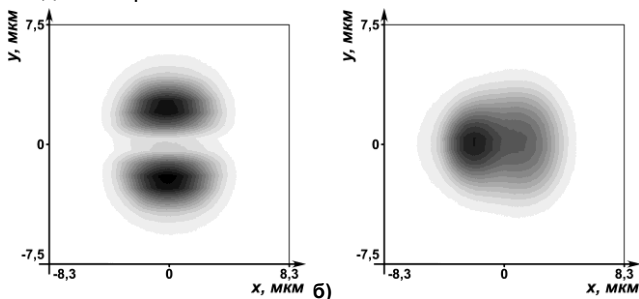


Рисунок 6 – Амплитуда пучка в поперечном сечении (плоскость сечения перпендикулярна оси волновода, глубина прогиба $h=74$ мкм) для моды LP-11 с линией раздела фаз, а) лежащей в плоскости изгиба и б) перпендикулярной плоскости изгиба

Сравнительный анализ полученных зависимостей мощности пучков и конкретных мод от величины микроизгиба для различных ориентаций моды LP-11 показывает, что характеристики чувствительности изменяются в зависимости от ориентации моды относительно изгиба. Этот эффект дает принципиальную возможность создавать волоконно-оптические преобразователи микроперемещений, определяющие не только величину перемещения, но и его направление. Действительно, если закрепить оптическое волокно в точках, ранее считавшихся точками опоры, то мощность выходящего из волновода пучка будет меняться в зависимости от направления воздействия на волновод (правда, оно должно быть перпендикулярно волноводу) при одном и том же значении прогиба. Т.е. если объединить в одну интегральную конструкцию несколько оптических волокон (минимум трех) с различным образом ориентированными микрорельефами, совместный анализ мощности излучения на выходе этих волокон позволит определить не только величину прогиба, но и его направление в плоскости, перпендикулярной центральной линии волокна. Т.е. является возможным создание преобразователя микроперемещений, определяющего направление перемещения.

Заключение

В диссертации проведен анализ возбуждения и распространения мод лазерного излучения в оптическом волокне со ступенчатым профилем показателя преломления и ДОЭ на торце на основе решения однонаправленных уравнений Гельмгольца с применением численного метода распространяющегося пучка (ВРМ).

Основными результатами работы являются следующие.

1. Модификация математической модели метода распространяющегося пучка, позволяющая учесть взаимодействие всех компонентов электромагнитного поля и изменение профиля показателя преломления.

2. Подтверждение высокой энергетической эффективности (79% для моды LP-11, 69% для моды LP-21), высокой эффективности возбуждения (более 93% мощности приходится на возбуждаемую моду), сравнимых с результатами для методов эффективного кодирования ДОЭ, а также ограниченности длины участка, требующегося для формирования моды (менее 0,5 мм), в случае возбуждения мод

высоких порядков в ступенчатом волокне с помощью фазового микрорельефа на торце волокна, проведенное при помощи численного анализа.

3. Оценка зависимости эффективности возбуждения мод от погрешностей нанесения микрорельефа на торец волокна (точности позиционирования и формирования высоты микрорельефа) и юстировки системы ввода излучения в волокно (смещения освещающего пучка).

4. Разработка схемы волоконно-оптического преобразователя микроперемещений на основе волокна с микрорельефом на торце, не требующей юстировки фазового элемента и корреляционного анализа выходного излучения, предложенная на основе результатов численного исследования чувствительности мод LP-11 и LP-21 к микроизгибам волокна.

5. Модель волоконно-оптических преобразователей микроперемещений, определяющих направление перемещения в плоскости, перпендикулярной оси волновода, основанная на выявленном характере зависимости чувствительности асимметричной моды LP-11 к микроизгибам от ориентации моды.

В **Приложении А** приведен вывод уравнений, лежащих в основе метода BPM, указаны предположения и ограничения, используемые при получении этих уравнений, а также кратко описаны разновидности конечно-разностной версии метода.

В **Приложении Б** кратко описаны возможности программного обеспечения OlympIOs, применявшегося для моделирования во второй и третьей Главах.

Основные положения работы отражены в следующих публикациях:
в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Белоусов, А.А. Анализ погрешностей численного решения задачи о распространении электромагнитного излучения в радиально-симметричном волноводе [Текст] / А.А. Белоусов, А.В. Гаврилов, А.А. Дегтярев // Компьютерная оптика. – 2003. – Т. 25. – С. 29-35.

2. Belousov, A.A. Numerical Solution of the Problem of Electromagnetic Radiation Propagation in Radially Symmetric Waveguide and the Error Analysis of the Solution [Text] / A.A. Belousov, A.V. Gavrilo, A.A. Degtyaryov // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics). – 2005. – Vol. 14, N. 3. – P. 167-177.

3. Karpeev, S.V. Fibre sensors based on transverse mode selection [Text] / S.V. Karpeev, V.S. Pavelyev, S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy, A.V. Gavrilo, V.A. Eropolov // Journal of Modern Optics. – 2007. – V. 54, N. 6. – P. 833-844.

4. Pavelyev, V.S. Design of On-fiber Diffractive Microrelief for Efficient Graded-index Fiber Mode Excitation [Text] / V.S. Pavelyev, S.V. Karpeev, A.V. Gavrilo, V.A. Soifer, A.N. Palagushkin, S.A. Prokopenko // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics). – 2007. – Vol. 16, N. 3. – P. 159-166.

5. Гаврилов, А.В. Модифицированный метод распространяющегося пучка и его применение к расчету распространения в волноводах с изменяющимся профилем показателя преломления [Текст] / А.В. Гаврилов // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32, № 1. – С. 15-22.

6. Гаврилов, А.В. Интегральные волоконные датчики давления на основе селективного возбуждения поперечных мод [Текст] / А.В. Гаврилов, В.С. Павельев, В.А. Сойфер // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32, № 2. – С. 175-179.

в других изданиях:

7. Gavrilo, A.V. Numerical Investigation of Mode Content Depending on Step-like Fiber's Microbending With Use of Beam Propagation Method [Text] / A.V. Gavrilo, D.L. Golovashkin, S.V. Karpeev, V.S. Pavelyev // Proceedings of the ICO Topical Meeting on Optoinformatics / Information Photonics' 2006. St. Petersburg, 2006. – P. 167-169.

8. Gavrilo, A.V. Selective excitation of step-index fiber modes [Text] / A.V. Gavrilo, S.V. Karpeev, N.L. Kazanskiy, V.S. Pavelyev, M. Duparre, B. Luedge, S. Schroeter // SPIE Proceedings vol. 6605, Optical Technologies for Telecommunications 2006. – Samara, 2006. – P. 660508-1–660508-6.

Подписано в печать 11.03.2009 г.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать оперативная.

Объем 1 усл.печ.л. Тираж 100 экз. Заказ №

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного автором,
в типографии ООО «Издательство СНЦ»
443001, г. Самара, Студенческий пер., За
тел.: (846) 242-37-07