

На правах рукописи

КИЗЕВЕТТЕР ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ И ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В  
МНОГОМОДОВЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ

01.04.21 – лазерная физика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург - 2008

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор  
**Матышев Александр Александрович**

Официальные  
оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор  
**Котов Олег Иванович**  
доктор физико-математических наук  
**Соколов Игорь Александрович**  
доктор технических наук, профессор  
**Мешковский Игорь Касьянович**

Ведущая организация Санкт-Петербургский государственный  
университет телекоммуникаций

Защита состоится “19” марта 2009 г. в 16-00, на заседании диссертационного совета «01.04.21 – лазерная физика» при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», 195251, Санкт-Петербург, Политехническая 29, II учебный корпус, аудитория 470.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2008 г.

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

А.С. Коротков

# ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ И ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В МНОГОМОДОВЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Физико-математическая основа теории распространения излучения в волоконных световодах (ВС) была создана в 60 - 70х годах прошлого века. Однако экспериментальные данные и теоретические представления, полученные за последние 30 лет, а также развитие вычислительной техники привели к необходимости частичного переосмысления полученных ранее результатов и изменению подходов к решению широкого круга задач волоконной оптики. В частности, до настоящего времени фактически не существовало волноводной теории, позволяющей описать поляризационные свойства многомодовых ВС простыми аналитическими выражениями, способов численного моделирования спекл-структур (СПС) излучения световодов, а также физико-математических моделей, позволяющих корректно рассчитать угловую передаточную характеристику (УПХ) световодов со ступенчатым профилем показателя преломления (ППП). Следует также отметить, что такое физическое явление как оптические вихри в волоконных световодах, представляющее интерес для различных прикладных целей, несмотря на хорошее развитие теории, экспериментально изучено недостаточно. В связи с появлением новых технологий и технических применений световодов со ступенчатым ППП, необходимо создание новых физико-математических моделей и теории для адекватного описания процессов распространения, ввода и вывода излучения, пригодных для прикладных расчетов.

**Цель работы.** На основании новых физико-математических моделей создать теории, методики численного моделирования (ЧМ), получить аналитические выражения для решения актуальных задач волоконной оптики,

используя которые появляется возможность выявить ранее неизвестные свойства волоконных световодов, определить области их практического применения, а также рассчитать требуемые характеристики различных волоконно-оптических устройств. Целью работы является также экспериментальное подтверждение теоретических выводов и созданных методик расчетов. В частности, создание волноводной теории деполяризации излучения многомодовых ВС, методики численного моделирования распределений интенсивности когерентного излучения, выходящего из световода, в том числе спекл-структур, сформированных оптическими вихрями, совершенствование теории, описывающей влияние рассеяния излучения торцевыми поверхностями ВС на передаточные характеристики световода.

### **Научная новизна.**

1. Получены асимптотические формулы для собственных чисел волноводных мод, расчета напряженности электромагнитного поля излучения волноводных мод и оптических вихрей в дальней зоне дифракции и длины распада линейно-поляризованных групп ( $LP$ ) в световодах со ступенчатым ППП в виде простых арифметических выражений.

2. Создана волновая теория деполяризации излучения в многомодовых ВС со ступенчатым ППП. Теоретически и экспериментально показано существование угла, названного углом отсечки линейной поляризации выходящего излучения и получены формулы, связывающие угол отсечки с параметрами световода. Выведены аналитические формулы для описания спектрально-поляризационных биений в одномодовом двулучепреломляющем световоде с локальным дефектом. Разработана методика и выполнено численное моделирование спектрально-поляризационных биений для случая большого количества локальных дефектов со случайным расположением по длине.

3. Разработана методика численного моделирования распределений интенсивности выходящего из ВС когерентного излучения, позволяющая корректно описать как образующуюся спекл-структуру, так и усредненное по фазам интерферирующих волн заданное угловое распределение интенсивности. Выполнено исследование пространственных статистических характеристик спекл-структур излучения волоконных световодов со ступенчатым профилем ППП методом численного моделирования, как для волноводных мод, так и для оптических вихрей, распространяющихся в ВС. Определены корреляционные расстояния спекл-структур при постоянном азимутальном  $\Delta L_{\varphi=const}$  и аксиальном  $\Delta L_{r=const}$  углах. Установлено, что при возникновении в ВС оптических вихрей с одним направлением вращения волнового фронта величина  $\Delta L_{r=const}$  возрастает, а СПС становится анизотропной. Смоделировано пространственное изменение спекл-структур ВС при изменении длины волны излучения. Теоретически и методом ЧМ показано, а также экспериментально подтверждено, что спеклы, сформированные излучением оптических вихрей, в отличие от спеклов, образованных излучением волноводных мод, при изменении длины волны имеют преимущественное азимутальное направление движения, что можно рассматривать как вращение СПС. Определены функции взаимной корреляции спекл-структур при различных длинах волн и различных углах выхода излучения.

4. Создана методика, позволяющая различать спекл-структуры, сформированные оптическими вихрями с одинаковыми направлениями вращения от СПС, образованных преимущественно волноводными модами со сравнительно малыми значениями азимутальных индексов.

5. Обнаружена новая разновидность эффекта вращения спекл-структуры выходящего излучения при изгибе световода одновременно в двух плоскостях, пригодная для создания датчиков угла поворота.

6. Разработана методика измерения угловых передаточных характеристик (УПХ) волоконных световодов, позволяющая оценить влияние

неточности юстировки оптической системы на параметры измеряемых зависимостей. Экспериментально определены УПХ различных волоконных световодов. Предложена простая физическая модель, позволяющая получить простые аналитические выражения для описания УПХ.

7. Разработан квазилучевой подход для решения задач ввода-вывода излучения, сохраняющий простоту классической лучевой модели, но позволяющей формально учесть влияние энергообмена между модами и дифференциальное модовое затухание. Создана теоретическая основа для расчета влияния оптических неоднородностей торцевых поверхностей волоконного световода на параметры вводимого и обратно отраженного излучения. Предложен способ равномерного возбуждения волноводных мод при проведении измерений параметров волоконных световодов, заключающийся в последовательном нанесении слоев светорассеивающего лака с одновременным контролем рассеивающих свойств покрытия. Исследовано влияние рассеяния на торцевых поверхностях световодов на характеристики модового шума, в том числе при появлении в ВС оптических вихрей.

**Практическая ценность** диссертации заключается, прежде всего, в создании новых физико-математических моделей и теоретических представлений, позволяющих применить полученные результаты для решения широкого круга прикладных задач волоконной оптики. В частности, для создания, проектирования и оптимизации параметров волоконно-оптических систем. Выявленные поляризационные свойства многомодовых волоконных световодов со ступенчатым ППП и разновидность эффекта вращения спекл-структур, могут быть использованы при разработке волоконно-оптических датчиков, устройств доставки поляризованного излучения к измерительным приборам, для расчетов полей оптических ловушек микрочастиц и других целей. Созданные физико-математические модели, а также результаты исследований методом численного моделирования создают основу для

разработки и внедрения новых методов диагностики качества ВС на основе анализа поляризационных, угловых передаточных характеристик и статистических характеристик спекл-структур выходящего излучения, а также для совершенствования существующих и создания новых стандартов в метрике волоконных световодов. Результаты исследований открывают новые возможности для практического использования волоконных световодов в качестве генератора оптических вихрей для манипуляций микрочастицами, диагностики винтовых внутренних напряжений и дислокаций твердых тел, оптических кристаллов, наноструктур и биологических объектов.

**На защиту выносятся:**

1. Волновая теория деполяризации излучения при распространении по многомодовому ВС со ступенчатым ППП, основанная на полученных асимптотических формулах для собственных чисел волноводных мод. Выявленные и теоретически обоснованные поляризационные свойства ВС, в частности, формулы, связывающие, угол, названный углом отсечки линейной поляризации выходящего излучения, с параметрами световода, открывающие новые возможности использования ВС для передачи поляризованного излучения. Аналитические формулы для описания спектрально-поляризационных биений в одномодовом двулучепреломляющем световоде с локальным дефектом, методика и результаты численного моделирования спектрально-поляризационных биений для случая большого количества локальных дефектов со случайным расположением по длине.

2. Методика численного моделирования распределений интенсивности выходящего из ВС когерентного излучения. Условия возникновения в ВС группы оптических вихрей и их влияние на пространственные и спектральные характеристики СПС. Предложенная методика, позволяющая отличать спекл-структуры, сформированные оптическими вихрями с одинаковыми направлениями вращения от СПС,

образованных преимущественно волноводными модами со сравнительно малыми значениями азимутальных индексов.

3. Эффект вращения спекл-структуры выходящего излучения при изгибе световода одновременно в двух плоскостях, на основе которого возможно создание датчика угла поворота.

4. Физическая модель, позволяющая корректно описать угловые передаточные характеристики (УПХ) волоконных световодов со ступенчатым профилем показателя преломления, результаты экспериментальных измерений и полученные аналитические выражения.

5. Методика расчета, теоретические оценки и результаты экспериментальных исследований влияния оптических неоднородностей торцевых поверхностей ВС на параметры вводимого, выходящего и обратно отраженного излучения, в частности, эффективности ввода, модовый состав, диаграмму направленности излучения и шумовые характеристики при пространственной фильтрации, необходимые при проектировании волоконно-оптических систем в реальных условиях эксплуатации. Способ равномерного возбуждения волноводных мод световода с использованием светорассеивающего лака для стандартизации измерений параметров ВС.

**Достоверность результатов.** Достоверность полученных результатов подтверждается совпадением теоретических и экспериментальных зависимостей, а также зависимостей, полученных методом численного моделирования. Созданные физико-математические модели и численно-аналитические методы позволили выявить и объяснить ряд эффектов, ранее не имевших научного объяснения, что также подтверждает достоверность полученных результатов. На основании одного из выявленных эффектов был создан, протестирован и запатентован лабораторный макет датчика угла поворота.

**Личный вклад автора.** Автором получены математические формулы для расчетов собственных чисел (гл. 2), описания поляризационных эффектов в многомодовых ВС (гл. 3), моделирования спекл-структур (гл. 4), оценки эффективности ввода (ЭВ) в ВС, величины обратного отражения и диаграмм направленности ВС с рассеивающими торцевыми поверхностями. Автором предложена физическая модель для описания УПХ световодов (гл. 5), объяснены физические эффекты, связанные с возникновением оптических вихрей в ВС (гл. 4, 6), обнаружен эффект вращения СПС в световодах (гл. 4). Лично автором произведены экспериментальные и теоретические исследования, описанные в гл. 3-5, исключая измерения спектрально-поляризационных характеристик (гл. 3), выполненных совместно с Малюгиным В.И. Также совместно с Малюгиным В.И. произведены экспериментальные измерения ЭВ и модового состава в ВС с рассеивающими торцевыми поверхностями.

**Структура и объем работы.** Материал диссертации, состоящий из введения, 6 глав, заключения и списка литературы изложен на 227 страницах, включая 85 рисунков на 72 листах и 3 таблицы. Список цитируемой литературы включает 160 наименований.

**Апробация работы.** Материалы диссертации докладывались на 21 научной конференции в период с 1983 г. по 2007 г. В частности, на 4-й и 6-й международной научно-технической конференции «Компьютерное моделирование», г. Санкт-Петербург, 2003, 2005 гг., на международной научной конференции «Лазеры. Измерения. Информация», г. Санкт-Петербург, 2003 - 2007 гг., на международной научной конференции «Лазеры для медицины, биологии и экологии», г. Санкт-Петербург, 2004, 2006 гг., на 61-й научной сессии, посвященной Дню Радио, г. Москва, 2006 г.

Материалы диссертации докладывались также на научно-технических семинарах радиофизического и электромеханического факультетов СПбГПУ.

По материалам диссертации опубликовано 49 работ, в том числе 5 авторских свидетельств и 1 патент РФ.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

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

**Глава 1. Обзор литературы.** В гл. 1 рассмотрены основные работы, относящиеся к теме диссертации.

**Глава 2. Асимптотические формулы для решений дисперсионного уравнения и задачи ввода-вывода излучения.**

2.1. Асимптотические формулы для собственных чисел волноводных мод световода со ступенчатым профилем показателя преломления. В п. 2.1 приводится математический вывод асимптотических формул для собственных чисел волноводных мод световодов со ступенчатым ППП. Методом линеаризации характеристического (дисперсионного) уравнения вблизи точек  $\xi_{l,s}$ , являющихся  $s$ -ым нулем производной функции Бесселя  $l$ -го порядка ( $J_l'(u)=0$ ), при  $V \gg 1$ , где  $V = r_0 k_0 (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$  – нормированная частота,  $r_0$  – радиус сердцевины ВС,  $k_0 = 2\pi / \lambda$ ,  $\lambda$  – длина волны излучения,  $n_1$ ,  $n_2$  – показатели преломления сердцевины и оболочки, для собственных чисел  $EH_{l,s-1}$  мод –  $u_{l,s}^{(1)}$  и  $HE_{l,s}$  мод –  $u_{l,s}^{(2)}$  получено:

$$u_{l,s}^{(1,2)} = \xi_{l,s} - \frac{\xi_{l,s} (n_1^2 + n_2^2) \pm ((n_1^2 + n_2^2)^2 - 4n_1^2(n_2^2 - p_0))^{1/2}}{\zeta_{l,s} 2n_1^2} \quad (1)$$

где  $l$  – азимутальный индекс моды,  $\zeta_{l,s} = (V^2 - \xi_{l,s}^2)^{1/2}$ ,  $p_0 = V^4 l^2 \mu_{l,s}^2 / (\xi_{l,s}^3 \zeta_{l,s}^3 k_0^2)$ ,  $\mu_{l,s} = (n_1^2 k_0^2 - \xi_{l,s}^2 / r_0^2)^{1/2}$  – величина постоянной распространения  $\beta$  при  $u = \xi_{l,s}$ .

Для поперечных волн  $TE_{0j}$  и  $TM_{0j}$  имеем:

$$u_j^{(TE)} = \widehat{\xi}_j V / (V + 1), \quad u_j^{(TM)} = \widehat{\xi}_j V / (V + \gamma_n), \quad (2)$$

где  $\gamma_n = n_2^2 / n_1^2$ , а  $\widehat{\xi}_s$  – корни уравнения  $J_l(\widehat{\xi}) = 0$ . Аппроксимация отношения  $J'_l(u) / J_l(u)$  функцией тангенса  $J'_l(u) / J_l(u) \approx -\text{tg}(u - \xi_{l,s})$  дает более точные выражения для собственных чисел:

$$u_{l,s}^{(1,2)} = \xi_{l,s} + \text{arctg}\left(\frac{b_s \mp d_s}{2}\right) \quad (3)$$

где:

$$b_s = \left(\frac{n_2^2}{n_1^2} + 1\right) \frac{\xi_{l,s} K'_l(\xi_{l,s})}{\xi_{l,s} K_l(\xi_{l,s})}, \quad d_s = (b_s^2 - 4c_s)^{1/2}, \quad c_s = \frac{n_2^2}{n_1^2} \frac{\xi_{l,s}^2}{\xi_{l,s}^2} \left(\frac{K'_l(\xi_{l,s})}{K_l(\xi_{l,s})}\right)^2 - \frac{V^4}{\xi_{l,s}^2 \xi_{l,s}^4} \frac{l^2 \mu_{l,s}^2}{n_1^2 k_0^2}.$$

В частности, при  $V \gg 1$ , справедливо:

$$b_s = -\left(\frac{n_2^2}{n_1^2} + 1\right) \frac{\xi_{l,s}}{\xi_{l,s}}, \quad d_s = (b_s^2 - 4c_s)^{1/2}, \quad c_s = \frac{n_2^2}{n_1^2} \frac{\xi_{l,s}^2}{\xi_{l,s}^2} - \frac{V^4}{\xi_{l,s}^2 \xi_{l,s}^4} \frac{l^2 \mu_{l,s}^2}{n_1^2 k_0^2}.$$

Определены точности полученных выражений. Показано, что для практических расчетов представленные формулы можно использовать при  $V > 10..20$ .

Таким образом, расчет собственных чисел, соответственно и постоянных распространения, можно выполнить без численного решения трансцендентных уравнений, используя полученные арифметические выражения. Основным преимуществом формул (1)-(3) по сравнению с известными асимптотическими формулами является возможность получения корректных аналитических выражений для производных по любому параметру, в частности, по длине волны. В п. 2.1 рассмотрена также разность собственных чисел и постоянных распространения между различными волноводными модами и проанализированы основные закономерности.

2.2. Асимптотические формулы для расчета длины волны поляризационных и спектрально-поляризационных биений. П.2.2 посвящен рассмотрению разности собственных чисел и постоянных распространения волноводных мод, образующих линейно-поляризованные ( $LP_{ij}$ ) модовые группы. Показано, что известная формула, полученная в приближении слабонаправляемых мод с использованием теории возмущений:

$$\frac{\Delta u}{u_{i\pm 1,j}} = -\frac{n_1^2 + n_2^2}{2n_1^2 V}, \quad (4)$$

где  $i, j$  - индексы  $LP$  группы, не позволяет корректно оценить величину  $\Delta u_{i,j}^{(LP)}$ , соответственно и  $\Delta\beta$ . Численное решение характеристического уравнения для разности собственных чисел  $\Delta u$  при  $V \rightarrow \infty$ , показывает, что асимптотой для  $\Delta u(V)$  является  $1/V^2$ , а не  $1/V$ . Соответственно, при  $V=100\dots 1000$  ошибка вычисления  $\Delta u$  с использованием (4) составляет 2-3 порядка. Установлено, что корректной аппроксимацией для  $\Delta u$  может служить выражение:

$$\Delta u_{i,j}^{(LP)} \approx \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\xi_{i,j}^2}{\zeta_{i,j}^2} \cdot \frac{n_A^2}{n_1}, \quad (5)$$

где  $n_A$  - числовая апертура ВС. Следует отметить, что поляризационные биения в  $LP_{i,j}$  модовых группах при  $i > 0$  возникают в идеальных цилиндрических ВС при отсутствии двулучепреломления. Определена точность выражения (5) для различных параметров ВС. Исключая собственные числа вблизи отсечки, при  $V=50\dots 10^4$  отличия аппроксимации (5) от точных значений, в большинстве случаев, не превышает 1,5 – 3 раза. Учитывая, что величина  $\Delta u$  во всем диапазоне  $i, j$  при  $V=10^4$  изменяется на 6 порядков, ошибку в 2..5 раз можно считать приемлемой для проведения оценок поляризационных характеристик. Для низших модовых групп, которые при распространении по ВС, как будет показано в гл. 2, могут сохранять линейную поляризацию, ошибка формулы (5) составляет 15% - 30%. Из (5) получены выражения для  $\Delta\beta$ , длины волны поляризационных биений  $L_z$  и периода спектрально-поляризационных биений  $\Lambda_\lambda$ :

$$\Delta\beta_{i,j} \approx \frac{\xi_{i,j}^3 n_A^2 \lambda}{4\pi^2 n_1^2 r_0^2 \zeta_{i,j}^2}, \quad (6)$$

$$L_z \approx \frac{2\pi^3 \zeta_{i,j}^2 n_1^2 r_0^2}{\lambda \xi_{i,j}^3 n_A^2}, \quad \Lambda_\lambda \approx \frac{2\pi}{L_F} \left( \frac{\xi_{i,j}^3 n_A^2}{4\pi^2 n_1^2 r_0^2 \zeta_{i,j}^2} + \frac{2\xi_{i,j}^3 n_A^4}{n_1^2 \lambda^2 \zeta_{i,j}^4} \right)^{-1}, \quad (7)$$

где  $L_F$  - длина световода. Оценочное значение  $L_z$ , в зависимости от параметров ВС и индексов модовой группы, составляет  $10^{-3} \dots 10^6$  м.

Например, при  $\lambda=0.633$  мкм,  $n_A=0.25$ ,  $r_0=500$  мкм ( $V \approx 1.2 \cdot 10^3$ ) для  $LP_{2,2}$  длина  $L_z$  приближенно  $3 \cdot 10^6$  м, для  $LP_{1000,1}$  - 1 м, при  $r_0=10$  мкм ( $V \approx 25$ ) для  $LP_{2,2}$  - 0.6 м, для  $LP_{15,1}$  -  $3 \cdot 10^{-4}$  м. Период спектрально-поляризационных биений между модами, образующими  $LP$  модовые группы, многократно превышает период межмодовых биений, поэтому в многомодовых световодах, по видимому, не может быть определен экспериментально.

2.3. Асимптотическое решение задачи ввода-вывода излучения для многомодовых волоконных световодов. На основании наиболее известных работ, связывающих поля волноводных мод в ближней и дальней зонах дифракции, для ВС со ступенчатым ППП – А. Снайдера, использовавшего разложение собственных волн ВС по плоским электромагнитным волнам и Н.С. Капани, применившего метод Щелкунова, получено асимптотическое выражение ( $V \rightarrow \infty$ ) для угловой зависимости проекций напряженностей электромагнитного поля в ДЗД при  $V \gg 1$ ,  $l \ll u_{l,s}$  в виде:

$$E_{x,y} \propto \sin(\chi - u_{l,s}) / (\chi - u_{l,s}), \quad (8)$$

где  $\theta$ ,  $\chi = r_0 k_0 \sin(\theta)$  – аксиальный и аксиальный нормированный углы выхода. Соответственно, угловое распределение интенсивности  $I_{l,s}(\theta)$  любой моды в рамках данного приближения может быть описано функцией  $(\sin(\chi) / \chi)^2$ , что подтверждает существующее утверждение о возможности использования формул дифракции на щели для описания распределений  $I_{l,s}(\theta)$ . Проанализированы основные закономерности возбуждения и излучения волноводных мод.

### Глава 3. Поляризационные характеристики волоконных световодов.

3.1. Расчет поляризационных характеристик многомодовых волоконных световодов со ступенчатым профилем показателя преломления. В п.3.1 представлено теоретическое рассмотрение проблемы расчета поляризационных характеристик излучения многомодовых волоконных световодов. Теоретически рассмотрен распад линейно-поляризованных

модовых групп в ВС со ступенчатым ППП. Показано, что при наличии разности фаз  $\psi$  между модами, образующими  $LP$  модовую группу, интегральную степень линейной поляризации (СЛП)  $p$ , а также СЛП с учетом направления плоскости поляризации  $p_a$ , можно описать зависимостями:

$$p = |\cos(\psi)|, \quad p_a = \cos(\psi). \quad (9)$$

Принципиальным отличием поляризационных биений  $LP_{i,j}$  модовых групп с  $i > 0$  от поляризационных биений основной модовой группы, заключается в том, что, во-первых, рассматриваемые биения обусловлены волноводными свойствами мод цилиндрического диэлектрического световода при отсутствии двулучепреломления, а во-вторых, в случаях  $\psi = \pi + 2\pi m$  и  $\psi = 2\pi m$ , где  $m$  - целое число, суммарные поля имеют ортогональные направления поляризации независимо от направления поляризации на входе ВС. Установлено, что существует критический угол  $\theta_d$ , при превышении которого, как в случае ввода излучения с  $\gamma > \theta_d$ , так и выхода с  $\theta > \theta_d$ , можно считать  $p \ll 1$ , то есть полагать, что излучение деполаризовано. Угол  $\theta_d$  в работе назван углом отсечки линейной поляризации. Используя формулу (6), п. 2.2 получено выражение для нормированного угла выхода  $\theta_{dn}$ , при котором достигается  $p = 0$ :

$$\theta_{dn} = (\pi^2 n_1^2 r_0 / L)^{1/3} / n_A \quad (10)$$

Соответственно:

$$\theta_d = \theta_{dn} \theta_c \quad (11)$$

Если из формулы (11) следует  $\theta_{dn} > 1$ , то это означает, что при заданных параметрах световода разность фаз  $\psi$  не достигает  $\pi/2$  даже при  $\theta = \theta_c$ . В малоугловом приближении выражение для угла  $\theta_d$  можно представить в виде:

$$\theta_d \approx 2.75(r_0 / L)^{1/3} \quad (12)$$

Если энергообмен между модами при распространении по ВС пренебрежимо мал, то моды с углами выхода  $\theta < \theta_d$  сохраняют линейную поляризацию. Так,

например, для ВС с  $r_0=100$  мкм, независимо от величины  $n_A$ , при  $L=1$  м оценка  $\theta_d$  дает  $7,5^0$ , а при  $L=10$  м –  $3,5^0$ .

Так как в большинстве случаев в ВС распространяется одновременно большое количество модовых групп, в работе было произведено численное моделирование поляризационных характеристик выходящего излучения при различных распределениях мощностей между модовыми группами. Для приближенного решения задачи предложено два альтернативных подхода, описанных ниже. Принимая во внимание различное пространственное распределение полей волноводных мод, можно суммировать интенсивности излучения мод двух ортогональных поляризаций в заданном интервале углов выхода. Противоположный подход заключается в суммировании напряженностей полей, пренебрегая пространственными распределениями мод, т.е. является аналогией лучевого подхода с учетом волноводных свойств. Получены теоретические зависимости  $p_a(L)$  и  $p_a(\theta)$ . Произведено сравнение с результатами численного моделирования (гл. 4) и экспериментальными данными (п. 3.2). Показано, что оба подхода корректно описывают характер изменения  $p_a(\theta)$  в диапазоне  $\theta \leq \theta_n < \theta_{dn}$  (соответственно и зависимость  $p$  от угла ввода). Однако в первом случае, при  $L \rightarrow \infty$ , имеет место  $p_a \rightarrow 0$ ,  $p \rightarrow 0$ , что соответствует известным экспериментальным данным, а во втором -  $p_a \rightarrow 1/2$ ,  $p \rightarrow 1/2$ , что не соответствует действительности. Но во втором случае более точно описываются осцилляции  $p_a(L)$  и  $p(L)$ . Предложена аппроксимация зависимости  $p_a(\theta_n)$  в виде:

$$p_a(\theta_n) = p_0 \cos(n_A^3 L \theta_n^3 / (2\pi n_1^2 r_0)) \exp(-\theta_n^2 / s_n^2), \quad (13)$$

где  $p_0$ ,  $s_n$  - коэффициенты аппроксимации ( $p_0 \leq 1$ ), обладающая достоинствами обоих рассмотренных подходов. Для прикладных расчетов можно полагать:  $s_n \approx \theta_{dn}$ . Для световодов высокого качества  $s_n$  может быть больше  $\theta_{dn}$ , а  $p_0 \approx 1$ , для ВС низкого качества -  $s_n < \theta_{dn}$ , а  $p_0 \ll 1$ .

Экспериментально измеренное значение  $p_0$  может рассматриваться как объективная численная оценка качества ВС.

В п. 3.1 продемонстрирована возможность оценки интегральной СЛП выходящего излучения с учетом реальной полуширины углового распределения выходящего излучения. В частности, получена оценка уменьшения  $p$  при  $\gamma = 0$  вследствие перераспределения энергии между модовыми группами.

3.2. Экспериментальное исследование поляризационных характеристик многомодовых волоконных световодов. В п. 3.2 приводятся результаты исследований поляризационных характеристик многомодовых ВС со ступенчатым ППП с различными параметрами, в т.ч. волоконно-оптических жгутов (ВОЖ). Были исследованы интегральная СЛП световодов от угла ввода излучения  $p(\gamma)$ , а также зависимость СЛП от угла выхода  $p_a(\theta)$ . Полученные экспериментальные данные подтвердили все теоретически предсказанные закономерности. Например, для ВС с  $n_1 = 1.45$ ,  $d_0 = 200$  мкм,  $L = 0.5$  м,  $\theta_c \approx 25^\circ$  (по уровню  $1/e$ ,  $n_A = 0.43$ ) расчетное значение  $\theta_d = 9.3^\circ$ , экспериментально измеренное –  $9.5^\circ$ . При равномерном возбуждении мод величина интегральной СЛП всего выходящего излучения  $p$  составляла 0.15, а  $p_a$  вблизи оси ( $\theta \ll \theta_d$ ) – 0.5 ... 0.7. При угле ввода  $\gamma = 0$  имело место  $p \approx 0.94$ , а вблизи оси –  $p_a \approx 0.98$ , т.е. снижение СЛП при равномерном возбуждении было обусловлено взаимосвязью мод. Для ВОЖ с диаметром одиночных световедущих жил  $d_0 = 20$  мкм,  $L = 0.25$  м,  $\theta_c \approx 33^\circ$  расчетное значение  $\theta_d = 5.5^\circ$ , экспериментальное –  $5.4^\circ$ . Измеренные зависимости  $p_a(\theta)$  также хорошо соответствовали теоретической зависимости (13).

3.3. Спектрально-поляризационные характеристики несовершенных волоконных световодов. В п. 3.3 представлены теоретические и экспериментальные исследования спектрально-поляризационных характеристик двулучепреломляющего ВС. Показано, что помимо хорошо известного эффекта спектрально-поляризационных биений с периодом:

$$\Lambda = 2\pi\lambda_0 / (L\Delta\beta) \quad (14)$$

где  $\lambda_0$  - центральная длина волны,  $L$  - длина ВС,  $\Delta\beta$  - разность постоянных распространения мод с ортогональными поляризациями, наличие локального дефекта, приводящего к перераспределению энергии между модами, приводит к изменению спектрально-поляризационных характеристик. При  $|\Delta L_m| \ll L$ , где  $\Delta L_m = L - L_1$ ,  $L_1$  - расстояние от входного торца до дефекта появляется модуляция спектра с огибающей, имеющей период  $\Lambda_m = 4\pi\lambda_0 / (\Delta L_m \Delta\beta)$ , а при  $|\Delta L_d| \ll L$ , где  $\Delta L_d = L_2 - L_1$ ,  $L_2$  - расстояние от дефекта до выходного торца, спектрально-поляризационные биения с периодом (14) наблюдаются на изменяющемся с периодом  $\Lambda_d = 4\pi\lambda_0 / (\Delta L_d \Delta\beta)$  уровне интенсивности. При увеличении количества локальных дефектов возрастает количество возможных частот биений, поэтому для случая большого числа дефектов был применен метод численного моделирования. Показано, что при случайном или равномерном расположении дефектов по длине световода на выходе ВС биения наблюдаются практически только с периодом приближенно равным  $\Lambda$ . Однако в отличие от случая бездефектного ВС, спектрально-поляризационные биения наблюдаются независимо от плоскости поляризации излучения на входе световода.

В п. 3.3 приведены результаты экспериментального исследования спектрально-поляризационных характеристик излучения, выходящего из несовершенного одномодового ВС, в том числе для случая искусственно наведенного изгибом ВС дефекта. Созданная математическая модель и результаты численного моделирования объясняют полученные зависимости. Исследования спектрально-поляризационных характеристик многомодовых ВС представлены в п. 4.3.

#### **Глава 4. Статистические характеристики спекл-структур излучения волоконных световодов.**

4.1. Методика численного моделирования распределений интенсивности выходящего излучения. В п. 4.1 рассмотрена методика численного моделирования распределений интенсивности излучения многомодовых волоконных световодов со ступенчатым ППП, заключающаяся фактически в суммировании полей всех волноводных мод  $\vec{E}_{l,s}$  в дальней зоне дифракции с заданными весовыми коэффициентами  $\alpha_{l,s}$ :

$$\vec{E}(r, \varphi) = \sum_{m=1}^4 \sum_l \sum_s \alpha_{l,s}^{(m)} \vec{E}_{l,s}^{(m)}(r, \varphi), \quad (15)$$

где  $m$  - число, характеризующее тип моды ( $HE_{l,s}$ ,  $EH_{l,s}$ ,  $TE_{0,s}$ ,  $TM_{0,s}$ ),  $l$ ,  $s$  - азимутальный и радиальный индексы моды,  $\vec{E}$  - вектор электрической напряженности электромагнитной волны в точке с координатами цилиндрической системы  $r$ ,  $\varphi$ . В п. 4.1 применен метод численного моделирования, основанный на использовании аналитических выражений для собственных чисел и напряженностей полей излучения отдельных волноводных мод (гл. 2), что позволяет избежать использования преобразования Фурье, и уменьшает время расчетов в тысячи раз. Показано, что для моделирования равномерного возбуждения волноводных мод коэффициенты следует задавать как

$$\alpha_{l,s} \propto 1 / \theta_{l,s}^{1/2}, \quad (16)$$

где  $\theta_{l,s}$  - угол выхода излучения моды с индексами  $l$ ,  $s$  (п. 1.5), а для случая селективного возбуждения мод с учетом перераспределения энергии при распространении по ВС вследствие конверсии (гл. 5) – в виде:

$$\alpha_{l,s} \propto \frac{1}{\sigma_F(\gamma) \theta_{l,s}^{1/2}} \left( \exp\left(-\frac{\theta_{l,s}^2 + \gamma^2}{2\sigma_F^2(\gamma)}\right) I_0\left(\frac{\theta\gamma}{\sigma_F^2}\right) \right)^{1/2} \quad (17)$$

где  $\sigma_F(\gamma)$  – полуширина углового распределения выходящего излучения при угле ввода  $\gamma$ . Для увеличения точности моделирования вблизи оси ( $\theta \rightarrow 0$ ) для основной моды  $HE_{1,1}$  угол  $\theta_{1,1}$  задавался как нулевой, что соответствовало строгому расчету, а весовой коэффициент  $\alpha_{1,1}$  был скорректирован. Представленный метод позволил описать как спекл-структуру интерференции

когерентного излучения волноводных мод, так и огибающую углового распределения, получаемую при усреднении распределения интенсивности по фазам мод. Азимутальные зависимости  $\cos(l\varphi)$ ,  $\sin(l\varphi)$  собственных функций волноводных мод соответствовали волнам с азимутально однородной фазой, т.е. классическим волноводным модам (далее по тексту – «обычным»), а зависимость вида  $\exp(\pm l\varphi)$  – оптическим вихрям. Это позволило исследовать методом численного моделирования СПС различных световодов, сформированные как излучением обычных волноводных мод, так и оптическими вихрями, в частности, при изменении длины волны излучения. Результаты исследований приведены в п. 4.2 - 4.4.

4.2. Исследование статистических характеристик спекл-структур излучения волоконных световодов методом численного моделирования. П. 4.2 посвящен исследованию статистических характеристик (СХ) спекл-структур ВС со ступенчатым ППП в дальней зоне дифракции методом численного моделирования. Были смоделированы распределения интенсивности выходящего излучения при различных параметрах ВС и различном модовом составе, а также определены статистические характеристики получаемой СПС: функция плотности вероятности распределения интенсивности  $p(I)$  и пространственная угловая автокорреляционная функция (АКФ).

Наиболее важным является случай равномерного возбуждения волноводных мод. Как будет показано в п. 6.6, равномерное возбуждение может быть легко реализовано в лабораторных условиях, а параметры СПС в этом случае упрощают задачу определения типа волн, которыми сформирована исследуемая спекл-структура: обычными модами или оптическими вихрями. Показано, что статистические характеристики СПС волоконных световодов имеют аксиальную симметрию. Отмечено, что получаемые характеристики по всей площади выходящего излучения для обычных волноводных мод при равномерном возбуждении соответствуют известным теоретическим представлениям. Однако, в общем случае, характерные размеры спекл-пятен зависят от параметров световода и

модового состава, а СПС является анизотропной. Характерный азимутальный угловой размер спекл-пятен, т.е. при фиксированном значении угла выхода  $\theta$  ( $\theta = const$ ) –  $\Delta L_{\theta=const}$  отличается от характерного аксиального углового размера – при фиксированном значении азимутального угла  $\varphi$  ( $\varphi = const$ ) –  $\Delta L_{\varphi=const}$ . Введем величину  $\varepsilon$ , характеризующую анизотропию пространственных характеристик СПС:

$$\varepsilon = \Delta L_{\varphi=const} / \Delta L_{\theta=const}. \quad (18)$$

Методом численного моделирования выявлены следующие закономерности. В зависимости от параметров ВС, величина  $\varepsilon$  для обычных волноводных мод (далее по тексту – « $\varepsilon_m$ ») при равномерном возбуждении находилась в пределах 1.0 – 1.5, для оптических вихрей с одним направлением вращения волнового фронта – 1.3 – 2.7 (далее – « $\varepsilon_v$ ») и 0.9 – 1.3 – для оптических вихрей со случайными направлениями вращения (далее – « $\varepsilon_r$ »). При увеличении радиуса сердцевины ВС имеет место  $\varepsilon_m \rightarrow 1$ , а при уменьшении  $r_0$  – параметры  $\varepsilon_m$ ,  $\varepsilon_v$  возрастают. Например, для ВС с  $n_A=0.15$  при  $\lambda=0.6328$  мкм,  $r_0=100$  мкм получено:  $\varepsilon_m=1.12$ ,  $\varepsilon_v=1.36$ ,  $\varepsilon_r=1.21$ , а при  $r_0=50$  мкм –  $\varepsilon_m=1.37$ ,  $\varepsilon_v=1.67$ ,  $\varepsilon_r=0.94$ . В п. 4.2 на примерах рассмотрения интерференции двух волн (двух LP модовых групп либо двух оптических вихрей), а также сумм азимутальных зависимостей полей мод и вихрей объяснены полученные закономерности.

В п. 4.2 рассмотрены также случаи преимущественного возбуждения мод со сравнительно малыми значениями азимутальных индексов ( $l \ll l_{max}$ , где  $l_{max} \approx V$  – максимальный азимутальный индекс моды для данного ВС). Установлена взаимосвязь величины  $\varepsilon$  с модовым составом и показано, что имеет место  $\varepsilon > \varepsilon_m$ . Одним из отличий таких спекл-структур от СПС, сформированных излучением оптических вихрей с одним направлением вращения заключается в их различных спектральных зависимостях, которые рассмотрены в п. 4.4. В п. 4.2 представлена новая методика, позволяющая различать указанные СПС при постоянной величине  $\lambda$  и без использования

интерферометрических схем измерений с опорной плоской волной. Для этой цели излучение, выходящее из ВС, делится полупрозрачным зеркалом, а возникающие изображения с помощью оптической системы совмещаются таким образом, что перекрываются диаметрально противоположные участки одного распределения. Если СПС световода сформирована оптическими вихрями с одним направлением вращения, то в области перекрытия полей будет интерферировать излучение, имеющее противоположные пространственные направления движения волновых фронтов, что при формировании спекл-структуры эквивалентно интерференции излучения оптических вихрей с различными направлениями вращения. Соответственно, для обычных волноводных мод величина  $\varepsilon$  не изменяется, т.е. сохраняется  $\varepsilon > \varepsilon_m$ , а для оптических вихрей имеет место  $\varepsilon \approx 1$ . Экспериментальное подтверждение способа, а также основных закономерностей, выявленных методом численного моделирования, приведено в п. 4.3.

Рассмотренные примеры демонстрируют главное достоинство метода – возможность моделирования пространственных распределений интенсивности для произвольного модового состава, в частности, трудно реализуемого на практике. Полезность описанной методики численного моделирования заключается также в том, что имеется возможность получить сведения о параметрах СПС для идеализированной модели – бездефектных ВС и сравнить с параметрами реальных спекл-структур.

4.3. Экспериментальное исследование статистических характеристик спекл-структур излучения волоконных световодов. В п. 4.3 представлены результаты экспериментального исследования статистических характеристик СПС излучения многомодовых ВС. Основное внимание уделено спекл-структурам ВС со ступенчатым ППП. Установлено, что для всех исследованных ВС интегральные пространственные характеристики по всей площади выходящего излучения соответствовали расчетным (п. 4.2). При равномерном возбуждении мод ВС с  $r_0 > 50$  мкм анизотропия СПС не наблюдалась, и имело место  $\varepsilon \approx 1$ , что приблизительно соответствовало

результатам численного моделирования для обычных волноводных мод:  $\varepsilon \rightarrow 1$  при  $r_0 \rightarrow \infty$ . Для ВС с  $r_0=10$  мкм было получено  $\varepsilon=1,6$  (расчетное значение –  $\varepsilon=1,4$ ), что подтверждает тенденцию увеличения  $\varepsilon$  при уменьшении  $r_0$ . Установлено, что для большинства реальных световодов в ДЗД существуют области СПС, в которых происходит нарушение условия аксиальной симметрии статистических характеристик спеклов, обусловленное влиянием внутренних дефектов сердцевины ВС. На основании полученных результатов исследований и обобщения известных экспериментальных данных сделано предположение о неустойчивости волноводных мод многомодовых ВС, аналогично неустойчивости оптических вихрей.

При селективном возбуждении мод наклонным сфокусированным лучом, смещенным относительно оси ВС, в ДЗД наблюдалось увеличение характерного азимутального размера спекл-пятен по сравнению с размером при равномерном возбуждении мод, обусловленное возникновением оптических вихрей с одинаковыми направлениями вращения волнового фронта. Наличие оптических вихрей было экспериментально подтверждено изменением параметров СПС в зависимости от направления вращения потоков энергии, вводимого через диаметрально противоположные участки входного торца. Также экспериментально был реализован способ, описанный в п. 4.2, позволяющий наблюдать интерференцию излучения двух диаметрально противоположных участков СПС выходящего излучения. В указанной области получено уменьшение величины  $\varepsilon$  от  $\varepsilon \approx 2,0$  до 1,5, что свидетельствовало о доминирующем влиянии оптических вихрей с одинаковыми направлениями вращения при формировании спекл-структуры.

4.4. Спектральные характеристики спекл-структур многомодовых волоконных световодов. Используя методику численного моделирования, представленную в п. 4.1, были рассчитаны пространственные распределения интенсивности, выходящего из ВС со ступенчатым ППП, при различных  $\lambda$ . Определены функции взаимной корреляции (ФВК) спекл-структур при различных длинах волн. Показано, что имеет место хорошее соответствие

ФВК смоделированных и экспериментально измеренных распределений. Например, для ВС с  $r_0=100$  мкм при  $L_f=0,5$  м,  $\lambda \approx 1$  мкм и  $\theta = 0.5\theta_c$  расчетная разность длин волн  $\Delta\lambda$ , соответствующая снижению ФВК до уровня 0,5 составляла 0.4 нм, экспериментально измеренная – 0,5 нм. Указанные величины соответствовали также оценке  $\Delta\lambda$ , следующей из асимптотических формул, приводимых в п. 2.3. В п. 4.4 представлены измеренные ФВК для световодов с параболическим ППП, которые также находятся в хорошем соответствии с теоретическими оценками. Установлен ряд других закономерностей, связанных с пространственно-спектральными характеристиками СПС. В частности, показано, что длина траектории движения спекл-пятен при изменении  $\lambda$  больше величины пространственного корреляционного расстояния.

Методом численного моделирования показано, что СПС, сформированные излучением оптических вихрей с одним направлением вращения волнового фронта при изменении  $\lambda$  имеют преимущественное азимутальное направление перемещения спекл-пятен, которое можно рассматривать как эффект вращения СПС. Движение пятен СПС, образованных излучением обычных волноводных мод или оптических вихрей с различными направлениями вращения носит хаотический характер без преимущественного азимутального направления перемещения.

#### 4.5. Вращения спекл-структуры волоконных световодов при изгибах.

Известно, что при деформациях многомодовых световодов, в общем случае, происходит квазислучайное изменение спекл-структуры. Известны также некоторые виды деформации ВС, при которых происходит вращение спекл-пятен вследствие эффекта Магнуса. В п. 4.5 рассмотрен эффект вращения спеклов, ранее не описанный в литературе, и не связанный непосредственно с эффектом Магнуса. Сущность выявленного эффекта заключается в том, что при повороте изогнутого световода в плоскости, перпендикулярной плоскости вращения, происходит поворот спекл-пятен на угол, равный углу поворота световода. Данный эффект вызван тем, что при указанном виде поворота

световода при идеальной цилиндрической симметрии ВС геометрические параметры изгиба в плоскости ВС остаются неизменными, соответственно, не изменяется и разность фаз между интерферирующими модами, а плоскость изгиба ВС вращается относительно оси ВС. В данном случае изогнутый участок световода аналогичен зеркалу, расположенному наклонно относительно плоскости выходного торца световода и вращающемуся относительно оси ВС.

В п. 4.5 представлены результаты экспериментального исследования эффекта вращения спеклов в ВС с различным ППП и с различным диаметром сердцевины. Показано, что эффект наблюдается как в ближней, так и в дальней зоне дифракции. На основании выявленного эффекта создан лабораторный макет датчика угла поворота [14] и датчика линейного смещения. Главным достоинством таких датчиков является возможность использования корреляционного анализа движения спеклов, что позволяет отличить полезное воздействие на ВС от случайных микродеформаций или влияния изменения длины волны излучения. В п. 4.5 дано описание лабораторного макета и приведены основные технические требования к элементам конструкции датчика.

## **Глава 5. Квазилучевая модель для расчета диаграмм направленности и характеристик ввода в волоконные световоды.**

### **5.1. Квазилучевой подход для решения задач ввода-вывода излучения.**

Классическая лучевая модель для расчета мощности излучения, вводимого в многомодовый волоконный световод, фактически заключается в интегрировании диаграммы направленности в пределах площади торца. В данном приближении предполагается, что любой луч, падающий в площадь сердцевины, далее распространяется в световоде и достигает выходного торца, исключая величину оптических потерь. То есть, мощность выходящего излучения считают независимой от угла ввода и распространения излучения. Точность расчета эффективности ввода с использованием простейшей

лучевой модели во многих случаях недостаточна, но, самое главное, такой способ не позволяет определить диаграмму направленности излучения волоконных световодов. Необходимо отметить, что невозможно выполнить строгий расчет углового распределения интенсивности выходящего излучения, т.е. диаграммы направленности, основываясь только на теоретических представлениях распространения электромагнитного излучения в идеальных цилиндрических диэлектрических световодах. Так как, во-первых, неизвестны передаточные функции каждой отдельной волноводной моды, учитывающие дифференциальное модовое затухание и энергообмен с другими модами, во-вторых, указанная задача слишком трудоемкая и ее решение потребовало бы больших затрат времени на расчеты. Поэтому в данной работе представлен метод, основанный на применении квазилучевой модели, обладающий простотой лучевого подхода, но позволяющий учитывать угловые передаточные характеристики реальных ВС, диаграмму направленности источника и, если необходимо, рассеивающие свойства торцевых поверхностей. Сущность метода заключается в том, что интегральную угловую передаточную характеристику (УПХ) аппроксимируют функцией соответствующей реальным физическим процессам, а для расчета диаграмм направленности световодов каждому углу ввода  $\gamma$  сопоставляется теоретическое или экспериментально определяемое распределение интенсивности  $I(\gamma, \theta)$ , где  $I$  - интенсивность выходящего излучения в единичный телесный угол,  $\theta$  - угол выхода относительно оси. Как будет показано ниже, угловые передаточные характеристики, как дифференциальные, так и интегральные для различных волоконных световодов, в большинстве случаев, могут быть аппроксимированы известными математическими функциями с небольшим количеством варьируемых параметров. Если параметры аппроксимирующих функций и ДН источника излучения известны, то имеется возможность определить распределение интенсивности излучения, выходящего из световода. Таким образом, для расчета диаграммы направленности излучения световодов

достаточно задать всего несколько параметров. Используемый подход позволяет, с одной стороны, избежать сложных вычислений, связанных с собственными функциями волноводных мод, а с другой стороны, фактически учесть реальное дифференциальное модовое затухание и взаимосвязь мод при распространении излучения по световоду. Далее, используя аппроксимации угловых передаточных характеристик (УПХ) (п. 5.2.), представленный квазилучевой подход был применен, в частности, для определения влияния рассеяния на торцах ВС на характеристики выходящего излучения (гл. 6).

5.2. Аппроксимация угловых передаточных характеристик. В п. 5.2 на основании диффузионной модели расширения углового распределения получены формулы, описывающие угловые передаточные характеристики волоконных световодов. Для одномерной модели:

$$T(\gamma) = (1 - \operatorname{erf}(\frac{\gamma - \gamma_c}{\sqrt{2}\sigma})) / 2, \quad (19)$$

где  $\gamma$  - угол ввода,  $\sigma$  - полуширина углового распределения,  $\gamma_c$  - апертурный угол ВС. Для двумерной модели в цилиндрической системе координат:

$$T(\gamma) = 1 - Q(\gamma / \sigma, \gamma_c / \sigma) \quad (20)$$

где Q- функция Маркума. Для распределения интенсивности в ДЗД в малоугловом приближении при селективном возбуждении мод плоской электромагнитной волной, вводимой под углом  $\gamma$  относительно оси, исходя из функции распределения Релея-Райса, для функции распределения интенсивности при единичной мощности можно записать:

$$\mathcal{R}(\gamma, \theta, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma_F^2(\gamma)} \exp(-\frac{\theta^2 + \gamma^2}{2\sigma_F^2(\gamma)}) I_0(\frac{\theta\gamma}{\sigma_F^2(\gamma)})$$

где  $\sigma_F(\gamma)$  - полуширина углового распределения при угле ввода  $\gamma$ . Однако для задач волоконной оптики удобнее использовать безразмерную функцию с иной нормировкой:

$$R(\gamma, \theta, \sigma) = \exp(-\frac{\theta^2 + \gamma^2}{\sigma_F^2(\gamma)}) I_0(\frac{2\theta\gamma}{\sigma_F^2(\gamma)}) \quad (21)$$

Тогда мощность излучения в заданный телесный угол при угле ввода  $\gamma$  можно вычислить интегрированием (21) с учетом нормировочного множителя.

5.3. Экспериментальное определение угловых передаточных характеристик волоконных световодов. В п. 5.3 описана методика юстировки оптической системы и измерения угловых передаточных характеристик ВС, заключающаяся в измерении мощности выходящего из ВС излучения как функции угла ввода  $P(\gamma)$  при различных углах наклона оси ВС относительно лазерного луча  $\hat{\gamma}$  в плоскости, перпендикулярной плоскости угла  $\gamma$  и последующем определении угла  $\gamma_0$ , соответствующего условию осевого ввода излучения ( $\gamma = 0$ ) с использованием сплайн аппроксимации трехмерной зависимости  $P(\gamma, \hat{\gamma})$ . Рассмотрено влияние неточности юстировки оптической системы на измеряемые характеристики и возможности корректировки зависимости  $T(\gamma)$  при различных  $\hat{\gamma}$ .

В п. 5.3 представлены результаты измерений  $T(\gamma)$  световодов с различными параметрами. Для ВС со ступенчатым ППП приведено сопоставление теории (п. 5.2) и экспериментальных данных. Показано, что как функция (19), так и (20), позволяет получить хорошее соответствие с экспериментом. Наилучшую точность аппроксимации УПХ дает формула (20): среднеквадратическое отклонение  $\delta$  в диапазоне  $0 \leq \gamma < 2\gamma_c$  для исследованных ВС составляло  $2 \cdot 10^{-2}$  -  $5 \cdot 10^{-2}$ , а для формулы (19) -  $3 \cdot 10^{-2}$  -  $10^{-1}$ . Отклонение  $\delta$  при использовании гауссовской аппроксимации  $T(\gamma)$  было в 3 – 5 раз больше, чем при применении полученных формул.

## Глава 6. Влияние несовершенств торцевых поверхностей на передаточные характеристики световодов.

6.1. Теоретическая основа для учета влияния рассеяния торцевыми поверхностями световодов на характеристики выходящего излучения. В квазилучевом приближении задача ввода сведена к интегрированию индикатрисы рассеяния на входном торце ВС с учетом передаточных

характеристик. В п. 6.1 рассмотрены допущения для использованного подхода и проанализированы основные источники погрешностей при расчетах.

6.2. Индикатрисы рассеяния шероховатых и оптически неоднородных поверхностей. В п. 6.2 обобщены литературные данные по измерениям индикатрис рассеяния (ИР) и основные свойства ИР шероховатых поверхностей стекол, необходимые для создания корректных физических моделей и выполнения расчетов параметров ВС с несовершенными торцевыми поверхностями (п. 6.3-6.5).

6.3. Теория и экспериментальное исследование эффективности ввода плоской монохроматической электромагнитной волны в световоды с рассеивающей поверхностью входного торца. В 6.3. представлено теоретическое рассмотрение задачи с использованием квазилучевого подхода и приближений УПХ (п. 5.2, 5.3), а также результаты экспериментальных исследований. Показано теоретически и подтверждено экспериментально, что при рассеянии излучения на входном торце имеют место два эффекта: уменьшение эффективности ввода (ЭФ) и расширение УПХ, которые в гауссовском приближении для ИР могут быть описаны зависимостью:

$$P_v(\gamma_n) \propto k_n T(\gamma_n) + \frac{2k_d}{\sigma_n^2} \int_0^\infty T(\gamma'_n) R(\gamma_n, \gamma'_n, \sigma_n) \gamma'_n d\gamma'_n \quad (22)$$

где  $\gamma_n = \gamma / \gamma_c$ ,  $\sigma_n = \sigma_s / \gamma_c$  - нормированные угол ввода и полуширина ИР,  $\gamma'_n$  - нормированный угол рассеяния,  $P_v$  - вводимая мощность. В частности, при  $\gamma=0$  и УПХ вида (19) в гауссовском приближении ИР для относительной величины ЭВ диффузной составляющей  $P_v / P_d$  можно получить:

$$\frac{P_v}{P_d} = \frac{1}{2} \left( 1 - \sigma_p \exp\left(-\frac{\gamma_c^2}{\sigma_Q^2}\right) - \text{Erf}\left(\frac{\gamma_c}{\sigma_T}\right) - \sigma_p \exp\left(-\frac{\gamma_c^2}{\sigma_Q^2}\right) \text{Erf}\left(\frac{\gamma_c \sigma_p}{\sigma_T \sigma_Q}\right) \right) \quad (23)$$

где  $P_d$  - полная мощность диффузной составляющей ИР,  $\sigma_Q = (\sigma_T^2 + \sigma_S^2)^{1/2}$ ,  $\sigma_p = \sigma_s / \sigma_Q$ . Если  $\gamma_c \gg \sigma_T$ , то  $T(\gamma=0) \approx 1$  и отношение (23) описывает также изменение ЭВ по отношению к мощности, вводимой в ВС при нерассеивающем входном торце. Для более простых моделей УПХ световодов: ступенчатой и гауссовской имеем соответственно:

$$\frac{P_v}{P_v(\sigma_n \rightarrow 0, \gamma = 0)} = 1 - \exp\left(-\frac{I}{\sigma_n^2}\right), \quad \frac{P_v}{P_v(\sigma_n \rightarrow 0, \gamma = 0)} = \frac{I}{I + \sigma_n^2} \quad (24)$$

Установлено, что рассмотренные закономерности и методика расчета могут успешно использоваться как для ВС со ступенчатым, так и с параболическим ППП. В качестве корректирующего коэффициента  $k_s$ , позволяющего учесть негауссовский вид ИР, может использоваться экспериментально измеряемая величина полного пропускания лазерного луча пластинкой с шероховатой входной поверхностью, параметры шероховатости которой соответствует параметрам шероховатости входного торца ВС. В этом случае для уточнения формулы (22) сомножитель  $k_d$  следует заменить на  $k_d k_s$ . Точность расчета ЭВ и УПХ при шероховатом входном торце составляла 10% - 30%.

6.4. Влияние шероховатости поверхности входного торца и диаграммы направленности источника излучения на эффективность ввода в волоконные световоды. Рассмотрено изменение эффективности ввода в зависимости от полуширины ДН источника излучения при различной степени шероховатости поверхности входного торца ВС. Показано, что основной закономерностью является увеличение относительной эффективности ввода  $P/P_i$  при возрастании отношения  $\sigma_s/\gamma_c$ . Представлены результаты расчетов  $P/P_i$  для наиболее типичных случаев. Для ДН источника в виде конуса с полушириной расходимости  $\sigma_K$  с равномерной освещенностью в пределах ДН проведено сопоставление расчетных и экспериментальных данных при различных соотношениях  $\sigma_K$ ,  $\sigma_s$ ,  $\gamma_c$  и показано, что имеет место удовлетворительное соответствие. Также экспериментально измерено изменение ЭВ излучения светодиодов в ВС типа «кварц-полимер» с различными параметрами и серийно выпускаемые пластиковые ВС с соответствующим излучателем при различной высоте шероховатости поверхности входного торца. Установлено, что для реальных параметров шероховатости торцов ВС при  $k_n \ll 1$  и  $\sigma_K > \gamma_c$  отношение  $P/P_i$  оценивается величиной  $k_s$  (п. 5.4). Для рассмотренных

случаев при  $R_a > 0.3$  мкм величина  $P/P_i$  находилась в пределах 0,5 – 0,75. Экспериментально подтверждены все теоретические закономерности.

6.5. Влияние шероховатости поверхности торцов световода на модовый состав и диаграммы направленности излучения. В п. 6.5 представлена теория и результаты экспериментальных исследований модового состава и диаграмм направленности (ДН) для случаев рассеяния на входном и выходном торцах многомодовых ВС. Аналогично п. 6.3, при шероховатом входном торце, мощность, передаваемая волноводным модам, может быть представлена из двух составляющих  $P_n$ ,  $P_d$ , а для расчетов можно использовать формулу (22), заменив УПХ световода на УПХ заданной моды. Однако, принимая во внимание, что реально при любом угле ввода возбуждается широкий спектр волноводных мод, угловое распределение которого аппроксимируется функцией распределения Релея-Райса (п. 5.2), для ДН  $I(\theta)$  справедливо:

$$I(\theta) \propto \frac{k_n T(\gamma)}{\pi \sigma_F^2} R(\gamma, \theta, \sigma_F) + \frac{k_d}{\pi \sigma_S^2} \int_0^\infty \frac{T(\gamma')}{\sigma_F^2(\gamma')} R(\gamma, \gamma', \sigma_S) R(\gamma', \theta, \sigma_F) \gamma' d\gamma' \quad (25)$$

Аналогично случаю, рассмотренному в п. 6.3, при  $\sigma_S > \sigma_F$  угловое распределение расширяется, а при  $\sigma_S > \gamma_c$  модовый состав практически не зависит от угла ввода. Экспериментально установлено, что при  $R_a > 0,2$  мкм,  $\lambda = 0,6328$  мкм,  $\gamma_c \approx 25^\circ$  кольцевая структура выходящего излучения не формируется, а при  $R_a > 0,5$  мкм изменение полуширины ДН световода при изменении  $\gamma$  от 0 до  $\gamma_c$  не превышает 10% - 15%. Диаграмму направленности ВС при шероховатом выходном торце можно описать зависимостью:

$$I(\theta) \propto \frac{k_n T(\gamma)}{\pi \sigma_F^2} R(\gamma, \theta, \sigma_F) + \frac{k_d T(\gamma)}{\pi \sigma_S^2 \sigma_F^2} \int_0^\infty R(\gamma, \theta', \sigma_F) R(\theta', \theta, \sigma_S) \theta' d\theta' \quad (26)$$

где  $\theta$  - осевой угол рассеяния. Из (25) и (26) следует, что одинаковая шероховатость входного и выходного торца по-разному влияет на ДН выходящего излучения. В п. 6.5 приводится подробное теоретическое рассмотрение эффекта асимметрии влияния рассеяния на торцевых

поверхностях ВС и представлены результаты экспериментального исследования, подтверждающие основные выводы теории.

Получены формулы для расчета мощности и нелинейных искажений при фильтрации излучения полупроводниковых лазеров. Теоретические оценки снижения нелинейных искажений при рассеянии на входном торце ВС сопоставлены с результатами экспериментального исследования.

Произведена оценка величина обратно отраженного излучения от шероховатой или дефектной поверхности выходного торца световода. Установлено, что при возникновении даже небольших дефектов поверхности скошенного выходного торца (типа “APC”) качество волоконно-оптического разъема по величине обратных потерь понижается на одну категорию и более.

6.6. Использование светорассеивающего лака для равномерного возбуждения волноводных мод. В п. 6.6 представлен предложенный неразрушающий способ стандартизации измерений параметров многомодовых волоконных световодов [7], позволяющий обеспечить равномерное возбуждение волноводных мод. Способ заключается в том, что перед проведением измерений параметров ВС коллимированное оптическое излучение от источника вводят через торец световода, а на другой конец световода последовательно наносят слои светорассеивающего покрытия, например лака или эмульсии, до тех пор, пока выходящее излучение не будет полностью рассеиваться. Контроль рассеивающих свойств покрытия осуществляется по диаграмме направленности излучения, выходящего через торец световода с рассеивающим покрытием. Когда выходящее излучение станет чисто диффузным (обычно при числе слоев покрытия 2 и более), дальнейшее наращивание числа слоев прекращают и проводят измерения параметров световода, вводя излучение через торец с нанесенным покрытием. По окончании измерений светорассеивающее покрытие на торце световода смывают растворителем. Предложено в качестве меры стабильности модового состава использовать полуширину  $w_d$  распределения интенсивности  $I(\theta)$  выходящего излучения. В п. 6.6 приводятся результаты экспериментального

исследования распределений  $I(\theta)$  как функции угла ввода  $\gamma$ , на основании которых были определены зависимости  $w_d(\gamma)$ . Установлено, что среднеквадратическое отклонение  $w_d$  от среднего при  $0 < \gamma < \gamma_c$ , как для ВС со ступенчатым, так и с параболическим ППП, составляло 5% - 15% в зависимости от количества слоев светорассеивающего лака. То есть, подтверждена возможность использования светорассеивающего лака для стандартизации измерений параметров ВС, что наиболее важно для коротких отрезков световодов с большим диаметром сердцевины, в которых невозможно получить равновесное модовое распределение.

6.7. Влияние рассеяния на поверхности торцов световодов на характеристики модового шума. В п. 6.8 приведены теоретические оценки и результаты экспериментального исследования модового шума при пространственной фильтрации фотоприемником (ФП) когерентного излучения, выходящего из ВС. Установлено, что рассеяние на выходном торце ВС при равномерном возбуждении мод, независимо от вида ППП, приводит к незначительному уменьшению отношения сигнал-шум (ОСШ). Если СПС выходящего излучения сформирована оптическими вихрями с одинаковыми направлениями вращения, то ОСШ может быть существенно меньше, чем при интерференции излучения обычных волноводных мод или вихрей с различными направлениями вращения. При размерах фотоприемника, соизмеримых с размерами спекл-пятен экспериментально зарегистрировано ухудшение ОСШ в 2,5-3 раза. При нанесении шероховатости или светорассеивающего лака на поверхность выходного торца ВС ОСШ увеличивалось приближенно до величины, соответствующей равномерному возбуждению мод. Установлено, что изменение ОСШ обусловлено изменением пространственных характеристик СПС выходящего излучения. Аналогичный эффект наблюдался при селективном возбуждении отдельных мод в ВС с параболическим ППП сфокусированным лазерным лучом, смещенным относительно центра сердцевины ВС.

**В заключении** обобщены основные полученные результаты.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основным результатом работы является, прежде всего, создание новых физико-математических моделей для описания свойств волоконных световодов, улучшающих понимание физических процессов при распространении излучения по ВС и являющихся основой для развития теоретических представлений, методик численного моделирования и расчетов параметров волоконно-оптических устройств. Это позволяет создавать принципиально новые волоконно-оптические системы и методики измерений параметров световодов, выработать научно обоснованные технические требования к элементам волоконно-оптических устройств в зависимости от решаемой технической задачи.

Ниже приведено обобщенное описание полученных результатов.

1. Получены асимптотические формулы, характеризующие основные свойства волноводных мод в многомодовых волоконных световодах в виде простых арифметических выражений, ставшие основой для теоретического исследования поляризационных свойств ВС и разработки методики численного моделирования распределений интенсивности выходящего из световодов излучения.

2. Создана волновая теория деполяризации излучения в многомодовых волоконных световодах со ступенчатым ППП, изменяющая представления о поляризационных свойствах многомодовых ВС и открывающая новые возможности их практического использования. В частности, получены аналитические выражения и аппроксимации для описания степени поляризации выходящего излучения, необходимые при проектировании устройств для доставки поляризованного излучения, а также для объективной оценки качества ВС.

3. Получены аналитические выражения для описания спектрально-поляризационных биений в одномодовом двулучепреломляющем световоде с

локальным дефектом и разработана методика численного моделирования для случая множества дефектов, расширяющие возможности методов измерения параметров одномодовых волокон.

4. Разработана методика численного моделирования пространственных распределений выходящего из ВС излучения, используя которую, были определены основные пространственные и спектральные характеристики спекл-структур ВС, в том числе сформированных излучением оптических вихрей.

5. Создана методика, позволяющая различать спекл-структуры, сформированные оптическими вихрями с одним направлением вращения от СПС, образованных преимущественно волноводными модами со сравнительно малыми значениями азимутальных индексов, необходимая для экспериментального исследования свойств волоконных световодов.

6. Обнаружена новая разновидность эффекта вращения спекл-структуры выходящего излучения при изгибе световода одновременно в двух плоскостях, на основании которого был создан лабораторный макет датчика угла поворота.

7. Предложена физическая модель, позволяющая получить простые аналитические выражения для описания УПХ ВС. Разработан квазилучевой подход для решения задач ввода-вывода излучения, сохраняющий простоту классической лучевой модели, но позволяющей формально учесть влияние энергообмена между модами и дифференциальное модовое затухание.

8. Создана теория, описывающая влияние оптических неоднородностей входной и выходной торцевых поверхностей волоконного световода на параметры выходящего и обратно отраженного излучения, позволяющая выработать научно обоснованные требования к качеству торцевых поверхностей волоконных световодов в зависимости от решаемой технической задачи.

## СПИСОК НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫХ РАБОТ

1. Кизеветтер, Д.В. Асимптотические выражения для вычисления собственных чисел поперечных волн в оптических световодах / Д.В. Кизеветтер, В.И. Малюгин // Изв. ВУЗов. Радиофизика.-1985.-Т.28, №1.-С.128-132.
2. Кизеветтер, Д.В. Влияние шероховатости поверхности торца световода на эффективность ввода электромагнитного излучения / Д.В. Кизеветтер, В.И. Малюгин // ЖТФ.-1986.-Т.56, В.1.-С.68-71.
3. Кизеветтер, Д.В. Измерение угловых характеристик ввода излучения в волоконные световоды / Д.В. Кизеветтер, В.И. Малюгин // Оптика и спектроскопия.-1988.-Т.64, №5.-С.1139-1143.
4. Кизеветтер, Д.В. Метод измерения угловых характеристик световодов / Д.В. Кизеветтер, В.И. Малюгин // Оптико-механическая промышленность.-1989.-Т. 56, №9.-С48-50.
5. А.с. 1354155. Волоконно-оптический приемный модуль / Д.В. Кизеветтер, В.И. Малюгин (СССР).- БИ.-1987.-№43.
6. А.с. 1672396. Оптический соединитель волоконного световода с фотоприемником / Д.В. Кизеветтер, В.И. Малюгин (СССР).- БИ.-1991.-№31.
7. А.с. 1509793. Способ возбуждения мод многомодового волоконного световода при проведении измерений его параметров / Д.В. Кизеветтер, В.И. Малюгин (СССР).- БИ.-1989.-№35.
8. Кизеветтер, Д.В. Влияние дефектов торцевой поверхности световода на эффективность ввода излучения / Д.В. Кизеветтер, В.И. Малюгин // ЖТФ.-2002.-Т.72, В.9.-С.80-86.
9. Кизеветтер, Д.В. Асимптотические выражения для собственных чисел гибридных мод в волоконных световодах со ступенчатым профилем показателя преломления / Д.В. Кизеветтер // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 2003.-Т.46, В.3, С. 228-234.

10. Кизеветтер, Д.В. Спектрально-поляризационные характеристики несовершенных одномодовых волоконных световодов / Д.В. Кизеветтер, В.И. Малюгин // Оптика и спектроскопия.-2004.-Т.97, В.5.-С.876-879.
11. Кизеветтер, Д.В. Численное моделирование излучения многомодовых волоконных световодов / Д.В. Кизеветтер // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 2005.-Т.48, В.8, С.692-701.
12. Кизеветтер, Д.В. Волноводная теория деполяризации излучения многомодовых волоконных световодов / Д.В. Кизеветтер // Оптический журнал.-2006.-Т. 73, №11.- С. 97-99.
13. Пат. РФ № 2290606. Волоконно-оптический датчик угла поворота / Д.В. Кизеветтер, опубл. 27.12.2006 г., Бюл. №36.
14. Кизеветтер, Д.В. Асимптотические формулы для расчета длины распада линейно-поляризованных групп в волоконных световодах со ступенчатым профилем показателя преломления / Д.В. Кизеветтер // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 2007.-Т.50, В.2, С. 426 - 440.
15. Кизеветтер, Д.В. Аппроксимация угловых передаточных характеристик волоконных световодов / Д.В. Кизеветтер // Оптический журнал. 2007.- Т.74, №9.- С.20-29.
16. Кизеветтер, Д.В. Квазилучевое описание межмодовой интерференции излучения оптических вихрей в коротких волоконных световодах / Д.В. Кизеветтер // Оптический журнал. -2008.- Т.75, №1.- С. 80-82.
17. Кизеветтер, Д.В. Численное моделирование спекл-структуры, образованной излучением оптических вихрей многомодового волоконного световода / Д.В. Кизеветтер // Квантовая электроника. - 2008.- Т.38, № 2.- С. 168-171.
18. Кизеветтер, Д.В. Характеристики спекл-структур излучения волоконных световодов / Д.В. Кизеветтер // Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2008, №3, С. 72-80.