

ВВЕДЕНИЕ

Физико-математическая основа теории распространения излучения в волоконных световодах (ВС) была создана в 60 - 70х годах прошлого века. Уровень развития теории был достаточным для коммерческого использования волоконно-оптических устройств. Появление и широкое внедрение полупроводниковых лазеров (ППЛ) в 80-х дало техническую возможность для создания конкурентоспособных волоконно-оптических систем передачи данных. Существующие теоретические и экспериментальные данные обобщены в монографиях, как, например [1-7], научных обзорах [8-10] и учебниках [11-13]. Развитие вычислительной техники и программных средств за последние 30 лет существенно повлияло на развитие всей науки и техники, в том числе и на волоконную оптику. Это изменило подход к решению различных теоретических и прикладных задач, дало возможность проверить численными методами многие теоретические формулы и закономерности, полученные ранее. В настоящее время возникает две крайности при решении физических задач, которые часто считают альтернативными подходами. Это – использование строгих аналитических методов и исключительно численных расчетов. Однако не каждая задача имеет аналитическое решение, и даже если такое решение найдено, то для большинства задач математической физики это решение представляет собой функциональный ряд, который сложно использовать для прикладных целей. В некоторых случаях для таких решений сложно получить даже какое-либо численное значение из-за плохой сходимости ряда. Использование только численных методов затрудняет анализ полученных результатов. Сложно выявить влияние различных факторов, параметров и граничных условий на получаемые зависимости. Поэтому, во многих случаях, совместное применение, как аналитических решений, так и численных методов позволяет достичь наилучших результатов. Именно такой подход к решению задач волоконной оптики рассматривается в представленной диссертации.

Появление современных технологий производства волоконных световодов открыло возможность новых технических применений ВС, относящихся не к передаче данных, а к передаче оптического излучения. Для этих целей широко используются волоконные световоды со ступенчатым профилем показателя преломления (ППП), обеспечивающие высокую эффективность ввода и большие передаваемые мощности оптического излучения. В зависимости от решаемой технической задачи наиболее важными характеристиками ВС являются: лучевая прочность, спектральное затухание, угловая передаточная характеристика (в простейшем случае – числовая апертура), диаграмма направленности и степень поляризации выходящего излучения, а в некоторых случаях – параметры спекл-структуры.

Применение ВС со ступенчатым ППП для доставки мощного оптического излучения [14] тесно связано с новым направлением в технике – использованием оптических ловушек для манипулирования микрочастицами [15]. Важным преимуществом многомодового волоконного световода, как будет показано ниже, является возможность создавать в ВС оптические вихри высокого порядка, что сложно осуществить с использованием голографических дифракционных элементов и невозможно – при использовании одномодовых световодов, в том числе микроструктурированных. Помимо упомянутого выше использования многомодовых ВС для создания оптических ловушек существуют и другие применения световода в качестве генератора оптических вихрей, в частности, для диагностики винтообразных внутренних напряжений в прозрачных средах. Для всех указанных применений важными характеристиками ВС для расчетов таких систем являются: диаграмма направленности, модовый состав и поляризация выходящего излучения.

В литературном обзоре (гл. 1) показано, что в настоящее время фактически не существует волновой теории, использующей волноводные свойства мод ВС для описания поляризационных явлений в многомодовых волоконных световодах со ступенчатым ППП без наведенного двулучепреломления. Не существует и простой методики, позволяющей рассчитать диаграмму направленности излучения многомодового ВС со ступенчатым ППП с учетом конверсии волноводных мод. До настоящего времени не было известно влияние оптических вихрей в ВС на параметры формируемой спекл-структуры (СПС), а также не существовало методики оценки влияния шероховатости или оптической неоднородности торцевых поверхностей световода на характеристики распространяющегося и выходящего излучения.

Разработка и создание принципиально новых типов волоконно-оптических устройств невозможно без дальнейшего развития теории и частичного переосмысления существующих теорий, методов расчетов, трактовки ранее полученных экспериментальных данных. Принимая во внимание, что за прошедшие 50 лет, используя только аналитические или только численные методы, не удалось решить указанные выше задачи, необходимо искать новые подходы и методы решений широкого круга задач волоконной оптики.

С учетом вышеизложенного, сформулированы следующие цели 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 являлось 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.

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 проектировании 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.

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 опубликованы в [16-64].

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 ЧМ 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.