

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Ольги Николаевны Егоровой на тему «Структуры волоконных световодов, образованные элементами из стекла различного состава» представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 «Лазерная физика»

Диссертация О.Н.Егоровой посвящена поиску и развитию новых подходов к созданию волоконных световодов. Для волоконных источников излучения с высокой мощностью и энергией требуется создание оптических одномодовых волокон, активированных редкоземельными ионами, с увеличенным диаметром поля моды. Для увеличения скорости передачи информации по одному оптическому волокну необходимо разрабатывать волокна, в которых сигнал передается в различных сердцевинах многосердцевинного волокна.

Одним из новых походов, получивших в последнее время широкое распространение, явилось создание дырчатых микроструктурированных световодов как с поллой сердцевиной, так и с сердцевиной из стекла. Исследование таких структур показало, что они обладают уникальными оптическими характеристиками, например, дисперсионными, открывающими новые возможности использования нелинейно-оптических эффектов, обладают высокой нелинейностью, могут иметь полую сердцевину.

Тем не менее, возможна разработка других подходов к созданию новых видов оптического волокна, и которым было посвящено гораздо меньше внимания исследователей, – а именно создание волноводной структуры за счет множества элементов, состоящих из стекла различного состава с различным показателем преломления. Кроме того, существует также направление создания волоконных световодов методом «стержень в трубке», а также путем спекания различных материалов в трубке из кварцевого стекла, и, за счет этого, получение уникального состава стекла сердцевины.

Использованные в работе подходы основаны на создании структур волоконных световодов, которые содержат множество элементов из легированного кварцевого стекла, расположенных в пределах поперечного сечения световода, либо имеют сердцевину с уникальным составом. Изготовление таких структур невозможно только за счет использования методов осаждения кварцевого стекла из газовой фазы, поскольку, во-первых, технология создания световодов этими методами позволяет получать по большей части только цилиндрически симметричную структуру, состоящую из сердцевины и оболочки, а также концентрических слоев легированного кварцевого стекла. Кроме того, максимально достижимая в процессе осаждения кварцевого стекла из газовой фазы концентрация легирующих компонент ограничена. Поэтому в диссертации эти структуры были получены либо с использованием дополнительных технологических процессов, либо совсем без использования методов осаждения стекла из газовой фазы. В работе рассматривалось также использование данного подхода для создания волоконных световодов в зависимости от различных направлений их применения. Таким образом, к моменту начала работы над диссертацией стояла проблема поиска, создания и исследования новых структур одномодовых волоконных световодов с диаметром поля моды свыше 15–17 мкм, не содержащих отверстий в поперечном сечении. Для ее успешного решения требовалось детальное понимание механизмов распространения оптического излучения в подобных структурах, преимущественно предназначенных для работы в спектральном диапазоне в окрестности 1000 нм. При этом вся область прозрачности, в которой целесообразно использование световодов на основе кварцевого стекла, составляет примерно от 600 до 1700 нм.

В диссертации О.Н.Егоровой выполнен поиск и исследование новых структур световодов, не содержащих отверстия в поперечном сечении, волноводная структура которых образована элементами из стекла различного состава. Таким образом, тема работы является, несомненно, актуальной и практически значимой. Следующим значительным этапом в области исследований новых структур волоконных световодов, последовавшим после появления микроструктурированных световодов, явилось начало активных

исследований многосердцевинных световодов в 2009-2010 гг. Многосердцевинные световоды – это световоды с несколькими сердцевинами, расположенными в единой оболочке. При этом каждая сердцевина является элементом из легированного, например оксидом германия, кварцевого стекла, расположенным в нелегированном кварцевом стекле. Несмотря на то что эти структуры были предложены еще в 1979 году, интерес к ним возник только в конце первого десятилетия этого века. Это произошло в связи с тем, как было показано, что с использованием существующих форматов модуляции передаваемого сигнала и уплотнения каналов была достигнута предельная скорость передачи информации по односердцевинному волоконному световоду, которая оценивалась как 100 Тбит/с. В связи с этим был предложен еще один способ уплотнения каналов – пространственное уплотнение каналов, использующий передачу сигнала в различных сердцевинах многосердцевинного волоконного световода. Благодаря использованию световодов с несколькими сердцевинами, которые оптически не связаны между собой, скорость передачи информации по одному световоду может быть увеличена в число раз, равное числу сердцевин. Однако при создании многосердцевинного световода с большим количеством сердцевин возникают ограничения с двух сторон. С одной стороны, в результате взаимодействия между модами соседних сердцевин возникают перекрестные оптические помехи, то есть перетекания части мощности из одной сердцевины в другую. Для снижения перекрестных помех сердцевинны должны быть расположены на достаточно большом расстоянии друг от друга. Поэтому для того, чтобы увеличить количество сердцевин, необходимо увеличить внешний диаметр световода. Увеличение диаметра волоконного световода свыше 220–250 мкм приводит к снижению его механической надежности, то есть к увеличению вероятности разрушения световода с течением времени из-за повышения скорости роста трещин на поверхности оболочки из кварцевого стекла, вызванного увеличением механического напряжения при изгибе световода. Снижение механической надежности неприемлемо для телекоммуникационных волоконных световодов, предназначенных для использования в течение длительного промежутка времени. В связи с этим для создания световода с максимальным количеством сердцевин необходим поиск решений, позволяющих при заданной величине перекрестных оптических помех снизить расстояние между сердцевинами. Поэтому актуальной являлась проблема снижения расстояния между сердцевинами в многосердцевинном световоде при заданной величине перекрестных оптических помех. Хотя интерес, возникший к многосердцевинным световодам в конце первой – начале второй декады 21 века, связан в первую очередь с развитием линий связи, многосердцевинные световоды рассматриваются также с точки зрения применения в других областях, в первую очередь в сетях доступа, поскольку позволяют сократить количество кабелей, а также при передаче данных в центрах обработки и в многопроцессорных системах, поскольку позволяют упростить и уменьшить габариты трактов передачи сигнала в центрах обработки и хранения данных и суперкомпьютерах.

Кроме того, многосердцевинные световоды перспективны для применений в качестве чувствительных элементов датчиков. Еще одной областью, где многосердцевинные световоды могут найти применение, является радиофотоника – область, изучающая генерацию, обработку и передачу сигнала радиодиапазона оптическими методами.

Одним из основных элементов, используемых в радиофотонике, являются линии задержки сигнала. Линии задержки на односердцевинных волоконных

световодах в настоящее время широко используются и производятся рядом предприятий (ЗАО «Центр ВОСПИ», ЗАО «ЦНИТИ Техномаш-ВОС»). Для ряда задач радиофотоники, связанных в первую очередь с радиолокацией и радиоэлектронным противодействием, необходимы линии задержки, осуществляющие длительную задержку сигнала и являющиеся частью бортового оборудования. Реализация таких линий задержки с использованием односердцевинных световодов приводит к значительным массе и габаритам соответствующих устройств за счет большой длины световода, что неприемлемо для ряда задач, особенно связанных с применениями на борту летательных аппаратов. В связи с этим актуальной проблемой являлся поиск и практическая реализация решений, основанных на использовании новых структур волоконных световодов и направленных на сокращение длины волоконного световода, необходимой для создания линии задержки сигнала.

Целями работы были:

Разработка теоретических положений и моделей, экспериментальных методик и технологических подходов, необходимых для создания новых структур волоконных световодов, одномодовых, с увеличенным диаметром поля моды; с высокой концентрацией активных редкоземельных ионов; а также многосердцевинных волоконных световодов, в которых снижение перекрестных оптических помех достигается за счет особенностей структуры.

Для достижения поставленной цели были решены следующие основные задачи:

Изучение закономерностей локализации излучения и численное моделирование параметров различных волноводных структур, включая микроструктурированные световоды, локализирующие излучение за счет образования фотонной запрещенной зоны, и многосердцевинные световоды;

разработка технологических подходов и решений для изготовления различных видов волоконных световодов, включая микроструктурированные световоды, композитные световоды с сердцевиной, изготовленной из фосфатного стекла, и оболочкой из кварцевого стекла, многосердцевинные световоды;

изучение характеристик полученных световодов, а также изучение зависимости характеристик световодов от параметров структуры и других факторов;

разработка принципов создания и экспериментальная реализация элементов функциональных устройств на основе разработанных структур волоконных световодов.

Научная новизна работы определяется тем, что:

Впервые исследованы особенности распространения оптического излучения по волоконному световоду с сердцевиной из кварцевого стекла и оболочкой, являющейся двумерным фотонным кристаллом, который состоит из элементов (цилиндров) с повышенным показателем преломления, с малым отношением диаметра элемента к расстоянию между центрами соседних элементов (0,1–0,3) и значительным расстоянием между центрами соседних элементов (примерно 10–12 мкм).

Установлено, что в таком типе световодов может быть получена локализация излучения в сердцевине в спектральном диапазоне, соответствующем фундаментальной запрещенной зоне фотонно-кристаллической оболочки. При этом минимальные оптические потери лежат в диапазоне 1000–1500 нм и составляют 20–30 дБ/км, а спектральная ширина зоны локализации моды сердцевины зависит от параметров оболочки и сердцевины и составляет несколько сотен нанометров по уровню 100 дБ/км.

Обнаружено, что в световодах с сердцевинной из кварцевого стекла и оболочкой, являющейся двумерным фотонным кристаллом с отношением диаметра элемента к расстоянию между центрами соседних элементов менее 0,4, в случае если сердцевина световода образована одним отсутствующим элементом оболочки, она является одномодовой в пределах всего спектрального диапазона фундаментальной запрещенной зоны за счет снижения эффективной разности показателей преломления сердцевины и оболочки с уменьшением длины волны. Одномодовость в широком спектральном диапазоне позволяет получить структуру одномодового световода с увеличенным диаметром моды. С учетом этого эффекта, а также экспериментально показанной возможности получить локализацию моды сердцевины в фундаментальной запрещенной зоне с центром в окрестности длины волны 1000 нм при достаточно большом диаметре сердцевины (около 20 мкм) с приемлемыми оптическими потерями,

предложен новый подход к созданию активных световодов с увеличенным диаметром поля моды для мощных лазеров и усилителей, основанный на использовании световодов данной конструкции.

Впервые обоснована правомерность нового подхода к созданию активных композитных световодов методом «стержень в трубке» с сердцевинной, изготовленной из фосфатного стекла, и оболочкой из кварцевого стекла.

Впервые показано, что данный вид световодов обладает приемлемыми для практического использования оптическими потерями на уровне 1–2 дБ/м, а также высокой механической прочностью самого световода – 5–7 ГПа – и мест его соединений, определяемой качеством поверхности оболочки из кварцевого стекла.

В световодах, легированных эрбием и иттербием, при накачке по оболочке дифференциальная эффективность генерации относительно введенной мощности накачки составила 28% при длине световода порядка 50 см.

В световодах, легированных только иттербием, дифференциальная эффективность генерации относительно введенной мощности накачки при накачке по сердцевине составила 74% и была достигнута при длине световода всего 5 см. Достигнутый уровень эффективности лазерной генерации близок к уровню эффективности в световодах на основе кварцевого стекла, но при этом оптимальная длина активного композитного световода существенно меньше. В изготовленных композитных световодах также обнаружено наличие фоточувствительности к действию излучения на длине волны 248 нм, что позволяет формировать резонатор лазера непосредственно в сердцевине активного световода.

Теоретически предсказан и экспериментально реализован новый подход к снижению перекрестных оптических помех в многосердцевинных волоконных световодах, заключающийся во введении барьерного слоя с пониженным показателем преломления между сердцевинами. Наличие такого барьерного слоя, расположенного на некотором расстоянии от сердцевины, позволяет снизить взаимодействие между модами соседних сердцевины за счет снижения поперечной компоненты напряженности поля моды в области барьерного слоя.

Впервые экспериментально реализована структура гетерогенного многосердцевинного волоконного световода прямоугольного поперечного сечения с сердцевинами, расположенными в один ряд. Экспериментально показано, что, благодаря существованию эффекта преимущественного направления изгиба за счет прямоугольной формы поперечного сечения, использование данной структуры

световода позволяет избежать роста перекрестных оптических помех между сердцевинами, вызванного уменьшением разности постоянных распространения мод соседних сердцевин при приближении радиуса изгиба световода к критическому. Однако при малых диаметрах изгиба (менее 1-2 см) за счет увеличения связи мод сердцевин с модами оболочки происходит резкое возрастание перекрестных оптических помех.

На основе разработанных конструкций световодов предложены новые подходы к реализации ряда элементов функциональных устройств: предложено и экспериментально реализовано решение, позволяющее снизить массу и габариты волоконно-оптических линий задержки за счет использования последовательного прохождения сигнала по сердцевинам многосердцевинного волоконного световода; впервые получены одночастотные волоконные лазеры на композитных волоконных световодах, легированных ионами эрбия; предложен и реализован новый метод создания интегрированного в структуру волоконного световода интерферометра Фабри–Перо, основанный на сварке композитного световода в электрическом разряде.

Теоретическая ценность работы определяется тем, что, в частности, определена зависимость модового состава сердцевины от параметров световода с фотонной запрещенной зоной при отношении диаметра элемента к расстоянию между центрами соседних элементов периодической оболочки менее 0,4.

Показано, что сердцевина световода, сформированная одним отсутствующим элементом оболочки, является одномодовой в пределах всей фундаментальной запрещенной зоны.

На основании расчета и анализа зонных диаграмм объяснен эффект одномодовости в широком спектральном диапазоне. Этот вывод подтверждает сделанный ранее Ф.Расселом вывод о причинах наличия *endlessly single mode regime* на основе более детальных расчетов.

Предложено использование барьерного слоя (*trench*) с пониженным показателем преломления для снижения перекрестных оптических помех в многосердцевинных волоконных световодах; объяснен механизм снижения перекрестных помех.

Могу отметить, что я участвовал в проверке выводов данной части работы, используя свои программы для расчета волноводных свойств микроструктурных волокон, и выводы автора нашли полное подтверждение.

Отмечу также, что работа с автором диссертации была комфортной и результативной.

Это является также одним из доказательств несомненной достоверности результатов работы, которая обеспечена применением современных экспериментальных методов исследования и численного моделирования свойств волоконных световодов, корреляцией экспериментальных данных и результатов численного моделирования, а также тем, что направления исследований, предложенные в диссертации, получили дальнейшее продолжение также и в работах других научных групп. Работа прошла хорошую апробацию, выполнялась в рамках работы по грантам и программам, замечаний по автореферату нет.

Совокупность изложенных в диссертации результатов свидетельствует о мировом научном уровне работы, перспективности и актуальности тематики исследований, высокой научно-теоретической и практической значимости.

Диссертация представляет собой крупный вклад в теорию и технологию

волоконно-оптических световодов, для различных применений, свидетельствует о высокой научной квалификации О.Н. Егоровой, автореферат полностью отражает содержание работы и публикаций. Работа удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Егорова О.Н. несомненно заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 «Лазерная физика».

Заведующий кафедрой «Приборостроение»
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»
доктор физико-математических наук,
профессор

Л.А. Мельников

« 30 » апреля 2021 г.

Подпись Л.А. Мельникова удостоверяю
Ученый секретарь СГТУ имени Гагарина Ю.А.
доктор культурологии, доцент



Н.В. Тищенко