

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

АО «НПО им. С. И. Вавилова»

К.т.н. К.В. Дукельский



2021 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Акционерного общества «Научно-производственное объединение

Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова»

на диссертационную работу Егоровой Ольги Николаевны «Структуры волоконных световодов, образованные элементами из стекла различного состава», представленную к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21- Лазерная физика.

Расширение возможностей применения волоконно-оптических технологий приводит к появлению новых требований к характеристикам оптических волокон. Для увеличения мощности и энергии волоконных источников излучения с высоким качеством пучка необходимо создание активных оптических волокон, одномодовых, с увеличенным диаметром поля моды. Сердцевина световода со ступенчатым профилем показателя преломления при увеличении диаметра становится многомодовой. Перспективными структурами для создания световодов с большим диаметром поля моды являются микроструктурированные световоды с дырчатой оболочкой, однако наличие отверстий в поперечном сечении затрудняет процесс их изготовления и использования, а также приводит к снижению механической прочности. Перечисленных недостатков лишены структуры световодов, которые не содержат отверстий в поперечном сечении. Поэтому к моменту начала работы над диссертацией актуальной являлась проблема поиска новых структур одномодовых волоконных световодов с увеличенным диаметром поля моды, не содержащих отверстия в поперечном сечении.

Развитие волоконных лазеров с короткой длиной резонатора, а именно одночастотных волоконных лазеров, а также импульсных лазеров с высокой частотой повторений, привело к необходимости использования активных световодов с высокой концентрацией редких земель. К моменту начала работы над диссертацией существовали, с одной стороны, активные световоды на основе кварцевого стекла, концентрация редкоземельных ионов в которых ограничена, а, с другой стороны, световоды, целиком состоящие из фосфатного стекла, с высокой концентрацией редкоземельных ионов, но с низкой механической прочностью и плохой совместимостью с другими световодами из-за различия физико-химических свойств. В этой связи большой практический интерес представляла разработка волоконных световодов с высокой концентрацией активных редкоземельных ионов, обладающих высокой механической прочностью и надежностью и хорошей совместимостью со световодами из кварцевого стекла.

Достижение предела скорости передачи информации по односердцевинному волоконному световоду в 2009-2010 гг. послужило стимулом к развитию пространственного уплотнения каналов или передачи сигнала в различных сердцевинах многосердцевинного волокна. При создании многосердцевинного световода с большим

количеством сердцевин возникают ограничения с двух сторон. С одной стороны, для снижения перекрестных оптических помех сердцевина должны быть расположены на достаточно большом расстоянии друг от друга. С другой стороны, увеличение диаметра волоконного световода свыше 220–250 мкм приводит к снижению его механической надежности, что недопустимо для телекоммуникационных световодов. Поэтому к моменту начала работы над диссертацией стоял вопрос о возможности снижения расстояния между сердцевинами в многосердцевинном световоде при заданной величине перекрестных оптических помех.

В этой связи диссертационная работа О.Н. Егоровой, посвященная поиску и развитию новых подходов к созданию волоконных световодов без отверстий в поперечном сечении, волноводная структура которых либо образована элементами из стекла различного состава, либо имеет уникальный состав сердцевины, является актуальной и имеет большую практическую ценность.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 231 страницу, диссертация содержит 112 рисунков, 9 таблиц и 262 наименования цитируемой литературы.

Введение содержит формулировку цели и задач работы; обоснование актуальности, научной новизны, практической значимости полученных результатов; формулировку защищаемых положений, а также сведения об апробации и о публикациях по теме диссертации.

В **первой главе** приведен обзор литературы, посвященной различным типам волоконных световодов. Проанализированы характеристики ряда существовавших на момент начала работы над диссертацией структур оптических волокон, а именно: одномодовых световодов с увеличенным диаметром поля моды для мощных волоконных лазеров и усилителей; световодов с сердцевиной из стекла, локализирующих излучение за счет образования фотонной запрещенной зоны; композитных световодов с сердцевиной, изготовленной из фосфатного стекла, и оболочкой из кварцевого стекла; многосердцевинных волоконных световодов. Определены недостатки перечисленных структур, связанные с их практическим применением, а также существовавшие на момент начала работы проблемы, для решения которых был необходим поиск и обоснование правомерности новых подходов к созданию оптических волокон. На основе данных формулировок определены основные направления исследований.

Во **второй главе** представлены результаты исследований волоконных световодов с сердцевиной из стекла, локализирующих излучение за счет образования фотонной запрещенной зоны. В световодах такого типа, имеющих малое отношение диаметра элемента периодической оболочки d к расстоянию между центрами соседних элементов Λ – менее 0,3, впервые изучены особенности распространения излучения. Показано, что в световоде с d/Λ в диапазоне 0,1–0,3, локализация излучения в сердцевине наблюдается в спектральном диапазоне, соответствующем фундаментальной запрещенной зоне фотонно-кристаллической оболочки, минимальные оптические потери не превышают 20–30 дБ/км, а ширина запрещенной зоны по уровню 100 дБ/км составляет несколько сотен нанометров. Диаметр изгиба световода при этом составляет около 30 см.

Экспериментально и теоретически установлено, что световоды с отношением $d/\Lambda < 0,4$ и с сердцевиной, образованной одним отсутствующим элементом оболочки, являются одномодовыми в пределах всей фундаментальной запрещенной зоны. Предложена качественная модель, основанная на анализе зонных диаграмм, позволяющая объяснить эффект одномодовости в пределах фундаментальной запрещенной зоны.

Существование одномодового режима в широком спектральном диапазоне означает также, что одномодовый режим существует и в широком диапазоне

геометрических параметров структуры, в том числе и при большом значении диаметра сердцевин. На основании этого, а также экспериментально показанной возможности получения световода с диаметром поля моды около 20 мкм и приемлемыми оптическими потерями, в работе предложено использовать данную структуру для создания одномодовых световодов с большим диаметром сердцевин для волоконных лазеров и усилителей с высокой выходной энергией и мощностью и высоким качеством пучка. Благодаря отсутствию воздушных отверстий в поперечном сечении, а также малому отношению d/Λ данная структура обладает рядом преимуществ по сравнению с существующими аналогами.

В третьей главе представлены результаты исследований композитных световодов. В результате проведенных исследований обоснована правомерность нового подхода к созданию активных волоконных световодов методом «стержень в трубке» из фосфатного и кварцевого стекла. Полученные результаты демонстрируют потенциал такого типа световодов для создания волоконных лазеров и усилителей.

В рамках работы показано, что с помощью метода «стержень в трубке» возможно повторяемое изготовление данного вида световодов. Обнаружено, что среди исследованных составов фосфатного стекла волоконный световод может быть изготовлен только из состава, содержащего алюминий и бор.

Исследование серии полученных световодов подтвердило, что в процессе вытяжки происходит взаимная диффузия фосфатного и кварцевого стекол, за счет чего содержание оксида фосфора в сердцевине уменьшается до величины 30–35 мол.%. Однако эта величина намного больше концентрации, которая может быть достигнута в процессе осаждения стекла из газовой фазы. Обнаружено, что оптические потери в серии исследуемых световодов, измеренные вне областей поглощения редкоземельных ионов, составляют около 1–3 дБ/м и соответствуют уровню оптических потерь в исходном фосфатном стекле.

Показано, что композитные световоды могут быть соединены с другими световодами с помощью процесса сварки в электрическом разряде без образования дефектов в местах соединений. Механическая прочность композитных световодов и мест их соединений с другими световодами определяется качеством поверхности кварцевого стекла оболочки и соответствует механической прочности световодов, целиком состоящих из кварцевого стекла.

Установлено, что в композитных световодах, активированных редкоземельными ионами, может быть получена высокая дифференциальная эффективность генерации, сравнимая с уровнем эффективности в световодах на основе кварцевого стекла. При этом оптимальная длина композитного световода в несколько раз меньше.

Четвертая глава посвящена проблеме снижения перекрестных оптических помех в многосердцевинных волоконных световодах. Предложен новый подход к снижению перекрестных оптических помех между сердцевинами за счет уменьшения величины напряженности поля моды одной сердцевин в области другой сердцевин, что приводит к снижению коэффициента связи, за счет использования барьерного слоя с пониженным показателем преломления между сердцевинами. Экспериментально показано, что наличие такого слоя приводит к значительному снижению перекрестных оптических помех в гомогенных световодах круглого поперечного сечения.

Впервые изготовлен гетерогенный многосердцевинный световод с прямоугольным поперечным сечением и двумя типами сердцевин, попеременно расположенными в один ряд. Экспериментально показано, что наличие преимущественного направления изгиба в световоде с прямоугольным поперечным сечением и сердцевинами, расположенными в один ряд, позволяет избежать увеличения перекрестных помех при изгибе.

В пятой главе продемонстрирована возможность создания элементов функциональных устройств с использованием разработанных конструкций световодов, в том числе на базе новых принципов, предложенных в рамках диссертационной работы.

Предложено и экспериментально реализовано решение, позволяющее уменьшить длину волоконно-оптических линий задержки за счет последовательного прохождения оптического сигнала по сердцевинам многосердцевинного волоконного световода. Снижение длины световода пропорционально количеству сердцевин позволяет сократить массу и габариты устройства, что важно для практического применения. Линия задержки на многосердцевинном оптическом волокне экспериментально реализована в рамках диссертационной работы.

Показана возможность создания одночастотного волоконного лазера на композитном световоде. Для этого разработан одномодовый композитный световод, легированный ионами эрбия. Обнаружено, что композитный световод является фоточувствительным к действию излучения на длине волны 248 нм, а наводимая разность показателей преломления достаточна для записи волоконной брэгговской решетки и формирования резонатора одночастотного лазера непосредственно в активном волоконном световоде. Впервые экспериментально реализованы одночастотные волоконные лазеры с резонатором, сформированном непосредственно в сердцевине композитного световода.

В заключении сформулированы основные результаты работы и выводы, полученные в результате проведенных в диссертационной работе исследований.

В диссертационной работе можно выделить следующие наиболее важные результаты:

1. Впервые изучены свойства волоконных световодов, локализирующих излучение за счет образования фотонной запрещенной зоны, с сердцевиной из стекла и оболочкой, представляющей собой двумерный фотонный кристалл, с отношением диаметра элемента d к расстоянию между центрами соседних элементов $\Lambda=0,1-0,2$. Установлено, что минимальные оптические потери составляют около 20–30 дБ/км, а спектральная ширина области локализации моды сердцевины в пределах фундаментальной запрещенной зоны составляет несколько сотен нанометров (по уровню 100 дБ/км).

2. Экспериментально и теоретически показано, что световоды с фотонной запрещенной зоной и сердцевиной из стекла, образованной одним отсутствующим элементом оболочки, при $d/\Lambda < 0,4$ являются одномодовыми в пределах спектрального диапазона фундаментальной запрещенной зоны оболочки. На основании этого предложен новый подход к созданию активных световодов с увеличенным диаметром поля моды для мощных лазеров и усилителей.

3. Обоснована перспективность нового подхода к созданию активных волоконных световодов методом «стержень в трубке» с сердцевиной, изготовленной из фосфатного стекла, и оболочкой из кварцевого стекла (композитных световодов). Показано, что в световодах, полученных данным методом, уровень дифференциальной эффективности лазерной генерации соответствует уровню эффективности в световодах на основе кварцевого стекла. При этом оптимальная длина композитного световода в несколько раз меньше.

4. В композитных световодах обнаружено наличие фоточувствительности к действию излучения на длине волны 248 нм. Продемонстрирована возможность создания одночастотного волоконного лазера с резонатором, образованным волоконными брэгговскими решетками, записанными непосредственно в сердцевине одномодового композитного световода.

5. Предложен новый подход к снижению перекрестных оптических помех между сердцевинами в многосердцевинном волоконном световоде, основанный на введении между сердцевинами слоя с пониженным показателем преломления. Экспериментально показано, что введение слоя с пониженным показателем преломления приводит к значительному снижению перекрестных оптических помех.

6. Экспериментально показано, что в гетерогенном многосердцевинном световоде прямоугольного поперечного сечения с двумя типами сердцевинок, попеременно расположенными в один ряд, благодаря существованию преимущественного направления изгиба, связанного с некруглой формой поперечного сечения световода, подавлен нежелательный рост перекрестных оптических помех при приближении радиуса изгиба световода к критическому.

Результаты, полученные в диссертационной работе, имеют практическую значимость. Разработанные в диссертации структуры волоконных световодов могут быть использованы при создании компонентной базы для таких областей, как квантовая электроника, радиофотоника, оптические телекоммуникации. Разработанные структуры одномодовых световодов с увеличенным диаметром поля моды и композитных световодов позволяют улучшить выходные характеристики волоконных лазеров и усилителей. Предложенные в работе способы снижения перекрестных оптических помех и разработанные структуры многосердцевинных световодов имеют практическую ценность с точки зрения совершенствования характеристик систем передачи и обработки оптического сигнала в телекоммуникациях и других областях.

Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов обеспечена применением современных экспериментальных методов исследования и численного моделирования параметров оптических волокон, корреляцией экспериментальных данных и результатов численного моделирования, использованием современных методов исследования, а также широкой апробацией материалов диссертации.

Наличие публикаций в высокорейтинговых журналах и приглашенных докладов на конференциях подтверждают научную ценность работы. Важность и актуальность полученных в диссертации результатов подтверждает также и то, что направления исследований, предложенные в диссертации, получили дальнейшее продолжение в работах других научных групп.

Отметим ряд замечаний, возникших при изучении материала работы:

1. Для создания преформы и последующей вытяжки из нее оптического волокна в диссертационной работе использовался известный метод «стержень-трубка». В таком подходе стекла для стержня и трубки по составу могут быть разными, но одним из основных требований к такой технологии является близость коэффициентов термического линейного расширения (КТЛР) материалов стержня и трубки. В диссертационной работе в качестве трубки использовалось кварцевое стекло, а в качестве стержня - фосфатное стекло. Известно, что кварцевые и фосфатные стекла имеют различные КТЛР, которые могут отличаться более чем в 10 раз. Возникает вопрос, который не рассмотрен в работе – насколько такая большая разница в КТЛР влияет при охлаждении заготовки и оптического волокна на напряжения, дефекты и трещины на границе сердцевина-оболочка и на само оптическое качество (оптические потери) волокна?
2. В диссертационной работе продемонстрированы эксперименты по записи брэгговских решеток в оптическом волокне. Как правило, такие решетки записываются в силикатном стекле с добавками германия. Работ в этом направлении чрезвычайно много, и такие волоконные брэгговские решетки сегодня крайне востребованы на рынке фотоники. В

диссертационной работе реализована запись волоконных брэгговских решеток в фосфатном стекле. Более того, в работе подчеркнута, что впервые «...обнаружено наличие фоточувствительности к действию излучения на длине волны 248 нм, что позволяет формировать резонатор лазера непосредственно в середине активного световода...». В диссертационной работе не указано, какие именно записываются решетки: амплитудные, амплитудно-фазовые или фазовые, не раскрыт механизм записи таких решеток, не установлено, какой фактор наиболее сильно влияет на фоточувствительность фосфатного стекла. Фоточувствительность на длине волны 248 нм у световода на фосфатном стекле автором обнаружена, а механизм не исследован. Также не раскрыта методическая часть, касающаяся записи брэгговских решеток. Какая была схема записи – использовалась фазовая маска или интерферометр Тальбота? Решетка записывалась с одного импульса или многократно облучалась?

3. Не проводилось сопоставление фоточувствительности волокна на основе фосфатного стекла без эрбия и с эрбием. Осталось неясным, как добавки эрбия изменяют фоточувствительность волокна, так как запись брэгговских решеток осуществлялась в УФ диапазоне (248 нм и 193 нм), а у эрбия в этом диапазоне много полос поглощения, т.е. не повлияло ли добавление эрбия в фосфатное стекло на снижение его фоточувствительности? Насколько брэгговские решетки, записанные в активированном фосфатном волокне стабильны к излучению накачки, воздействию температуры, а также какой срок их службы?

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы и не снижают ценности полученных результатов.

Диссертационная работа «Структуры волоконных световодов, образованные элементами из стекла различного состава» Егоровой Ольги Николаевны является законченным научным исследованием, содержащим новые научные результаты и решения, имеющие практическую ценность. Основные результаты диссертационной работы получены впервые и достаточно полно отражены в 3 патентах и 48 публикациях, 22 из которых входят в перечень ВАК РФ. Автореферат отражает содержание диссертационной работы. Содержание диссертации соответствует специальности 01.04.21 - Лазерная физика.

Диссертация «Структуры волоконных световодов, образованные элементами из стекла различного состава» полностью удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Егорова Ольга Николаевна, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 - Лазерная физика.

Отзыв подготовлен по итогам обсуждения доклада О.Н. Егоровой по материалам диссертации на заседании Научно-Технического Совета АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова» 7 апреля 2021 г.. Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании Научно-Технического Совета АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова» (Протокол №4? от 23 апреля 2021 г.).

Отзыв составили:

- Заместитель генерального директора по научной работе и развитию АО "Научно-производственного объединения Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова".

доктор технических наук, профессор

Адрес электронной почты: a.bourdine@goi.ru

Тел. +7 812 386-73-16

Бурдин Антон Владимирович

- Директор научно-исследовательского центра оптического материаловедения университета ИТМО, член Научно-технического совета АО "Научно-производственного объединения Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова",
доктор физико-математических наук, профессор
Адрес электронной почты: nikonorov@oi.ifmo.ru
Тел. +7 921 998-69-60



Никоноров Николай Валентинович

Сведения о ведущей организации

Акционерное общество «Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова» (АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова»).

Адрес: 192171, Санкт-Петербург, ул. Бабушкина, д. 36, корпус 1

Тел. +7 812 386-73-16

Адрес электронной почты: info@goi.ru

Адрес сайта в сети «Интернет»: <http://www.goi.ru/>

Подпись руки Никонорова Н.В. заверяю.

Делопроизводитель отдела УП



Э.А. Фомина