

На правах рукописи



Егорова Ольга Николаевна

**СТРУКТУРЫ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ, ОБРАЗОВАННЫЕ
ЭЛЕМЕНТАМИ ИЗ СТЕКЛА РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА**

01.04.21 - Лазерная физика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва - 2021

Работа выполнена в *Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН)*

- Официальные оппоненты:**
- Голант Константин Михайлович**
доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт радиотехники и
электроники им. В.А. Котельникова Российской
академии наук ИРЭ им. Котельникова В.А. РАН,
главный научный сотрудник
- Мешковский Игорь Касьянович,**
доктор технических наук, профессор, Федеральное
государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Национальный
исследовательский университет ИТМО», директор
Научно-исследовательского центра световодной
фотоники
- Каблуков Сергей Иванович,**
доктор физико-математических наук, профессор
РАН, Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт автоматики и
электрометрии Сибирского отделения Российской
академии наук, главный научный сотрудник

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

Защита состоится «24» мая 2021 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.063.02 при Федеральном исследовательском центре «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» по адресу: 119991, г. Москва, ул. Вавилова 38, корп. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук», <https://diss.gpi.ru/media/diss/56/dissertation.pdf>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук
тел. +7 (499) 503-87-77 доб. 4-13



А.А. Ушаков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Благодаря успехам, достигнутым в разработке источников лазерного излучения, в 1960-х годах идея передачи сигнала с помощью оптического излучения стала реальностью. В связи с этим возникла проблема поиска среды, подходящей для передачи оптического сигнала. В 1966 году было показано, что такой средой могут служить волоконные световоды из кварцевого стекла, поскольку в кварцевом стекле могут быть достигнуты оптические потери менее 20 дБ/км, что может представлять практический интерес для передачи сигнала [1]. В 1970 году оптические потери на уровне 20 дБ/км были достигнуты в волоконном световоде, заготовка которого была изготовлена методом осаждения кварцевого стекла из газовой фазы [2]. А в 1979 году были достигнуты оптические потери 0,2 дБ/км на длине волны 1550 нм [3], что практически соответствует современному уровню оптических потерь в телекоммуникационных волоконных световодах.

Волоконные световоды широко используются в настоящее время не только для передачи сигнала, но и для генерации и усиления излучения, а также как элементы датчиков. Для различных применений разработан ряд конструкций волоконных световодов, которые имеют одну сердцевину, локализирующую излучение за счет полного внутреннего отражения, и изготовлены с помощью процесса осаждения кварцевого стекла из газовой фазы [4]. В первую очередь это световоды для телекоммуникаций с одномодовой или многомодовой сердцевиной, световоды, активированные редкоземельными ионами, и так далее.

Однако расширение областей применения волоконной оптики приводило к появлению новых требований к свойствам волоконных световодов. Развитие волоконных источников излучения с высокой мощностью и энергией привело к необходимости создания оптических волокон, активированных редкоземельными ионами, одномодовых, с увеличенным диаметром поля моды. Развитие одночастотных волоконных лазеров, а также импульсных лазеров с высокой частотой повторений привело к необходимости создания световодов с высокой концентрацией активных редкоземельных ионов. Достижение предела скорости передачи информации при использовании существующих форматов модуляции сигнала привело к осознанию того, что следующим шагом к увеличению скорости передачи информации по одному оптическому волокну является передача сигнала в различных сердцевинах многосердцевинного волокна. Настоящая работа посвящена поиску и развитию новых подходов к созданию волоконных световодов с характеристиками, необходимыми для решения перечисленных проблем.

Одним из новых подходов, 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 в них может быть получен ряд уникальных оптических характеристик. Однако существует и другой подход к созданию новых видов оптического волокна, которому 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.

К моменту начала работы над диссертацией область, посвященная созданию и исследованию новых видов световодов без отверстий, была проработана гораздо меньше, по сравнению с дырчатыми микроструктурированными световодами. Тем не менее такие структуры световодов имеют определенные преимущества перед дырчатыми структурами, связанные с более простым процессом изготовления и использования, а также более высокой механической прочностью вследствие отсутствия отверстий в поперечном сечении. Поэтому настоящая работа и посвящена поиску и исследованию новых структур световодов, не содержащих отверстия в поперечном сечении, волноводная структура которых образована элементами из стекла различного состава.

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 [5]. 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 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 настоящей работе эти структуры были получены либо с использованием дополнительных технологических процессов, либо совсем без использования методов осаждения стекла из газовой фазы. Далее будет рассмотрено использование данного подхода для создания волоконных световодов в зависимости от различных направлений их применения.

Опубликование работы [6] во второй половине 1990-х годов положило начало активным исследованиям, посвященным разработке технологии изготовления, исследованию свойств и возможностей применения **микроструктурированных волоконных световодов**. Под термином микроструктурированные в настоящее время подразумеваются различные виды волоконных световодов, локализирующие излучение как за счет полного внутреннего отражения, так и за счет образования фотонной запрещенной зоны и имеющие неоднородную структуру поперечного сечения. То есть оболочка (и/или сердцевина) таких световодов состоит не из однородного стекла, а имеет элементы из стекла другого состава или незаполненные отверстия, упорядоченно или хаотично расположенные в стекле оболочки (сердцевины).

Исследование микроструктурированных световодов показало, что использование этих структур позволяет получать оптические характеристики, недостижимые в обычных световодах, которые изготовлены только с помощью процесса осаждения кварцевого стекла из газовой фазы, с сердцевиной, локализирующей излучение за счет полного внутреннего отражения. Микроструктурированные световоды могут обладать уникальными дисперсионными характеристиками, открывающими новые возможности использования нелинейно-оптических эффектов, высокой нелинейностью, могут иметь полую сердцевину [7]. Одним из важных применений микроструктурированных световодов является использование их в качестве активных элементов волоконных лазеров и усилителей.

Волоконные световоды вообще в настоящее время находят широкое применение в качестве активной среды лазеров и усилителей. Это обусловлено тем, что они обеспечивают локализацию излучения на большой длине активной среды, это позволяет получать высокое однопроходное усиление. Кроме того, в волоконных световодах легко достижимо высокое качество пучка, а большое значение отношения площади внешней поверхности световода к объему активной сердцевины позволяет осуществлять эффективный теплоотвод. Однако при создании волоконных лазеров и усилителей возникает ряд проблем, связанных с высокой интенсивностью и большой длиной активной среды, а именно нежелательные нелинейно-оптические эффекты (ВРМБ, ВКР и фазовой самомодуляции), приводящие к искажению спектра излучения. Кроме того, под действием излучения с высокой интенсивностью может происходить разрушение стекла.

Одним из путей снижения влияния нелинейно-оптических эффектов является снижение интенсивности излучения за счет увеличения диаметра сердцевины активного волоконного световода. Однако для ряда задач необходимо высокое качество пучка, а увеличение диаметра сердцевины приводит к многомодовости, что значительно его ухудшает. В световодах со ступенчатым профилем показателя преломления, получаемых с помощью осаждения из газовой фазы, при увеличении диаметра сердцевины для того, чтобы сердцевина оставалась одномодовой, необходимо уменьшать числовую апертуру или разность показателей преломления сердцевины и оболочки. Однако на практике сложно получать одномодовые световоды из легированного кварцевого стекла с числовой апертурой менее 0,05 с приемлемой оптической однородностью сердцевины. Это ограничивает диаметр поля моды таких световодов величиной 15–17 мкм [8]. Перспективными структурами для создания световодов с большим диаметром поля моды являются микроструктурированные световоды с дырчатой оболочкой [9]. Однако наличие отверстий в оболочке является недостатком данного вида световодов. Во-первых, процесс изготовления дырчатых световодов сложнее, чем световодов без отверстий. Во-вторых, наличие отверстий в световоде приводит к снижению механической прочности. В-третьих, для того чтобы предотвратить схлопывание отверстий внутри световода при соединении световодов с помощью процесса сварки, необходимы меньшее время и температура прогрева, из-за чего получаемые соединения могут являться механически ненадежными. Перечисленных недостатков лишены структуры световодов, которые не содержат отверстий в поперечном сечении. Волноводная структура таких световодов может быть образована элементами, состоящими, например, из легированного кварцевого стекла и расположенными в нелегированном кварцевом стекле. **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 отверстия в поперечном сечении.** Для ее успешного решения требовалось детальное понимание механизмов распространения оптического излучения в подобных структурах. Здесь подразумеваются структуры световодов на основе кварцевого стекла, преимущественно предназначенные 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.

Как уже было отмечено, фактором, который приводит к росту нежелательных нелинейно оптических эффектов, искажающих спектр излучения волоконных лазеров и усилителей, является не только высокая интенсивность излучения в сердцевине активного световода, но и его большая длина. Поэтому вторым способом снижения влияния нежелательных нелинейно-оптических эффектов является **уменьшение длины активного световода**. Это может быть достигнуто за счет увеличения концентрации активных редкоземельных ионов в сердцевине. Кроме того, использование волоконных световодов с высоким содержанием активных редкоземельных ионов позволяет улучшить выходные параметры устройств с малой длиной резонатора, например одночастотных волоконных лазеров.

В настоящее время наиболее широко используемым материалом для создания волоконных световодов вообще и активных волоконных световодов в частности является кварцевое стекло. Это связано с уникальными свойствами кварцевого стекла, такими как малые оптические потери, устойчивость к воздействию внешних факторов, высокая механическая прочность и другие. Однако в кварцевом стекле затруднительно получение высокой концентрации активных редкоземельных элементов. Увеличение концентрации редкоземельных элементов в кварцевом стекле приводит к их кластеризации, которая, в свою очередь, приводит к безызлучательной релаксации верхнего лазерного уровня и даже к фазовому расслоению стекла. Для повышения концентрации редкоземельных ионов в кварцевом стекле используется легирование стекла различными добавками в процессе осаждения стекла из газовой фазы, например оксидами фосфора или алюминия, однако эта технология имеет свои ограничения.

Фосфатное стекло, напротив, допускает введение высокой концентрации активных редкоземельных элементов. Концентрация редкоземельных ионов в фосфатном стекле в среднем на порядок выше, чем их концентрация в легированном кварцевом стекле, обычно используемом для создания сердцевины активных световодов. Были созданы как световоды, целиком состоящие из фосфатного стекла, так и устройства на их основе [10, 11]. Недостатком световодов, целиком состоящих из фосфатного стекла, является низкая стойкость к воздействию факторов окружающей среды. Другим существенным недостатком является то, что из-за различия физико-химических свойств эти световоды плохо поддаются процессу соединения со световодами из кварцевого стекла с помощью процесса сварки, а получаемые соединения механически ненадежны. Из-за различия коэффициентов термического расширения двух стекол возникают механические напряжения в местах соединения волокон на основе фосфатного и кварцевого стекла, что приводит к ускоренному росту трещин и к разрушению мест соединений волокон. Таким образом, к моменту начала работы над диссертацией существовали, с одной стороны, активные световоды на основе кварцевого стекла, концентрация редкоземельных ионов в которых ограничена, а для изготовления используются довольно сложные методы осаждения из газовой фазы, а с другой стороны, световоды, целиком состоящие из фосфатного стекла, обладающие низкой стойкостью к воздействию факторов окружающей среды, соединения которых со световодами на основе кварцевого стекла являются ненадежными из-за различия физико-химических свойств. В этой связи **актуальной проблемой являлась разработка активных волоконных световодов с высокой концентрацией активных редкоземельных ионов,**

обладающих высокой механической прочностью и надежностью и хорошей совместимостью со световодами из кварцевого стекла.

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 [12], интерес к ним возник только в конце первого десятилетия этого века. Это произошло в связи с тем, как было показано [13, 14], 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 [15], 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 сердцевины 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 длинных линий связи, многосердцевинные световоды рассматриваются также с точки зрения применения в других областях, в первую очередь в сетях доступа [16, 17], поскольку позволяют сократить количество кабелей, а также в «датакоме» и «компьютеркоме», поскольку позволяют упростить и уменьшить габариты трактов передачи сигнала в центрах обработки и хранения данных и суперкомпьютерах

[18]. Кроме того, многосердцевинные световоды перспективны для применений в качестве чувствительных элементов датчиков [19, 20, 21]. 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.**

В соответствии с вышеизложенным **Целью работы** явилась:

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, локализующие 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 сердцевинной, 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

1. Впервые исследованы особенности распространения оптического излучения по волоконному световоду с сердцевинной 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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 сердцевин, позволяет снизить взаимодействие между модами соседних сердцевин за счет снижения поперечной компоненты напряженности поля моды в области барьерного слоя.

5. 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.

6. 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 и практическая значимость работы

Результаты работы, заключающиеся в разработанных теоретических положениях, экспериментальных методиках и технологических подходах, необходимых для создания новых видов волоконных световодов, а также функциональных устройств на их основе, могут быть использованы для создания элементной базы для квантовой электроники, радиофотоники и других областей. Например, для построения мощных волоконных лазеров и усилителей, одночастотных волоконных лазеров, волоконно-оптических линий задержки, трактов передачи сигнала и так далее.

Теоретическая значимость исследования основана на том, что:

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.

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

Методология и методы исследования

Для решения поставленных в работе задач по созданию новых видов световодов потребовалась разработка лабораторных технологий создания микроструктурированных, композитных и многосердцевинных волоконных световодов. Для этого были использованы метод «сборки и перетяжки», метод «стержень в трубке», а также метод сверления. Разработка новых технологий проводилась с использованием имеющейся технологии создания заготовок и вытяжки световодов на основе кварцевого стекла.

Моделирование параметров новых видов волоконных световодов осуществлялось с помощью численного расчета методами конечных элементов (пакет программ “Comsol Multiphysics”), плоских волн (“MPB MIT”), мультипольным методом (“Cudos MOF”). Анализ свойств световодов с фотонной запрещенной зоной проводился с помощью построения зонных диаграмм для различных параметров световодов.

Для определения характеристик волоконных световодов использовались как известные методы измерений, так и доработанные с учетом специфики исследуемого волоконного световода. В частности, существенная доработка методик измерения параметров потребовалась при исследовании ряда характеристик многосердцевинных волоконных световодов. Была разработана методика контроля положения измеряемой сердцевинки. Для измерения разности времени задержки сигнала между модами соседних сердцевин многосердцевинного волоконного световода предложено использовать метод низкокогерентной интерферометрии на основе интерферометра Маха–Цендера.

Положения, выносимые на защиту

1. В световодах с сердцевинкой из кварцевого стекла и оболочкой, представляющей собой двумерный фотонный кристалл, который состоит из элементов (цилиндров) из легированного кварцевого стекла, при отношении диаметра элемента к расстоянию между центрами соседних элементов $0,1-0,3$ и расстоянии между центрами соседних элементов примерно $10-12$ мкм мода сердцевинки локализуется в спектральном диапазоне, соответствующем фундаментальной запрещенной зоне фотонно-кристаллической оболочки, с минимальными оптическими потерями около $20-30$ дБ/км. При этом спектральная ширина зоны локализации по уровню 100 дБ/км составляет несколько сотен нанометров.

2. В световодах с сердцевинкой из кварцевого стекла и оболочкой, представляющей собой двумерный фотонный кристалл, с уменьшением длины волны происходит снижение эффективной разности показателей преломления сердцевинки и оболочки в пределах фундаментальной запрещенной зоны. Это приводит к тому, что, при отношении диаметра элемента фотонно-кристаллической оболочки к расстоянию между центрами соседних элементов менее $0,4$, сердцевинка световода является одномодовой в пределах всей фундаментальной запрещенной зоны в случае, если она образована одним отсутствующим элементом оболочки.

3. Композитные волоконные световоды, изготовленные методом «стержень в трубке», с сердцевинной, изготовленной из фосфатного стекла, и оболочкой из кварцевого стекла, обладают оптическими потерями на уровне 1-2 дБ/м. Механическая прочность композитных световодов и мест их соединений с другими световодами не отличается от характеристик световодов на основе кварцевого стекла (5–7 ГПа) и определяется дефектами на поверхности оболочки из кварцевого стекла.

Уровень дифференциальной эффективности лазерной генерации, который достижим в композитных световодах, активированных ионами эрбия и иттербия (около 28%) и только иттербия (около 74%), близок к значениям эффективности, получаемым для световодов на основе кварцевого стекла. При этом за счет более высокой концентрации редкоземельных ионов в композитных световодах максимальная эффективность генерации может быть получена при меньшей длине активного световода.

4. Существование барьерного слоя с пониженным показателем преломления между сердцевинами многосердцевинного волоконного световода приводит к снижению поперечной компоненты напряженности поля моды на краях распределений полей мод. За счет этого значительно снижаются коэффициент связи и перекрестные оптические помехи между модами соседних сердцевин. При этом барьерный слой может быть достаточно удален от сердцевин для того, чтобы не оказывать существенного влияния на другие волноводные характеристики мод сердцевин.

5. В гетерогенном многосердцевинном световоде с прямоугольным поперечным сечением и сердцевинами, расположенными в один ряд, при приближении радиуса изгиба световода к критическому, то есть соответствующему условию равенства постоянных распространения мод соседних сердцевин, не происходит роста перекрестных оптических помех за счет существования преимущественного направления изгиба, обусловленного прямоугольной формой поперечного сечения. Однако при малых диаметрах изгиба, соответствующих заметному росту изгибных оптических потерь, происходит резкое возрастание перекрестных оптических помех вследствие увеличения связи мод сердцевин с модами оболочки.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов 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.

Материалы, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на конференциях “Photonics West” (Сан-Франциско, США, 2010 г., 2016 г.), “Conference on Lasers and Electro-Optics” (Сан-Хосе, США, 2008 г., Балтимор, США, 2009 г.), “European Conference on Optical Communication” (Вена, Австрия, 2009 г.), “Всероссийская конференция по волоконной оптике” (Пермь, Россия, 2009, 2011, 2013, 2015, 2017, 2019 гг.), “Photonics Europe” (Брюссель, Бельгия, 2012 г.), “Advanced Solid State Lasers” (Париж, Франция 2013 г.), “Advanced Laser Technology” (Фаро, Португалия, 2015; Прага, Чехия, 2019), Всероссийской школе-

семинаре «Волновые явления в неоднородных средах» имени А.П. Сухорукова (Красновидово, Россия, 2015, 2016, 2017 гг.), «Оптика Лазеров» (Санкт-Петербург, Россия, 2016 г.), «Российском семинаре по волоконным лазерам RFL'2016» (Новосибирск, Россия, 2016 г.), на семинарах МИРЭА, ИЦВО РАН, ИПФ РАН, ИОФ РАН, конкурсе научных работ ИОФ РАН (диплом победителя конкурса, Москва, Россия, 2019 г.).

Личный вклад автора

Все выносимые на защиту экспериментальные и теоретические результаты и положения получены автором лично, либо при его непосредственном участии и под его руководством. Автор принимал участие в постановке, проведении и обработке результатов всех представленных в работе экспериментов.

На всем протяжении работа над диссертацией активно поддерживалась Семеновым С.Л. и Диановым Е.М. Весомый вклад в получение представленных результатов внесли Галаган Б.И., Сверчков С.Е., Денкер Б.И., Мельников Л.А., Белкин М.Е., Прямикова А.Д., Медведков О.И., Васильев С.А.

Публикации

Основные результаты диссертации изложены в 3 патентах и в 48 публикациях, из которых 22 входят в перечень рецензируемых журналов и изданий, рекомендованных ВАК.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована ее цель и задачи, показана научная новизна, практическая значимость полученных результатов, сформулированы защищаемые положения, а также приведены сведения об апробации и о публикациях.

В первой главе приведен обзор литературы, посвященной различным структурам волоконных световодов. В пункте 1.1 приведен литературный обзор структур световодов с большим диаметром поля моды. В частности, рассмотрены структуры световодов с микроструктурированной оболочкой с отверстиями, обладающие свойством одномодовости в широком спектральном диапазоне. С использованием таких структур получены рекордные значения энергии импульсных волоконных лазеров. С использованием активного световода с дырчатой микроструктурированной оболочкой с диаметром сердцевины 105 мкм, а также техники усиления чирпированных импульсов, получено импульсное излучение с длительностью 500 фс, энергией импульсов 2,2 мДж и высоким качеством пучка [22]. Для импульсов пикосекундной длительности (60 пс) получено рекордное значение энергии 26 мДж. При этом был использован световод с диаметром сердцевины 130 мкм, диаметр поля моды на длине волны 1000 нм составлял около 100 мкм [22]. Недостатком световодов с дырчатой микроструктурированной оболочкой является наличие отверстий в поперечном сечении, что снижает механическую прочность, а также затрудняет изготовление и использование данного вида световодов.

Также в пункте 1.1 приведен обзор предложенных структур световодов с увеличенным диаметром поля моды, не содержащих отверстий в поперечном сечении. В частности, структуры световода с сердцевинной из стекла, локализирующей излучение за счет образования фотонной запрещенной зоны [23]. Расстояние между центрами соседних элементов периодической оболочки Λ в описанной структуре составляло 15,2 мкм, отношение диаметра элемента оболочки d к Λ составляло 0,68, сердцевина была сформирована одним отсутствующим элементом оболочки. Диаметр поля фундаментальной моды сердцевины на длине волны в окрестности 1500 нм достигал 25 мкм, однако сердцевина не являлась одномодовой. Другим существенным недостатком данной структуры являлось высокое отношение d/Λ , что привело бы к тому, что при накачке такого световода с торца значительная доля излучения накачки была бы локализована элементами оболочки. Кроме того, изготовление описанной структуры световода требует достаточно больших объемов легированного оксидом германия кварцевого стекла, что делает изготовление такого световода трудоемким.

В пункте 1.2 приведен обзор литературных данных, посвященных особенностям волноводных свойств световодов с сердцевинной из стекла, локализирующих излучение за счет фотонной запрещенной зоны. Анализ литературных данных показал, что к моменту начала работы над диссертацией не было работ, посвященных изготовлению, исследованию свойств и возможностей применения световодов, которые локализируют излучение за счет образования фотонной запрещенной зоны, с отношением диаметра элементов оболочки к расстоянию между центрами соседних элементов d/Λ менее 0,34.

Пункт 1.3 посвящен проблеме создания композитных световодов с сердцевинной, изготовленной из фосфатного стекла, и оболочкой из кварцевого стекла. В работе [24] было предложено объединить преимущества фосфатного и кварцевого стекла путем изготовления композитного световода методом «стержень в трубке» с сердцевинной из фосфатного стекла, легированного неодимом, и оболочкой из кварцевого стекла. С одной стороны, высокая концентрация редкоземельных элементов в сердцевине таких световодов позволяет сократить рабочую длину активного световода, а, с другой стороны, оболочка из кварцевого стекла позволяет обеспечить механическую прочность и надежность, а также упростить процесс сварки со световодами, целиком состоящими из кварцевого стекла. В данной работе была получена достаточно высокая эффективность генерации, однако из-за недостаточного описания свойств световода, а также отсутствия продолжения работ на данную тему, невозможно было судить о том, насколько перспективной является данная технология. Также до начала работы над диссертацией была опубликована работа, посвященная изготовлению композитного световода, легированного эрбием и иттербием [25]. Однако в данной работе отсутствовало систематическое исследование свойств световода, и, кроме того, полученная дифференциальная эффективность генерации составила всего 4%. Таким образом, до начала работ над диссертацией стояла задача определения перспектив технологии изготовления композитных световодов методом «стержень в трубке» с сердцевинной, изготовленной из фосфатного стекла, и оболочкой из кварцевого стекла с точки зрения различных аспектов.

В пункте 1.4 приведен обзор литературных данных, посвященных многосердцевинным волоконным световодам и проблеме снижения перекрестных оптических помех, а также обзору конструкций устройств ввода-вывода излучения

из каждой сердцевинки многосердцевинного волоконного световода. Пункт 1.5 посвящен волоконно-оптическим линиям задержки и их применениям.

Во второй главе представлены результаты исследований волоконных световодов с сердцевинкой из кварцевого стекла, локализирующих излучение за счет образования фотонной запрещенной зоны. Оболочка световода с фотонной запрещенной зоной представляет собой двумерный фотонный кристалл, состоящий из цилиндров из легированного кварцевого стекла, расположенных в нелегированном стекле в гексагональном порядке, оси цилиндров параллельны оси световода (рисунок 1 а). Показатель преломления цилиндров выше, чем показатель преломления окружающего стекла. Сердцевина образована за счет отсутствия одного или нескольких элементов периодической оболочки и является дефектом фотонного кристалла, в котором при наличии запрещенной зоны может возникать локализация излучения.

В работе впервые изучены особенности распространения излучения в световодах такого типа с малым отношением диаметра элемента периодической оболочки d к расстоянию между центрами соседних элементов Λ – менее 0,3. Для создания серии световодов разработана собственная лабораторная технология их изготовления, основанная на методе сборки и перетяжки стержней, в том числе полученных из заготовок, созданных методом осаждения кварцевого стекла из газовой фазы. Показано, что в таком типе световодов может быть получена локализация излучения с минимальными оптическими потерями 20–30 дБ/км в спектральном диапазоне, соответствующем фундаментальной запрещенной зоне фотонно-кристаллической оболочки. При этом минимальные оптические потери приходится на спектральный диапазон, соответствующий центру фундаментальной запрещенной зоны, а спектральная ширина зоны локализации моды сердцевинки зависит от параметров оболочки и сердцевинки и составляет несколько сотен нанометров по уровню 100 дБ/км. В частности, в световоде с $\Lambda=11,4$ мкм, $d/\Lambda=0,12$, с сердцевинкой, образованной одним отсутствующим элементом оболочки, и шестью слоями периодической оболочки (рисунок 1 а) получена локализация моды сердцевинки в пределах фундаментальной (наиболее длинноволновой) запрещенной зоны периодической оболочки в спектральном диапазоне от 950 до 1300 нм (по уровню 100 дБ/км) и минимальными оптическими потерями в центре запрещенной зоны 20 дБ/км (рисунок 1 б).

При исследовании зависимости оптических потерь от диаметра изгиба световода обнаружено, что изменение вида спектральной зависимости при различных диаметрах изгиба является характерным для данного вида световодов. В частности, уменьшение диаметра изгиба приводит к сужению спектрального диапазона локализации моды, а также возникновению областей с высокими оптическими потерями, вызванными взаимодействием моды сердцевинки и мод оболочки. Экспериментально показано, что световод с параметром d/Λ , лежащим в диапазоне 0,1–0,3, имеет приемлемые для практического использования оптические потери при диаметрах изгиба около 30 см (рисунок 1 б).

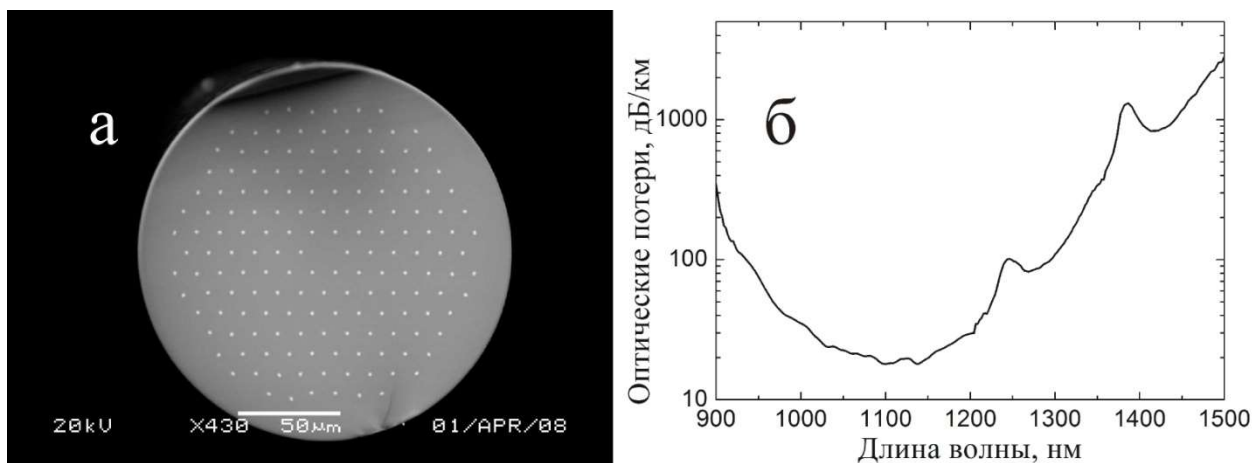


Рисунок 1. а – фотография торца световода с фотонной запрещенной зоной, полученная с помощью электронного микроскопа. Более светлые участки соответствуют элементам фотонно-кристаллической оболочки из легированного кварцевого стекла. Отношение диаметра элемента оболочки к расстоянию между соседними элементами 0,12, расстояние между центрами соседних элементов 11,4 мкм, разница показателей преломления элементов оболочки и нелегированного кварцевого стекла 0,028. б – спектр оптических потерь исследуемого световода в фундаментальной запрещенной зоне, намотанного с диаметром 30 см.

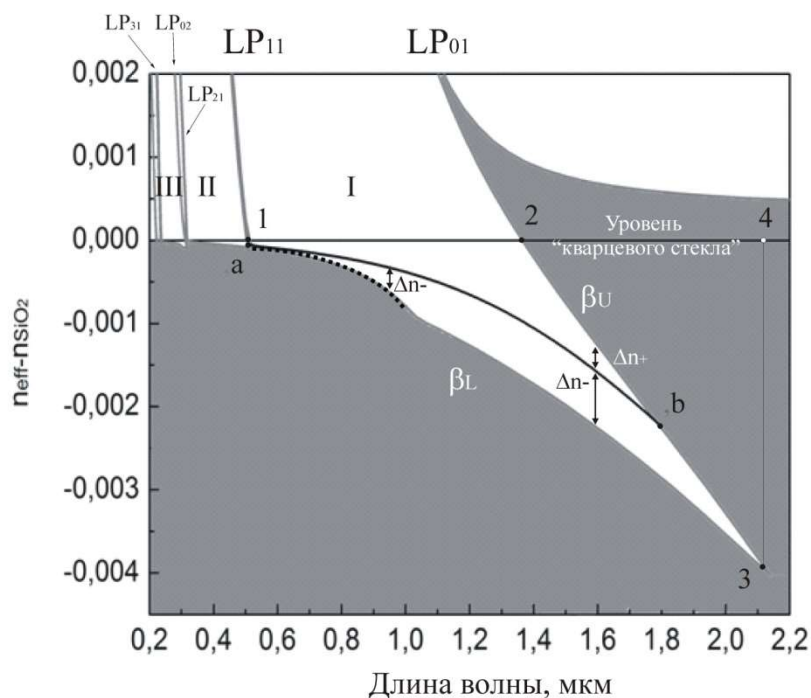


Рисунок 2. Зонная диаграмма, рассчитанная для параметров световода, представленного на рисунке 1 а.

На основе результатов проведенного численного моделирования параметров световодов с фотонной запрещенной зоной, а также экспериментальных исследований серии световодов установлено, что световоды с отношением $d/\Lambda < 0,4$ и с сердцевинкой, образованной одним отсутствующим элементом оболочки, являются одномодовыми в пределах всей фундаментальной запрещенной зоны. При проведении численного моделирования разность показателей преломления в

периодической оболочке выбиралась в диапазоне от 0 до 0,03, что соответствует технологическим возможностям методов создания легированного кварцевого стекла с помощью осаждения из газовой фазы. Также установлено, что при формировании сердцевины более чем одним отсутствующим элементом оболочки световод является многомодовым.

На рисунке 2 представлена зонная диаграмма, рассчитанная для параметров световода, который представлен на рисунке 1 а. Координата по оси абсцисс соответствует длине волны, по оси ординат – разности эффективного показателя преломления моды n_{eff} и показателя преломления кварцевого стекла n_{SiO_2} . Фундаментальная запрещенная зона ограничена кривыми β_L , β_U и осью абсцисс. Существование в пределах фундаментальной запрещенной зоны только одной дисперсионной зависимости моды сердцевины (черная кривая) свидетельствует о том, что световод является одномодовым. Экспериментальные исследования подтверждают одномодовость световода. Измеренный диаметр поля моды составляет 18 мкм на длине волны 1 мкм.

На основе анализа зонных диаграмм предложена модель, позволяющая объяснить эффект одномодовости в широком спектральном диапазоне в световодах с фотонной запрещенной зоной. Координата по оси ординат нижней границы запрещенной зоны β_L (рисунок 2) соответствует разности показателя преломления сердцевины n_{SiO_2} , равного показателю преломления кварцевого стекла, и эффективного показателя преломления оболочки n_{eff} , то есть наибольшего эффективного показателя преломления мод оболочки. В отличие от световодов со ступенчатым профилем показателя преломления, в которых разница показателей преломления сердцевины и оболочки незначительно зависит от длины волны, в световодах с фотонной запрещенной зоной с уменьшением длины волны разность показателя преломления сердцевины и эффективного показателя преломления оболочки значительно снижается (рисунок 2). За счет снижения разности показателей преломления сердцевины и оболочки эффективный параметр V (определяющий число мод в сердцевине), который можно ввести по аналогии со световодами со ступенчатым профилем показателя преломления [26], не изменяется или изменяется незначительно при уменьшении длины волны, что и приводит к постоянству модового состава (одномодовости) в широком спектральном диапазоне.

Существование одномодового режима в широком спектральном диапазоне эквивалентно существованию одномодового режима в широком диапазоне геометрических параметров волноводной структуры, поскольку при изменении длины волны излучения и пространственного размера структуры в одинаковое число раз решение волнового уравнения не изменяется. Другими словами, уменьшение длины волны излучения при фиксированном размере поперечной структуры световода эквивалентно увеличению размеров структуры световода (а следовательно, и диаметра сердцевины) при заданной длине волны. **Таким образом, на основании существования одномодового режима распространения в широком спектральном диапазоне, а также возможности получения большого диаметра поля моды (около 20 мкм) с приемлемыми оптическими потерями, в работе предложено использовать данную структуру световода для создания одномодовых световодов с большим диаметром сердцевины для волоконных лазеров и усилителей с высокой выходной энергией и мощностью и высоким качеством пучка.** Увеличение диаметра сердцевины позволяет

уменьшить нелинейно-оптические взаимодействия, ограничивающие выходные параметры волоконно-оптических источников. При этом для получения высокого качества пучка важно, чтобы сердцевина оставалась одномодовой.

По сравнению с дырчатыми микроструктурированными световодами [27], которые рассматриваются в настоящее время как одна из наиболее перспективных структур световодов с большим диаметром поля моды, структура световода с фотонной запрещенной зоной и сердцевиной из стекла более проста в изготовлении и имеет более высокую механическую прочность за счет отсутствия отверстий в поперечном сечении. Использование в структуре световода с фотонной запрещенной зоной малого отношения диаметра элемента оболочки к расстоянию между соседними элементами также является преимуществом. Во-первых, это позволяет использовать для создания световода относительно малый объем легированного кварцевого стекла. Во-вторых, малая площадь поперечного сечения элемента оболочки относительно площади всего поперечного сечения световода позволяет минимизировать нежелательную локализацию излучения накачки элементами оболочки при накачке световода с торца.

Пункт 2.7 посвящен созданию световода, локализирующего излучение за счет фотонной запрещенной зоны, с сердцевиной из кварцевого стекла, легированного ионами иттербия. При изготовлении заготовки активной сердцевины использовались сердцевинные заготовки, полученные методом осаждения стекла из газовой фазы. Поскольку оптическая однородность исходных заготовок была недостаточна, для повышения однородности стекла был использован метод, основанный на сборке и перетяжке стержней, полученных из сердцевины заготовок. В результате был изготовлен активный световод, одномодовый, с диаметром поля моды 18 мкм. В изготовленном световоде была получена лазерная генерация и высокое качество пучка. Разработанная технология имеет потенциал для создания световодов, активированных редкоземельными ионами, с большим диаметром сердцевины, одномодовых или близких к одномодовым.

Также в пункте 2.7 описаны результаты исследования возможности создания активированного иттербием стекла сердцевины световода методом спекания порошков оксидов с большим размером частиц (10–100 мкм). Указанный размер частиц порошков оксидов позволяет проводить спекание без образования пузырей с помощью достаточно простой технологии, однако полученное стекло является оптически неоднородным. Для проведения гомогенизации стекла в настоящей работе предложен метод, основанный на перетяжке стержня из полученного легированного стекла на стержни меньшего диаметра, последующей сборки и сплавлении полученных стержней. После трех циклов гомогенизации был получен волоконный световод с «серыми» оптическими потерями на уровне 100 дБ/км, что приемлемо как для создания световодов с большим диаметром сердцевины, так и для других задач.

В третьей главе представлены результаты исследований композитных световодов с сердцевиной, изготовленной из фосфатного стекла, легированного активными редкоземельными ионами, и оболочкой из кварцевого стекла. Оболочка из кварцевого стекла обеспечивает механическую прочность и надежность и позволяет получать надежные соединения таких световодов с помощью процесса сварки. Серцевина, изготовленная из фосфатного стекла, обеспечивает высокую концентрацию активных редкоземельных ионов, что позволяет использовать малую длину активного световода. В результате исследований световодов данного

типа обоснована правомерность нового подхода к созданию активных волоконных световодов. 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 повторяемо получать композитные световоды с сердцевиной, изготовленной из фосфатного стекла, легированного редкоземельными ионами, и оболочкой из кварцевого стекла. При этом не происходит растрескивания консолидированной заготовки, несмотря на значительные напряжения, вызванные различием коэффициентов термического расширения фосфатного и кварцевого стекла.

В настоящей работе изготовлена серия композитных световодов с сердцевиной, легированной эрбием и иттербием, и только иттербием. При этом исследована возможность изготовления композитных световодов из фосфатного стекла различного состава. Оказалось, 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 композитных световодов происходит взаимная диффузия фосфатного и кварцевого стекол, за счет чего содержание оксида фосфора в сердцевине уменьшается по сравнению с исходным фосфатным стеклом до величины 30–35 мол.%. Однако эта величина намного больше концентрации, которая может быть достигнута в процессе осаждения стекла из газовой фазы.

Оптические потери в серии исследуемых световодов, измеренные вне областей поглощения редкоземельных ионов, составляют около 1–3 дБ/м. Достигнутый уровень оптических потерь в световодах по порядку величины соответствует уровню оптических потерь в исходном фосфатном стекле.

Исследование серии изготовленных образцов световодов показало, что композитные световоды могут быть соединены со световодами из кварцевого стекла с помощью процесса сварки в электрическом разряде без образования дефектов в местах соединений. Величина оптических потерь в местах соединений по порядку величины соответствует величине потерь, рассчитанной, исходя из параметров фундаментальных мод сердцевины соединяемых световодов. 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.

В композитном световоде, легированном эрбием и иттербием, получены приемлемые для практического использования уровни эффективности лазерной генерации. В схеме с накачкой по оболочке с резонатором, образованным торцами световода, получен наклон эффективности генерации 28% относительно введенной и 39% относительно поглощенной мощности накачки. Достигнутый уровень эффективности лазерной генерации близок к уровню эффективности в световодах на основе кварцевого стекла, полученных методом осаждения из газовой фазы. Однако благодаря наличию сердцевины с высокой концентрацией редкоземельных ионов, оптимальная длина, соответствующая максимальному наклону эффективности генерации относительно введенной мощности накачки, составила около 40–60 см. Это в несколько раз меньше оптимальной длины световода с

близкими геометрическими параметрами поперечного сечения, изготовленного методом осаждения из газовой фазы [28].

В световоде с сердцевиной, легированной только ионами иттербия, в схеме с резонатором, образованным волоконной брэгговской решеткой и торцом световода, и накачкой по сердцевине дифференциальная эффективность относительно введенной мощности накачки составила 73%–74% при длине световода порядка 50 мм. Несмотря на многомодовость световода, было получено высокое качество пучка. Высокое качество пучка было достигнуто благодаря использованию в резонаторе одномодового световода с брэгговской решеткой, который служил модовым фильтром. В схеме с двумя брэгговскими решетками достигнута генерация при длине активного световода 25 мм с наклоном эффективности относительно введенной мощности накачки 50%. При длине активного световода 16 мм наклон эффективности лазерной генерации относительно введенной мощности накачки составил 20%.

Также была получена генерация в композитном световоде, легированном ионами иттербия, с накачкой по оболочке, с резонатором, образованным торцами световода. Дифференциальная эффективность относительно поглощенной мощности накачки при накачке по оболочке составила 72% при длине световода 90 см.

Четвертая глава посвящена проблеме снижения перекрестных оптических помех в многосердцевинных волоконных световодах.

Как уже отмечалось во введении, основной задачей, связанной с разработкой конструкций многосердцевинных волоконных световодов, которые предназначены для передачи сигнала, является увеличение количества сердцевин, расположенных в пределах поперечного сечения световода. Однако при этом возникают ограничения с двух сторон. С одной стороны, для снижения перекрестных оптических помех необходимо увеличивать расстояние между сердцевинами, но, с другой стороны, для обеспечения достаточной механической прочности на изгиб диаметр телекоммуникационного световода не должен превышать 250 мкм. Поэтому основной задачей при разработке структуры многосердцевинных световодов является поиск решений, позволяющих уменьшить расстояния между соседними сердцевинами без существенного роста перекрестных помех.

В общем случае анализ распространения света в системе из нескольких волноводов заключается в решении волнового уравнения для определения мод всей системы в целом. При этом моды всей системы, состоящей из нескольких волноводов, будут отличаться от мод каждого волновода в отдельности. Данный анализ достаточно сложен. Поэтому в случае, если связь между волноводами мала, как в случае телекоммуникационных многосердцевинных световодов с несвязанными сердцевинами, для описания взаимодействия между волноводами используется упрощенная теория связанных мод. В этом приближении предполагается, что сами моды являются модами отдельно расположенных волноводов (сердцевин), а обмен мощностью между сердцевинами зависит от распределения напряженности полей мод соседних сердцевин и разности постоянных распространения мод соседних сердцевин.

В настоящей работе предложен новый подход к снижению перекрестных оптических помех между сердцевинами многосердцевинного световода за счет снижения напряженности поля моды одной сердцевины в области другой сердцевины, что приводит к снижению коэффициента связи, за счет использования

барьерного слоя с пониженным показателем преломления между сердцевинами. Схематично принцип этого представлен на рисунке 3. Черными сплошной и пунктирной кривыми показано распределение напряженности электрического поля для двух сердцевин, серым – профиль показателя преломления. Между сердцевинами находится область со сниженным показателем преломления или барьерный слой. Благодаря такому слою, расположенному на некотором расстоянии от сердцевины, напряженность электрического поля на краю распределения полей мод обеих сердцевин уменьшается, приводя к снижению перекрестных оптических помех. В то же время слой с пониженным показателем преломления, расположенный на некотором расстоянии от сердцевины, не оказывает значительного влияния на свойства моды отдельных сердцевин. В тексте диссертации приведены математическое описание и численные оценки влияния барьерного слоя на величину перекрестных оптических помех.

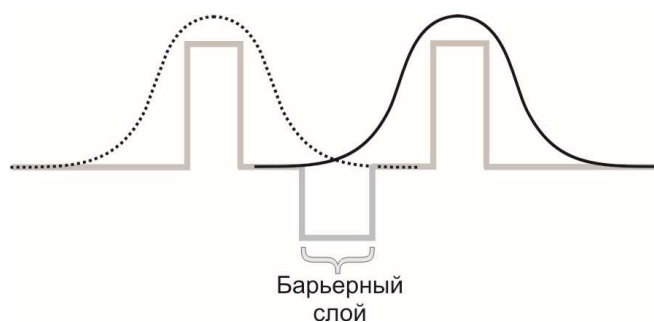


Рисунок 3. Профиль показателя преломления (серая линия) и распределение напряженности электрического поля (черные сплошная и пунктирная линии) двух сердцевин, между которыми расположен барьерный слой с пониженным показателем преломления.

Для экспериментального исследования влияния барьерного слоя разработана лабораторная технология изготовления многосердцевинных световодов с барьерным слоем методом сборки и перетяжки. Изготовлены многосердцевинные световоды, содержащий и не содержащий барьерный слой. Параметры и расположение сердцевин в изготовленных световодах одинаковы. Фотографии поперечного сечения изготовленных световодов представлены на рисунке 4.

Разработаны методики измерения оптических потерь, длины волны отсечки и перекрестных оптических помех в многосердцевинных волоконных световодах. В световоде с барьерным слоем показателя преломления наблюдался эффект смещения длины волны отсечки в длинноволновую область. Данный эффект связан с дополнительной локализацией первой высшей моды в области отсечки барьерным слоем с пониженным показателем преломления.

Исследовано влияние барьерного слоя с пониженным показателем преломления на величину перекрестных оптических помех в многосердцевинном световоде круглого поперечного сечения. На рисунке 5 представлены результаты измерения перекрестных помех между центральной и боковыми сердцевинами при намотке световода с различными диаметрами. Введение слоя с пониженным показателем преломления между сердцевинами многосердцевинного световода с малым расстоянием между центрами соседних сердцевин – 27 мкм – привело к снижению перекрестных оптических помех на величину 20 дБ. В световоде со

слоем с пониженным показателем преломления достигнута величина перекрестных помех 30 дБ на 1 км световода, что приемлемо для ряда задач, в которых необходима небольшая длина световода.

Обнаружена и объяснена зависимость перекрестных оптических помех от диаметра изгиба в полученных многосердцевинных световодах (рисунок 5). Снижение перекрестных оптических помех с уменьшением диаметра намотки световода связано с ростом разности эффективных показателей преломления мод соседних сердцевин.

Следует отметить, что идея об использовании снижения перекрестных оптических помех с помощью барьерного слоя показателя преломления одновременно была выдвинута несколькими группами авторов [29, 30, 31], в том числе и коллективом соавторов, в который входит автор настоящей работы [29] (дата приоритета заявки, поданной автором настоящей работы [29], является более ранней, чем дата публикации заявок других авторов [30, 31]). Использование барьерного слоя показателя преломления позволило в дальнейшем получить световоды, на которых была осуществлена рекордная скорость передачи информации. При использовании многосердцевинных волоконных световодов с 12 сердцевинами в 2012 году была получена скорость передачи информации по одному световоду, превышающая 1 Пбит/с [32]. В 2015 году с использованием многосердцевинного световода с 22 одномодовыми сердцевинами достигнута скорость передачи информации 2,15 Пбит/с [33]. Ожидается, что технология пространственного уплотнения каналов не только увеличит скорость передачи данных по одному световоду, но и в будущем позволит значительно сократить затраты на прокладку новых линий связи.

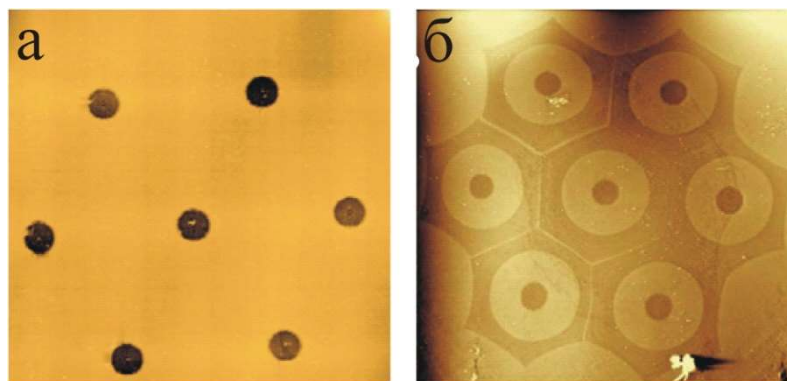


Рисунок 4. Изображение торцов многосердцевинных световодов (а – без слоя с пониженным показателем преломления, б – со слоем). Расстояния между центрами соседних сердцевин 27 мкм, диаметр сердцевин 5,3 мкм, разность показателей преломления сердцевин и оболочки 0,009. Толщина слоя с пониженным показателем преломления из фторированного кварцевого стекла 8–9 мкм (на линии, соединяющей центры соседних сердцевин) и разность показателей преломления относительно оболочки 0,009. Диаметр оболочки внутри фторированного слоя 19 мкм.

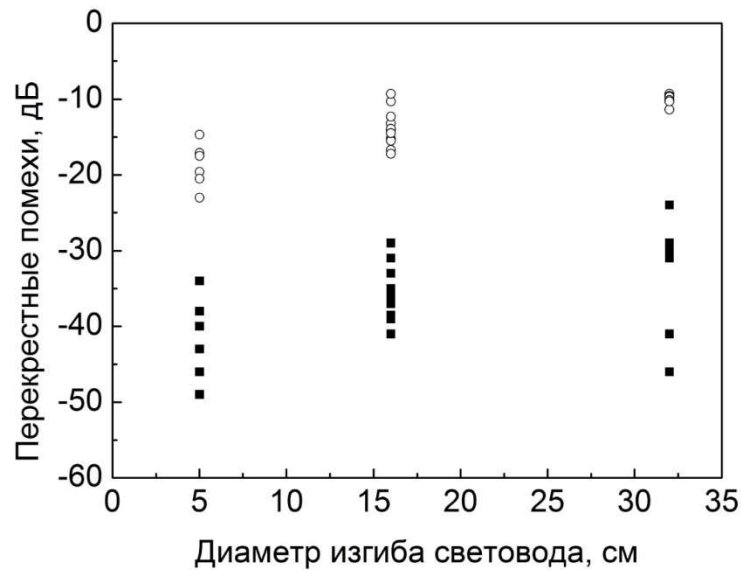


Рисунок 5. Зависимость перекрестных оптических помех между центральной и боковыми сердцевинами от диаметра изгиба световода для световода со слоем с пониженным показателем преломления (■) и без такого слоя (○).

Второй подход, рассматриваемый в работе, связан с подавлением нежелательного роста перекрестных оптических помех при изгибе многосердцевинного световода с различными параметрами соседних сердцевин (гетерогенного многосердцевинного световода). Использование фазового рассогласования между модами соседних сердцевин в гетерогенном многосердцевинном световоде является известным способом снижения перекрестных оптических помех [34]. Фазового рассогласования или неравенства фазовых скоростей (постоянных распространения) мод соседних сердцевин возможно достичь за счет различия параметров соседних сердцевин (диаметра или показателя преломления). Однако на величину фазового рассогласования между модами соседних сердцевин оказывают влияние изгибы световода, которые всегда присутствуют в волоконно-оптическом кабеле и имеют неконтролируемый характер. Это обусловлено тем, что при изгибе изменяется значение постоянной распространения моды. При этом если в световоде с различными параметрами соседних сердцевин в прямом положении наблюдается малое значение перекрестных помех, то в изогнутом состоянии перекрестные помехи могут возрастать за счет сближения постоянных распространения (эффективных показателей преломления) мод вплоть до наступления условия фазового синхронизма и резкого роста перекрестных помех [35].

В настоящей работе 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. На рисунке 6а и 6б изображены многосердцевинный световод с прямоугольным поперечным сечением и сердцевинами, расположенными в один ряд вдоль оси X, и профиль показателя преломления неизогнутого световода соответственно. Пунктиром показаны эффективные показатели преломления мод сердцевин. На рисунках 6в и 6д показаны многосердцевинные световоды, изогнутые вокруг оси Z',

перпендикулярной оси X , и вокруг оси Z , параллельной оси X . На рисунках бг и бе показаны их эквивалентные профили показателя преломления. За счет прямоугольной формы поперечного сечения при достаточно большом отношении длин сторон a/b световод будет изгибаться преимущественно вокруг оси, параллельной длинной стороне поперечного сечения, как показано на рисунке бд. При этом не будет происходить сближения постоянных распространения (эффективных показателей преломления) мод соседних сердцевин, условие фазового рассогласования мод не изменится и не будет происходить роста перекрестных помех.

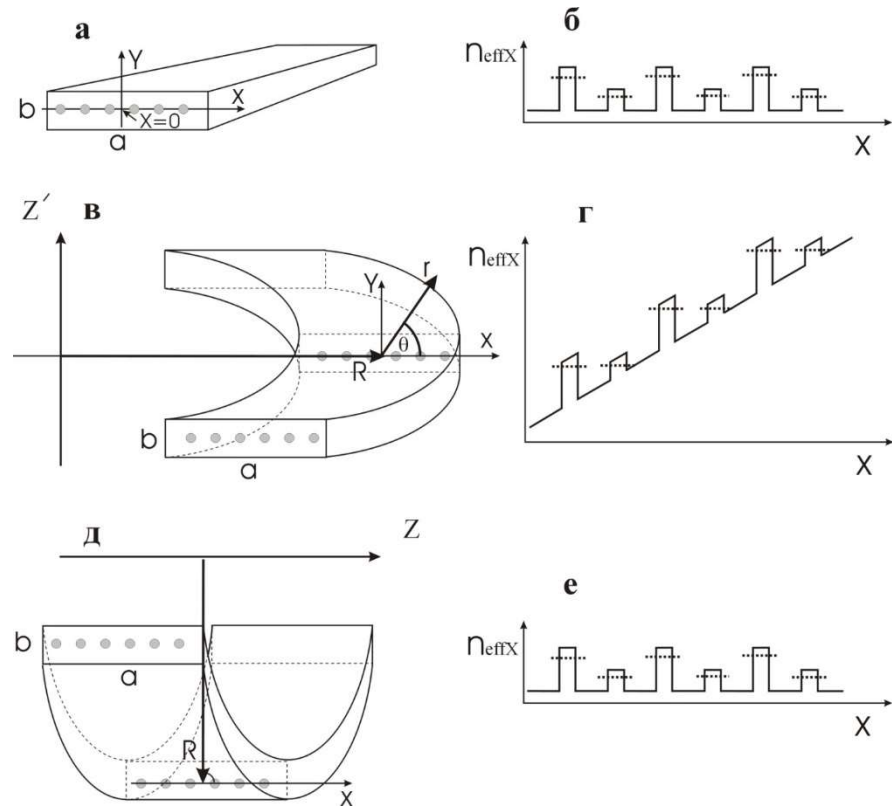


Рисунок 6. Световод с прямоугольным поперечным сечением, а – неизогнутый; в, д – изогнутый в различных направлениях; б – профиль показателя преломления неизогнутого световода; г, е – эквивалентный профиль показателя преломления изогнутого световода (профиль показателя преломления прямого световода, который по своим оптическим свойствам эквивалентен изогнутому световоду).

В работе впервые изготовлен гетерогенный многосердцевинный световод прямоугольного поперечного сечения с двумя типами сердцевин, попеременно расположенными в один ряд (рисунок 7а). Для сравнения был изготовлен световод круглого поперечного сечения и такими же параметрами сердцевин (рисунок 7б). Исследование перекрестных оптических помех при различных диаметрах намотки световодов показало, что в световоде прямоугольного поперечного сечения не наблюдается роста перекрестных помех при приближении радиуса изгиба световода к критическому (соответствующему равенству эффективных показателей преломления мод соседних сердцевин при изгибе световода, как показано на рисунке 6б) (рисунок 8б). В световоде круглого поперечного сечения с таким же расположением сердцевин происходит резкое возрастание перекрестных оптических помех между некоторыми парами сердцевин при приближении радиуса

изгиба световода к критическому (рисунок 8б). Причем пары сердцевин, в которых перекрестные помехи увеличиваются при приближении радиуса изгиба световода, чередуются с парами сердцевин, в которых перекрестные помехи снижаются. Эффект чередования пар сердцевин в световоде круглого поперечного сечения обусловлен тем, что в эквивалентном профиле показателя преломления, который соответствует изогнутому световоду, между одними парами сердцевин происходит сближение эффективных показателей преломления мод, а между другими парами, наоборот, разность эффективных показателей преломления мод увеличивается, аналогично тому, как показано на рисунке 8г.

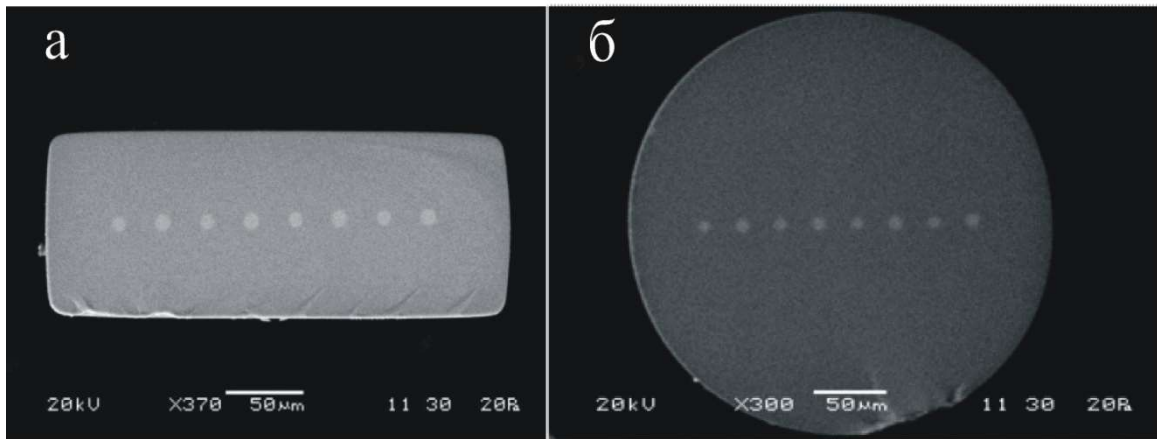


Рисунок 7. Фотографии торцов многосердцевинных световодов с а – прямоугольным и б – круглым поперечным сечением. В многосердцевинном световоде с прямоугольным поперечным сечением размеры поперечного сечения составили 296x110 мкм. Расстояние между центрами соседних сердцевин 28,3 мкм, диаметры сердцевин 8,2 и 9,45 мкм (сердцевины с диаметром 8,2 мкм чередовались с сердцевинами с диаметром 9,45 мкм). Диаметр световода круглого поперечного сечения 298 мкм.

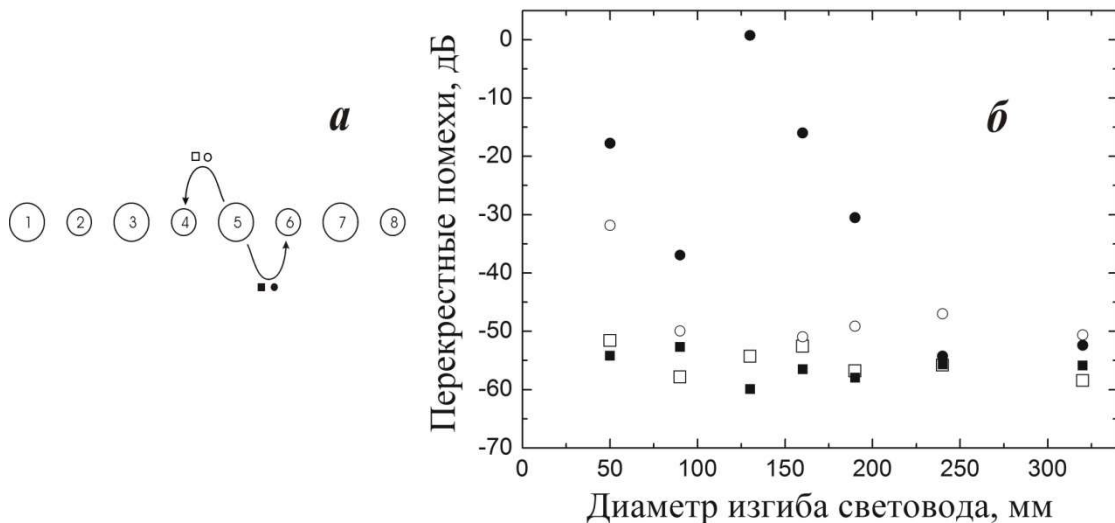


Рисунок 8. (а) схема расположения сердцевин, (б) перекрестные помехи между соседними сердцевинами (при вводе излучения в сердцевину 5) при различных диаметрах намотки световодов: ■ – в световоде прямоугольного поперечного сечения между сердцевинами 5 и 6, □ – в световоде прямоугольного поперечного сечения между сердцевинами 5 и 4, ● – в световоде круглого поперечного сечения между сердцевинами 5 и 6, ○ – в световоде круглого поперечного сечения между сердцевинами 5 и 4.

Обнаружено, что в световоде с прямоугольным поперечным сечением при диаметрах изгиба менее 15 мм происходит резкое возрастание перекрестных

оптических помех. Резкий рост оптических помех между сердцевинами в этом случае вызван увеличением связи между модами сердцевины и оболочки при изгибе. Излучение из сердцевины сначала переходит в моды оболочки, а затем в моды соседних сердцевины.

Вопросам, связанным с разработкой и созданием элементов функциональных устройств на основе разработанных структур волоконных световодов, посвящена **пятая глава** настоящей работы.

В настоящей работе предложено решение, позволяющее существенно улучшить массогабаритные параметры волоконно-оптических линий задержки. Данное решение основано на использовании последовательного прохождения оптического сигнала по сердцевинам многосердцевинного волоконного световода. Это позволяет сократить необходимую длину волоконно-оптической линии задержки в число раз, равное количеству сердцевины, а следовательно, сократить массу и габариты устройства. Снижение массы и габаритов волоконно-оптических линий задержки актуально для ряда задач, где требуется создание бортового оборудования летательных аппаратов, осуществляющих задержку аналогового сигнала на длительные промежутки времени.

Схема волоконно-оптической линии задержки на примере семисердцевинного световода представлена на рисунке 9а. Входной оптический сигнал, модулированный радиосигналом с помощью электрооптического модулятора (ЭОМ), подается в одну из сердцевины световода. Проходя по первой сердцевине, оптический сигнал приобретает временную задержку $\tau = L \cdot n_g / c$, где L – длина отрезка световода, n_g – групповой показатель преломления моды сердцевины. После этого сигнал подается в следующую сердцевину и т.д., после прохождения всех семи сердцевины сигнал приобретает задержку 7τ . Очевидно, что необходимая длина отрезка световода в этом случае в семь раз меньше, чем при использовании односердцевинного волоконного световода.

Для экспериментальной реализации описанной схемы была разработана лабораторная технология изготовления методом сверления семисердцевинных световодов с одинаковыми сердцевинами с круглым поперечным сечением и гексагональным расположением сердцевины. Изготовлена серия семисердцевинных световодов, и проведено исследование их оптических характеристик. Параметры сердцевины были близки к параметрам телекоммуникационных волокон стандарта G.652. Расстояние между центрами соседних сердцевины составляло 43–45 мкм. В тексте диссертации содержится подробное описание характеристик полученных световодов.

Для измерения разности времени задержки сигнала между модами соседних сердцевины многосердцевинного волоконного световода предложено использовать метод низкокогерентной интерферометрии на основе интерферометра Маха–Цендера. При исследовании времени задержки в различных сердцевинах обнаружено, что при снижении радиуса намотки световода происходит возрастание модуля разности времени задержки сигнала в центральной и боковой сердцевинах. Также обнаружено, что в случае, если центры двух боковых сердцевины расположены на линии, проходящей через центр центральной сердцевины, разность времени задержки в каждой из этих сердцевины и в центральной сердцевине близка по модулю и противоположна по знаку. Обнаруженное распределение времени задержки между боковыми сердцевинами может быть объяснено намоткой (изгибом) световода с сохранением (или

частичным сохранением) радиального направления изгиба по длине. Для устранения нежелательного увеличения разности времени задержки при перемотке многосердцевидного световода необходимо применять закручивание вокруг оси для того, чтобы ориентация поперечного сечения изменялась по длине световода. Однако для многосердцевидного волоконного световода, исследованного в настоящей работе, максимальная относительная разность оптических задержек между центральной и боковой сердцевинами при намотке световода с радиусом 25 мм не превышает 0,15%, что, по-видимому, является приемлемым для широкого ряда задач.

Для практического использования многосердцевидных световодов необходимы устройства, осуществляющие ввод и вывод излучения из сердцевин многосердцевидного световода в отдельные односердцевидные световоды. Для экспериментальной реализации такого устройства в работе выбрана волоконная конструкция, основанная на травлении и склеивании участков односердцевидных световодов [36]. В тексте диссертации содержится описание разработанной лабораторной технологии изготовления устройств ввода-вывода и их стыковки с многосердцевидным световодом. Разработанная технология позволяет обеспечивать ввод и вывод излучения из сердцевин многосердцевидного световода в односердцевидные световоды с оптическими потерями менее 1 дБ и коэффициентом обратного отражения сигнала менее -45 – -50 дБ. Также в настоящей работе впервые предложено использовать описанную технологию для создания устройств ввода-вывода для волоконного световода с девятнадцатью сердцевинами.

Впервые изготовлена волоконно-оптическая линия задержки на многосердцевидном волоконном световоде. Внешний вид линии задержки, представляющей собой многосердцевидный световод с пристыкованными к нему устройствами ввода-вывода, представлен на рисунке 9б. Благодаря тому, что сигнал последовательно проходит по всем семи сердцевинам многосердцевидного световода, получена временная задержка оптического сигнала 45,0 мкс при длине световода всего 1300 м.

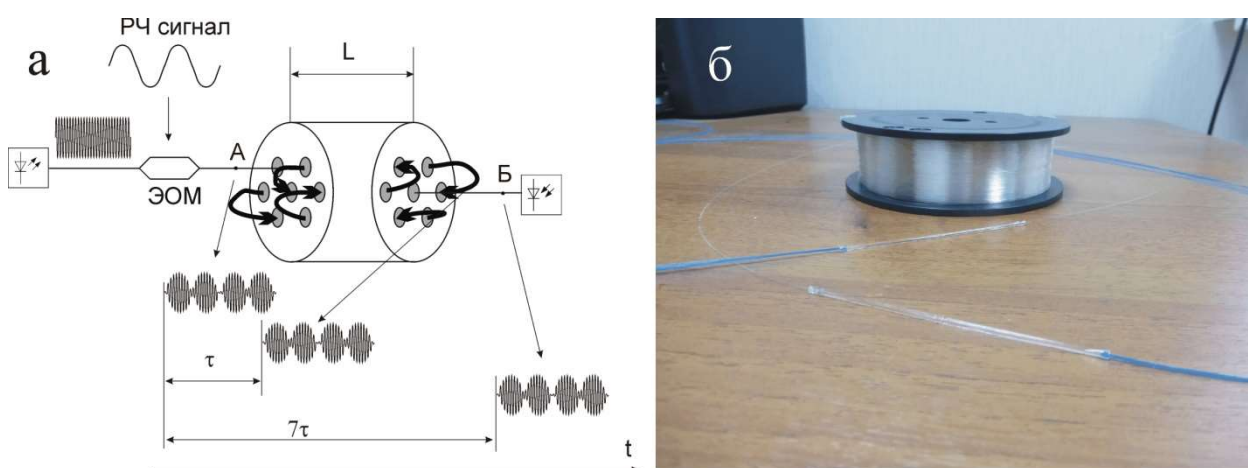


Рисунок 9. а – схема волоконно-оптической линии задержки на многосердцевидном волоконном световоде. б – внешний вид волоконно-оптической линии задержки на многосердцевидном световоде. Диаметр катушки по краю бортика – 12,5 см.

Следующая часть пятой главы посвящена созданию волоконных одночастотных лазеров на композитных световодах, легированных только ионами

эргия. Для создания одночастотного волоконного лазера был впервые создан одномодовый композитный световод. Одномодовость была достигнута за счет малого диаметра сердцевины, граница одномодового режима составляла 1,4 мкм.

В изготовленном световоде впервые обнаружена фоточувствительность к действию излучения эксимерного KrF лазера на длине волны 248 нм. На рисунке 10 представлена зависимость наведенного показателя преломления от дозы УФ-облучения. Разность показателей преломления, наводимая при действии ультрафиолетового излучения, представленная на этом графике, была достаточна для записи волоконной брэгговской решетки и формирования резонатора одночастотного лазера непосредственно в активном волоконном световоде.

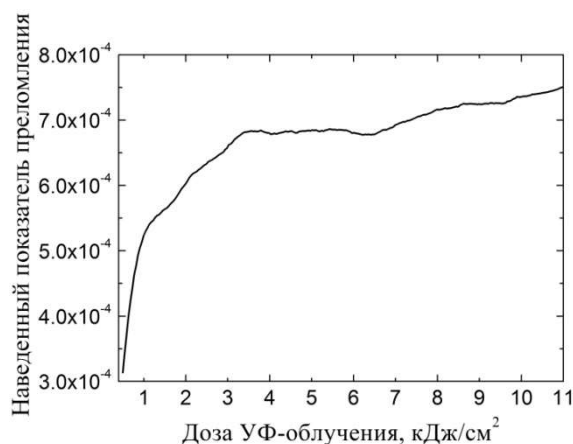


Рисунок 10. Зависимость наведенного показателя преломления в композитном волоконном световоде от дозы УФ-облучения на длине волны 248 нм.

С использованием записи брэгговских решеток с помощью излучения на длине волны 248 нм непосредственно в сердцевине активного композитного световода продемонстрирована возможность создания одночастотного волоконного лазера (рисунок 11). Резонатор лазера был сформирован двумя одинаковыми волоконными брэгговскими решетками длиной 23 мм каждая, решетки были разделены участком необлученного активного световода длиной 4 мм. Коэффициент отражения каждой решетки составляет около 98%, ширина спектра по полувысоте — 0,16 нм. Изготовленный волоконный лазер работал в устойчивом одночастотном и линейно-поляризованном режиме на длине волны 1560 нм. Дифференциальная эффективность лазерной генерации составляла свыше 1,2%, максимальная выходная мощность — свыше 3 мВт.

Также продемонстрирована возможность создания одночастотного волоконного лазера с резонатором, сформированным брэгговскими решетками, записанными с помощью излучения на длине волны 193 нм эксимерного ArF лазера. Изготовленный волоконный лазер с общей длиной резонатора 21 мм работал в устойчивом одночастотном и линейно-поляризованном режиме на длине волны 1565 нм.

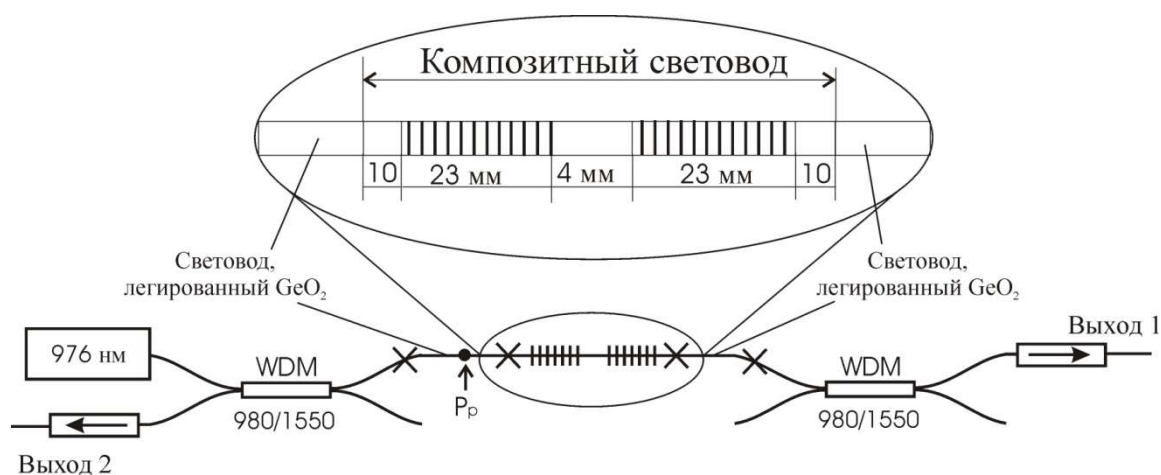


Рисунок 11. Схема одночастотного волоконного лазера.

Заключительная часть пятой главы посвящена новому способу создания интерферометра Фабри–Перо, интегрированного непосредственно в структуру волоконного световода. Метод основан на соединении в электрическом разряде торцов одномодового световода на основе кварцевого стекла и композитного световода, полученного методом «стержень в трубке», с сердцевинной, изготовленной из фосфатного стекла, и оболочкой из кварцевого стекла. За счет высокой концентрации оксида фосфора сердцевина композитного световода обладает низкой (по сравнению со световодами, полученными методами осаждения стекла из газовой фазы) температурой образования летучих компонент. За счет этого при нагреве в электрическом разряде при сварке двух световодов в сердцевине композитного световода образуется микрополость. Данная микрополость является интерферометром Фабри–Перо. В работе показана возможность использования полученного интерферометра Фабри–Перо в качестве чувствительного элемента датчика деформации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные в диссертации структуры волоконных световодов, технологические процессы их создания, экспериментальные методики измерения их характеристик, а также элементы функциональных устройств на основе новых структур световодов вносят существенный вклад в решение проблемы создания элементной базы для таких областей, как квантовая электроника и радиофотоника. В результате работы предложен новый подход к созданию световодов для волоконных лазеров и усилителей, основанный на использовании световодов с фотонной запрещенной зоной, представляющих собой световоды с сердцевинной из кварцевого стекла и оболочкой в виде двумерного фотонного кристалла с малым отношением диаметра элементов к расстоянию между центрами соседних элементов. Кроме того, в результате работы обоснована правомерность нового подхода к созданию активных волоконных световодов с помощью метода «стержень в трубке» с сердцевинной, изготовленной из фосфатного стекла, и оболочкой, изготовленной из кварцевого стекла. Данный подход открывает новые возможности для создания световодов с высокой концентрацией активных редкоземельных ионов. В световодах данного типа обнаружена фоточувствительность к действию излучения на длине волны 248 нм, что позволило создать на их основе одночастотные волоконные лазеры. Также в работе

предложен и исследован ряд способов снижения перекрестных оптических помех в многосердцевинных волоконных световодах.

Основные результаты работы сводятся к следующему:

1. Впервые изучены свойства и показаны перспективы использования волоконных световодов с сердцевинной из кварцевого стекла и оболочкой, представляющей собой двумерный фотонный кристалл, который состоит из элементов (цилиндров) из легированного кварцевого стекла, расположенных в нелегированном кварцевом стекле в гексагональном порядке, с отношением диаметра элемента к расстоянию между центрами соседних элементов менее 0,3. В ходе исследований получены следующие основные результаты:

а) в световодах с расстоянием между центрами соседних элементов около 10–12 мкм и с отношением диаметра элемента к расстоянию между центрами соседних элементов примерно 0,1–0,3 наблюдалась локализация моды сердцевинной в пределах фундаментальной запрещенной зоны периодической структуры оболочки. Минимальные оптические потери составляли около 20–30 дБ/км. Ширина области локализации моды сердцевинной в пределах фундаментальной запрещенной зоны зависела от параметров оболочки и сердцевинной и составляла несколько сотен нанометров (по уровню 100 дБ/км);

б) экспериментально и теоретически показано, что в световодах с отношением диаметра элемента фотонно-кристаллической оболочки к расстоянию между центрами соседних элементов менее 0,4 в случае, если сердцевина световода образована одним отсутствующим элементом оболочки, она является одномодовой в пределах спектрального диапазона фундаментальной запрещенной зоны. Одномодовость в широком спектральном диапазоне позволяет получить структуру одномодового световода с увеличенным диаметром моды. С учетом этого, а также экспериментально показанной возможности получить локализацию моды сердцевинной в фундаментальной запрещенной зоне с центром в окрестности длины волны 1000 нм при достаточно большом диаметре сердцевинной (около 20 мкм) с приемлемыми оптическими потерями, предложен новый подход к созданию активных световодов с увеличенным диаметром поля моды для волоконных лазеров и усилителей, основанный на использовании световодов данной конструкции. Изготовлены и исследованы одномодовые световоды с диаметром поля моды 18 мкм и с сердцевинной, активированной ионами иттербия. Разработанная технология имеет потенциал для создания активных световодов с большим диаметром сердцевинной, одномодовых или близких к одномодовым.

2. Обоснована правомерность нового подхода к созданию активных композитных световодов методом «стержень в трубке» с сердцевинной, изготовленной из фосфатного стекла, и оболочкой из кварцевого стекла. В ходе работ по созданию и исследованию нового вида световодов достигнуты следующие основные результаты:

а) показано, что величина оптических потерь в композитных световодах составляет 1–2 дБ/м, что приемлемо для практического использования;

б) показано, что механическая прочность исследованных световодов и мест их соединений с другими световодами соответствует прочности световодов, целиком состоящих из кварцевого стекла;

в) в композитных световодах, легированных ионами эрбия и иттербия и только иттербия, достигнут уровень эффективности лазерной генерации, который близок к уровню эффективности, достижимому при использовании световодов на

основе кварцевого стекла. В световоде, легированном эрбием и иттербием, в схеме с накачкой по оболочке получена дифференциальная эффективность генерации 28% относительно введенной и 39% относительно поглощенной мощности накачки при длине световода около 40–60 см, что в несколько раз меньше оптимальной длины световода аналогичной конструкции, изготовленного методом осаждения стекла из газовой фазы. В схеме с накачкой по сердцевине световода, легированного только ионами иттербия, при длине световода всего 5 см была достигнута дифференциальная эффективность относительно введенной мощности накачки 73%–74%. Достижимая в композитных световодах концентрация активных редкоземельных ионов превышает уровень легирования, обычно получаемый в световодах на основе кварцевого стекла, за счет чего длина активного световода может быть уменьшена;

г) в композитных световодах обнаружено наличие фоточувствительности к действию излучения на длине волны 248 нм. Используя запись брэгговских решеток с помощью излучения эксимерного KrF лазера на длине волны 248 нм непосредственно в сердцевине одномодового композитного световода, легированного ионами эрбия, продемонстрирована возможность создания одночастотного волоконного лазера на длине волны 1560 нм.

3. Проведен цикл работ, посвященных разработке структур многосердцевинных волоконных световодов, методик их создания и исследования, в ходе которых предложен и реализован ряд новых подходов к снижению перекрестных оптических помех. В ходе работ получены следующие наиболее важные результаты:

а) предложен новый подход к снижению перекрестных оптических помех между сердцевинами в многосердцевинном волоконном световоде, основанный на использовании барьерного слоя с пониженным показателем преломления. При введении такого слоя между сердцевинами снижается величина поперечной компоненты напряженности поля моды на краях распределения и, за счет этого, снижаются перекрестные оптические помехи между модами соседних сердцевин. При этом барьерный слой может быть достаточно удален от сердцевин для того, чтобы не оказывать существенного влияния на другие волноводные характеристики мод. Разработана технология изготовления многосердцевинных световодов со слоем с пониженным показателем преломления, и созданы образцы таких световодов. Экспериментально показано, что введение слоя с пониженным показателем преломления между сердцевинами многосердцевинного световода приводит к снижению перекрестных оптических помех на величину примерно 20 дБ на одном километре световода;

б) впервые изготовлен гетерогенный многосердцевинный световод прямоугольного поперечного сечения с сердцевинами, расположенными в один ряд. Экспериментально показано, что в такой структуре световода нежелательный рост перекрестных оптических помех при приближении радиуса изгиба световода к критическому, связанный с уменьшением разности постоянных распространения мод соседних сердцевин, существенно подавлен по сравнению со световодом круглого поперечного сечения (и таким же расположением сердцевин) благодаря существованию преимущественного направления изгиба, связанного с некруглой формой поперечного сечения световода. Однако при малых диаметрах изгиба, при которых наблюдается существенный рост изгибных оптических потерь, за счет

увеличения связи мод сердцевин с модами оболочки происходит резкое возрастание перекрестных оптических помех;

в) 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 изготовлена линия задержки сигнала на многосердцевинном оптическом волокне. Для экспериментальной реализации данного подхода разработана методика создания устройств, предназначенных для ввода и вывода из сердцевины многосердцевинных волоконных световодов.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Патенты

1 Патент РФ № 2489741 С.Л. Семенов, О.Н. Егорова, Е.М. Дианов «Многосердцевинный волоконный световод (варианты)», дата приоритета 19 января 2011, дата регистрации 10 августа 2013 (Патент США US 9052433 B2 Multicore optical fiber (variants), изобретатели: Е.М. Dianov, S.L. Semenov, O.N. Egorova, заявитель: FORC RAS; дата приоритета 19.01.2011; опубликовано 07.11.2013).

2 Патент РФ № 2626045 О.Н. Егорова, М.С. Астапович, М.Е. Белкин, С.Л. Семенов, «Линии задержки на многосердцевинном оптическом волокне», дата приоритета 20 июня 2016, дата регистрации 21 июля 2017.

3 Патент РФ № RU 2707383 С.Г. Журавлев, О.Н. Егорова, С.Л. Семенов, «Способ изготовления устройства ввода-вывода для многосердцевинного оптического волокна», дата приоритета 10 апреля 2019, дата регистрации 26.11.2019.

Публикации по теме диссертации, опубликованные в изданиях, входящих в список, рекомендованный ВАК

1 O.N. Egorova, S.L. Semjonov, A.F. Kosolapov, A.N. Denisov, A.D. Pryamikov, D.A. Gaponov, A.S. Biriukov, E.M. Dianov, M.Y. Salganskii, V.F. Khopin, M.V. Yashkov, A.N. Gurianov, D.V. Kuksenkov, "Single-mode all-silica photonic bandgap fiber with 20- μ m mode-field diameter," Optics Express, Vol. 16, No. 16, pp. 11735-11740 (2008).

2 О. Н. Егорова, С. Л. Семенов, М. Ю. Салганский, В. Ф. Хопин, А. Н. Гурьянов, «Свойства световодов с фотонной запрещенной зоной и сердцевиной из кварцевого стекла; критерий одномодовости,» Квантовая электроника, т. 42, № 2, сс. 165–169 (2012).

3 О. Н. Егорова, С. Л. Семенов, В. В. Вельмискин, М. Ю. Салганский, М. В. Яшков, А. Н. Гурьянов, Е. М. Дианов, «Одномодовый волоконный световод с фотонной запрещенной зоной и сердцевиной из кварцевого стекла, легированного ионами иттербия,» Квантовая электроника, т. 40, № 12, сс. 1137–1140 (2010).

4 S. L. Semjonov; O. N. Egorova; A. F. Kosolapov; A. E. Levchenko; Vladimir V. Velmiskin; A. D. Pryamikov; M. Y. Salganskiy; V. F. Khopin; M. V. Yashkov; A. N. Guryanov; E. M. Dianov, "LMA fibers based on two-dimensional solid-core photonic

bandgap fiber design,” Proc. of SPIE, Vol. 7580, Fiber Lasers VII: Technology, Systems, and Applications, p. 758018 (2010).

5 C. Lecaplain, L. Rasoloniana, J. Michaud, A. Hideur, O.N. Egorova, S.L. Semjonov, E.M. Dianov, “Mode-locked all-solid photonic bandgap fiber laser,” Applied Physics B: Lasers and Optics, Vol. 107, No.2. 2012. pp. 317-322 (2012).

6 V.V. Velmiskin, O.N. Egorova, S.L. Semjonov, V. Mishkin, K. Nishchev, “Active material for fiber core made by powder-in-tube method: subsequent homogenization by means of stack-and-draw technique,” Proc. of SPIE, Vol. 8426, p. 84260I (2012).

7 О.Н. Егорова, С.Л. Семенов, Е.М. Дианов, С.Е. Сверчков, Б.И. Галаган, Б.И. Денкер «Световоды с высокой концентрацией активных редкоземельных ионов с сердцевиной из фосфатного и оболочкой из кварцевого стекла,» Квантовая электроника, т. 46, № 12, с. 1071-1076 (2016).

8 S.L. Semjonov, O.N. Egorova, O.I. Medvedkov, M.S. Astapovich, A.G. Okhrimchuk, E.M. Dianov, B. I. Denker, B. I. Galagan, S. E. Sverchkov, «Fabrication and Investigation of Active Composite Fibers with Phosphate Core and Silica Cladding,» Proc. of SPIE, Vol. 9728, p. 97281P (2016).

9 O.N. Egorova, S.L. Semjonov, V.V. Velmiskin, Yu. P. Yatsenko, S.E. Sverchkov, B. I. Galagan, B.I. Denker, E.M. Dianov, “Phosphate-core silica-clad Er/Yb-doped optical fiber and cladding pumped laser,” Optics Express, Vol. 22, No. 7, pp. 7632-7637 (2014).

10 O.N. Egorova, S.L. Semjonov, O.I. Medvedkov, V.S. Astapovich, A.G. Okhrimchuk, B.I. Galagan, B.I. Denker, S.E. Sverchkov, E.M. Dianov, “High-beam quality, high-efficiency laser based on fiber with heavily Yb³⁺-doped phosphate core and silica cladding,” Optics Letters, Vol. 40, No. 16, pp. 3762-3765 (2015).

11 О. Н. Егорова, М.С. Астапович, Л.А. Мельников, М. Ю. Салганский, В. П. Мишкин, К. Н. Нищев, С. Л. Семенов, Е. М. Дианов, «Влияние структуры и изгибов многосердцевинного волоконного световода на перекрестные оптические помехи,» Квантовая электроника, т. 46, № 3, с 262-266 (2016).

12 O. N. Egorova, S. L. Semjonov, A. K. Senatorov, M. Y. Salganskii, A. V. Koklyushkin, V. N. Nazarov, A. E. Korolev, D. V. Kuksenkov, Ming-Jun Li, and E. M. Dianov, “Multicore fiber with rectangular cross-section,” Optics Letters, Vol. 39, No. 7, pp. 2168-2170 (2014).

13 O. N. Egorova, M. S. Astapovich, and S. L. Semjonov, “Crosstalk in rectangular cross-section heterogeneous multicore fiber,” Optical Engineering, Vol. 55, No. 9, pp. 090507 -1 -4 (2016).

14 М.С. Астапович, О.Н. Егорова, С.Л. Семенов, “Измерение разности задержек между сердцевинами многосердцевинного световода интерференционным методом,» Известия РАН. Серия физическая, т. 81, № 1, сс. 15–18 (2017).

15 М.С. Астапович, О.Н. Егорова, С.Л. Семенов, “Влияние изгиба многосердцевинного оптического волокна на разницу оптических задержек между сердцевинами,» Краткие сообщения по физике ФИАН, т. 12, сс. 29-34 (2016).

16 О.Н. Егорова, М.С. Астапович, М.Е. Белкин, С.Л. Семенов, “Многосердцевинное оптическое волокно и линия задержки на его основе, Квантовая электроника,» т. 46, № 12, сс. 1134-1138 (2016).

17 О.Н. Егорова, М.С. Астапович, М.Е. Белкин, С.Л. Семенов, “Волоконно-оптическая линия задержки на основе многосердцевинного оптического волокна,” Краткие сообщения по физике ФИАН, т. 12, сс. 60-64 (2016).

18 O.N. Egorova, M.E. Belkin, D.A. Klushnik, S.G. Zhuravlev, M.S. Astapovich, and S. L. Semjonov, “Microwave Signal Delay Line Based on Multicore Optical Fiber,” *Physics of Wave Phenomena*, Vol. 25, No. 4, pp. 289–292 (2017).

19 С.Л. Семенов, О.Н. Егорова, «Надежность многосердцевинного оптического волокна в волоконно- оптических линиях задержки,» Краткие сообщения по физике, т. 11, сс. 35-40 (2017).

20 A.A. Rybaltovsky, O.N. Egorova, S.G. Zhuravlev, B.I. Galagan, S.E. Sverchkov, B.I. Denker, S.L. Semjonov, “Distributed Bragg reflector fiber laser directly written in a composite fiber manufactured by melting phosphate glass in a silica tube,” *Optics Letters*, Vol. 44, No. 14, pp. 3518-3521 (2019).

21 О.Н. Егорова, О.И. Медведков, Е. С. Серегин, С.А. Васильев, С.Е. Сверчков, Б.И. Галаган, Б.И. Денкер, Г.Л. Даниелян, В.И. Пустовой, С.Л. Семенов, «Одночастотный волоконный лазер с резонатором, сформированным брэгговскими решетками, записанными в сердцевине активного композитного световода излучением KrF лазера (248 нм),» *Квантовая электроника*, т. 49, №12, сс. 1112-1116 (2019).

22 О.Н. Егорова, С.А. Васильев, И.Г. Лихачев, С.Е. Сверчков, Б.И. Галаган, Б.И. Денкер, С.Л. Семенов, В.И. Пустовой, «Интерферометр Фабри–Перо, сформированный в сердцевине композитного волоконного световода с высоким содержанием оксида фосфора,» *Квантовая электроника*, т.49, № 12, сс. 1140-1144 (2019).

Публикации по теме диссертации, опубликованные в изданиях, не входящих в список, рекомендованный ВАК

1 S. L. Semjonov, O. N. Egorova, A. D. Pryamikov, D. A. Gaponov, A. S. Biriukov, E. M. Dianov, M. Y. Salganskii, V. F. Khopin, and A. N. Guryanov, "Mode Structure of Large Mode Area All-Solid Photonic Bandgap Fiber," in *Proc. of Conference on Quantum Electronics and Laser Science Conference on Lasers and Electro-Optics*, paper CMNH6 (2009).

2 O.N. Egorova, D.A. Gaponov, N.A. Harchenko, A.F. Kosolapov, S.A. Letunov, A.D. Pryamikov, S.L. Semjonov, E.M. Dianov, V.F. Khopin, M.Y. Salganskii, A.N. Guryanov, D.V. Kuksenkov, “All-solid photonic bandgap fiber with large mode area and high order modes suppression,” in *Proc. of Conference on Quantum Electronics and Laser Science Conference on Lasers and Electro-Optics*, Paper CTuMM3 (2008).

3 O.N. Egorova, S.L. Semjonov, A.F. Kosolapov, V.V. Velmiskin, A.D. Pryamikov, A.S. Biriukov, E.M. Dianov, M.Y. Salganskii, V.F. Khopin, M.Y. Yashkov, A.N. Gurianov, “Large mode area single-mode ytterbium doped all-solid photonic bandgap fiber,” in *Proc. of European Conference on Optical Communication*, p. 5287029 (2009).

4 С.Л. Семенов, О.Н. Егорова, В.Ф. Косолапов, В.В. Вельмискин, А.Д. Прямиков, А.С. Бирюков, М.Ю. Салганский, В.Ф. Хопин, А.Н. Гурьянов, Е.М. Дианов, “Световоды с фотонной запрещенной зоной и большим диаметром поля моды,”

труды Всероссийской конференции по волоконной оптике ВКВО'2009, Фотон-экспресс, № 6 (78), сс. 25-26. (2009).

5 C. Lecaplain, L. Rasoloniana, J. Michaud, A. Hideur, O.N. Egorova, S.L. Semjonov, E.M. Dianov, "Mode-locked all-solid photonic bandgap fiber laser," In Proc. of Optics InfoBase Conference Papers "Advanced Solid-State Photonics, ASSP 2011," paper ATuB11 (2011).

6 В.В. Вельмискин, О.Н. Егорова, С.Л. Семёнов, Е.М. Дианов, «Метод создания легированных оптических материалов на основе кварцевого стекла для активных волоконных световодов путем спекания порошков оксидов,» труды Всероссийской конференции по волоконной оптике ВКВО'2011, Фотон-экспресс, № 6 (94), сс. 172-173 (2011).

7 В.В. Вельмискин, О.Н. Егорова, Д.С. Исупов, А.К. Сенаторов, С.Г. Черноок, С.Л. Семёнов, Е.М. Дианов, «Оптимизация метода создания заготовок активных кварцевых волоконных световодов путем спекания порошков оксидов,» труды Всероссийской конференции по волоконной оптике ВКВО'2013, Фотон-экспресс, № 6 (110), сс. 140-141 (2013).

8 В.В. Вельмискин, О.Н. Егорова, Д.Ю. Ерин, С.Л. Семёнов, Е.М. Дианов, «Изготовление легированных фосфором и алюминием кварцевых волоконных световодов путем спекания порошков оксидов,» труды Всероссийской конференции по волоконной оптике ВКВО'2015, Фотон-экспресс, № 6 (126), сс. 161-162 (2015).

9 V.V. Vel'miskin, O.N. Egorova, D.Y. Erin, S.L. Semjonov, E.M. Dianov, "Fabrication of aluminum and phosphorus doped optical fibers by sintering a powder mixture," In Proc. of Specialty Optical Fibers Conference, paper SoM2B.2 (2014).

10 В.В. Вельмискин, О.Н. Егорова, Д.Ю. Ерин, А.К. Сенаторов, С.Г. Черноок, С.Л. Семёнов, «Усовершенствованный метод изготовления заготовок активных кварцевых волоконных световодов путем спекания порошков оксидов,» В сборнике: IV Международная конференция по фотонике и информационной оптике Сборник научных трудов, сс. 84-85, (2015).

11 О.Н. Егорова, С.Л. Семенов, М.Ю. Салганский, М.В. Яшков, А.Н. Гурьянов, «Одномодовый волоконный световод с фотонной запрещенной зоной и сердцевиной из кварцевого стекла, легированного ионами иттербия: получения и свойства,» Нижний Новгород, Высокочистые вещества и материалы, тезисы докладов, сс. 29-30 (2011).

12 B. Denker, B. Galagan, V. Kamynin, A. Kurkov, Y. Sadovnikova, S. Semenov, S. Sverchkov, O. Egorova, V. Velmiskin, E. Dianov, "Efficient laser action in composite fibers with Yb, Er codoped phosphate core and silica cladding," in Advanced Solid-State Lasers Congress, G. Huber and P. Moulton, eds., OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2013), paper AM4A.07. (2013).

13 В.В. Вельмискин, Б.И. Галаган, Б.И. Денкер, О.Н. Егорова, В.А. Камынин, А.С. Курков, Я.Е. Садовникова, С.Е. Сверчков, С.Л. Семенов, Е.М. Дианов, «Иттербий-эрбиевое лазерное волокно с фосфатной сердцевиной и кварцевой оболочкой,» труды Всероссийской конференции по волоконной оптике ВКВО'2013, Фотон-экспресс, № 6 (110), с. 148 (2013).

- 14 Б.И. Галаган, Б.И. Денкер, О.Н. Егорова, В.В. Вельмискин, С.Л. Семенов, С.Е. Сверчков, Е.М. Дианов, «Высокоактивированные РЗИ композитные световоды с кварцевой оболочкой,» труды Всероссийской конференции по волоконной оптике ВКВО'2017, Фотон-экспресс, № 6 (142), с. 143-144 (2017).
- 15 О.Н. Егорова, С.Л. Семёнов, В.В. Вельмискин, Ю.П. Яценко, С.Е. Сверчков, Б.И. Галаган, Б.И. Денкер, Е.М. Дианов, «Световод с сердцевиной из фосфатного стекла, легированного ионами Er и Yb и оболочкой из кварцевого стекла,» В сборнике: IV Международная конференция по фотонике и информационной оптике Сборник научных трудов с. 80-81 (2015).
- 16 О.Н. Егорова, С.Л. Семенов, О.И. Медведков, М.С. Астапович, А.Г. Охримчук, Б.И. Галаган, Б.И. Денкер, С.Е. Сверчков, Е.М. Дианов, «Композитные волоконные световоды с оболочкой из кварцевого и сердцевиной из фосфатного стекла, легированного редкоземельными ионами,» труды Всероссийской конференции по волоконной оптике ВКВО'2015, Фотон-экспресс, № 6 (126), с. 124 (2015).
- 17 O.N. Egorova, S. L. Semjonov, O. I. Medvedkov, M. S. Astapovich, A. G. Okhchimchuk, E.M Dianov, B. I. Denker, B. I. Galagan, S. E. Sverchkov, "Efficient TEM00 laser action in a short-length heavily Yb-doped composite fiber with phosphate core and silica cladding," Conference on Advanced Laser Technologies, Book of Abstracts, Paper LS-I-15 p. 165 (2015).
- 18 О. Н. Егорова, С. Л. Семенов, С. Е. Сверчков, Б. И. Галаган, Б. И. Денкер, Е. М. Дианов, "Световоды с высокой концентрацией активных редкоземельных ионов с сердцевиной из фосфатного и оболочкой из кварцевого стекла," Материалы 7-го Всероссийского семинара по волоконным лазерам, Новосибирск, стр. 55-56 (2016) (приглашенный).
- 19 О.Н. Егорова, С.Л. Семенов, Е.М. Дианов, М.Ю. Салганский, А.В. Коклюшкин, В.Н. Назаров, А.Е. Королев, Д.В. Куксенков, В.П. Мишкин, К.Н. Нищев, «Влияние слоя с пониженным показателем преломления на перекрестные помехи в многосердцевинных световодах,» труды Всероссийской конференции по волоконной оптике ВКВО'2013, Фотон-экспресс, № 6 (110), с. 277-278 (2013).
- 20 О.Н. Егорова, С.Л. Семенов, Е.М. Дианов, А.В. Коклюшкин, В.Н. Назаров, А.Е. Королев, Д.В. Куксенков, «Микроструктурированный световод для передачи сигнала с пониженной групповой задержкой,» труды Всероссийской конференции по волоконной оптике ВКВО'2013, Фотон-экспресс, № 6 (110), с. 325-326 (2013).
- 21 О.Н. Егорова, М.С. Астапович, С.Л. Семенов, М.Ю. Салганский, «Многосердцевинный волоконный световод с прямоугольным поперечным сечением,» Прикладная фотоника, т. 3. № 1. С. 28-36 (2016).
- 22 М.С. Астапович, О.Н. Егорова, С.Л. Семёнов, М.Ю. Салганский, Е.М. Дианов, «Влияние изгиба многосердцевинного гетерогенного световода с прямоугольным поперечным сечением на перекрестные помехи,» труды Всероссийской конференции по волоконной оптике ВКВО'2015, Фотон-экспресс, № 6 (126), с. 107-108 (2015).
- 23 С. Л. Семенов, О. Н. Егорова, М. С. Астапович, "Многосердцевинные волоконные световоды текущее состояние и перспективы применений,"

Материалы 7-го Всероссийского семинара по волоконным лазерам, Новосибирск, стр. 20-21 (2016) (приглашенный).

24 С.Г. Журавлев, О.Н. Егорова, С.Л. Семенов, «Устройство ввода-вывода для многосердцевинного волокна,» труды Всероссийской конференции по волоконной оптике ВКВО'2017, Фотон-экспресс, № 6 (142), с. 256-257 (2017).

25 О.Н. Егорова, А.А. Рыбалтовский, С.Г. Журавлев, С.Е. Сверчков, Б.И. Галаган, Б.И. Денкер, С.Л. Семенов, «Одночастотный волоконный лазер на световоде, изготовленном методом спекания фосфатного стекла в трубке из кварцевого стекла,» Труды всероссийской конференции по волоконной оптике ВКВО'2019, Фотон-экспресс, № 6, с. 413 (2019).

26 О.Н. Егорова, И.Г. Лихачев, С.А. Васильев, С.Е. Сверчков, Б.И. Галаган, Б.И. Денкер, С.Л. Семенов, В.И. Пустовой, «Датчик деформации на основе интерферометра Фабри–Перо, сформированного в сердцевине композитного волоконного световода» Труды всероссийской конференции по волоконной оптике ВКВО'2019, Фотон-экспресс, № 6, с. 351 (2019).

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 С. К. Kao and G. A. Hockham, "Dielectric-fiber surface waveguides for optical frequencies," Proc. IEEE, vol. 133, pp. 1151–1158 (1966).
- 2 F. P. Kapron, D. B. Keck, and R. D. Maurer, "Radiation losses in glass optical waveguides," Appl. Phys. Lett., Vol. 17, pp. 423–425 (1970).
- 3 T. Miya, Y. Terunuma, T. Hosaka, and T. Moyashita, "Ultimate low-loss single-mode fibers at 1.55 μm ," Electron. Lett., Vol. 15, pp. 106–108, (1979).
- 4 A. Mendez and T.F. Morse, "Specialty Optical Fibers Handbook," Elsevier Academic Press 2007, p. 798.
- 5 J. Ballato, and P. Dragic, "Rethinking Optical Fiber: New Demands, Old Glasses," J. Am. Ceram. Soc., Vol. 96, No. 9, pp. 2675–2692 (2013).
- 6 J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell and D. M. Atkin, "All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding," Optics Letters, Vol. 21, No. 19, pp. 1547-1549 (1996).
- 7 P. Russell, "Photonic crystal fibers," Science 299(5605), pp. 358–362 (2003).
- 8 M.-J. Li, X. Chen, A. Liu, S. Gray, J.Wang, D.T. Walton, and L.A. Zenteno, "Effective area limit for large mode area fibers," in Proc. Optical Fiber Communication Conference, paper OTuJ2 (2008).
- 9 T.A. Birks, J.C. Knight, and P.St.J. Russell, "Endlessly single-mode photonic crystal fiber," Optics Letters, Vol. 22, No. 13, pp. 961-963 (1997).
- 10 P. Hofmann, C. Voigtländer, S. Nolte, N. Peyghambarian, and A. Schülzgen, "550-mW Output Power From a Narrow Linewidth All-Phosphate Fiber Laser," Journal of Lightwave Technology, Vol. 31, No. 5, pp. 756-760 (2013).

-
- 11 R. Thapa, D. Nguyen, J. Zong, and A. Chavez-Pirson, All-fiber fundamentally mode-locked 12 GHz laser oscillator based on an Er/Yb-doped phosphate glass fiber," *Optics Letters*, Vol. 39, No. 6, pp. 1418-1421 (2014).
 - 12 S. Inao, T. Sato, S. Sentsui, T. Kuroha, Y. Nishimura, "Multicore optical fiber," in *Proc. of Optical Fiber Communication Conference*, p. WB1. (1979).
 - 13 A.R. Chraplyvy, "The coming capacity crunch," ECOC'2009, plenary talk.
 - 14 R.J. Essiambre, G. Kramer, P. J. Winzer, G. J. Foschini, and B. Goebel, "Capacity Limits of Optical Fiber Networks," *J.Lightwave Technology*, Vol. 28, No. 4, pp. 662-701 (2010).
 - 15 P.J. Winzer and R.J. Essiamber, 'Advanced Optical Modulation Format', in *Optical Fiber Telecommunications V.I. Kaminov, T. Li, and A.E. Willner, Elsevier* (2008).
 - 16 B. Rosinski, J. W. D. Chi, P. Grosso, and J. Le Bihan. "Multichannel Transmission of a Multicore Fiber Coupled with Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers," *J. Lightwave Technol*, Vol. 17, No. 5, pp. 807-810 (1999).
 - 17 B. Zhu, T.F. Taunay, M.F. Yan, J.M. Fini, M. Fishteyn, E.M. Monberg, F.V. Dimarcello, "Seven-core multicore fiber transmissions for passive optical network," *Optics Express*, Vol. 18, No. 11, pp. 11117-11122 (2010).
 - 18 J. Berthold , "Optical Networking for Data Centers Across Wide Area Networks," *Proc. Optical Fiber Communication Conference*, Paper OW1J.1. (2012).
 - 19 P. S. Westbrook, T. Kremp, K. S. Feder, W. Ko, E. M. Monberg, H. Wu, D. A. Simoff, T. F. Taunay, and R. M. Ortiz, "Continuous Multicore Optical Fiber Grating Arrays for Distributed Sensing Applications," *J. of Lightwave Technology*, Vol. 35, No. 6, pp. 1248-1252 (2017).
 - 20 J. E. Antonio-Lopez, Z. S. Eznaveh, P. LiKamWa, A. Schülzgen, and R. Amezcua-Correa, "Multicore fiber sensor for high-temperature applications up to 1000°C," *Optics Letters*, Vol. 39, No. 15, pp. 4309- 4312 (2014).
 - 21 D. Barrera, I. Gasulla, and S. Sales, "Multipoint Two-Dimensional Curvature Optical Fiber Sensor Based on a Nontwisted Homogeneous Four-Core Fiber," *J. of Lightwave Technology*, Vol. 33, No. 12, pp. 2445-2450 (2015).
 - 22 T. Eidam, J. Rothhardt, F. Stutzki, F. Jansen, S. Hädrich, H. Carstens, C. Jauregui, J. Limpert, and A. Tünnermann, "Fiber chirped-pulse amplification system emitting 3.8 GW peak power," *Optics Express*, Vol. 19, No. 1, pp. 255-260 (2010).
 - 23 G. Bouwmans, L. Bigot, Y. Quiquempois, F. Lopez, L. Provino, and M. Douay, "Fabrication and characterization of an all-solid 2D photonic bandgap fiber with a low-loss region (< 20 dB/km) around 1550 nm," *Optics Express*, Vol. 13, pp. 8452-8459 (2005).
 - 24 R.A. Martin, J.C. Knight, "Silica-Clad Neodymium-Doped Lanthanum Phosphate Fibers and Fiber Lasers," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 18, No. 4, pp. 574-576 (2006).

-
- 25 B. I. Denker, B. I. Galagan, V. A. Kamynin, A. S. Kurkov, Ya. E. Sadovnikova, S. L. Semenov, S. E. Sverchkov, V. V. Velmiskin and E. M. Dianov, "Composite laser fiber with Yb, Er co-doped phosphate glass core and silica cladding," *Laser Phys. Lett.*, Vol. 10, p. 055109 (2013).
- 26 M. J. F. Digonnet, H. K. Kim, G. S. Kino, and S. Fan, "Understanding air-core photonic-bandgap fibers: Analogy to conventional fibers," *J. Lightwave Technol.* Vol. 23, pp. 4169-4177 (2005).
- 27 J. Limpert, O. Schmidt, J. Rothhardt, F. Röser, T. Schreiber, A. Tünnermann, S. Ermeneux, P. Yvernault, F. Salin, "Extended single-mode photonic crystal fiber lasers," *Opt. Express*, Vol. 14, pp. 2715-2720 (2006).
- 28 J. Nilsson, S.U. Alam, J.A. Alvarez-Chavez, P.W. Turner, W.A. Clarkson, and A.B. Grudinin, "High-power and tunable operation of erbium-ytterbium co-doped cladding-pumped fiber laser," *IEEE J. Quantum Electronics* Vol. 39, pp. 987-994 (2003).
- 29 Патент РФ № 2489741 С.Л. Семенов, О.Н. Егорова, Е.М. Дианов «Многосердцевинный волоконный световод (варианты)», дата приоритета 19 января 2011, дата регистрации 10 августа 2013 (Патент США US 9052433 B2 Multicore optical fiber (variants), изобретатели: E.M. Dianov, S.L. Semenov, O.N. Egorova, заявитель: FORC RAS; дата приоритета 19.01.2011; опубликовано 07.11.2013).
- 30 Международная патентная заявка PCT WO2012063775 (A1) Multicore Fiber; изобретатели: S. Matsuo; K. Takenaga; K. Saitoh; M. Koshiba; заявитель: Fudjikura LTD; дата приоритета 08.11.2010; опубликовано 18.05.2012.
- 31 Патент США US 8737792 Multicore fibers and associated structures and techniques, изобретатели J. Fini, T. Taunay, F. Yan Man, B. Zhu, заявитель: OFS Fitel LLC, дата приоритета 10.03.2011; опубликовано 10.11.2011.
- 32 H. Takara, A. Sano, T. Kobayashi, H. Kubota, H. Kawakami, A. Matsuura, Y. Miyamoto, Y. Abe, H. Ono, K. Shikama, Y. Goto, K. Tsujikawa, Y. Sasaki, I. Ishida, K. Takenaga, K. Matsuo, K. Saitoh, M. Koshiba, T. Morioka, "1.01-Pb/s (12 SDM/222 WDM/456 Gb/s) crosstalk-managed transmission with 91.4-b/s/Hz aggregate spectral efficiency," in *Proc. of European Conference of Optical Communications*, Paper Th.3.C.1. (2012).
- 33 B.J. Puttnam, R.S. Luis, W. Klaus, J. Sakaguchi, J.-M. D. Mendinueta, Y. Awaji, N. Wada, Y. Tamura, T. Hayashi, M. Hirano, and J. Marciante, "2.15 Pb/s transmission using a 22 core homogeneous single-mode multi-core fiber and wideband optical comb," in *Proc. of European Conference of Optical Communications*, Paper PDP 3.1 (2015).
- 34 Патент США US 6611648 "Optical fibers having cores with different propagation constants, and method of manufacturing same," Изобретатели: S. Kumar, U.H. Manyam, V. Srikant, дата приоритета 09.05.2001, опубликовано 26.08.2003.
- 35 T. Hayashi, T. Nagashima, O. Shimakawa, T. Sasaki, E. Sasaoka, "Crosstalk Variation of Multi-Core Fibre due to Fibre Bend," in *Proc. of European Conference of Optical Communications*, Paper We.8.F.6. (2010).

36 K. Watanabe, T. Saito, K. Imamura, M. Shiino, "Development of Fiber Bundle Type Fan-out for Multicore Fiber," in Proc. of OptoElectronics and Communications Conference, 5C1-2, pp. 475-476 (2012).