Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН)

На правах рукописи

Егорова Ольга Николаевна

СТРУКТУРЫ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ, ОБРАЗОВАННЫЕ ЭЛЕМЕНТАМИ ИЗ СТЕКЛА РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА

Специальность: - 01.04.21 Лазерная физика

Диссертация на соискание ученой степени

Доктора физико-математических наук

Москва - 2020

ОГЛАЕ	вление
-------	--------

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. СТРУКТУРЫ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)	19
1.1 Структуры волоконных световодов с увеличенным диаметром поля моды	19
1? Световоды с сердиевиной из квариевого стекла локализующие	
1.2 Состововой с сероцеваной из комрусовсе стокла, мокализующие излучение за счет образования фотонной запрешенной зоны	26
13 Световоды с сердиевиной изготовленной из фосфатного стекла и	20
1.5 Светововой с сероцеваной, изсотовленной из фосфинносо стекли, и оболочкой из квариевого стекла	33
1 4 Миогосердиевинные волоконные световоды	36
1.5 Волоконно-оптические линии задержки	30
1.5 Болокоппо-оптические липии заберяски	57
ГЛАВА 2. СВЕТОВОДЫ С СЕРДЦЕВИНОЙ ИЗ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА,	
ЛОКАЛИЗУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ЗА СЧЕТ ОБРАЗОВАНИЯ	
ФОТОННОЙ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ	42
2.1 Численное моделирование волноводных свойств световода.	
локализующего излучения за счет образования фотонной запрешенной	
зоны	44
2.2. Изготовление световода, локализующего излучения за счет	
фотонной запрешенной зоны целиком состоящего из квариевого	
стркла	50
23 M_{cched}	52
2.5 Исследование уровня оптических потеро	55
2.5 gazania oduonodozo cocimusa anarmagi non duangoona a	55
2.5 Лвление обномобовости в широком спектральном бийназоне в	
световооах, локализующих излучения за счет фотонной запрещенной	57
30H6l	57
2.0 Критерии оономооовости световооов, локализующих излучения за	
счет фотоннои запрещеннои зоны, с малым отношением оиаметра	()
элемента оболочки к расстоянию межоу ними	60
2.6.1 Численное моделирование	60
2.6.2 Экспериментальное исследование параметров световодов	67
2.7 Световод, локализующий излучение за счет фотонной запрещенной	
зоны, с сердцевиной из кварцевого стекла, легированной ионами	
иттербия	76
2.7.1 Изготовление и исследование световода	76
2.7.2 Изготовление стекла для сердцевины методом спекания порошков	
оксидов	79
2.7.3 Исследование оптических характеристик	81
2.7.4 Исследование генерационных характеристик	84
Выводы к главе 2	85

ГЛАВА 3. КОМПОЗИТНЫЕ СВЕТОВОДЫ С СЕРДЦЕВИНОЙ,	
ИЗГОТОВЛЕННОЙ ИЗ ФОСФАТНОГО СТЕКЛА, И ОБОЛОЧКОЙ ИЗ	
КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА	88
3.1 Изготовление композитных световодов с использованием различных	

составов фосфатного

стекла	89
3.1.1 Фосфатное стекло	89
3.1.2 Изготовление световодов	90
3.2 Световод с сердцевиной, легированной эрбием и иттербием	93
3.2.1 Параметры световода	93
3.2.2 Лазерная генерация в световоде, легированном эрбием и	
иттербием	97
3.3 Световод с сердцевиной, легированной иттербием	101
3.3.1 Световод, легированный ионами иттербия, для накачки по	
сердцевине	101
3.3.1.1 Параметры световода	101
3.3.1.2 Лазерная генерация при накачке в сердцевину в световоде,	
легированном иттербием	105
3.3.1.2.1 Схема лазера с одной брэгговской решеткой	105
3.3.1.2.2 Схема волоконного лазера с двумя брэгговскими решетками	111
3.3.2 Световод, легированный ионами иттербия, для накачки по	
оболочке	111
Выводы к главе 3	113
ГЛАВА 4. НОВЫЕ СТРУКТУРЫ МНОГОСЕРЛПЕВИННЫХ	
ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОЛОВ И СНИЖЕНИЕ ПЕРЕКРЕСТНЫХ	
ПОМЕХ	115
4.1 Снижение перекрестных помех за счет барьерного слоя в профиле	
показателя преломления	116
4.1.1 Влияние барьерного слоя показателя преломления на величину	
перекрестных оптических помех в многосердиевинных волоконных	
световодах круглого поперечного сечения с одинаковыми параметрами	
сердиевин	116
4.1.2 Влияние изгибов на величину перекрестных оптических помех в	
многосердиевинных световодах круглого поперечного сечения с	
одинаковыми параметрами сердиевин	122
4.1.3 Изготовление световодов с барьерным слоем и без него	125
4.1.4 Измерение характеристик многосердиевинных световодов с	
одинаковыми параметрами сердиевин	128
4.1.4.1 Измерение длины волны отсечки первой высшей моды	128
4.1.4.2 Измерение оптических потерь	130
4.1.4.3 Измерение перекрестных оптических помех	131
4? Многосердиевинный волоконный световод с прямоугольным	
поперечным сечением	134
4 ? 1 Снижение перекрестных помех в многосердиевинном световоде с	107
пазличными параметрами сердиевин за счет прямоугольной формы	
разна толна параметрали серецест за е тет прямојсонопо а ферто. поперечного сечения	134
4 ? ? Изготовление многосердиевинного световода с прямоугольным	107
поперечным сечением	137
4.2.3 Расчет критического радиуса изгиба для параметров	
изготовленных световодов	140
4.2.4 Исследование влияния изгиба многосердиевинного волоконного	

световода на перекрестные помехи	140
Выводы к главе 4	145
ГЛАВА 5. СОЗДАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ	
УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ	
СВЕТОВОДОВ	147
5.1 Линии задержки на основе многосердцевинного волоконного	
световода	147
5.1.1 Принцип работы линии задержки на многосердцевинном	
волоконном световоде	148
5.1.2 Изготовление многосердцевинного волоконного световода для	
линии задержки	150
5.1.3 Измерение характеристик многосердцевинного волоконного	
световода для линии задержки	153
5.1.3.1 Измерение длины волны отсечки первой высшей моды,	
оптических потерь и перекрестных помех между сердцевинами	153
5.1.3.2 Измерение разности оптических задержек между	
сердцевинами	155
5.1.3.3 Разность оптических задержек между сердцевинами и изгиб	
световода	158
5.1.4 Создание устройства ввода-вывода излучения для	
многосердцевинного волоконного световода	162
5.1.5 Линии задержки на многосердцевинном волоконном	
световоде	169
5.2 Одночастотные волоконные лазеры на композитном световоде,	
изготовленном методом «стержень в трубке» из фосфатного и	
кварцевого стекла	173
5.2.1 Композитный световод, легированный ионами эрбия	174
5.2.2 Одночастотный волоконный лазер с резонатором,	
сформированным брэгговскими решетками, записанными в сердцевине	
активного композитного световода излучением KrF лазера (248	
нм)	176
5.2.3 Одночастотный волоконный лазер с резонатором,	
сформированным брэгговскими решетками, записанными в сердцевине	
активного композитного световода излучением ArF лазера (193	
нм)	182
5.3 Интерферометр Фабри–Перо, сформированный в сердцевине	
композитного волоконного световода с высоким содержанием оксида	
фосфора	185
5.3.1 Создание интерферометра Фабри–Перо в сердцевине	
композитного световода	185
5.3.2 Интерферометр Фабри–Перо как чувствительный элемент	
датчика деформации	189
Выводы к главе 5	192
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	195
СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ	199
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	206

введение

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]. Затем, в 1973 году, были достигнуты оптические потери на уровне 5 дБ/км на длине волны 850 нм [3], в 1976 году были достигнуты оптические потери 0,47 дБ/км на длине волны 1200 нм [4] и в 1979 году были достигнуты оптические потери 0,2 дБ/км на длине волны 1550 нм [5], 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, локализующую излучение за счет полного внутреннего отражения, и изготовлены с помощью процесса осаждения кварцевого стекла из газовой фазы [6]. В первую очередь это световоды для телекоммуникаций с одномодовой или многомодовой сердцевиной, легированной оксидом германия, световоды с заданной дисперсией групповых скоростей или межмодовой дисперсией, световоды с двулучепреломлением, световоды, активированные редкоземельными ионами, фоточувствительные световоды, световоды, стойкие к неблагоприятным воздействиям внешней среды, 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 походов, получивших в последнее время широкое распространение, явилось создание дырчатых микроструктурированных световодов как с полой 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», или 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 [7]. 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 были получены либо с настояшей работе ЭТИ структуры использованием дополнительных технологических процессов, либо совсем без использования методов

6

осаждения стекла из газовой фазы. Далее будет рассмотрено использование данного подхода к созданию волоконных световодов применительно к различным направлениям их использования.

Опубликование работы [8] во второй половине 90-х годов положило начало исследованиям, посвященным разработке технологии изготовления, активным исследованию свойств И возможностей применения микроструктурированных волоконных световодов. Под термином микроструктурированные в настоящее время подразумеваются различные виды волоконных световодов, локализующие 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, локализующей 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 [9]. 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

7

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 Однако на практике сложно получать одномодовые световоды из оболочки. 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 [10]. Перспективными структурами для создания световодов с большим диаметром поля моды являются микроструктурированные световоды с дырчатой оболочкой [11]. Однако наличие отверстий в оболочке является недостатком данного вида световодов, поскольку, во-первых, требует контролируемого давления газа в различных отделах заготовки при изготовлении заготовки и вытяжке световода, для чего необходима разработка и создание довольно сложной системы подачи давления, во-вторых, приводит к снижению механической прочности и надежности, 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 механизмов понимание 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 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 Концентрация редкоземельных активных редкоземельных элементов. ИОНОВ В фосфатном стекле в среднем на порядок выше, чем их концентрация в легированном кварцевом стекле, обычно используемом для создания сердцевин активных световодов. Были созданы как световоды, целиком состоящие из фосфатного стекла, так и устройства на их основе [12, 13]. Недостатком световодов, целиком состоящих из фосфатного стекла, является низкая стойкость к воздействию факторов окружающей среды. Другим существенным недостатком является то, что из-за различия физикохимических 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 [14], интерес к ним возник только в конце первого десятилетия этого века. Это произошло в связи с тем, как было показано [15, 16], 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 [17], 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 многосердцевинные световоды рассматриваются также с точки зрения связи, применения в других областях, в первую очередь в сетях доступа [18, 19], 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 [20]. Кроме того, многосердцевинные световоды перспективны ДЛЯ применений В качестве чувствительных элементов датчиков [21, 22, 23]. 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 сердцевиной, изготовленной из фосфатного стекла, и оболочкой из кварцевого стекла, многосердцевинные световоды;

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

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

Научная новизна работы

1. Впервые исследованы особенности распространения оптического излучения по волоконному световоду с сердцевиной из кварцевого стекла и оболочкой, являющейся двумерным фотонным кристаллом, который состоит из элементов (цилиндров) с повышенным показателем преломления, с малым отношением диаметра элемента к расстоянию между центрами соседних элементов (0,1–0,3) и значительным расстоянием между центрами соседних элементов (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 сердцевиной 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 сердцевиной, 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 элементов функциональных устройств: К реализации ряда 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 сердцевины. 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 сердцевиной 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 0,1–0,3 и расстоянии между центрами соседних элементов примерно 10–12 мкм мода сердцевины 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 сердцевиной из кварцевого стекла и оболочкой, представляющей собой двумерный фотонный кристалл, с уменьшением длины волны происходит снижение эффективной разности показателей преломления сердцевины 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, сердцевина 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 сердцевиной, 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 оптических перекрестных помех 3a 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, НЦВО РАН, ИПФ РАН, ИОФ РАН, конкурсе научных работ ИОФ РАН (диплом победителя конкурса, Москва, Россия, 2019 г.).

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.

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 пункте 1.2 приведен обзор литературных данных, посвященных особенностям волноводных свойств световодов, локализующих излучение за счет фотонной запрещенной зоны; пункт 1.3 посвящен проблеме композитных световодов с сердцевиной, изготовленной из фосфатного стекла, и оболочкой из кварцевого стекла; в пункте 1.4 приведен обзор литературных данных, посвященный существующим структурам многосердцевинных волоконных световодов и способам снижения перекрестных оптических помех, а также обзору конструкций устройств ввода-вывода; пункт 1.5 посвящен волоконно-оптическим линиям задержки и их применениям.

Вторая глава посвящена описанию исследований световодов, локализующих излучение за счет образования фотонной запрещенной зоны, с сердцевиной из стекла и возможности применения их в качестве структуры для создания одномодовых световодов с большим диаметром поля моды.

Третья глава посвящена созданию и исследованию композитных световодов с сердцевиной, изготовленной из фосфатного стекла, и оболочкой из кварцевого стекла.

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

Вопросам, связанным с разработкой элементов функциональных устройств с использованием новых структур волоконных световодов, посвящена **пятая глава** настоящей работы.

Публикации

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

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., Прямиков А.Д., Медведков О.И., Васильев С.А.

ГЛАВА 1

СТРУКТУРЫ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

Настоящая глава связана со структурой диссертации в целом и организована следующим образом: в пункте 1.1 приведен обзор литературных данных о существующих конструкциях волоконных световодов с большим диаметром поля моды; в пункте 1.2 приведен обзор литературных данных, посвященный особенностям волноводных свойств световодов, локализующих излучение за счет образования фотонной запрещенной зоны; пункт 1.3 посвящен световодам, изготовленным методом «стержень в трубке» с сердцевиной, изготовленной из фосфатного, и оболочкой из кварцевого стекла; обзор литературных данных, посвященный существующим структурам многосердцевинных волоконных световодов и способам снижения перекрестных оптических помех, приведен в пункте 1.4; пункт 1.5 посвящен вопросу создания волоконно-оптических линий задержки и их применениям.

1.1 Структуры световодов с увеличенным диаметром поля моды

Активные исследования в области создания волоконных источников излучения привели к значительным достижениям в повышении мощности и энергии непрерывных и импульсных волоконных лазеров и усилителей в течение последних 30-40 лет [24, 25, 26]. На рисунке 1.1 представлен рост выходной мощности непрерывных волоконных лазеров с высоким качеством пучка, работающих в окрестности 1000 нм (начиная с 1999 года – иттербиевых лазеров). По сравнению с 90- годами прошлого века мощность таких лазеров возросла более чем на два порядка и достигла 10 кВт в 2009 году [27]. Также были достигнуты значительные успехи в увеличении мощности и энергии импульсных лазеров [28, 25]. Достижения в этой области стали возможны, в том числе, благодаря разработке активных световодов с увеличенным, по сравнению С телекоммуникационными световодами, диаметром поля моды, одномодовых или близких к одномодовым. Исследование в этой области и поиск новых структур световодов продолжается и в настоящее время.

Высокая интенсивность излучения в сердцевине активного световода и его большая длина приводят к возникновению нежелательных нелинейно-оптических эффектов, таких как фазовая самомодуляция, вынужденное комбинационное рассеяние, а в случае излучения с узким спектром – вынужденного рассеяния Мандельштама– Бриллюэна. Эти эффекты влияют на спектр излучения, ограничивая выходные параметры лазеров и усилителей. Кроме того, высокая интенсивность лазерного излучения в световоде может приводить к разрушению стекла. Увеличение диаметра поля моды является одним из способов снижения интенсивности излучения в сердцевине активного световода и, следовательно, уменьшения влияния этих эффектов. Кроме того, в случае световодов с накачкой по оболочке, которая, как правило, используется для создания мощных волоконных лазеров и усилителей, при заданном диаметре оболочки накачки увеличение диаметра сердцевины приводит к увеличению поглощения накачки на единицу длины, что позволяет уменьшить длину активного световода. Уменьшение длины также приводит к снижению влияния нелинейно-оптических эффектов. Однако при увеличении диаметра сердцевина становится многомодовой, что ведет к ухудшению качества пучка.

Методами осаждения кварцевого стекла из газовой фазы технологически сложно изготовить активный одномодовый световод с увеличенным диаметром поля моды. Диаметр сердцевины одномодовых световодов со ступенчатым профилем показателя преломления, полученных методом осаждения из газовой фазы, как правило, ограничен величиной 15–17 мкм [29, 25].

В целях увеличения диаметра поля моды активных световодов могут быть использованы многомодовые световоды, значение V-параметра в которых превышает 2,41. Такие световоды могут поддерживать распространение высших мод в сердцевине, однако позволяют получать высокое качество пучка лазеров и усилителей. Существуют различные методы получения высокого качества пучка в многомодовых активных световодах. Оно может быть получено за счет преимущественного возбуждения фундаментальной моды сердцевины [30]; преимущественного усиления фундаментальной моды за счет использования соответствующего распределения концентрации активных редкоземельных ионов по поперечному сечению световода [31, 32], а также подавления высших мод за счет контролируемого изгиба световода [33]. Кроме того, преимущественное возбуждение фундаментальной моды может быть достигнуто в конусных световодах, диаметр которых изменяется по длине, причем со стороны меньшего диаметра сердцевина является одномодовой [34]. Часть длины активного световода, которая является одномодовой, служит модовым фильтром, позволяющим получать в таких световодах высокое качество пучка. В настоящее время продемонстрированы световоды такого типа с диаметром сердцевины в утолщенной части световода 100 [35] и 200 мкм [36].

С использованием обычных структур световодов со ступенчатым профилем показателя преломления, полученных осаждением стекла из газовой фазы, достигнуты рекордные значения мощности непрерывных волоконных лазеров. Например, в работе [37] была достигнута мощность непрерывного иттербиевого лазера в районе длины волны 1000 нм свыше 1 кВт с использованием световода, полученного методом модифицированного осаждения из газовой фазы (MCVD), с диаметром сердцевины 40 мкм. Числовая апертура сердцевины составила менее 0,05. Сердцевина световода

являлась многомодовой, V-параметр составлял 5,7 (для длины волны 1000 нм). Однако в лазере было получено высокое качество пучка (M²=1,4) за счет того, что высшие моды сердцевины подавлялись с помощью изгиба световода.

Позднее с использованием активных световодов со ступенчатым профилем показателя преломления были получены выходные мощности в дифракционноограниченном пучке - 4,3 [38] и 10 кВт [39, 40, 27], которые на сегодняшний день являются рекордными значениями мощности непрерывных волоконных лазеров с высоким качеством пучка. Эти результаты были получены для длины волны 1000 нм с использованием световодов, активированных ионами иттербия.

Для получения рекордных значений энергии импульсных волоконных источников пучка были использованы с высоким качеством активные световоды С микроструктурированной оболочкой с отверстиями, поскольку в таких структурах достижим значительно больший диаметр поля моды в одномодовом режиме, чем в световодах со ступенчатым профилем показателя преломления. Структура поперечного сечения световода с дырчатой микроструктурированной оболочкой показана на вставке на рисунке 1.2. Оболочка состоит из отверстий, расположенных в гексагональном порядке в кварцевом стекле, сердцевина сформирована отсутствием одного, семи или большего количества отверстий. В отличие от световода со ступенчатым профилем показателя преломления, в котором при уменьшении длины волны возрастает количество мод сердцевины, число мод в сердцевине световода с дырчатой оболочкой может оставаться постоянным в широком спектральном диапазоне. Это связано с особой дисперсионной зависимостью мод оболочки. На рисунке 1.2 представлена дисперсионная диаграмма мод оболочки и сердцевины световода с дырчатой микроструктурированной оболочкой в координатах $n_{eff} = ck_z/\omega$ и λ/a , где n_{eff} – эффективный показатель моды, k_z – постоянная распространения моды, а – расстояние между центрами соседних элементов оболочки. Серым цветом показана область, в которой существуют моды оболочки. Модами оболочки являются моды бесконечной периодической структуры оболочки. Сверху область существования мод оболочки ограничена черной кривой, которая соответствует дисперсионной зависимости моды оболочки с наибольшим эффективным показателем преломления (фундаментальной моде оболочки) и определяет эффективный показатель преломления оболочки. Выше этой кривой могут существовать моды сердцевины, дисперсионная зависимость фундаментальной моды сердцевины показана на рисунке 1.2 красным цветом.

Как видно, с уменьшением длины волны эффективный показатель преломления оболочки увеличивается. Это происходит вследствие того, что фундаментальная мода оболочки (мода с наибольшим эффективным показателем преломления) с уменьшением длины волны стремится сконцентрироваться в областях с высоким показателем

преломления между отверстиями. То есть при малых длинах волн поле больше сосредоточено в пространстве между отверстиями, и при уменьшении длины волны эффективный показатель преломления фундаментальной моды оболочки стремится к преломления кварцевого стекла. Поскольку характерные размеры показателю пространственного изменения напряженности поля соответствуют длине волны, при больших значениях длины волны поле более равномерно распределено в оболочке между отверстиями эффективный преломления стеклом И И показатель оболочки снижается. Такое поведение дисперсионных фундаментальной моды зависимостей мод оболочки приводит к тому, что с уменьшением длины волны разность эффективных показателей преломления оболочки и сердцевины снижается и, в отличие от световода со ступенчатым профилем показателя преломления, не происходит Такое увеличения количества мод сердцевины. явление получило название «бесконечной одномодовости» (endlessly single-mode) [11]. Свойство «бесконечной одномодовости» означает, что при достаточно большом значении расстояния между соседними отверстиями можно изготовить одномодовый световод с большим диаметром сердцевины. Это обстоятельство сделало данную конструкцию световодов наиболее востребованной для создания световодов с диаметром поля моды 50 мкм и более.

На основе конструкции микроструктурированного световода с отверстиями в оболочке и сердцевиной из стекла получены активные световоды с диаметром сердцевины до 130 мкм [41]. С использованием активного световода с диаметром сердцевины 105 мкм, а также техники усиления чирпированных импульсов получено импульсное излучение с длительностью 500 фс, энергией импульсов 2,2 мДж, средней мощностью 11 В и рекордной для волоконных лазеров пиковой мощностью 3,8 ГВт (после сжатия импульса) и высоким качеством пучка [42]. Для импульсов пикосекундной длительности (60 пс) получено рекордное значение энергии 26 мДж, значение средней мощности излучения при этом составляло 130 Вт. При этом был использован световод с диаметром сердцевины 130 мкм, диаметр поля моды на длине волны 1000 нм составлял около 100 мкм [42]. Так же как и для непрерывных лазеров, для импульсных лазеров все рекордные результаты были достигнуты на длине волны в районе 1000 нм с использованием световодов, легированных ионами иттербия.



Рисунок 1.1. Рост мощности непрерывных волоконных лазеров с дифракционноограниченным пучком. С 1999 года все результаты получены для световодов, легированных ионами иттербия [25].



Рисунок 1.2. Дисперсионная диаграмма мод оболочки и сердцевины в дырчатом микроструктурированном световоде с отношением диаметра отверстия в оболочке к расстоянию между центрами соседних отверстий (а) - 0,15. Серая область – моды оболочки, красная – фундаментальная мода сердцевины. Из работы [43].

Недостатком описанной структуры световода является наличие отверстий в поперечном сечении. Из-за наличия отверстий создание таких световодов представляет собой достаточно трудоемкий процесс, поскольку требуется контролировать величину давления газа в различных отделах заготовки при изготовлении заготовки и вытяжке световода, для чего необходима разработка и создание довольно сложной системы подачи давления газа. Кроме того, наличие отверстий в поперечном сечении световода приводит к снижению механической прочности со временем из-за контакта поверхности кварцевого стекла внутри отверстий с атмосферной влагой. Процесс соединения дырчатых микроструктурированных световодов с помощью сварки в электрическом разряде также связан с определенными трудностями – использование недостаточного прогрева во время сварки для предотвращения схлопывания отверстий внутри световода может приводить к низкой прочности получаемых соединений.

В связи с этим был предложен ряд конструкций волоконных световодов с увеличенным диаметром поля моды, не содержащих отверстий в поперечном сечении. Например, световоды с боковой закрученной сердцевиной [44]. В такой структуре одна или несколько боковых сердцевин закручены вокруг центральной сердцевины в процессе вытяжки световода. Излучение из высших мод центральной сердцевины за счет резонансного взаимодействия переходит в моды боковых сердцевин, где испытывает потери за счет изгиба. Такая конструкция световода оптимальна для диаметров полей мод около 30–40 мкм. Как правило, недостатком такой структуры является неполное подавление высших мод.

Также было предложено для создания световодов с большим диаметром поля моды использовать конструкцию световодов, локализующих излучение за счет фотонной запрещенной зоны, с элементами оболочки, представляющими собой кольца с повышенным показателем преломления (брэгговские световоды) [45]. Еще одной конструкцией световодов с большим диаметром поля моды являются световоды с каналами для вытекания ("leaky channel fibers"), оболочка которых представляет собой несколько элементов из фторированного кварцевого стекла, расположенных вокруг сердцевины [46, 47]. В такой конструкции световода было достигнуто значение диаметра поля моды 62 мкм. Принцип действия этих структур основан на том, что оптические потери для фундаментальной моды значительно ниже, чем для более высоких мод, которые лучше «вытекают» через участки оболочки, расположенные между соседними элементами оболочки [9]. Также предложен ряд других конструкций световодов с элементами из фторированного кварцевого стекла в оболочке [48, 49]. Основным недостатком перечисленных структур световодов является достаточно сложная технология изготовления из-за необходимости создания больших объемов легированного стекла.

24

В работе [50] было предложено использовать световоды, локализующие излучение за счет образования фотонной запрещенной зоны, в качестве конструкции одномодового световода с увеличенным диаметром поля моды для волоконных лазеров и усилителей. На рисунке 1.3 приведена фотография торца такого световода и его спектр пропускания. Оболочка световода представляет собой двумерный фотонный кристалл, элементами которого являются цилиндры из легированного кварцевого стекла, расположенные в нелегированном кварцевом стекле в гексагональном порядке с осями, параллельными оси световода. Сердцевина является дефектом кристалла и образована отсутствием элементов периодической оболочки. Наиболее длинноволновая область пропускания, в которой были получены оптические потери на уровне 20 дБ/км, соответствует третьей запрещенной зоне фотонно-кристаллической оболочки, то есть у данного световода существуют еще две более длинноволновые области локализации моды сердцевины. Расстояние между центрами соседних элементов периодической оболочки (Л) составляет 15,2 мкм, отношение диаметра элемента оболочки (d) к Л составляет 0,68, сердцевина 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. Кроме того, высокое отношение диаметра элемента оболочки к расстоянию между соседними элементами в таком световоде приводит к тому, что при накачке световода с торца значительная доля излучения накачки будет локализована элементами оболочки. Кроме того, изготовление описанной структуры световода требует достаточно больших объемов легированного оксидом германия стекла, что делает изготовление такого световода трудоемким.



Рисунок 1.3. Фотография торца световода с фотонной запрещенной зоной и его спектр пропускания [50].

При рассмотрении описанной структуры волоконного световода возникает вопрос: какими волноводными свойствами будет обладать такая структура, если снизить отношение диаметра элемента оболочки к расстоянию между центрами соседних элементов? Снижение отношения диаметра элемента оболочки к расстоянию между центрами соседних элементов, во-первых, значительно упростит процесс изготовления такого типа световодов, во-вторых, при накачке с торца только малая часть излучения накачки будет захватываться элементами оболочки. При этом неоспоримым плюсом данной структуры по сравнению с дырчатыми микроструктурированными световодами является отсутствие отверстий в поперечном сечении. Изучению вопроса о волноводных свойствах световода с фотонной запрещенной зоной, а также возможности использования такой структуры световода в качестве световода с большим диаметром поля моды и посвящена часть настоящей работы.

1.2 Световоды с сердцевиной из кварцевого стекла, локализующие излучение за счет образования фотонной запрещенной зоны

Настоящая часть литературного обзора посвящена описанию волноводных свойств световодов, локализующих излучение за счет образования фотонной запрещенной зоны, с сердцевиной из стекла (световоды с фотонной запрещенной зоной), а также обзору работ на эту тему, существовавших на момент начала работы над диссертацией. Ha рисунке 1.4 представлено поперечное сечение световода, локализующего излучение за счет образования фотонной запрещенной зоны, с сердцевиной из стекла и его профиль показателя преломления. Оболочка световода с фотонной запрещенной зоной представляет собой двумерный фотонный кристалл, состоящий из цилиндров из легированного стекла, которые расположены В нелегированном стекле в гексагональном порядке, оси цилиндров параллельны оси световода. Показатель преломления цилиндров выше, чем показатель преломления окружающего стекла, для световодов из кварцевого стекла разница показателей преломления обычно составляет порядка 0,005-0,03. Сердцевина образуется за счет отсутствия одного или нескольких элементов периодической оболочки и является дефектом фотонного кристалла, в котором при наличии запрещенной зоны (то есть набора волновых векторов и частот, для которых отсутствуют моды фотонного кристалла) может возникать локализация излучения.

Поскольку световоды с запрещенной зоной являются фотонными кристаллами, они могут быть описаны теми же методами, которые применимы для описания фотонных кристаллов вообще. Фотонный кристалл представляет собой среду с периодически изменяющимся показателем преломления, в которой свет распространяется не рассеиваясь. Период изменения показателя преломления близок к длине волны излучения. Законы распространения света в фотонном кристалле отличаются от распространения света в однородной среде. Это обусловлено тем, что отраженный от различных элементов периодической структуры фотонного кристалла свет когерентно складывается, образуя периодическое распределение поля вдоль решетки фотонного кристалла.

Впервые возможность образования запрещенной зоны, то есть набора длин волн и волновых векторов, для которых излучение не распространяется в периодической структуре за счет брэгговского отражения, была показана в работе 1887 года [51]. Эта работа была посвящена исследованию одномерных структур. В работе 1972 года [52] было показано, что структуры с периодически изменяющимся показателем преломления позволяют управлять спонтанным излучением молекул или атомов. Термин «фотонные кристаллы» появился несколько позже [53, 54] при исследовании двухмерных и трехмерных структур. При этом для описания поведения фотона в периодической структуре был применен аппарат физики твердого тела.

Используемое в настоящее время описание фотона в фотонном кристалле аналогично описанию электрона в кристаллической решетке [43]. При этом аналогом уравнения Шредингера является волновое уравнение, аналогом потенциала, создаваемого атомами решетки для электрона, - среда с периодически изменяющимся показателем преломления. Ключевым моментом физики твердого тела является теорема Блоха, которая заключается в том, что электромагнитные волны в периодической среде распространяются не рассеиваясь и представляют собой произведение плоской волны на периодическую функцию, период которой равен периоду среды. Это справедливо также для мод фотонного кристалла, которые также являются периодическими функциями, период которых соответствует периоду среды, то есть периоду изменения показателя преломления. По аналогии с физикой твердого тела, для описания фотонного кристалла вводится понятие обратной решетки в пространстве волновых векторов и зоны Бриллюэна, границы которой соответствуют условию брэгговского отражения. Для описания фотонных кристаллов используют дисперсионные или зонные диаграммы. Зонные диаграммы отражают наличие запрещенных зон, соответствующих набору значений частот и волновых векторов, для которых отсутствуют возможные состояния в фотонном кристалле.

В случае световодов с фотонной запрещенной зоной оболочка световода представляет собой фотонный кристалл, состоящий из цилиндров с повышенным показателем преломления, расположенных в среде с меньшим показателем преломления в гексагональном порядке, оси цилиндров параллельны оси Z (рисунок 1.5). Периодическое изменение показателя преломления происходит в плоскости XY. Для описания распространения волн в поперечном направлении в таком фотонном кристалле, то есть в плоскости XY, применяют построение зонных диаграмм, то есть зависимость частоты от волнового вектора при движении конца волнового вектора вдоль границы зоны Бриллюэна такого двумерного кристалла [43, 55]. Однако в

сердцевине световода с запрещённой зоной распространение излучения происходит не в плоскости изменения показателя преломления, а под небольшими углами к оси Z. При этом зонная структура будет определяться не только составляющей волнового вектора, лежащей в плоскости XY, но и составляющей вдоль оси Z или оси световода – k_z.

Однако, как показано в работах [56, 43], при возрастании k_z , то есть при уменьшении угла наклона волнового вектора к оси Z, ширина зон уменьшается, и, при больших значениях k_z , зона практически вырождается в одиночную кривую. При больших значениях k_z практически исчезает зависимость частоты от направления поперечной составляющей волнового вектора (проекции волнового вектора на плоскость XY). Кроме того, исчезает различие между двумя поляризациями (моды TE, электрическое поле которой лежит в плоскости XY, и TM – электрическое поле перпендикулярно плоскости XY). Поэтому для анализа мод двумерных фотонных кристаллов, распространяющихся под небольшими углами к оси Z (перпендикулярной плоскости, в которой происходят изменения показателя преломления), достаточно рассмотреть зависимость частоты возможных состояний фотонного кристалла от проекции волнового вектора на ось Z – k_z .

Объяснение того, что при возрастании k_z зоны, в которых существуют моды фотонного кристалла, сужаются, состоит в следующем [43, глава 5]: большие значения k_z свидетельствуют о том, что моды фотонного кристалла распространяются под малыми углами к оси Z. При этом для областей структуры фотонного кристалла с высоким показателем преломления выполняется условие полного внутреннего отражения и излучение захватывается этими участками. Если, например, рассматривать фотонный кристалл, состоящий из цилиндров с повышенным показателем преломления, расположенных в среде с более низким показателем преломления, то модами такого фотонного кристалла будут являться моды отдельных цилиндров, локализующих излучение за счет полного внутреннего отражения. В случае, когда поля мод соседних элементов оболочки не перекрываются, дисперсионная диаграмма мод фотонного кристалла соответствует дисперсионной зависимости мод отдельных элементов фотонного кристалла.



Рисунок 1.4. Поперечное сечение световода, локализующего излучение за счет образования фотонной запрещенной зоны, и его профиль показателя преломления.



Рисунок 1.5. Двумерный фотонный кристалл, состоящий из цилиндров с повышенным показателем преломления n_{high}, расположенных в среде с меньшим показателем преломления n_{lo}.



Рисунок 1.6. Зонная диаграмма для световода с фотонной запрещенной зоной и сердцевиной из кварцевого стекла. Параметры световода: отношение диаметра элемента оболочки d к расстоянию между центрами соседних элементов Λ d/Λ=0.4, показатель преломления кварцевого стекла – n ₁₀ =1,458, показатель преломления элементов оболочки – n _{high} = 1,478. Из работы [57].

На рисунке 1.6 представлен пример зонной диаграммы для световода с запрещенной зоной со следующими параметрами: отношение диаметра элемента оболочки (d) к расстоянию между центрами соседних элементов (Λ) d/ Λ =0,4, показатель преломления кварцевого стекла - n_{lo} =1,458, показатель преломления элементов оболочки - $n_{high} = 1,478$, сердцевина образована отсутствием одного элемента оболочки [57]. Как и на рисунке 1.4, элементы оболочки световода представляют собой цилиндры с повышенным, за счет легирования оксидом германия, показателем преломления. Зонная диаграмма представлена в координатах (β -kn_{lo}) Λ и k Λ , где k=2 π/λ , β =k_zn_{lo}=kn_{eff} – постоянная распространения мод. Поскольку моды распространяются вдоль оси световода Z, то постоянная распространения параллельна этой оси и осям элементов оболочки. Различными оттенками серого показаны области на зонной диаграмме, в которых существуют моды фотонного кристалла, то есть моды оболочки. Зоны для мод оболочки показаны с учетом плотности состояний, то есть количества мод в единичном спектральном интервале. Более светлые области соответствуют большей плотности состояний. Красным цветом показаны области, в которых отсутствуют моды оболочки. Линия кварцевого стекла, обозначенная на рисунке 1.6 "cutoff", соответствует условию

равенства эффективного показателя преломления моды показателю преломления кварцевого стекла n_{lo}.

Элементы оболочки являются цилиндрами с более высоким показателем преломления, расположенными в стекле с более низким показателем преломления. Таким образом, они могут локализовать излучения за счет полного внутреннего отражения, как обычные сердцевины слабонаправляющих световодов. Поэтому выше линии кварцевого стекла дисперсионная диаграмма мод оболочки представляет собой дисперсионные зависимости отдельных мод, локализованных в элементах оболочки за счет полного внутреннего отражения. Обозначения этих мод LP_{ml} представлены над соответствующей дисперсионной зависимостью. Эти обозначения соответствуют линейно-поляризованным модам слабонаправляющих световодов, локализующих излучение за счет полного внутреннего отражения, т обозначает количество максимумов по углу, 1 - по радиусу распределения поля моды. При пересечении линии кварцевого стекла, когда эффективные показатели преломления этих мод сравниваются с показателем преломления кварцевого стекла, моды элементов оболочки испытывают отсечку. Ниже линии кварцевого стекла с уменьшением эффективного показателя преломления моды будут все менее сосредоточены в области элемента оболочки с высоким показателем преломления, все сильнее вытекать в оболочку, поля соседних мод будут пересекаться, и за счет взаимодействия мод будет происходить образование зон, в которых существуют разрешенные состояния фотонно-кристаллической оболочки. Вид каждой зоны на дисперсионной диаграмме будет зависеть от структуры соответствующей LP фотонно-кристаллической оболочки. В области моды существования мод оболочки ниже линии кварцевого стекла моды оболочки будут представлять собой периодические функции с периодом фотонно-кристаллической оболочки. Некоторые закономерности вида конкретной зоны на зонной диаграмме в зависимости от азимутального и радиального индекса соответствующей линейнополяризованной моды элемента оболочки исследовались в работах [58, 56, 59].

В областях, показанных красным цветом ниже уровня кварцевого стекла, отсутствуют моды фотонно-кристаллической оболочки. В них может локализоваться мода сердцевины или дефекта фотонного кристалла. На рисунке 1.6 дисперсионные зависимости мод сердцевины показаны желтым цветом. При сближении дисперсионной зависимости моды сердцевины с границами зон оболочки мода сердцевины испытывает высокие оптические потери за счет взаимодействия с модами оболочки. Таким образом, спектр пропускания световодов с фотонной запрещенной зоной состоит из чередования областей, в которых мода сердцевины локализуется, и областей, в которых мода сердцевины отсутствует. Границы областей пропускания световода с фотонной запрещенной зоной определяются длинами волн отсечек мод элементов оболочки. Области, в которых может существовать мода оболочки, ограничены линией кварцевого стекла и границами зон оболочки. Граница зоны оболочки соответствует моде с максимально (минимально) возможной для данной зоны постоянной распространения (для данной длины волны). Постоянная распространения моды является проекцией волнового вектора на ось Z, умноженного на показатель преломления среды (рисунок 1.5), то есть:

$$\beta = kn_{eff} = kn_{lo}cos\theta$$

Здесь θ – угол к оси Z, под которым распространяется данная мода оболочки. Таким образом, граница зоны определяет максимальный (минимальный) угол, под которым может распространяться мода сердцевины, или числовую апертуру сердцевины световода, а эффективный показатель преломления этой границы соответствует эффективному показателю преломления оболочки [60, 61].

Следует также отметить, что существует модель, позволяющая интуитивно представить особенности локализации излучения световодов с фотонной запрещенной зоной [62, 63]. В этом представлении элементы фотонно-кристаллической оболочки рассматриваются как интерферометры Фабри–Перо. В условиях резонанса, то есть максимума пропускания интерферометра, излучение, падающее под углом к оси элемента, проходит через такой интерферометр, поэтому излучение, введенное в сердцевину, проходит через оболочку и не локализуется. Условие резонанса соответствует отсечке моды элемента фотонно-кристаллической оболочки. В случае антирезонансного условия, когда интерферометр Фабри–Перо отражает излучение, мода сердцевины может существовать. Однако точное описание и понимание свойств световодов с фотонной запрещенной зоной позволяет получить построение зонных диаграмм, которое является общепринятым методом для описания фотонных кристаллов.

В случае распространения излучения в плоскости изменения показателя преломления в двумерном фотонном кристалле (в плоскости XY на рисунке 1.5) для образования запрещенной зоны требуется значительное различие показателей преломления ($\Delta \varepsilon > 12$) [64]. До появления работ [65, 66] не было очевидно, что при распространении излучения вдоль продольной оси Z (рисунок 1.5) в двумерном фотонном кристалле для образования запрещенной зоны достаточно очень малой разницы показателей преломления. Поэтому первые световоды с фотонной запрещенной зоной были изготовлены из материалов, имеющих значительно бо́льшую разность показателей преломления, чем нелегированное и легированное в процессе осаждения из газовой фазы кварцевое стекло. Первыми световодами с эффектом запрещенной зоны были световоды из кварцевого стекла с полой сердцевиной [67, 68]. Затем были продемонстрированы световоды, изготовленные путем заполнения жидкостями с

высоким показателем преломления отверстий в дырчатых микроструктурированных световодах с сердцевиной из стекла [69]. Также был изготовлен световод из силикатных стекол с показателями преломления 1,54 и 1,79, разница показателей преломления в оболочке световода составила 16% [70].

Первый световод с небольшой разницей показателей преломления в оболочке порядка 1% (такой световод может быть изготовлен методами легирования кварцевого стекла из газовой фазы) был продемонстрирован в работе [71]. Отношение диаметра элемента оболочки d к расстоянию между центрами соседних элементов Λ в исследованном световоде составило 0,34; Λ =6 мкм. В изготовленном световоде наблюдалась локализация моды сердцевины в пределах длинноволновой или фундаментальной запрещенной зоны, однако из-за того, что структура световода была неоднородной из-за погрешности в процессе изготовления, а также из-за малого количества слоев оболочки, в этом световоде был получен высокий уровень оптических потерь – порядка 1 дБ/м.

В последовавших за этим работах, посвященных исследованию световодов с небольшой разницей показателей преломления в оболочке порядка 1%, исследовались только световоды с бо́льшим отношением d/A [59, 50, 72, 73, 74, 75, 76]. В работах [74, 75] световоды с фотонной запрещенной зоной были использованы для управления дисперсией групповых скоростей, а именно для смещения длины волны нулевой дисперсии в коротковолновую область; а в работах [76, 72] – в качестве фильтров для подавления спонтанной люминесценции. Однако в литературе не было работ, посвященных изготовлению, исследованию свойств и возможностей применения световодов, локализующих излучение за счет образования фотонной запрещенной зоны, с отношением диаметра элементов оболочки к расстоянию между центрами соседних элементов менее 0,34.

1.3 Световоды с сердцевиной, изготовленной из фосфатного стекла, и оболочкой из кварцевого стекла

В настоящее время наиболее широко используемым материалом для создания волоконных световодов, активированных редкоземельными ионами, является кварцевое стекло. Это связано с уникальными свойствами кварцевого стекла, такими как малые оптические потери, устойчивость к воздействию внешних факторов, высокая прочность и другие. Однако структура кварцевого стекла не допускает введения высокой концентрации активных редкоземельных элементов. Увеличение концентрации редкоземельных элементов в кварцевом стекле приводит к их кластеризации, которая, в свою очередь, приводит к безызлучательной релаксации возбужденного лазерного уровня и даже фазовому расслоению стекла. Для лучшего растворения редкоземельных ионов используется легирование кварцевого стекла различными добавками, например оксидами фосфора или алюминия, однако данная технология также имеет свои ограничения [77].

Фосфатное стекло, напротив, является одной из наилучших матриц для введения редкоземельных ионов, оно допускает введение высокой концентрации активных редкоземельных элементов. Концентрация редкоземельных ионов в фосфатном стекле в среднем на порядок больше, чем их концентрация в легированном кварцевом стекле, обычно используемом для создания световодов [78]. Возможно изготовить световоды, и сердцевина и оболочка которых состоят из фосфатного стекла. Высокая концентрация активных редкоземельных ионов в сердцевине таких световодов позволяет получать высокие значения коэффициента усиления и выходной мощности на единицу длины световода и, следовательно, сократить рабочую длину активного элемента волоконного лазера или усилителя по сравнению со световодами на основе кварцевого стекла. Так, в работе [79] в световоде, легированном эрбием и иттербием, был достигнут коэффициент усиления на длине волны 1535 нм 5 дБ/см. Концентрация ионов эрбия в сердцевине световода составляла 3x10²⁰ см⁻³. В работе [80] при накачке по оболочке в световоде длиной 7 см, легированном эрбием и иттербием, была достигнута выходная мощность 9,3 Вт, а удельная мощность составила 1,33 Вт/см. Концентрация ионов эрбия в сердцевине световода составляла $1,1 \times 10^{20}$ см⁻³, ионов иттербия – $8,6 \times 10^{20}$ см⁻³.

Уменьшение длины активных элементов лазеров и усилителей целесообразно, вопервых, для снижения нежелательного нелинейно-оптического взаимодействия. Как известно, нелинейно-оптические эффекты, в том числе фазовая самомодуляция, ВКР и вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна, возникающие за счет высокой интенсивности излучения в сердцевине и большой длины волоконных лазеров и усилителей, являются одним из основных факторов, ограничивающих выходную мощность и энергию импульсов этих устройств [81]. Поскольку величина нелинейнооптического взаимодействия возрастет с длиной световода [82], одним из способов снижения нежелательных нелинейно-оптических эффектов является уменьшение этой длины.

Кроме того, фосфатные световоды с высоким коэффициентом усиления на единицу длины используются для создания одночастотных волоконных лазеров с высокой выходной мощностью порядка нескольких сотен милливатт [83, 12]. Высокая концентрация активных редкоземельных ионов в фосфатном стекле позволяет получать значительную выходную мощность даже при достаточно малой длине активного световода, которая, в свою очередь, необходима для получения одночастотного режима генерации. Также с использованием фосфатного световода, легированного эрбием и иттербием, был продемонстрирован лазер с синхронизацией мод с высокой частотой повторений, равной 12 ГГц [84]. Длина активного световода при этом составила менее 0,8 см.

Недостатком фосфатного стекла по сравнению с кварцевым является его низкая стойкость к воздействию атмосферной влаги, что существенно снижает прочность и надежность световодов на его основе и приводит к деградации фосфатных световодов с течением времени. Кроме того, из-за значительных различий в физико-химических свойствах фосфатного и кварцевого стекол, световоды из этих материалов плохо поддаются соединению друг с другом с помощью сварки, а получаемые соединения ненадежны [12, 85].

В работе [86] было предложено объединить преимущества фосфатного и кварцевого стекла путем изготовления композитного световода с сердцевиной из фосфатного стекла, легированного неодимом, и оболочкой из кварцевого стекла. В световоде такого типа, с одной стороны, высокая концентрация редкоземельных элементов в фосфатной сердцевине позволяет сократить рабочую длину активного световода, а, с другой стороны, оболочка из кварцевого стекла позволяет обеспечить механическую надежность, а также упростить процесс сварки со световодами, целиком состоящими из кварцевого стекла. В работе [86] в качестве стекла сердцевины было использовано фосфатное стекло, содержащее 0,2-2,0 мол.% алюминия, которое было синтезировано в платиновом тигле. Заготовка световода изготавливалась путем помещения фосфатного стекла внутрь трубки из кварцевого стекла, нагрева до температуры около 2000° С и перетяжки. В полученном световоде концентрация ионов неодима составила 2,1x10²⁰ см⁻³. Используя 21 см световода при накачке по оболочке была получена генерация в районе длины волны 1060 нм с дифференциальной эффективностью 25%.

В работе [87] был изготовлен другой композитный световод с оболочкой из кварцевого стекла и сердцевиной, изготовленной из фосфатного стекла, легированного эрбием и иттербием. В составе фосфатного стекла также присутствовали алюминий и бор. В изготовленном световоде была получена лазерная генерация на длине волны 1535 нм при накачке по сердцевине. Однако дифференциальная эффективность лазерной генерации составила всего 4%.

Таким образом, к моменту начала работы над диссертацией уже была показана возможность создания композитных световодов новым методом, основанным на спекании фосфатного стекла определенного состава в трубке из кварцевого стекла, однако отсутствовали данные о перспективах использования данной технологии, а именно: о достижимых уровнях эффективности лазерной генерации, об оптических свойствах и о возможности создания функциональных устройств на базе композитных волоконных световодов.

1.4 Многосердцевинные волоконные световоды

B настоящее многосердцевинные время световоды находят различные применения для передачи сигнала, усиления и генерации излучения, как чувствительные элементы волоконных датчиков. Материал настоящей работы посвящен исследованию многосердцевинных волоконных световодов, предназначенных для передачи оптического сигнала, поэтому настоящая часть обзора литературных источников посвящена этой теме. При этом имеются в виду многосердцевинные световоды с одномодовыми сердцевинами, оптически слабо связанными друг с другом, то есть каждая сердцевина такого световода является отдельным каналом передачи сигнала. Исследования возможности применения в телекоммуникации многосердцевинных световодов со связанными сердцевинами освещены в работах [88, 89, 90, 91]. Обзор работ, посвященных использованию многосердцевинных световодов как элементов лазеров и усилителей, можно найти, например, в работах [6, 92]. Применению многосердцевинных световодов в качестве активных элементов датчиков посвящены работы [6, 93, 94, 95].



Рисунок 1.7. Поперечное сечение односердцевинного (слева) и многосердцевинного (справа) волоконного световода.

На рисунке 1.7 представлен пример поперечного сечения многосердцевинного волоконного световода с семью сердцевинами, расположенными в гексагональном порядке. Многосердцевинные волоконные световоды были предложены еще 1979 году [14], однако в то время эта тема не получила дальнейшего активного развития, хотя был продемонстрирован ряд возможных применений таких световодов [6]. Значительный интерес к многосердцевинным световодам возник в 2009-2010 гг., когда был достигнут предел скорости передачи данных по односердцевинному световоду, который по оценкам составляет 100 Тбит/с [16, 96]. Увеличить скорость передачи информации по
одному волоконному световоду можно за счет передачи данных по различным сердцевинам многосердцевинного световода. При этом пропускная способность линии связи будет равна произведению пропускной способности одной сердцевины на количество сердцевин. Уплотнение каналов связи за счет передачи данных по различным сердцевинам многосердцевинных световодов (а также в различных модах многомодовых световодов) получило название пространственное уплотнение каналов [97].

Кроме линий многосердцевинные длинных связи световоды являются перспективными для использования в локальных сетях доступа [18, 19], поскольку снижение количества кабелей позволит снизить объем труб городских канализаций. Кроме телекома они перспективны для применений, связанных с «датакомом» и «компьютеркомом», поскольку позволяют упростить и уменьшить габариты трактов передачи сигнала в центрах обработки и хранения данных и суперкомпьютерах [20]. Снижение количества отрезков волоконно-оптического кабеля, массы и габаритов обеспечить волоконно-оптических устройств, которое может использование многосердцевинного световода вместо односердцевинного, особенно актуально для создания бортовой аппаратуры.

Возможность значительного увеличения пропускной способности и упрощения конструкции и габаритов длинных линий связи и трактов передачи информации вызвало высокую активность в исследованиях в этом направлении мировых лидеров по производству волоконных световодов и созданию оборудования с их использованием (OFS, Corning, Alcatel-Lucent, NTT Corporation, NEC Corpotation, Fujikura, Sumitomo и др.) и связанных с ними исследовательских лабораторий и центров. В результате за последние 10 лет в научной литературе появилось, по меньшей мере, несколько сотен публикаций по теме «многосердцевинные волоконные световоды», посвященных как разнообразным вариантам конструкции таких структур И созданию ИХ экспериментальных образцов, так и различным аспектам их применения в волоконнооптических линиях связи и экспериментальному исследованию их реальной работы в макетах линий связи.

Основной задачей, связанной с разработкой структуры многосердцевинных волоконных световодов, которые предназначены для передачи сигнала, является увеличение количества сердцевин, расположенных в пределах поперечного сечения световода. При этом возникает проблема, связанная с тем, что, вследствие интерференции, происходит переход излучения из одной сердцевины в другую. В случае, когда каждая сердцевина световода является отдельным каналом передачи информации, это нежелательно, поскольку приводит к появлению перекрестных оптических помех между каналами. По оценкам для телекоммуникационных линий допустимая величина перекрестных помех составляет -20 – (-35) дБ для различных форматов модуляции сигнала [98]. Для линии связи длиной 100 км это примерно соответствует перекрестным помехам в световоде -40 – (-55) дБ/км.

Чем ближе сердцевины расположены друг к другу, тем больше перекрестные помехи, поэтому снизить величину перекрестных помех возможно за счет увеличения расстояния между соседними сердцевинами. Однако, с точки зрения механической прочности и надежности, нежелательно увеличивать внешний диаметр световода свыше 250 мкм [99]. Перекрестные помехи и ограничение на внешний диаметр и являются факторами, ограничивающими количество сердцевин в многосердцевинном световоде: с стороны, существует минимальное расстояние одной между сердцевинами, обеспечивающее приемлемую для данной задачи величину перекрестных помех, а, с другой стороны, сердцевины должны быть расположены в поперечном сечении с диаметром менее 250 мкм.

Поэтому основной задачей при разработке структуры многосердцевинных световодов является поиск решений, позволяющих уменьшить расстояния между соседними сердцевинами без существенного роста перекрестных помех. Таким образом, к моменту начала работы над диссертацией существовала потребность в поиске и практической реализации новых решений, позволяющих снизить перекрестные оптические помехи при заданном расстоянии между соседними сердцевинами в многосердцевинном волоконном световоде.

Одним из известных ранее решений, позволяющих снизить перекрестные оптические помехи, является фазовое рассогласование между модами соседних сердцевин, то есть использование сердцевин с различными эффективными показателями преломления (постоянными распространения) мод [100]. Сделать это возможно, например, если две соседние сердцевины имеют различные параметры. Многосердцевинные световоды с различными сердцевинами получили название гетерогенные [101].

Недостаток данного метода снижения перекрестных оптических помех состоит в том, что на величину фазового рассогласования между модами соседних сердцевин оказывают влияние изгибы многосердцевинного световода, которые всегда присутствуют и имеют неконтролируемый характер. Поскольку в результате изгиба происходит изменение эффективного профиля показателя преломления световода [102], то исходная разница эффективных показателей преломления мод также изменяется. То есть, если в многосердцевинном волоконном световоде с различными параметрами соседних сердцевин в прямом положении наблюдается малое значение перекрестных помех за счет значительной разницы эффективных показателей преломления мод, то в изогнутом положении световода перекрестные помехи могут возрастать за счет

сближения эффективных показателей преломления мод [103, 104, 105]. Поэтому использование фазового рассогласования мод соседних сердцевин может оказаться неэффективным с точки зрения снижения перекрестных помех.

В работах [106, 107] был предложен способ уменьшения дополнительных перекрестных оптических помех, возникающих из-за изгиба световода. Данный способ состоит в закручивании световода вокруг оси. Закручивание световода вокруг оси с периодом порядка метра (во время вытяжки) приводит к изменению ориентации боковых сердцевин по отношению к направлению изгиба световода, за счет чего снижается максимальная величина перекрестных помех. Недостатками такого метода являлись неполное подавление величины дополнительных перекрестных помех, связанных с изгибом, а также возможность возникновения дополнительных изгибных потерь при закручивании световода. Также в работе [106] упомянута возможность контроля величины перекрестных помех, вызванных изгибом световода, за счет существования преимущественного направления изгиба, возникающего из-за некруглой формы поперечного сечения световода или специальной конструкции волоконнооптического кабеля. При этом приводится пример световодов с D-образной формой поперечного сечения. Однако в литературе отсутствовали работы, направленные на экспериментальное подтверждение принципа снижения перекрестных оптических помех за счет существования преимущественного направления изгиба, связанного с определенной формой поперечного сечения световода. Таким образом, к моменту начала работы над диссертацией существовала проблема снижения дополнительных с изгибом, перекрестных оптических помех, связанных В гетерогенных многосердцевинных световодах, в том числе с использованием световодов некруглого поперечного сечения.

1.5 Волоконно-оптические линии задержки

Обработка, генерация и передача сигнала радиодиапазона с помощью оптического излучения относится к междисциплинарной области, получившей название радиофотоника ("Microwave photonics") [108, 109]. В большинстве задач радиофотоники радиочастотный сигнал преобразуется В оптический путем модуляции Для дальнейшей обработки этого высококогерентного оптического излучения. оптического сигнала. модулированного радиочастотным сигналом, широко используются различные виды многоканальных и одноканальных волоконнооптических линий задержки, являющихся ключевыми элементами для создания устройств радиофотоники [110]. Широкое применение волоконно-оптические линии задержки находят, в частности, в задачах радиолокации и радиоэлектронного противодействия. Например, в радиотелескопах для компенсации разности задержек сигналов, обусловленных различным расстоянием от каждой из антенн до центра обработки данных; для формирования диаграммы направленности фазированных антенных решеток; в радарных системах для выделения движущихся целей; для создания ложных целей в системах радиоэлектронного противодействия.

Схематично волоконно-оптическую линию задержки на односердцевинных световодах можно представить так, как это сделано на рисунке 1.8. Входным радиосигналом осуществляется модуляция узкополосного лазерного излучения на оптической длине волны. Входной СВЧ сигнал подается либо непосредственно на генератор оптического сигнала, представляющий собой, например, полупроводниковый лазер с возможностью модуляции в СВЧ диапазоне, либо на электрооптический модулятор Маха–Цендера. Далее модулированное с частотой СВЧ диапазона излучение на оптической несущей (например, в области около 1550 нм) подается в оптоволоконную линию. Линия задержки, показанная на рисунке 1.8, обеспечивает время задержки сигнала, определяемое длиной отрезка световода L и равное $\tau=L\cdot n_g/c$, где L - длина световода, с – скорость света в вакууме, n_g –групповой показатель преломления моды сердцевины.

Волоконные линии задержки на односердцевинных световодах исследуются и используются достаточно давно [111]. В настоящее время разработаны и производятся рядом предприятий (Emcore, ЗАО «Центр ВОСПИ», ЗАО "ЦНИТИ "Техномаш-ВОС") волоконно-оптические линии задержки на основе односердцевинных световодов для различных применений, осуществляющие задержку сигнала на время, достигающее миллисекунд. Недавно теоретически было предложено использование многосердцевинных световодов с различными параметрами сердцевин в качестве многоканальных линий задержки [112]. Каждый канал (сердцевина) такой линии задержки осуществляет определенную, отличную от другого канала, задержку сигнала. Такие многоканальные линии задержки с постоянной разностью задержек между каналами могут использоваться как фильтры сигнала радиодиапазона, а также для формирования диаграммы направленности фазированных антенных решеток.

Волоконно-оптические линии задержки не являются единственным типом линий задержки сигнала радиодиапазона [113]. Для каждой конкретной задачи выбор типа линии задержки индивидуален. Однако, если сравнивать волоконно-оптические линии задержки с другими типами устройств, то их преимущества обычно заключаются в совокупности следующих факторов: невосприимчивость к электромагнитным помехам, низкий уровень шумов (приемно-передающие модули), широкополосность, механическая гибкость световода, возможность доставки излучения одновременно с его задержкой. К недостаткам волоконно-оптических линий задержки относятся большие потери за счет преобразования электрического сигнала в оптический и обратно, малый динамический диапазон, ограниченный нелинейностью передающих и модулирующих устройств, и большие габариты устройств, необходимые для получения длительных времен задержки сигнала.



Рисунок 1.8. Линия задержки на односердцевинном волоконном световоде.

Именно большие масса и габариты волоконно-оптических линий задержки являются одним из основных ограничений при использовании этих устройств, особенно на борту летальных аппаратов. Улучшение массогабаритных характеристик этих устройств позволит расширить диапазон их возможных применений, в том числе в качестве альтернативы сложным электронным устройствам. Поэтому поиск таких решений, в первую очередь за счет использования новых видов волоконных световодов, являлся актуальной задачей на момент начала работы над диссертацией.

ГЛАВА 2

СВЕТОВОДЫ С СЕРДЦЕВИНОЙ ИЗ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА, ЛОКАЛИЗУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ЗА СЧЕТ ОБРАЗОВАНИЯ ФОТОННОЙ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ

По материалам работ:

114**, 115**, 116**, 117**, 118*, 119*, 120*, 121*, 122**, 123*, 124*, 125**, 126*, 127*, 128*, 129*, 130*.

Как отмечено в обзоре литературных источников, оболочка световода, локализующего излучение за счет образования фотонной запрещенной зоны, представляет собой двухмерный фотонный кристалл, который образован цилиндрами из легированного кварцевого стекла с повышенным показателем преломления, расположенными в нелегированном кварцевом стекле в гексагональном порядке. Сердцевина таких световодов образуется отсутствием одного или нескольких элементов оболочки (рисунок 2.1). Излучение локализуется в сердцевине за счет эффекта фотонной образования запрещенной зоны или когерентного отражения ОТ периодической оболочки [131]. Световоды с фотонной запрещенной с заполненной сердцевиной обладают свойствами, сходными со свойствами световодов с полой сердцевиной, но, в отличие от последних, более просты в изготовлении и использовании, поскольку не имеют отверстий в поперечном сечении. Кроме того, наличие сердцевины из стекла дает возможность легирования всей площади сердцевины активными редкоземельными элементами, а также запись волоконных брэгговских решеток.

Настоящая глава посвящена изучению свойств световодов с сердцевиной из стекла, локализующих излучение за счет образования фотонной запрещенной зоны в периодической оболочке. Как отмечено в обзоре литературных источников, до начала работы над диссертацией все исследования световодов такого типа были посвящены структурам с отношением диаметра элемента оболочки d к расстоянию между центрами соседних элементов $\Lambda d/\Lambda$ не менее 0,34. В рамках настоящей работы впервые показано, что структуры с меньшим отношением d/A~0,1-0,3 также локализуют излучение с низкими оптическими потерями. Автором настоящей работы с соавторами показано, что световоды с фотонной запрещенной зоной с малым отношением d/A являются наиболее длинноволновой одномодовыми В пределах или фундаментальной запрещенной зоны, в случае если сердцевина образована отсутствием одного элемента оболочки. Одномодовость достаточно широком В спектральном диапазоне, соответствующем фундаментальной запрещенной зоне, аналогична свойству оболочкой, микроструктурированных световодов с дырчатой называемому

«бесконечной одномодовостью». «Бесконечная одномодовость» световодов с дырчатой микроструктурированной оболочкой делает возможным их использование в качестве структуры для создания активных одномодовых световодов с увеличенным диаметром поля моды для волоконных лазеров и усилителей, о чем изложено в пункте 1.1 главы 1. В связи с этим автором настоящей работы с соавторами предложено использовать конструкцию световодов с фотонной запрещенной зоной и малым d/A в качестве структуры для создания одномодовых световодов с большим диаметром поля моды. Малое отношение диаметра элемента периодической оболочки к расстоянию между соседними элементами d/A, во-первых, уменьшает объем легированного кварцевого необходимого изготовления световодов, a стекла. ДЛЯ во-вторых, позволяет минимизировать нежелательную локализацию излучения накачки элементами оболочки при накачке световода с торца. Отсутствие воздушных отверстий в поперечном сечении этих световодов делает их изготовление и использование проще по сравнению с микроструктурированными световодами с отверстиями.

Особенности локализации излучения в световодах с фотонной запрещенной зоной с малым d/A были теоретически исследованы Прямиковым А.Д. и Бирюковым А.С. на основе теории вытекающих мод отдельных элементов оболочки [132]. Результаты этих исследований не входят в настоящую работу, однако они учитывались при выборе параметров исследуемых световодов. Все численные расчеты в настоящей главе проведены автором диссертации и основаны на общепринятом подходе к описанию свойств фотонных кристаллов с помощью численного моделирования дисперсионных зависимостей мод оболочки (фотонного кристалла) и сердцевины (дефекта). Прямиков А.Д. и Гапонов Д.А. оказывали содействие автору настоящей работы при освоении и проведении численного моделирования характеристик световодов. При изготовлении световодов в работе использовались заготовки волоконных световодов, изготовленные в ИХВВ РАН Салганским М.Ю., Хопиным В.Ф., Яшковым М.Ю., Гурьяновым А.Н. Косолапов А.Ф., Вельмискин В.В. и Денисов А.Н. участвовали на этапе вытяжки световодов. Харченко Н.А. и Летунов С.А. участвовали в измерении оптических характеристик исследуемых волоконных световодов. Успешному ходу работ способствовало обсуждение полученных результатов с Диановым Е.М., Семеновым С.Л., Левченко А.Е. и Куксенковым Д.В.

2.1 Численное моделирование волноводных свойств световода, локализующего излучения за счет образования фотонной запрещенной зоны

Для численного моделирования оптических свойств световодов с сердцевиной из стекла, локализующих излучение за счет образования фотонной запрещенной зоны, использовались пакеты программ, осуществляющие решение векторного волнового уравнения различными численными методами: «Comsol Multiphysics», «Cudos MOF» и «MPB». «Comsol Multiphysics» [133] является пакетом программ, позволяющим методом конечных элементов проводить моделирование широкого ряда объектов, включая различные виды волоконных световодов. Одно из достоинств метода состоит в том, что он позволяет проводить численное моделирование оптических свойств световодов с произвольной формой поперечного сечения сердцевины и элементов структуры оболочки. Пакет программ «Cudos MOF» основан на решении волнового уравнения мультипольным методом [134, 135]. Пакеты программ «Comsol Multiphysics» и «Cudos МОF» в настоящей работе были использованы для поиска действительной и мнимой частей эффективного показателя преломления мод сердцевины световодов, а также пространственного распределения напряженности полей мод. Для расчета зонных диаграмм периодической оболочки был использован пакет программ «MPB» [136]. Данный пакет программ предназначен для численного моделирования параметров фотонных кристаллов.

Для численного моделирования в настоящем пункте, а также для последующей экспериментальной реализации, были выбраны следующие параметры световода: разница показателей преломления элементов оболочки и нелегированного кварцевого стекла 0,028, отношение диаметра элемента оболочки к расстоянию между соседними элементами $d/\Lambda = 0,12$, расстояние между центрами соседних элементов $\Lambda = 11,4$ мкм, сердцевина образована одним отсутствующим элементом оболочки. На рисунке 2.1 представлено схематичное изображение поперечного сечения световода и соответствующий профиль показателя преломления.

На рисунке 2.2 представлена рассчитанная зонная диаграмма световода с фотонной запрещенной зоной. Диаграмма представлена в координатах n_{eff} - n_{SiO2} и λ , где λ – длина волны, n_{eff} – эффективный показатель преломления моды, n_{SiO2} – показатель преломления нелегированного кварцевого стекла. Зонные диаграммы также могут быть представлены в относительных координатах (β -kn_{lo}) Λ и k Λ , как на рисунках 1.5 и 1.6 в Главе 1.

Так же как и на зонных диаграммах, приведенных в Главе 1, области на рисунке 2.2, в которых существуют моды фотонно-кристаллической оболочки, показаны серым цветом. Уровень «кварцевого стекла» (n_{eff}-n_{SiO2}=0) соответствует условию равенства эффективного показателя преломления мод и показателя преломления кварцевого

стекла, а также максимально возможному значению эффективного показателя преломления моды сердцевины. Запрещенные зоны, в которых могут существовать моды сердцевины, расположены ниже уровня «кварцевого стекла» и показаны белым цветом. На рисунке 2.2 представлены три запрещенные зоны, обозначенные цифрами I, II, III. Зона I является наиболее длинноволновой (фундаментальной) запрещенной зоной фотонно-кристаллической оболочки данного световода. Нижняя граница запрещенной зоны I, обозначенная β_L, расположена между точками 1 и 3 и пересекает линию «кварцевого стекла» в точке 1. Верхняя граница запрещенной зоны I, обозначеная β_U, расположена между точками 2 и 3 и пересекает «линию кварцевого стекла» в точке 2.

Как уже отмечалось в Главе 1, часть зонной диаграммы, расположенная выше уровня «кварцевого стекла», соответствует дисперсионным зависимостям элементов оболочки, которые представляют собой отдельные сердцевины, локализующие излучение за счет полного внутреннего отражения [137 , 57]. Причем кривая, обозначенная LP₀₁, соответствует дисперсионной зависимости фундаментальной моды элемента оболочки, кривая LP₁₁ соответствует первой высшей моде элемента оболочки и т. д.

При пересечении дисперсионной зависимости моды элемента оболочки с уровнем «кварцевого стекла» эта мода испытывает отсечку. Ниже уровня «кварцевого стекла» моды оболочки представляют собой набор состояний, являющихся периодическими функциями с периодом структуры оболочки (моды Блоха) [58]. Для такого набора состояний существуют запрещенные зоны, расположенные ниже уровня «кварцевого стекла», в которых могут существовать моды сердцевины или дефекта фотонного кристалла.

Постоянная распространения β моды является проекцией волнового вектора, умноженного на материальный показатель преломления среды, kn₀ на ось световода. Таким образом, мода с постоянной распространения β распространяется под углом к оси световода, равным θ =arccos($\beta/(k \cdot n_0)$). С другой стороны, постоянная распространения моды связана с ее эффективным показателем преломления соотношением β =kn_{eff}. Таким образом, значения эффективного показателя преломления на границах запрещенной зоны β_L и β_U на рисунке 2.2 определяют максимальный и минимальный возможный угол, под которым распространяется мода сердцевины, то есть числовую апертуру световода NA=n₀sin(θ). В области 1–2 на рисунке 2.2 NA=n₀sin(arccos(n_{effL}/n₀)), где n_{effL} – эффективный показатель преломления моды на границе β_L . Как и в световодах, локализующих излучение за счет полного внутреннего отражения, распространение излучения в сердцевине возможно для мод, распространяющихся под углами к оси световода от 0 до arccos(n_{effI}/n₀).



Рисунок 2.1. Поперечное сечение световода с фотонной запрещенной зоной и сердцевиной из кварцевого стекла, образованной отсутствием одного элемента оболочки, и соответствующий профиль показателя преломления вдоль оси X.



Рисунок 2.2. Зонная диаграмма световода, локализующего излучение за счет фотонной запрещенной зоны, с разницей показателей преломления элементов оболочки и чистого кварцевого стекла 0,028, отношением диаметра элемента оболочки к расстоянию между центрами соседних элементов d/Λ = 0,12, расстоянием между центрами соседних элементов 11,4 мкм и сердцевиной, образованной одним отсутствующим элементом



Рисунок 2.3. Расчетные оптические потери нулевой и первой высшей моды сердцевины для фундаментальной запрещенной зоны исследуемого световода. На вставках представлены расчетные распределения интенсивностей этих мод.

В области 2–4 максимально возможный угол распространения мод также ограничен arccos(n_{effL}/n_0). Однако в этой области существуют также минимально возможные значения постоянной распространения $\beta = kn_{effU}$, где n_{effU} – эффективный показатель преломления моды на границе β_U . Поэтому в области 2–4 распространение излучения возможно для мод сердцевины, распространяющихся под углами к оси световода от arccos(n_{effU}/n_0) до arccos(n_{effL}/n_0). То есть существует как максимальное, так и минимальное значение числовой апертуры сердцевины, равное NA= n_0 sin(arccos(n_{effU}/n_0)). Ограничение числовой апертуры сердцевины снизу приводит к такому явлению, как существование только мод высших порядков в сердцевине световода, в то время как нулевая мода не локализуется.

Эффективный показатель преломления оболочечных мод n_{effL} , соответствующий нижней границе запрещенной зоны β_L , можно рассматривать как эффективный показатель преломления оболочки, поскольку он определяет максимальный возможный угол распространения мод сердцевины. Такое рассмотрение, в котором, по аналогии со ступенчатым профилем показателя преломления, за эффективный показатель преломления оболочки принимается максимальное значение эффективного показателя преломления среди оболочечных мод (или эффективный показатель преломления фундаментальной моды оболочки), применяется для более наглядного описания свойств различных типов микроструктурированных световодов [60, 61].

Кривая дисперсионной зависимости фундаментальной моды сердцевины в фундаментальной запрещенной зоне показана сплошной черной линией на рисунке 2.2. Как уже было сказано, диапазон, в котором может находиться дисперсионная зависимость моды сердцевины, ограничен верхней и нижней границей запрещенной зоны β_L и β_U , а также уровнем «кварцевого стекла». При приближении дисперсионной зависимости моды сердцевины к нижней и верхней границе запрещенной зоны в точках а и b соответственно, мода сердцевины становится вытекающей за счет взаимодействия с модами оболочки. Таким образом, спектральный диапазон существования моды сердцевины определяется точками а и b на рисунке 2.2 (спектральный диапазон существования самой запрещенной зоны определяется абсциссами точек 1 и 3).

Также на зонной диаграмме пунктирной линией представлена дисперсионная зависимость первой высшей моды сердцевины. Как видно, она практически совпадает с границей запрещенной зоны, что говорит о том, что она является вытекающей за счет взаимодействия с модами оболочки.

На рисунке 2.3 показаны результаты расчета оптических потерь в фундаментальной и первой высшей моде сердцевины исследуемого световода. Потери были рассчитаны, исходя из значения мнимой части показателя преломления,

полученной в результате численного моделирования с помощью пакета программ «Cudos MOF» по формуле:

$$\alpha \left[\frac{\partial E}{\kappa_{M}}\right] = 20 \lg(e) \frac{2\pi}{\lambda} Im(n_{eff}) \times 10^{9}$$

Здесь а – оптические потери в дБ/км, Im(n_{eff}) – мнимая часть эффективного показателя преломления моды, λ – длина волны в микрометрах. Расчет проводился для фотонно-кристаллической оболочки, состоящей ИЗ четырех слоев элементов. Оптические потери нулевой моды находятся на уровне 0,01 дБ/км, первая высшая мода имеет существенно большие оптические потери – порядка 10⁵ дБ/км. Уровень оптических потерь в первой высшей моде свидетельствует о том, что она является вытекающей. О том, что первая высшая мода является вытекающей, свидетельствует и распределение интенсивности в поперечном сечении световода, представленное на рисунке 2.3, также полученное с помощью пакета программ «Cudos MOF». При этом из распределения интенсивности нулевой моды, представленной на рисунке 2.3, видно, что она локализована в сердцевине. Таким образом, дисперсионная зависимость первой высшей моды, практически совпадающая с границей запрещенной зоны, расчетное значение оптических потерь, а также распределение интенсивности первой высшей моды свидетельствуют о том, что эта мода является вытекающей, а сердцевина исследуемого световода – одномодовой.

Как видно, наиболее длинноволновая (фундаментальная) запрещенная зона I на рисунке 2.2 имеет разницу показателя преломления сердцевины, равного показателю преломления нелегированного кварцевого стекла, И эффективного показателя преломления оболочки, намного бо́льшую, чем у других запрещенных зон в данной конструкции фотонно-кристаллической оболочки. Так, разность показателей преломления в центре фундаментальной запрещенной зоны на рисунке 2.2 составляет около 0,002, в то время как эта величина для запрещенных зон более высокого порядка менее 0,0002. Уменьшение разницы показателей преломления сердцевины и оболочки с ростом номера запрещенной зоны согласуется с результатами расчетов в работе [57] для световода с отношением диаметра элемента оболочки к расстоянию между центрами соседних элементов $d/\Lambda = 0,4$ (Глава 1, рисунок 1.6).

2.2 Изготовление световода, локализующего излучения за счет фотонной запрещенной зоны, целиком состоящего из кварцевого стекла

Для изготовления световодов с запрещенной зоной, целиком состоящих из кварцевого стекла, применялся метод сборки и перетяжки, который широко используется для изготовления микроструктурированных световодов. Схематичное изображение поперечного сечения сборочной заготовки представлено на рисунке 2.4. Она состоит из стержней с сердцевинами 1, сложенными в гексагональном порядке и помещенными в трубку из кварцевого стекла 2. Для образования сердцевины в центре сборочной заготовки помещен стержень из нелегированного кварцевого стекла без сердцевины 3. Стержни для изготовления периодической оболочки были получены путем перетягивания на башне для вытяжки световодов заготовки, изготовленной методом осаждения из газовой фазы. Диаметр стержней после перетягивания составлял около 1 мм. Увеличение показателя преломления сердцевины стержня в процессе осаждения из газовой фазы. Разница показателей преломления в заготовке, из которой вытягивались стержни, составляла 0,028, отношение диаметра легированной части к внешнему диаметру – 0,12.

На рисунке 2.5 показана фотография сборки до помещения в трубку из кварцевого стекла. После помещения сборки внутрь трубки из кварцевого стекла, в трубку со сборочной заготовкой подавалось пониженное давление, и полученная заготовка была консолидирована в стержень-заготовку при нагреве до температуры около 2000°С. Стержни 4, расположенные по краю сборки, позволяли избежать изменения положения стержней 1 во время консолидации заготовки (рисунок 2.4). Полученная таким образом консолидированная заготовка была вытянута в световод.

Фотография торца полученного световода представлена на рисунке 2.6. Расстояние между центрами соседних элементов оболочки составило Λ =11,4 мкм, отношение диаметра элементов оболочки d к расстоянию между центрами соседних элементов Λ составило d/ Λ =0,12. Сердцевина световода была образована одним пропущенным элементом оболочки. Оболочка состояла из шести слоев элементов. Внешний диаметр оболочки из кварцевого стекла составил 182 мкм.



Рисунок 2.4. Поперечное сечение сборочной заготовки для изготовления световода, локализующего излучение за счет фотонной запрещенной зоны.



Рисунок 2.5. Фотографии сборки до помещения в трубку из кварцевого стекла.



Рисунок 2.6. Фотография торца световода с фотонной запрещенной зоной, полученная с помощью электронного микроскопа.

2.3 Исследование уровня оптических потерь

В изготовленном световоде были измерены оптические потери методом обрыва. Измерения проводились на отрезке световода длиной 80 м, свободно намотанного с диаметром 30 см. Для того чтобы исключить возможность распространения измеряемого сигнала по элементам периодической оболочки, на выходе и на входе измеряемого световода с помощью процесса сварки присоединялся световод со ступенчатым профилем показателя преломления с диаметром поля моды около 6 мкм. Кроме того, при присоединении отрезка подводящего световода только на входе исследуемого световода проводился анализ изображения выходного торца исследуемого световода с помощью ИК-камеры для того, чтобы убедиться в том, что излучение распространяется преимущественно по сердцевине исследуемого световода, а не по элементам оболочки.

Измеренный спектр оптических потерь представлен на рисунке 2.7. Как уже было отмечено, спектральный диапазон существования моды сердцевины определяется точками пересечения дисперсионной зависимости моды сердцевины с границами запрещенной зоны (точки a и b на рисунке 2.2). Экспериментально измеренный спектральный диапазон локализации моды сердцевины в фундаментальной запрещенной зоне составил от 950 до 1300 нм по уровню 100 дБ. Минимум оптических потерь приходился на диапазон от 1000 до 1200 нм, значение потерь в минимуме составляло 20-30 дБ/км. По сравнению с расчетными зависимостями, представленными на рисунке 2.3, минимум оптических потерь сдвинут на 100 нм в длинноволновую сторону. Это смещение может быть обусловлено как неточностью в определении разности показателей преломления элементов оболочки и кварцевого стекла, вызванной ошибкой при измерении профиля показателя преломления в заготовке, так и изменением разницы показателя преломления элементов оболочки и окружающего их кварцевого стекла при вытяжке световода [138]. То, что измеренная величина минимальных оптических потерь превышает расчетную (рисунок 2.3) связано, вероятно, с влиянием изгибных оптических потерь, а также неидеальной структурой световода.

Как видно из зонной диаграммы, представленной на рисунке 2.2, эффективная разность показателей преломления сердцевины и оболочки, то есть нижней границы запрещенной зоны и кварцевого стекла, составляет в центре запрещенной зоны примерно 0,001-0,003. Достаточно малая разность показателей преломления сердцевины и оболочки может приводить к высоким изгибным потерям [59].



Рисунок 2.7. Оптические потери моды сердцевины в фундаментальной запрещенной зоне исследуемого световода.



Рисунок 2.8. Изгибные оптические потери в световоде, локализующем излучение за счет фотонной запрещенной зоны. Соответствующие диаметры изгиба световода приведены на графике.

Для исследования влияния изгиба световода на спектр оптических потерь было проведено измерение изгибных потерь путем сравнения мощности излучения, проходящего через 3 м изогнутого с различным диаметром световода и неизогнутого световода. Для предотвращения распространения излучения по элементам оболочки, с двух сторон присоединялись отрезки световода с диаметром поля моды 6 мкм, локализующего излучение за счет полного внутреннего отражения.

Результаты измерения изгибных потерь представлены на рисунке 2.8. Измерения проводились при диаметрах намотки световода 45, 22, 17, 15 и 11 см. Намотка проводилась в свободных витках без катушки. Видно, что при уменьшении диаметра изгиба световода наблюдается уменьшение ширины зоны локализации излучения в сердцевине. Эффект уменьшения ширины запрещенной зоны можно понять на основании подхода к анализу изгибных потерь с помощью модели эквивалентного ступенчатого профиля, предложенной в работе [59]. Как уже было сказано, эта модель основана на том, что дисперсионная зависимость нижней границы запрещенной зоны β_L рассматривается как эффективный показатель преломления оболочки, поскольку она определяет максимальный возможный угол распространения мод сердцевины в лучевом приближении [60, 61]. При этом эффективная разность показателей преломления моды сердцевины и оболочки определяется расстоянием от дисперсионной зависимости моды сердцевины до границы запрещенной зоны (Дл- на рисунке 2.2). По аналогии со ступенчатым профилем показателя преломления изгибные потери в световоде с фотонной запрещенной зоной будут определяться разностью эффективного показателя преломления моды сердцевины и оболочки Δn -: чем меньше эта разница, тем больше величина изгибных потерь. Кроме того, на длинноволновом краю запрещенной зоны изгибные потери также будут определяться и расстоянием до верхней границы запрещенной зоны $\beta_U - \Delta n + [59]$.

Как видно из дисперсионной диаграммы на рисунке 2.2, разница между эффективным показателем преломления моды сердцевины и границами запрещенной зоны уменьшается при приближении к длинноволновому и коротковолновому краю области локализации моды сердцевины а и b. Поэтому наибольшие изгибные потери должны наблюдаться на краях области локализации моды сердцевины. В связи с этим при уменьшении радиуса изгиба и происходит сужение области пропускания. Сужение спектральной области локализации моды сердцевины наблюдалось в большинстве работ, посвященных исследованию изгибных потерь в световодах с фотонной запрещенной зоной [59, 139, 140].

Для диаметров изгиба 17 см и менее в спектре оптических потерь наблюдаются достаточно узкие области высоких потерь для моды сердцевины. При изменении диаметра изгиба положение пиков смещается. Причина возникновения узких областей с

54

высокими оптическими потерями объяснена в работе [131]. Как известно, изогнутый световод по своим оптическим свойствам эквивалентен неизогнутому световоду с наклонным профилем показателя преломления [102]. Чем меньше диаметр изгиба, тем больше наклон эквивалентного профиля показателя преломления. Изгиб с достаточно малым диаметром приводит к тому, что в результате большого наклона эффективного профиля показателя преломления эффективные показатели преломления мод соседних элементов оболочки значительно отличаются друг от друга, и моды соседних элементов оболочки перестают взаимодействовать из-за отсутствия фазового условия синхронизма. Это приводит к тому, что вместо широких зон при малом диаметре изгиба моды оболочки образуют набор узких дисперсионных зависимостей, соответствующих различным элементам оболочки. Пересечение дисперсионной зависимости моды сердцевины световода с этими дисперсионными зависимостями, возникающими при малом диаметре изгиба, и приводит к возникновению пиков в спектре оптических потерь.

2.4 Исследование модового состава

Как видно из дисперсионной диаграммы на рисунке 2.2, в фундаментальной запрещенной зоне исследуемого световода находится только одна дисперсионная зависимость моды сердцевины, соответствующая нулевой моде, то есть световод является одномодовым в пределах фундаментальной запрещенной зоны. Расчеты оптических потерь и распределения интенсивности для мод сердцевины также показывают, что первая высшая мода не локализуется в сердцевине исследуемого световода (рисунок 2.3). Для экспериментального подтверждения одномодовости было проведено изучение модового состава сердцевины исследуемого световода. Для этого было использовано излучение волоконного источника суперконтинуума. С помощью монохроматора из спектра суперконтинуума вырезалась часть излучения с шириной 4–10 нм, далее это излучение вводилось в световод, локализующий излучение за счет полного внутреннего отражения, с диаметром сердцевины 6 мкм и отсечкой первой высшей моды порядка 900 нм. Выходной торец этого световода стыковался с торцом исследуемого световода.

Как известно, эффективность ввода излучения из одного волновода в другой зависит от интеграла перекрытия мод двух волноводов [55]. Поскольку максимум поля нулевой моды сердцевины сосредоточен в центре сердцевины световода, а первая высшая мода в центре имеет минимум напряженности поля, то при соосном положении подводящего и принимающего световодов эффективность ввода будет больше для нулевой моды, а при несоосном - первой высшей. Таким образом, перемещая торцы световодов друг относительно друга вдоль поперечной оси, можно определить, является

ли исследуемая сердцевина одномодовой. Если световод является многомодовым, при несоосном положении торцов должно наблюдаться распределение интенсивности, соответствующее первой высшей моде, то есть имеющее минимум в центре.



Рисунок 2.9. Распределение интенсивности поля моды на торце световода при центральном и смещенном положении возбуждающего световода на длине волны 1100 нм. Длина исследуемого световода 10 см.

На рисунке 2.9 приведены фотографии распределения интенсивности моды в ближней зоне дифракции, полученные с помощью ИК-камеры, при различных положениях торцов подводящего и исследуемого световодов. Измерения проводились на участке прямого световода длиной 10 см на длине волны 1100 нм. Мода состоит из центральной части и шести боковых частей, соответствующих положению первого слоя элементов оболочки. И при смещенном и при соосном положении торцов распределение интенсивности поля центральной части моды хорошо аппроксимируется функцией Гаусса и имеет ширину на высоте $1/e^2$, равную 19–20 мкм. Исследование световода описанным способом также показали, что в диапазоне 700–1200 нм первая высшая мода не наблюдается и световод является одномодовым. Исследование одномодовости было проведено и в окрестности длины волны 1550 нм, в которой также наблюдалась только фундаментальная мода сердцевины.

Шесть боковых частей, положение которых соответствует положению ближайших к сердцевине элементов оболочки, являются частью фундаментальной моды световода. Часть мощности, приходящаяся на боковые части, зависит от конструкции световода и длины волны. Для исследуемой структуры световода на длине

волны 1100 нм согласно расчетам в боковых частях моды находится 4,2% общей мощности фундаментальной моды сердцевины.

Также были предприняты попытки наблюдения локализации моды сердцевины во второй запрещенной зоне. Как видно из зонной диаграммы на рисунке 2.2, центру второй запрещенной зоны соответствует длина волны 400 нм. Однако при описанных условиях эксперимента мода сердцевины в исследуемом световоде в окрестности 400 нм не наблюдалась. Для более детального анализа этого вопроса из заготовки световода с фотонной запрещенной зоной был изготовлен световод с бо́льшим внешним диаметром – 297 мкм. Поскольку диаметр элементов оболочки также увеличился пропорционально отношению внешних диаметров, следовательно, увеличились и длины волн отсечек мод элемента оболочки. Поскольку длины волн отсечек мод элементов определяют спектральный диапазон соответствующих запрещенных зон, центр второй запрещенной зоны в световоде с увеличенным диаметром должен был сместиться пропорционально увеличению диаметра элемента оболочки в область 650 нм. Однако исследования световода с увеличенным диаметром показали, что на неизогнутом участке длиной 10 см мода сердцевины в окрестности длины волны 650 нм не наблюдается.

Таким образом, результаты численного моделирования и экспериментальные исследования показали, что световод с расстоянием между центрами соседних элементов оболочки Λ =11,4 мкм, отношением диаметра элементов оболочки d к расстоянию между центрами соседних элементов Λ d/ Λ =0,12 и с сердцевиной, сформированной одним отсутствующим элементом оболочки, локализует излучение в фундаментальной запрещенной зоне с минимальными оптическими потерями на уровне 20 дБ/км и является одномодовым в пределах этой запрещенной зоны.

2.5 Явление одномодовости в широком спектральном диапазоне в световодах, локализующих излучения за счет фотонной запрещенной зоны

Как было показано, световод с фотонной запрещенной зоной и сердцевиной из кварцевого стекла с отношением диаметра элемента оболочки к расстоянию между центрами элементов $d/\Lambda=0,12$ и сердцевиной, образованной одним пропущенным элементом оболочки, является одномодовым в пределах фундаментальной запрещенной зоны. При этом диаметр поля моды составляет 19–20 мкм в центре запрещенной зоны, а значение оптических потерь приемлемо для практического использования данных световодов.

Постоянство модового состава (одномодовость) в пределах фундаментальной запрещенной зоны связано с определенной дисперсионной зависимостью эффективного показателя преломления оболочки или n_{eff} на нижней границе запрещенной зоны β_L на рисунке 2.2. Как видно из рисунка 2.2, при уменьшении длины волны разность

57

В обычных световодах со ступенчатым профилем показателя преломления число мод сердцевины зависит от параметра V:

$$N = \frac{V^2}{2}$$

равного

$$V = \frac{\pi D \sqrt{n_{cep}^2 - n_{ob}^2}}{\lambda},$$

где D – диаметр сердцевины, n_{об} - показатель преломления оболочки, n_{сер} - показатель преломления сердцевины. Поскольку в световодах со ступенчатым профилем показателя преломления разность показаувшетелей преломления сердцевины и оболочки практически не зависит от длины волны, то уменьшение длины волны приводит к увеличению параметра V и, следовательно, количества мод сердцевины. Для световодов с фотонной запрещенной зоной и сердцевиной из стекла можно ввести эквивалентный параметр V, по аналогии с тем, как это было сделано для световодов с

полой сердцевиной [60], равный $V = \frac{\pi D_{eff} \sqrt{n_{eff}^2 - n_{effof}^2}}{\lambda}$, где D_{eff} эффективный диаметр сердцевины, n_{effof} – эффективный показатель преломления оболочки, соответствующий значению n_{eff} на нижней границе запрещенной зоны β_L , n_{cep} - показатель преломления сердцевины, равный показателю преломления кварцевого стекла. Снижение разности эффективных показателей преломления сердцевины и оболочки с уменьшением длины волны приведет к тому, что V-параметр будет оставаться постоянным или изменяться незначительно, что и приведет к постоянству модового состава в широком спектральном диапазоне.

Аналогичное явление одномодовости в широком спектральном диапазоне, или «бесконечная одномодовость», наблюдается в микроструктурированных световодах с сердцевиной из стекла и дырчатой оболочкой (пункт 1.1 Глава 1). На рисунке 1.2 Главы 1 представлена зонная диаграмма дырчатого световода. Из диаграммы на рисунке 1.2 видно, что в световодах с дырчатой микроструктурированной оболочкой также происходит снижение разности показателя преломления сердцевины и эффективного показателя преломления оболочки, которое и приводит к одномодовости в широком спектральном диапазоне.

Как отмечалось в обзоре литературных источников, снижение эффективного показателя преломления фундаментальной моды оболочки в дырчатых микроструктурированных световодах при увеличении длины волны связано с тем, что при меньших длинах волн поле больше сосредоточено в пространстве между отверстиями и эффективный показатель преломления фундаментальной моды оболочки стремится к показателю преломления кварцевого стекла, а при больших значениях длины волны поле более равномерно распределено в оболочке между стеклом и отверстиями и, за счет этого, эффективный показатель преломления фундаментальной эффективного показателя оболочки снижается. Снижение моды преломления фундаментальной моды оболочки при увеличении длины волны в световодах с запрещенной фотонной зоной обусловлено возрастанием угла, под которым распространяется фундаментальная мода оболочки, и осью световода. Данный факт характерный размер следует ИЗ того. что изменения напряженности поля фундаментальной моды оболочки в поперечном сечении световода практически не зависит от длины волны. Для того, чтобы при увеличении длины волны не изменялся размер распределения поля, необходимо одновременное увеличение угла наклона распространения моды к оси световода. Увеличение угла наклона распространения моды к оси световода эквивалентно снижению эффективного показателя преломления моды.

Одномодовость в широком спектральном диапазоне эквивалентна одномодовости при увеличении размера геометрической структуры световода. На рисунке 1.2 дисперсионная диаграмма световода с дырчатой оболочкой представлена в относительных координатах по оси абсцисс – отношении длины волны и расстояния между центрами соседних отверстий «а». Дисперсионные диаграммы световодов с фотонной запрещенной зоной также могут быть представлены в относительных координатах. Из рисунка 1.2 следует, что уменьшение длины волны при фиксированных геометрических размерах структуры световода эквивалентно увеличению размера геометрической структуры при фиксированной длине волны. Поэтому одномодовость в широком спектральном диапазоне означает, что в данной структуре также возможно получение одномодового режима при неограниченном увеличении (масштабировании) размера структуры световода и, следовательно, диаметра сердцевины.

Таким образом, благодаря одномодовости в широком спектральном диапазоне, а также возможности получения довольно низких оптических потерь, в настоящей работе предложено использовать световоды с сердцевиной из стекла, локализующие излучение за счет образования фотонной запрещенной зоны, в качестве структуры для создания активных световодов с большим диаметром поля моды для лазеров и усилителей. Как было отмечено в Главе 1, световоды с большим диаметром поля моды, одномодовые или близкие к одномодовым, перспективны для использования в квантовой электронике в качестве активной лазерной среды. Большой диаметр поля моды позволяет снизить интенсивность излучения в сердцевине и, таким образом, уменьшить нежелательное влияние нелинейно-оптических эффектов, а одномодовость позволяет получать высокое качество пучка. По сравнению с дырчатыми микроструктурированными световодами

59

[141], 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 при использовании, поскольку не имеет 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.

2.6 Критерий одномодовости волоконных световодов, локализующих излучения за счет фотонной запрещенной зоны, с малым отношением диаметра элемента оболочки к расстоянию между ними

Для практического использования световодов важным является понимание зависимости модового состава от параметров структуры поперечного сечения. Поэтому настоящий раздел посвящен исследованию критерия одномодовости световодов данной конструкции, то есть того, при каких параметрах структуры световод будет являться одномодовым. Исследование этого вопроса проводилось с помощью расчета зонных диаграмм световодов с различными параметрами поперечного сечения. Были исследованы зависимости вида зонных диаграмм от отношения диаметра элемента оболочки к расстоянию между центрами соседних элементов d/Λ , разницы показателей преломления в оболочке Δn , количества элементов оболочки, пропущенных для формирования сердцевины. При этом исследовался диапазон малых значений $d/\Lambda < 0.4$. Полученные теоретические зависимости подтверждены экспериментально с помощью изготовления и исследования серии световодов.

2.6.1 Численное моделирование

Для исследования критерия одномодовости проводилось численное моделирование зонных диаграмм мод оболочки для всех возможных пар из следующего набора параметров: трех значений разности показателей преломления элемента оболочки и стекла сердцевины Δn: 0,005; 0,015; 0,03; и пяти значений отношения диаметра элемента оболочки d к расстоянию между центрами соседних элементов Λ d/Λ: 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4. Диапазон значений разности показателей преломления выбран с точки зрения практической реализуемости, поскольку данные значения могут

быть достаточно просто достигнуты с помощью процесса осаждения кварцевого стекла из газовой фазы.

Зонная диаграмма мод периодической оболочки при разнице показателей преломления в оболочке $\Delta n=0,015$ и d/ $\Lambda=0,1$ представлена на рисунке 2.10. В отличие от зонной диаграммы на рисунке 2.2, она представлена в координатах (β -kn₀) Λ и λ/Λ , где β – постоянная распространения моды, k=2 π/λ , n₀ – показатель преломления нелегированного кварцевого стекла. Представление зонной диаграммы в этих координатах более универсально и обусловлено тем, что волновое уравнение инвариантно к изменению длины, то есть, при изменении размера структуры в n раз, решение волнового уравнения остается неизменным на длине волны, также измененной в n раз. Таким образом, зонная диаграмма на рисунке 2.10 в выбранных безразмерных координатах определяется только отношением λ/Λ и не зависит от абсолютных величин длины волны и периода фотонно-кристаллической оболочки.

Как и на рисунке 2.2, области, в которых существуют моды оболочки, показаны серым цветом, запрещенные зоны расположены ниже уровня "кварцевого стекла" (β -kn₀) Λ =0 и показаны белым цветом, зона I является наиболее длинноволновой (фундаментальной) запрещенной зоной фотонно-кристаллической оболочки, дисперсионная зависимость моды сердцевины в фундаментальной запрещенной зоне показана черной кривой. Как уже было отмечено, дисперсионная зависимость моды сердцевины становится вытекающей за счет взаимодействия с модами оболочки в точках а и b.

На рисунках 2.11 и 2.12 показано, как изменяются границы фундаментальной запрещенной зоны, обозначенные на рисунке 2.10 β_L и β_U , в зависимости от параметров оболочки. Поскольку на границе запрещенной зоны β_L - (β -kn₀) Λ =(n_{eff}-n₀)k Λ , то возрастание «глубины» запрещенной зоны на рисунках 2.11 и 2.12 соответствует увеличению разности показателя преломления сердцевины и эффективного показателя преломления периодической оболочки. При фиксированном значении параметра d/ Λ = 0,1 при возрастании разности показателей преломления в оболочке возрастает "глубина" запрещенной зоны и, следовательно, числовая апертура сердцевины световода (рисунок 2.11). При фиксированном значении разности показателей преломления в оболочки возрастает тлубина" запрещенной зоны или эквивалентная числовая апертура сердцевины возрастает при увеличении параметра d/ Λ (рисунок 2.12).



Рисунок 2.10. Зонная диаграмма световода с разностью показателей преломления в оболочке Δn=0,015, отношением диаметра элемента оболочки к расстоянию между центрами соседних элементов d/Л=0,1 и сердцевиной, образованной одним пропущенным элементом. Зоны, в которых могут существовать моды оболочки, показаны серым цветом, запрещенные зоны - белым цветом, черная кривая – дисперсионная зависимость моды сердцевины. β - постоянная распространения моды, k=2π/λ, n₀ - показатель преломления кварцевого стекла.



Рисунок 2.11. Рассчитанная зависимость границ фундаментальной запрещенной зоны β_L и β_U от λ/Λ при d/ Λ =0,1.



Рисунок 2.12. Рассчитанная зависимость границ фундаментальной запрещенной зоны β_L и β_U от λ/Λ при разности показателей преломления в оболочке Δn =0,015.



Рисунок 2.13. Относительная ширина запрещенной зоны при различных параметрах фотонно-кристаллической оболочки.



Рисунок 2.14. Разность показателей преломления сердцевины и оболочки в середине запрещенной зоны при различных параметрах фотонно-кристаллической оболочки.



Рисунок 2.15. Зонная диаграмма световода с сердцевиной, образованной отсутствием одного элемента оболочки (Δn =0,015 и d/Δ=0,1).



Рисунок 2.16. Зонная диаграмма световода с сердцевиной, образованной отсутствием семи элементов оболочки (Δn =0,015 и d/Λ=0,1).

Для наглядного представления полученных результатов расчета можно ввести относительную ширину запрещенной зоны: $\Delta\lambda/\lambda_c = (\lambda_3 - \lambda_1)/\lambda_c$, где λ_1 и λ_3 – длины волн, соответствующие точкам 1 и 3 (рисунок 2.10), $\lambda_c = (\lambda_3 + \lambda_1)/2$ – длина волны, которую можно принять за середину запрещенной зоны [43]. При этом следует отметить, что $\Delta\lambda/\lambda_c$ характеризует только ширину запрещенной зоны, область, в которой локализуется фундаментальная мода сердцевины, является более узкой и определяется местами пересечения дисперсионной зависимости моды (или мод в случае многомодового световода) сердцевины с краями запрещенной зоны (точки а и b на рисунке 2.10).

На рисунке 2.13 представлены зависимости относительной ширины запрещенной зоны при различных параметрах оболочки. Как видно, относительная ширина запрещенной зоны не зависит от разности показателей преломления в оболочке и увеличивается, хотя и незначительно, при уменьшении параметра d/A. Разница показателей преломления сердцевины и эффективного показателя преломления оболочки на длине волны, соответствующей середине запрещенной зоны n_0 - $n_{eff}(\lambda)$, напротив, значительно возрастает по модулю при увеличении параметра d/A и Δn (рисунок 2.14). Увеличение n_0 - $n_{eff}(\lambda)$ с ростом разницы показателей преломления оболочки согласуется, например, со случаем наклонного падения излучения на решетку Брэгга, состоящую из попеременно расположенных слоев диэлектрика с показателями преломления n_1 и n_2 [55, Глава 7]. В такой системе область углов, при которых коэффициент отражения падающего излучения близок к единице, расширяется с увеличением отношения n_2/n_1 , что эквивалентно увеличению числовой апертуры сердцевины световода с запрещенной зоной.

Модовый состав сердцевины рассчитывался для сердцевин, образованных одним и семью отсутствующими элементами оболочки (рисунок 2.15, 2.16). Для этого проводился расчет дисперсионных зависимостей мод сердцевин различными методами для каждого набора значений разности показателей преломления в оболочке световода Δn : 0,005; 0,015; 0,03; и параметра d/ Λ : 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4. Для каждого набора параметров оболочки были рассчитаны дисперсионные зависимости мод сердцевины, образованной одним и семью отсутствующими элементами оболочки. Результаты расчета для случая Δn =0,015 и d/ Λ =0,1 представлены на рисунках 2.15-2.16, для других наборов параметров модовый состав сердцевины является таким же, а дисперсионные диаграммы выглядят аналогично.

На рисунке 2.15 представлена дисперсионная диаграмма для световода с сердцевиной, сформированной одним пропущенным элементом оболочки. Как видно, в фундаментальной запрещенной зоне находится только одна (дважды вырожденная) дисперсионная зависимость моды сердцевины. Для других наборов параметров оболочки в случае, если сердцевина образована одним пропущенным элементом

оболочки, также была найдена только одна дисперсионная зависимость, соответствующая нулевой моде сердцевины. Таким образом, световоды с одним пропущенным элементом оболочки являются одномодовыми во всей фундаментальной запрещенной зоне при малом отношении диаметра элемента к расстоянию между центрами соседних элементов.

В световодах с сердцевиной, образованной семью отсутствующими элементами оболочки, при всех наборах значений параметров оболочки в запрещенной зоне находились дисперсионные зависимости 14 мод сердцевины. Так как некоторые из них вырождены, они образуют пять групп мод с приблизительно одинаковыми дисперсионными зависимостями (рисунок 2.16). Полученный модовый состав аналогичен описанному в работе [142] для дырчатых микроструктурированных световодов. Причина увеличения числа мод в сердцевине при формировании сердцевины бо́льшим количеством элементов оболочки заключается в возрастании диаметра сердцевины.

2.6.2 Экспериментальное исследование параметров световодов

Экспериментальная проверка полученных результатов проводилась для ряда образцов световодов с сердцевиной, образованной одним и семью отсутствующими элементами фотонно-кристаллической оболочки. В таблице 2.1 представлены параметры исследованных световодов, на рисунке 2.17 представлены фотографии их торцов, полученные с помощью электронного микроскопа.

Модовый состав полученных образцов определялся путем исследования распределения интенсивности излучения на торце световода при различных условиях возбуждения от внешнего источника.

При исследовании световодов с сердцевиной, образованной одним отсутствующим элементом оболочки, при различных условиях возбуждения всегда наблюдалось гауссово распределение интенсивности излучения, что соответствует фундаментальной моде сердцевины исследуемого световода (рисунок 2.9).

При исследовании световодов с сердцевиной, образованной семью элементами, при изменении условий возбуждения распределение интенсивности по торцу световода имело минимум в центре. Это свидетельствовало о том, что световод является многомодовым (рисунок 2.18 справа). Таким образом, в соответствии с результатами расчетов световоды с сердцевиной, образованной одним элементом периодической оболочки, являются одномодовыми, семью – многомодовыми.

Далее более подробно рассмотрены результаты исследований световода «а» и «г». Подробное описание исследования параметров световода «в» представлено в пунктах 2.3-2.4.

Световод	d/Λ	Λ, мкм	Δn	Количество элементов	Число	Модовый состав
				для формирования	слоев	
				сердцевины	оболочки	
а	0,24	11,5	0,0185	7	6	Многомодовый
б	0,08	18	0,028	7	2	Многомодовый
В	0,12	11,4	0,028	1	6	Одномодовый
Г	0,09	28,8	0,005	1	3	Одномодовый

Таблица 2.1. Параметры изготовленных световодов.



Рисунок 2.17. Фотографии торцов световодов (Таблица 2.1), полученные на электронном микроскопе.



Рисунок 2.18. Фотография торца световода (рисунок 2.17б) с сердцевиной, образованной семью отсутствующими элементами оболочки, при соосном (слева) и несоосном (справа) положении торцов исследуемого и подводящего световодов. Длина волны излучения 1000 нм.

Световод «а»

Световод, торец которого представлен на рисунке 2.17а, имел следующие параметры: разница показателей преломления элемента оболочки и кварцевого стекла $\Delta n=0,0185$, отношение диаметра элемента оболочки к расстоянию между центрами соседних элементов $d/\Lambda=0,24$, расстояние между центрами соседних элементов $\Lambda=11,5$ мкм. Сердцевина световода образована отсутствием семи элементов оболочки, расстояние между центрами элементов, находящихся в углах шестиугольника, – 45,9 мкм. Оболочка состоит из шести слоев, последний слой деформирован. Диаметр оболочки из кварцевого стекла – 180 мкм.

В световоде «а» было проведено исследование оптических потерь в пределах фундаментальной запрещенной зоны. Спектр оптических потерь, измеренный методом обрыва при длине световода 100 м, представлен на рисунке 2.19. Измерения проводились при намотке световода на катушку диаметром 32 см. Оптические потери, измеренные таким образом на длине волны 1550 нм, совпадали с измерениями, полученными с помощью оптического рефлектометра. Минимальная величина оптических потерь наблюдалась в области 1550–1700 нм и составляла 25–30 дБ/км. Область высоких потерь в районе 1400 нм связана с поглощением гидроксильными группами. Область пропускания в пределах фундаментальной запрещенной зоны по уровню 100 дБ составила 1250–1950 нм.

Для исследования влияния изгиба световода на оптические потери проводилось измерение спектра оптических потерь исследуемого световода, намотанного с диаметром 12 см. Результаты измерений представлены на рисунке 2.20. Как видно, минимальные значения оптических потерь световода «а», намотанного с диаметром 12 и 32 см, практически совпадают, однако при намотке с меньшим диаметром в спектре оптических потерь появляется ряд областей с более высокими оптическими потерями. Возрастание потерь на определенных длинах волн связано с резонансным взаимодействием мод сердцевины с модами оболочки при изгибе, более подробное объяснение этого явления дано в пункте 2.3.

Для исследования модового состава в световод с запрещенной зоной вводилось излучение волоконного источника суперконтинуума с помощью одномодового световода с диаметром поля моды 6 мкм, для чего торцы световодов располагались вплотную друг к другу. Модовый состав исследовался на коротковолновом краю зоны пропускания (980–1030 нм) и на длине волны 1050 нм. При этом исследовался свободно лежащий отрезок световода длиной 30–50 см, так, что диаметр изгиба световода превышал 30 см. В таблице 2.2 приведено распределение интенсивности на выходном торце световода при соосном и несоосном положении торцов на различных длинах волн.



Рисунок 2.19. Спектр оптических потерь в световоде «а».



Рисунок 2.20. Спектр оптических потерь световода «а», намотанного с диаметром 12 и 32 см.

Таблица 2.2.

Распределение интенсивности моды на торце световода «а» при соосном и несоосном положении подводящего и исследуемого световодов.

	Соосное положение	Несоосное положение
	световодов	световодов
980—1030 нм		
1050 нм		



Рисунок 2.21. Распределение интенсивности моды на длине волны 1000 нм в световоде «а» и его аппроксимация функцией Гаусса.

В диапазоне длин волн 980–1030 нм, как при соосном, так и при смещенном положении торцов распределение поля моды выглядит одинаково и имеет максимум в центре, что свидетельствует об одномодовости исследуемого световода. На длинах волн свыше 1040 нм при смещении возбуждающего световода наблюдалось появление первой высшей моды. Распределение интенсивности моды на длине волны 1000 нм и его аппроксимация функцией Гаусса представлены на рисунке 2.21. Диаметр распределения поля моды по уровню $1/e^2$ составляет 36 мкм.

Для объяснения существования одномодового режима на коротковолновом краю зоны пропускания можно использовать зонную диаграмму на рисунке 2.16. Хотя параметры световодов несколько различаются, дисперсионная диаграмма мод сердцевины и оболочки световода «а» аналогична дисперсионной диаграмме, представленной на рисунке 2.16. Из рисунка 2.16 видно, что на коротковолновом краю фундаментальной запрещенной зоны дисперсионная зависимость первой высшей моды сердцевины расположена ближе к нижней границе запрещенной зоны, чем дисперсионная зависимость нулевой моды сердцевины. Поэтому первая высшая мода сердцевины испытывает большие оптические потери, связанные, в том числе, и с изгибом световода, чем нулевая мода сердцевины. Поэтому, поскольку в процессе измерений исследуемый световод свободно располагался с некоторым изгибом, на запрещенной наблюдался коротковолновом краю зоны одномодовый режим распространения.

Следует также отметить, что диаметр поля моды значительно изменяется в пределах запрещенной зоны: на границах запрещенной зоны диаметр поля моды сердцевины существенно больше, чем в центре [65]. Поэтому измеренная величина диаметра поля фундаментальной моды сердцевины – 36 мкм – соответствует границе запрещенной зоны, в центре запрещенной зоны она составляет существенно меньшую величину. Однако на краю запрещенной зоны возрастают также и оптические потери в фундаментальной моде сердцевины. Оценки оптических потерь показали, что они составляют порядка 9 дБ/м на длине волны 960 нм и 3 дБ/м на длине волны 1040 нм.

Исследования модового состава в окрестности длины волны 1550 нм показало, что световод является многомодовым.

Световод «г»

Увеличение диаметра поля моды сердцевины световода за счет образования сердцевины отсутствием не одного, а нескольких элементов оболочки приводит к многомодовости. Другой способ увеличения диаметра поля моды состоит в увеличении расстояния между соседними элементами оболочки при сердцевине, образованной одним пропущенным элементом оболочки.
В работе изготовлен световод с расстоянием между центрами элементов оболочки 28,8 мкм и сердцевиной, сформированной отсутствием одного элемента периодической оболочки (световод «г»). Остальные параметры были выбраны таким образом, чтобы центр фундаментальной запрещенной зоны приходился на длину волны 1000 нм, и составили $d/\Lambda=0,09$, $\Delta n=0,005$. Количество слоев оболочки было выбрано равным трем, основываясь на том, что в реальном лазере с накачкой по оболочке диаметр оболочки накачки должен иметь сравнительно небольшую величину – 200-300 мкм. При трех слоях фотонно-кристаллической оболочки диаметр световода (диаметр оболочки накачки) составил 200 мкм.

Зонная диаграмма световода «г» представлена на рисунке 2.22. Числовая апертура, соответствующая середине запрещенной зоны, составляет 0,025, при этом разница показателей преломления сердцевины и оболочки равна 0,0002. Точки пересечения дисперсионной зависимости моды сердцевины с краями запрещенной зоны соответствуют длинам волн 400–1300 нм. В области 400–700 нм дисперсионная зависимость моды сердцевины расположена достаточно близко к краю запрещенной зоны.

Излучение на длине волны 1050 нм, выходящее из торца световода, наблюдалось с помощью ИК-камеры при длине световода 10 см (рисунок 2.23 слева). Устойчивая локализация моды наблюдалась в диапазоне 800–1200 нм, при этом длинноволновый диапазон измерений был ограничен рабочим диапазоном камеры. При различных условиях возбуждения световода от внешнего источника на выходном торце световода наблюдалось гауссово распределение интенсивности, это свидетельствует о том, что световод является одномодовым. Измеренный диаметр поля моды составил 35 мкм на длине волны 1050 нм.

Спектр оптических потерь световода «г», измеренный методом обрыва, представлен на рисунке 2.23 справа. Чтобы избежать влияния изгибов, к обоим торцам исследуемого отрезка световода длиной 2 м с помощью сварки были присоединены отрезки световода, локализующего излучение за счет полного внутреннего отражения, с диаметром поля моды 6 мкм, одномодового в исследуемом спектральном диапазоне. Затем исследуемый световода был выпрямлен, а крепление производилось за присоединенные отрезки световодов. К выходному торцу отрезка исследуемого световода при измерении опорного сигнала также присоединялся отрезок световода, локализующего излучение за счет полного внутреннего отражения. Минимальная величина измеренных оптических потерь составила около 6 дБ/м (рисунок 2.23 справа). Таким образом, увеличение диаметра сердцевины за счет увеличения расстояния между соседними элементами периодической оболочки привело к значительному повышению уровня оптических потерь.



Рисунок 2.22. Зонная диаграмма световода «г» (Таблица 2.1). n_{eff}=β/k, β – постоянная распространения моды, n(SiO₂) – показатель преломления кварцевого стекла.



Рисунок 2.23. Слева – распределение интенсивности излучения на торце световода «г». Справа – спектр оптических потерь световода «г».

Итак, в световоде, локализующем излучение за счет образования фотонной запрещенной зоны, с сердцевиной из стекла, с расстоянием между центрами соседних элементов 28,8 мкм, диаметром элемента оболочки 2,6 мкм, разностью показателей преломления в оболочке 0,005, оптические потери моды сердцевины составляют неприемлемо высокую величину – несколько дБ/м. Причина высоких волноводных потерь состоит в том, что излучение на краях распределения поля моды проникает за пределы фотонно-кристаллической оболочки, за счет чего происходит туннелирование излучения во внешнюю среду. Однако в реальных волоконных лазерах используется накачка через оболочку, для чего (в дополнение к описанной структуре) световод покрыт отражающим полимерным покрытием или отражающей оболочкой, состоящей из воздушных отверстий. Наличие второй отражающей оболочки предотвращает вытекание моды сердцевины во внешнюю среду, находящуюся за пределами фотоннокристаллической оболочки, и, следовательно, значительно снижает волноводные оптические потери моды сердцевины. Поэтому, даже если исследованная структура световода обладает неприемлемо высокими оптическими потерями, она может быть вполне работоспособной в структуре со второй отражающей оболочкой.

В работе было проведено сравнение результатов численного моделирования волноводных параметров световодов с фотонной запрещенной зоной и световодов с дырчатой оболочкой с большим расстоянием между центрами соседних отверстий и сердцевиной, образованной отсутствием одного элемента оболочки (Large-Pitch Photonic Crystal Fiber) [143, 144]. Как отмечалось во Введении, данный вид световодов успешно используется для получения импульсного излучения с высокой выходной мощностью и энергией, в частности, с использованием такого типа световодов были получены рекордная энергия [41] и рекордная пиковая мощность [42] импульсных волоконных систем. Для проведения сравнения была выбрана конструкция световода с отверстиями в оболочке и большим расстоянием между центрами отверстий, исследованная в [145, 144] численно и экспериментально. Данный световод имел следующие параметры: расстояние между центрами соседних отверстий 30 мкм, отношение диаметра отверстия к расстоянию между центрами соседних отверстий 0,3, два слоя оболочки, сердцевина сформирована одним пропущенным элементом оболочки. Диаметр поля моды на длине волны 1030 нм составил около 40 мкм. Расчет оптических потерь проводился с помощью пакета программ «Cudos MOF» и «Comsol Multiphysics», данные, полученные обоими методами, совпадали по порядку величины. При отсутствии второй отражающей оболочки на длине волны 1030 нм были получены оптические потери для фундаментальной моды сердцевины на уровне 1 дБ/м. Значительная часть излучения полученных при расчете более высоких мод распределена в оболочке, а их оптические

75

потери составляли более 100–200 дБ/м. Полученные значения согласуются с результатами работы [145].

Выбранная для проведения сравнения конструкция световода с фотонной запрещенной зоной имела следующие параметры: разница показателей преломления в оболочке 0,015, расстояние между центрами соседних элементов периодической оболочки 30 мкм, отношение диаметра элемента к расстоянию между центрами соседних элементов 0,058, два слоя оболочки, сердцевина сформирована одним пропущенным элементом оболочки. Диаметр поля моды сердцевины на длине волны 1030 нм составлял 44 мкм. Значение рассчитанных оптических потерь фундаментальной моды сердцевины, так же как и в случае световода с отверстиями, составило около 1 дБ/м, оптические потери в более высоких модах, большая часть интенсивности которых распределена в оболочке световода, превышали 100 дБ/м.

Проведенный расчет и сравнение показали, что оба вида световодов с близкими диаметрами поля фундаментальной моды при одинаковом количестве слоев оболочки и отсутствии второй отражающей оболочки имеют схожие оптические потери мод сердцевины. Несмотря на достаточно высокие оптические потери в случае отсутствия второй отражающей оболочки, с использованием световодов с отверстиями в оболочке и большим расстоянием между центрами соседних отверстий (Large-Pitch Photonic Crystal Fiber) в настоящее время получены рекордные значения энергии и пиковой мощности импульсных волоконных систем. Это дает основание ожидать, что, несмотря на полученное высокое значение оптических потерь, световоды с фотонной запрещенной зоной также могут быть успешно использованы в качестве активной среды волоконных лазеров и усилителей.

2.7 Световод, локализующий излучение за счет фотонной запрещенной зоны, с сердцевиной из кварцевого стекла, легированного ионами иттербия 2.7.1 Изготовление световода

Одномодовость световодов с фотонной запрещенной зоной в широком спектральном диапазоне делает их перспективными для использования в качестве активной среды волоконных лазеров и усилителей. Для создания активного световода необходимо легировать сердцевину редкоземельными элементами. Для сохранения волноводных характеристик световода с фотонной запрещенной зоной усредненный показатель преломления легированного материала сердцевины должен быть примерно равен показателю преломления нелегированного кварцевого стекла. При этом для получения высокого качества пучка волоконного лазера или усилителя материал сердцевины должен иметь достаточно однородное распределение показателя преломления по сечению световода. Однако, как правило, распределение показателя преломления по диаметру сердцевины заготовки, полученной методом осаждения из газовой фазы, имеет крупные неоднородности показателя преломления, которые вызваны вариациями концентрации легирующих добавок в кварцевом стекле, возникающими при послойном нанесении легированного стекла и в процессе консолидации заготовки. На рисунке 2.24 приведен пример профиля показателя преломления заготовки, полученной методом осаждения кварцевого стекла из газовой фазы. Поэтому для изготовления материала (в виде стержня) для сердцевины заготовки активного волоконного световода с фотонной запрещенной зоной была использована методика, которая позволяет повышать оптическую однородность стекла сердцевины по сравнению с сердцевинами заготовок, полученными в процессе осаждения кварцевого стекла из газовой фазы [146].

Схема процесса изготовления активного световода с фотонной запрещенной представлена на рисунке 2.24. Стадии 4 и 5 на рисунке 2.24 соответствуют процессу изготовления световода с нелегированной сердцевиной, описанному в пункте 2.2. Различие состояло в том, что при изготовлении активного световода в качестве материала для сердцевины сборочной заготовки был использован стержень из кварцевого стекла, легированного ионами иттербия. Процесс изготовления этого стержня соответствует стадиям 1–3 на рисунке 2.24.

Для изготовления стекла сердцевины было использовано несколько заготовок, изготовленных методом осаждения стекла из газовой фазы (MCVD), легированных ионами иттербия и солегированных оксидом алюминия и фтором. Солегирование фтором было необходимо для того, чтобы снизить средний показатель преломления стекла сердцевины до уровня кварцевого стекла.

Характерный профиль показателя преломления исходной заготовки приведен на рисунке 2.24. С нескольких заготовок с сердцевиной, легированной ионами иттербия, при помощи травления плавиковой кислотой была удалена бо́льшая часть нелегированной оболочки. Затем полученные стержни-сердцевины были перетянуты на стержни меньшего диаметра (1 мм). Из 30 отрезков таких стержней была сформирована сборка, которая затем была помещена в трубку из кварцевого стекла и, при помощи нагрева, консолидирована в монолитный стержень. Полученный стержень был перетянут на диаметр (около 1 мм), необходимый для создания сборочной заготовки световода с фотонной запрещенной зоной. В результате описанного процесса гомогенизации относительный размер оптических неоднородностей был уменьшен более чем в пять раз по сравнению с размером неоднородностей в исходных заготовках.



Сердцевина световода

Рисунок 2.24. Схема процесса изготовления световода с фотонной запрещенной зоной и легированной сердцевиной.



Рисунок 2.25. Фотографии поверхности легированного материала, полученные с помощью электронного микроскопа, после спекания (а), первой (б) и второй (в) стадий гомогенизации. Темные области – нелегированный оксид кремния.

2.7.2 Изготовление стекла для сердцевины методом спекания порошков оксидов

Следует отметить, что описанный метод получения стекла для сердцевины световода требует больших объемов легированного стекла. Однако диаметр сердцевин заготовок, получаемых методом осаждения кварцевого стекла из газовой фазы и легированных ионами иттербия, как правило, не превышает 1–2 мм. Поэтому для создания заготовки для сердцевины световода с большим диаметром поля моды требуется значительное число заготовок, полученных методом осаждения из газовой фазы.

Наличие метода, позволяющего изготавливать большие объемы легированного кварцевого стекла, позволило бы сократить затраты на создание сердцевины активного световода с увеличенным диаметром поля моды. В работе [147] предложен способ изготовления световодов, активированных редкоземельными ионами, путем спекания порошков оксидов кремния, алюминия и редкоземельного элемента в трубке из кварцевого стекла в процессе вытяжки световода. При этом, поскольку размер частиц порошков оксидов составляет сотни микрометров, не требуется предварительная стадия осветления стекла. Однако полученное этим методом стекло вследствие большого размера исходных частиц содержит значительные флуктуации показателя преломления и концентрации и требует дополнительной гомогенизации.

В рамках настоящей работы было проведено изучение возможности получения стекла сердцевины методом спекания порошков оксидов с большим размером частиц [124–129]. На первом этапе создания активного стекла проводилось спекание смеси порошков оксидов, например оксида кремния, алюминия и иттербия, внутри трубки из кварцевого стекла на стеклодувном станке. Размер частиц оксидов составлял от десятков до сотен микрометров, что позволяло спекать их практически без образования пузырей внутри трубки из кварцевого стекла при использовании пониженного давления (около 1 мбар) и нагрева до температуры около 2000°С. Для проведения гомогенизации стекла в настоящей работе был предложен метод, основанный на перетяжке стержня из полученного легированного стекла на стержни меньшего диаметра, последующей сборке и сплавлении полученных стержней [125]. Другими словами, гомогенизация стекла проводилась путем многократного перетягивания полученного стержня из легированного стекла (с удаленной с помощью травления в плавиковой кислоте оболочкой из нелегированного кварцевого стекла) на стержни меньшего диаметра и консолидации сборки из полученных стержней в трубке из кварцевого стекла. На рисунке 2.25 представлены фотографии стекла, полученные с помощью электронного микроскопа, непосредственно после спекания (рисунок 2.25а), а также после первой (2.25б) и второй (2.25в) стадий гомогенизации. В процессе каждой из стадий гомогенизации размер оптических неоднородностей уменьшался примерно в 10 раз.

Методом спекания порошков оксидов была изготовлена первичная заготовка. Содержание в шихте легирующих оксидов составило: Yb₂O₃ – 1,68 вес.% (0,256 мол.%), Al₂O₃ – 3,78 вес.% (2,268 мол.%). Среднее значение разности показателей преломления сердцевины и оболочки в заготовке составило 0,006–0,007. Для улучшения однородности стекла были проведены три цикла процесса гомогенизации структуры материала. После каждого цикла из легированного материала изготавливалась заготовка многомодового волоконного световода и вытягивался световод с диаметром сердцевины 30 мкм.

В световоде, полученном после первого цикла гомогенизации, величина минимальных оптических потерь в диапазоне 1100–1300 нм составляла 250 дБ/км, в световоде, полученном после двух циклов, – 130 дБ/км, после трех циклов – 100 дБ/км. Уменьшение оптических потерь с возрастанием числа циклов перетяжка-сборка связано с уменьшением рассеяния при повышении однородности стекла.

Из заготовки, полученной после трех стадий гомогенизации, был изготовлен одномодовый световод, покрытый отражающим полимерным покрытием. Диаметр сердцевины световода составил 9 мкм, диаметр оболочки – 100 мкм. Поглощение ионов иттербия по оболочке составило 0,8 дБ/м на длине волны 915 нм. Время жизни возбужденного состояния иона иттербия составило 810 мкс. Измерение эффективности лазерной генерации проводилось в схеме с накачкой через оболочку с торца световода, резонатором служили торцы световода, обеспечивающие 4%-ное отражение. При длине световода 16 м пороговая мощность накачки составила 150 мВт, а наклон эффективности генерации относительно поглощенной мощности был 65% – 70%.

Полученные с помощью описанной технологии объемы легированного кварцевого стекла могут быть использованы для создания стекла с показателем преломления, близким к показателю преломления нелегированного кварцевого стекла. Это может быть достигнуто путем сборки и последующей консолидации элементов (стержней) из полученного легированного стекла с элементами из фторированного кварцевого стекла с пониженным показателем преломления.

Следует отметить, что руководство проведением работ по созданию методики получения стекла путем спекания порошков оксидов осуществлялось Семеновым С.Л., основные работы по изготовлению стекла проводились Вельмискиным В.В. и Ериным Д.Ю. В данном исследовании автором настоящей работы проводился выбор параметров стекла и изготовленных из него волоконных световодов, а также проводилось исследование оптических и лазерных характеристик. Кроме того, в работе принимали участие Черноок С.Г., Сенаторов А.К., Исупов Д.С., Мишкин В.П., Нищев К.Н., которые внесли свой вклад в исследование характеристик полученных образцов.

2.7.3 Исследование оптических характеристик

Фотография торца световода, изготовленного по методике, описанной в п. 2.7.1, представлена на рисунке 2.26. Параметры световода практически совпадали с параметрами световода «в» Таблицы 2.1.: d/Λ=0,12; Λ =11,4 мкм; Δn=0,028. Диаметр оболочки из кварцевого стекла составлял 135 мкм. Диаметр легированной ионами иттербия части сердцевины составил 10 мкм.

Исследования модового состава сердцевины показало, что в диапазоне 850–1200 нм сердцевина световода является одномодовой. Измеренный диаметр поля моды на длине волны 1100 нм составил 18 мкм.

Спектры оптических потерь, измеренные в отрезках световода длиной 2 и 45 м, представлены на рисунке 2.27. Для предотвращения резкого возрастания оптических потерь, связанных с микроизгибами, волоконный световод был сложен в виде свободных витков диаметром 33 см без намотки на катушку. Спектральный диапазон измерений соответствует фундаментальной запрещенной зоне периодической оболочки световода. Спектральный диапазон пропускания световода по уровню 2000 дБ/км составил от 850 до 1400 нм (рисунок 2.27а). Данный диапазон лежит внутри спектрального диапазона существования моды сердцевины, полученного с помощью численного моделирования (рисунок 2.2) – 600–1800 нм. Резкое возрастание оптических потерь в окрестности 1000 нм связанно с поглощением излучения ионами иттербия.

Минимальные оптические потери приходились на спектральный диапазон 1100– 1200 нм и составляли 80 дБ/км. В световоде с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла и такими же параметрами структуры, описанном в п.п. 21.-2.4., уровень минимальных оптических потерь составлял 20 дБ/км. Повышение уровня оптических потерь в световоде с легированной сердцевиной может быть связано как с дополнительным рассеянием в стекле сердцевины из-за присутствия оптических неоднородностей, так и с увеличением волноводных и изгибных потерь за счет того, что показатель преломления легированной части сердцевины несколько ниже, чем показатель преломления нелегированного кварцевого стекла.



Рисунок 2.26. Фотография торца световода, активированного ионами иттербия, полученная с помощью электронного микроскопа. Светлые области, расположенные в гексагональном порядке, – элементы фотонно-кристаллической оболочки, легированные оксидом германия. На вставке – легированная ионами иттербия сердцевина световода.



Рисунок 2.27. Спектр оптических потерь, измеренный на 2- (а) и 45-метровом (б) отрезке световода.



Рисунок 2.28. Схема для исследования лазерной генерации.



Рисунок 2.29. Зависимость выходной мощности лазерной генерации от введенной мощности накачки, полученная в схеме на рисунке 2.28. Длина световода 47 м.



Рисунок 2.30. Распределение интенсивности излучения на торце исследуемого световода.

2.7.4 Исследование генерационных характеристик

Для создания световедущей оболочки, по которой может распространяться излучение накачки, на волоконный световод было нанесено отражающее полимерное покрытие (с показателем преломления ниже, чем у кварцевого стекла). Числовая апертура оболочки накачки составила 0,4. Для измерения величины поглощения активных ионов излучение от источника белого света вводилось с торца в оболочку накачки волоконного световода. Измеренные значения поглощения ионов иттербия составили 1,2 дБ/м на длине волны 980 нм и 0,3 дБ/м на 915 нм.

Исследование эффективности лазерной генерации проводилось в схеме, представленной на рисунке 2.28. В качестве источника накачки использовалась линейка многомодовых полупроводниковых лазерных диодов, излучающих на длине волны 910–915 нм. Резонатором лазера служили торец волоконного световода F1 и зеркало M2, вплотную пристыкованное к другому торцу световода. Для ввода излучения накачки в световод использовались линзы L1 и L2. Для защиты источника накачки от излучения волоконного лазера, а также для вывода излучения, между линзами помещалось диэлектрическое зеркало M1 с высоким коэффициентом отражения на длине волны генерации (1030–1060 нм) и прозрачное на длине волны накачки.

На рисунке 2.29 представлена зависимость выходной мощности лазерной генерации от введенной мощности накачки. Длина исследуемых световодов составляла 47 м. Непоглощенная мощность накачки составила около 3% от введенной мощности. Генерация наблюдалась на длинах волн в диапазоне 1074–1078 нм. Наклон эффективности генерации от введенной мощности накачки составил 51%, пороговая мощность накачки была 700 мВт.

В схеме на рисунке 2.28 исследовалось распределение интенсивности излучения, выходящего из торца исследуемого световода. Для этого на выходе лазера помещалась линза, с помощью которой изображение торца строилось на рабочую поверхность камеры. Распределение интенсивности выходящего излучения на торце волоконного световода представлено на рисунке 2.30. Полученное изображение состоит из центральной части и шести боковых частей, что соответствует основной моде сердцевины световода. Оценка качества пучка по двум точкам (в перетяжке и дальней зоне дифракции) показала, что значение фактора M² выходного лазерного пучка составляет порядка 1,3.

Следует также отметить, что несмотря на то, что диаметр поля моды в изготовленном световоде имел всего 18 мкм, разработанная технология имеет потенциал для создания световодов с бо́льшим диаметром сердцевины.

Полученный в настоящей работе световод с диаметром поля моды 18 мкм был использован для генерации [122, 123] фемтосекундных импульсов. В этих работах

создание импульсного лазера осуществлялось сотрудниками университета г. Руан, Франция.

Идея создания световода с большим полем моды на основе конструкции световода с фотонной запрещенной зоной получила продолжение в работах других авторов [148, 149, 150, 151, 152, 153]. В этих работах авторами сделан акцент на исследование световодов с сердцевиной, образованной семью отсутствующими элементами оболочки. Несмотря на то что такие световоды являются многомодовыми, показано, что при определенном диаметре изгиба может быть получен режим, при котором высшие моды имеют высокие потери, а фундаментальная мода сердцевины имеет приемлемый уровень оптических потерь. В работах [148, 149, 151] исследовались световоды, центр фундаментальной запрещенной зоны которых приходится на длину волны в окрестности 1000 нм, в работах [150, 152, 153] исследовались световоды, локализующие излучение на длине волны 1000 нм в третьей запрещенной зоне. Уровни оптических потерь, полученные в световоде «а» [119] и в работе [149], в которой изготовлен световод с аналогичными параметрами, совпадают. В работе [152] экспериментально продемонстрирован световод с фотонной запрещенной зоной и сердцевиной из стекла, активированного ионами иттербия, и с диаметром поля моды около 40 мкм.

Выводы к главе 2

1. Впервые изготовлена серия световодов с сердцевиной из стекла, локализующих излучение за счет образования фотонной запрещенной зоны, с малым отношением диаметра элемента фотонно-кристаллической оболочки к расстоянию между центрами элементов (менее 0,3). Для этого разработана методика изготовления таких световодов методом сборки и перетяжки.

2. Экспериментально исследована серия изготовленных образцов световодов. В световоде с отношением диаметра элемента оболочки к расстоянию между центрами соседних элементов 0,12, расстоянием между центрами соседних элементов 11,4 мкм и сердцевиной, сформированной отсутствием одного элемента оболочки, измеренный спектральный диапазон локализации моды сердцевины по уровню 100 дБ/км в фундаментальной запрещенной зоне составил от 950 до 1300 нм, минимальные оптические потери равнялись 20 дБ/км. В световоде с отношением диаметра элемента оболочки к расстоянию между центрами соседних элементов 0,24, расстоянием между центрами соседних элементов 0,24, расстоянием между центрами соседних элементов 11,5 мкм и сердцевиной, сформированной отсутствием семи элементов оболочки, экспериментально измеренный спектральный диапазон локализации моды сердцевиной запрещенной зоне составил от 1250 до 1950 нм, минимальные оптические потери были 25–30 дБ/км.

3. C помощью численного моделирования исследован модовый состав сердцевины световодов, локализующих излучение за счет образования фотонной запрещенной зоны. Исследовались световоды с малым, менее 0,4, отношением диаметра элемента оболочки к расстоянию между центрами соседних элементов. Проведенные теоретические исследования показывают, что снижение разности эффективного показателя преломления оболочки и показателя преломления сердцевины с уменьшением длины волны приводит к тому, что в случае, если сердцевина образована одним отсутствующим элементом оболочки, только одна (дважды вырожденная) мода сердцевины существует в фундаментальной запрещенной зоне. При формировании сердцевины семью отсутствующими элементами оболочки световод становится многомодовым.

4. Экспериментальная реализация ряда образцов с сердцевиной, образованной одним и семью отсутствующими элементами оболочки, подтверждает, что световод с сердцевиной, образованной одним отсутствующим элементом оболочки, является одномодовым, а семью – многомодовым. Диаметр поля моды в световоде с отношением диаметра элемента оболочки к расстоянию между центрами соседних элементов 0,12, расстоянием между центрами соседних элементов 11,4 мкм и сердцевиной, сформированной отсутствием одного элемента оболочки, на длине волны 1000 нм составил 18 мкм.

5. Предложено использовать конструкцию световода с фотонной запрещенной зоной и сердцевиной из стекла с малым отношением диаметра элемента оболочки к расстоянию между центрами соседних элементов для создания активных световодов, одномодовых или близких к одномодовым, с увеличенным диаметром поля моды для волоконных лазеров и усилителей. Данное предложение основано на возможности получить одномодовый режим распространения в широком спектральном диапазоне, что эквивалентно одномодовости при увеличении размера геометрической структуры световода, в том числе и диаметра сердцевины. Кроме того, малое отношение диаметра оболочки к расстоянию между соседними элементами позволяет минимизировать нежелательную локализацию излучения накачки элементами оболочки при накачке световода с торца.

6. В световодах с сердцевиной, сформированной одним отсутствующим элементом оболочки, увеличение диаметра поля моды за счет увеличения расстояния между элементами фотонно-кристаллической оболочки позволяет сохранить одномодовость, однако приводит к росту оптических потерь. Так, в изготовленном световоде, локализующем излучение в фундаментальной запрещенной зоне в окрестности длины волны 1100 нм, с расстоянием между центрами соседних элементов 28,8 мкм, с тремя слоями оболочки и с диаметром поля фундаментальной моды 35 мкм,

86

оптические потери составляют неприемлемо высокую величину 6 дБ/м. Однако сравнение результатов численного моделирования конструкции световода с фотонной запрещенной зоной и конструкции световода с дырчатой микроструктурированной оболочкой, которая в настоящее время успешно используется для получения рекордных характеристик импульсных лазеров, показало, что световоды обеих конструкций с близким значением диаметра поля моды обладают схожими оптическими потерями мод сердцевины. Это дает основание ожидать, что, несмотря на полученное высокое значение оптических потерь, световоды с фотонной запрещенной зоной также могут быть успешно использованы в качестве активной среды волоконных лазеров и усилителей при наличии второй отражающей оболочки.

7. Изготовлен световод, локализующий излучение за счет фотонной запрещенной зоны с сердцевиной, легированной ионами иттербия, одномодовый, с диаметром поля моды 18 мкм. Для повышения однородности стекла при изготовлении заготовки стекла сердцевины был использован метод сборки и перетяжки. В изготовленном световоде была получена лазерная генерация с эффективностью 51% и высокое качество пучка. Разработанная технология имеет потенциал для создания световодов, активированных редкоземельными ионами, с бо́льшим диаметром сердцевины, одномодовых или близких к одномодовым.

КОМПОЗИТНЫЕ СВЕТОВОДЫ С СЕРДЦЕВИНОЙ, ИЗГОТОВЛЕННОЙ ИЗ ФОСФАТНОГО СТЕКЛА, И ОБОЛОЧКОЙ ИЗ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА

По материалам работ: 154**, 155**, 156**, 157**, 158*, 159*, 160*, 161*, 162*, 163*, 164*.

Как отмечалось в обзоре литературных данных, в работе [86] было предложено объединить преимущества фосфатного и кварцевого стекла путем изготовления композитного световода с сердцевиной, изготовленной из фосфатного стекла, легированного неодимом, и оболочкой 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 [87]. Однако в данной работе отсутствовали систематические исследования свойств световода, а, кроме того, полученная 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 сердцевиной, изготовленной из фосфатного стекла, и оболочкой из кварцевого стекла с точки зрения различных аспектов.

Следует отметить, что в процессе изготовления композитных световодов методом «стержень в трубке» в процессе вытяжки световода происходит взаимная диффузия фосфатного и кварцевого стекол. Поэтому, несмотря на то что в качестве исходного материала для изготовления сердцевины используется фосфатное стекло, за счет взаимной диффузии в сердцевине световода стекло становится фосфоросиликатным с содержанием оксида фосфора порядка 30 мол.%. Однако такая концентрация оксида фосфора недостижима с помощью методов осаждения кварцевого стекла из газовой фазы и открывает новые перспективы увеличения концентрации редкоземельных ионов, а также, возможно, получения новых уникальных свойств активных волоконных световодов, таких как устойчивость к фотопотемнению ионов иттербия, увеличение допустимой концентрации ионов эрбия, при которой отсутствует нежелательный импульсный режим [165] или снижение вероятности появления генерации в окрестности длины волны 1000 нм в системе эрбий-иттербий [166].

Следует также отметить, что изготовление методом осаждения стекла из газовой фазы световодов, солегированных иттербием и эрбием, где требуется именно наличие

фосфоросиликатной матрицы [167], является довольно трудоемкой задачей. В частности, она требует сложного оборудования и глубокого понимания технологического процесса [168]. Изготовление световодов методом «стержень в трубке» с использованием фосфатного стекла с технологической точки зрения намного проще. Кроме того, данная технология не приводит к образованию области в центре сердцевины световода, обедненной оксидом фосфора, которая образуется в заготовках, изготовленных методом осаждения стекла, из-за испарения оксида фосфора в процессе консолидации заготовки.

В настоящей главе представлены результаты исследований композитных световодов с сердцевиной, изготовленной из фосфатного стекла, легированного активными редкоземельными ионами, и оболочкой из кварцевого стекла. Показана возможность изготовления таких световодов с приемлемыми оптическими характеристиками, и исследованы образцы с сердцевиной, легированной ионами эрбия и иттербия, а также только иттербия. Полученные результаты демонстрируют потенциал такого типа световодов для создания волоконных лазеров и усилителей.

Работа проводилась совместно с сотрудниками лаборатории концентрированных лазерных материалов ИОФ РАН Галаганом Б.И., Сверчковым С.Е. и Денкером Б.И. Сотрудниками лаборатории было инициировано начало работ в данном направлении, а также осуществлялся выбор материалов для создания композитных световодов и синтез различных составов фосфатных стекол. Кроме того, в работе принимали участие: на стадии создания световодов - Вельмискин В.В., на стадии измерения характеристик полученных световодов - Астапович М.С., Охримчук А.Г., Яценко Ю.П. Медведковым О.И. были изготовлены волоконные брэгговские решетки для проведения лазерных экспериментов. Соавторами некоторых работ по теме диссертации – Камыниным В.А., Садовниковой Я.Е., Курковым А.С. – были проведены лазерные эксперименты с использованием композитного световода, легированного эрбием и иттербием, с накачкой по сердцевине. Проведенные ими эксперименты не входят в материал настоящей диссертационной работы.

3.1 Изготовление композитных световодов с использованием различных составов фосфатного стекла

3.1.1 Фосфатное стекло

На первом этапе работы была изучена возможность изготовления композитных световодов из различных составов фосфатных стекол. Изготовление световодов проводилось с использованием следующих составов:

1. Состав, содержащий алюминий и бор [169, 170]:

15.3LiF - 7.7Al₂O₃ - 6.1 RE₂O₃ - 13.4B₂O₃ - 57.5P₂O₅

Данное стекло обладало повышенной механической прочностью и высокой устойчивостью к воздействию атмосферной влаги. Также стекло этого состава обладало существенно меньшим коэффициентом термического расширения по сравнению с другими составами фосфатных стекол – $7,2x10^{-6}$ K⁻¹. Однако его коэффициент термического расширения примерно на порядок превышает коэффициент термического расширения кварцевого стекла ~ $3x10^{-7}$ K⁻¹. Варка стекла производилась с помощью платинового тигля в индукционной печи. Важнейшим требованием являлась глубокая дегидратация стекла из-за сильной гигроскопичности оксида фосфора. Поэтому варка происходила в герметично закрытой печи в сухой атмосфере в течение 10–20 часов. Температура варки составляла 1350°С.

2. Состав, содержащий литий [170, 171]:

25Li₂O - 10RE₂O₃ - 65P₂O₅

3. Состав с высоким содержанием редкоземельных ионов:

 $10Na_2O - 5CaO - 5BaO - 20RE_2O_3 - 10B_2O_3 - 60P_2O_5$

3.1.2 Изготовление световодов

Заготовки световодов изготавливались методом «стержень в трубке». Для этого из объема фосфатного стекла с помощью полого алмазного сверла высверливались стержни диаметром около 4 мм и длиной 40-50 мм. Затем с помощью травления в ортофосфорной кислоте с поверхности стержней удалялись загрязнения, внесенные при сверлении. Полученные стержни вставлялись в трубку из кварцевого стекла, затем полученная сборочная заготовка консолидировалась на печи вытяжки и перетягивалась на стержни диаметром около 1-2 мм. В полученных стержнях диаметр сердцевины составлял около 0,5–1 мм. Дополнительная трубка из кварцевого стекла нахлопывалась на полученный стержень для того, чтобы получить необходимое отношение диаметра сердцевины и оболочки. Для состава стекла №1 эту операцию удавалось осуществить на стеклодувном станке, оснащенном пропан-кислородной горелкой. Для других составов при попытке произвести нахлопку дополнительной жакетирующей трубки с помощью горелки происходило растрескивание стекла сердцевины. Это связано с большим значением коэффициента термического расширения стекол составов №2 и №3 по сравнению с составом №1. Жакетирование заготовок, сердцевины которых состояли из составов фосфатного стекла №2 и №3, удавалось проводить на печи установки для вытяжки световодов. Это, по-видимому, связано с тем, что печь обеспечивала меньшее значение градиента температуры по длине заготовки. Полученная после жакетирования дополнительной трубки заготовка имела внешний диаметр около 8–12 мм, при диаметре сердцевины 0,5-1 мм. После охлаждения до комнатной температуры заготовки не

растрескивались, несмотря на существенное различие коэффициентов термического расширения сердцевины и оболочки.

Затем заготовка перетягивалась в световод при температуре 2000°С. Все операции выполнялись при тех же температурных режимах и на том же оборудовании, которое обычно используется для изготовления световодов из кварцевого стекла.

На рисунке 3.1 представлены фотографии торцов световодов в области сердцевины, полученных из стекла № 2 и стекла № 3. Как видно, для этих стекол произошла значительная ликвация стекла. Анализ, проведенный методом рентгеноспектрального с помощью сканирующего микроанализа электронного микроскопа JSM-5910 LV (JEOL) и рентгеновского спектрометра INCA (Oxford Instruments), показал, что более светлые участки на рисунке 3.1 соответствуют областям с более высоким содержанием оксида фосфора, более темные – оксида кремния. Из-за неоднородного состава стекла в области сердцевины локализация излучения в световодах, изготовленных из стекол составов № 2 и 3, не наблюдалась.

Фотография торца световода, полученного из стекла состава №1, представлена на рисунке 3.2. Как видно, в отличие от составов № 2 и № 3, сердцевина сохранила круглую форму при вытяжке световода и ликвации стекла сердцевины не произошло. Во всех световодах, изготовленных из стекла состава № 1, наблюдалась локализация излучения в сердцевине.

С помощью анализатора профиля заготовок фирмы "Photon Kinetics" было проведено измерение профиля показателя преломления заготовок, изготовленных из стекла состава №1, после стадии жакетирования дополнительной трубы из кварцевого стекла. Пример профиля показателя преломления приведен на рисунке 3.3. Во всех исследованных заготовках разность показателей преломления сердцевины и оболочки из кварцевого стекла составляла примерно 0,05–0,055.

В объемных образцах стекла состава № 1 и кварцевого стекла марки Heraeus F300, из которого изготавливалась оболочка, был измерен показатель преломления на длине волны 589 нм с помощью рефрактометра. Измеренные значения составили 1,458 – для кварцевого стекла (марки Heraeus F300), и 1,5365 – для фосфатного стекла. Полученная разница показателей преломления 0,079 превышает разницу показателей преломления сердцевины и оболочки в заготовке. Это может быть связано как с растягивающими напряжениями, возникающими в стекле сердцевины при остывании заготовки до комнатной температуры вследствие различия коэффициентов термического расширения стекла сердцевины и оболочки, так и с ошибками измерений профиля показателя преломления.



Рисунок 3.1. Полученные с помощью электронного микроскопа фотографии торцов световодов в области сердцевины, изготовленных из фосфатного стекла «а» – состава №2, «б» – состава № 3.



Рисунок 3.2. Полученная с помощью электронного микроскопа фотография торца световода, изготовленного из фосфатного стекла состава №1.



Координата в поперечном сечении заготовки, мм

Рисунок 3.3. Профиль показателя преломления заготовки, изготовленной из стекла состава № 1.

3.2 Световод с сердцевиной, легированной эрбием и иттербием 3.2.1 Параметры световода

Световод, легированный эрбием и иттербием, был изготовлен с использованием фосфатного стекла состава № 1. Концентрация ионов иттербия в исходном стекле составляла 1,7х10²¹ см⁻³ и ионов эрбия – 1,3х10²⁰ см⁻³. Фотография торца световода представлена на рисунке 3.4. Световод содержит сердцевину, легированную эрбием и иттербием, внутреннюю оболочку из кварцевого стекла и внешнее полимерное покрытие (не показано на рисунке 3.4) с показателем преломления ниже, чем у кварцевого стекла. Полимерная оболочка с более низким показателем преломления позволяет использовать накачку через оболочку от многомодового источника. Для максимального поглощения накачки внутренняя оболочка имела достижения квадратную форму поперечного сечения. Это было достигнуто при помощи механической обработки заготовки перед вытяжкой световода. Оболочка световода имела размер 100x100 мкм, диаметр сердцевины составлял 13,5 мкм.

На рисунке 3.5 приведены распределения концентрации атомов фосфора и кремния в поперечном сечении световода, полученные методом рентгеноспектрального микроанализа с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-5910 LV (JEOL) и рентгеновского спектрометра INCA (Oxford Instruments). Из рисунка 3.5 видно, что в сердцевине световода произошла взаимная диффузия фосфатного и кварцевых стекол. В результате взаимной диффузии произошло снижение концентрации оксида фосфора от 65 мол.% в исходном стекле до 30 мол.% в световоде. О взаимной диффузии двух стекол также свидетельствует и возрастание отношения диаметра сердцевины к размеру оболочки в световоде по сравнению с этим отношением в заготовке световода.

Однако несмотря на то, что произошло значительное снижение концентрации оксида фосфора в сердцевине, данная величина все еще намного больше, чем возможно получить методами осаждения легированного кварцевого стекла из газовой фазы.

Для исследования числовой апертуры сердцевины и оптических потерь часть заготовки была вытянута в световод, покрытый выводящим полимерным покрытием с коэффициентом преломления, большим, чем у кварцевого стекла. Диаметр сердцевины в полученном световоде также составил величину около 13 мкм. Числовая апертура сердцевины измерялась на длине волны 633 нм с помощью излучения гелий-неонового лазера. Для измерения числовой апертуры сердцевины световода ось световода располагалась под углом к оси пучка. Измерения проводились на длине световода порядка 1 м. Измеренное значение числовой апертуры составило 0,32. Разница показателей преломления сердцевины и оболочки, рассчитанная исходя из измерения числовой апертуры, составляет 0,035.



Рисунок 3.4. Фотография торца световода с сердцевиной, легированной эрбием и иттербием, полученная с помощью электронного микроскопа.



Рисунок 3.5. Распределение концентрации атомов фосфора и кремния по сечению сердцевины композитного световода.

Полученная разница показателей преломления 0,035 значительно меньше разницы показателей преломления фосфатного и кварцевого стекла – 0,079, что является результатом взаимной диффузии двух стекол в процессе вытяжки композитного световода.

При диаметре 13,5 мкм и разности показателей преломления сердцевины и оболочки 0,035 сердцевина световода является многомодовой. Однако с точки зрения создания лазеров и усилителей в большинстве случаев желательно, чтобы активный световод являлся одномодовым. Одним из путей создания одномодового световода на длине волны 1550 нм является уменьшение диаметра сердцевины до величины порядка 3 мкм. Другим вариантом является использование в качестве стекла оболочки легированного, например оксидом германия, кварцевого стекла. Это позволит сократить разницу показателей преломления стекла сердцевины и оболочки. Легированное кварцевое стекло может быть изготовлено, например, методом осаждения из газовой фазы.

Спектр оптических потерь был измерен методом обрыва в световоде, покрытом выводящим полимерным покрытием (рисунок 3.6). Минимальные оптические потери 2 дБ/м наблюдались в области 1200–1300 нм, где отсутствует поглощение ионов эрбия и иттербия. Полученный уровень оптических потерь достаточен для получения высокой эффективности генерации, поскольку за счет высокой концентрации редкоземельных ионов требуемая длина световода достаточно мала.

Спектры поглощения ионов эрбия и иттербия в композитном световоде показаны на рисунке 3.7. Спектры получены с помощью спектроанализатора Ando AQ 6317B. Величина поглощения в режиме слабого сигнала, измеренная при прохождении излучения по внутренней оболочке, составила 0,6 дБ/см на длине волны 976 нм и 0,15 дБ/см на длине волны 914 нм (рисунок 3.7а).

Измеренное поглощение ионов эрбия по сердцевине на длине волны 1535 нм составило 1,5 дБ/см (рисунок 3.76). Спектр люминесценции ионов эрбия в световоде и в исходном стекле представлен на рисунке 3.8. Время жизни возбужденного состояния ионов эрбия, измеренное и в исходном стекле, составило 7,6 мс, в световоде – 7,8–7,9 мс.



Рисунок 3.6. Спектр оптических потерь в световоде, легированном эрбием и иттербием.



Рисунок 3.7. Спектры поглощения ионов а – иттербия, измеренные при прохождении излучения по внутренней оболочке, и б – эрбия, измеренные при прохождении излучения по сердцевине.



Рисунок 3.8. Спектр люминесценции ионов эрбия в исходном стекле (сплошная линия) и в световоде (пунктирная линия).

Изготовленный световод являлся достаточно механически прочным. Механическая прочность световода на разрыв измерялась с помощью специального оборудования Instron 6022. Измеренные значения механической прочности находились в диапазоне 5–7 ГПа. Эти значения соответствуют прочности на разрыв световодов из кварцевого стекла.

Полученный световод удавалось соединять со световодом, целиком состоящим из кварцевого стекла, с помощью процесса сварки. Оптические потери на соединениях исследуемого световода со стандартным световодом SMF-28, измеренные при вводе излучения в стандартный световод, в спектральном диапазоне 1200–1300 нм составляли величину порядка 1 дБ.

3.2.2 Лазерная генерация в световоде, легированном эрбием и иттербием

Исследование лазерных характеристик световода, легированного эрбием и иттербием, проводилось в схеме, представленной на рисунке 3.9. Резонатор был сформирован торцами световода, каждый из которых обеспечивал 4%-ное отражение. Для накачки использовалась линейка многомодовых полупроводниковых лазерных диодов. Ширина спектра излучения линейки лазеров на полувысоте составляла 4 нм. Изза отсутствия температурной стабилизации при возрастании мощности накачки центральная длина волны спектра излучения линейки лазерных диодов смещалась в длинноволновую сторону в пределах от 964 до 969 нм. Величина поглощения ионов иттербия в спектральном диапазоне 762–971 нм практически одинакова (рисунок 3.7а). Поэтому сдвиг длины волны спектра излучения лазерных диодов не приводил к существенному изменению величины поглощения накачки. При этом спектр излучения диодов накачки не совпадал с максимум поглощения ионов иттербия, поглощение накачки было в четыре раза ниже, чем максимальное поглощение ионов иттербия в этом световода с максимальное поглощение ионов иттербия в этом световоде (рисунок 3.7а), и составляло 0,13 дБ/см.

Излучение накачки вводилось во внутреннюю оболочку световода с помощью линзы. Для разделения накачки и сигнала на входе и на выходе использовались диэлектрические зеркала. Выходная мощность лазерной генерации измерялась с обеих сторон и суммировалась. Также измерялась мощность непоглощенной накачки. При этом учитывались оптические потери на линзах и зеркалах, измеренные отдельно с помощью источников на длинах волн накачки и генерации. Значение выходной мощности с учетом оптических потерь с каждой из сторон совпадали. Введенная мощность накачки и змерялась при укорачивании длины отрезка световода до 2 см. Поглощение накачки и величина отражения от выходного торца учитывались при измерении величины введенной мощности накачки.

На рисунке 3.10 и 3.11 представлены зависимости выходной мощности лазера от введенной и поглощенной мощности накачки при различных длинах световода. Максимальная дифференциальная эффективность генерации относительно введенной мощности накачки составила 28% и была получена на длине световода 40–60 см. Пороговая мощность накачки составляла около 200 мВт. При меньших длинах световода дифференциальная эффективность уменьшалась за счет недостаточного поглощения накачки, при больших длинах – за счет роста оптических потерь. Полученный наклон эффективности относительно введенной мощности накачки 28% немного ниже, чем наклон эффективности (34%), полученной в работе [80] в схеме с накачкой по оболочке световода, целиком состоящего из фосфатного стекла. В описанной работе оптимальная длина световода составила 7 см. Более короткая длина световода обусловлена совпадением длины волны излучения накачки с максимумом поглощения ионов иттербия и большей величиной отношения диаметра сердцевины к диаметру оболочки накачки.

В работе [172] проводилось тестирование световода на основе кварцевого стекла с высокой концентрацией эрбия и иттербия, в описанной выше схеме на рисунке 3.9. Отличие состояло в том, что отношение площадей сердцевины и оболочки накачки световода в работе [172] было примерно в 1,5 раза меньше, чем в настоящей работе. С учетом этого величина поглощения активных редкоземельных ионов в работе [172] была примерно в два раза меньше, чем в исследуемом композитном световоде. Накачка осуществлялась на длине волны в окрестности 915 нм, где поглощение примерно в 4-5 раз меньше, чем поглощение в максимуме на длине волны 976 нм, так же как и при накачке в спектральном диапазоне 762–971 нм, использованной в настоящей работе. В работе [172] получен наклон эффективности относительно введенной мощности накачки 40% при оптимальной длине световода 2-2,5 м. Таким образом, оптимальная длина световода на основе кварцевого стекла из работы [172] примерно в 4-5 раз больше, чем оптимальная длина исследуемого композитного световода. Таким образом, благодаря более высокой концентрации редкоземельных ионов в композитном световоде, оптимальная длина композитного световода значительно меньше, чем длина световода на основе кварцевого стекла.







Рисунок 3.10. Зависимость выходной мощности от введенной мощности накачки.



Рисунок 3.11. Зависимость выходной мощности от поглощенной мощности накачки.

99

Наклон эффективности генерации относительно поглощенной мощности накачки 39% был получен в световоде длиной 25 см. При увеличении длины световода наклон эффективности относительно поглощенной мощности накачки уменьшался за счет роста оптических потерь. Полученное значение дифференциальной эффективности относительно поглощенной мощности накачки –39% – такое же, как и в световоде длиной 7 см, целиком состоящем из фосфатного стекла [80], и близко к наклону эффективности 38%–50%, полученном в световоде на основе кварцевого стекла [172].

При длине исследуемого световода 43 см спектр лазерного излучения состоял из двух областей в районе длин волн 1535 и 1545 нм, каждая с шириной порядка 3 нм. При меньших длинах активного световода спектр излучения сдвигался преимущественно в область 1535 нм, при больших длинах световода – в сторону более длинных волн. Последнее обстоятельство связано с уменьшением инверсной населенности на конце световода и ростом перепоглощения лазерного излучения невозбужденными ионами эрбия. В ходе тестирования генерационных характеристик в окрестности длины волны один микрон не наблюдалось ни лазерной генерации, ни люминесценции даже при максимальной мощности накачки 7 Вт.

Как уже было отмечено, спектр используемых для накачки лазерных диодов в рабочем диапазоне мощностей приходился на длины волн, меньшие, чем длина волны, соответствующая максимуму поглощения ионов иттербия. Нагрев диодов накачки при возрастании выходной мощности приводил к смещению длины волны накачки в длинноволновый диапазон. Однако введенная мощность накачки была ограничена величиной порядка 7 Вт. При попытке введения в световод большей мощности происходил нагрев полимерного покрытия, формирующего оболочку накачки, его деформация при нагреве, что, в свою очередь, приводило к разъюстировке, то есть смещению торца световода из фокуса линзы. Для того чтобы повысить рабочую мощность диодов накачки, накачка была разделена на две равные части с помощью двух многомодовых световодов, вытянутых в одном полимерном покрытии. На входе накачка вводилась в один из световодов, в результате взаимодействия мод двух световодов происходила перекачка излучения из одной сердцевины в другую так, что на выходе мощности в обоих световодах сравнивались. Для накачки было использовано излучение, идущее по одному из световодов. За счет этого удалось вдвое повысить рабочую мощность линейки диодов накачки, центральная длина волны при этом составила 973 нм. Поглощение накачки при этом возросло примерно в два раза по сравнению с диапазоном 762–971 нм и составило 0,25 дБ/см.

На рисунке 3.12 представлена зависимость дифференциальной эффективности от введенной мощности накачки при различных длинах активного световода. Как видно,

уже при длине активного световода 25 см значение наклона эффективности генерации относительно введенной мощности накачки составляет порядка 30%.



Рисунок 3.12. Зависимость дифференциальной эффективности от введенной мощности накачки при различных длинах активного световода. Центральная длина волны спектра излучения диодов накачки – 973 нм.

3.3 Световод с сердцевиной, легированной иттербием

3.3.1 Световод, легированный ионами иттербия, для накачки по сердцевине 3.3.1.1 Параметры световода

При создании световода, легированного только ионами иттербия, было использовано фосфатное стекло состава \mathbb{N} 1 с концентрацией ионов иттербия $6,2x10^{20}$ см⁻³. Фотография торца световода представлена на рисунке 3.13. Световод был вытянут для накачки по сердцевине с круглым поперечным сечением. Диаметр сердцевины составлял D_{core} =4,8 мкм. Световод был покрыт выводящим полимерным покрытием с показателем преломления, большим, чем у кварцевого стекла.

В отрезке световода длиной 15 см на длине волны 633 нм была измерена числовая апертура сердцевины, которая составила 0,32. Разность показателей преломления сердцевины n_{core} и оболочки n_{clad}, рассчитанная исходя из измеренного значения числовой апертуры, так же как и в световоде, легированном эрбием и иттербием, составила около 0,035. При таких параметрах сердцевины V-параметр на длине волны

1000 нм $V = \frac{\pi D_{core} \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2}}{\lambda} = 4,6 > 2,41$ и световод является многомодовым.

Многомодовость световода была подтверждена экспериментально путем введения в сердцевину световода излучения от внешнего источника на длине волны 1040 нм при различных условиях возбуждения. Для этого излучение на длине волны 1040 нм вводилось в световод с отсечкой первой высшей моды около 900 нм и диаметром сердцевины порядка 6 мкм. Выходной торец этого световода стыковался с исследуемым световодом. На рисунке 3.14 показано распределение интенсивности на выходном торце исследуемого световода при соосном положении подводящего и исследуемого световодов, а также при несоосном положении этих световодов. При соосном положении световодов возбуждается преимущественно нулевая мода, при сдвиге одного торца относительно другого происходит возбуждение высшей моды. Таким образом, световод являлся многомодовым на длине волны в окрестности одного микрометра.

На рисунке 3.15а представлен спектр оптических потерь, измеренный в изготовленном световоде методом обрыва. Минимальный уровень оптических потерь приходится на диапазон 1100–1350 нм и составляет так же, как и в световоде, легированном эрбием и иттербием, величину около 1,5–2,0 дБ/м. Кроме того, в окрестности длины волны 1400 нм присутствует пик поглощения ОН-групп величиной 2 дБ/м.

Для сравнения были измерены оптические потери в объемном образце стекла, из которого была изготовлена сердцевина световода. Измерения проводились на длине волны 1542 нм с помощью коллимированого пучка волоконного лазера. Измерялась мощность излучения, прошедшая через образцы стекла длиной 56 и 2 мм. Оптические потери рассчитывались по формуле:

$$k = \frac{-ln\left(\frac{T_1}{T_2}\right)}{d1 - d2},$$

где T1 – мощность, прошедшая через образец длиной d1=56 мм, T2 – мощность, прошедшая через образец d2=2 мм. Исследованный образец фосфатного стекла был несколько неоднороден, измеренная величина оптических потерь изменялась на различных участках образца в пределах от 5,5 до 6,0 дБ/м.

Также измерения оптических потерь в образце фосфатного стекла длиной 56 мм проводились с помощью спектрофотометра Shimadzu UV-3101PC. Френелевское отражение от границ образца было учтено при обработке полученных данных. Спектр оптических потерь представлен на рисунке 3.156. Как видно из рисунка 3.156 в спектральной области свыше 1400–1500 нм наблюдается рост оптических потерь, связанный с поглощением колебательными переходами сетки стекла. Рост оптических потерь в этой области также наблюдается и в композитном световоде. Однако величина оптических потерь в этой области в световодах меньше, чем в исходном фосфатном стекле; оптические потери, измеренные на длине волны 1542 нм в фосфатном стекле, составляют около 5–6 дБ/м, в световоде – 2,5–3 дБ/м.



Рисунок 3.13. Фотография торца световода, легированного ионами иттербия, полученная на электронном микроскопе.



Рисунок 3.14. Распределение интенсивности на торце световода при соосном (слева) и несоосном (справа) положении подводящего световода.



Рисунок 3.15. Спектр оптических потерь а – в световоде и б – в исходном фосфатном стекле, легированном иттербием.

В области 1100–1350 нм уровень оптических потерь в фосфатном стекле составляет около 1 дБ/м, что примерно соответствует уровню оптических потерь в этой области в композитных световодах.

В работе [173] исследовался уровень оптических потерь (вне пиков поглощения редкоземельных ионов) в фосфатных стеклах того же состава, который был использован в настоящей работе для изготовления композитных световодов. Измеренная величина потерь в различных образцах составила от 3 до 16 дБ/м. Исследования авторов показывают, что основным источником оптических потерь является загрязнение стекла во время варки в платиновом тигле.



Рисунок 3.16. Спектры а – поглощения и б – люминесценции ионов иттербия в сердцевине световода.

Спектры поглощения и люминесценции ионов иттербия представлены на рисунке 3.16. Максимальная величина поглощения ионов иттербия приходится на длину волны 976 нм и составляет около 25 дБ/см.

Следует отметить, что в работе [174] методом плазмохимического осаждения из газовой фазы был получен световод с сердцевиной состава $SiO_2/Al_2O_3/P_2O_5/GeO_2/Yb_2O_3$ с примерно такой же величиной поглощения ионов иттербия. Однако если для методов осаждения из газовой фазы данная концентрация ионов иттербия уже является достаточно высокой, то в случае композитных световодов она может быть повышена в два-три раза за счет использования более концентрированного исходного фосфатного стекла с содержанием иттербия до $1,7x10^{21}$ см⁻³ (как в случае световода, легированного эрбием и иттербием, рассмотренного выше).

Время жизни уровня ${}^{2}F_{5/2}$, измеренное в изготовленном световоде, составило 1,0 мс. Это меньше, чем в световодах с фосфоросиликатной сердцевиной, изготовленных методом осаждения кварцевого стекла из газовой фазы, – 1,2 мс [175]. Малое значение времени жизни связано, очевидно, с высокой концентрацией ОН-групп в исходном

фосфатном стекле. Время жизни уровня ${}^{2}F_{5/2}$ в стекле составляет 0,78–0,79 мс. Увеличение времени жизни в световоде, возможно, связано со снижением концентрации ОН-групп в процессе взаимной диффузии фосфатного и кварцевого стекол при вытяжке световода.

3.3.1.2 Лазерная генерация при накачке в сердцевину в световоде, легированном иттербием

3.3.1.2.1 Схема лазера с одной брэгговской решеткой

Для исследования генерационных характеристик и качества пучка использовалась схема, приведенная на рисунке 3.17. Резонатор лазера был сформирован волоконной брэгговской решеткой с коэффициентом отражения более 99% на длине волны 1018 нм и торцом исследуемого световода, обеспечивающим отражение 4%. Брэгговская решетка была записана на одномодовом световоде Nufern 1060-XP с сердцевиной, легированной оксидом германия, длиной волны отсечки первой высшей моды 920 нм и диаметром поля моды 6,2 мкм на длине волны 1060 нм. Для накачки использовался одномодовый лазерный диод на длине волны 976,2 нм. Введенная мощность накачки измерялась после спектрального мультиплексора, как показано на рисунке 3.17. Излучение волоконного лазера на выходе коллимировалось с помощью линзы, затем излучение накачки и излучение лазера на длине волны 1018 нм разделялось с помощью дифракционной решетки. Мощность излучения непоглощенной накачки и лазерной генерации рассчитывалась, исходя из измеренного с помощью дифракционной решетки отношения мощностей и суммарной мощности на выходе лазера Роut.

Для оценки потерь внутри резонатора было проведено измерение оптических потерь в месте соединения световода Nufern 1060-XP, используемого для записи брэгговской решетки, и исследуемого активного композитного световода. Измерения проводились в области 1200–1300 мкм, для измерений использовалось излучение галогеновой лампы, прошедшее через монохроматор. Сварка световодов производилась с использованием сварочного аппарата Fujikura FSM80. Для повышения точности измерения проводились для нескольких соединений световодов, то есть нескольких участков двух световодов, попеременно соединенных друг с другом с помощью процесса сварки. Средняя величина оптических потерь на одном соединении составляла 1,3 дБ. Измеренное значение примерно соответствует величине потерь, рассчитанной, исходя из параметров фундаментальных мод сердцевин соединяемых световодов.

Также проводилось исследование механической прочности соединений световодов, полученных с помощью процесса сварки. Для испытания прочности были подготовлены образцы соединений стандартного световода SMF-28 с исследуемым световодом с диаметрами 80, 125 и 160 мкм. Также исследовались места соединений

двух отрезков стандартного световода SMF-28. При подготовке световодов к процессу сварки защитное полимерное покрытие удалялось механически. Никаких специальных операций для получения высокопрочного соединения не предпринималось. Прочность на разрыв полученных соединений исследовалась с помощью разрывной машины Instron 6022. Для сравнения были протестированы сварные соединения двух стандартных одномодовых световодов, полученные в тех же условиях. При испытании на разрыв разрушение световода в обоих случаях происходило на расстоянии 3–5 мм от места сварки, там, где было удалено полимерное покрытие. Происходило разрушение как исследуемого световода, так и стандартного световода SMF-28. Прочность в том и в другом случае, а также при испытании прочности места соединения двух световодов SMF-28, составила величину 0,5–0,8 ГПа, которая определялась качеством поверхности световода после снятия полимерного покрытия и сварки в электрическом разряде.

На рисунке 3.18 представлена зависимость наклона эффективности генерации относительно введенной мощности накачки, а также пороговой мощности накачки от длины активного световода в схеме, представленной на рисунке 3.17. Для проведения исследования лазерных характеристик были использованы длины световода короче 90 мм. Минимальная длина световода, на которой была получена генерация, составила 32 мм. Дифференциальная эффективность относительно введенной мощности накачки, полученная для длин световода свыше 48 мм, составила 73%-74% (рисунок 3.18). Пороговая мощность накачки при этом составила 20-30 мВт. Дифференциальная эффективность снижалась на коротких длинах световода из-за недостаточного поглощения накачки. Например, при длине активного волоконного световода 32 мм поглощалось 70% излучения накачки, при длине световода 37 мм – 87%. Для длин световодов более 40 мм поглощалось свыше 97% мощности накачки. Длины отрезков световодов свыше 90 мм не тестировались, поскольку при большей длине световода повышалась вероятность возникновения генерации на длинах волн свыше 1050-1060 нм, что могло привести к повреждению лазерного диода накачки. Ширина спектра лазерной генерации определялась шириной спектра отражения брэгговской решетки и составила 0,5 нм.







Рисунок 3.18. Зависимость дифференциальной эффективности относительно введенной мощности накачки и пороговой мощности накачки от длины композитного световода, легированного ионами иттербия.



Рисунок 3.19. Зависимость радиуса пучка от расстояния вдоль оси распространения пучка для M²=1,06. На вставках показано распределение интенсивности моды в районе перетяжки пучка и вдали от перетяжки.



Рисунок 3.20. Фотография торца активного световода, легированного ионами иттербия, в области сердцевины, полученная с помощью электронного микроскопа в режиме отраженных электронов.




Рисунок 3.22. Зависимость выходной мощности от введенной мощности накачки в схеме лазера с двумя брэгговскими решетками при длине активного световода 25 мм.

В схеме, представленной на рисунке 3.17, исследовалось качество пучка излучения, выходящего из торца исследуемого световода, путем измерения параметра M². Измерения проводились при длине активного световода свыше 65 мм для того, чтобы на выходе лазера практически не оставалось излучения накачки. Измерения проводились с помощью камеры Spiricon M²-200-ACC. Для проведения измерений использовалась асферическая линза с фокусным расстоянием 2,75 мм. По распределению интенсивности в перетяжке пучка и расстоянию от положения перетяжки до линзы был измерен диаметр поля моды, выходящей из исследуемого световода. Измеренное значение составило 3,8 мкм.

Результаты измерения радиуса пучка от расстояния вдоль оси пучка приведены на рисунке 3.19. Мощность накачки при проведении измерений составляла 200 мВт. Рассчитанный на основании проведенных измерений фактор M² находился в диапазоне 1,05–1,22 для различных измерений. Таким образом, несмотря на то, что световод является многомодовым, в данной схеме было получено высокое качество пучка. Это стало возможным благодаря использованию в резонаторе лазера одномодового световода с брэгговской решеткой, который выполнял роль модового фильтра, отражая только фундаментальную моду, и, таким образом, подавляя генерацию на более высоких поперечных модах.

Необходимо также отметить, что поверхность торца композитного световода, служившего выходным зеркалом резонатора в схеме на рисунке 3.17, не являлась идеально ровной. На рисунке 3.20 приведена фотография торца активного световода в области сердцевины, полученная на электронном микроскопе в режиме отраженных электронов. Наличие более темных областей в районе сердцевины свидетельствует о том, что поверхность скола не является плоской и на ней присутствуют углубления или выступы. Как было отмечено ранее, несмотря на взаимную диффузию кварцевого и фосфатного стекла во время вытяжки световода, сердцевина световода содержит значительную концентрацию оксида фосфора, что приводит к значительно большему, чем у нелегированного кварцевого стекла, коэффициенту термического расширения. Поскольку коэффициент термического расширения сердцевины больше, чем оболочки, то при остывании световода после вытяжки до комнатной температуры стекло оболочки сжимается намного меньше, чем стекло сердцевины, и, вследствие этого, в сердцевине будут присутствовать растягивающие напряжения. Растягивающие напряжения в сердцевине увеличивают напряжения в вершине трещины при скалывании световода. В результате этого при росте трещины происходят отклонения поверхности скола от плоскости с образованием углублений или выступов [176], проявляющиеся в виде темных областей на изображениях торца, которые получены в режиме отраженных электронов (рисунок 3.20). Тем не менее, несмотря на неидеальную поверхность скола, в

исследованной схеме получена высокая эффективность генерации и высокое качество пучка.

3.3.1.2.2 Схема волоконного лазера с двумя брэгговскими решетками

Для достижения лазерной генерации при более коротких длинах исследуемого активного световода на выходе лазера была использована волоконная брэгговская решетка с коэффициентом отражения 30% (рисунок 3.21). В схеме, показанной на рисунке 3.21, при длине активного световода 25 мм были получены наклон эффективности относительно введенной мощности накачки 50% и пороговая мощность накачки 10 мВт (рисунок 3.22). При длине активного световода 16 мм наклон эффективности лазерной генерации относительно введенной мощность накачки составил 20%, пороговая мощность накачки составил 15 мВт.

3.3.2 Световод, легированный ионами иттербия, для накачки по оболочке

Из фосфатного стекла, активированного ионами иттербия, описанного в пункте 3.3.1.1, был изготовлен световод с отражающим полимерным покрытием для накачки через оболочку. Диаметр сердцевины в полученном световоде составил 11 мкм. Оболочка накачки имела прямоугольную форму с размерами 76х105 мкм.

На рисунке 3.23 представлен спектр поглощения изготовленного световода, зарегистрированный при вводе излучения в оболочку накачки. Спектр получен с помощью спектроанализатора Ando AQ 6317В при спектральном разрешении 0,5 нм. Поглощение на длине волны 915 нм составляет около 0,06 дБ/см.

Исследование лазерных характеристик световода проводилось в схеме, представленной на рисунке 3.24, аналогичной схеме, представленной на рисунке 3.9. Резонатор был сформирован торцами световода, каждый из которых обеспечивал 4%-ное отражение. Для накачки использовалась линейка многомодовых полупроводниковых лазерных диодов с длиной волны излучения в окрестности 915 нм.

Излучение накачки вводилось во внутреннюю оболочку световода с помощью линзы. Для разделения излучения накачки и сигнала на входе и на выходе использовались диэлектрические зеркала с высоким коэффициентом отражения в спектральном диапазоне в окрестности 1000 нм и прозрачные для длины волны излучения накачки. Выходная мощность лазерной генерации измерялась с обеих сторон и суммировалась. Введенная мощность накачки измерялась при укорачивании длины отрезка световода до 2 см. Исследовались световоды с длиной порядка 90 см. Поглощение излучения накачки на такой длине световода составляло примерно 60%.



Рисунок 3.23. Спектр поглощения световода с двойной оболочкой при вводе излучения в оболочку накачки.







Рисунок 3.25. Зависимость выходной мощности от поглощенной (слева) и введенной (справа) мощности излучения накачки.

Генерация лазерного излучения наблюдалась в спектральном диапазоне 1053–1059 нм.

На рисунке 3.25 представлены зависимости выходной мощности лазера от введенной и поглощенной мощности накачки при длине активного световода 87 см. Дифференциальная эффективность генерации относительно введенной мощности накачки составила 45%, относительно поглощенной – 72%.

Выводы к главе 3

Методом «стержень в трубке» создана серия композитных световодов с сердцевиной, изготовленной из фосфатного стекла, легированного 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. Сердцевина, 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. В результате исследований установлены следующие закономерности:

1. Исследована возможность изготовления композитных световодов из фосфатных стекол различных составов. Среди исследованных составов фосфатного стекла волоконный световод данной конструкции может быть изготовлен только из состава, содержащего алюминий и бор.

2. При изготовлении композитных волоконных световодов методом «стержень в трубке» не происходит растрескивания консолидированной заготовки, несмотря на значительное различие коэффициентов термического расширения фосфатного и кварцевого стекла.

3. При вытяжке композитного световода происходит взаимная диффузия фосфатного и кварцевого стекла, в результате чего концентрация оксида фосфора в сердцевине световода снижается до величины порядка 30 мол.%.

4. Оптические потери в полученных световодах вне областей поглощения редкоземельных ионов составляют от 1 до 3 дБ/м, что по порядку величины соответствует оптическим потерям в фосфатном стекле.

5. 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.

6. 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 сердцевин соединяемых световодов.

7. В световоде, легированном эрбием и иттербием, получены приемлемые для практического использования уровни эффективности лазерной генерации. В схеме с накачкой по оболочке получен наклон эффективности генерации 28% относительно введенной и 39% относительно поглощенной мощности накачки. Благодаря наличию сердцевины с высокой концентрацией редкоземельных элементов, оптимальная длина, соответствующая максимальному наклону эффективности генерации относительно введенной мощности накачки, даже при несовпадении спектра излучения накачки и максимума поглощения ионов иттербия, составила около 40–60 см, что в несколько раз меньше оптимальной длины световода, изготовленного методом осаждения из газовой фазы.

8. В световоде с сердцевиной, легированной ионами иттербия, дифференциальная эффективность относительно введенной мощности накачки при накачке по сердцевине составила 73%–74% при длине световода всего 48–90 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. Также была получена генерация в схеме с двумя брэгговскими решетками при длине активного световода до 16 мм.

9. В композитном световоде с двойной оболочкой и с сердцевиной, легированной ионами иттербия, дифференциальная эффективность относительно поглощенной мощности накачки при накачке по оболочке составила 72% при длине световода 90 см.

ГЛАВА 4

НОВЫЕ СТРУКТУРЫ МНОГОСЕРДЦЕВИННЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ И СНИЖЕНИЕ ПЕРЕКРЕСТНЫХ ПОМЕХ

По материалам работ:

177**, 178**, 179**, 180**, 181*, 182*, 183*, 184*, 185*.

Как уже было отмечено во введении, центральным вопросом, связанным с созданием многосердцевинных световодов, является возможность одновременного достижения большого числа сердцевин и малой величины перекрестных оптических помех. Однако для получения высокой механической прочности и надежности диаметр телекоммуникационного световода (оболочки из кварцевого стекла) не должен превышать 200–250 мкм. Из-за ограничения на внешний диаметр световода увеличение числа сердцевин в поперечном сечении должно происходить за счет сокращения расстояния между соседними сердцевинами, однако это приводит к росту перекрестных оптических поиск решений, позволяющих снизить расстояние между сердцевинами при заданной величине перекрестных оптических помех.

В настоящей главе описываются два таких решения, составляющих результаты данной диссертационной работы.

Первый подход к снижению перекрестных оптических помех связан с использованием барьерного слоя с пониженным показателем преломления между сердцевинами. Он может быть применен как в случае многосердцевинных световодов с одинаковыми параметрами сердцевин, так и в случае многосердцевинных световодов с различными параметрами сердцевин (гетерогенных многосердцевинных световодов). Благодаря такому слою, расположенному на некотором расстоянии от сердцевины, напряженность электрического поля на краю распределения поля моды уменьшается, что приводит к снижению перекрестных 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.

При обсуждении влияния барьерного слоя между сердцевинами в профиле показателя преломления в настоящей главе рассматривается случай гомогенного многосердцевинного световода, то есть световода с одинаковыми параметрами сердцевин. В дополнение к этому рассматривается влияние других факторов на перекрестные оптические помехи в гомогенных многосердцевинных световодах. Экспериментально влияние барьерного слоя в профиле показателя преломления

подтверждается путем сравнения перекрестных оптических помех в многосердцевинных световодах с барьерным слоем и без него.

Второй подход к снижению перекрестных оптических помех, который рассматривается в данной главе, связан со снижением дополнительных перекрестных оптических помех, возникающих при изгибе световода, в многосердцевинном световоде с различными параметрами сердцевин (гетерогенном многосердцевинном световоде). Для этого автором настоящей работы с соавторами было экспериментально показано, что наличие преимущественного направления изгиба позволяет избежать роста перекрестных помех помех при изгибе световода.

При создании многосердцевинных световодов для данной работы были использованы односердцевинные заготовки, изготовленные Салганским М.Ю. в ИХВВ РАН. Мишкиным В.П. и Нищевым К.Н. была проведена работа по изучении геометрии поперечного сечения многосердцевинного волоконного световода с помощью атомносилового микроскопа на базе Мордовского Государственного Университета. Астапович М.С. и Сенаторов А.К. принимали участие в исследовании характеристик многосердцевинных световодов. Для подтверждения достоверности полученных результатов измерений исследования многосердцевинных световодов проводились также сотрудниками исследовательского центра компании Корнинг Инк. в г. Санкт-Петербург Коклюшкиным А.В., Назаровым В.Н. и Королевым А.Е. Успешному выполнению работ способствовало обсуждение полученных результатов с Диановым Е.М., Семеновым С.Л., Мельниковым Л.А., Ли М.Дж. и Куксенковым Д.В.

4.1 Снижение перекрестных помех за счет барьерного слоя в профиле показателя преломления

4.1.1 Влияние барьерного слоя показателя преломления на величину перекрестных оптических помех в многосердцевинных волоконных световодах круглого поперечного сечения с одинаковыми параметрами сердцевин

Если два волновода (сердцевины) расположены достаточно близко друг к другу, моды этих волноводов будут обмениваться энергией. Физической причиной обмена энергией является интерференция. В результате этого взаимодействия происходит полное или частичное периодическое перетекание излучения из одного волновода в другой и обратно [186]. В общем случае анализ распространения света в системе из нескольких волноводов заключается в решении уравнений Максвелла для определения мод всей системы в целом. При этом моды всей системы, состоящей из нескольких волноводов, будут отличаться от мод каждого волновода в отдельности. В случае, если связь между волноводами мала, как в случае многосердцевинных световодов с несвязанными сердцевинами, и сердцевины являются слабонаправляющими (то есть $\frac{n_c^2 - n_{cl}^2}{2n_c^2} \ll 1$, где n_c – показатель преломления сердцевины, n_{cl} – показатель преломления оболочки), для описания взаимодействия между волноводами используется упрощенная теория связанных мод. В этом приближении предполагается, что сами моды являются модами отдельно расположенных волноводов (сердцевин) и при взаимодействии изменяются только амплитуды мод. Световое поле мод отдельных сердцевин 1 и 2:

$$E_n(x, y, z) = A_n(z)\psi_n(x, y)exp(-i\beta_n z),$$

где n – номер сердцевины, $A_n(z)$ – медленно меняющаяся амплитуда электрического поля моды изолированной сердцевины 1 или 2, β_n – постоянные распространения мод соответствующих сердцевин, $\psi_n(x,y)$ – поперечное распределение полей мод изолированных сердцевин 1 и 2. При этом переход излучения между двумя сердцевинами 1 и 2 (рисунок 4.1) определяется при помощи уравнений связанных мод [186, 187]:

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} = -iC_{21}exp[i(\beta_1 - \beta_2)z]A_2, \qquad (4.1)$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial z} = -iC_{12}exp[i(\beta_2 - \beta_1)z]A_1.$$
(4.2)

Здесь С₁₂ и С₂₁ – коэффициент связи между модами сердцевин 1 и 2, z – координата вдоль оси световода.

Если параметры соседних сердцевин не изменяются вдоль оси световода z, постоянная распространения моды отдельно расположенной первой сердцевины равна β_1 , постоянная распространения моды второй сердцевины равна β_2 , на входе в сердцевину 1 вводится сигнал мощностью $P_1(0)$, то зависимость оптической мощности от координаты z в первой сердцевине $P_1(z)$ и во второй сердцевине $P_2(z)$ изменяется как [186]:

$$P_{1}(z) = P_{1}(0) \left(1 - F^{2} sin^{2} \left(\frac{c}{F} z \right) \right), \tag{4.3}$$

$$P_{2}(z) = P_{1}(0)F^{2}sin^{2}\left(\frac{c}{F}z\right),$$
(4.4)

где

$$C = k \frac{\int_{A} (n - n_{co}) \psi_1 \psi_2 dA}{\int_{A} \psi_1^2 dA}$$
(4.5)

коэффициент связи, k=2π/λ, A – поперечное сечение световода, n – профиль показателя преломления возмущенного световода (рисунок 4.1 в центре), n_{co} – профиль показателя преломления невозмущенного световода (рисунок 4.1 внизу) и

$$F = \frac{1}{\left(1 + \frac{(\beta_1 - \beta_2)^2}{4C^2}\right)^{0.5}} \tag{4.6}$$

Таким образом, мощность осциллирует между двумя сердцевинами, изменяясь в первой сердцевине от значения $P_1(0)$ до $P_1(0)(1-F^2)$, а во второй сердцевине – от 0 до $P_1(0)F^2$. Период изменений по длине световода, или длина биений, составляет:

$$L_B = \frac{\pi F}{C}.\tag{4.7}$$

В случае двух одинаковых сердцевин $\beta_1 = \beta_2$ и формулы (4.3, 4.4) преобразуются к виду

$$P_{1}(z) = P_{1}(0)cos^{2}(Cz)$$
(4.8)

$$P_{2}(z) = P_{1}(0)sin^{2}(Cz)$$
(4.9)

Таким образом, при одинаковых параметрах сердцевин мощность осциллирует полностью между двумя сердцевинами, длина биений составляет:

$$L_B = \frac{\pi}{c} \tag{4.10}$$

Увеличить длину биений, что эквивалентно снижению СВЯЗИ между сердцевинами, возможно за счет уменьшения коэффициента связи С. Из выражения (4.5) следует, что для того, чтобы снизить коэффициент связи, необходимо уменьшить напряженность поля моды сердцевины 1 в области сердцевины 2, поскольку разность возмущенного и невозмущенного профилей показателя преломления n – n_{co} имеет ненулевое значение только в области сердцевины 2. Этого можно достичь путем введения барьерного слоя с пониженным показателем преломления между сердцевинами, как показано на рисунке 4.2. При этом, за счет того, что слой с пониженным показателем преломления расположен на некотором расстоянии от сердцевины, он не будет оказывать значительного влияния на волноводные свойства мод отдельных сердцевин.

Для демонстрации эффекта, который может оказывать слой с пониженным показателем преломления, нами был проведен расчет коэффициента связи по формуле (4.5) и длины биений по формуле (4.10) для двух сердцевин с одинаковыми параметрами в световоде со слоем и без слоя с пониженным показателем преломления. Рассматриваемая волноведущая система показана на рисунке 4.36, соответствующее поперечное сечение многосердцевинного световода с барьерным слоем показано на рисунке 4.3a. Волноведущая система состоит из двух сердцевин (области C1 и C2, показатель преломления $n_{\rm C}$), оболочек (Об1 и Об2, показатель преломления $n_{\rm O6}$) и области с уменьшенным значением показателя преломления (Сл, показатель преломления $n_{\rm Cn}$). Для проведения оценок показатели преломления выбраны следующим образом: $n_{\rm C} = 1,453$, $n_{\rm O6} = 1,444$, $n_{\rm Cn} = 1,435$.

Расстояние между центрами сердцевин d, радиус сердцевин R_{C1} и R_{C2} . Внешний радиус оболочек равен R_{O6} . Расчет проводился для сердцевин с одинаковыми параметрами. Для расчетов использовались следующие значения геометрических параметров: радиусы сердцевин $R_{C1}=R_{C2}=R_C=2,65$ мкм, радиусы внутренних оболочек «Об1» и «Об2» $R_{O6}=9,5$ мкм, расстояние между центрами сердцевин d=27 мкм. Для определения влияния области с меньшим показателем преломления рассмотрено два случая: 1) $n_{C\pi} = n_{O6}$ и 2) $n_{C\pi} \neq n_{O6}$. Расчет проводился для длины волны 1550 нм.

Поперечное распределение полей мод изолированных сердцевин C1 и C2 – ψ_1 , ψ_2 – рассчитывалось с помощью пакета программ «Comsol Multiphysics». На рисунке 4.4 показано распределение поля моды в логарифмическом масштабе для сердцевины C1 в присутствии области с пониженным показателем преломления (пунктирная линия) и без нее (сплошная линия). Область, в которой расположена сердцевина C2, показана серым цветом. Как видно, в случае, когда показатель преломления области «Cл» понижен по сравнению с показателем преломления оболочки «Oб1» и «Oб2», на краях распределения моды сердцевины C1, в том числе в области сердцевины C2, происходит значительное уменьшение напряженности поля по сравнению со случаем, когда слой с пониженным показателем преломления отсутствует.

Для нахождения коэффициента связи проводилось численное интегрирование полученного распределения напряженности электрического поля мод в соответствии с (4.5). Длины биений рассчитывалась по формуле (4.10). Для случая $n_{C_{\pi}} = n_{06}$ коэффициент связи составил C=7,368x10⁻⁷ мкм⁻¹, длина биений $L_b \approx 4,3$ м. В случае $n_{C_{\pi}} \neq n_{06}$ коэффициент связи составил C=2.132x10⁻⁸ мкм⁻¹, длина биений $L_b \approx 150$ м. Таким образом, полученные значения коэффициента связи и длины биений при отсутствии и при наличии слоя с пониженным показателем преломления различаются более чем на порядок.

Однако следует отметить, что проведенный расчет не учитывает случайных флуктуаций параметров световода по длине, которые всегда присутствуют из-за погрешности, связанной с изготовлением световода, а также изгиба световода. Наличие случайных изменений параметров по длине, а также изгиб световода, приводят к случайному изменению разности фаз между модами соседних сердцевин. Вследствие этого вместо периодической осцилляции мощности происходит линейное перетекание излучения из одной сердцевины в другую до тех пор, пока мощности во взаимодействующих сердцевинах не сравняются [188, 107]. При этом характерная длина, на которой происходит перетекание мощности из одной сердцевины в другую, будет намного больше, чем рассчитанная длина биений в случае постоянства параметров по длине [189]. Поэтому проведенные оценки, хотя и отражают качественное влияние слоя с пониженным показателем преломления на величину перекрестных помех, количественно будут значительно отличаться от реальных значений перекрестных помех. Для численного моделирования величины перекрестных оптических помех в световоде со слабо связанными сердцевинами необходим учет случайных изменений параметров световода по длине [190, 107].



Рисунок 4.1. Две расположенные рядом сердцевины 1 и 2, n – профиль показателя преломления возмущенного световода и n_{co} – профиль показателя преломления невозмущенного световода.



Рисунок 4.2. 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.



Рисунок 4.3. а – поперечное сечение многосердцевинного световода, б – волноведущая система, состоящая из двух сердцевин С1 и С2, внутренних оболочек Об1 и Об2 и слоя с пониженным показателем преломления Сл.



Рисунок 4.4. Поперечное распределение напряженности электрического поля моды сердцевины С1 со слоем с пониженным показателем преломления (пунктирная линия) и без этого слоя (сплошная линия). Серым цветом показана область, в которой расположена сердцевина С2.

Однако при численных оценках перекрестных помех достаточно сложно учесть все факторы, приводящие к изменению условий взаимодействия между модами двух сердцевин. Гораздо более достоверным способом является непосредственное измерение величины перекрестных помех в отрезке многосердцевинного световода. При этом для количественного описания величины перекрестных оптических помех в многосердцевинных световодах используется величина, равная

$$XT=10 \lg (P_1/P_0), (4.11)$$

где P_0 – мощность, измеренная на выходном торце в сердцевине, в которую введено излучение, P_1 – мощность излучения на выходе соседней сердцевины, XT (cross talk) – величина перекрестных помех в дБ.

4.1.2 Влияние изгибов на величину перекрестных оптических помех в многосердцевинных световодах круглого поперечного сечения с одинаковыми параметрами сердцевин

В предыдущем пункте было упомянуто, что изгибы световода оказывают значительное влияние на перекрестные оптические помехи. Настоящий пункт посвящен описанию механизма этого влияния, что важно для дальнейшего изложения. Как известно [102], изогнутый световод эквивалентен прямому световоду с наклонным эффективным профилем показателя преломления, который определяется формулой:

$$n_{eff}^{2} = n^{2} \left(1 + 2\frac{r}{R} \cos(\theta) \right), \tag{4.12}$$

где г и θ – координаты точки, в которой определяется показатель преломления, в локальной цилиндрической системе координат (z', r, θ) (рисунок 4.5a), n – значение показателя преломления в точке с координатами г и θ в неизогнутом световоде, R – радиус изгиба. В эквивалентный профиль показателя преломления также вносят вклад эластооптические эффекты, связанные с изменением показателя преломления кварцевого стекла при действии механических напряжений, вызванных изгибом [191]. Для учета эластооптических эффектов, связанных с изгибом световодов из кварцевого стекла, в формуле (4.12) необходимо вместо радиуса изгиба световода R использовать эффективный радиус изгиба R_{eff}=1,28R.

На рисунке 4.5а представлен многосердцевинный световод, изогнутый вокруг некоторой оси Z. На рисунке 4.5б приведен профиль показателя преломления этого световода вдоль оси X в неизогнутом положении. Все сердцевины световода одинаковые, и, следовательно, одинаковы их постоянные распространения β и эффективные показатели преломления мод n_s, которые связаны с постоянной распространения соотношением $\beta = \mathbf{k} \cdot \mathbf{n}_s$. На рисунке 4.5в показан эквивалентный профиль показателя преломления вдоль оси X ($\theta = 0$) изогнутого световода. Изогнутому

световоду соответствует наклонный профиль показателя преломления, наклон которого, согласно (4.12), увеличивается с уменьшением радиуса изгиба. Как видно, при изгибе многосердцевинного световода с одинаковыми сердцевинами возникает разница между эффективными показателями преломления мод n_{b1} - n_{b2} , а следовательно, и между постоянными распространения мод соседних сердцевин. Отсутствие фазового синхронизма между модами соседних сердцевин приводит к резкому снижению перекрестной связи между ними.

Наличие ненулевой разности постоянных распространения мод соседних сердцевин приводит к тому, что параметр F в выражении (4.6), определяющий долю мощности, которая осциллирует между сердцевинами, становится меньше единицы. Так, например, изгиб световода без барьерного слоя, рассмотренный в предыдущем параграфе, с радиусом 5 см (при θ =0) приводит к и значению F≈ 0,2246. Таким образом, только доля мощности, равная F²≈0,05 переходит из одной сердцевины в другую. При этом так же, как и в случае неизогнутого световода, случайные изменения разности фаз между модами соседних сердцевин из-за флуктуаций параметров в реальных световодах приводят к тому, что, вместо осцилляции мощности из одной сердцевины в другую, происходит линейное изменение мощности в сердцевинах с характерной длиной, намного превышающей длину биений (4.7).

Таким образом, если в неизогнутом многосердцевинном световоде с одинаковыми сердцевинами эффективные показатели преломления мод совпадают, то в изогнутом световоде возникает фазовое рассогласование между модами отдельных сердцевин, что приводит к снижению величины перекрестных оптических помех.

При этом в световоде с различными параметрами сердцевин может иметь место обратная ситуация, о чем более подробно будет сказано далее. Если в неизогнутом положении световода эффективные показатели преломления мод соседних сердцевин различны, то при определенном направлении изгиба разница между ними может снижаться, вплоть до наступления условия фазового синхронизма и резкого возрастания перекрестных оптических помех.

Кроме радиуса изгиба световода, наклон профиля показателя преломления, а следовательно, и разница между эффективными показателями мод определяются углом в между радиальным направлением изгиба и осью, вдоль которой определяется профиль показателя преломления (рисунок 4.5а). Отсюда следует, что в результате изгиба световода изменение перекрестных помех между центральной сердцевиной и сердцевинами с центрами, лежащими на оси X, будет больше, чем изменение перекрестных помех между и другими четырьмя сердцевинами.



Рисунок 4.5. а – многосердцевинный световод, изогнутый с радиусом R, б – профиль показателя преломления вдоль оси X неизогнутого световода, «в» – эквивалентный профиль показателя преломления изогнутого световода.

Описанные эффекты влияния изгиба световода могут приводить как к контролируемому изменению перекрестных помех, например, при намотке световода с определенным диаметром с сохранением ориентации поперечного сечения световода относительно направления изгиба по длине световода, так и к случайному разбросу значений величины перекрестных оптических помех. Последнее связано с тем, что в реальных условиях эксплуатации изменение радиуса и направления изгиба световода по длине часто имеет неконтролируемый характер. Это может приводить к случайным изменениям величины перекрестных помех между различными сердцевинами при изменении пространственного расположения световода [190, 107].

К изменению перекрестных оптических помех будут приводить также и микроизгибы световода. В этом случае, по-видимому, основным механизмом взаимодействия между модами соседних сердцевин будет являться перекачка излучения через оболочечные моды, то есть при микроизгибе будет сначала происходить вытекание излучения из моды одной из сердцевин в моды оболочки, а затем моды оболочки будут взаимодействовать с модами других сердцевин [192].

4.1.3 Изготовление световодов с барьерным слоем и без него

Для исследования влияния слоя с пониженным показателем преломления на перекрестные оптические помехи были изготовлены два световода с одинаковыми параметрами и расположением сердцевин со слоем с пониженным показателем преломления и без него. Заготовки многосердцевинных световодов были изготовлены методом сборки из стержней, полученных путем перетягивания на стеклодувном станке односердцевинных заготовок, изготовленных методом осаждения из газовой фазы (MCVD), и стержней из чистого кварцевого стекла [193]. Для получения световода со слоем с пониженным показателем преломления на заготовку с легированной оксидом германия сердцевиной производилась нахлопка трубки из кварцевого стекла, на внутреннюю поверхность которой с помощью процесса осаждения стекла из газовой фазы был нанесен слой из фторированного кварцевого стекла. Показатель преломления фторированного слоя был меньше, чем у нелегированного кварцевого стекла. Затем с поверхности полученной таким образом заготовки удалялся слой нелегированного кварцевого стекла до фторированного слоя. Потом полученная заготовка перетягивалась на стержни меньшего диаметра.

Стержни, которые были получены перетяжкой заготовки, изготовленной методом MCVD, с легированной оксидом германия сердцевиной, а также стержни из чистого кварцевого стекла складывались в определенном порядке и помещались в трубку из кварцевого стекла. Схематичное изображение поперечного сечения сборочной заготовки показано на рисунке 4.6. Стержни из чистого кварцевого стекла

использовались для снижения деформации сердцевин многосердцевинного световода, которая происходит в процессе консолидации сборки в монолитный стержень. Затем заготовка, собранная из стержней, превращалась в сплошную стержень-заготовку путем нагрева в печи при 2000°С при подаче пониженного давления внутрь трубки. Описанным способом были изготовлены две заготовки, одна с барьерным слоем из фторированного кварцевого стекла, другая без него. Из полученных заготовок были вытянуты многосердцевинные световоды.

Фотографии центральной части торцов многосердцевинных световодов со слоем и без слоя с пониженным показателем преломления, полученные с помощью атомносилового микроскопа, представлены на рисунке 4.7. Для получения изображения торцов осуществлялось предварительное травление торцов в плавиковой кислоте. Поскольку скорость травления кварцевого стекла зависит от состава стекла, то есть от концентрации легирующих добавок, в результате травления на торце световода была получена поверхность, рельеф которой отражает состав стекла. Исследование этой поверхности с помощью атомно-силового микроскопа и позволило получить информацию о геометрии структуры поперечного сечения световода.

Оба световода содержали семь сердцевин, все сердцевины были изготовлены с использованием одной MCVD-заготовки и имели одинаковые параметры. Расстояние между центрами соседних сердцевин составляло 27 мкм, диаметр сердцевин равнялся 5,3 мкм, разность показателей преломления сердцевин и оболочки была 0,009. Толщина слоя с пониженным показателем преломления из фторированного кварцевого стекла составляла 8–9 мкм (на линии, соединяющей центры соседних сердцевин), разность показателей преломления оболочки – 0,009. Диаметр оболочки внутри фторированного слоя составлял 19 мкм.



Рисунок 4.6. Поперечное сечение сборочной заготовки многосердцевинного световода с барьерным слоем.



Рисунок 4.7. Изображения торцов многосердцевинных световодов, полученные на атомно-силовом микроскопе (справа – со слоем с пониженным показателем преломления, слева – без него).

4.1.4 Измерение характеристик многосердцевинных световодов с одинаковыми параметрами сердцевин

4.1.4.1 Измерение длины волны отсечки первой высшей моды

Конструкция односердцевинных световодов с сердцевиной, окруженной слоем с пониженным показателем преломления, используется для снижения изгибных оптических потерь в световодах стандарта G.657 [194]. Поскольку барьерный слой приводит к уменьшению изгибных потерь первой высшей моды в районе отсечки, методика эталонного изгиба измерения отсечки для этих световодов неприменима, а вместо нее используется методика эталонного многомодового световода [195]. Поскольку в одном из исследуемых многосердцевинных световодов сердцевины также окружены слоем с пониженным показателем преломления, для измерения длины волны отсечки первой высшей моды тоже была применена методика эталонного многомодового световода. Измерение отсечки первой высшей моды с помощью этой методики заключается в сравнении мощности излучения, прошедшей через отрезок исследуемого световода и отрезок многомодового световода [196], в качестве которого используется световод стандарта G.651 с диаметром сердцевины 50 мкм.

Для проведения измерений отсечки первой высшей моды в каждую из исследуемых сердцевин вводилось излучение с помощью подводящего односердцевинного световода путем стыковки торцов. При измерении длины волны отсечки важно возбудить на входе исследуемого световода первую высшую моду, для этого должен быть использован многомодовый световод с достаточно высокой числовой апертурой. С другой стороны, необходимо ввести излучение только в одну исследуемую сердцевину, не возбудив при этом моды соседних сердцевин, поэтому подводящий световод должен иметь достаточно малый диаметр сердцевины. В качестве подводящего измерения отсечки первой высшей световода ДЛЯ моды был использован микроструктурированный световод с числовой апертурой сердцевины 0,3 и диаметром сердцевины около 10 мкм [182]. Поперечное сечение подводящего световода представлено на рисунке 4.8. Сердцевина световода состоит из 37 отверстий, расстояние между центрами соседних отверстий составляет 1,25 мкм, отношение диаметра отверстий к расстоянию между центрами соседних отверстий d/A= 0,7. Волноводная структура световода сформирована за счет различного соотношения площади отверстий к площади кварцевого стекла в поперечном сечении сердцевины и оболочки. Световод был изготовлен путем сборки и перетяжки капилляров из кварцевого стекла, при этом для создания сердцевины и оболочки были использованы капилляры с различным соотношением внешнего и внутреннего диаметров, а при вытяжке использовалась подача давления в отверстия, под действием которого происходило окончательное формирование волноведущей структуры световода.



Рисунок 4.8. Фотографии торца подводящего световода, полученные на электронном микроскопе.

Измерение длины волны отсечки проводилось следующим образом: излучение галогеновой лампы, прошедшее через монохроматор, вводилось в поводящий световод, затем противоположный торец подводящего световода с помощью трехкоординатной подвижки стыковался с одной из сердцевин отрезка исследуемого световода длиной 2 м. Контроль того, в какой из сердцевин производится измерение отсечки, осуществлялся следующим образом: выходной торец исследуемого многосердцевинного световода закреплялся с помощью клея на пластине, пластина устанавливалась на держатель каждый раз в одно и то же положение, с помощью микрообъектива изображение торца исследуемого световода строилось на поверхность камеры, с ее помощью определялось относительное положение измеряемой сердцевины и пластины, на которой закреплен исследуемый световод. Затем выходной торец исследуемого световода стыковался с фотоприемником и измерялась спектральная зависимость мощности прошедшего сигнала. Для получения опорного сигнала, согласно ГОСТ Р МЭК 60793-1-44-2013, отрезок многосердцевинного световода заменялся на отрезок эталонного многомодового световода. Таким же образом измерялись длины волн отсечки для всех сердцевин. При этом использовался один и тот же отрезок световода, с помощью клея закрепленного с одной стороны на пластине.

Полученные значения длин волн отсечек для различных сердцевин лежали в диапазоне от 1200 до 1210 нм в световоде без слоя с пониженным показателем преломления и в диапазоне от 1300 до 1400 нм в световоде со слоем с пониженным показателем преломления. Эффект смещения длины волны отсечки в длинноволновую область связан, очевидно, с дополнительной локализацией первой высшей моды барьерным слоем с пониженным показателем преломления. Эффект смещения длины волны отсечки в длинноволновую область связан, очевидно, с дополнительной локализацией первой высшей моды барьерным слоем с пониженным показателем преломления. Эффект смещения длины волны отсечки в длиние барьерного слоя наблюдался, например, в работе [197].

Также в сердцевинах исследуемых многосердцевинных световодов был измерен диаметр поля моды на длине волны 1300 нм методом измерения распределения интенсивности излучения в дальней зоне дифракции. Диаметр поля моды на длине волны 1300 нм, измеренный в различных сердцевинах, составил около 6 мкм.

4.1.4.2 Измерение оптических потерь

Для сердцевин всех многосердцевинного световода с использованием оптического рефлектометра EXFO FTB-400 проводилось измерение затухания сигнала методом обратного рассеяния на длине волны 1550 нм. При этом для ввода излучения в отдельные сердцевины многосердцевинного световода использовалась стыковка со стандартным световодом G.652. Положение измеряемой сердцевины контролировалось по боковому изображению исследуемого и принимающего световодов в месте стыковки в двух перпендикулярных направлениях. Измерения были проведены последовательно во всех сердцевинах при вводе излучения с одного из торцов многосердцевинного световода. Согласно ГОСТ Р МЭК 60793-1-40-2012, измерения оптических потерь методом обратного рассеяния необходимо проводить с двух сторон световода для предотвращения ошибки, связанной с изменениями параметров световода по длине. Поэтому измерения оптических потерь были также проведены с противоположного торца световода. При этом измеренные оптические потери в каждой из сердцевин на длине волны 1550 нм находились в диапазоне 2,0–2,5 дБ/км для световода без барьерного слоя и в диапазоне 4,2-5,9 дБ/км для световода с барьерным слоем показателя преломления.

Для выяснения причин повышенных оптических потерь в световоде с барьерным слоем было проведено измерение спектра оптических потерь в обоих световодах, которое показало, что в световоде с барьерным слоем присутствуют дополнительные оптические потери, не зависящие от длины волны (рисунок 4.9). Кроме того, рефлектограмма световода с барьерным слоем показателя преломления была более неоднородна по длине световода, чем рефлектограмма световода без этого слоя. Полученные данные свидетельствуют о том, что дополнительные оптические потери в световоде с барьерным слоем показателя преломления вероятнее всего связаны с резкими скачками диаметра световода в процессе вытяжки из-за наличия микропузырей, сформировавшихся на стадии консолидации заготовки на поверхности фторированного слоя.

В данном исследовании не ставилась задача точного определения оптических потерь в каждой из сердцевин, поэтому отсутствовала необходимость идентификации боковой сердцевины, в которой проводятся измерения оптических потерь. В случае, когда необходимо точно измерить величину оптических потерь, необходима

идентификация исследуемой сердцевины при измерении потерь с обеих сторон световода. Идентификация сердцевин может быть осуществлена путем закрепления участков световода вблизи торцов на специальный держатель с помощью клея, так чтобы ориентация торца относительно соответствующего держателя сохранялась. Затем с помощью камеры, источника излучения и фотоприемника должна быть произведена идентификация положения каждой из сердцевин относительно держателя на обоих торцах исследуемого световода. Затем должны быть проведены измерения оптических потерь с двух сторон световода в каждой из сердцевин согласно ГОСТ Р МЭК 60793-1-40-2012.



Рисунок 4.9. Спектры оптических потерь в одной из сердцевин световодов без барьерного слоя (сплошная линия) и с барьерным слоем (пунктирная линия).

4.1.4.3 Измерение перекрестных оптических помех

Для измерения перекрестных оптических помех сигнал на длине волны 1550 нм вводился в центральную сердцевину световода путем стыковки с одномодовым односердцевинным подводящим световодом стандарта G.652. На выходном торце многосердцевинного световода мощность, выходящая из различных сердцевин, измерялась при помощи сканирования по торцу световода торцом такого же одномодового односердцевинного световода, противоположный торец которого был присоединен к фотоприемнику. Положение измеряемой сердцевины контролировалось по боковому изображению исследуемого и принимающего световодов в месте стыковки в двух перпендикулярных направлениях. Перекрестные помехи определялись по формуле (4.11). Длина отрезка световода со слоем с пониженным показателем преломления составляла 1,1 км, без слоя – 1,0 км. Измерения проводились для трех диаметров намотки световодов - 32, 16 и 5 см.



Рисунок 4.10. 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 (о). На вставке – расположение сердцевин, стрелки соответствуют измерению перекрестных помех из центральной в боковые сердцевины.

Значения величины перекрестных помех при намотке световода с различным диаметром представлены на рисунке 4.10. Как видно, наблюдается большой разброс значений перекрестных оптических помех, измеренных при одном диаметре изгиба световода. Разброс значений составляет 10–15 дБ. Это связано с тем, что, как было отмечено в пункте 4.1.2, на величину перекрестных помех влияют условия намотки световода, то есть различная ориентация поперечного сечения относительно направления изгиба. Значение перекрестных оптических помех в световоде со слоем с пониженным показателем преломления в среднем на 20 дБ меньше, чем в световоде без слоя с пониженным показателем преломления. При диаметре намотки световода 16 см средняя величина перекрестных помех в световоде без слоя с пониженным показателем преломления.

Как видно из рисунка 4.10, с уменьшением диаметра изгиба в обоих световодах снижается величина перекрестных оптических помех. Это связано с тем, что наклон эквивалентного профиля показателя преломления (рисунок 4.5в) возрастает с уменьшением диаметра изгиба световода согласно (4.12). При этом возрастает разность эффективных показателей преломления мод соседних сердцевин, а величина

перекрестных помех снижается. Уменьшение диаметра изгиба световода от 16 до 5 см приводит к снижению перекрестных помех в среднем на величину порядка 5 дБ.

В таблице 4.1 приведены значения перекрестных помех между сердцевинами 1-0, 1-2, 1-3 и 1-4 (рисунок 4.10) при вводе излучения в сердцевину 1 при намотке световода на катушку диаметром 16 см. Величина перекрестных помех снижается с увеличением расстояния между сердцевинами.

перекрестиве помехи		ty pasmin	ыми сердце	Drinamin
	1-0	1-2	1-3	1-4
Световод без барьерного слоя	-12,3	-12,9	-24,1	-35,6
Световод с барьерным слоем	-35,8	-37,3	<-70	<-70

Таблица 4.1
Перекрестные помехи (лБ) межлу различными серлиевинами

Следует отметить, что после создания новой концепции пространственного уплотнения каналов, в которой скорость передачи данных по одному световоду зависит от числа сердцевин внутри поперечного сечения световода, идея об использовании снижения перекрестных оптических помех с помощью барьерного слоя показателя преломления одновременно была выдвинута несколькими группами авторов [177, 198, 199], в том числе и коллективом соавторов, в который входит автор настоящей работы [177] (дата приоритета заявки, поданной автором настоящей работы [177], является более ранней, чем дата публикации заявок других авторов [198, 199].) Таким образом, введение барьерного слоя для снижения перекрестных оптических помех было предложено автором (в соавторстве) настоящей работы одновременно с другими группами исследователей.

Световоды со слоем с пониженным показателем преломления были реализованы также в ряде работ других научных групп [200, 201]. Результаты работы [201], а также сравнение результатов работы [200] с результатами работ [202] и [203] (в которых были изготовлены световоды с такими же параметрами, как и в работе [121], но без барьерного слоя) показывает, что введение барьерного слоя показателя преломления приводит к снижению перекрестных помех на величину порядка 20 дБ. Эти результаты соответствуют результатам, полученным в настоящей работе (пункт 4.1.4.3), несмотря на различие в параметрах световодов.

Использование барьерного слоя показателя преломления позволило 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 [204]. В 2015 году с использованием моногосердцевинного световода с 22 одномодовыми сердцевинами достигнута скорость передачи информации 2,15 Пбит/с [205]. Еще большей скорости передачи данных удалось достигнуть за счет использования многосердцевинного световода с многомодовыми сердцевинами [206] – 10,16 Пбит/с. Ожидается, что технология пространственного уплотнения каналов не только увеличит скорость передачи данных по одному световоду, но и в будущем позволит значительно сократит затраты на прокладку новых линий связи.

4.2 Многосердцевинный волоконный световод с прямоугольным поперечным сечением

4.2.1 Снижение перекрестных помех в многосердцевинном световоде с различными параметрами сердцевин за счет прямоугольной формы поперечного сечения

Как было отмечено в обзоре литературных данных, уменьшить перекрестную связь возможно путем фазового рассогласования между модами соседних сердцевин, то есть за счет использования сердцевин с различными постоянными распространения (эффективными показателями преломления) мод [100]. Однако на величину фазового рассогласования между модами соседних сердцевин оказывают влияние изгибы световода, которые всегда присутствуют в волоконно-оптическом кабеле и имеют неконтролируемый характер. При этом если в световоде с различными параметрами соседних сердцевин в прямом положении наблюдается малое значение перекрестных помех за счет значительной разницы постоянных распространения мод соседних сердцевин, то в изогнутом положении перекрестные помехи могут возрастать за счет сближения постоянных распространения мод вплоть до наступления условия фазового согласования и резкого роста перекрестных помех [103, 104, 105]. Поскольку изменение величины перекрестных помех, связанное с изменением разницы постоянных распространения мод за счет изгиба, трудно контролировать, использование фазового рассогласования мод соседних сердцевин может оказаться неэффективным с точки зрения снижения перекрестных помех в световодах с круглым поперечным сечением.

Как уже отмечалось в обзоре литературы, в работе [106] была упомянута возможность контроля перекрестных помех, вызванных изгибом, за счет существования преимущественного направления изгиба из-за некруглой формы поперечного сечения световода. Однако автором настоящей диссертационной работы в литературе не найдено конкретных исследований, посвященных практической реализации данного подхода. В настоящей работе проводится исследование структуры гетерогенного многосердцевинного световода с прямоугольным поперечным сечением и сердцевинами, расположенными в один ряд. Автором настоящей работы с соавторами

экспериментально показано, что наличие преимущественного направления изгиба в световоде с прямоугольным поперечным сечением позволяет избежать увеличения перекрестных помех при изгибе такого световода [179].

Следует отметить, что конструкция гетерогенного многосердцевинного световода с прямоугольным поперечным сечением и сердцевинами, расположенными в один ряд, была теоретически предложена в работе [207]. Такие световоды перспективны для использования в трактах передачи сигнала в центрах хранения и обработки информации, поскольку геометрия расположения сердцевин повторяет геометрию расположения приемно-передающих устройств, что может облегчить стыковку многосердцевинного световода с матрицей источников и приемников сигнала. Кроме того, структура световода с прямоугольным поперечным сечением позволяет неограниченно увеличивать количество сердцевин без потери гибкости световода, поскольку увеличение количества сердцевин приводит к увеличению размера поперечного сечения только вдоль одного направления. Однако в данной работе не было отмечено, что с помощью данной структуры возможно снижение перекрестных оптических помех, вызванных изгибом. Кроме того, данные о практической реализации такой структуры отсутствуют. В работе [208] была предложена и изготовлена похожая структура многосердцевинного световода, однако параметры сердцевин данного световода были одинаковы. Данный световод предназначался для создания мощных лазеров и усилителей, сердцевины световода были активированы ионами иттербия.

На рисунке 4.11а изображен многосердцевинный световод с прямоугольным поперечным сечением и сердцевинами, расположенными в один ряд вдоль оси Х. На рисунке 4.11б изображен профиль показателя преломления неизогнутого световода. Пунктиром показаны эффективные показатели преломления мод сердцевин. На рисунках 4.11в и 4.11д показаны многосердцевинные световоды, изогнутые, соответственно, вокруг оси Z', перпендикулярной оси X, и вокруг оси Z, параллельной оси X. На рисунках 4.11г и 4.11е показаны эквивалентные профили показателя преломления для световода, изогнутого вокруг оси Z' и Z соответственно. При изгибе вокруг оси Z', радиальное направление изгиба **R** параллельно оси X и $\theta=0$ в выражении (4.12) и эквивалентный профиль показателя преломления определяется формулой:

$$n_{effx} = n(r,\theta) \left(1 + \frac{x}{R}\right), \tag{4.13}$$

где х – координата вдоль оси X (формула (4.13) переходит в формулу (4.12), если возвести правую и левую часть (4.13) в квадрат и пренебречь членом x²/R²).



Рисунок 4.11. Световод с прямоугольным поперечным сечением, а – неизогнутый и 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). Как видно из рисунка 4.11г, изгиб приводит к снижению разности эффективных показателей преломления мод для некоторых пар соседних сердцевин. В случае, если световод изогнут вокруг оси Z, параллельной оси X, радиальное направление изгиба **R** перпендикулярно оси X, θ =90°, и эквивалентный профиль показателя преломления (рисунок 4.11е) практически не отличается от профиля показателя преломления неизогнутого световода (рисунок 4.11б).

При достаточно большом отношении длин сторон поперечного сечения a/b световод будет изгибаться только вокруг оси, параллельной длинной стороне поперечного сечения, как показано на рисунке 4.11д. При изгибе вокруг оси Z, параллельной длинной стороне поперечного сечения, не будет происходить сближения постоянных распространения (эффективных показателей преломления) мод соседних сердцевин, условие фазового рассогласования мод не изменится и не будет происходить возрастание перекрестных помех.

Таким образом, в отличие от гетерогенного световода с круглым поперечным сечением, в гетерогенном световоде с прямоугольным поперечным сечением и сердцевинами, расположенными в один ряд, не будет происходить возрастание перекрестных помех при изгибе.

4.2.2 Изготовление многосердцевинного световода с прямоугольным поперечным сечением

Многосердцевинный световод прямоугольного поперечного сечения был изготовлен методом сборки. На рисунке 4.12 представлено поперечное сечение сборочной заготовки. Она состоит из опорной трубки из кварцевого стекла 4, в которой размещены стержни из нелегированного кварцевого стекла 1 и стержни с сердцевинами двух типов 2a и 2b. Стержни 2a были изготовлены путем перетягивания на меньший диаметр заготовки, полученной методом MCVD, с разницей показателей преломления сердцевины и оболочки 0,0045, стержни 2b – из заготовки с разницей показателей преломления 0,006. Для того чтобы предотвратить поворот стержней 2a и 2b вокруг оси сборки, в трубку 4 вставлялись элементы 3 из кварцевого стекла полукруглого поперечного сечения. Затем сборка консолидировалась в стержень-заготовку.

После этого проводилась механическая шлифовка и полировка полученного стержня-заготовки для придания прямоугольной формы поперечного сечения. Размеры поперечного сечения заготовки после шлифовки и полировки составляли 4,8x15,3 мм, шероховатость поверхности заготовки – 100 нм.

Вытяжка полученной заготовки проводилась при температуре в печи 1850°С, скорости 21 м/мин, натяжение вытяжки при этом составило 3,2 Н. Торец полученного световода представлен на рисунке 4.13. Поперечное сечение после вытяжки световода

сохранило прямоугольную форму без существенного закругления углов прямоугольника. Размеры поперечного сечения многосердцевинного световода составляли 400х125 мкм. Примерные параметры двух типов сердцевин составили: для одного типа – диаметр 8,8 мкм, разница показателей преломления сердцевины и оболочки $\Delta n=0,0045$; для второго типа – диаметр 7,7 мкм, $\Delta n=0,006$. Расстояние между центрами соседних сердцевин составило 40 мкм. Измеренная длина волн отсечки первой высшей моды в световоде с разницей показателей преломления сердцевины и оболочки ∆n=0,0045 составила 1310 нм, в световоде с ∆n=0,006 – 1330 нм.

Большое расстояние между сердцевинами и небольшая длина отрезка полученного световода (150 м) привели к тому, что уровень перекрестных помех составил менее -70 дБ, то есть ниже уровня, при котором возможно проведение измерений с помощью имеющегося оборудования. Поэтому для исследования влияния изгиба световода на перекрестные помехи был изготовлен еще один световод с меньшим расстоянием между центрами соседних сердцевин.

Как и предыдущий, данный световод имел восемь сердцевин двух типов, попеременно расположенных друг с другом. В отличие от предыдущего световода, оба типа сердцевин имели одинаковую разность показателей преломления с оболочкой 0,005, разница эффективных показателей преломления мод соседних сердцевин достигалась за счет различных диаметров соседних сердцевин. Для сравнения влияния изгиба на перекрестные помехи был изготовлен световод круглого поперечного сечения. Световод круглого поперечного сечения был вытянут из стержня-заготовки, полученного после консолидации сборочной заготовки, но до механической обработки с целью получения прямоугольной формы поперечного сечения.

Фотографии торцов изготовленных световодов представлены на рисунке 4.14. Как видно, в процессе вытяжки световода не произошло существенной деформации формы поперечного сечения световода, форма сердцевин также сохранила форму круга. В многосердцевинном световоде с прямоугольным поперечным сечением размеры поперечного сечения составили 296х110 мкм.

Расстояние между центрами соседних сердцевин составило 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). Измеренная методом эталонного изгиба длина волны отсечки для сердцевин с диаметром 8,2 мкм находилась в диапазоне 1280–1300 нм, для сердцевин с диаметром 9,45 мкм – в диапазоне 1440–1470 нм.



Рисунок 4.12. Поперечное сечение сборочной заготовки для многосердцевинного световода с прямоугольным поперечным сечением.



Рисунок 4.13. Фотография поперечного сечения многосердцевинного световода, полученная с помощью электронного микроскопа.



Рисунок 4.14. Фотографии торцов многосердцевинных световодов с круглым и прямоугольным поперечным сечением.

Диаметр световода круглого поперечного сечения составлял 298 мкм. Параметры световода с круглым поперечным сечением немного отличались от параметров световода с прямоугольным сечением: расстояние между центрами соседних сердцевин в световоде с круглым сечением составляло 26,7 мкм, диаметры сердцевин 7,6 и 8,9 мкм. Измеренная длина волны отсечки для сердцевин с диаметром 7,6 мкм находилась в диапазоне 1200–1220 нм, для сердцевин с диаметром 8,9 мкм – в диапазоне 1360–1380 нм. Однако полученное 7%-ное различие в параметрах световодов круглого и прямоугольного поперечного сечения существенно не влияет на результаты исследований перекрестных оптических помех при изгибах.

4.2.3 Расчет критического радиуса изгиба для параметров изготовленных световодов

В случае, если световод изгибается вокруг оси Z' (рисунок 4.11в), существует диаметр изгиба, при котором наступает фазовый синхронизм между модами некоторых пар сердцевин, при котором эффективные показатели преломления мод этих сердцевин будут равны. При этом произойдет резкое возрастание перекрестных оптических помех между модами этих сердцевин. Для параметров изготовленных световодов был проведен расчет критического диаметра изгиба, при котором наступит условие фазового синхронизма. Расчет эффективных показателей преломления мод изогнутого световода осуществлялся с помощью пакета программ «Comsol Multiphysics». При расчетах были также учтены эластооптические эффекты, то есть изменение показателя преломления за счет возникновения механических напряжений в световоде при изгибе [191].

Рассчитанный критический диаметр изгиба для параметров световода с прямоугольным поперечным сечением (расстояние между центрами сердцевин 28,3 мкм, диаметры сердцевин 8,2 и 9,45 мкм, разность показателей преломления сердцевины и оболочки 0,005) составил 143 мм. Критический диаметр изгиба для параметров световода с круглым поперечным сечением (расстояние между центрами сердцевин 27,6 мкм, диаметры сердцевин 7,6 и 8,9 мкм, разность показателей преломления преломления сердцевины и оболочки 0,005) составил 118 мм.

4.2.4 Исследование влияния изгиба многосердцевинного световода на перекрестные оптические помехи

Измерение перекрестных помех в изготовленных световодах проводилось так, как описано в пункте 4.1.4.3. Перекрестные помехи измерялись в отрезке световода прямоугольного поперечного сечения длиной 50 м и в отрезке световода круглого поперечного сечения также длиной 50 м. Для исследования влияния изгиба на перекрестные помехи были проведены измерения при намотке световодов с диаметрами

50, 90, 130, 160, 190, 240 и 300 мм. Для того чтобы убедиться в том, что прямоугольная форма поперечного сечения обеспечивает необходимую ориентацию световода, производилась перемотка световода с катушки на катушку, оси катушек при этом были перпендикулярны. Натяжение световода при перемотке составило 0,7 Н.

На рисунке 4.156 показаны зависимости перекрестных помех от диаметра намотки исследуемых световодов. В ходе измерений излучение на входе вводилось сердцевину 5 (рисунок многосердцевинных световодов В 4.15a), перекрестные помехи измерялись для сердцевин 4 и 6. Измерения для других наборов соседних сердцевин совпадали с этими измерениями как в случае световода с прямоугольным поперечным сечением, так и в случае световода с круглым поперечным сечением. Значение перекрестных помех между соседними сердцевинами в световоде с прямоугольным поперечным сечением не зависели от диаметра намотки и лежали в диапазоне от -50 до -60 дБ. Таким образом, в световоде с прямоугольным поперечным сечением не наблюдалась зависимость перекрестных помех от диаметра намотки даже при диаметрах намотки, близких к критическому диаметру изгиба 143 мм.

Зависимость перекрестных помех от диаметра изгиба в световоде круглого поперечного сечения с линейным расположением сердцевин также представлена на рисунке 4.15б. Зависимости величины перекрестных помех для пар сердцевин 5 и 4 и 5 и 6 значительно различаются. Перекрестные помехи между сердцевинами 5 и 4 уменьшаются при приближении к критическому диаметру изгиба. При диаметре изгиба 130 мм, наиболее близком к расчетному критическому диаметру изгиба 118 мм, уровень перекрестных помех между сердцевинами 5 и 4 становится меньше измеряемой на имеющемся оборудовании величины -65 дБ. Перекрестные помехи между сердцевинами 5 и 6, наоборот, возрастают при приближении диаметра намотки световода к расчетному критическому диаметра намотки 130 мм.

Такая же зависимость перекрестных помех от диаметра изгиба световода наблюдалась и при вводе излучения в другие сердцевины. На рисунке 4.16 показаны значения перекрестных помех между соседними сердцевинами в 50-метровом отрезке световода круглого поперечного И 50-метровом отрезке световода сечения прямоугольного поперечного сечения, намотанных на катушку с диаметром 130 мм. Пары натуральных чисел по горизонтальной оси обозначают номера сердцевин, между которыми измерялись перекрестные помехи. Первое число – номер сердцевины, в которую вводилось излучение на входе световода, второе число – номер сердцевины, в которой измерялись перекрестные помехи. Перекрестные помехи в световоде с прямоугольным поперечным сечением приблизительно одинаковы для всех пар сердцевин и находятся на уровне -50 – (-60) дБ.



Рисунок 4.15. (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.



Рисунок 4.16. Перекрестные помехи между соседними сердцевинами в многосердцевинных световодах ■ – прямоугольного и ○ – круглого поперечного сечения, намотанных с диаметром 130 мм. Пары натуральных чисел по горизонтальной оси обозначают номера сердцевин, между которыми измерялись перекрестные помехи. Первое число – номер сердцевины, в которую вводилось излучение на входе световода, второе число – номер сердцевины, в которой измерялись перекрестные помехи.

В многосердцевинном световоде круглого поперечного сечения перекрестные помехи для пар сердцевин 1-2, 3-4, 5-6 и 7-8 находятся на уровне 0 дБ. Для пар сердцевин 2-3, 4-5 и 6-7 они меньше измеряемой (на имевшемся оборудовании) величины -65 дБ.

Чередование пар сердцевин с высоким и низким значением перекрестных помех связано с тем, что ориентация сердцевин относительно направления изгиба при намотке световода круглого сечения на катушку сохраняется вдоль всей длины световода или только ее части. В случае, если световод изогнут так, как показано на рисунке 4.17, даже если угол между радиальным направлением изгиба и осью X отличен от нуля, в эквивалентном профиле показателя преломления, определяемом выражением (4.12), между одними парами сердцевин происходит сближение эффективных показателей преломления мод, а между другими парами, наоборот, разность эффективных показателей преломления мод увеличивается. На рисунке 4.17 справа показан эквивалентный профиль показателя преломления, для которого разность эффективных показателей преломления мод в парах сердцевин 1-2, 3-4, 5-6 и 7-8 уменьшается, так же как и в эксперименте, за счет чего происходит увеличение перекрестных помех. В парах сердцевин 2-3, 4-5, 6-7 разность эффективных показателей преломления мод, наоборот, увеличивается, что приводит к снижению перекрестных оптических помех.

Перекрестные помехи между сердцевинами, расположенными через одну сердцевину (номера которых различаются на 2), в световодах круглого и прямоугольного сечения составляли величину менее -50 дБ.





Рисунок 4.17. Изогнутый многосердцевинный световод круглого поперечного сечения и его эквивалентный профиль показателя преломления.

Значительное возрастание перекрестных помех было обнаружено в световоде прямоугольного поперечного сечения при изгибе световода с диаметром менее 15 мм. Вместе с ростом перекрестных помех наблюдался рост изгибных оптических потерь. Измерение роста перекрестных помех производилось на отрезке световода длиной 2 м, на котором был сделан один виток соответствующего диаметра. Для измерения перекрестных помех сигнал вводился в сердцевину 5. Перекрестные помехи определялись по отношению мощности на выходе одной из сердцевин к мощности на выходе сердцевины, в которую вводился сигнал (сердцевины 5). Результаты измерения перекрестных помех, а также изгибных потерь, измеренных на одном витке световода, представлены на рисунке 4.18. Как видно, зависимость перекрестных помех от диаметра изгиба примерно одинакова для всех сердцевин, то есть не зависит от того, происходят ли перекрестные помехи между двумя соседними сердцевинами или между сердцевинами, между которыми расположена одна и более сердцевин. Перекрестные помехи возрастают примерно на 50 дБ при уменьшении диаметра изгиба световода от 15 до 5 мм.



Рисунок 4.18. Зависимость перекрестных помех и оптических потерь от диаметра изгиба световода. Числа на подписях к кривым: первое число (5) – номер сердцевины, в которую вводилось излучение, второе число – номер сердцевины, для которой производилось измерение перекрестных помех.
Возрастание перекрестных оптических помех при малых диаметрах изгиба световода связано, очевидно, с возрастанием связи между модами оболочки и сердцевин. Это происходит при изгибе световода с прямоугольным поперечным сечением так, как показано на рисунке 4.11д. На рисунке 4.11е показан эквивалентный профиль показателя преломления вдоль оси X, в котором отсутствует наклон профиля, поскольку радиальное направление изгиба перпендикулярно оси X (в формуле (4.12) $\theta = \pi/2$). Однако эквивалентный профиль показателя преломления вдоль оси Y, для которой $\theta = 0$, будет иметь наклон, в результате чего при малых диаметрах изгиба будет достигаться равенство эффективных показателей преломления мод сердцевины и оболочечных мод. В результате будет происходить значительный переход мощности сначала из одной из сердцевин в моды оболочки, а затем из мод оболочки в моды других сердцевин. За счет этого будет происходить рост перекрестных оптических помех.

Выводы к главе 4

1. Предложен новый подход к снижению перекрестных оптических помех в многосердцевинных волоконных световодах, состоящий в использовании барьерного слоя с пониженным показателем преломления между сердцевинами.

2. Для экспериментального исследования влияния барьерного слоя разработана технология изготовления многосердцевинных световодов с барьерным слоем методом сборки. Изготовлены световоды, содержащий и не содержащий барьерный слой. Параметры и расположение сердцевин в изготовленных световодах совпадают.

3. Разработаны методики измерения оптических потерь, длины волны отсечки и перекрестных оптических помех в многосердцевинных волоконных световодах.

4. Исследовано влияние слоя с пониженным показателем преломления на величину перекрестных оптических помех в многосердцевинном световоде круглого поперечного сечения. 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.

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

6. 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 между сердцевинами при приближении радиуса изгиба световода К критическому существенно подавлен благодаря существованию преимущественного направления изгиба, связанного с прямоугольной формой поперечного сечения световода. 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.

7. В гетерогенном световоде круглого поперечного сечения с сердцевинами, расположенными в один ряд, обнаружен и объяснен эффект чередования пар сердцевин, в которых перекрестные помехи увеличиваются, с парами сердцевин, в которых перекрестные помехи снижаются при приближении радиуса изгиба световода к критическому.

8. 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 сердцевин сначала переходит в моды оболочки, а затем в моды соседних сердцевин.

ГЛАВА 5

СОЗДАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ СВЕТОВОДОВ

По материалам работ:

209**, 210**, 211**, 212**, 213**, 214**, 215*, 216**, 217**, 218**, 219**, 220*, 221**, 222*.

5.1 Линии задержки сигнала на основе многосердцевинного волоконного световода

Как уже было отмечено в литературным обзоре, волоконно-оптические линии задержки применяются для широкого класса задач, связанных с обработкой сигнала радиодиапазона, в задачах радиолокации, радиоэлектронного противодействия и т.д. Для ряда задач, связанных, например, с радиоэлектронным противодействием, где требуется создание линий задержки, которые являются составной частью бортового оборудования летательных аппаратов, стоит задача создания компактных линий задержки с улучшенными массогабаритными характеристиками.

В настоящем разделе приведено описание решения, предложенного автором настоящей работы в соавторстве, для создания компактных линий задержки [209]. Данное решение основано на использовании последовательного прохождения оптического сигнала по сердцевинам многосердцевинного световода. Это позволяет сократить длину световода в линии задержки в число раз, равное количеству сердцевин, а следовательно, сократить массу и габариты устройства. Кроме того, использование многосердцевинного световода вместо набора отдельных односердцевинных световодов позволяет снизить влияние внешних факторов, например пространственного расположения световода (макро- и микроизгибов) и перепада температуры, на разность времен задержки между каналами при создании многоканальной линии задержки.

Для создания линии задержки на многосердцевинном волоконном световоде необходимы устройства ввода-вывода, осуществляющие ввод и вывод излучения из каждой сердцевины в отдельные односердцевинные световоды. Часть настоящей главы посвящена описанию разработанной технологии для создания таких устройств и их стыковки с многосердцевинными световодами.

Постановка проблемы, а именно формулировка необходимости снижения массы и габаритов волоконно-оптической линии задержки, принадлежит соавтору работ Белкину М.Е. Автором настоящей работы предложено решение данной проблемы. Также автором настоящей работы осуществлялся выбор и разработка конструкции волоконно-оптической линии задержки и устройств ввода-вывода излучения. Координация работ по проектированию и изготовлению многосердцевинного волоконного световода

осуществлялась Семеновым С.Л. Измерение параметров многосердцевинного световода, участие в изготовлении устройств ввода-вывода и создании линии задержки осуществлялось Астаповичем А.С. и Журавлевым С.Г. под непосредственным руководством автора настоящей работы. Клюшником Д.А. под непосредственным руководством Белкина М.Е. осуществлялись постановка и проведение измерений параметров изготовленной волоконно-оптической линии задержки.

5.1.1 Принцип работы линии задержки на многосердцевинном волоконном световоде

Как уже было отмечено, для снижения габаритов и массы волоконно-оптической линии задержки может быть использовано последовательное прохождение сигнала по сердцевинам многосердцевинного световода, каждая сердцевина которого является не связанным с другими каналом передачи сигнала [209].

Схема линии оптической задержки на многосердцевинном световоде 5.1. Входной оптический представлена на рисунке сигнал, модулированный радиосигналом с помощью электрооптического модулятора (ЭОМ), подается в одну из сердцевин семисердцевинного световода. Проходя по первой сердцевине, оптический сигнал приобретает временную задержку т=L·n_g/c, где L – длина отрезка световода, n_g – групповой показатель преломления моды сердцевины. После прохождения всей длины световода сигнал подается в следующую сердцевину, проходя по которой, приобретает задержку 2т. Таким образом, после прохождения всех семи сердцевин сигнал приобретает задержку 7т. Очевидно, что в случае семисердцевинного световода для получения требуемого времени задержки необходим отрезок световода, длина которого в семь раз меньше, чем при использовании для создания линии задержки односердцевинного световода.

Уменьшение длины световода приведет к снижению массы и габаритов линии задержки, что особенно важно для бортовых применений этих устройств. Можно оценить эффект от снижения длины световода при замене односердцевинного световода на семисердцевинный. Для оценок выберем, например, время задержки, равное τ =100 мкс. Поскольку

L=c· $\tau/n_g \approx 3.10^8$ м/c·100·10⁻⁶c /1,458=20 км,

то для обеспечения временной задержки сигнала 100 мкс необходимо двадцать километров односердцевинного световода. Можно оценить приблизительный объем и массу 20 км односердцевинного световода по следующей формуле:

$$M = L\left\{\rho_s \pi \left(\frac{D_s}{2}\right)^2 + \rho_p \pi \left(\left(\frac{D_p}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_s}{2}\right)^2\right)\right\} , \qquad (5.1)$$

где D_s – диаметр оболочки из кварцевого стекла, ρ_s – плотность кварцевого стекла, равная 2,2 г/см³, D_p – диаметр полимерной оболочки, ρ_p – плотность полимерного покрытия.



Рисунок 5.1. Схема волоконно-оптической линии задержки на многосердцевинном световоде.

Минимальный диаметр оболочки из кварцевого стекла, при котором с волоконным световодом удобно работать, составляет 80 мкм. В качестве полимерного покрытия обычно используется акрилатное полимерное покрытие. При комнатной температуре его плотность составляет около 1 г/см³. Для обеспечения достаточной механической прочности толщина полимерного покрытия должна составлять не менее 50 мкм. Следовательно, масса 20 км волоконного световода с диаметром оболочки из кварцевого стекла 80 мкм и полимерной оболочки 180 мкм составляет 629 г. Объем такого световода будет составлять 508 см³.

При использовании семисердцевинного световода для получения такой же временной задержки сигнала требуется длина световода в семь раз меньше, то есть 2,86 км. В отличие от односердцевинного световода, оболочка из кварцевого стекла которого может быть уменьшена до диаметра 80 мкм, для семисердцевинного световода для предотвращения оптической связи между модами соседних сердцевин необходима оболочка большего диаметра. Для семисердцевинных световодов внешний диаметр оболочки составляет около 200 мкм [202, 203]. При этом толщина полимерного покрытия, необходимого для обеспечения механической прочности и надежности световода, также может составлять 50 мкм. Масса и объем семисердцевинного световода с диаметром оболочки из кварцевого стекла 200 мкм, диаметром полимерной оболочки 300 мкм и длиной световода 2,86 км составляют 309 г и 202 см³. Полученные значения более чем в два раза меньше значений, полученных для односердцевинного световода – 629 г и 508 см³.

Еще более существенное снижение массы и объема световода может быть достигнуто за счет использования многосердцевинного световода с бо́льшим количеством сердцевин и/или с уменьшенным расстоянием между сердцевинами. Однако даже использование семисердцевинного световода вместо односердцевинного позволяет существенно сократить длину световода. Поэтому для практической реализации линии задержки был выбран семисердцевинный световод с сердцевинами, расположенными в гексагональном порядке.

5.1.2 Изготовление многосердцевинного волоконного световода для линии задержки

Наиболее широко используемыми настоящее В время являются два технологических процесса, с помощью которых могут быть изготовлены заготовки многосердцевинных световодов – процесс сборки и перетяжки (stack and draw), используемый также для создания микроструктурированных световодов, и процесс (drilling), активно используемый сверления ДЛЯ изготовления световодов с напрягающими стержнями («Панда»). В работе [193] проводится сравнительный анализ этих двух методов. Как отмечено в работе [193], с помощью метода сверления проще получить более точное расположение сердцевин В поперечном сечении многосердцевинного световода (меньшие вариации расстояния между центрами сердцевин), следовательно, стыковку различных а меньшие потери на многосердцевинного световода и устройства ввода-вывода. Кроме того, метод сверления требует меньшего расхода материала, который представляет собой дорогостоящее кварцевое стекло высокого качества.

Поэтому для создания многосердцевинного волоконного световода для линии задержки был выбран метод сверления. Схема процесса создания многосердцевинных световодов методом сверления изображена на рисунке 5.2. В стержне из нелегированного кварцевого стекла (1) высверливаются отверстия (2), оси которых Оо параллельны оси стержня Ос. Для этого обычно используется исходный стержень (1) из

синтетического кварцевого стекла марки F-300 с диаметром порядка 24 мм и длиной до 180 мм. В НЦВО РАН процесс сверления осуществляется с помощью установки "Вихрь", позволяющей проводить сверление заготовок из стекла с помощью полого алмазного сверла. В исходном стержне (1) высверливаются семь отверстий диаметром около 2,5 мм, центры которых располагаются на расстоянии порядка 6 мм. Затем для снижения шероховатости и удаления загрязнений производится химическое травление внутренней поверхности отверстий. В полученные отверстия вставляются стержни (3) с легированной оксидом германия сердцевиной (4), полученные путем перетягивания на стеклодувном станке заготовки односердцевинного световода, изготовленной методом осаждения кварцевого стекла из газовой фазы. Диаметры стержней составляют 2,2 мм, диаметры сердцевины стержней – около 1 мм. Затем собранная заготовка герметично закрывается с одной стороны с помощью приспособления (5), с другой стороны в отверстия подается пониженное давление, заготовка нагревается в печи (6) до 2000° С и консолидируется в стержень-заготовку. Затем из полученной заготовки вытягивается многосердцевинный световод с помощью оборудования для вытяжки световодов из кварцевого стекла.

Фотография торца световода, изготовленного описанным методом, представлена на рисунке 5.3. Геометрические параметры структуры поперечного сечения световода, определенные по фотографии торца, составили: диаметры сердцевин 8,2 мкм; расстояние между центрами соседних сердцевин 47 мкм; диаметр оболочки из кварцевого стекла 182 мкм. Разница показателей преломления сердцевины и оболочки, определенная по профилю показателя преломления исходной односердцевинной заготовки, составила 0,0055. Диаметр полимерного покрытия составил 350 мкм. Расстояние от центра сердцевины до края оболочки из кварцевого стекла составило 44 мкм.



Рисунок 5.2. Схема изготовления многосердцевинного волоконного световода методом сверления.



Рисунок 5.3. Поперечное сечение многосердцевинного волоконного световода.

5.1.3 Измерение характеристик многосердцевинного волоконного световода для линии задержки

5.1.3.1 Измерение длины волны отсечки первой высшей моды, оптических потерь и перекрестных помех между сердцевинами

При отработке технологии создания световодов для линии задержки сигнала была изготовлена серия семисердцевинных световодов с близкими параметрами. В одном из изготовленных световодов, торец которого показан на рисунке 5.3, для центральной и боковых сердцевин измерена длина волны отсечки первой высшей моды согласно ГОСТ Р МЭК 60793-1-44-2013 метод С по методике эталонного изгиба. В качестве подводящего световода был использован многомодовый световод, описанный в пункте 4.1.4.1, который пристыковывалось к торцу исследуемого световода с помощью трехкоординатного транслятора. Измеренные таким образом длины волн отсечки первой высшей моды в каждой из сердцевин находились в диапазоне 1340–1380 нм.

Для всех сердцевин многосердцевинного световода с использованием рефлектометра EXFO FTB-400 проводилось измерение затухания сигнала так, как описано в пункте 4.1.4.2. При этом, поскольку значения оптических потерь с двух сторон световода различались мало, не проводилась идентификация того, в какой именно из боковых сердцевин проводится измерение. Оптические потери в центральной сердцевине составили 0,84 дБ/км на длине волны 1310 нм и 0,87 дБ/км на длине волны 1550 нм. Оптические потери в боковых сердцевинах находились в диапазоне от 1,4 до 1,6 дБ/км на длине волны 1310 нм и от 2,1 до 2,4 дБ/км на длине волны 1550 нм.

Оптические потери в боковых сердцевинах значительно превышали оптические потери в центральной сердцевине многосердцевинного световода. Для выяснения причин этого различия в центральной и одной из боковых сердцевин был измерен спектр затухания сигнала согласно ГОСТ Р МЭК 60793-1-40-2012 метод А (метод обрыва) в диапазоне длин волн 800–1700 нм. При этом для ввода излучения в отдельные сердцевины многосердцевинного световода использовалась стыковка со стандартным световодом SMF-28. Измеренные спектры оптических потерь приведены на рисунке 5.4.

Как видно из рисунка 5.4, оптические потери в боковой сердцевине резко возрастают с ростом длины волны. Такая спектральная зависимость оптических потерь свидетельствует о том, что более высокий уровень оптических потерь в боковых сердцевинах связан с вытеканием (туннелированием) излучения из боковой сердцевины в полимерную оболочку вследствие недостаточного расстояния от центра этой сердцевины до края оболочки из кварцевого стекла – 44 мкм. При увеличении длины волны возрастает доля мощности моды, проникающая в полимерную оболочку с бо́льшим, чем у кварцевого стекла, показателем преломления. Это и приводит к увеличению оптических потерь с ростом длины волны.



Рисунок 5.4. Спектр оптических потерь в центральной (сплошная линия) и боковой (пунктирная линия) сердцевинах семисердцевинного световода.

В дальнейшем при изготовлении многосердцевинных световодов такого типа было учтено это обстоятельство, и расстояние от центра боковой сердцевины до края оболочки из кварцевого стекла было увеличено до 60 мкм, при этом значение оптических потерь в центральной и боковых сердцевинах сравнялось. Был достигнут уровень оптических потерь в каждой сердцевине 0,5 дБ/км на длине волны 1550 нм.

Измерения уровня перекрестных помех проводились так, как описано в пункте 4.1.4.3. Измерения проводились на длине волны излучения 1550 нм. Значение перекрестных помех в каждой из боковых сердцевин лежало в диапазоне от -52 до -56 дБ при длине световода 1560 м (или примерно от -54 до -58 дБ/км), что соответствует уровню перекрестных помех, полученному в работах [202, 203] в световоде, параметры которого примерно соответствуют параметрам изготовленного многосердцевинного световода (таблица 1.2, Глава 1).

Следует отметить, что кроме оптических свойств важной характеристикой световода является прочность, то есть напряжение, необходимое для разрушения световода, а также надежность, то есть время срока службы световода или время до его разрушения. Измеренная стандартными методами с помощью разрывной машины "Instron" прочность полученных многосердцевинных световодов соответствует прочности обычных световодов и составляет около 5,5 ГПа. Однако для оценки надежности, то есть срока службы, для изготовленных многосердцевинных световодов

должны применяться специальные методики, отличные от методик оценки срока службы телекоммуникационных световодов. Это связано с тем, что, в отличие от телекоммуникационных световодов, многосердцевинные световоды для линии задержки планируется использовать намотанными на катушку. При этом с целью снижения габаритов аппаратуры желательно максимально уменьшить диаметр катушки. При намотке на катушку с малым диаметром световод подвержен напряжениям, связанным с изгибом, которые значительно влияют на скорость роста трещин на поверхности оболочки из кварцевого стекла. Дополнительный рост напряжений по сравнению с телекоммуникационными световодами, диаметр которых составляет 125 мкм, связан также с увеличенным диаметром многосердцевинного световода – 200–250 мкм. Для оценки срока службы многосердцевинного световода может быть применена методика, в которой применяется перемотка световода с изгибом [216].

5.1.3.2 Измерение разности оптических задержек между сердцевинами

В изготовленном многосердцевинном световоде проводилось измерение разности оптических задержек между сердцевинами. Измерение разности задержек между сердцевинами представляет интерес как с практической точки зрения для создания, например, многоканальных линий задержки [112], так и с точки зрения изучения однородности полученного многосердцевинного световода, то есть того, насколько различие параметров сердцевин, которые всегда присутствуют в многосердцевинном световоде, могут повлиять на величину задержки сигнала.

В рамках настоящей работы для измерения разности величины времени задержки сигнала между модами соседних сердцевин предложено использовать интерферометр Маха–Цендера [223, 224]. Принцип измерения задержки основан на определении изменения воздушной части длины плеча интерферометра, необходимой для получения интерференционной картины от низкокогерентного источника излучения, при последовательном введении в данное плечо различных сердцевин одного и того же отрезка многосердцевинного световода.

На рисунке 5.5 представлена схема установки для измерения разности оптических задержек методом низкокогерентной интерферометрии на основе интерферометра Маха–Цендера. В качестве широкополосного источника излучения 1 использовался суперлюминесцентный полупроводниковый диод, с центральной длиной волны 1530 нм и шириной спектра излучения 50 нм. Его излучение делилось на волоконном ответвителе 2 в равном соотношении между двумя плечами интерферометра Маха–Цендера. В первом (измерительном) плече излучение из односердцевинного световода 3 вводилось в измеряемую сердцевину исследуемого многосердцевинного световода 4 путём стыковки торцов на прецизионном трехкоординатном трансляторе 5. Положение

155

измеряемой сердцевины контролировалось по боковому изображению исследуемого и подводящего световодов в месте стыковки в двух перпендикулярных направлениях. На выходе измеряемой сердцевины многосердцевинного световода 4 излучение преобразовывалось в коллимированный пучок, а затем поступало в регулируемую линию задержки 6. Регулируемая линия задержки 6 представляла собой уголковый отражатель, установленный на механическом модуляторе, осуществляющем перемещение уголкового отражателя вдоль оси Х. Пройдя линию задержки и отразившись от металлического зеркала 7, излучение поступало на полупрозрачную делительную пластину 8.



Рисунок 5.5. Схема установки для измерения разности оптических задержек между сердцевинами.

Во втором (опорном) плече излучение проходило по отрезку компенсационного односердцевинного световода 9, длина которого примерно равнялась длине исследуемого многосердцевинного световода. На выходе световода 9 излучение также преобразовывалось в коллимированный пучок и затем поступало на делительную пластину 8, где складывалось с излучением, прошедшим измерительное плечо интерферометра. После делительной пластины сложенное излучение попадало на фотоприемник 10, с которого детектированный сигнал визуально наблюдался на осциллографе 11.

В случае, если длины плеч интерферометра различаются на величину, большую, чем длина когерентности источника излучения 1, происходило сложение некогерентных пучков и в плоскости фотоприемника не возникало интерференционной картины. Для достижения условия интерференции, то есть равенства плеч интерферометра,

измерительного плеча интерферометра проводилось изменение длины путем перемещения узла 6 вдоль оси Х. Когда разница плеч составляла величину, меньшую, длина когерентности источника 1, в плоскости фотоприемника возникала чем интерференционная картина. Поскольку размер чувствительной области фотоприемника сравним с шириной интерференционных полос, то под воздействием внешних факторов, вызывающих флуктуацию длин плеч интерферометра и изменение положения интерференционных полос, сигнал на фотоприемнике испытывал резкие скачки. Это затрудняло наблюдение максимума сигнала, соответствующего совпадению плеч интерферометра. Поэтому для усреднения сигнала и наблюдения его огибающей осуществлялось малое периодическое изменение длины (модуляция) измерительного плеча интерферометра с амплитудой, сравнимой с длиной когерентности источника. Модуляция осуществляется путем перемещения уголкового отражателя с помощью электромеханического модулятора с частотой 20 Гц с амплитудой, превышающей длину когерентности источника излучения. Длина когерентности используемого в данной установке широкополосного источника согласно [225] составляла около 50 мкм, амплитуда модуляции электромеханического модулятора была 100-300 мкм.

В начале измерения в измерительное плечо интерферометра вводилась одна из сердцевин многосердцевинного световода. При этом в опорное плечо устанавливался односердцевинный компенсационный световод стандарта G.652 (SMF-28), длина которого с точностью 0,5 м соответствовала длине многосердцевинного световода. Затем осуществлялось выравнивание оптических длин плеч интерферометра путем перемещения узла 6 вдоль оси Х до достижения на фотоприемнике сигнала, Затем соответствующего появлению интерференции. В измерительное плечо интерферометра вводилась другая сердцевина многосердцевинного световода. Если оптическая длина этой сердцевины оказывалась отличной от оптической длины первой сердцевины, баланс длин плеч интерферометра нарушался, вследствие чего нарушалось условие интерференции. Затем, путем изменения длины воздушной части измерительного плеча за счет перемещения узла 6 вдоль оси Х, снова осуществлялось балансирование длин плеч интерферометра до появления интерференционного сигнала.

Измерив разность длин воздушной части измерительного плеча интерферометра при введении в него различных сердцевин Δx , то есть разницу в положении узла 6 вдоль оси X, можно определить разность оптических задержек между сердцевинами:

$$\Delta \tau = 2\Delta x n_{gair} / c, \qquad (5.2)$$

где c – скорость света, n_{gair} – групповой показатель преломления воздуха ($n_{gair} \approx 1$).

Относительную разность оптических задержек между сердцевинами δτ можно оценить по следующей формуле:

$$\delta \tau = \frac{\Delta \tau}{\tau} \cdot 100\% = 2\Delta x n_{gair} / (Ln_g) \cdot 100\%, \tag{5.3}$$

где L – длина измеряемого отрезка многосердцевинного световода, τ – величина задержки в сердцевине многосердцевинного световода, n_g – групповой показатель преломления основной моды сердцевины многосердцевинного световода. Для оценки можно принять n_g = 1,468, что равно групповому показателю преломления основной моды односердцевинного световода SMF-28, параметры которого близки к параметрам сердцевин исследуемого многосердцевинного световода.

Измерения разности задержек сигнала между сердцевинами проводились при намотке на катушки с радиусами 25, 80 и 160 мм отрезка многосердцевинного световода длиной 94 м. Полученные значения разности задержек $\Delta \tau_{k-0}$ и $\delta \tau_{k-0}$ между боковой сердцевиной с номером k и центральной сердцевиной «0» представлены в таблице 5.1.

5.1.3.3 Разность оптических задержек между сердцевинами и изгиб световода

Как видно из таблицы 5.1, три из боковых сердцевин семисердцевинного световода обеспечивают задержку сигнала больше, чем центральная сердцевина, а три – меньше. При этом номера сердцевин соответствуют порядку их расположения по угловой координате в поперечном сечении световода, как показано на рисунке 5.6.

На рисунке 5.6 приведены значения величин относительной разности задержек $\delta \tau_{k-0}$ между боковыми и центральной сердцевиной в соответствии с расположением сердцевин в поперечном сечении световода при радиусе намотки 25 мм. Сердцевины с отрицательной разницей задержек расположены слева от оси Y, показанной на рисунке 5.6, с положительной – справа. Модули разностей задержек с различными знаками практически совпадают в парах сердцевин 1-4, 2-5 и 3-6.

Для объяснения полученного распределения задержек В сердцевинах многосердцевинного световода необходимо обратиться к эффектам, связанным с изгибом. На рисунке 5.7 изображены поперечное сечение семисердцевинного световода, профиль показателя преломления вдоль оси Х неизогнутого световода и эквивалентный профиль показателя преломления световода, изогнутого вокруг оси Z, перпендикулярной оси Х. Как было отмечено в пункте 4.1.2, изогнутый световод оптически эквивалентен прямому световоду, профиль показателя преломления которого определяется формулой (4.12).

Таблица 5.1.

Абсолютная и относительная разность задержки между боковой и центральной сердцевинами многосердцевинного световода при различных радиусах намотки световода.

Номер сердцевины,	1	2	3	4	5	6
k						
Δτ, пс (R=25 mm)	74	570	492	-83	-575	-488
Δτ, пс (R=80 mm)	37	74	46	-32	-83	-46
Δτ, пс (R=160 mm)	46	101	64	-32	-101	-60
δτ _{k-0} , % (R=25 mm)	0,016	0,124	0,107	-0,018	-0,125	-0,106
δ $τ_{k-0}$, % (R=80 mm)	0,008	0,016	0,010	-0,007	-0,018	-0,010
δ $τ_{k-0}$, % (R=160 mm)	0,010	0,022	0,014	-0,007	-0,022	-0,013



Рисунок 5.6. Фотография торца семисердцевинного световода. Над каждой сердцевиной обозначен ее номер (Таблица 5.1). Ниже отмечены величины относительных разностей задержек δτ_{k-0} боковой и центральной сердцевин для радиуса намотки 25 мм.



Рисунок 5.7. а – торец семисердцевинного световода, б – неизогнутый световод, в – изогнутый световод, г – профиль показателя преломления вдоль оси X неизогнутого световода, д – эквивалентный профиль показателя преломления вдоль оси X изогнутого световода.



Рисунок 5.8. Расчетная (сплошная кривая) и измеренная (точки) зависимость максимальной относительной разности задержек в боковой и центральной сердцевинах δτ_{k-0max} от радиуса намотки световода.

Согласно [192] в случае, если сердцевины одинаковые, фазовые показатели преломления мод центральной и боковой сердцевин также связаны соотношением:

$$n_{effk} = n_{eff0} \left(1 + \frac{D}{R} \cos \phi_k \right), \tag{5.4}$$

где n_{eff0} – эффективный показатель преломления моды центральной сердцевины, n_{effk} – эффективный показатель преломления моды сердцевины с номером k, D – расстояние между центрами соседних сердцевин, ϕ_k – угол между радиальным направлением изгиба и радиус-вектором, проведенным к центру сердцевины с номером k (рисунок 5.7а). Для учета эластооптических эффектов, связанных с изгибом, в этой формуле необходимо радиус изгиба R заменить на эффективный радиус изгиба R_{eff} =1,28R [191].

Поскольку групповой показатель преломления моды сердцевины с номером k – $n_{gk} = n_{effk} - \lambda \frac{dn_{effk}}{d\lambda}$, то, используя (5.4), разность групповых показателей преломления мод боковой сердцевины с номером k и центральной сердцевины равна:

$$\Delta n_{gk-0} = n_{gk} - n_{g0} = \frac{D}{R_{eff}} \cos \varphi_k n_{g0}, \qquad (5.5)$$

где $n_{g0} = n_{eff0} - \lambda \frac{dn_{eff0}}{d\lambda}$ – групповой показатель преломления моды центральной сердцевины. Разность времен задержек между центральной и боковой сердцевиной световода длиной L, соответственно, равна:

$$\Delta \tau_{k-0} = \tau_k - \tau_0 = \frac{L}{c} \Delta n_{gk-0} = \frac{L}{c} \frac{D}{R_{eff}} \cos \varphi_k n_{g0}, \qquad (5.6)$$

где τ_k – величина задержки в сердцевине с номером k, τ_0 – величина задержки в центральной сердцевине.

Таким образом, величина задержки в боковой сердцевине, определяемая изгибом многосердцевинного световода, пропорциональна косинусу угла ϕ_k между радиальным направлением изгиба (осью X на рисунке 5.7а) и вектором, проведенным из центра поперечного сечения световода в центр боковой сердцевины. Если предположить, что при намотке многосердцевинного световода сохраняется радиальное направление изгиба по всей длине световода, то для сердцевин 5 и 2 (рисунок 5.7а), для которых модуль косинуса ϕ_k равен 1, разность задержки с центральной сердцевиной будет максимальна. При этом величина задержки в сердцевине 5, для которой $\phi_k=\pi$, будет меньше, чем в центральной, а в сердцевине 2, для которой $\phi_k=0$, наоборот, больше. Для остальных четырех сердцевин $\Delta \tau_{k-0}$ будет иметь промежуточное по модулю значение, для сердцевин 4, 6 - значение $\Delta \tau_{k-0}$ будет отрицательным, для сердцевин 1, 3 – положительным.

Таким образом, обнаруженное распределение времени задержки между боковыми сердцевинами может быть объяснено намоткой (изгибом) световода с сохранением (или

частичным сохранением) радиального направления изгиба по длине. Радиальное направление изгиба, которое приводит к полученному распределению задержек между сердцевинами, примерно совпадает с осью X на рисунке 5.6. Угол ϕ_k для сердцевин с примерно одинаковой по модулю и противоположной по знаку относительной разностью задержек $\delta \tau_{k-0}$ различается на π , то есть $\phi_1 = \phi_4 + \pi$, $\phi_2 = \phi_5 + \pi$, $\phi_3 = \phi_6 + \pi$. Максимальная относительная разность времен задержки $\delta \tau_{k-0max}$ наблюдалась для сердцевин 2 и 5 (рисунок 5.6), центры которых расположены наиболее близко к радиальному направлению изгиба.

При намотке многосердцевинного световода с радиусом 80 и 160 мм характер распределения величин разности задержек в различных сердцевинах такой же, как и при намотке с радиусом 25 мм. На рисунке 5.8 представлены максимальные (по модулю) измеренные значения разности задержек для трех радиусов изгиба многосердцевинного световода. Сплошной кривой показана рассчитанная по формуле (5.6) зависимость максимально возможной ($\phi_k=0$) разности задержки между центральной и боковой сердцевинами $\delta \tau_{k-0max}$ от радиуса изгиба. Несовпадение измеренного и рассчитанного значения для радиуса намотки 80 мм, очевидно, связано с частичным несохранением радиального направления изгиба световода при намотке на катушку.

Таким образом, полученное распределение разности задержек между боковыми и центральной сердцевиной позволяет предположить, что различие во времени задержки между сердцевинами связано только с изгибом световода. При этом очевидно, что измеренное различие в задержках разных сердцевин будет наблюдаться только в случае, если направление изгиба частично или полностью сохраняется по длине световода, то есть сохраняется ориентация радиального направления изгиба (ось X) относительно поперечного сечения световода.

Для предотвращения возникновения нежелательной разности задержек при намотке световода с малым радиусом, в процессе перемотки с катушки на катушку может быть применено закручивание световода вокруг оси. Это приведет к изменению углов ϕ_k для шести боковых сердцевин по длине световода от 0 до 2π , что позволит избежать нежелательного роста разности времени задержки.

5.1.4 Создание устройства ввода-вывода излучения для многосердцевинного волоконного световода

Для создания устройств на основе многосердцевинного световода, каждая сердцевина которого является независимым каналом передачи сигнала, необходимы устройства, осуществляющие ввод и вывод излучения из сердцевин многосердцевинного световода в отдельные односердцевинные оптические волокна. В настоящее время предложено три основных вида решений для создания устройств

ввода-вывода: устройства на объемных элементах (линзах) [226, 227, 228]; интегральнооптические устройства ввода-вывода [229, 230, 231] и волоконные устройства вводавывода, основанные на сплавлении и перетяжке [19, 232] и на травлении и склеивании [233, 234, 235] участков односердцевинных световодов. Для реализации нами была выбрана волоконная конструкция устройства ввода-вывода, основанная на травлении и склеивании участков односердцевинных световодов [233, 234, 235]. Выбранная конструкция позволяет обеспечить достаточную механическую надежность, малые оптические потери и малый размер устройства ввода-вывода.

Схематичное изображение стыковки устройства ввода-вывода И многосердцевинного световода показано на рисунке 5.9. Устройство ввода-вывода состоит из односердцевинных световодов, сложенных вместе, оптический сигнал из каждой сердцевины многосердцевинного световода поступает В отдельный односердцевинный световод.

Для изготовления устройства ввода-вывода сначала изготавливался корпус устройства, представляющий собой капилляр из кварцевого стекла с воронкой (рисунок 5.10). Воронка изготавливалась при помощи раздувки участка капилляра из кварцевого стекла на стеклодувном станке, оснащенном горелкой, и последующего скалывания в центре раздутого участка. Воронка обеспечивает возможность введения световодов внутрь корпуса. Затем с отрезков односердцевинных световодов длиной 1-2 м с одного из концов на длине несколько сантиметров удалялось полимерное покрытие, на зачищенном участке с помощью плавиковой кислоты проводилось травление оболочки из кварцевого стекла до диаметра, равного расстоянию между центрами соседних сердцевин в многосердцевинном световоде. Затем внутрь корпуса устройства вводавывода вводился клей, а потом помещались семь участков односердцевинных уменьшенного световодов В результате травления диаметра, сложенных В гексагональном порядке.

Затем производилось отверждение клея с помощью ультрафиолетового излучения. После этого производилась полировка торца полученного устройства вводавывода. При этом геометрия расположения сердцевин односердцевинных световодов на торце устройства ввода-вывода соответствовала расположению сердцевин в многосердцевинном световоде (рисунок 5.11). Внешний вид устройства ввода-вывода, полученного описанным способом, показан на рисунке 5.12.



Рисунок 5.9. Схематичное изображение стыковки многосердцевинного световода (слева) и устройства ввода-вывода (справа) [235].



Рисунок 5.10. Устройство ввода-вывода (УВВ) после сборки.



Рисунок 5.11. Торец устройства ввода-вывода.



Рисунок 5.12. Внешний вид изготовленного устройства ввода-вывода.

Для соединения с устройством ввода-вывода конец многосердцевинного световода также заклеивался в капилляр из кварцевого стекла. Затем торцы устройства ввода-вывода и многосердцевинного световода стыковались, производилась юстировка, после которой торцы соединялись с помощью склеивания. На рисунке 5.13 показан внешний вид устройства ввода-вывода с присоединенным к нему многосердцевинным световодом.

Описанным способом для выбранного отрезка семисердцевинного световода длиной 1250 м были изготовлены устройства ввода-вывода. Затем устройства вводавывода были присоединены к торцам отрезка световода и измерены характеристики полученной сборки. В выбранном отрезке световода расстояние между центрами соседних сердцевин составляло 45 мкм. Отсечка первой высшей моды в каждой из сердцевин находилась в диапазоне 1400–1450 нм. Оптические потери в отрезке световода длиной 1250 м на длине волны 1550 нм, измеренные с помощью рефлектометра, составляли в центральной сердцевине 0,7 дБ (0,56 дБ/км), в каждой из боковых сердцевин – от 1 до 1,1 дБ (0,8–0,88 дБ/км). Значения перекрестных помех, измеренных в каждой из боковых сердцевин при вводе излучения в центральную сердцевину, представлены в таблице 5.2.

Устройства ввода-вывода с расстоянием между центрами сердцевин, равным расстоянию между центрами сердцевин в многосердцевинном световоде, были присоединены с двух сторон к отрезку световода путем юстировки и склеивания торцов. После соединения с первым устройством ввода-вывода измерялись оптические потери в каждом из каналов путем ввода излучения в соответствующий односердцевинный световод, являющийся выходом устройства ввода-вывода. Потери измерялись методом обрыва, то есть путем измерения мощности сигнала на выходе многосердцевинного световода и мощности в односердцевинном световоде на входе. Для нахождения величины оптических потерь в месте соединения первого устройства ввода-вывода из измеренных значений оптических потерь вычитались потери в сердцевинах световода (таблица 5.3). Затем производилось присоединение второго устройства ввода-вывода ко второму торцу многосердцевинного световода. После этого измерялись суммарные потери на канал, оптические потери на втором соединении вычислялись на основании этих измерений и значений оптических потерь на первом соединении и в отрезке многосердцевинного световода.



Рисунок 5.13. Внешний вид устройства ввода-вывода с присоединенным к нему многосердцевинным световодом.

Таблица 5.2.

Перекрестные оптические помехи в отрезке многосердцевинного световода длиной 1250

Номер	Перекрестные
сердцевины	помехи, дБ
1	-55,8
2	-54,0
3	-53,8
4	-53,0
5	-57,0
6	-55,7

M.

Таблица 5.3.

Оптические потери в линии задержки, изготовленной с использование отрезка многосердцевинного световода длиной 1250 м.

	Оптические	Оптические	Коэффициент	Оптические	Коэффициент	Суммарные	
	потери в	потери на	отражения на	потери на	отражения на	потери на	
	световоде	первом	первом	втором	втором	канал, дБ	
	длиной	соединении,	соединении,	соединении, соединении,			
	1250 м, дБ	дБ	дБ	дБ	дБ		
Α	0,7	0,6	-54,2	0,6	-60,0	1,9	
В	1,0	0,5	-55,5	0,6	-60,3	2,1	
С	1,0	0,9	-58,3	0,4	-50,9	2,3	
D	1,0	1,6	-60,0	0,9	-56,4	3,5	
E	1,1	1,3	-65,5	1,0	-57,5	3,4	
F	1,0	1,0	-56,9	1,1	-51,4	3,1	
G	1,0	0,5	-59,6	1,2	-49,2	2,7	

Значения оптических потерь в местах соединений и суммарные оптические потери в канале представлены в таблице 5.3. Видно, что и для первого и для второго соединения для пары сердцевин, расположенных рядом, оптические потери превышают значение 1 дБ. Это связано с неточной юстировкой по углу во время соединения световода и устройства ввода-вывода. Дальнейшая отработка процесса юстировки позволила снизить величину оптических потерь на стыковке. В таблице 5.4 приведен уровень минимальных оптических потерь на одной стыковке, которые удается получить с помощью разработанной технологии. Величина минимальных оптических потерь в каждой из сердцевин не превышает 0,6 дБ.

В таблице 5.3 также приведены значения коэффициентов отражения, измеренных в местах соединения многосердцевинного световода и устройств ввода-вывода с помощью оптического рефлектометра. Коэффициенты отражения не превышают -49 дБ, что соответствует коэффициентам отражения на стыковке торцов световодов в волоконно-оптических разъемах и приемлемо для большинства задач.

Также в полученной сборке проводилось измерение перекрестных помех между каналами, соответствующими центральной и боковой сердцевинам. Значения перекрестных помех представлены в таблице 5.5. Измеренные величины лежат в диапазоне от -52 до -55 дБ. Значения перекрестных помех, измеренные для многосердцевинного световода (Таблица 5.2), лежат в диапазоне от -53 до -57 дБ. Таким образом, измеренные значения перекрестных помех в световоде и в линии задержки практически совпадают, что говорит о том, что устройства ввода-вывода не влияют на величину перекрестных помех.

Таким образом, разработанные устройства ввода-вывода обеспечивают ввод и вывод излучения из сердцевин многосердцевинного световода в односердцевинные световоды с приемлемыми оптическими потерями и коэффициентом обратного отражения сигнала и не приводят к существенному увеличению перекрестных помех между каналами.

Таблица 5.4.

Минимальные значения оптических потерь, достигнутых на стыковке многосердцевинного световода и устройства ввода-вывода.

Номер сердцевины	Оптические потери на стыковке, дБ	Коэффициент отражения на стыковке, дБ
0 (центральная)	0,3	-53
1	0,4	-62,7
2	0,4	-47,9
3	0,3	-49,9
4	0,6	-50,8
5	0,4	-56,3
6	0,5	-57,3

Таблица 5.5.

Перекрестные помехи между каналами в линии задержки, изготовленной на многосердцевинном световоде длиной 1250 м.

	Перекрестные
	помехи, дБ
А	-
В	-52
С	-52
D	-53
Е	-53
F	-53
G	-55



Рисунок 5.14. а – схема торца и б – фотография торца устройства ввода-вывода для волоконного световода с девятнадцатью сердцевинами.

В настоящей работе впервые предложено использовать описанную технологию создания устройств ввода-вывода для создания устройств ввода-вывода для волоконного световода с девятнадцатью сердцевинами [217]. При связывании сборки, состоящей из девятнадцати односердцевинных световодов с одинаковым диаметром D, их расположение приобретает структуру, показанную на рисунке 5.14.а. Центральный световод, показанный на рисунке 5.14.а окружностью с центром в точке О, и шесть световодов внутреннего ряда, показанные окружностями с центрами в точках O'N, имеют гексагональное расположение, расстояние между центрами этих окружностей равно D. Двенадцать световодов внешнего ряда показаны окружностями с центрами в точках O''N и O'''N, которые лежат на окружности с радиусом R2=2 Λ sin(5 π /12). Если световоды внутреннего ряда касаются световодов внешнего ряда в точках AN и BN, световоды внешнего ряда с центрами в точках О"N и О"N касаются друг друга в точке CN, а прямая, проведенная через точки О и CN, проходит также через точку O'N, то нетрудно показать, что углы между касательными к окружностям с центрами в точках O''N и O'''N, проведенными через точку O и точки DM, составляют $2\pi/6$, откуда следует, что световоды внешнего ряда также касаются друг друга в точках DM. Длины отрезков, соединяющих центры соседних сердцевин световодов внешнего ряда, равны диаметру световодов D.

Расположение односердцевинных световодов, показанное на рисунке 5.14.а, соответствует минимальной длине нити 1, связывающей световоды, и, следовательно, состоянию устойчивого равновесия, поскольку отклонение от данной структуры приводит к возникновению сил, действующих со стороны нити 1 и стремящихся вернуть систему к исходной конфигурации. На рисунке 5.14.б показана фотография торца изготовленного устройства ввода-вывода.

5.1.5 Линии задержки сигнала на многосердцевинном волоконном световоде

Схема волоконно-оптической линии задержки на основе многосердцевинного световода представлена на рисунке 5.15. Основным элементом исследуемой волоконнооптической линии задержки является многосердцевинный световод (МС) с пристыкованными к нему с обеих сторон устройствами ввода-вывода (УВВ). Длина многосердцевинного световода составляет 1300 м. Фотография поперечного сечения семисердцевинного световода, полученная на электронном микроскопе, показана на вставке на рисунке 5.15. Параметры световода описаны в пункте 5.3. Внешний вид полученной линии задержки показан на рисунке 5.16.

В таблице 5.6 приведены величины оптических потерь в месте стыковки каждой из сердцевин многосердцевинного световода с устройствами ввода-вывода УВВ1 и УВВ2, оптические потери в световоде и суммарные оптические потери в каждом канале.

Как видно из таблицы 5.6, суммарные оптические потери при прохождении сигнала по всем семи каналам составляют около 30 дБ. Как было показано в пункте 5.4, эта величина может быть снижена за счет уменьшения оптических потерь на стыковку, оптические потери в световоде также могут быть снижены до уровня оптических потерь телекоммуникационных световодов.

· · · · · · · · · · · · · · · · · ·							
Номер сердцевины	1	2	3	4	5	6	7
	(центр.)						
Потери в сердцевине	0,8	2,1	2,2	2,4	2,2	2,3	2,3
(1550 нм), дБ/км							
Потери в УВВ1, дБ	0,8	1,6	1,3	1,5	1,4	1,8	1,7
Потери в УВВ2, дБ	0,9	0,6	0,6	1,1	1,6	0,6	0,5
Суммарные потери, дБ	2,5	4,3	4,1	5,0	5,2	4,7	4,5

Таблица 5.6.

Оптические потери в волоконно-оптической линии задержки длиной 1300 м.

Для тестирования волоконно-оптической линии задержки использовался аналоговый сигнал. Для его генерации было использовано излучение узкополосного полупроводникового лазерного источника (ПЛИ) на длине волны 1559,2 нм (рисунок 5.15), которое подавалось на электрооптический модулятор Маха-Цендера (ЭОМ). С помощью ЭОМ узкополосное оптическое излучение модулировалось последовательностью импульсов длительностью 1 мкс и частотой несущей 100 МГц, получаемой от генератора сигналов (ГС). Время между импульсами составляло 50 мкс. Осциллограмма сигнала после ЭОМ показана на вставке на рисунке 5.15. Мощность сигнала на выходе ЭОМ составляла около 10 мВт.

Для того чтобы обеспечить последовательное прохождение сигнала по всем сердцевинам, соответствующие выходы устройств ввода-вывода были соединены друг с другом. Сигнал после ЭОМ подавался по односердцевинному световоду в устройство ввода-вывода УВВ1, далее поступал в первую сердцевину С1 многосердцевинного световода МС. Пройдя по ней, оптический сигнал с помощью устройства ввода-вывода УВВ2 поступал в короткий отрезок односердцевинного световода ОС, а затем во вторую сердцевину многосердцевинного световода С2 и т. д.. Таким образом, с помощью односердцевинных световодов, являющихся выходами УВВ1 и УВВ2 и соединенных попарно, оптический сигнал последовательно проходил все сердцевины многосердцевинного волоконного световода. Затем оптический сигнал подавался на фотодетектор ФД, сигнал с выхода которого подавался на осциллограф Осц.



Рисунок 5.15. Схема волоконно-оптической линии задержки на многосердцевинном световоде (MC). На вставках – фотография торца МС и осциллограмма сигнала после электрооптического модулятора (ЭОМ).



Рисунок 5.16. Внешний вид волоконно-оптической линии задержки на многосердцевинном световоде.

171

Для измерения задержки сигнала синхронизирующий импульс от генератора сигналов ГС также подавался на осциллограф. Поскольку значительная величина оптических потерь в сердцевинах многосердцевинного световода и на его стыковках с устройствами ввода-вывода приводила к существенному ослаблению сигнала, в схему был включен эрбиевый волоконный усилитель У с усилением 13 дБ.

Полученное значение временной задержки при последовательном прохождении сигнала по всем семи сердцевинам многосердцевинного световода, измеренное по переднему фронту импульса, составило 45,0 мкс. Полученное значение оптической задержки соответствует расчетным значениям, полученным по формуле $\tau=7(L\cdot n_g)/c$, где $n_g = 1,468$ – групповой показатель преломления стандартного телекоммуникационного световода SMF-28, L=1300 м – длина световода. Расчетное значение задержки сигнала после прохождения семи сердцевин составляет 44,52 мкс. Разница расчетной и измеренной оптической задержек между каналами обусловлена дополнительной длиной эрбиевого усилителя и отрезков односердцевинных световодов ОС. Также была измерена величина временной задержки после прохождения одного, двух и т.д. каналов. Величина разности оптических задержек между соседними каналами составляла 6,43 мкс, что примерно соответствует расчетному времени задержки на длине 1300 м световода – 6,36 мкс.

Следует также отметить, что кроме изготовленной линии задержки оптического сигнала результаты, представленные в настоящей главе, а именно изготовленные многосердцевинные световоды и устройства ввода-вывода для них, могут быть использованы для уплотнения каналов в линиях связи и трактах передачи сигнала, а также для создания волоконно-оптических датчиков изгибной деформации [236, 237].

5.2 Одночастотные волоконные лазеры на композитном световоде, изготовленном методом «стержень в трубке» из фосфатного и кварцевого стекла

Несмотря на то что волоконные одночастотные лазеры являются предметом исследований и разработок уже несколько десятилетий, интерес к этой теме не ослабевает [238 , 239]. Значительные успехи в области создания одночастотных волоконных лазеров были достигнуты благодаря использованию световодов, целиком состоящих из фосфатного стекла [240]. Это связано с высокой концентраций редкоземельных ионов в фосфатном стекле. Высокие концентрации активных редкоземельных элементов позволяют получить высокий коэффициент усиления на единицу длины, что важно при создании одночастотных волоконных лазеров, в которых необходима малая длина резонатора.

В Главе 3 была показана возможность получения высокой эффективности генерации при достаточно небольшой длине активного световода нового типа – композитного волоконного световода, изготовленного методом «стержень в трубке» из фосфатного и кварцевого стекла. Несмотря на то что в процессе вытяжки таких световодов происходит взаимная диффузия фосфатного и кварцевого стекол, за счет чего состав стекла сердцевины значительно изменяется, концентрация оксида фосфора и активных редкоземельных ионов в сердцевине все равно еще намного больше, чем в световодах, обычно получаемых методом осаждения кварцевого стекла из газовой фазы. Благодаря высокой концентрации активных редкоземельных ионов такие световоды перспективны для создания одночастотных волоконных лазеров.

В настоящей главе показана возможность создания одночастотных волоконных лазеров на композитных световодах, легированных ионами эрбия. Для этого разработан и изготовлен композитный световод, одномодовый в окрестности длины волны 1550 нм, легированный ионами эрбия. С использованием данного световода показана возможность записи волоконных брэгговских решеток, в том числе с использованием излучения на длине волны 248 нм, непосредственно в сердцевине композитного световода. Изготовлены резонаторы лазеров, состоящие из брэгговских решеток, записанных непосредственно в активном волокне, и получена генерации в одночастотном линейно-поляризованном режиме.

Синтез фосфатного стекла для изготовления сердцевины световода осуществлялся Сверчковым С.Е., Галаганом Б.И. и Денкером Б.И. Изготовление и исследование свойств одномодового световода, легированного ионами эрбия, осуществлялись автором настоящей работы совместно с Семеновым С.Л. Исследование возможности записи волоконных брэгговских решеток, а также изготовление резонатора лазера в активном композитном световоде с использованием излучения на длине волны 248 нм осуществлялись Серегиным Е.С. и Медведковым О.И., на длине волны 193 нм -

Рыбалтовским А.А. Автором настоящей работы совместно с Журавлевым С.Г. и Даниеляном Г.Л. осуществлялось исследование характеристик полученных лазеров. С.А. Васильев, В.И. Пустовой и С.Л. Семенов участвовали в обсуждениях и анализе полученных результатов.

5.2.1. Композитный световод, легированный ионами эрбия

Для использования в качестве активного элемента лазера разработан и изготовлен легированный ионами эрбия композитный световод, одномодовый в окрестности длины волны 1550 нм. Исследуемый световод был изготовлен методом «стержень в трубке» с сердцевиной, изготовленной из фосфатного, и оболочкой из кварцевого стекла так, как описано в Главе 3. Для изготовления сердцевины было использовано стекло, содержащее 65 мол.% P_2O_5 , 7 мол.% Al_2O_3 , 12 мол.% B_2O_3 , 9 мол.% Li_2O и 7 мол.% RE_2O_3 [169]. Концентрация ионов эрбия в исходном стекле составляла $1,0 \times 10^{20}$ см⁻³ (1,1 вес.% или 0,39 мол.% оксида эрбия). Также данный состав содержал гадолиний, суммарная концентрация редкоземельных ионов при этом составляла около 7 мол.%.

Диаметр сердцевины изготовленного световода, оцененный по фотографии торца световода (рисунок 5.17), полученной с помощью электронного микроскопа, составил приблизительно 4,5 мкм. Диаметр оболочки из кварцевого стекла составил 125 мкм.

Как уже отмечалось в Главе 3, при вытяжке заготовки с сердцевиной из фосфатного и оболочкой из кварцевого стекла в световод происходит значительная взаимная диффузия фосфатного и кварцевого стекол. Поэтому в полученном световоде была проведена оценка концентрации оксида фосфора в сердцевине методом микроанализа с помощью сканирующего рентгеноспектрального электронного микроскопа JSM-5910 LV (JEOL) и рентгеновского спектрометра INCA (Oxford Instruments). Для проведения анализа пучок электронов направлялся в центр сердцевины световода, при этом энергия пучка электронов подбиралась таким образом, что диаметр области, в которой присутствует генерация рентгеновского излучения, составлял около 3,5 мкм и был меньше диаметра сердцевины. По проведенным оценкам концентрация оксида фосфора составляла около 24 мол.%. Для оценки концентрации оксидов алюминия, лития, бора и гадолиния, входящих в состав исходного стекла, можно принять, что их концентрация уменьшается пропорционально снижению концентрации оксида фосфора в сердцевине световода по сравнению с исходным стеклом.



Рисунок 5.17. Фотография торца композитного волоконного световода, легированного ионами эрбия.



Рисунок 5.18. а – спектр поглощения композитного световода в окрестности длины волны 980 нм. б – спектр поглощения композитного световода в окрестности длины волны 1550 нм.

a 6

б

3.5



Рисунок 5.19. а – спектр люминесценции, б – спектр оптических потерь композитного световода.

На длине волны в окрестности 1550 нм исследовался модовый состав полученного световода путем изучения изображения торца с помощью инфракрасной камеры. При различных условиях возбуждения на входе исследуемого световода, на выходном торце наблюдалось только распределение интенсивности, соответствующее фундаментальной моде сердцевины световода. Это свидетельствует о том, что изготовленный световод являлся одномодовым в окрестности длины волны 1550 нм. С использованием отрезка световода длиной 2 м было проведено измерение длины волны отсечки первой высшей моды методом эталонного изгиба. Измеренное значение составило 1400 нм.

На рисунке 5.18 представлены спектры поглощения полученного световода в окрестности 980 и 1550 нм в режиме слабого сигнала. Максимальная величина поглощения на длине волны 980 нм составляет около 0,4 дБ/см. На рисунке 5.19а представлен спектр люминесценции, измеренный при возбуждении на длине волны 980 нм. Измеренное в композитном световоде значение времени жизни уровня ионов эрбия ⁴I_{13/2} составило 6,1 мс. Низкое значение времени жизни по сравнению со световодами, изготовленными методом осаждения кварцевого стекла из газовой фазы, которое 10 мс, обусловлено, очевидно, обычно составляет порядка многофононной дезактивацией за счет значительного содержания гидроксильных групп (высокое содержание гидроксильных групп в сердцевине световода обусловлено высоким содержанием гидроксильных групп в исходном фосфатном стекле).

На рисунке 5.19б показан спектр оптических потерь вне областей поглощения ионов эрбия, измеренный методом обрыва. Значение оптических потерь в области 1050–1350 нм составляет около 1 дБ/м.

5.2.2 Одночастотный волоконный лазер с резонатором, сформированным брэгговскими решетками, записанными в сердцевине активного композитного световода излучением KrF лазера (248 нм)

Для формирования резонатора лазера волоконные брэгговские решетки записывались непосредственно в активном композитном световоде. Запись волоконных брэгговских решеток осуществлялась излучением эксимерного KrF лазера (248 нм) CL-5000 («ОптоСистемы») через однородную фазовую маску с периодом $\Lambda_{\rm M}$ =1072,03 нм и длиной 50 мм. Для повышения фоточувствительности активный композитный световод был насыщен молекулярным водородом при температуре 100°C и давлении 110 атм в течение 16 часов. Излучение KrF лазера (длительность импульса 10 нс, энергия 24 мДж, частота повторения 50 Гц) фокусировалось цилиндрической линзой на боковую поверхность световода через фазовую маску.

Вначале было проведено экспериментальное исследование возможности записи брэгговских решеток непосредственно в сердцевине изготовленного композитного световода. Для этого при описанных условиях записывалась пробная брэгговская решетка длиной 3,5 мм. В процессе записи этой решетки проводилось измерение спектров пропускания при различных дозах УФ-облучения. Спектры пропускания измерялись с помощью спектроанализатора ANDO 6317В с разрешением 0,02 нм при использовании тестирующего широкополосного люминесцентного источника. По полученной динамике изменения коэффициента отражения брэгговской решетки с помощью методики [241] была рассчитана зависимость наведенного изменения показателя преломления от дозы УФ-облучения (рисунок 5.20). Сравнение полученной дозной зависимости наведенного показателя преломления с аналогичными данными для стандартного телекоммуникационного световода SMF28e, исследованного при условиях, близких к условию настоящего эксперимента [242], показало, что величина наведенного показателя преломления сравнима для двух типов световодов при дозах УФ-облучения менее 4 кДж/см². Однако при дозах УФ-облучения свыше 4 кДж/см² в исследуемом композитном световоде скорость роста величины наведенного показателя преломления существенно замедляется, в то время как в световоде типа SMF28е этого не происходит. Несмотря на последнее обстоятельство, изменение показателя преломления на уровне $4-6 \times 10^{-4}$, наведенное в сердцевине композитного световода, достаточно для создания резонатора одночастотного волоконного лазера.

Резонатор лазера был сформирован двумя одинаковыми волоконными брэгговскими решетками длиной 23 мм каждая. Решетки были разделены участком необлученного активного световода длиной 4 мм. Запись резонатора осуществлялась сканированием пучка лазера вдоль оси световода со скоростью 0,05 мм/сек за два прохода. После каждого прохода производилось измерение спектра пропускания резонатора. Коэффициент отражения решеток после первого прохода составлял примерно 90%.



Рисунок 5.20. Зависимость наведенного показателя преломления в композитном волоконном световоде от дозы УФ-облучения.



Рисунок 5.21. Спектр пропускания резонатора лазера, измеренный с разрешением 0,01



Рисунок 5.22. Схема установки для исследования характеристик волоконного лазера.

Конечный спектр пропускания полученного резонатора, состоящего из двух брэгговских решеток, представлен на рисунке 5.21. Коэффициент отражения каждой решетки составляет около 98%, ширина спектра по полувысоте – 0,16 нм. В спектре присутствует узкий пик пропускания. Исходя из геометрических параметров резонатора и измеренного коэффициента отражения решеток можно оценить спектральную ширину центральной области пропускания в спектре отражения резонатора [241]. Согласно проведенным расчетам, спектральная ширина пика пропускания по полувысоте составляет $\Delta\lambda$ (FWHM)=0,003 нм. Полученная величина меньше, чем максимальное разрешение используемого спектрального прибора (0,01 нм), поэтому данный пик на рисунке 5.21 не удалось разрешить.

Также можно оценить разность длин волн соседних продольных мод резонатора [243]. При длине решеток 23 мм, расстоянии между решетками 4 мм и коэффициенте отражения решеток 98% расчетная разность длин волн между соседними продольными модами резонатора составляет 0,065 нм (8 ГГц). Следует отметить, что численные оценки были проведены исходя из предположения, что параметры решеток одинаковы. Однако, вследствие изменений температуры в процессе записи решеток, реальные параметры двух решеток могут различаться.

На рисунке 5.22 представлена схема установки для исследования характеристик лазера. Источником полученного волоконного излучения накачки служил полупроводниковый лазерный диод с длиной волны генерации 976 нм. Общая длина активного световода составляла примерно 70 мм: 50 мм приходилось на резонатор и еще по 10 мм активного световода с каждой из сторон были необходимы для осуществления соединения полученного резонатора с остальными частями схемы. Активный световод с двух сторон был подварен к специально изготовленному световоду, легированному оксидом германия. Диаметры полей мод световода, легированного оксидом германия, и активного световода практически совпадали и составляли на длине волны 1550 нм около 5 мкм.



Рисунок 5.23. Модовый состав лазера, полученный с помощью сканирующего интерферометра Фабри–Перо с областью свободной дисперсии 750 МГц, а – две поляризации, б – одна поляризация.



Рисунок 5.24. Спектр излучения лазера при различных мощностях накачки.



Рисунок 5.25. Зависимость выходной мощности лазера от введённой мощности накачки.
Модовый состав полученного лазера изучался с помощью конфокального сканирующего интерферометра Фабри–Перо с областью свободной дисперсии 750 МГц. Лазер работал в устойчивом одночастотном режиме. Из-за наличия небольшого двулучепреломления в резонаторе, связанного с активным световодом или наведенного в процессе записи брэгговских решеток, лазер работал в режиме с двумя ортогональными поляризациями (рисунок 5.23а). Ортогональность поляризаций мод, присутствующих на рисунке 5.23а, определялась с помощью контроллера поляризации, установленного на выходе схемы, и поляризатора, установленного перед входом в сканирующий интерферометр Фабри–Перо. При помощи изгиба активного световода в определенном направлении удавалось достичь устойчивого одночастотного режима с линейной поляризацией (рисунок 5.23б). По всей видимости, изгиб оптического волокна приводил к увеличению двулучепреломления внутри резонатора и, следовательно, к увеличению разности частот ортогонально-поляризованных мод. Линия генерации лазера, измеренная с помощью сканирующего интерферометра Фабри–Перо, имела ширину, меньшую, чем аппаратная ширина интерферометра (11 МГц).

Исследование временных характеристик лазера с помощью фотоприемника с шириной полосы 2 ГГц и осциллографа (500 МГц) показало отсутствие импульсного режима. При мощности накачки в диапазоне 90–320 мВт (измеренной в точке Рр на рисунке 5.22) проводилось фурье-преобразование сигнала лазера. Частота пика релаксационных колебаний возрастала от 220 до 650 кГц при увеличении мощности накачки от 90 до 320 мВт. Других частотных компонент шума обнаружено не было.

Спектр излучения лазера, измеренный при мощности накачки около 89, 183 и 320 мВт с разрешением 0,01 нм, приведён на рисунке 5.24. Длина волны генерации составила 1559,5 нм. Как видно, с ростом мощности накачки длина волны излучения лазера увеличивается. Это обусловлено нагревом брэгговских решеток.

На рисунке 5.25 представлена зависимость выходной мощности лазера с обеих сторон (выход 1 и выход 2 рисунок 5.22) от введенной мощности накачки, измеренная в линейно-поляризованном режиме генерации лазера (с изгибом). Введенная мощность накачки измерялась в точке, обозначенной на рисунке 5.22 точкой Рр. Непоглощенная мощность накачки на выходе 1 составляла примерно треть от введенной мощности накачки. Наклон эффективности лазерной генерации на выходе 1 составлял 1,2%. Порог генерации – около 70 мВт. Мощность лазерной генерации на выходе 2 составляла величину, примерно в два раза меньшую, чем мощность на выходе 1. Это связано, очевидно, с различием коэффициентов отражения брэгговских решеток, составляющих резонатор лазера, или их небольшим рассогласованием по длине волны.

Фиксация изогнутого положения резонатора лазера осуществлялась с помощью крепления подводящих участков световода, легированного оксидом германия (рисунок

5.22), на лабораторном столе без использования каких-либо специальных приспособлений. Изменение положения волокна значительно влияло на значение выходной мощности и состояние поляризации лазерного излучения. Амплитуда колебаний выходной мощности при изменении пространственного положения резонатора волоконного лазера составляла более 50%. Однако при определенном положении световода удавалось получать генерацию лазера в линейно-поляризованном режиме с достаточно стабильной во времени выходной мощностью (в пределах 5%), что было достаточно для проведения измерений. При этом эффективность лазерной генерации каждый раз примерно соответствовала зависимости, представленной на рисунке 5.25.

5.2.3 Одночастотный волоконный лазер с резонатором, сформированным брэгговскими решетками, записанными в сердцевине активного композитного световода излучением ArF лазера (193 нм)

В изготовленном композитном световоде была обнаружена также фоточувствительность к действию излучения на длине волны 193 нм. Подробному фотоиндуцированного изменения исследованию показателя преломления В изготовленном композитном световоде при его облучении излучением эксимерного ArF лазера (193 нм) посвящены работы [244, 245, 246], также зависимость коэффициента отражения решетки от дозы УФ-облучения приведена в работе [218].

На рисунке 5.26 представлена схема исследуемого волоконного лазера. Резонатор лазера был образован брэгговской решеткой HR FBG с коэффициентом отражения 99,9% и шириной спектра отражения на уровне 3 дБ – 0,5 нм и решеткой PR FBG с коэффициентом отражении 95,4% и шириной спектра на уровне 3 дБ – 0,15 нм. Обе решетки были записаны непосредственно в композитном волоконном световоде. Для создания резонатора лазера запись брэгговских решеток проводилась через фазовую маску с периодом 1075 нм с помощью эксимерного ArF лазера на длине волны 193 нм (6 нс, 10 Гц, 160 мДж/см²). Перед облучением световод был насыщен молекулярным водородом при комнатной температуре и давлении 65 атм в течение 14 суток. Длина решетки HR FBG составила 3,6 мм, длина решетки PR FBG – 8 мм, а расстояние между решётками составляло примерно 9 мм. Таким образом, общая длина резонатора составляла около 21 мм. Согласно [243], данная конструкция резонатора соответствует расстоянию между продольными модами 0,073 нм или 5,96 ГГц.



Рисунок 5.26. Схема одночастотного волоконного лазера.



Рисунок 5.27. а – спектр излучения лазера, б – зависимость выходной мощности лазера от введённой мощности накачки.

Активный световод с двух сторон был подварен к специально изготовленному световоду, легированному оксидом германия. Диаметры полей мод световода, легированного оксидом германия, и активного световода практически совпадали и составляли на длине волны 1550 нм около 5 мкм. Оптические потери, измеренные в резонаторе лазера с подваренными с двух сторон отрезками легированного оксидом германия световода на длине волны 1310 нм, составили около 1 дБ (21%).

Модовый состав полученного лазера изучался с помощью сканирующего интерферометра Фабри–Перо с областью свободной дисперсии 750 МГц. Несмотря на то что спектр выходной брэгговской решетки был больше расстояния между продольными модами резонатора, был получен устойчивый одночастотный режим генерации. Одночастотный режим генерации удавалось получать за счет точной подстройки максимума отражения выходной решетки и одной из продольных мод резонатора с помощью регуляции температуры лазера, размещенного на элементе Пельтье. Возможность генерации лазера в одночастотном режиме при существенном превышении ширины спектра выходной решетки над расстоянием между продольными модами наблюдалась также в работах [247, 248].

Излучение лазера имело линейную поляризацию. Достигнуть линейнополяризованного режима позволило, очевидно, наличие небольшого двулучепреломления в резонаторе. Наблюдаемое двулучепреломление могло быть связано с самим световодом или возникнуть, например, вследствие напряжений, индуцированных УФ-излучением, аналогично эффекту, который наблюдался в германосиликатных световодах [249]. Наличие двулучепреломления приводило к различию в частотах двух поляризаций, достаточному, чтобы выходная решетка обеспечила генерацию только одной, линейно-поляризованной моды [250].

Лазер работал в устойчивом непрерывном режиме. Спектр излучения лазера, измеренный при мощности накачки около 200 мВт с разрешением 0,01 нм, приведён на рисунке 5.27а.

На рисунке 5.276 представлена зависимость выходной мощности лазера от введенной мощности накачки. Введенная мощность накачки измерялась в точке, обозначенной на рисунке 5.26 как Рр. Наклон эффективности лазерной генерации составил 0,5%.

При мощности накачки в диапазоне 170–230 мВт проводилось фурьепреобразование сигнала лазера, полученного с помощью осциллографа (500 МГц) и фотоприемника (2 ГГц). Пик релаксационных колебаний соответствовал частотам 300– 500 кГц. Других частотных компонент шума обнаружено не было.

5.3 Интерферометр Фабри–Перо, сформированный в сердцевине композитного волоконного световода с высоким содержанием оксида фосфора

Среди большого разнообразия различных конструкций датчиков на основе интерферометров Фабри-Перо, предложенных в настоящее время, большой интерес представляют конструкции, интегрированные непосредственно В структуру волоконного световода и представляющие собой полость внутри оптического волокна. Такие структуры являются достаточно простыми, компактными, а также, благодаря использованию для передачи сигнала оптического волокна, могут быть расположены вдали от регистрирующего оборудования. В настоящее время предложены различные техники создания микрополостей в сердцевине оптического волокна: путем микрообработки волоконного световода фемтосекундными лазерными импульсами [251, 252]; за счет использования отверстий внутри микроструктурированных дырчатых световодов [253, 254, 255]; с помощью процесса сварки обычных оптических волокон [256, 257, 258] и волокна с высоким содержанием оксида алюминия в сердцевине [259].

В настоящей работе представлен новый метод формирования микрополости в сердцевине волоконного световода, представляющей собой интерферометр Фабри– Перо, а также показана возможность использования полученного интерферометра в качестве чувствительного элемента датчика деформации. Метод формирования интерферометра Фабри–Перо основан на процессе сварки в электрическом разряде обычного волоконного световода и специального композитного световода с оболочкой из кварцевого стекла и с сердцевиной с высоким содержанием оксида фосфора. Специальное композитное волокно было изготовлено методом «стержень в трубке» с сердцевиной, изготовленной из фосфатного стекла, и оболочкой из кварцевого стекла так, как описано в Главе 3.

Синтез фосфатного стекла для изготовления сердцевины световода осуществлялся Сверчковым С.Е., Галаганом Б.И. и Денкером Б.И. Изготовление и исследование свойств световода осуществлялись автором настоящей работы совместно с Семеновым С.Л. Изготовление и исследование свойств интерферометров Фабри–Перо осуществлялись автором настоящей работы совместно с Лихачевым И.Г. и Васильевым С.А. Лихачев И.Г., Васильев С.А., Пустовой В.И. и Семенов С.Л. участвовали в обсуждениях и анализе полученных результатов.

5.3.1. Создание интерферометра Фабри–Перо в сердцевине композитного световода

При изготовлении специального композитного световода для создания интерферометра Фабри–Перо в качестве стекла сердцевины было использовано фосфатное стекло состава номер 1 (Глава 3), содержащее 65 мол.% P₂O₅, 7 мол.% Al₂O₃,

12 мол.% B_2O_3 , 9 мол.% Li₂O и 7 мол.% Re_2O_3 . Диаметр сердцевины полученного световода составлял около 10 мкм, диаметр оболочки из кварцевого стекла – 125 мкм. Как было отмечено в Главе 3, в процессе вытяжки световода происходит взаимная диффузия фосфатного и кварцевого стекол, приводящая к снижению концентрации оксида фосфора в стекле сердцевины. Концентрация оксида фосфора в сердцевине изготовленного световода, измеренная методом рентгеноспектрального микроанализа, составила около 35 мол.%. Данный уровень концентрации намного превышает концентрацию, которая может быть получена обычными методами изготовления световодов с помощью осаждения стекла из газовой фазы. Высокая концентрация оксида фосфора приводит к существенному различию физико-химических свойств стекла сердцевины и оболочки, в частности к более низкой температуре образования летучих компонент и к более высокому коэффициенту термического расширения стекла сердцевины.

Следует отметить, что концентрация оксида фосфора в сердцевине композитных световодов зависит от ряда параметров, влияющих на взаимную диффузию фосфатного и кварцевого стекол во время вытяжки световода. Этим объясняется различие концентрации в световодах, описанных в Главе 3, в пункте 5.2 и в настоящем пункте. Различие связано с тем, что концентрация оксида фосфора в сердцевине определяется степенью взаимной диффузии фосфатного и кварцевого стекол в процессе вытяжки световода, а на процесс диффузии, в свою очередь, влияют такие факторы, как диаметр сердцевины, время нахождения световода в печи вытяжки, температура в печи. Чем больше диаметр сердцевины, выше скорость вытяжки световода и меньше температура в печи вытяжки, тем больше концентрация оксида фосфора в сердцевине композитного световода.

Интерферометр Фабри–Перо в виде микрополости в сердцевине световода был получен с помощью сварки в электрическом разряде композитного световода и обычного телекоммуникационного волоконного световода SMF-28. На рисунке 5.28а представлена фотография микрополости 1, полученной при сварке на сварочном аппарате Fujikura FSM80 при мощности дуги 50 единиц (производитель сварочного аппарата предоставляет только относительные значения) и длительности разряда 300 мс. Композитное оптическое волокно расположено справа от места соединения световодов, интерферометр Фабри–Перо полностью расположен в сердцевине композитного волоконного световода.

Механизм образования микрополости, по-видимому, заключается в следующем. В самом начале процесса сварки при включении электрической дуги с поверхности торца композитного световода происходит испарение стекла сердцевины, поскольку оно имеет более низкую температуру образования летучих компонент, чем нелегированное стекло

оболочки. За счет этого в области сердцевины на поверхности торца световода образуется углубление. Кроме того, формирование углубления на поверхности торца световода в области сердцевины может быть обусловлено релаксацией напряжений (возникающих при вытяжке световода за счет высокой разности коэффициентов термического расширения стекла сердцевины и оболочки композитного световода) при нагреве торца световода в начале процесса сварки. Образовавшееся углубление в области сердцевины преобразуется в микрополость при сплавлении торцов световодов в процессе сварки.

Следует отметить, что на процесс формирования микрополости оказывали влияние параметры процесса сварки. Так, было замечено, что образованию микрополости способствует наличие предварительной «дуги очистки» перед процессом сварки, то есть электрического разряда, используемого перед основным процессом сварки для удаления загрязнений с торцов световодов. По-видимому, данная операция способствовала формированию углубления в области сердцевины на торце композитного световода.



Рисунок 5.28. Фотографии микрополостей в сердцевине световода: а – исходная (длительность дуги 300 мс), б и в – полученные из исходной после дополнительного прогрева дугой длительностью 600 и 2300 мс соответственно; г, д и е – спектры отражения интерферометров 1, 2 и 3 соответственно.

На рисунке 5.286 и 5.288 представлены фотографии микрополостей 2 и 3, полученных дополнительным прогревом исходной микрополости 1 дугой длительностью 600 и 2300 мс соответственно. Как видно, под действием давления паров стекла, испаряемого в результате данного прогрева, объем микрополости увеличивается в продольном направлении вдоль легкоплавкой сердцевины, а при более длительном

нагреве и в поперечном направлении, расширяя более тугоплавкую оболочку из кварцевого стекла.

Спектр отражения микрополостей (интерферометров Фабри–Перо) исследовался в схеме, показанной на рисунке 5.29. В качестве источника излучения использовался полупроводниковый суперлюминесцентный диод (СЛД) Superlum SLD-76-MP с шириной спектра 50 нм (по уровню 3 дБ) с центром в окрестности длины волны 1550 нм, регистрация отраженного сигнала проводилась с помощью оптического анализатора спектров ANDO AQ6317B (OAC). Сигнал от источника подавался на вход волоконнооптического циркулятора, затем поступал в стандартное одномодовое оптическое волокно, в месте соединения которого с композитным оптическим волокном находился интерферометр Фабри–Перо, образованный двумя границами газ–стекло, как показано на вставке на рисунке 5.29. Отраженный от интерферометра сигнал с помощью циркулятора подавался на вход оптического анализатора спектров. На рисунках 5.28г–е представлены полученные спектры отражения интерферометров Фабри–Перо 1, 2 и 3.

Поскольку коэффициент отражения на границе стекло–газ мал (порядка 4%), полученные интерферометры могут быть описаны с помощью двухлучевой модели. Интенсивность отраженного сигнала представляет собой осциллирующую функцию длины волны λ:

 $I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\varphi,$

где, I₁ и I₂ – интенсивности волн, отраженных от двух зеркал интерферометра Фабри–Перо (рисунок 5.29), $\varphi = \frac{4\pi n L_I}{\lambda}$ – разность фаз этих волн, n \approx 1 – показатель преломления газовой среды внутри полости интерферометра, L_I – длина интерферометра. Отметим, что снижение интенсивности отраженного сигнала на краях спектров отражения, приведенных на рисунках 5.28г–е, обусловлено формой спектра источника СЛД. При выполнении математической обработки всех полученных экспериментальных результатов проводилась нормировка на спектр источника.

Длина интерферометра Фабри–Перо может быть рассчитана по разности длин волн соседних минимумов (максимумов) в спектре отражения как $L_I = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2n(\lambda_1 - \lambda_2)}$, где λ_1 , λ_2 – длины волн соседних минимумов в спектре отражения. Рассчитанные по периоду спектра отраженного сигнала длины интерферометров 1, 2 и 3 (рисунок 5.28г–е), составили 40, 93 и 172 мкм соответственно. Амплитуда модуляции отраженного сигнала снижалась с ростом длины интерферометра. Это связано с увеличением оптических потерь в интерферометре с ростом его длины, обусловленных расходимостью гауссова пучка [260]. Отметим, что процесс формирования микрополостей имеет хорошую воспроизводимость. При одинаковых параметрах электрической дуги вариации длины микрополости не превышали 5%.

5.3.2 Интерферометр Фабри–Перо как чувствительный элемент датчика деформации

Для полученных интерферометров Фабри-Перо исследовалось влияние относительного удлинения световода и температуры на спектр отражения. К участку световода с интерферометром в точках 1 и 2, находящихся на расстоянии нескольких десятков сантиметров (рисунок 5.29), прикладывалась растягивающая сила F, которая обеспечивала относительное удлинение оптического волокна согласно закону Гука. Для световода с интерферометром, имеющим, например, цилиндрическую участка поверхностью боковых стенок, как изображено на вставке на рисунке 5.29, приложенная сила F в соответствии с законом Гука определяет, во-первых, относительное удлинение интерферометра $\frac{\Delta L_I}{L_I} = \frac{F}{ES_I}$, где S_I – площадь поперечного сечения боковых стенок интерферометра из кварцевого стекла (в плоскости I на рисунке 5.29), Е – модуль Юнга кварцевого стекла, L_I – длина интерферометра, ΔL_I - увеличение длины интерферометра, во-вторых, относительное удлинение оптического волокна вне интерферометра $\frac{\Delta L_F}{L_F} = \frac{F}{FS_F}$ где S_F – площадь поперечного сечения оптического волокна (в плоскости F на рисунке 5.29), L_F – длина световода между точками 1 и 2 вне интерферометра, ΔL_F – увеличение длины световода на этом участке. Модуль Юнга полагается одинаковым для стекла сердцевины и оболочки световода. Поскольку $L_I \ll L_F$, а S_F и S_I сравнимы по величине, то $\frac{\Delta L_{12}}{L_{12}} = \frac{\Delta L_I + \Delta L_F}{L_{12}} = \frac{F}{EL_{12}} \left(\frac{L_I}{S_I} + \frac{L_F}{S_F} \right) \approx \frac{\Delta L_F}{L_F}, \ \ \text{где } \Delta L_{12}/L_{12} - \text{ относительное удлинение всего участка}$ волокна между точками 1 и 2. Поскольку $\frac{F}{E} = \frac{\Delta L_F S_F}{L_F} \approx \frac{\Delta L_{12} S_F}{L_{12}}$, то $\frac{\Delta L_I}{L_I} \approx \frac{\Delta L_{12}}{L_{12}} \frac{S_F}{S_I}$. Таким образом, относительное удлинение интерферометра Фабри-Перо линейно связано как с приложенной силой F, так и с относительным удлинением самого оптического волокна между точками 1 и 2.

Используя выражение для условия минимума в спектре отражения интерферометра Фабри–Перо $\varphi = \frac{4\pi n L_I}{\lambda} = \pi (2m + 1)$, где m –целое число, можно прийти к следующему соотношению:

$$\frac{\Delta L_I}{L_I} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \qquad , \qquad (5.7)$$



Рисунок 5.29. Схема установки. На вставке – схематичное изображение интерферометра.



Рисунок 5.30. а – сдвиг спектра отражения интерферометра 1 при различных относительных удлинениях волоконного световода; б – зависимость длины волны одного из минимумов (в окрестности длины волны 1550 нм) в спектре отражения интерферометров 1, 2 и 3 от относительного удлинения волоконного световода и приложенной силы F.



Рисунок 5.31. Зависимость длины волны минимума в окрестности 1550 нм в спектрах отражения интерферометров 1, 2 и 3 при нагреве от комнатной температуры до 500°С.

где $\Delta\lambda$ – сдвиг длины волны минимума в спектре отражения интерферометра за счет изменения L_I, λ – длина волны, соответствующая этому минимуму в спектре отражения. Таким образом, $\Delta\lambda/\lambda$ линейно зависит от относительного удлинения интерферометра, которое, в свою очередь, линейно связано с приложенной силой F и относительным удлинением самого световода.

На рисунке 5.30а представлен сдвиг спектра отражения интерферометра 1 при увеличении относительного удлинения волоконного световода от 0 до 2160 мкм/м. Зависимости сдвига длины волны минимума сигнала $\Delta\lambda$ в окрестности 1550 нм в спектрах отражения интерферометров 1, 2 и 3 от относительного удлинения волоконного световода, а также от приложенной растягивающей силы представлены на рисунке 5.306. Чувствительность интерферометров Фабри–Перо 1 и 2 составляет около 1,7 пм/(мкм/м), интерферометра 3 – 2,3 пм/(мкм/м) (в англоязычной литературе мкм/м соответствует единице измерения относительного удлинения µє). Полученное значение чувствительности соответствует результатам, полученным, например, в работе [253].

Чувствительность интерферометра 3 при приложении продольной механической нагрузки немного превышает чувствительность интерферометров 1 и 2. Как видно из рисунка 5.28, диаметр поперечного сечения микрополости 3 превышает диаметр поперечного сечения полостей 1 и 2, а в продольном сечении микрополость 3 имеет характерную форму раздутого пузыря с изогнутыми границами боковых стенок. В соответствии с законом Гука к увеличению относительного удлинения могло бы привести уменьшение площади поперечного сечения боковых стенок интерферометра 3. Однако анализ изображения, представленного на рисунке 5.28а-в, не свидетельствует о наличии данного уменьшения. Дополнительное увеличение чувствительности микрополости 3, скорее всего, связано с изменением формы сечения микрополости в продольном направлении при действии растягивающего усилия.

Для изучения температурной чувствительности полученные интерферометры помещались в трубчатую печь, где производился их нагрев от комнатной температуры 25°C до температуры 500°C с шагом 50°C. Полученные экспериментальные данные, а также их аппроксимация линейной зависимостью для всех трех интерферометров, представлены на рисунке 5.31. Данные представлены для минимума в спектре отражения интерферометров 1, 2 и 3, наиболее близкого к длине волны 1550 нм. Температурная чувствительность полученных образцов $\Delta\lambda/\Delta T$ составляет достаточно малую величину – 1,1 пм/°C для интерферометров 1 и 3 и 0,9 пм/°C для интерферометра 2. Полученные хорошо согласуются с результатами других авторов [253–257]. Величина $\Delta\lambda/(\lambda\Delta T) = \Delta L_I/(L_I\Delta T)$ (см. (5.7)) для длины волны 1550 нм, на которой проводились измерения, составляет около 6,5х10⁻⁷ °C⁻¹, что близко к значению

коэффициента термического расширения кварцевого стекла марки КИ в температурном диапазоне 50–500°С – (4,17–5,92)х10⁻⁷ °С⁻¹ [261]. Следовательно, температурная чувствительность полученных интерферометров в основном определяется коэффициентом термического расширения боковых стенок интерферометра из нелегированного кварцевого стекла. Столь низкая температурная чувствительность интерферометра Фабри–Перо, обусловленная малым коэффициентом термического расширения кварцевого стекла, выгодно отличает его от волоконных брэгговских решеток, у которых спектральное смещение длины волны составляет на порядок большую величину [262], и позволяет не прибегать к дополнительной температурной компенсации показаний датчика для ряда задач.

Нагрев интерферометров Фабри–Перо до температуры 500–600°С являлся обратимым, то есть при снижении температуры после нагрева положение минимумов и максимумов спектра отражения возвращалось к значениям, соответствующим данной температуре. Однако при нагреве до температуры 700°С наблюдалось необратимое увеличение базы интерферометра. Это необратимое изменение может быть использовано для контролируемого выбора рабочей точки интерферометра при использовании узкополосного лазерного излучения.

Выводы к главе 5

1. Разработана технология изготовления многосердцевинных волоконных световодов методом сверления. Изготовлена серия семисердцевинных световодов и проведено исследование их оптических характеристик.

Исследование оптических характеристик показало, что при недостаточной толщине оболочки из кварцевого стекла в боковых сердцевинах наблюдается повышенный уровень оптических потерь, связанный с туннелированием излучения во внешнюю полимерную оболочку. При увеличении диаметра оболочки из кварцевого стекла уровень оптических потерь в центральной и боковых сердцевинах совпадал.

2. Предложено использовать интерферометрический метод на основе интерферометра Маха–Цендера для измерения разности величины времени задержки сигнала между модами соседних сердцевин многосердцевинного волоконного световода.

3. При исследовании времени задержки в различных сердцевинах многосердцевинного волоконного световода 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 сердцевин расположены на линии, проходящей через центр центральной сердцевины, то разность времени задержки в каждой из этих сердцевин и в центральной

сердцевине близка модулю и противоположна по знаку. Обнаруженное по 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 многосердцевинного световода необходимо применять закручивание вокруг оси для того, чтобы ориентация поперечного сечения изменялась по длине световода. Однако для многосердцевиного 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.

4. Разработана технология изготовления устройств ввода-вывода излучения для многосердцевинного волоконного световода с семью сердцевинами, основанная на травлении и склеивании односердцевинных световодов. Разработанная технология позволяет производить стыковку многосердцевинного световода с устройствами вводавывода с оптическими потерями на стыковку каждой из сердцевин менее 1 дБ и коэффициентом обратного отражения менее -50 дБ. Впервые предложено использовать данную технологию для создания устройств ввода-вывода для волоконного световода с девятнадцатью сердцевинами.

5. Предложена конструкция волоконно-оптической линии задержки, основанная на последовательном прохождении сигнала по сердцевинам многосердцевинного световода. Последовательное прохождение сигнала по сердцевинам многосердцевинного световода позволяет сократить длину световода, необходимую для получения требуемой задержки сигнала, а следовательно, снизить массу и габариты устройств, осуществляющих задержку сигнала, что особенно важно для бортовых применений.

6. Впервые изготовлена волоконно-оптическая линия задержки на многосердцевинном световоде. Благодаря тому, что сигнал последовательно проходит по всем семи сердцевинам многосердцевинного световода, получена временная задержка оптического сигнала 45,0 мкс при длине волоконного световода всего 1300 м.

7. Впервые изготовлен композитный световод, легированный ионами эрбия, одномодовый в окрестности длины волны 1500 нм. Длина волны отсечки в полученном световоде составила 1400 нм.

8. В изготовленном световоде впервые обнаружена фоточувствительность к действию излучения на длине волны 248 нм. Показано, что величины наведенного показателя преломления достаточно для формирования резонатора одночастотного волоконного лазера. С использованием записи брэгговских решеток с помощью

излучения на длине волны 248 нм непосредственно в сердцевине активного световода продемонстрирована возможность создания одночастотного волоконного лазера на композитном световоде, легированном ионами эрбия. Изготовленный по данной методике волоконный лазер работал в устойчивом одночастотном и линейно-поляризованном режиме на длине волны 1560 нм.

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

10. Предложен новый способ создания интерферометра Фабри–Перо, интегрированного непосредственно в структуру волоконного световода. Метод основан на сплавлении в электрическом разряде одномодового световода на основе кварцевого стекла и композитного световода, полученного методом «стержень в трубке», с сердцевиной, изготовленной из фосфатного стекла, и оболочкой из кварцевого стекла. Показана возможность использования полученного интерферометра в качестве чувствительного элемента датчика деформации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные диссертации В 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, с основанный на использовании световодов фотонной запрещенной зоной. представляющих собой световоды с сердцевиной 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 сердцевиной, изготовленной из фосфатного стекла, и оболочкой, изготовленной из кварцевого стекла. Данный подход открывает новые возможности для создания световодов с высокой концентрацией редкоземельных ИОНОВ. В световодах данного типа обнаружена активных фоточувствительность к действию излучения на длине волны 248 нм, что позволило создать на их основе одночастотные волоконные лазеры. Также в работе предложен и перекрестных исследован ряд способов снижения оптических помех В многосердцевинных волоконных световодах.

Основные результаты работы сводятся к следующему:

1. Впервые изучены свойства и показаны перспективы использования волоконных световодов с сердцевиной 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 сердцевины в пределах фундаментальной запрещенной зоны периодической структуры оболочки. Минимальные оптические потери составляли около 20–30 дБ/км. Ширина области локализации моды сердцевины в пределах фундаментальной запрещенной зоны зависела от параметров оболочки и сердцевины 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 элементом оболочки, она является одномодовой в пределах отсутствующим 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 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 волоконных лазеров и усилителей, основанный на использовании световодов данной конструкции. Изготовлены и исследованы одномодовые световоды с диаметром поля моды 18 мкм и с сердцевиной, активированной ионами иттербия. Разработанная технология имеет потенциал для создания активных световодов с бо́льшим диаметром сердцевины, одномодовых или близких к одномодовым.

2. Обоснована правомерность нового подхода к созданию активных композитных световодов методом «стержень в трубке» с сердцевиной, 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

197

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 сердцевинам ПО 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 излучения из сердцевин многосердцевинных волоконных световодов.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ*

Патенты

1 (177) 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 В2 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 (209) 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 (217) Патент РФ № RU 2 707 383 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 (114) 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-μm mode-field diameter," Optics Express, Vol. 16, No. 16, pp. 11735-11740 (2008).

2 (115) 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 (116) 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 (117) 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

^{*} В скобках приведены номера, соответствующие полному списку литературы (с. 206).

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

5 (122) 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 (125) 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 (154) 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 (155) 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 (156) 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 (157) 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 (178) 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 (179) 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 (180) 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 (210) 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 (211) 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 (212) 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 (213) О.Н. Егорова, М.С. Астапович, М.Е. Белкин, С.Л. Семенов, "Волоконнооптическая линия задержки на основе многосердцевинного оптического волокна," Краткие сообщения по физике ФИАН, т. 12, сс. 60-64 (2016).

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

19 (216) 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 (218) 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 (219) 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 (221) 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 (118) 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 CMHH6 (2009).

2 (119) 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 (120) 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 (121) 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 оптики ВКВО'2009, Фотон-экспресс, № 6 (78), сс. 25-26. (2009).

5 (123) 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 (124) 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 оптики ВКВО'2011, Фотон-экспресс, № 6 (94), сс. 172-173 (2011).

7 (126) 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 оптики ВКВО'2013, Фотон-экспресс, № 6 (110), сс. 140-141 (2013).

8 (127) 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 оптики ВКВО'2015, Фотон-экспресс, № 6 (126), сс. 161-162 (2015).

9 (128) 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 (129) 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 (130) 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 (158) 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 (159) 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, «Иттербийэрбиевое лазерное волокно с фосфатной сердцевиной и кварцевой оболочкой,» труды Всероссийской конференции по волоконной оптики ВКВО'2013, Фотон-экспресс, № 6 (110), с. 148 (2013).

14 (160) 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 оптики ВКВО'2017, Фотон-экспресс, № 6 (142), с. 143-144 (2017).

15 (161) 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 Ег 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 (162) 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 оптики ВКВО'2015, Фотон-экспресс, № 6 (126), с. 124 (2015).

17 (163) O.N. Egorova, S. L. Semjonov, O. I. Medvedkov, M. S. Astapovich, A. G. Okhrimchuk, 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 (164) 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 (181) 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 оптики ВКВО'2013, Фотон-экспресс, № 6 (110), с. 277-278 (2013).

20 (182) 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 оптики ВКВО'2013, Фотон-экспресс, № 6 (110), с. 325-326 (2013).

21 (183) 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 (184) 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 оптики ВКВО'2015, Фотон-экспресс, № 6 (126), с. 107-108 (2015).

23 (185) 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 (215) С.Г. Журавлев, О.Н. Егорова, С.Л. Семенов, «Устройство ввода-вывода для многосердцевинного волокна,» труды Всероссийской конференции по волоконной оптики ВКВО'2017, Фотон-экспресс, № 6 (142), с. 256-257 (2017).

25 (220) 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 (222) 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 ЛИТЕРАТУРЫ

*- Работы по теме диссертации, опубликованные в изданиях, не входящих в список, рекомендованный ВАК.

**- Работы по теме диссертации, опубликованные в изданиях, входящих в список, рекомендованный ВАК.

1 C. K. Kao and G. A. Hockham, "Dielectric-fiber surface waveguides for optical frequencies," Proc. of the 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 D. B. Keck, R. D. Maurer, and P. C. Schultz, "On the ultimate lower limit of attenuation in glass optical waveguides," Appl. Phys. Lett., Vol. 22, No. 7, pp. 307–309 (1973).

4 M. Horiguchi and H. Osanai, "Spectral losses of low-OH-content optical fibres," Electron. Lett., Vol. 12, pp. 310–312 (1976).

5 T. Miya, Y. Terunuma, T. Hosaka, and T. Moyashita, "Ultimate low-loss single-mode fibers at 1.55 mm," Electron. Lett., Vol. 15, pp. 106–108, (1979).

6 A. Mendez and T.F. Morse, "Specialty Optical Fibers Handbook," Elsevier Academic Press 2007, p. 798.

J. Ballato, and P. Dragic, "Rethinking Optical Fiber: New Demands, Old Glasses," J. Am. Ceram. Soc., Vol. 96, No. 9, pp. 2675–2692 (2013).

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).

9 P. Russell, "Photonic crystal fibers," Science 299(5605), pp. 358–362 (2003).

10 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. of Optical Fiber Communication Conference, paper OTuJ2 (2008).

11 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).

12 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).

13 R. Thapa, D. Nguyen, J. Zong, and A. Chavez-Pirson, "All-fiber fundamentally modelocked 12 GHz laser oscillator based on an Er/Yb-doped phosphate glass fiber," Optics Letters, Vol. 39, No. 6, pp. 1418-1421 (2014).

14 S. Inao, T. Sato, S. Sentsui, T. Kuroha, Y. Nishimura, "Multicore optical fiber," in Proc. of Optical Fiber Communication Conference, p. WB1. (1979).

15 A.R. Chraplyvy, "The coming capacity crunch," ECOC'2009, plenary talk.

16 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).

17 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).

18 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).

19 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).

20 J. Berthold , "Optical Networking for Data Centers Across Wide Area Networks," in Proc. of Optical Fiber Communication Conference, paper OW1J.1. (2012).

21 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).

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).

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).

24 C. Jauregui, J. Limpert, and A. Tünnermann, "High-power fiber laser," Nature Photonics, Vol. 7, No. 11, pp. 861-867 (2013).

25 D.J. Richardson, J. Nilsson, and W.A. Clarkson, "High power fiber lasers: current status and future perspectives," J. Opt. Soc. Am. B, Vol. 27, No. 11, pp. B63-B92 (2010).

26 R. Royon, J. Lhermite, L. Sarger, and E. Cormier, "High power, continuous-wave ytterbium-doped fiber laser tunable from 976 to 1120 nm," Optics Express, Vol. 21, No. 11, pp. 13818-13823 (2013).

E. Stiles, "New developments in IPG fiber laser technology," in Proceedings of the 5th International Workshop on Fiber Lasers (2009).

28 C. Jauregui, J. Limpert, and A. Tünnermann, "High-power fiber laser," Nature Photonics, Vol. 7, No. 11, pp. 861-867 (2013).

D. Taverner, D.R. Richardson, 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. of Optical Fiber Communication Conference, Paper OTuJ2 (2008).

30 M. E. Fermann, "Single-mode excitation of multimode fibers with ultrashort pulses," Optics Letters, Vol. 23, pp. 52–54 (1998).

N. G. R. Broderick, H. L. Offerhaus, D. J. Richardson, R. A. Sammut, J. Caplen, and L. Dong, "Large mode area fibers for high power applications," Opt. Fiber Technol., Vol. 5, pp. 185–196 (1999).

J. M. Sousa and O. G. Okhotnikov, "Multimode Er-doped fiber for single-transversemode amplification," Appl. Phys. Lett., Vol. 74, pp. 1528–1530 (1999).

J. P. Koplow, D. A. V. Kliner, and L. Goldberg, "Singlemode operation of a coiled multimode fiber amplifier," Optics Letters, Vol. 25, pp. 442–444 (2000).

V. Filippov, Y. Chamorovskii, J. Kerttula, K. Golant, M. Pessa, and O. G. Okhotnikov, "Double clad tapered fiber for high power applications," Optics Express, Vol. 16, No. 3, pp. 1929–1944 (2008).

35 V. Filippov, A. Vorotynskii, T. Noronen, R. Gumenyuk, Y. K. Chamorovskii, and K. M. Golant, "Picosecond MOPA with ytterbium doped tapered double clad fiber," Proc. of SPIE Vol. 10083, p. 100831H (2017).

V. Filippov, Yu. Chamorovskii, K. Golant, A. Vorotynskii, and O. G. Okhotnikov, "Optical amplifiers and lasers based on tapered fiber geometry for power and energy scaling with low signal distortion," Proc. of SPIE Vol. 9728, p. 97280V (2016). 37 Y. Jeong, J.K. Sahu, D.N. Payne, and J. Nilsson, "Ytterbium -doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power," Optics Express, Vol. 12, pp. 6088-6092 (2004).

38 F. Beier, C. Hupel, S. Kuhn, S. Hein, J. Nold, F. Proske, B. Sattler, A. Liem, C. Jauregui, J. Limpert, N. Haarlammert, T. Schreiber, R. Eberhardt, AND A. Tunnermann, "Single mode 4.3 kW output power from a diode-pumped Yb-doped fiber amplifier," Optics Express, Vol. 25, No. 13, pp. 14892-14899 (2017).

G. Overton, "IPG Photonics offers world's first 10 kW single-mode production laser," http://www.laserfocusworld.com/articles/2009/06/ipg-photonics-offers-worlds-first-10-kw-single-modeproduction-laser.html, Laser Focus World (2009).

40 M. O'Connor, V. Gapontsev, V. Fomin, M. Abramov, and A. Ferin, "Power scaling of SM fiber lasers toward 10kW," in Proc. of Conference on Lasers and Electro-Optics, Paper CThA3 (2009).

41 F. Stutzki, F. Jansen, A. Liem, C. Jauregui, J. Limpert, and A. Tünnermann, "26 mJ, 130 W Q-switched fiber-laser system with near-diffraction-limited beam quality," Optics Letters, Vol. 37, No. 6, pp. 1073-1075 (2012).

42 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).

43 J.D. Joannopoulos et al, "Photonic Crystals Molding the Flow of Light," Princeton University Press 2008, p. 286.

44 C.-H. Liu, G. Chang, N. Litchinitser, A. Galvanauskas D. Guertin, N. Jabobson, K. Tankala, "Effectively Single-Mode Chirally-Coupled Core Fiber," in Proceedings of Advanced Solid-State Photonics, Paper ME2 (2007).

45 S. Février, R. Jamier, J.-M. Blondy, S. L. Semjonov, M. E. Likhachev, M. M. Bubnov, E. M. Dianov, V. F. Khopin, M. Y. Salganskii, and A. N. Guryanov, "Low-loss singlemode large mode area all-silica photonic bandgap fiber," Optics Express, Vol. 14, pp. 562–569 (2006).

L. Dong, H. A. McKay, L. Fu, M. Ohta, A. Marcinkevicius, S. Suzuki, and M. E. Fermann, "Ytterbium-doped all glass leakage channel fibers with highly fluorine-doped silica pump cladding," Optics Express, Vol. 17, No. 11, pp. 8962–8969 (2009).

47 L. Dong, H. A. Mckay, A. Marcinkevicius, L. Fu, J. Li, B. K. Thomas, and M. E. Fermann, "Extending effective area of fundamental mode in optical fibers," J. Lightwave Technol, Vol. 27, No. 11, pp. 1565–1570 (2009).

48 L. Dong, H. A. McKay, and L. Fu, "All-glass endless single-mode photonic crystal fibers," Optics Letters, Vol. 33, No. 21, pp. 2440-2442 (2008).

D. Jain, C. Baskiotis, and J. K. Sahu, "Mode area scaling with multi-trench rod-type fibers," Optics Express, Vol. 21, No. 2, pp. 1448-1455 (2013).

50 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).

51 Lord Raylegh "On the maintenance of vibrations by forces of double frequency, and on the propagation of waves through a medium endowed with a periodic structure," Philosophical Magazine, Vol. 24, pp. 145-159 (1887).

52 V.P. Bykov, "Spontaneous emission in a periodic structure," Sov. Phys. – JETP, Vol. 35, pp. 269–273 (1972).

53 E. Yablonovitch, "Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics," Phys. Rev. Lett., Vol. 58, pp. 2059–2062 (1987).

54 S. John, "Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices," Phys. Rev. Lett., Vol. 58, pp. 2486–2489 (1987).

55 B.E.A. Saleh, M.C. Teich, "Fundamentals of Photonics," Wiley-Interscience 2007, p. 1177.

56 R.D. Meade, K.D. Brommer, A.M. Rappe and J. D. Joannopoulos, "Existence of a photonic band gap in two dimensions," Appl. Phys. Lett. Vol. 61, No. 4, pp. 495-497 (1992).

57 T.A. Birks, G.J. Pearce, D.M. Bird, "Approximate band structure calculation for photonic bandgap fibers," Optics Express, Vol. 14, No. 20, pp. 9483-9490 (2006).

J. Lægsgaard, "Gap formation and guided modes in photonic bandgap fibres with highindex rods," J. Opt. A.: Pure Appl. Opt., Vol. 6, pp. 798-804 (2004).

59 T. A. Birks, F. Luan, G. J. Pearce, A. Wang, J. C. Knight, and D. M. Bird, "Bend loss in all-solid bandgap fibres," Optics Express, Vol. 14, No. 12, pp. 5688-5698 (2006).

60 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).

61 Y. Li, C. Wang, T. A. Birks, and D. M. Bird, "Effective index method for all-solid photonic bandgap fibres," J. Opt. A, Vol. 9, pp. 858-861 (2007).

62 T. P. White, R. C. McPhedran, C. M. de Sterke, N. M. Litchinitser, B. J. Eggleton, "Resonance and scattering in microstructured optical fibers," Opt. Lett., Vol. 27, pp. 1977-1979 (2002).

63 N. M. Litchinitser, S. C. Dunn, B. Usner, B. J. Eggleton, T. P. White, R. C. McPhedran, C. M. de Sterke, "Resonances in microstructured optical waveguides," Opt. Express, Vol. 11, pp. 1243-1251 (2003).

64 P. R. Villeneuve, M. Piché, "Photonic band gaps in two-dimensional square and hexagonal lattices," Phys. Rev. B, Vol. 48, pp. 4969-4972 (1992).

J. Riishede, J. Lægsgaard, J. Broeng, A. Bjarklev, "All-silica photonic bandgap fibre with zero dispersion and a large mode area at 730 nm," J. Opt. A, Vol. 6, pp. 667-670 (2004).

66 T. A. Birks, D. M. Bird, T. D. Hedley, J. M. Pottage, P. St. J. Russell, "Scaling laws and vector effects in bandgap-guiding fibres," Optics Express, Vol. 12, pp. 69-74 (2004).

R. F. Cregan, B. J. Managan, J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell, P. J. Roberts,D. C. Allen, "Single-mode photonic band gap guidance of light in air," Science 285, pp. 1537-1539 (1999).

C. M. Smith, N. Venkataraman, M. T. Gallagher, D. Muller, J. A. West, N. F. Borrelli,
D. C. Allan, K. W. Koch, "Low-loss hollow-core silica/air photonic bandgap fibre," Nature 424, pp. 657-659 (2003).

69 R. T. Bise, R. S. Windeler, K. S. Kranz, C. Kerbage, B. J. Eggleton, D. J. Trevor, "Tunable photonic bandgap fiber," in Proc. of Optical Fiber Communication Conference, Vol. 70 of OSA Trends in Optics and Photonics (Optical Society of America, Washington, D.C., 2002) pp. 466-468 (2002).

70 F. Luan, A. K. George, T. D. Hedley, G. J. Pearce, D. M. Bird, J. C. Knight, P. St. J. Russell, "All-solid photonic band gap fiber," Optics Letters, Vol. 29, pp. 2369-2371 (2004).

A. Argyros, T. A. Birks, S. G. Leon-Saval, C. M. B. Cordeiro, F. Luan, P. St.J. Russell, "Photonic bandgap with an index step of one percent," Optics Express, Vol. 13, No. 1, pp. 309-314 (2005).

G. Bouwmans, V. Pureur, A. Betourne, Y. Quiquempois, L. Bigot, M. Perrin, and M. Douay, "Solid – Core Photonic Bandgap Fiber and its Future Potential," IEEE/LEOS Winter Topical Meeting Series, Paper TuD3.4 (2008).

G. Ren, P. Shum, L. Zhang, X. Yu, W. Tong, J. Luo, "Low-loss all-solid photonic bandgap fiber," Optics Letters, Vol. 32, No. 9, pp. 1023-1025 (2007).

A. Isomäki and O. G. Okhotnikov, "All-fiber ytterbium soliton mode-locked laser with dispersion control by solid-core photonic bandgap fiber," Optics Express, Vol. 14, No. 10, pp. 4368-4373 (2006).

A. Isomäki and O. G. Okhotnikov, "Femtosecond soliton mode-locked laser based on ytterbium-doped photonic bandgap fiber," Optics Express, Vol. 14, No. 20, pp. 9238-9243 (2006).

A. Wang, A.K. George, J.C. Knight, "Three-level neodymium fiber laser incorporating photonic bandgap fiber ", Optics Letters, Vol. 31, No. 10, pp. 1388-1390 (2006).

⁷⁷ "Rare earth doped fiber lasers and amplifiers," edited by Michel J.F. Digonnet, New York : Marcel Dekker 1993, p, 659.

V.P.Gapontsev, S.M.Matitisin, A.A.Isineev, V.B.Kravchenko, "Erbium glass lasers and their applications," Opt. Laser Techn., Vol.14, pp. 189-196 (1982).

Y. Hu, S. Jiang, T. Luo, K. Seneschal, M. Morrell, F. Smektala, S. Honkanen, J. Lucas,
N. Peyghambarian, "Performance of High-Concentration Er 3+-Yb 3+ - Codoped Phosphate
Fiber Amplifiers," IEEE Photonics Tech. Letters, Vol. 13, No. 7, pp. 657-659 (2001).

T. Qiu, L. Li, A. Schulzgen, V.L. Temyanko, T. Luo, S. Jiang, A. Mafi, J.V. Moloney, N. Peyghambarian, "Generation of 9.3-W Multimode and 4-W Single-Mode Output From 7cm Short Fiber Lasers", IEEE Photonics Tech. Letters, Vol. 16, No. 12, pp. 2592-2594 (2004).

A. Tünnermann, T. Schreiber, F. Röser, A. Liem, S. Höfer, H. Zellmer, S. Nolte, J. Limpert, "The renaissance and bright future of fiber lasers," J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., Vol. 38, S681-693 (2005).

82 G.P. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics," Academic Press, San Diego 1995, p. 323.

83 S.H. Xu, Z.M. Yang, T. Liu, W.N. Zhang, Z.M. Feng, Q.Y. Zhang, and Z.H. Jiang, "An efficient compact 300 mW narrow-linewidth single frequency fiber laser at 1.5 μ m," Optics Express, Vol. 18, No. 2, pp. 1249-1254 (2010).

R. Thapa, D. Nguyen, J. Zong, and A. Chavez-Pirson, "All-fiber fundamentally modelocked 12 GHz laser oscillator based on an Er/Yb-doped phosphate glass fiber," Optics Letters, Vol. 39, No. 6, pp. 1418-1421 (2014).

85 И.А. Буфетов, С.Л. Семенов, А.Ф. Косолапов, М.А. Мелькумов, В.В. Дудин, Б.И. Галаган, Б.И. Денкер, В.В. Осико, С.Е. Сверчков, Е.М. Дианов, "Иттербиевый

волоконный лазер на основе световода с сердцевиной из высококонцентрированного Yb³⁺ -стекла," Квантовая электроника, т. 36, № 3, сс. 189-191 (2006).

86 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).

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).

88 C. Xia, N. Bai, I. Ozdur, X. Zhou, and G. Li, "Supermodes for optical transmission," Optics Express, Vol. 19, pp. 16653–16664 (2011).

R. Ryf, R.-J. Essiambre, S. Randel, A. H. Gnauck, P. J.Winzer, T.Hayashi, T. Taru, and
T. Sasaki, "MIMO-based crosstalk suppression in spatially multiplexed 3×56 Gbps PDMQPSK signals for strongly coupled threecore fiber," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 23, No. 20, pp. 1469–1471 (2011).

90 S. O. Arik and J. M. Khan, "Coupled-core multi-core fibers for spatial multiplexing," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 25, No. 21, pp. 2054–2057 (2013).

91 R. Ryf, N.K. Fontaine, B. Guan, R.-J. Essiambre, S. Randel, A.H. Gnauck, S. Chandrasekhar, A. Adamiecki, G. Raybon, B. Ercan, R.P. Scott, S.J. Ben Yoo, T. Hayashi, T. Nagashima, and T. Sasaki, "1705 km transmission over coupled-core fiber supporting 6 spatial modes," in Proc. of European Conference on Optical Communication, Paper PD.3.2. (2014).

92 И.А. Лобач "Особенности распространения и генерации лазерного излучения в многосердцевинных волоконных световодах," тезисы кандидатской диссертации, Новосибирск (2012).

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).

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). 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).

D. Qian, M.-F. Huang, E. Ip, Y.-K. Huang, Y. Shao, J. Hu, and T. Wang. "101.7-Tb/s (370x294-Gb/s) PDM-128QAM-OFDM transmission over 3 × 55-km SSMF using pilot-based phase noise," in Proc. of Optical Fiber Communication Conference, Paper PDPB5 (2011).

97 D. J. Richardson, J. M. Fini and L. E. Nelson, "Space-division multiplexing in optical fibres," Nature Photonics, Vol. 7, pp. 354-562 (2013).

98 P.J. Winzer, A.H. Gnauck, A. Konczykowska, F. Jorge, and J.Y. Dupuy, "Penalties from In-Band Crosstalk for Advanced Optical Modulation Formats," in Proc. of European Conference on Optical Communication, Paper Tu.5.B.7. (2011).

K. Imamura, K. Mukasa, T. Yagi, "Effective Space Division Multiplexing by Multi-Core Fibers," in Proc. of European Conference of Optical Communications, Paper P1.09 (2010).

100 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.

101 M. Koshiba, K. Saitoh, Y. Kokubun, "Heterogeneous multi-core fibers: proposal and design principle," IEICE Electronics Express, Vol. 6. No. 2. pp. 98-103 (2009).

102 D. Marcuse, "Influence of curvature on the losses of doubly clad fibers," Applied Optics, Vol. 21, No. 23, pp. 4208-4213 (1982).

103 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).

104 T. Hayashi, T. Sasaki , E. Sasaoka, K. Saitoh, M. Koshiba, "Physical interpretation of intercore crosstalk in multicore fiber: effects of macrobend, structure fluctuation, and microbend," Optics Express, Vol. 21, No. 5, pp. 5401-5412 (2013).

105 Y. Sasaki, Y. Amma, K. Takenaga, S. Matsuo, K. Saitoh, M. Koshiba, "Investigation of Crosstalk Dependencies on Bending Radius of Heterogeneous Multicore Fiber," in Proc. of Optical Fiber Communication Conference, Paper OTh3K.3. (2013).

106 Патент США US 8923678 "Techniques for Manipulating Crosstalk in Multicore Fibers," Изобретатели: Fini J.M., Taunay T.F., Yan M.F., Zhu B.; заявитель: OFS FITEL; дата приоритета: 02.12.20190; опубликовано: 02.06.2011.

107 J.M. Fini, B. Zhu, T.F. Taunay, and M.F. Yan, "Statistics of crosstalk in bent multicore fibers," Optics Express, Vol. 18, No. 14, pp. 15122-15129 (2010).

108 A. Seeds, K. J. Williams, "Microwave Photonics," J. Of Lightwave Technology, Vol. 24, No. 12, pp. 4628-4641 (2006).

109 J. Capmany and D. Novak, "Microwave photonics combines two worlds," Nature photonics, Vol. 1, pp. 319-330 (2007).

110 J. Capmany, B. Ortega, D. Pastor, S. Sales, "Discrete-time optical processing of microwave signals," J. of Lightwave Technology, Vol. 23, pp. 702-723 (2005).

111 K. Wilner, V.D. Huevel, "Fiber optic delay lines for microwave signal processing," Proc. IEEE, Vol. 64, pp. 805-807 (1976).

112 I. Gasulla, J. Capmany, "Microwave Photonics Applications of Multicore Fibers," IEEE Photonics Journal, Vol. 4, pp. 877-888 (2012).

113 Электроника: Энциклопедический словарь, Гл. ред. В.Г. Колесников, Москва: Советская энциклопедия 1991, с. 668.

**. 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-μm
mode-field diameter," Optics Express, Vol. 16, No. 16, pp. 11735-11740 (2008).

115 ** 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).

116 ****** 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).

** 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. SPIE 7580, Fiber Lasers VII: Technology, Systems, and Applications, pp. 758018 (2010).

* 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 CMHH6 (2009).

119 * 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).

120 * 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).

121 * 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 оптики ВКВО'2009, Фотон-экспресс, № 6
(78), сс. 25-26. (2009).

** 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).

* 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).

124 * 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 оптики ВКВО'2011, Фотон-экспресс, № 6 (94), сс. 172-173 (2011).
125 ** 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).

126 * 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 оптики ВКВО'2013, Фотон-экспресс, № 6 (110), сс. 140-141 (2013).

127 * 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 оптики ВКВО'2015, Фотон-экспресс, № 6 (126), сс. 161-162 (2015).

128 * 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, paper SoM2B.2 (2014).

129 * 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).

130 * 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).

131 A. Argyros, T.A. Birks, S.G. Leon-Saval, C.M.B. Cordeiro, P.St.J. Russell, "Guidance properties of low-contrast photonic bandgap fibres", Opt. Express, Vol. 13, pp. 2503-2511 (2005).

132 А. Д. Прямиков, А. С. Бирюков, "Возбуждение циклических волн Зоммерфельда и аномалии Вуда при скользящем падении плоской волны на диэлектрический цилиндр," УФН, т. 183, сс. 863–873 (2013).

133 https://www.comsol.com.

134 T. P. White, B. T. Kuhlmey, R. C. McPhedran, D. Maystre, G. Renversez, C. Martijn de Sterke, and L. C. Botten, "Multipol method for microstructured optical fibers. I. Formulation," J. Opt. Soc. Am. B, Vol. 19, pp. 2322-2330 (2002).

B. T. Kuhlmey, T. P. White, G. Renversez, D. Maystre, L. C. Botten, C. Martijn de Sterke, and R. C. McPhedran, "Multipol method for microstructured optical fibers. II. Implementation and resultes," J. Opt. Soc. Am. B, Vol. 19, pp. 2331-2340 (2002).

136 S. G. Johnson and J. D. Joannopoulos, "Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a planewave basis," Optics Express, Vol. 8, No. 3, pp. 173-190 (2001).

137 J. Lægsgaard, "Gap formation and guided modes in photonic bandgap fibres with highindex rods," J. Of Optics A: Pure and Applied Optics, Vol. 6, pp.798-804 (2004).

138 A.D. Yablon, M.F. Yan, D.J. DiGiovanni, M.E. Lines, S.L. Jones, D.N. Ridgway, G.A. Sandels, I.A.White, P.Wisk, F.V.DiMarcello, E.M. Monberg, J. Jasapara, "Frozen-In Viscoelasticity for Novel Beam Expanders and High-Power Connectors", J. of Lightwave Technology, Vol. 22, pp. 16-23 (2004).

139 V. Pureur, A. Bétourné, G. Bouwmans, L. Bigot, M. Douay, and Y. Quiquempois, "Bending Losses in all solid 2D photonic band-gap fibers: a limiting factor?," in Proc. of European Conference on Optical Communication, paper We.P3.34 (2006).

140 T. Murao, K. Saitoh, and M. Koshiba, "Detailed theoretical investigation of bending properties in solid-core photonic bandgap fibers," Optics Express, Vol. 17, No. 9, pp. 7615-7629 (2009).

141 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).

142 R. Guobin, W. Zhi, L. Shuqin, J. Shuisheng, "Mode classification and degeneracy in photonic crystal fibers," Optics Express, Vol. 11, pp. 1310-1321 (2003).

143 F. Jansen, F. Stutzki, H.-J. Otto, M. Baumgartl, C. Jauregui, J. Limpert, and A. Tünnermann, "The influence of index-depressions in core-pumped Yb-doped large pitch fibers," Opt. Express, Vol. 18, No. 26, pp. 26834–26842 (2010).

144 F. Stutzki, F. Jansen, T. Eidam, A. Steinmetz, C. Jauregui, J. Limpert, and A. Tünnermann, "High average power large-pitch fiber amplifier with robust single-mode operation," Opt. Lett., Vol. 36, No. 5, pp. 689–691 (2011).

145 F. Jansen, F. Stutzki, C. Jauregui, J. Limpert, and Andreas Tünnermann, "Avoided crossings in photonic crystal fibers," Optics Express, Vol. 19, No. 14, pp. 13578-13589 (2011).

146 W.J. Wadsworth, J.C. Knight, P.St.J. Russell, "Large mode area photonic crystal fibre laser," in Proc. of Conference on Quantum Electronics and Laser Science Conference on Lasers and Electro-Optics, paper CWC1 (2001).

147 R. Renner-Erny, L. Di Labio, W. Lüthy "A novel technique for active fibre production," Optical Materials, Vol. 29, pp. 919-922 (2007).

148 K. Saitoh, T. Murao, L.Rosa, and M. Koshiba, "Effective area limit of large-mode-area solid-core photonic bandgap fibers for fiber laser applications," Opt. Fiber Technology, Vol. 16, No. 6, pp. 409-418 (2010).

M. Kashiwagi, K. Saitoh, K. Takenaga, S. Tanigawa, S. Matsuo, M. Fujimaki, "Low bending loss and effectively single-mode all-solid photonic bandgap fiber with an effective area of 650 μm2", Optics Letters, Vol. 37, No. 8, pp. 1292-1294 (2012).

150 S. Saitoh, K. Saitoh, M. Kashiwagi, S. Matsuo, and L. Dong, "Design optimization of large-mode-area all-solid photonic bandgap fibers for high-power laser applications," J. Lightwave Thecnology, Vol. 32, No. 3, pp. 440-449 (2014).

151 M. Kashiwagi, K. Saitoh, K. Takenaga, S. Tanigawa, S. Matsuo, M. Fujimaki, "Effectively single-mode all-solid photonic bandgap fiber with large effective area and low bending loss for compact high-power all-fiber lasers," Optics Express, Vol. 20, No. 14, pp. 15061-15070 (2012).

152 G. Gu, F. Kong, T. Hawkins, J. Parsons, M. Jones, C. Dunn, M. Dong, K. Saitoh, L. Dong, "Ytterbium-doped large-mode-area all-solid photonic bandgap fiber lasers" Optics Express, Vol. 22, No. 11, pp. 13962-13968 (2014).

153 F. Kong, K. Saitoh, D. Mcclane, T. Hawkins, P. Foy, G. Gu, and L. Dong, "Mode area scaling with all-solid photonic bandgap fibers," Optics Express, Vol. 20, No. 24, pp. 26363-26372 (2012).

154 ****** 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). 155 ** 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).

** 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).

157 **. 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).

* 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).

159 * 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, «Иттербийэрбиевое лазерное волокно с фосфатной сердцевиной и кварцевой оболочкой,» труды Всероссийской конференции по волоконной оптики ВКВО'2013, Фотон-экспресс, № 6 (110), с. 148 (2013).

160 * 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 оптики ВКВО'2017, Фотон-экспресс, № 6 (142), с. 143-144 (2017).

161 * 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 Ег и Yb и оболочкой из кварцевого стекла,» В сборнике: IV Международная конференция по фотонике и информационной оптике Сборник научных трудов с. 80-81 (2015).

162 * 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 оптики ВКВО'2015, Фотон-экспресс, № 6 (126), с. 124 (2015).

163 * O.N. Egorova, S. L. Semjonov, O. I. Medvedkov, M. S. Astapovich, A. G. Okhrimchuk, 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).

164 * 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).

165 F. Sanchez, P.L. Boudec, P.L. Francois, G. Stephan, "Effects of ion pairs on the dynamics of erbium-doped fiber laser," Phys. Rev. A., Vol. 48, pp. 2220-2229 (1993).

166 G. Sobon, P. Kaczmarek, A. Antonczak, J. Sotor, and K. M. Abramski, "Controlling the 1 μ m spontaneous emission in Er/Yb co-doped fiber amplifiers," Opt. Express, Vol. 19, pp. 19104–19113 (2011).

167 E.F. Artem'ev, A.G. Murzin, Y.K. Fedorov, V.A. Fromzel, "Some characteristics of population inversion of the ${}^{4}I_{13/2}$ level of erbium ions in ytterbium-erbium glasses," Sov. J. Quantum Electron., Vol. 11, No. 9 (1981).

168 G.G. Vienne, J.E. Caplen, L. Dong, J.D. Minelly, J. Nilsson, D. Payne, "Fabrication and Characterization of Yb3+:Er3+ Phosphosilicate Fibers for Lasers," J. of Lightwave Technology, Vol. 16, No. 11, pp. 1990-2001 (1998).

169 G. Karlsson, F. Laurell, J. Tellefsen, B. Denker, B. Galagan, V. Osiko, S. Sverchkov, "Development and characterization of Yb-Er laser glass for high average power laser diode pumping," Appl. Phys. B, Vol. 75, pp. 41-46 (2002).

170 B.I. Denker, B.I. Galagan, S.E. Sverchkov, "Up-conversion losses in different erbium-doped laser glasses," Applied Physics B, Vol. 120, No. 2, pp. 367-372 (2015).

171 Yu. K. Voronko, B.I. Denker, A.A. Zlenko, A.Ya. Karasik, Yu.S. Kuz'Minov, G.V. Maksimova, V.B. Neustruyev, V.V. Osiko, A.M. Prokhorov, V.A. Sychugov, G.P. Shipulo, I.A. Shcherbakov, "Spectral and lasing properties of Li-Nd phosphate glass," Optics Communications, Vol. 18, p. 88 (1976).

172 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).

173 Б.И. Галаган, И.Н. Глущенко, Б.И. Денкер, Ю.Л. Калачев, В.А. Михайлов, С.Е. Сверчков, «Влияние условий синтеза на оптические потери в алюмоборофосфатном лазерном стекле,» Физика и Химия стекла, т. 37, № 3, сс.350-356 (2011).

174 O.V. Butov, A.A. Rybaltovsky, A.P. Bazakutsa, K.M. Golant, M.Y. Vyatkin, S.M. Popov, Y.K. Chamorovskiy, "1030 nm Yb3+ distributed feedback short cavity silica-based fiber laser," J. of Opt. Soc. Of Am. B, Vol.34, No. 3, pp. A43-A48 (2017).

175 J. Kirchhof and S. Unger, "Codoping Effects in Fibers for Active Applications," in Proc. of Optical Fiber Communication Conference, Paper WM1 (1999).

176 J.J. Mecholsky, R.W. Rice, and S.W. Freiman, "Prediction of Fracture Energy and Flaw Size in Glasses from Measurements of Mirror Size," Journal of the American Ceramic Society, Vol. 57, N. 10, pp. 440-443 (1974).

177 ** 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 В2 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).

178 ** 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).

179 ** 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).

180 ****** 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).

181 * 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 оптики ВКВО'2013, Фотон-экспресс, № 6 (110), с. 277-278 (2013).

182 * 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 оптики ВКВО'2013, Фотон-экспресс, № 6 (110), с. 325-326 (2013).

183 * 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).

184 * 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 оптики ВКВО'2015, Фотон-экспресс, № 6 (126), с. 107-108 (2015).

185 * 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).

186 А. Снайдер, Дж. Лав "Теория оптических волноводов," М.: Радио и связь 1987, с.656.

187 A.W. Snyder, "Coupled-Mode Theory for Optical Fibers," J. Opt. Soc. Am., Vol. 62, No. 11, pp. 1267-1277 (1972).

188 T. Hayashi, T. Taru, O. Shimakawa, T. Sasaki, and E. Sasaoka, "Design and fabrication of ultra-low crosstalk and low-loss multi-core fiber," Optics Express, Vol. 19, No. 17, pp. 16576-16592 (2011).

189 K. Takenaga, S. Tanigawa, N. Guan, S. Matsuo, K. Saitoh, and M. Koshiba, "Reduction of Crosstalk by Quasi-Homogeneous Solid Multi-Core Fiber," in Proc. of Optical Fiber Communication Conference, paper OWK7 (2010).

190 J.M. Fini, B. Zhu, T.F. Taunay, M.F. Yan, K.S. Abedin, "Crosstalk in multicore fibers with randomness: gradual drift vs. short-length variations," Optics Express, Vol. 20, No. 2, pp. 949-959 (2012).

191 R. T. Schermer and J. H. Cole, "Improved bend loss formula verified for optical fiber by simulation and experiment," IEEE J. of Quantum Electronics, Vol. 43, No. 10, pp. 899-909 (2007).

192 S. Li, D.L. Butler, M.-J. Li, A. Koklyushkin, V. Nazarov, R. Khrapko, Y. Geng, R.L. McCollum, "Bending effects in multicore optical fibers," in Proc. of IEEE Photonics Conference, paper TuF3.2 (2013).

193 I. Ishida, T. Akamatsu, Z. Wang, Y. Sasaki, K. Takenaga, S. Matsuo, "Possibility of Stack and Draw process as Fabrication Technology for Multi-Core Fiber," in Proc. of Optical Fiber Communication Conference, Paper OTu2G.1 (2013).

194 S. Matsuo, M. Ikeda, and K. Himeno, "Bend-insensitive and low-spliceloss optical fiber for indoor wiring in FTTH," in Proc. of Optical Fiber Communication, Paper ThI3 (2004).

195 K. Himeno, S. Matsuo, N. Guan, and A. Wada, "Low-Bending-Loss Single-Mode Fibers for Fiber-to-the-Home," IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 23, No. 11, pp. 3494-3499 (2005).

196 ГОСТ Р МЭК 60793-1-44-2013.

197 K. Takenaga, Y. Arakawa, Y. Sasaki, S. Tanigawa, S. Matsuo, K. Saitoh, and M. Koshiba, "A large effective area multi-core fiber with an optimized cladding thickness," Opt. Express, Vol. 19, pp. B543-B550 (2011).

198 Международная патентная заявка РСТ 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.

199 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.

200 T. Hayashi, T. Taru, O. Shimakawa, T. Sasaki, E. Sasaoka, Ultra-Low-crosstalk Multi-Core Fiber Feasible to Ultra.Long-Haul Transmission," in Proc. of Optical Fiber Communication Conference, Paper PDPC2 (2011).

201 K. Takenaga, Y. Arakawa, S. Tanigawa, N. Guan, S. Matsuo, K. Saitoh, M. Koshiba, "Reduction of Crosstalk by Trench-Assisted Multi-Core Fiber," in Proc. of Optical Fiber Communication Conference, Paper OWJ4 (2011). B. Zhu, T.F. Taunay, M. Fishteyn, X. Liu, S. Chandrasekhar, M.F. Yan, J.M. Fini, E.M. Monberg, F.V. Dimarcello, "112-Tb/s Space-division multiplexed DWDM transmission with 14-b/s/Hz aggregate spectral efficiency over a 76.8 km seven-core fiber," Optics Express, Vol. 19. No. 17. pp. 16665-16671 (2011).

203 B. Zhu, J.M. Fini, M.F. Yan, X. Liu, S. Chandrasekhar, T.F. Taunay, M. Fishteyn, E.M. Monberg, F.V. Dimarcello, "High-Capacity Space-Division-Multiplexed DWDM Transmissions Using Multicore Fiber," J. of Lightwave Technology, Vol. 30. No. 4, pp. 486-492 (2012).

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).

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).

206 D. Soma , Y. Wakayama, S. Beppu, S. Sumita, T. Tsuritani, T. Hayashi , T. Nagashima, M. Suzuki, M. Yoshida, K. Kasai, M. Nakazawa, H. Takahashi, K. Igarashi, I. Morita, and M. Suzuki, "10.16-Peta-B/s Dense SDM/WDM Transmission Over 6-Mode 19-Core Fiber Across the C+L Band," J. Lightwave Technology, Vol. 36, No. 6, pp. 1362-1368 (2018).

207 M.-J. Li, B. Hoover, V.N. Nazarov, D.L. Butler, "Multicore Fiber for Optical Interconnect Applications," in Proc. Of Optoelectronics and Communications Conference, Paper 5E4-2 (2012).

L. J. Cooper, P. Wang, R. B. Williams, J. K. Sahu, W. A. Clarkson, A. M. Scott and D. Jones, "High-power Yb-doped multicore ribbon fiber laser," Optics Letters, Vol. 30, No. 21, pp. 2906-2908 (2005).

209 ** 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.

210 ** 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).

211 ****** 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).

212 ** 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).

213 ****** О.Н. Егорова, М.С. Астапович, М.Е. Белкин, С.Л. Семенов, "Волоконнооптическая линия задержки на основе многосердцевинного оптического волокна," Краткие сообщения по физике ФИАН, т. 12, сс. 60-64 (2016).

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

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

216 ** 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).

217 ** Патент РФ № RU 2 707 383 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.

** 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).

219 ** 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).

220 * 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).

221 ** 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).

222 * 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).

223 А.В. Белов, Е.М. Дианов, А.С. Курков, «Измерение хроматической дисперсии в одномодовых волоконных световодах интеференционным методом,» Квантовая электроника, т. 13, № 8, сс. 1680-1682 (1986).

224 А.Е. Левченко, А.С. Курков, С.Л. Семенов, «Измерение дисперсии в волоконных световодах с микроструктурированной оболочкой,» Квантовая электроника, т. 35, № 9, сс. 835-838 (2005).

225 С.А. Ахманов, С.Ю. Никитин "Физическая оптика," М.:Изд-во МГУ; Наука 2004.с. 334.

W. Klaus, J. Sakaguchi, B. J. Puttnam, Y. Awaji, N. Wada, T. Kobayashi, M. Watanabe, "Free-space coupling optics for multi-core fibers," IEEE Photon. Tech. Lett., Vol. 24, pp. 1902–1905 (2012).

J. Sakaguchi, B.J. Puttnam, W. Klaus, Y. Awaji, N. Wada, A. Kanno, T. Kawanishi, K. Imamura, H. Inaba, K. Mukasa, R. Sugizaki, T. Kobayashi, M. Watanabe, "19-core fiber transmission of 19x100x172-Gb/s SDM-WDM-PDM-QPSK signals at 305Tb/S," in Proc. of Optical Fiber Communication Conference, Paper PDP5C.1. (2012).

228 Y. Tottori, T. Kobayashi, and M. Watanabe, "Low Loss Optical Connection Module for Seven-Core Multicore Fiber and Seven Single-Mode Fibers," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 24, No. 21, pp. 1926-1928, (2012). T. Watanabe, M. Hikita, Y. Kokubun, "Laminated polymer waveguide fan-out device for uncoupled multi-core fibers," Optics Express, Vol. 20, pp. 26317-26325 (2012).

D. Suganuma, T. Ishigure, "Fan-in/out polymer optical waveguide for a multicore fiber fabricated using the Mosquito method," Optics Express, Vol. 23, No. 2, pp. 1585-1593 (2015).

231 R. R. Thomson, H. T. Bookey, N. D. Psaila, A. Fender, S. Campbell, W. N. MacPherson, J. S. Barton, D. T. Reid, and A. K. Kar, "Ultrafast-laser inscription of a three dimensional fan-out device for multicore fiber coupling applications," Optics Express, Vol. 15, No. 18, pp. 11691-11696 (2007).

B. Zhu, T. Taunay, M. Fishteyn, X. Liu, S. Chandrasekhar, M. Yan, J. Fini, E. Monberg, F. Dimarcello, "Space-, wavelength-, polarization-division multiplexed transmission of 56-Tb/s over a 76.8-km seven-core fiber," in Proc. of Optical Fiber Communication Conference, Paper PDPB7 (2011).

233 K. Watanabe, "Connectivity technologies of MCF: readiness for field deployment" Proc. of SPIE, Vol. 9774, pp. 97740Q-1-9 (2016).

B. Li, Z. Feng, M. Tang, Z. Xu, S. Fu, Q. Wu, L. Deng, W. Tong, S. Liu, P.P. Shum, "Experimental demonstration of large capacity WSDM optical access network with multicore fibers and advanced modulation formats," Optics Express, Vol. 23, No. 9, pp 10997-11006 (2015).

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).

236 А. А. Вольф, А. В. Достовалов, С. Л. Семёнов, С. Г. Журавлев, М. Ю. Салганский, О. Н. Егорова, "Создание однородных и неоднородных ВБР в 7сердцевинном волоконном световоде методом фемтосекундной поточечной записи," Прикладная фотоника, том 6, №1-2, с. 47-58 (2019).

237 А.А. Вольф, К.А. Бронников, С.С. Якушин, А.В. Достовалов, С.Г. Журавлев, М.Ю. Салганский, О.Н. Егорова, С.Л. Семёнов, С.А. Бабин, «Фемтосекундная запись массивов ВБР в 7- сердцевинных волоконных световодах для сенсорных применений,» Труды всероссийской конференции по волоконной оптике 2019, Фотон-экспресс № 6, с. 158 (2019).

238 Z. Yang, C. Li, S. Xu, C. Yang, "Single-Frequency Fiber Lasers," Singapore: Springer 2019, p.170.

239 W. Shi, Q. Fang, X. Zhu, R.A. Norwood, and N. Peyghambarian, "Fiber lasers and their applications," Applied Optics, Vol. 53, pp. 6554-6568 (2014).

240 S. Fu, W. Shi, Y. Feng, L. Zhang, Z. Yang, S. Xu, X. Zhu, R.A. Norwood, and N. Peyghambarian, "Review of recent progress on single-frequency fiber lasers [Invited]," Journal of the Optical Society of America B, Vol. 34, No. 3, pp. A49-A62 (2017).

A. Othonos, K. Kalli, "Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing," Norwood, Mass.: Artech House 1999, p.422.

242 P.L. Swart, M.G. Shlyagin, A.A. Chtcherbakov, V.V. Spirin, "Photosensitivity measurement in optical fibre with Bragg grating interferometers," Electronics Letters, Vol. 38, No. 24, pp. 1508-1510 (2002).

243 Y. O. Barmenkov, D. Zalvidea, S. Torres-Peiró, J.L. Cruz, M.V. Andrés, "Effective length of short Fabry-Perot cavity formed by uniform fiber Bragg gratings," Optics Express, Vol. 14, No. 14, pp. 6394-6399 (2006).

244 А.А. Рыбалтовский, С.А. Васильев, О.В. Бутов, О.Н. Егорова, С.Г. Журавлев, С.Л. Семенов, Б.И. Галаган, С.Е. Сверчков, Б.И. Денкер, "Фоточувствительность эрбиевых композитных фосфоросиликатных световодов к лазерному излучению с длиной волны 193 нм," Квантовая электроника, т. 49, № 12, сс. 1132-1136 (2019).

A.A. Rybaltovsky, O.N. Egorova, S.A. Vasiliev, S.G. Zhuravlev, O.V. Butov, S.L. Semjonov, B.I. Galagan, S.E. Sverchkov, B.I. Denker, "Photosensitivity of highly Erbiumdoped composite phosphosilicate fibers for single-frequency ultra-short cavity fiber lasers development," Conference on Advanced Laser Technologies, Book of Abstracts, pp. 106-107 (2019).

246 А.А. Рыбалтовский, О.Н. Егорова, С.А. Васильев, С.Г. Журавлев, О.В. Бутов, С.Л. Семенов, Б.И. Галаган, С.Е. Сверчков, Б.И. Денкер, «Волоконные решетки в активных композитных фосфосиликатных световодах,» Труды всероссийской конференции по волоконной оптике 2019, Фотон-экспресс № 6, с. 160 (2019).

T. Qiu, S. Suzuki, A. Schülzgen, L. Li, A. Polynkin, V. Temyanko, J. V. Moloney, and N. Peyghambarian, "Generation of watt-level single-longitudinal-mode output from cladding-pumped short fiber lasers," Optics Letters, Vol. 30, No. 20, pp. 2748 -2750 (2005).

248 S. Xu, C. Li, W. Zhang, S. Mo, C. Yang, X. Wei, Z. Feng, Q. Qian, S. Shen, M. Peng, Q. Zhang, and Z. Yang, "Low noise single-frequency single-polarization ytterbiumdoped phosphate fiber laser at 1083 nm," Optics Letters, Vol. 38, No. 4, pp. 501 -503 (2013).

249 T. Erdogan, V. Mizrahi, "Characterization of UV-induced birefringence in photosensitive Ge-doped silica optical fibers," J. Opt. Soc. Am. B, Vol 11, No. 10, pp. 2100-2104 (1994).

250 V. Mizrahi, D. J. DiGiovanni, R. M. Atkins, S. G. Grubb, Y.-K. Park, and J.-M. P. Delavaux, "Stable single-mode erbium fiber-grating laser for digital communication," J. Lightwave Technol., Vol. 11, pp. 2021-2025 (1993).

251 Y.J. Rao, M. Deng, D.W. Duan, X.C. Yang, T. Zhu, G.H. Cheng, "Micro Fabry-Perot interferometers in silica fibers machined by femtosecond laser," Optics Express, Vol. 15, No. 21, pp. 14123-14128 (2007).

252 T. Wei, Y.K. Han, H.L. Tsai, H. Xiao, "Miniaturized fiber inline Fabry-Perot interferometer fabricated with a femtosecond laser," Optics Letters, Vol. 33, No. 6, pp. 536-538 (2008).

J. Villatoro, V. Finazzi, G. Coviello, V. Pruneri, "Photonic-crystal-fiber-enabled micro-Fabry-Perot interferometer," Optics Letters, Vol. 34, No. 16, pp. 2441-2443 (2009).

M. S. Ferreira, J. Bierlich, J. Kobelke, K. Schuster, J.L. Santos, O. Frazão, "Towards the control of highly sensitive Fabry-Pérot strain sensor based on hollow-core ring photonic crystal fiber," Optics Express, Vol. 20, pp. 21946-21952 (2012).

255 F. C. Favero, L. Araujo, G. Bouwmans, V. Finazzi, J. Villatoro, V. Pruneri, "Spheroidal Fabry-Perot microcavities in optical fibers for high-sensitivity sensing," Optics Express, Vol. 20, pp. 7112-7118 (2012).

256 S. Liu, Y. Wang, C. Liao, G. Wang, Z. Li, Q. Wang, J. Zhou, K. Yang, X. Zhong, J. Zhao, J. Tang, "High-sensitivity strain sensor based on in-fiber improved Fabry–Perot interferometer," Optics Letters, Vol. 39, pp. 2121-2124 (2014).

257 D.W. Duan, Y. Rao, Y.-S. Hou, T.Zhu, "Microbubble based fiber-optic Fabry–Perot interferometer formed by fusion splicing single-mode fibers for strain measurement," Applied Optics, Vol. 51, pp. 1033-1036 (2012).

V.R. Machavaram, R.A. Badcock, G.F. Fernando, "Fabrication of intrinsic fibre Fabry-Perot sensors in silica fibres using hydrofluoric acid etching," Sensors and Actuators A, Vol. 138, pp. 248-260 (2007).

259 Z. Ma, F. Pang, H. Liu, Z. Chen, T. Wang, "Air microcavity formed in sapphirederived fiber for high temperature sensing," in Proc. of Conference on Optical Fiber Sensors, paper WF48 (2018). E.Cibula and D. Donlagic, "In-line short cavity Fabry-Perot strain sensor for quasi distributed measurement utilizing standard OTDR," Optics Express, Vol. 15, pp. 8719-8730 (2007).

261 В.К. Леко, О.В. Мазурин "Свойства кварцевого стекла," Л.: Наука 1985, с. 166.

A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins, E. J. Friebele, "Fiber grating sensors," IEEE Journal of lightwave technology, Vol. 15, pp. 1442-1463 (1997).