

На правах рукописи

Бутов Олег Владиславович

**ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ
РЕШЕТОК И УСТРОЙСТВ НА ИХ ОСНОВЕ**

Специальность 01.04.21 – Лазерная физика

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Защита диссертации состоится « » _____ 2020 г. в _____ на заседании диссертационного совета _____ на базе Московского физико-технического института (государственного университета) по адресу: 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д.9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского физико-технического института (национального исследовательского университета) <https://mipt.ru/education/post-graduate/soiskateli-fiziko-matematicheskie-nauki.php>

Работа представлена « » _____ 2020 г. в Аттестационную комиссию Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» для рассмотрения советом по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук в соответствии с п. 3.1 ст. 4 Федерального закона «О науке и государственной научно-технической политике».

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Начало эры волоконной оптики можно отнести к началу 70-х годов, когда был разработан первый кварцевый световод с низкими потерями. Впервые были достигнуты потери в световоде на уровне 20 дБ/км [1]. Именно тогда началось активное развитие оптической телекоммуникации. Вскоре потери были снижены до уровня 4 дБ/км, а впоследствии и до 0,2 дБ/км, что позволило начать создание протяженных линий связи.

В настоящее время волоконная оптика не ограничивается только лишь вопросами телекоммуникации. На основе волоконно-оптических технологий активно развивается и волоконная сенсорика, лазерная физика. Ощутимый толчок к развитию данных технологий дало открытие в 1978 году фоточувствительности волоконных световодов [2], т.е. возможности перманентно изменять показатель преломления легированного германием кварцевого стекла, составляющего основу сердцевины волоконных световодов под действием высокоэнергетического оптического излучения, что позволило формировать внутриволоконные периодические структуры, названные по аналогии с эффектом Брэгга-Вульфа брэгговскими. В дальнейшем было показано, что наиболее эффективно запись брэгговских структур происходит с помощью воздействия лазерного излучения ультрафиолетового диапазона, совпадающего с полосами поглощения примесных дефектов легированной сердцевины. Были разработаны методы формирования брэгговских решеток с помощью бокового облучения [3]. Для создания необходимой периодической структуры на сердцевине волоконного световода формировалась интерференционная картина в свете луча лазера ультрафиолетового диапазона с помощью специально разработанных схем интерферометров или с применением фазовых масок [4-7]. Преимущества такого метода были очевидны. Во-первых, формирование эффективной брэгговской структуры производилось на коротком участке волоконного световода, что позволяло создать компактный и эффективный брэгговский элемент. Во-вторых, такая технология позволяла записывать решетки с различным периодом, просто изменяя угол сведения лучей интерферометра или применяя фазовую маску с другим периодом.

Было очевидно, что подобные брэгговские решетки могут найти широкое применение в качестве узкополосных оптических фильтров, в качестве зеркал волоконных лазеров, а также в качестве датчиков физических величин. Действительно, при внешнем воздействии на световод, таком как продольное механическое напряжение или нагрев, изменяются оптические

свойства структуры, что приводит и изменению брэгговской длины волны отражения. Таким образом, создание волоконных брэгговских решеток положило основу новому большому направлению в прикладной науке. Исследование механизмов фоточувствительности, разработка методов формирования брэгговских структур с заданными свойствами, расширение областей применения брэгговских решеток и датчиков, на их основе составляет содержание работ множества научных групп по всему миру. В настоящее время датчики на основе брэгговских решеток активно используются в различных областях строительства, промышленности для контроля многих ключевых технологических параметров, состояния элементов конструкций и сложных инженерных сооружений, практически вытесняя собой электрические аналоги. Брэгговские решетки также являются ключевыми элементами современных волоконных лазеров.

Несмотря на активное развитие данного направления в науке и промышленности на протяжении последних трех десятков лет, остается множество актуальных вопросов, среди которых разработка и применение новых принципов в волоконной сенсорике, решение ключевых задач, ограничивающих использование брэгговских датчиков в сложных условиях эксплуатации, включая высокие температуры и работу в присутствии высокоинтенсивного ионизирующего излучения. Отдельного внимания заслуживают вопросы исследования лазерных сред и создания на их основе эффективных волоконных лазерных источников, включая одночастотные волоконные лазеры с распределенной обратной связью.

Вопросы использования брэгговских датчиков в условиях высоких температур и повышенного фона ионизирующего излучения являются крайне актуальными для целого ряда отраслей, таких как аэрокосмическая отрасль, атомная энергетика, военная промышленность. Относительно низкая стойкость как самих волоконных световодов, так и датчиков на их основе к воздействию вышеперечисленных факторов является существенным ограничивающим фактором для их использования. Так, например, до недавнего времени не существовало возможности проведения полноценной диагностики состояния атомного реактора внутри его активной зоны ввиду отсутствия датчиков, как оптических, так и электрических, с достаточно высокой стойкостью к воздействию ионизирующего излучения. Однако, именно брэгговские датчики являются крайне перспективными для обеспечения контрольных измерений и проведения комплексной диагностики объектов в условиях высокого уровня радиации. Повышение радиационной стойкости, создание термоустойчивых брэгговских структур

является одной из основных задач дальнейшего развития волоконной сенсорики.

Другим, крайне перспективным, но, на данный момент, малоизученным направлением является развитие биосенсорики на основе волоконно-оптических технологий. Действительно, оптическое волокно является удобным, гибким инструментом доставки излучения и изображения, в том числе и для использования внутри живого организма. Очевидно, что и создание биосенсоров различного назначения, позволяющих проводить экспресс-диагностику и контроль проведения различного рода процедур является интересной и актуальной задачей. Так, на основе сенсоров, чувствительных к параметрам исследуемой внешней среды, возможно создание высокоточных датчиков иммунного анализа. В основу таких датчиков могут быть положены брэгговские решетки с наклонными штрихами (наклонные брэгговские решетки), обеспечивающие возбуждение оболочечных мод и возможность анализа их взаимодействия с внешней поверхностью сенсора. Отдельного внимания заслуживают волоконные датчики, работающие на эффекте поверхностного плазмонного резонанса. Обладая потенциально высоким разрешением, они могут войти в состав компактного и мобильного сенсорного комплекса. Особую актуальность данное направление может получить с развитием технологии «лаборатория на чипе», которая является основой перспективных систем экспресс-диагностики в медицине будущего. В литературе встречается большое количество работ, посвященных датчикам на основе наклонных брэгговских решеток, однако такие датчики до сих пор остаются в виде лабораторных макетов ввиду целого ряда нерешенных проблем. Среди них можно выделить две основные – контроль поляризации излучения, проходящего по датчику и корректная, однозначная интерпретация показаний датчика и их изменений. Первая проблема связана с крайне высокой чувствительностью эффективности возбуждения поверхностных плазмонов к поляризации возбуждающего излучения. Даже незначительная нестабильность поляризации может приводить к искажениям спектра датчика и, как следствие, падению точности показаний. Вторая проблема связана со сложной структурой самого спектра пропускания датчика и, как следствие, сложностью его интерпретации. Поэтому, создание методов контроля и стабилизации поляризации проходящего по сенсору излучения, а также разработка математического аппарата, способного обеспечить однозначную интерпретацию данных с плазмонного сенсора на основе брэгговских решеток с наклонными штрихами, является наиболее важными и актуальными задачами в этой области.

Волоконные брэгговские решетки являются неотъемлемой частью большинства волоконных лазеров, формируя необходимую структуру резонатора. В классических схемах решетки выполняют роль зеркал в составе лазерного резонатора. Особый интерес вызывают одночастотные волоконные лазеры, которые находят широкое применение в телекоммуникации и волоконной сенсорике. Отдельным крайне перспективным направлением является разработка лазеров с распределенной обратной связью. В таких устройствах брэгговская решетка располагается вдоль всего резонатора, а для обеспечения условий генерации в структуре решетки формируется фазовый сдвиг. Именно благодаря особенностям структуры такой лазер, как правило, с коротким, длиной несколько сантиметров, резонатором, обеспечивает одночастотный режим генерации со сверхузкой спектральной полосой излучения. Изучение особенностей и механизмов генерации таких лазеров, оптимизация их структуры и состава сердцевины активного световода является крайне актуальными задачами современной волоконной оптики.

Как видно из вышесказанного, несмотря на значительную историю исследований, а также опыта использования волоконных брэгговских решеток и устройств на их основе, остается целый ряд нерешенных проблем, препятствующих дальнейшему развитию как волоконной лазерной техники, так и брэгговской волоконной сенсорики.

Цели и задачи

Целью данной работы является оценка возможностей и поиск способов решения проблем, ограничивающих развитие технологий брэгговской сенсорики и волоконной лазерной техники.

Для достижения вышеуказанной цели в работе были поставлены следующие задачи:

1. Исследовать динамику записи брэгговских решеток и влияние параметров записи на их свойства.
2. Исследовать термическую и радиационную стойкость датчиков на основе волоконных брэгговских решеток для создания сенсорных систем, способных работать в условиях повышенных температур и высокого радиационного фона.
3. Исследовать влияние молекулярного водорода на параметры брэгговских решеток, записанных в волокнах с различным легированием сердцевины.
4. Показать возможность создания датчика на основе брэгговских решеток, способного работать в сложных условиях эксплуатации, в том числе в активной зоне атомного реактора. Предложить решение важной

отраслевой задачи контроля изгиба технологических каналов в графитовой кладке атомных реакторов типа РБМК-1000.

5. Предложить методы стабилизации поляризации излучения, проходящего по наклонной брэгговской решетке.
6. Оценить влияние температуры и предложить методику ее компенсации в схемах с использованием плазмонных датчиков на основе наклонных волоконных брэгговских решеток.
7. Разработать математический аппарат автоматической интерпретации показаний плазмонного сенсора на основе наклонных брэгговских решеток.
8. Продемонстрировать возможность создания волоконных лазеров с коротким (менее 30 мм) резонатором на основе высоколегированных редкоземельными элементами волоконных световодов.
9. Выявить и объяснить механизмы формирования импульсного режима работы эрбиевых волоконных лазеров.

Научная новизна

1. В рамках данной диссертационной работы впервые продемонстрирована возможность записи брэгговских решеток в волоконных световодах с низким уровнем легирования сердцевинной азотом (0,5 ат. % N). Выявлен двухступенчатый механизм записи брэгговских решеток в данном типе волоконного световода.
2. Показана зависимость динамики формирования и последующего термического распада брэгговских решеток, записанных в световоде с сердцевинной, легированной азотом от режимов их записи.
3. Проведено детальное исследование стойкости волоконных световодов с сердцевинной легированной азотом и брэгговских решеток на их основе к воздействию ионизирующего излучения, в том числе, в условиях реакторного облучения.
4. Получены и проанализированы новые данные по взаимодействию водорода с фотоиндуцированной структурой брэгговских решеток, записанных в кварцевых световодах с азотосиликатной и германосиликатной сердцевинной.
5. Впервые предложен полностью волоконный высокочувствительный датчик изгиба на основе брэгговских сенсорных элементов, способный работать в активной зоне атомного реактора. Разработка получила практическую реализацию в виде датчика изгиба технологических каналов в графитовой кладке реактора РБМК-1000, благодаря чему была решена важная отраслевая задача.

6. Впервые предложена схема построения плазмонного волоконного датчика повышенной стабильности на основе наклонной брэгговской решетки с применением волокон с сохранением поляризации.
7. Предложен и реализован универсальный математический аппарат автоматической обработки спектра пропускания плазмонного волоконного датчика на основе наклонной брэгговской решетки, что позволило достичь разрешения сенсора по показателю преломления до величины 3×10^{-6} .
8. На основе высоколегированных редкоземельными элементами волоконных световодов изготовлены волоконные лазеры с распределенной обратной связью со сверхмалой длиной резонатора (12-24 мм).
9. Впервые продемонстрирована температурная зависимость режимов работы эрбиевого волоконного лазера. Предложена новая теоретическая модель, возникновения импульсного режима генерации в эрбиевых волоконных лазерах, основанная на эффекте обратного насыщающегося поглощения.

Теоретическая и практическая значимость работы

На основе полученных данных по исследованию радиационной и термической стойкости волоконных световодов и внутриволоконных брэгговских структур может быть создан целый спектр устройств, в первую очередь волоконных сенсоров различного назначения, способных работать в сложных условиях эксплуатации при значительном перепаде температур и повышенном фоне ионизирующего излучения. Такие сенсоры могут получить широкое развитие в космической и атомной промышленности.

Полученные результаты по стабилизации волоконных плазмонных сенсоров и созданный математический аппарат интерпретации данных позволил существенно, почти на порядок величины по сравнению с существующими мировыми аналогами, поднять разрешение сенсоров. Это открывает широкие перспективы по их использованию для задач иммунного анализа, медицинской диагностики, высокоточного химического анализа и для применения в качестве сенсоров физических параметров состояния окружающей среды.

Результаты работы в области волоконных лазеров проясняют механизм нестабильной работы эрбиевых волоконных лазеров с коротким резонатором. Полученные результаты в этой области позволяют создавать высокостабильные, компактные одночастотные лазерные источники со сверхузкой линией генерации.

Методология и методы исследования

В работе использовался широкий комплекс экспериментальных методик, среди которых были методики записи волоконных брэгговских решеток как с помощью излучения эксимерного лазера ультрафиолетового диапазона, так и с применением фемтосекундного излучения видимой части спектра. Методы экспериментального исследования образцов основывались на анализе их оптических и временных характеристик. Исследования проводились в различных условиях, в том числе с применением высокотемпературного нагрева, облучения ионизирующим излучением.

Эксперименты с плазмонными сенсорами были построены в основном на методах исследования их оптических характеристик при изменении химического состава окружающей среды, а также при контролируемых изменениях температуры.

Брэгговские структуры резонаторов для волоконных лазеров создавались с помощью модифицированных методик, применяемых для записи брэгговских решеток. Комплексно исследовались параметры работы лазеров в различных условиях окружающей среды. На основе полученных данных была создана теоретическая модель, описывающая новые наблюдаемые явления.

Положения, выносимые на защиту

1. Брэгговские решетки, записанные в световоде с сердцевиной, легированной азотом, обладают высокой стойкостью к воздействию ионизирующего излучения.
2. Динамика формирования и термического распада брэгговских решеток, записанных в световоде с сердцевиной, легированной азотом, зависит от плотности энергии лазерного излучения в процессе их записи.
3. Присутствие молекулярного водорода в сетке кварцевого стекла волоконного световода с сердцевиной легированной азотом, приводит к уменьшению фоточувствительности и к распаду ранее записанных брэгговских решеток типа I.
4. На основе внутриволоконных брэгговских решеток возможно создание датчиков физических величин, в частности, датчиков изгиба, способных работать в активной зоне атомного реактора.
5. Волоконный световод с сохранением поляризации в схеме плазмонного волоконного датчика на основе наклонной брэгговской решетки в несколько раз повышает стабильность его работы.
6. Разработанный математический аппарат обработки спектра пропускания плазмонного волоконного датчика на основе наклонной брэгговской

решетки позволяет повысить разрешение сенсора по показателю преломления до величины 3×10^{-6} .

7. Оптимизация состава материала легирования кварцевой сердцевины активных волоконных световодов дает возможность создавать одночастотные волоконные лазеры со сверхмалой длиной резонатора (12-24 мм).
8. Эрбиевые волоконные лазеры могут переходить в режим импульсной генерации благодаря эффекту обратного насыщающегося поглощения.
9. Порог перехода от импульсного к непрерывному режиму генерации эрбиевых волоконных лазеров зависит как от температуры резонатора, так и от мощности накачки.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность представленных результатов обусловлена использованием широкого спектра известных экспериментальных методик, проведением сравнительного анализа с образцами, характеристики которых представлены в мировой литературе. Разработанный радиационно-стойкий датчик кривизны технологических каналов в графитовой кладке реактора прошел независимые поверочные испытания и признан официальным, зарегистрированным средством измерения, применяемым на атомных станциях для контроля состояния реакторов РБМК-1000.

Результаты работы докладывались на ведущих отечественных и международных конференциях, среди которых: **OFC** (Лос-Анжелес, США, 2004), **XX ICG** (Киото, Япония – 2004), **OFS 17, 20, 23, 25, 26** (Брюгге, Бельгия – 2005; Эдинбург, Великобритания – 2009, Сантандер, Испания – 2014; Джеджу, Корея – 2017; Лазанна, Швейцария – 2018), **ECOC 29, 31** (Римини, Италия – 2003; Глазго, Великобритания – 2005), **EWOFs 2007** (Наполи, Италия, 2007), **ВКВО** (Пермь – 2009; 2011; 2015; 2019), **Российский семинар по волоконным лазерам** (Новосибирск, 2016; 2018); **PIERS** (Санкт-Петербург, 2017; Рим, 2019), **Innovative Concepts and Technologies for Biomedical Applications: Head & Neck** (Москва – 2016), **Advanced Photonics Congress** (Цюрих, Швейцария – 2018),

Основные результаты работы представлены в 53 публикациях, в том числе в 22 статьях в отечественных и ведущих мировых рецензируемых журналах, а также в виде 1 патента.

Все результаты, определяющие научную новизну работы, получены лично автором или под его непосредственным руководством.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка условных обозначений и сокращений, списка литературы, а также списка иллюстративного материала. Полный объем диссертации составляет 292 страницы, включая 160 рисунков, 12 таблиц и список литературы, насчитывающий 454 наименования.

Во введении рассмотрена актуальность темы исследования, указаны цели и задачи, решаемые в диссертационной работе, показана научная новизна представленных результатов и их теоретическая и практическая значимость, обсуждается методология и методы исследования, декларированы положения, выносимые на защиту, рассказывается об апробации результатов, а также представлены данные о количестве опубликованных работ по теме диссертации и личном вкладе автора.

В первой главе дан обзор литературы по теме диссертации.

В разделе 1.1 дается определение волоконной брэгговской решетки, рассматриваются основные ее свойства. Даны основные определения и формулы расчета параметров брэгговских решеток.

В разделе 1.2 рассматриваются методы изготовления брэгговских решеток на основе интерференционных схем, с применением фазовых масок, а также метод поточечной записи с помощью излучения фемтосекундного лазера. Дается краткий обзор методов повышения фоточувствительности волоконных световодов.

В разделе 1.3 представлены обзор литературы по результатам исследования термической стойкости брэгговских решеток. Показаны области возможного применения брэгговских решеток с повышенной термической стойкостью. Анализируются известные из литературы, методы ее повышения. Отдельное внимание уделено брэгговским решеткам на основе световодов с сердцевиной, легированной азотом, являющиеся одним из перспективных типов волокон для создания высокотемпературных брэгговских сенсоров.

В разделе 1.4 рассматриваются вопросы радиационной стойкости волоконных световодов и брэгговских решеток на их основе. Представлены существующие литературные данные по результатам исследования оптических волокон с различным легированием сердцевины, включая германий, азот, а также волокна на основе нелегированного кварцевого стекла.

Раздел 1.5 посвящен анализу влияния молекулярного водорода на свойства оптических волокон. Рассматривается роль молекулярного водорода

в радиационном упрочнении волоконных световодов, а также в повышении фоточувствительности, что особенно актуально для записи брэгговских решеток. Отмечено также и негативное влияние водорода на оптические свойства световодов.

Разделе 1.6 посвящен обзору существующих конструкции волоконных датчиков изгибных деформаций и их применения. Особое внимание уделено датчикам на основе брэгговских решеток. Рассмотрены дифференциальные схемы построения датчиков как на основе нескольких волоконных линий, так и на основе многосердцевинных волоконных световодов.

В **разделе 1.7** рассматриваются физические свойства брэгговских решеток с наклонными штрихами и методы их записи. Представлена модель возбуждения оболочечных мод, рассмотрены особенности спектра пропускания таких брэгговских решеток. Показано, что на их основе, благодаря наличию эванесцентного поля, возможно создание высокочувствительных датчиков показателя преломления. Рассматриваются классические схемы планарных датчиков, работающих на эффекте поверхностного плазмонного резонанса. Продемонстрирована возможность создания на основе наклонных брэгговских решеток, волоконных плазмонных сенсоров.

Раздел 1.8 посвящен вопросам создания одночастотных волоконных лазеров с предельно узкой линией генерации. Рассмотрены схемы построения волоконного лазера на основе классического резонатора Фабри-Перо. Представлены свойства и особенности работы лазеров на основе световодов с различным легированием сердцевины. Обсуждаются особенности создания стекол с высоким легированием сердцевины ионами эрбия и иттербия. Рассмотрена проблема образования кластеров редкоземельных элементов в структуре кварцевого стекла. Представлены различные технологические методы уменьшения уровня кластеризации, и методы оптимизации состава стекла сердцевины активных волоконных световодов.

В **разделе 1.9** рассматриваются волоконные лазеры с распределенной обратной связью. Показаны особенности их построения. Обсуждаются их свойства, преимущества и недостатки, их отличия от классических схем на основе резонаторов Фабри-Перо.

Во второй главе приводятся результаты исследований особенностей записи и термического распада брэгговских решеток в световодах с сердцевиной, легированной азотом. Рассматривается взаимодействие молекулярного водорода с брэгговскими решетками. Приводятся сравнения с образцами, записанными в световодах с германосиликатной сердцевиной.

В разделе 2.1 впервые продемонстрирована запись брэгговских решеток в волоконных световодах с низким уровнем легирования сердцевины азотом (0,5 ат.% N). Запись решеток производилась с помощью излучения ArF-эксимерного лазера с длиной волны генерации 193 нм с применением фазовой маски для создания необходимой интерференционной картины на сердцеvine волоконного световода. Проводится сравнительный анализ динамики записи таких решеток с германосиликатными аналогами. Выявлен двухэтапный механизм записи в азотосиликатных образцах, при этом не обнаружено зависимости динамики записи от плотности энергии импульсов лазерного излучения (рисунок 1).

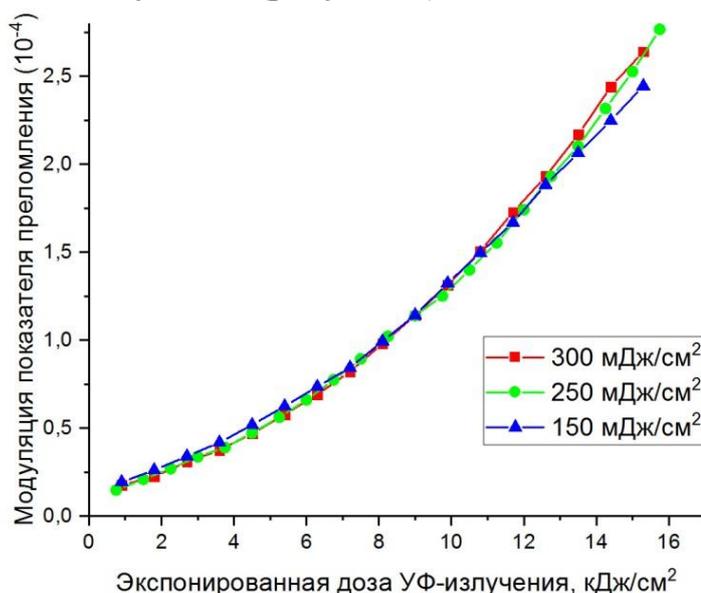


Рисунок 1 – Динамика изменения величины модуляции показателя преломления в зависимости от экспонированной дозы при различных плотностях мощности излучения для низколегированного азотосиликатного образца.

Раздел 2.2 посвящен исследованию особенностей записи брэгговских решеток в высоколегированных азотосиликатных волоконных световодах. Выявлена зависимость скорости записи решетки от плотности энергии в импульсе лазерного излучения, что свидетельствует о существенной роли многофотонных процессов в данном типе стекла. Сделано предположение о возможной роли диффузии атомов азота в процессе записи решетки, что подтверждается особенностями динамики формирования решетки в волокнах с тонкой сердцевиной.

В разделе 2.3 приводятся результаты исследования термической стойкости брэгговских решеток, записанных в кварцевых световодах с сердцевиной, легированной азотом. Показана высокая стойкость

азотосиликатных решеток типа I, по сравнению с германосиликатными аналогами, к воздействию температур вплоть до 450-500 °С. Для высоколегированных образцов продемонстрирована зависимость динамики термической эволюции параметров решеток типа IIa, от режимов их записи (рисунок 2), что является дополнительным подтверждением диффузной природы формирования решетки в данном типе оптических волокон. Для характеристики изменения контраста брэгговской решетки был использован параметр NICC определяемый формулой:

$$NICC = \frac{\tanh^{-1}(\sqrt{R})}{\tanh^{-1}(\sqrt{R_0})} \quad (1)$$

где R и R_0 – текущий и начальный коэффициенты отражения решетки соответственно.

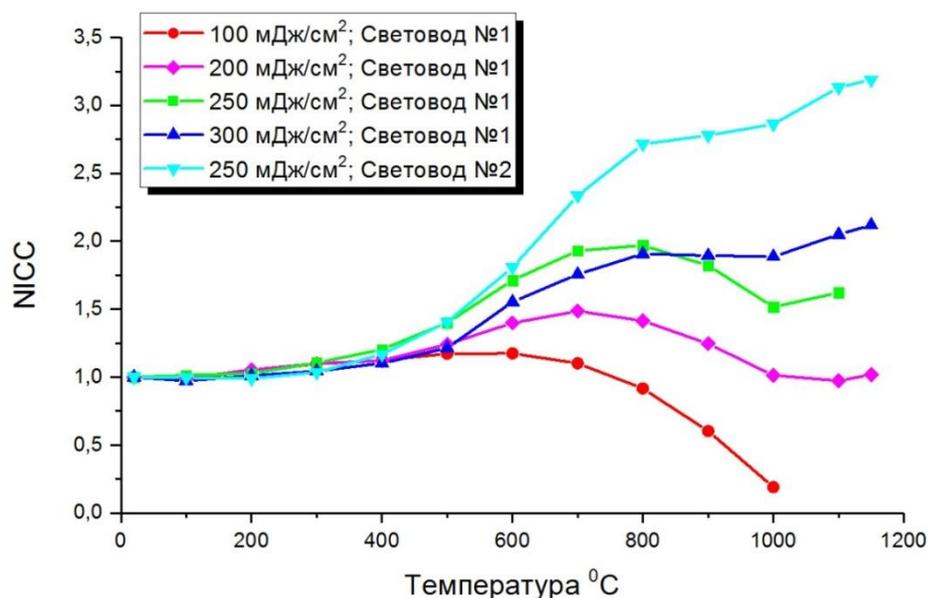


Рисунок 2 – Результаты изохронного отжига брэгговских решеток типа IIa, записанных с различной плотностью энергии в импульсе в световоде с сердцевиной из кварцевого стекла, легированного азотом.

Решетки типа IIa продемонстрировали более высокую термическую стабильность по сравнению с решетками типа I. В разделе представлены эксперименты по длительному отжигу таких решеток при температурах 500-600 °С. Показана возможность достижения стабилизации параметров таких решеток.

В разделе 2.4 представлены данные экспериментов по влиянию растворяемого в сетке стекла молекулярного водорода на свойства брэгговских решеток, записанных ранее без его присутствия. В экспериментах проводилось исследование изменения параметров

брэгговских решеток в процессе насыщения волокон молекулярным водородом и последующего его выхода из сетки стекла. В работе были исследованы решетки, изготовленные при идентичных условиях в кварцевых волоконных световодах, сердцевина которых была легирована германием или азотом. Важно отметить, что присутствие водорода в сетке стекла различным образом влияет на динамику записи брэгговских решеток в световодах с разным легированием сердцевины. Так, в случае германосиликатных образцов их фоточувствительность в присутствии водорода значительно повышается, тогда как, согласно [8], процесс записи решеток в азотосиликатном световоде становится невозможным при насыщении его молекулярным водородом.

Насыщение германосиликатных образцов приводит к пропорциональному концентрации водорода изменению параметров брэгговских решеток. При этом начальные параметры полностью восстанавливаются после выхода водорода из сетки стекла, что свидетельствует об отсутствии химических реакций с фотоиндуцированными центрами при комнатной температуре.

В азотосиликатных образцах уже на первом этапе насыщения контраст брэгговских решеток необратимо изменяется, не восстанавливаясь после выхода водорода из сетки стекла (рисунок 3). Если учесть, что необлученное УФ-излучением кварцевое стекло, легированное азотом, не вступает в реакцию с водородом при температурах вплоть до 400 °С [9], очевидно, что наблюдаемые эффекты связаны с взаимодействием водорода именно с фотоиндуцированными центрами, ассоциированным с присутствием азота в сетке стекла. Подобных изменений практически не наблюдается в образцах, прошедших предварительный термический отжиг при температуре 700 °С, что связано с распадом большей части фотоиндуцированных центров при данной температуре.

Приведенные в разделе данные объясняют подавление фоточувствительности в азотосиликатных волоконных световодах при их насыщении молекулярным водородом.

В разделе 2.5 приводятся выводы к главе 2.

Третья глава посвящена исследованию эффектов воздействия ионизирующего излучения на параметры световодов с азотосиликатной сердцевиной и брэгговских решеток на их основе. Проведенные ранее исследования показывают перспективность использования данного типа волокна в условиях повышенного радиационного фона. Неоспоримым преимуществом решеток на его основе по сравнению с решетками, записанными в радиационно-стойких волокнах с нелегированной кварцевой

сердцевиной, является возможность их производства с применением стандартной технологии записи с помощью излучения лазеров УФ-диапазона.

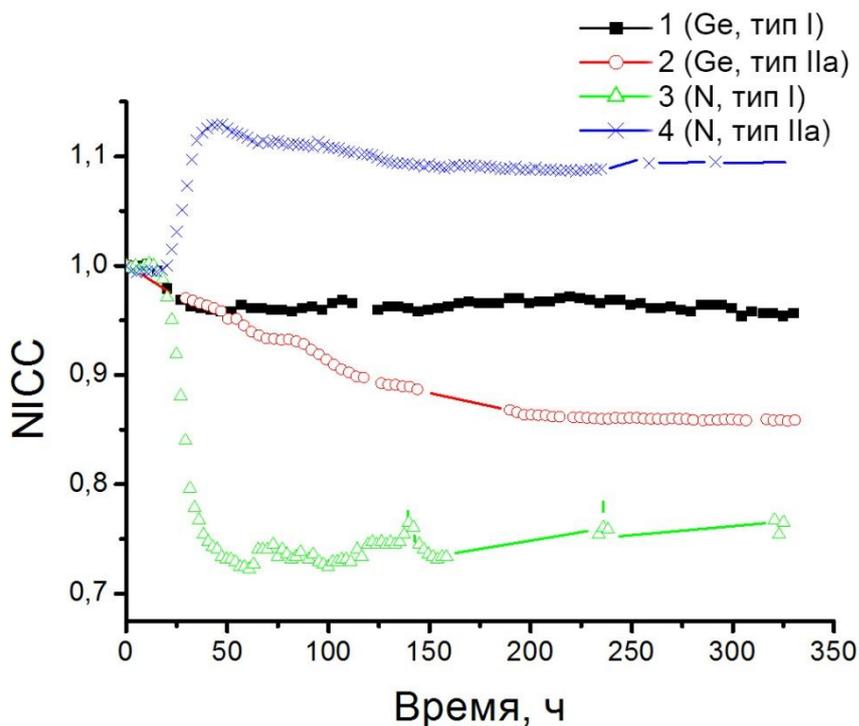


Рисунок 3 – Изменения параметра NICC в процессе насыщения молекулярным водородом брэгговских решеток разного типа, записанных в различных волокнах.

В разделе 3.1 проводится исследование радиационной стойкости азотосиликатной сердцевины на примере двулучепреломляющего волокна при воздействии на него гамма-излучения. Было показано, что потери при дозе облучения 2-10 кГр не превышают 5-10 дБ/км, что на порядок ниже аналогичных показателей для стандартных телекоммуникационных волокон на основе германосиликатного стекла.

Был проведен анализ динамики роста и последующей релаксации радиационно-наведенных потерь в световоде на различных длинах волн в диапазоне от 1,1 до 1,6 мкм. Показано, что при малых дозах облучения минимум наведенных потерь наблюдается в районе 1,3 мкм. Наибольший рост потерь наблюдается в коротковолновой части исследуемого диапазона.

Динамика релаксации радиационно-наведенного поглощения также различна. Наиболее быстро релаксируют наведенные потери в коротковолновой части исследуемого диапазона, где основную роль в наведенном поглощении играют центры окраски, образующиеся из радиационно-чувствительных точечных дефектов. Очевидно, что такие центры нестабильны и существенно рекомбинируют при комнатной

температуре уже в течение первого часа после снятия облучения. Релаксация наведенных потерь в длинноволновой части исследованного диапазона много медленнее. Основную роль здесь, по-видимому, играют структурные изменения сетки стекла, вклад которых в наведенное поглощение не так велик, но зато более стабилен и поэтому меньше релаксирует при снятии облучения.

Раздел 3.2 посвящен исследованию радиационной стойкости брэгговских решеток, записанных в волокнах с азотосиликатной сердцевиной. Проводится исследование эволюции брэгговской длины волны и спектральной ширины брэгговских решеток под воздействием гамма-излучения. Суммарная доза излучения, полученная образцами в ходе проведения экспериментов, составила 9 МГр. В эксперименте проводилось сравнение с коммерчески доступными брэгговскими решетками, записанными в германосиликатных световодах.

Было показано, что величина изменения брэгговской длины волны в азотосиликатных образцах не превышает 50 пм, тогда как в германосиликатных аналогах изменения составили порядка 200 пм.

В **разделе 3.3** приводятся результаты исследования радиационной стойкости брэгговских решеток в присутствии радиолитического водорода. Облучение образцов проводилось в бассейне выдержки с помощью отработавшего ядерного топлива. В разделе приводится расчет интенсивности и суммарной дозы, полученной образцами гамма-излучения, а также оценка количества радиолитического водорода, способного проникнуть в сетку кварцевого стекла в данном эксперименте.

Выявлена корреляция изменения параметров брэгговских решеток с концентрацией радиолитического водорода, поступающего в световод в ходе эксперимента. В германосиликатных образцах наблюдается существенный рост брэгговской длины волны (рисунок 4), тогда как в решетках, записанных в азотосиликатных световодах, обнаружен сдвиг в сторону коротковолновой области спектра. Проведена аналогия с экспериментами по насыщению молекулярным водородом брэгговских решеток без присутствия ионизирующего излучения. Показано, что в германосиликатных образцах изменение брэгговской длины волны определяется взаимодействием водорода с радиационно-наведенными центрами, тогда как изменение брэгговской длины волны в азотосиликатных образцах обусловлено эффектами взаимодействия водорода с фотоиндуцированными центрами, образованными при записи решеток. Величина изменения брэгговской длины волны полностью коррелирует с экспонированной дозой УФ-излучения при записи брэгговской решетки (рисунок 5). При этом само гамма-излучение не

оказывает существенного влияния на параметры азотосиликатных образцов, что дополнительно подтверждает их высокую радиационную стойкость.

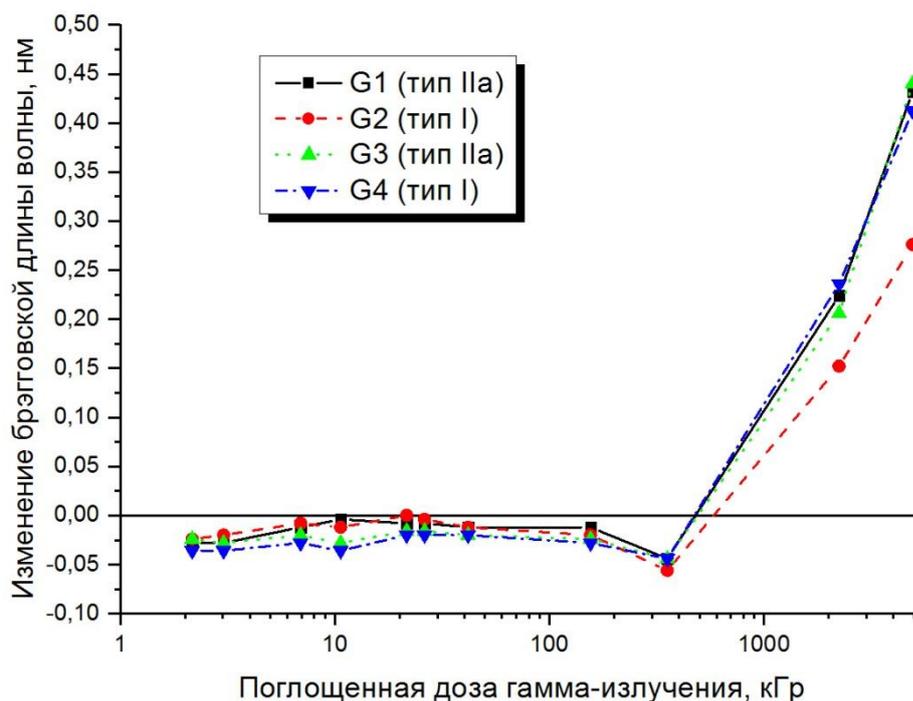


Рисунок 4 – Зависимость изменения брэгговской длины волны в германосиликатных образцах от поглощенной дозы гамма-излучения.

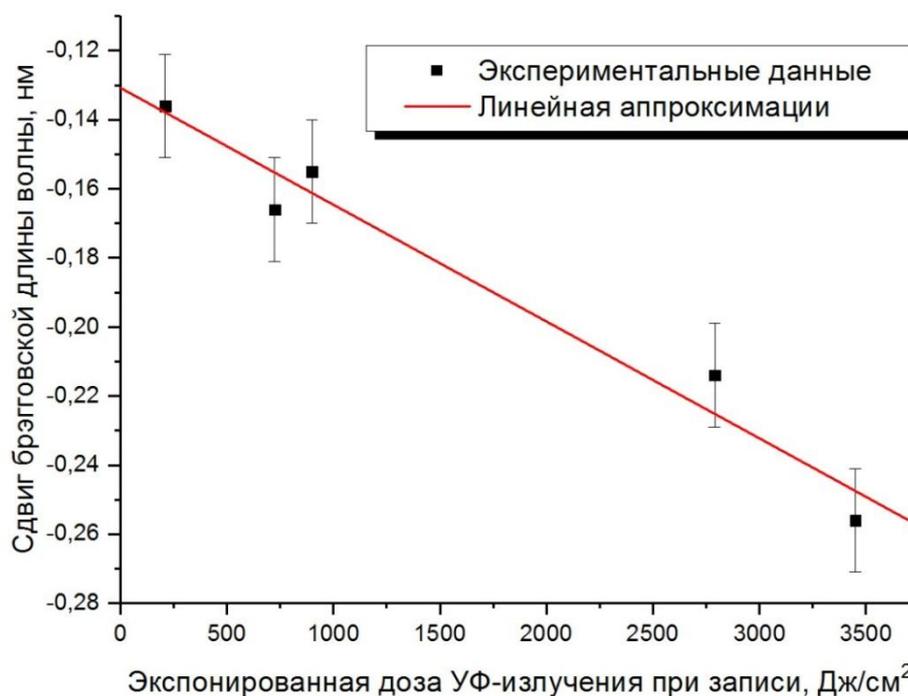


Рисунок 5 – Зависимость сдвига брэгговской длины волны при насыщении их радиолитическим водородом от экспонированной дозы УФ-излучения при записи решеток в азотосиликатном световоде.

Результаты проведенных исследований радиационной и термической стойкости брэгговских решеток, записанных в световодах с сердцевиной легированной азотом, делают их перспективными для использования в атомной промышленности, например, в качестве сенсорных элементов для контроля ряда параметров работы атомного реактора. В частности, одной из актуальных задач является контроль деформации технологических каналов в графитовом остовах реакторов РБМК-1000. Деформация в результате длительной экспозиции графита мощными потоками ионизирующих излучений является критическим параметром, определяющим возможность дальнейшей эксплуатации реактора. Особую актуальность задача такого контроля приобретает в период продленного срока эксплуатации, когда величина возможных деформаций может достигать предельно допустимых значений.

Следует отметить, что параметры реакторного излучения существенно отличаются от источников, использованных в ранее проведенных экспериментах. Помимо более высокой плотности гамма-излучения в реакторе присутствуют потоки нейтронов высокой интенсивности. Поэтому, для оценки возможности использования световодов и брэгговских решеток на их основе необходимо оценить эволюцию их параметров в условиях именно реакторного излучения.

В разделе 3.4 представлены результаты по исследованию динамики роста наведенного поглощения азотосиликатного световода и эволюции параметров брэгговских решеток на его основе при их облучении в экспериментальном реакторе ИВВ-2М. Величина средней плотности потока нейтронов с энергией более 1 МэВ составляла $6,2 \times 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и гамма-фотонов $9,3 \times 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Температура в месте установки брэгговских решеток в ходе проведения экспериментов достигала $650 \text{ }^\circ\text{C}$.

На рисунке 6 демонстрируется динамика изменения радиационно-наведенных потерь с ростом поглощенной дозы в ходе эксперимента (черная кривая). Синей кривой показана эквивалентная электрическая мощность реактора. При рабочей температуре $350\text{-}650 \text{ }^\circ\text{C}$ и общей усредненной дозе гамма-излучения 270 МГр наведенные потери составили порядка 31 дБ/м. При этом, при стабильной мощности реактора рост потерь в световоде практически линейный и составляет величину примерно $0,1 \text{ дБ}/(\text{м} \cdot \text{МГр})$.

Следует отметить, что скорость набора дозы в реакторе РБМК-1000 примерно в 15 раз медленнее, чем в реакторе ИВВ-2М. Процесс же восстановления радиационных дефектов (обусловленный температурой) происходит примерно с одинаковой скоростью. Таким образом, можно ожидать, что скорость роста радиационно-наведенных потерь в

азотосиликатном световоде при их расположении в активной зоне реактора РБМК-1000 будет ниже, что может обеспечить достаточно высокую продолжительность работы брэгговских датчиков.

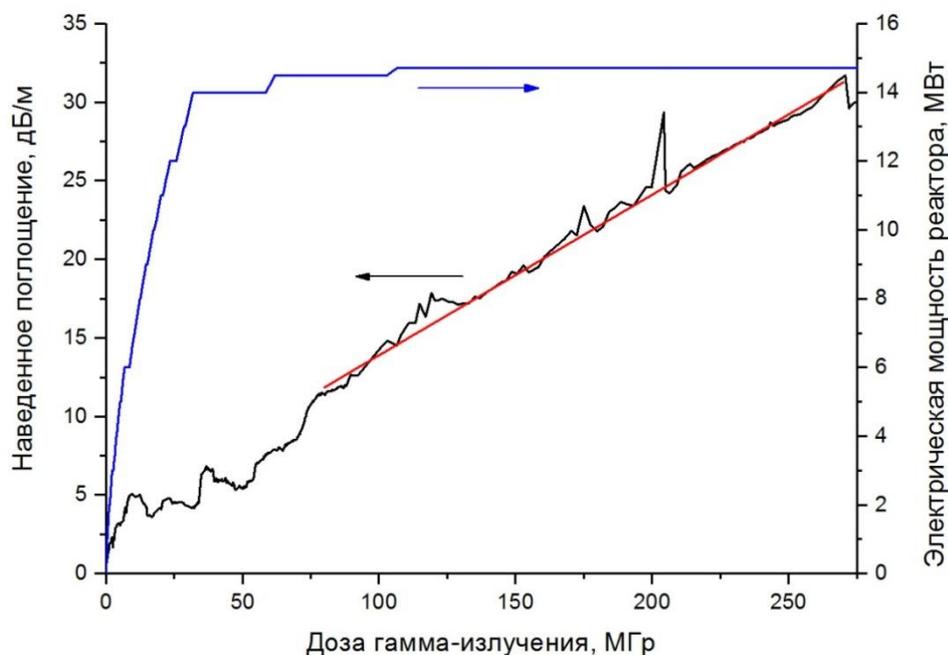


Рисунок 6 – Рост радиационно-наведенных потерь в световоде с дозой облучения.

В разделе 3.5 предложена оригинальная конструкция датчика изгибных деформаций, представляющий собой специально разработанный цельный стержень-световод из кварцевого стекла с внешним диаметром 2,1 мм, который содержит 4 световедущие одномодовые сердцевинки, диаметром 7-8 мкм, расположенные через 90° по периметру сечения несущего волокна на глубине примерно 50 мкм от поверхности. В каждой из сердцевин в одном сечении были записаны брэгговские решетки на одну и ту же длину волны, формируя, таким образом, дифференциальную схему измерения по двум ортогональным направлениям. Структурная схема такого датчика и фотография торца стержня с подсвеченными лазером сердцевинами представлена на рисунке 7.

Приводится математический аппарат для расчета величины и направления изгибной деформации исходя из показаний брэгговских датчиков. По результатам лабораторных измерений была оценена величина ошибки в определении кривизны $\Delta\kappa$, которая составила не более $1,2 \times 10^{-3} \text{ м}^{-1}$.

На основе данной конструкции впервые был предложен и изготовлен датчик кривизны технологических каналов реактора РБМК-1000. Для измерения величины деформации по длине канала в каждой из четырех

сердцевин было записано по 20 решеток на расстоянии 0,5 м, образуя 20 чувствительных зон датчика, распределенных по высоте активной зоны. В первой версии датчика использовались сердцевинки из азотосиликатного стекла, а запись решеток производилась с помощью излучения ArF-экимерного лазера.

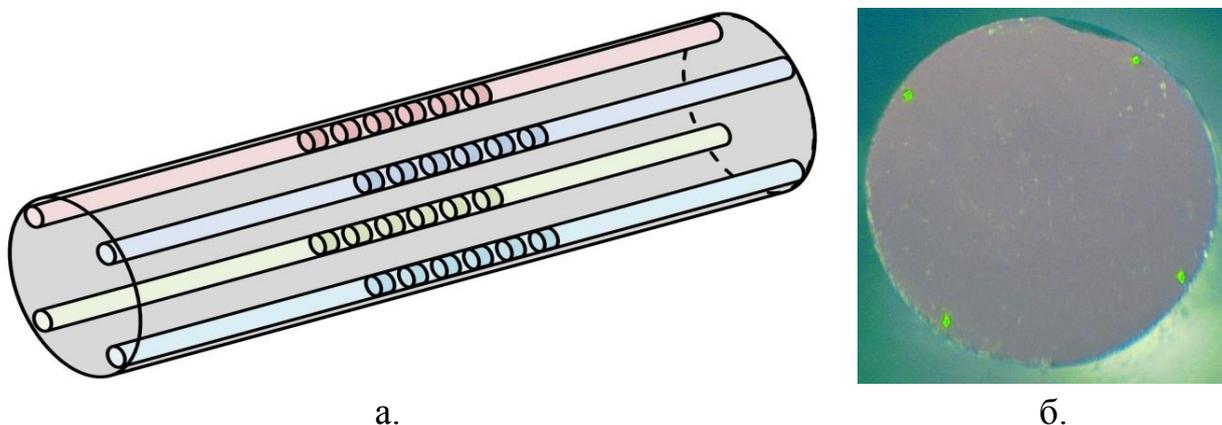


Рисунок 7 – Структурная схема датчика (а) и фотография торца стержня с подсвеченными сердцевинами (б).

Экспериментально была показана работоспособность датчика при высоких температурах в условиях работы реактора на 100% мощности. Однако, основным негативным фактором для работы датчика помимо высокой температуры (до 400 °С) являются радиационно-наведенные потери в сердцевине световода из-за высокого потока ионизирующего излучения (порядка 8 кРад/с по гамма-излучению с энергией фотонов выше 1 МэВ). Кроме этого, на датчик воздействует высокий уровень потока нейтронов – примерно $4,1 \times 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Потеря работоспособности датчика проявляется в невозможности детектирования длины волны отражения брэгговских решеток из-за радиационно-наведенных потерь. Эксперименты показали, что уровень потерь в сердцевинах датчика может достигать значения 3,2 дБ/м при суммарной дозе по гамма-облучению порядка 2 МГр, что несколько превышает предельно допустимые значения и позволяет проводить лишь ограниченное количество измерений.

Единственной возможной альтернативой является использование в качестве материала для световедущих сердцевин нелегированного кварцевого стекла. Однако, запись брэгговских решеток стандартными методами в таких сердцевинах невозможна. Для решения этой проблемы была реализована система пошаговой записи брэгговских решеток с помощью излучения фемтосекундного лазера с длиной волны генерации 517 нм. Первая пробная эксплуатация такого датчика показала его высокую

радиационную стойкость. После проведения серии измерений, при которых величина суммарной поглощенной дозы гамма-излучения составила 580 кГр, радиационно-наведенные потери не превысили значения 0,1 дБ/м.

Благодаря новой разработке, принятой в эксплуатацию, была решена важная отраслевая задача мониторинга искривления технологических каналов атомного реактора РБМК-1000.

В разделе 3.6 представлены выводы к главе 3.

В четвертой главе исследуются волоконные сенсоры на основе брэгговских решеток с наклонными штрихами, работающие на эффекте поверхностного плазмонного резонанса.

В разделе 4.1 описывается метод изготовления брэгговских решеток с наклонными штрихами. Запись решетки производилась излучением ArF-эксимерного лазера, при этом световод с фазовой маской устанавливались под углом к плоскости фронта лазерного излучения, чем обеспечивается необходимый наклон штрихов брэгговской решетки. Для создания плазмонного сенсора, на боковую поверхность волокна необходимо было нанести тонкий (порядка 40 нм) слой золота. Напыление осуществлялось с помощью метода термического испарения металла в вакууме. При этом ключевым фактором является равномерность толщины наносимого слоя. Для решения данной задачи был сконструирован специальный механизм вращения участка волокна с брэгговской решеткой над испарителем.

Спектр пропускания такого плазмонного сенсора имеет характерную перетяжку, соответствующую длине волны, при которой наблюдается плазмонный резонанс (рисунок 8). Спектральное положение длины волны плазмонного резонанса существенно зависит от показателя преломления окружающей среды, на чем и основан принцип работы плазмонного сенсора (рисунок 8).

В разделе 4.2 предложены способы повышения стабильности работы сенсоров. Наиболее критичным параметром при работе с плазмонным сенсором на основе наклонной брэгговской решетки является поляризация излучения, проходящего через сенсорный элемент. Для решения данной проблемы было впервые предложено использование волоконного световода с сохранением поляризации. Так, показания сенсоров, изготовленных на основе волокна с сохранением поляризации, несмотря на более низкое качество начального спектра пропускания, оказались, по меньшей мере, на порядок величины более стабильными по сравнению со стандартными датчиками, изготовленными на основе изотропного волокна.

При использовании сенсора в потоке исследуемой жидкости, в частности, в системе микрофлюидных каналов, одним из основных

негативных факторов является механическое воздействие потока на сенсорный элемент, что также приводит к падению разрешающей способности сенсора. Для решения данной проблемы было использовано жесткое клеевое соединение с основанием микрофлюидной ячейки по всей длине сенсора. При этом, важно сохранять ориентацию плоскости наклона штрихов брэгговской решетки относительно основания сенсора, как это показано на рисунке 9. Данное решение позволило уменьшить уровень шумов, при проведении измерений в потоке жидкости, по меньшей мере, в три раза.

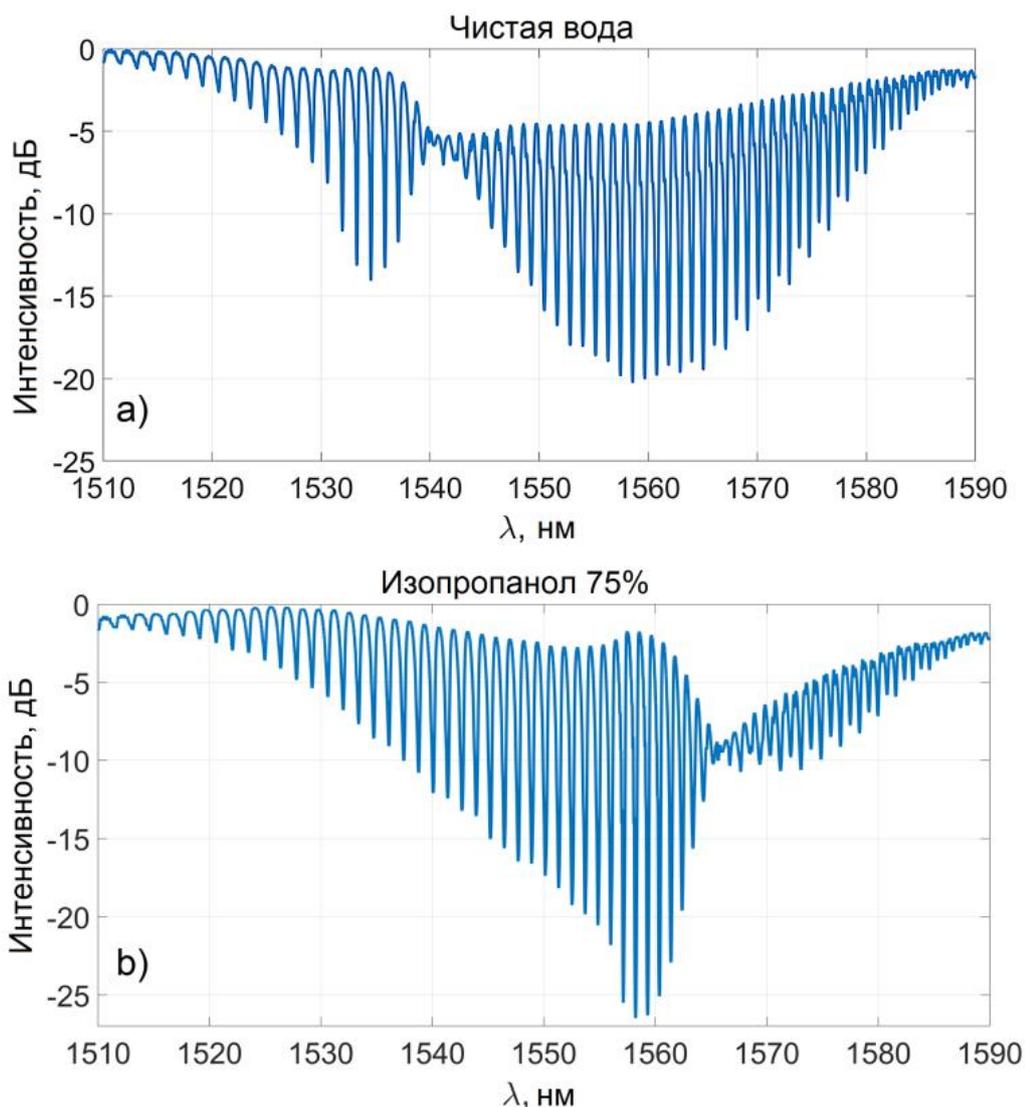


Рисунок 8 – Спектр пропускания датчика для двух различных концентраций растворов изопропилового спирта.

Раздел 4.3 посвящен описанию нового математического аппарата для определения длины волны плазмонного резонанса из измеряемых спектров сенсора. Как видно из рисунка 8, точное определение положения спектральной перетяжки является нетривиальной задачей.

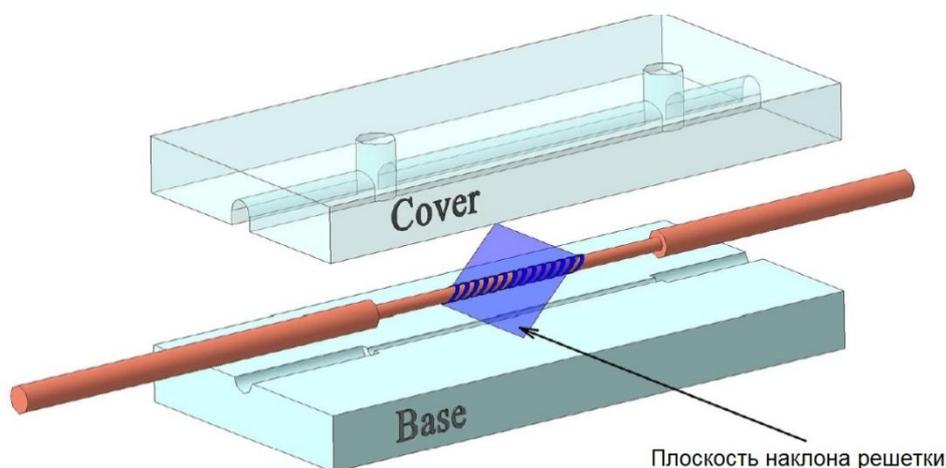


Рисунок 9 – Схема установки сенсора на основе НВБР во флюидный чип.

В работе были предложены три метода, общая идея которых заключается в определении суперпозиции множества пиков в спектре датчика вблизи длины волны плазмонного резонанса (λ^{SPR}) путем аппроксимации их интенсивностей аналитической кривой. Поскольку в определении λ^{SPR} участвует сразу множество спектральных пиков, существенно снижается погрешность измерения.

Предложенный алгоритм математической обработки состоит из двух этапов. На первом этапе происходит Фурье-фильтрация спектров. При этом с применением фильтрации по высокочастотной составляющей сглаживается форма пиков, а при фильтрации низких частот происходит выравнивание спектра относительно горизонтальной прямой.

На следующем этапе обработки осуществляется поиск длины волны и амплитуды спектральных пиков. По найденным значениям проводится аппроксимация с помощью многопараметрической кривой. Как было указано выше, в работе было предложено три метода, отличающиеся количеством варьируемых параметров при аппроксимации. Рассматривались варианты аппроксимации только по верхним экстремумам спектра, или с использованием как верхних, так и нижних точек спектра (1).

$$\begin{aligned}
 f_{(3)}^{top} &= \frac{\beta_{11}}{1 + \exp(\beta_{21}(x - \beta_{31}))} + \frac{\beta_{41}}{1 + \exp(-\beta_{51}(x - \beta_{61}))} \\
 f_{(3)}^{bot} &= \frac{-\beta_{21}}{1 + \exp(\beta_{22}(x - \beta_{32}))} + \frac{-\beta_{42}}{1 + \exp(-\beta_{52}(x - \beta_{62}))}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где $f_{(3)}^{top}$ и $f_{(3)}^{bot}$ – кривые, аппроксимирующая верхнюю и нижнюю подгруппы пиков соответственно.

Длина волны плазмонного резонанса определялась как экстремум аппроксимирующей функции, а в случае использования двух кривых – как

точка пересечения нулевой горизонтальной прямой и отрезка, соединяющего экстремумы функций.

На рисунке 10 приведены спектр датчика после фильтрации, группы пиков, а также аппроксимирующие их функции и определенные тремя различными методами длины волн плазмонного резонанса. Из рисунка видно, что абсолютные значения длины волны плазмонного резонанса, определяемой разными методами, могут значительно отличаться между собой. Однако это не свидетельствует о невозможности применения той или иной функции для вычислений и не является параметром оценки степени ее эффективности. При проведении измерений важно не абсолютное значение длины волны плазмонного резонанса, а возможность максимально точного определения величины ее изменения при изменении показателя преломления окружающей среды.

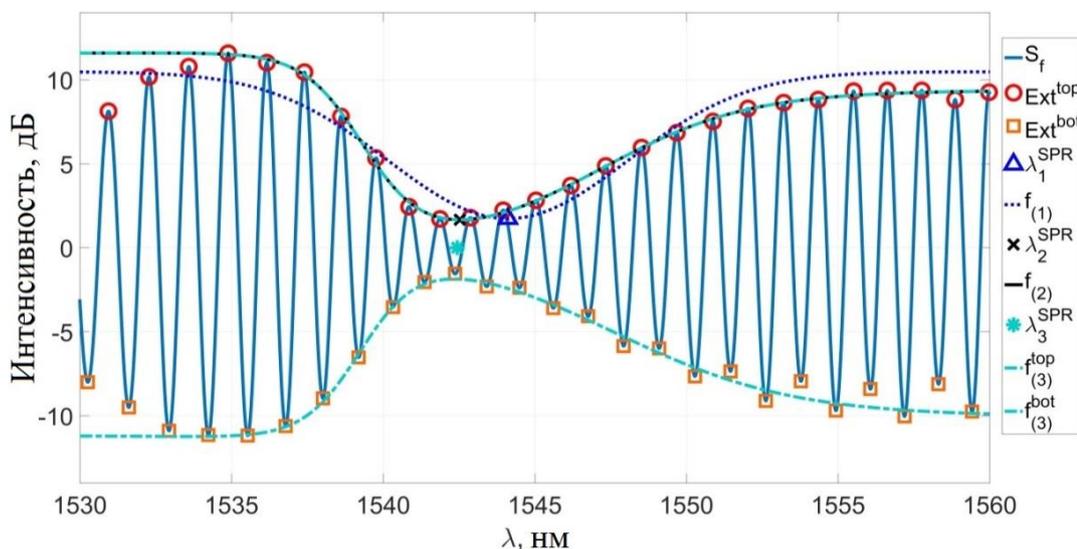


Рисунок 10 – Спектр датчика после фильтрации, группы пиков и аппроксимирующие их кривые, соответствующие различным методам обработки.

В разделе 4.4 проводится оценка эффективности работы различных методов обработки, представленных в разделе 4.3. Оценка проводится по величине среднеквадратичного отклонения экспериментальных данных от кривой аппроксимации. На первом этапе измерялась зависимость длины волны плазмонного резонанса сенсора от концентрации изопропилового спирта в воде. Экспериментальные данные обрабатывались в автоматическом режиме тремя различными методами и аппроксимировались прямой зависимости сдвига длины волны от показателя преломления раствора. Однако такой подход может обеспечить лишь относительное сравнение эффективности методов обработки экспериментальных данных, поскольку

присутствует вклад в общую ошибку измерения связанный с вычислением показателя преломления и точностью подготовки самих растворов.

На втором этапе использовалась дистиллированная вода, температура которой изменялась в естественных условиях. Известно, что для воды при комнатной температуре дисперсия показателя преломления составляет порядка $(-1) \times 10^{-4}$ RIU/°C, где RIU – единица показателя преломления (Refractive Index Unit) [10]. Динамика нагрева или охлаждения воды в естественных условиях хорошо описывается экспоненциальной функцией. Таким образом, разрешение сенсора определялось исходя из среднеквадратичного отклонения экспериментальных точек от данной экспоненциальной кривой (рисунок 11). Синей кривой на рисунке отмечены показания независимого брэгговского датчика температуры.

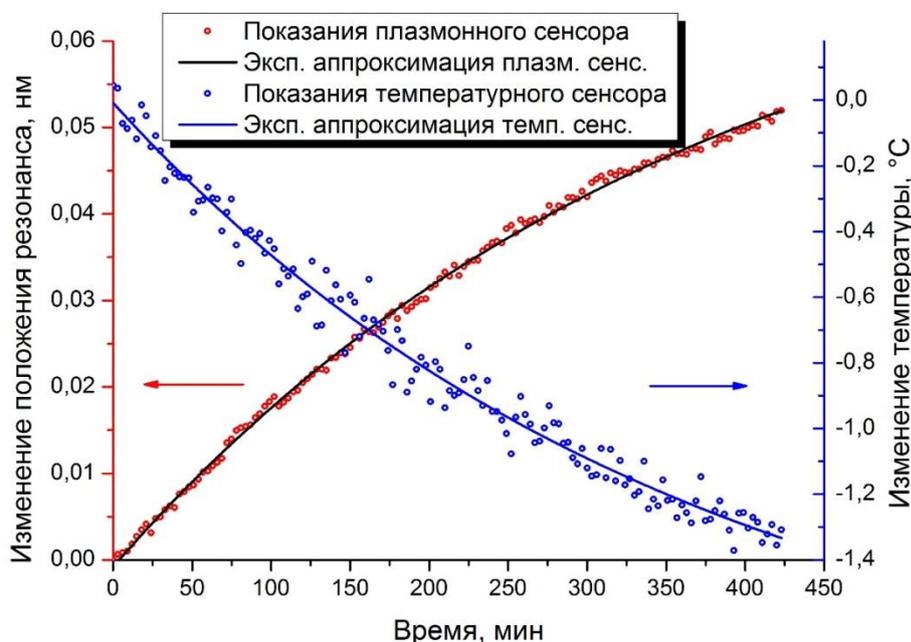


Рисунок 11 – Динамика изменений показаний сенсоров при изменении температуры дистиллированной воды.

Была проведена серия экспериментов с различным диапазоном изменения температуры. Во всех экспериментах наилучшие результаты обработки спектров продемонстрировал третий метод, основанный на двух шестипараметрических функциях, описывающих как верхний, так и нижний группы спектральных пиков (1). С учетом найденной чувствительности сенсора на уровне 576 нм/RIU, в терминах показателя преломления среднеквадратичное отклонение в серии экспериментов не превышало значения 1×10^{-6} RIU. Известно, что разрешение сенсора определяется как тройная величина среднеквадратичного отклонения [11, 12], и, таким

образом, составляет 3×10^{-6} RIU. Данное значение почти на порядок лучше результатов, представленных в современной мировой литературе [13-17].

Экспериментально получены температурные зависимости показаний плазмонного сенсора, что позволило компенсировать влияние изменения температуры окружающей среды в ходе проведения измерений. На рисунке 12 представлен пример температурной компенсации. В данном случае повышенный уровень шума результирующего сигнала после температурной компенсации проявляется вследствие шумов температурного датчика (рисунок 11).

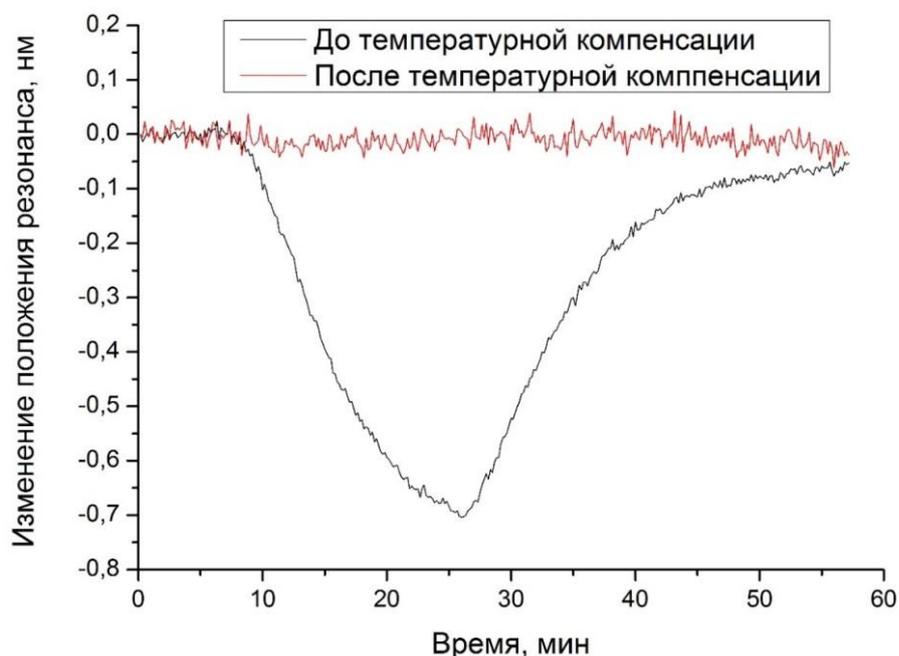


Рисунок 12 – Пример использования температурной компенсации.

Высокое разрешение и чувствительность сенсора к показателю преломления внешней среды позволяет использовать его для задач медицинской диагностики. В **разделе 4.5** приводятся экспериментальные данные по детектированию в физрастворе различных концентраций миоглобина – одного из белков маркеров инфаркта миокарда. Эксперименты проводились без применения функционализации поверхности антителами. Теоретически было показано, что скорость адсорбции белка к поверхности, а, следовательно, и скорость изменения показаний сенсора пропорциональны концентрации белка в растворе, что нашло свое подтверждение и в эксперименте. На основании экспериментальных данных была построена калибровочная кривая (рисунок 13). График представляет зависимость

обратного времени реакции датчика (временной постоянной) от концентрации миоглобина.

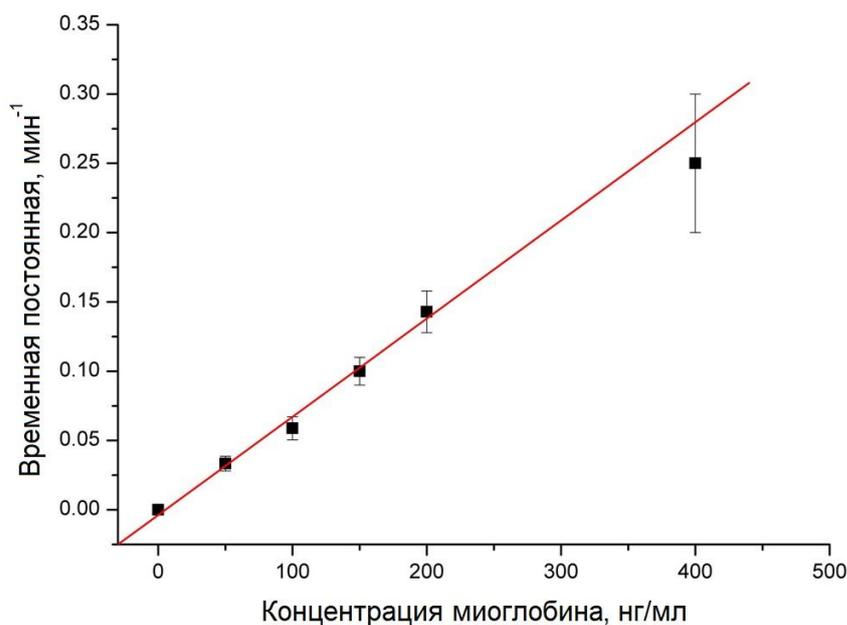


Рисунок 13 – Зависимость временной постоянной от концентрации миоглобина в растворе.

В разделе 4.6 приводятся выводы к главе 4.

В пятой главе рассмотрены вопросы, связанные с работой волоконных лазеров на основе световодов, сердцевина которых легирована ионами эрбия или иттербия. Особое внимание уделено конструкциям одночастотных лазеров с коротким резонатором на основе высоколегированных волокон.

В разделе 5.1 представлены результаты разработки волоконного лазера с распределенной обратной связью (РОС-лазер) на основе кварцевого световода с высоким уровнем легирования сердцевины ионами иттербия. Концентрация иттербия в стекле, соответствующая измеренному коэффициенту поглощения, составляет 0.84 мол.% Yb_2O_3 . Высокий уровень легирования при минимальном уровне кластеризации был получен благодаря использованию плазмохимической технологии синтеза стекла SPCVD. На основе такого волоконного световода были изготовлены волоконные РОС-лазер с длиной резонатора 12, 16 и 20 мм. Приводятся результаты исследования их свойств. Получен одночастотный режим генерации такого лазера на длине волны 1033,3 нм.

Точное измерение ширины линии генерации осуществлялось гетеродинным методом, основанным на регистрации частотного спектра биений двух идентичных волоконных РОС-лазеров, предварительно согласованных по длине волны и интенсивности излучения. Оценка

полуширины приведённой на рисунке 14 спектральной линии биений дает величину ~ 16 кГц. Ширина линии каждого из идентичных лазеров может быть оценена в половину от измеренной спектральной ширины линии биений [18], и составляет не более 8 кГц.

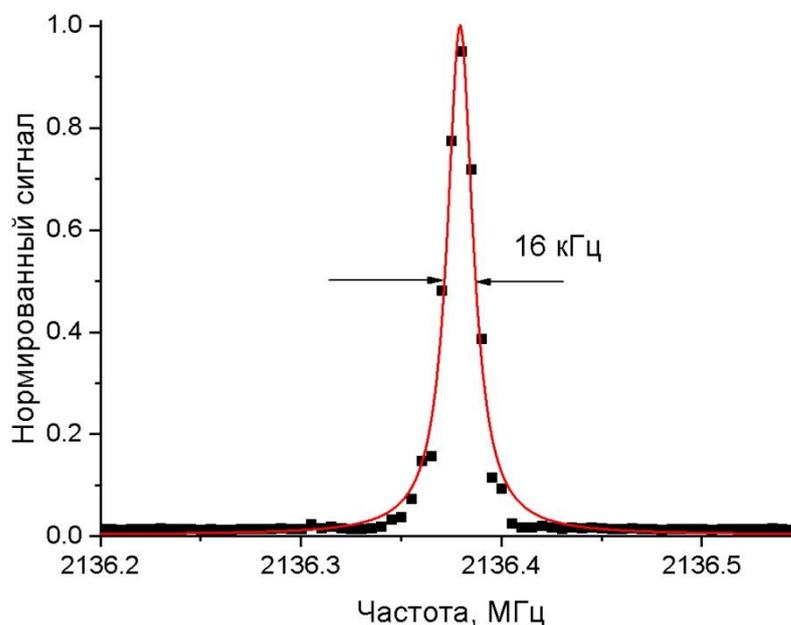


Рисунок 14 – Радиочастотный спектр биений при измерении ширины полосы генерации гетеродинным методом.

Для создания резонаторов РОС-лазеров необходимо создание брэгговских решеток непосредственно в сердцевине активного волоконного световода. В случае волокон, легированных эрбием, необходимая для записи решеток фоточувствительность достигается благодаря насыщению волокон молекулярным водородом. Однако это может повлиять на усилительные свойства данного типа световода [19, 20].

В разделе 5.2 исследуется влияние УФ-излучения, используемого при записи брэгговских решеток, на усилительные свойства кварцевых волокон с сердцевиной, легированной ионами эрбия. Сердцевина исследуемого волоконного световода была также дополнительно солегирована алюминием. Показано негативное влияние насыщения молекулярным водородом при последующем облучении образцов УФ-излучением с длиной волны 193 нм. Это влияние связано с наведением, под действием квантов УФ-излучения с энергией 6,4 эВ в сетке стекла сердцевины световода, дефектов двух типов: фотоиндуцированных кислородно-дырочных центров (Si-OHC, Al-OHC) и гидроксильных центров, формирующихся только в условиях предварительного насыщения световода молекулярным водородом. Часть фотоиндуцированных центров распадается при воздействии излучения накачки на длине волны 976 нм.

В разделе 5.3 представлены результаты разработки РОС-лазеров на основе высоколегированного ионами эрбия кварцевого волоконного световода. Приводятся результаты исследования параметров их генерации. Режимы работы были протестированы с использованием накачных диодов с различными длинами волн генерации – 976 и 1490 нм. Представлены графики зависимости выходного лазерного излучения от мощности накачки. Была получена генерация при длине резонатора 24 мм. При этом эффективность лазеров по отношению к введенной мощности накачки составили 0,7% и 1,1% для длины волны накачки 976 и 1490 нм соответственно. Относительно невысокий уровень эффективности генерации обусловлен во многом малой долей поглощенной накачки на участке короткого резонатора.

Раздел 5.4 посвящен исследованию режимов работы эрбиевых лазеров, изготовленных на основе высоколегированных волокон. Ионы эрбия в стекле имеют ограниченную растворимость при синтезе и при высоких концентрациях образуют в стекле ионные пары и миникластеры. Наличие кластеров ухудшает усилительные свойства световода, а также может вызывать дополнительные потери в стекле, что крайне негативно сказывается на лазерной генерации.

В работе были исследованы как РОС-лазеры, так и лазеры, собранные по классической схеме с резонатором Фабри-Перо. Длины резонаторов исследуемых лазеров не превышали 50 мм. Для температурной стабилизации лазеров в ходе проведения экспериментов резонаторы погружались в емкость с жидкостью. Режимы генерации исследуемого лазера были изучены в условиях непрерывной накачки диодным полупроводниковым лазером с длиной волны излучения 976 нм. При комнатной температуре лазер работал в импульсном режиме, соответствующем режиму пассивной модуляции добротности (Рисунок 15), причем частота следования и длительность импульсов зависели от мощности, вводимой в лазер, накачки.

Впервые был обнаружен переход из импульсного режима в режим постоянной генерации лазера при снижении температуры окружающей среды до 77 °С. Следует отметить, что эффект импульсной генерации в эрбиевых лазерах был известен и ранее и связывался с образованием ионных пар эрбия [21, 22], что приводит к появлению такого эффекта, как ап-конверсия. Однако стройной теории, объясняющей наблюдаемые эффекты не было. В разделе представлено теоретическое обоснование наблюдаемым эффектам. Было показано, что возникновение импульсной генерации связано с эффектом обратного насыщающегося поглощения, т.е. возрастанием внутрирезонаторного поглощения при увеличении интенсивности лазерной

генерации. Представленная теория также объясняет переход лазера из импульсного режима в режим постоянной генерации. Показано, что такой переход зависит как от температуры, так и от мощности накачки (рисунок 16). Предсказана возможность наблюдения такого перехода при комнатных температурах.

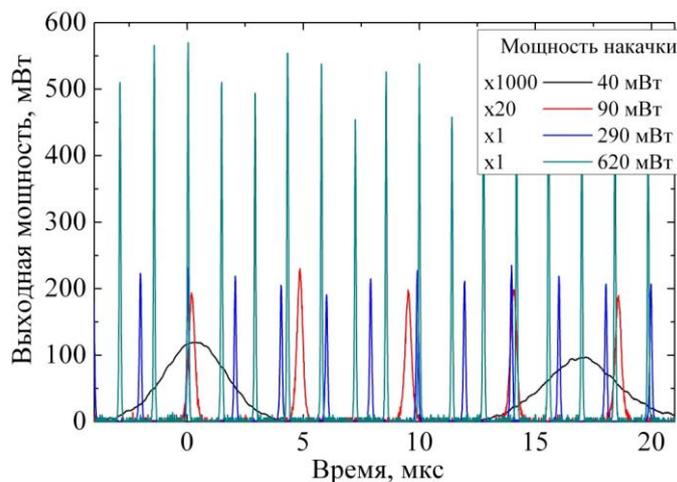


Рисунок 15 – Режимы генерации РОС-лазера при различных уровнях накачки.

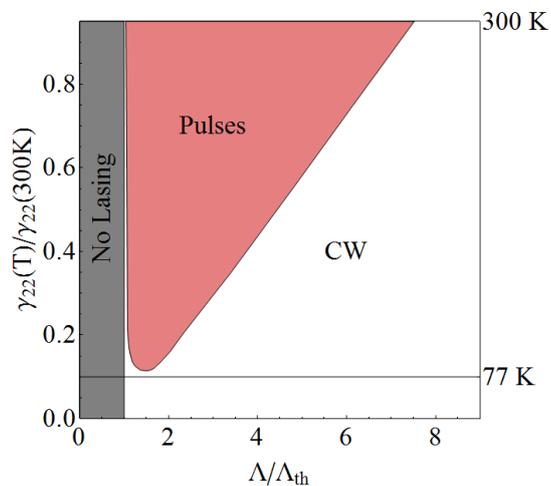


Рисунок 16 – Диаграмма режимов генерации лазера в зависимости от мощности накачки и вероятности ап-конверсионных процессов.

В разделе 5.5 представлены результаты исследования лазера на основе нового композитного волоконного световода, особенностью которого является высокая концентрация фосфора в стекле сердцевины. Фосфор повышает растворимость ионов эрбия в стекле, уменьшая вероятность образования кластеров. На основе такого световода был изготовлен лазер с классическим Фабри-Перо резонатором длиной порядка 10 мм. Впервые был получен одночастотный режим генерации при накачке лазера на длине волны 1490 нм. Показано, что эффективность генерации лазера при накачке на 1490 и 976 нм отличается более чем в 3,5 раза: 0,52% и ~ 0,14% соответственно. Столь существенная разница объясняется поглощением из возбуждённого состояния ионов Er^{3+} и связанными с ним ап-конверсионными процессами, которые могут приводить к значительным потерям и снижению эффективности генерации лазера при накачке на длине волны 976 нм [23, 24].

При использовании в качестве накачки диода с длиной волны излучения 1490 нм была достигнута ширина линии генерации лазера на уровне 4 кГц.

Как и в случае классических кварцевых волокон, наблюдалась зависимость режимов генерации от мощности вводимой в лазер накачки. Был получен переход из импульсного режима в режим постоянной генерации

лазера уже при комнатной температуре, что является дополнительным подтверждением теории, изложенной в разделе 5.4.

В разделе 5.6 приводятся выводы к главе 5.

В заключении кратко сформулированы основные результаты диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые показана возможность записи брэгговских решеток в волоконных световодах со слаболегированной азотосиликатной (0,5 ат.% N) сердцевиной. Выявлен двухэтапный механизм записи в азотосиликатных образцах [A1].
2. В световодах с высокой концентрацией азота в сердцевине наблюдается ярко выраженная зависимость скорости записи брэгговских решеток от плотности энергии экспонирующего излучения, что свидетельствует о существенной роли многофотонных процессов [A2].
3. Брэгговские решетки, записанные в световодах с сердцевиной, легированной азотом, обладают повышенной термической устойчивостью вплоть до температур 450-500 °С [A3], при этом решетки типа Па более устойчивы к воздействию высоких температур по сравнению с решетками типа I, записанными в тех же волокнах. Динамика изменения параметров решетки типа Па под воздействием температуры зависит от плотности энергии УФ-излучения, при которой записывалась брэгговская структура. Наиболее вероятно, что данные изменения связаны с изменением радиального профиля световода в местах облучения вследствие частичной диффузии атомов азота при записи решетки [A2, A4, A23-A27].
4. Выявлено влияние водорода на параметры брэгговских решеток, записанных как в германосиликатных, так и в азотосиликатных волокнах. Показано резкое изменение параметров азотосиликатных образцов даже при присутствии малого количества водорода в сердцевине. Взаимодействие водорода с фотоиндуцированными центрами, ассоциированными с атомами азота, приводит к резкому падению контраста брэгговских решеток типа I и росту уровня отражения решеток типа Па, и является причиной подавления фоточувствительности в данном типе стекла. Данный эффект влияния водорода на параметры решеток подавляется при проведении предварительного термического отжига брэгговских решеток при температуре порядка 700 °С в течение

- 20 минут, что связано с термическим распадом фотоиндуцированных центров, ответственных за формирование решеток типа I [A5-A7, A28].
5. Впервые исследована радиационная стойкость двулучепреломляющего оптического волокна с сердцевиной из кварцевого стекла, легированного азотом. Выявлено влияние коротковолновой и длинноволновой составляющих в общий уровень радиационно-наведенных потерь. Показано, что потери при дозе облучения 2-10 кГр не превышают 5-10 дБ/км, что на порядок ниже аналогичных показателей для стандартных телекоммуникационных волокон на основе германосиликатного стекла [A8, A9, A29, A30].
 6. Продемонстрирована высокая стабильность параметров брэгговских решеток, записанных в световодах с азотосиликатной сердцевиной, к воздействию ионизирующего излучения, что, вкупе с их высокой термической стойкостью, делает такие решетки перспективными в качестве датчиков, работающих в условиях повышенного фона ионизирующего излучения [A10, A31-A34].
 7. Показано, что на основе волоконных брэгговских решеток могут быть созданы волоконные датчики механических деформаций, способных работать в условиях активной зоны атомного реактора [A33-A36]. Впервые представлен принципиально новый тип брэгговского волоконно-оптического датчика на основе четырехсердцевинного кварцевого стержня-сборки для мониторинга кривизны технологических каналов в графитовой кладке канального атомного реактора [A11, A53]. Датчик продемонстрировал работоспособность в условиях работы реактора РБМК-1000 на 100% мощности [A35, A36]. Благодаря новой разработке была решена отраслевая задача мониторинга искривления технологических каналов в графитовой кладке атомного реактора РБМК-1000.
 8. Разработана методика изготовления волоконных плазмонных сенсоров на основе наклонных брэгговских решеток, включающая в себя новый способ равномерного нанесения тонких металлических покрытий заданной толщины на боковую поверхность волоконного световода [A12, A13, A37, A38].
 9. Впервые предложено использование двулучепреломляющих волокон для контроля поляризации излучения, проходящего через плазмонный сенсор на основе наклонных брэгговских решеток. Сравнительные эксперименты продемонстрировали увеличение стабильности показаний сенсора при механическом воздействии на подводящее волокно на порядок величины [A39].

10. Экспериментально исследована динамика изменения длины волны плазмонного резонанса сенсора на основе наклонной брэгговской решетки при изменении температуры окружающей среды. Продемонстрирована возможность температурной компенсации сигнала, что позволяет увеличить стабильность показаний сенсора, минимизировав влияние температуры при реальной его эксплуатации [A12, A14, A40].
11. Разработан макет микрофлюидного чипа для проведения измерений в потоке исследуемой жидкости. Впервые предложен метод жесткого крепления сенсорного элемента на основе наклонной брэгговской решетки в канале чипа, благодаря чему минимизировано влияние механического воздействия на сенсор в потоке исследуемой жидкости [A15].
12. Впервые разработан универсальный математический аппарат обработки показаний плазмонного сенсора на основе наклонной брэгговской решетки, основанный на комплексном анализе спектрального положения и амплитуды пиков спектра пропускания сенсора. С его помощью было получено разрешение сенсора на уровне 3×10^{-6} по показателю преломления. [A14, A41]. Исследована возможность детектирования концентрации биологических молекул в чистых растворах с помощью волоконного плазмонного сенсора без функционализации поверхности. Обозначены перспективы для дальнейшего развития биосенсорики на базе разработанных волоконных чувствительных элементов [A12, A39, A42].
13. На основе нового фоточувствительного, высоколегированного ионами иттербия, световода изготовлен волоконный лазер с распределенной обратной связью с ультракоротким резонатором длиной 12 мм. Получен одночастотный режим генерации такого лазера на длине волны 1033,3 нм. Ширина спектральной линии генерации лазера с резонатором длиной 20 мм не превышала 8 кГц. Показана стабильность выходной мощности лазера в одночастотном режиме на уровне 10 мВт при многочасовой эксплуатации в лабораторных условиях [A16-A18, A43, A44].
14. Выявлено негативное влияние насыщения молекулярным водородом при последующем, характерном для записи брэгговских решеток, облучении образцов УФ-излучением с длиной волны 193 нм, на усилительные свойства кварцевых активных волокон, легированных Er^{3+} . Предложено объяснение данного явления. Показано, что часть фотоиндуцированных центров распадается при воздействии излучения накачки на длине волны 976 нм [A19, A45-A47].

15. Впервые обнаружен эффект перехода импульсного режима в режим постоянной генерации при уменьшении температуры эрбиевого волоконного лазера, резонатор которого сформирован на участке высоколегированного волокна. Было показано, что причиной возникновения импульсов является пассивная модуляция добротности, обусловленная эффектом обратного насыщающегося поглощения [A20, A48-A50].
16. Впервые продемонстрирована работа эрбиевого волоконного лазера с длиной резонатора порядка 1 см в режиме постоянной генерации при накачке на длине волны 1490 нм. Продемонстрирована работа лазера в импульсном режиме самомодуляции добротности при малых токах накачки с переходом в режим постоянной генерации при комнатной температуре при повышении мощности накачки, что подтверждает предложенную модель возникновения пассивной модуляции добротности в высоколегированных эрбиевых световодах [A21, A22, A51, A52].

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах:

- A1. Butov O. V. Bragg gratings inscription in weakly-doped fibers // *Results in Physics*. – 2019. – V. 15. – P. 102542
- A2. Butov O. V., Golant K. M., Nikolin I. Ultra-thermo-resistant Bragg gratings written in nitrogen-doped silica fibres // *Electronics Letters*. – 2002. – V. 38. – N 11. – P. 523-525
- A3. Laktaev I. D., Przhiiakovskii D. V., Ustimchik V. E., Butov O. V. Thermal aging of Bragg gratings inscribed in pristine Ge- and N-doped fibers // *Applied Optics*. – 2019. – V. 58. – N 34. – P. 9326-9330
- A4. Butov O. V., Dianov E. M., Golant K. M. Nitrogen-doped silica-core fibres for Bragg grating sensors operating at elevated temperatures // *Measurement science and technology*. – 2006. – V. 17. – N 5. – P. 975
- A5. Lanin A. V., Butov O. V., Golant K. M. Response of in-fiber Bragg gratings to hydrogen loading and subsequent heat treatment in H₂ ambience // *Applied optics*. – 2006. – V. 45. – N 23. – P. 5800-5807
- A6. Lanin A. V., Butov O. V., Golant K. M. H₂ impact on Bragg gratings written in N-doped silica-core fiber // *Optics express*. – 2007. – V. 15. – N 19. – P. 12374-12379
- A7. Lanin A. V., Kholodkov A. V., Butov O. V., Golant K. M. Photoinduced changes in UV absorption spectra of nitrogen-doped silica caused by

- exposure to ArF excimer laser // *Journal of non-crystalline solids*. – 2009. – V. 355. – N 18-21. – P. 1075-1079
- A8. Волошин В. В., Воробьев И. Л., Иванов Г. А., Колосовский А. О., Чаморовский Ю. К., Бутов О. В., Голант К. М. Радиационно-стойкое оптическое волокно с большим двулучепреломлением // *Радиотехника и электроника*. – 2009. – V. 54. – N 7. – P. 890-894
- A9. Butov O. V., Golant K. M., Shevtsov I. A., Fedorov A. N. Fiber Bragg gratings in the radiation environment: Change under the influence of radiolytic hydrogen // *Journal of Applied Physics*. – 2015. – V. 118. – N 7. – P. 074502
- A10. Brichard B., Butov O. V., Golant K. M., Fernandez Fernandez A. Gamma radiation-induced refractive index change in Ge-and N-doped silica // *Journal of Applied Physics*. – 2008. – V. 103. – N 5. – P. 054905
- A11. Butov O. V., Bazakutsa A. P., Chamorovskiy Y. K., Fedorov A. N., Shevtsov I. A. All-Fiber Highly Sensitive Bragg Grating Bend Sensor // *Sensors*. – 2019. – V. 19. – N 19. – P. 4228
- A12. Tomyshev K. A., Tazhetdinova D. K., Manuilovich E. S., Butov O. V. High-resolution fiber optic surface plasmon resonance sensor for biomedical applications // *Journal of Applied Physics*. – 2018. – V. 124. – N 11. – P. 113106
- A13. Нечепуренко И. А., Дорофенко А. В., Томышев К. А., Бутов О. В. Исследование плазмонного резонанса на медной пленке, напыленной на световод с наклонной брэгговской решеткой // *Журнал радиоэлектроники*. – 2015. – N 4
- A14. Tomyshev K. A., Tazhetdinova D. K., Manuilovich E. S., Butov O. V. Ultrastable Combined Planar-Fiber Plasmon Sensor // *physica status solidi (a)*. – 2019. – V. 216. – N 3. – P. 1800541
- A15. Manuylovich E., Tomyshev K., Butov O. V. Method for Determining the Plasmon Resonance Wavelength in Fiber Sensors Based on Tilted Fiber Bragg Gratings // *Sensors*. – 2019. – V. 19. – N 19. – P. 4245
- A16. Рыбалтовский А., Бутов О., Савельев Е., Чаморовский Ю. Фоточувствительность иттербиевых волоконных световодов с сердцевиной из кварцевого стекла с добавкой алюминия и фосфора // *Письма в Журнал технической физики*. – 2016. – V. 42. – N 10. – P. 1-8
- A17. Smirnov A. M., Butov O. V. All-fiber heavily ytterbium-doped, passively mode-locked laser with the 456 MHz repetition rate // *Optics letters*. – 2019. – V. 44. – N 20. – P. 5065-5068
- A18. Butov O. V., Rybaltofsky A. A., Bazakutsa A. P., Golant K. M., Vyatkin M. Y., Popov S. M., Chamorovskiy Y. K. 1030 nm Yb 3+ distributed feedback

- short cavity silica-based fiber laser // JOSA B. – 2017. – V. 34. – N 3. – P. A43-A48
- A19. Bazakutsa A., Rybaltovsky A., Butov O. Effect of hydrogen loading and UV irradiation on the gain of Er³⁺-doped fibers // JOSA B. – 2019. – V. 36. – N 9. – P. 2579-2586
- A20. Smirnov A. M., Bazakutsa A. P., Chamorovskiy Y. K., Nechepurenko I. A., Dorofeenko A. V., Butov O. V. Thermal switching of lasing regimes in heavily doped Er³⁺ fiber lasers // ACS Photonics. – 2018. – V. 5. – N 12. – P. 5038-5046
- A21. Rybaltovsky A. A., Butov O. V., Vasiliev S. A., Nechepurenko I. A., Egorova O. N., Semjonov S. L., Galagan B. I., Denker B. I., Sverchkov S. E. Continuous-wave operation of an erbium-doped short-cavity composite fiber laser // Results in Physics. – 2020. – V. 16. – P. 102832
- A22. Рыбалтовский А. А., Васильев С. А., Бутов О. В., Егорова О. Н., Журавлев С. Г., Семенов С. Л., Галаган Б. И., Свечков С. Е., Денкер Б. И. Фоточувствительность эрбиевых композитных фосфоросиликатных световодов к лазерному излучению с длиной волны 193 нм // Квантовая электроника. – 2019. – V. 49. – N 12. – P. 1132-1136

Публикации в материалах конференций:

- A23. Golant K. M., Butov O. V., Dianov E. M. Nitrogen-doped silica-core fibres for Bragg gratings sensing at elevated temperatures // 17th International Conference on Optical Fibre Sensors. – T. 5855 –International Society for Optics and Photonics, 2005. – C. 872-875
- A24. Butov O. V., Golant K. M., Chamorovskii Y. K., Kolosovskii A. A., Isaev V. A., Voloshin V. V., Vorob'ev I. L., Gousev Y. V., Sokolov I. V. In-fiber Bragg gratings for sensor applications at high temperatures // Optical Fiber Communication Conference –Optical Society of America, 2004. – C. FC5
- A25. Butov O. V., Golant K. M., Gousev Y. V., Sokolov A. N., Niay P., Hidayat A., Douay M. Thermal decay of Bragg gratings written in N-doped-silica-core fibers // 17th International Conference on Optical Fibre Sensors. – T. 5855 –International Society for Optics and Photonics, 2005. – C. 314-317
- A26. Butov O. V., Golant K. M. Temperature-resistant Bragg gratings for sensor applications written in nitrogen-doped silica-core fibre // 29-th European Conference on Optical Communication, 14-th International Conference on Integrated Optics and Optical Fibre Communication ECOC-IOOC 2003. – T. 3 – Rimini, Italy, . – C. 626-627
- A27. Butov O. V., Golant K. M. Core-cladding structure transformation in silica optical fibers caused by UV-induced Bragg grating inscription //

- Proceedings of the XX International Congress on Glass –, 2004. – С. O-14-047
- A28. Lanin A., Butov O., Dianov E., Golant K. Behaviour of in-fibre Bragg gratings in hydrogen atmosphere at elevated temperature // 2005 31st European Conference on Optical Communication, ECOC 2005. – Т. 3 –IET, 2005. – С. 665-666
- A29. Chamorovskii Y. K., Butov O., Ivanov G., Kolosovskii A., Voloshin V., Vorob'ev I., Golant K. N-doped-silica-core polarization maintaining fibre for gyros and other sensors for application in space industry // 20th International Conference on Optical Fibre Sensors. – Т. 7503 –International Society for Optics and Photonics, 2009. – С. 75036T
- A30. Исаев В. А., Волошин В. В., Воробьев И. Л., Иванов Г. А., Колосовский А. О., Чаморовский Ю. К., Бутов О. В., Голант К. М. Радиационно-стойкое оптическое волокно с большим двулучепреломлением // Фотон-экспресс. – 2009. – V. 78. – N 6. – P. 13-14
- A31. Fernandez A. F., Brichard B., Butov O. V., Golant K. M., Lanin A. V. High radiation tolerance of temperature resistant Bragg gratings written in N-doped silica-core fibers up to MGy dose levels // Third European Workshop on Optical Fibre Sensors. – Т. 6619 –International Society for Optics and Photonics, 2007. – С. 66190M
- A32. Бутов О. В., Голант К. М., Ланин А. В., Шевцов И. А., Федоров А. Н., Шушлебин В. В. О возможности применения оптоволоконных датчиков для контроля температуры и деформации графитовых колонн ядерного реактора РБМК-1000 // Фотон-экспресс. – 2011. – V. 94. – N 6. – P. 43-44
- A33. Butov O. V., Chamorovskii Y. K., Golant K. M., Shevtsov I. A., Fedorov A. N. Fibers and sensors for monitoring nuclear power plants operation // 23rd International Conference on Optical Fibre Sensors. – Т. 9157 –International Society for Optics and Photonics, 2014. – С. 91570X
- A34. Бутов О. В. Современное состояние проблемы радиационной стойкости фоточувствительных волоконных световодов и брэгговских сенсоров на их основе // Фотон-экспресс. – 2015. – V. 126. – N 6. – P. 134-135
- A35. Butov O. V., Chamorovski Y. K., Bazakutsa A. P., Fedorov A. N., Igor'A S. Optical fiber sensor for deformation monitoring of fuel channels in industrial nuclear reactors // Optical Fiber Sensors –Optical Society of America, 2018. – С. TuE103
- A36. Бутов О. В., Базакуца А. П., Чаморовский Ю. К., Федоров А. Н., Шевцов И. А. Полностью волоконный высокочувствительный датчик

- изгиба для атомной промышленности // Фотон-экспресс. – 2019. – V. 158. – N 6. – P. 26-27
- A37. Butov O., Golant K., Tomyshev K. Recoating of fiber Bragg gratings with metals // 11-th International Symposium on SiO₂, Advanced Dielectrics and Related Devices –, 2016. –
- A38. Бутов О. В., Томышев К. А. Волоконные датчики на основе брэгговских решеток с наклонными штрихами // Фотон-экспресс. – 2019. – V. 158. – N 6. – P. 22-23
- A39. Tomyshev K. A., Chamorovskiy Y. K., Ustimchik V. E., Butov O. V. Polarization stable plasmonic sensor based on tilted fiber Bragg grating // 2017 25th Optical Fiber Sensors Conference (OFS) –IEEE, 2017. – С. 1-4
- A40. Tomyshev K. A., Tazhetdinova D. K., Butov O. V. High-resolution fiber plasmon sensor // 2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS) –IEEE, 2017. – С. 53-56
- A41. Томышев К. А., Мануйлович Е. С., Бутов О. В. Методика определения длины волны плазмонного резонанса для датчиков на основе брэгговских решеток с наклонными штрихами // Фотон-экспресс. – 2019. – V. 158. – N 6. – P. 24-25
- A42. Butov O. V., Tomyshev K. A., Golant K. M. Advanced biosensors based on optical fibers // Innovative Concepts and Technologies for Biomedical Applications. – Т. 3 – Moscow: Head & Neck, 2016. – С. 156
- A43. Butov O. V., Rybaltovsky A. A., Vyatkin M. Y., Bazakutsa A. P., Popov S. M., Chamorovskiy Y. K., Golant K. M. Short-cavity DFB fiber lasers // 2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS) –IEEE, 2017. – С. 1594-1597
- A44. Бутов О. В., Рыбалтовский А. А., Вяткин М. Ю., Попов С. М., Чаморовский Ю. К., Голант К. М. 1030 нм волоконный лазер с распределенной обратной связью с резонатором длиной 2 см // 7-й российский семинар по волоконным лазерам – Новосибирск, 2016. –
- A45. Butov O. V., Bazakutsa A. P., Golant K. M. Amplification decay of Er-doped H₂-loaded fiber caused by UV exposure // Advanced Photonics Congress – Zürich, Switzerland: Optical Society of America, 2018. – С. JTh4A. 7
- A46. Базакуца А. П., Голант К. М., Бутов О. В. Влияние УФ-излучения на усилительные свойства легированного эрбием кварцевого волокна, насыщенного молекулярным водородом // 8-й Российский семинар по волоконным лазерам –, 2018. – С. 164-165
- A47. Базакуца А. П., Бутов О. В. Влияние насыщения молекулярным водородом на люминесцентные свойства кварцевых оптических

- волокон с высоким содержанием Er^{3+} в сердцевине // Фотон-экспресс. – 2019. – V. 158. – N 6. – P. 212-213
- A48. Смирнов А. М., Базакуца А. П., Бутов О. В. Особенности генерации волоконных лазеров с распределенной обратной связью с коротким резонатором // 8-й Российский семинар по волоконным лазерам –, 2018. – С. 61-62
- A49. Смирнов А. М., Базакуца А. П., Бутов О. В. Температурная зависимость режимов работы эрбиевых волоконных лазеров с коротким резонатором // Фотон-экспресс. – 2019. – V. 158. – N 6. – P. 218-219
- A50. A. M. Smirnov, A. P. Bazakutsa, O. V. Butov, “Temperature and Pump Dependent Operation of Short-cavity Erbium-doped Fiber Laser,” Proc. 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS – SPRING), Rome, Italy, 17-20 June (2019), pp. 741-744
- A51. Rybaltovsky A., Egorova O., Vasiliev S., Zhuravlev S., Butov O., Semjonov S., Galagan B., Sverchkov S., Denker B. Photosensitivity of composite heavily erbium-doped phosphosilicate fibers // Book of Abstracts «International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT)» – Prague, Czech Republic, 2019. – С. LS-I-17
- A52. Егорова О. Н., Васильев С. А., Журавлев С. Г., Бутов О. В., Семенов С. Л., Галаган Б. И., Сверчков С. Е., Денкер Б. И. Волоконные решетки в активных композитных фосфосиликатных световодах // Фотон-экспресс. – 2019. – V. 158. – N 6. – P. 160-161

Патент:

- A53. Баранов А. В., Федоров А. Н., Бутов О. В. Пат. RU 2626301 РФ, МПК7 Способ измерения искривления технологического канала ядерного реактора типа РБМК и устройство для его осуществления.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kapron F. P., Keck D. B., Maurer R. D. Radiation losses in glass optical waveguides // Applied Physics Letters. – 1970. – V. 17. – N 10. – P. 423-425.
2. Hill K. O., Fujii Y., Johnson D. C., Kawasaki B. S. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication // Applied physics letters. – 1978. – V. 32. – N 10. – P. 647-649.
3. Meltz G., Morey W. W., Glenn W. H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method // Optics letters. – 1989. – V. 14. – N 15. – P. 823-825.
4. Kashyap R. Fiber bragg gratings. Academic press, 2009.

5. Othonos A. Fiber bragg gratings // Review of scientific instruments. – 1997. – V. 68. – N 12. – P. 4309-4341.
6. Васильев С. А., Медведков О. И., Королев И. Г., Божков А. С., Курков А. С., Дианов Е. М. Волоконные решетки показателя преломления и их применения // Квантовая электроника. – 2005. – V. 35. – N 12. – P. 1085-1103.
7. Hill K. O., Meltz G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview // Journal of lightwave technology. – 1997. – V. 15. – N 8. – P. 1263-1276.
8. Leconte B. Contribution à l'étude de la photosensibilité des fibres en silice sous l'effet d'une insolation par un laser à ArF; Lille 1, 1998.
9. Lanin A. V., Golant K. M., Nikolin I. V. Interaction of molecular hydrogen with the doped silica core of an optical fiber at elevated temperatures // Technical physics. – 2004. – V. 49. – N 12. – P. 1600-1604.
10. Bashkatov A. N., Genina E. A. Water refractive index in dependence on temperature and wavelength: a simple approximation // Saratov Fall Meeting 2002: Optical Technologies in Biophysics and Medicine IV. – T. 5068 –International Society for Optics and Photonics, 2003. – C. 393-395.
11. MacDougall D., Crummett W. B. Guidelines for data acquisition and data quality evaluation in environmental chemistry // Analytical Chemistry. – 1980. – V. 52. – N 14. – P. 2242-2249.
12. Long G. L., Winefordner J. D. Limit of detection. A closer look at the IUPAC definition // Analytical chemistry. – 1983. – V. 55. – N 7. – P. 712A-724A.
13. Albert J., Shao L. Y., Caucheteur C. Tilted fiber Bragg grating sensors // Laser & Photonics Reviews. – 2013. – V. 7. – N 1. – P. 83-108.
14. Voisin V., Caucheteur C., Mégret P., Albert J. Interrogation technique for TFBG-SPR refractometers based on differential orthogonal light states // Applied optics. – 2011. – V. 50. – N 22. – P. 4257-4261.
15. Albert J., Lepinay S., Caucheteur C., DeRosa M. C. High resolution grating-assisted surface plasmon resonance fiber optic aptasensor // Methods. – 2013. – V. 63. – N 3. – P. 239-254.
16. Guo T., Liu F., Liang X., Qiu X., Huang Y., Xie C., Xu P., Mao W., Guan B.-O., Albert J. Highly sensitive detection of urinary protein variations using tilted fiber grating sensors with plasmonic nanocoatings // Biosensors and Bioelectronics. – 2016. – V. 78. – P. 221-228.
17. Shevchenko Y., Chen C., Dakka M. A., Albert J. Polarization-selective grating excitation of plasmons in cylindrical optical fibers // Optics letters. – 2010. – V. 35. – N 5. – P. 637-639.
18. Spieberger S., Schiemangk M., Wicht A., Wenzel H., Brox O., Erbert G. Narrow linewidth DFB lasers emitting near a wavelength of 1064 nm // Journal of lightwave technology. – 2010. – V. 28. – N 17. – P. 2611-2616.
19. Bazakutsa A. P., Golant K. M. Quenching of erbium and ytterbium luminescence by the random walk of H₂ and D₂ molecules in the silica glass of active optical fibers // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2015. – V. 411. – P. 68-75.

20. Stone J. Interactions of hydrogen and deuterium with silica optical fibers: A review // *Journal of Lightwave technology*. – 1987. – V. 5. – N 5. – P. 712-733.
21. Sanchez F., Le Boudec P., François P.-L., Stephan G. Effects of ion pairs on the dynamics of erbium-doped fiber lasers // *Physical Review A*. – 1993. – V. 48. – N 3. – P. 2220.
22. Loh W. H. Suppression of self-pulsing behavior in erbium-doped fiber lasers with resonant pumping // *Optics letters*. – 1996. – V. 21. – N 10. – P. 734-736.
23. Barmenkov Y. O., Kir'yanov A. V., Guzmán-Chávez A. D., Cruz J.-L., Andrés M. V. Excited-state absorption in erbium-doped silica fiber with simultaneous excitation at 977 and 1531 nm // *Journal of Applied Physics*. – 2009. – V. 106. – N 8. – P. 083108.
24. Kir'yanov A. V., Barmenkov Y. O., Guzman-Chavez A. D. Er 3+ excited-state absorption in an erbium-doped silica fiber at the wavelengths 1490–1580 and 978 nm // *Laser physics*. – 2008. – V. 18. – N 11. – P. 1251.