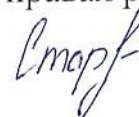


На правах рукописи



Старикова Виктория Александровна

**Исследование структур микрополостей в кварцевом
оптическом волокне при оптическом пробое**

1.3.8. Физика конденсированного состояния

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Пермь – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ФГАОУ ВО «ПНИПУ»).

Научный руководитель: **Перминов Анатолий Викторович** – доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой общей физики ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Официальные оппоненты: **Шандаров Станислав Михайлович** – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры электронных приборов ФГАОУ ВО "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники", г. Томск.

Пономарев Роман Сергеевич – кандидат физико-математических наук, заведующий молодежной лабораторией интегральной фотоники ФГАОУ ВО "Пермский государственный национальный исследовательский университет", г. Пермь.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «29» мая 2025 г. в 15:15 часов на заседании диссертационного совета 24.2.358.03 на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Пермский государственный национальный исследовательский университет" по адресу: 614068, г. Пермь, ул. Букирева 15, тел: (342) 239-62-27, факс: (342) 237-16-11, сайт: www.psu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ПГНИУ и на сайте <http://www.psu.ru/nauka>.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н.



Сосунов Алексей Владимирович

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования.

В диссертации изучается процесс оптического пробоя в кварцевом оптическом волокне и влияние на него различных внешних факторов. Явление оптического пробоя представляет собой возникновение плазменного очага (искры) в оптическом волокне. После возникновения плазменный очаг (искра) распространяется по оптическому волокну навстречу источнику излучения, формируя после распространения квазипериодическую внутреннюю структуру из отдельных микрополостей различных размеров и форм, заполненных молекулярным кислородом. Механизм возникновения оптического пробоя в волоконном световоде тесно связан с нелинейным поглощением оптического излучения кварцевым стеклом. Долгое время оптический пробой волокна считался негативным эффектом, например, если он происходит в телекоммуникационных оптоволоконных линиях. Однако, данный эффект нашел свое применение в качестве альтернативы существующим сенсорным и рассеивающим структурам. Полученная в ходе прохождения оптического пробоя внутренняя структура оптического волокна может быть использована как чувствительный элемент для оптического датчика на основе интерферометра Фабри-Перо или оптического рассеивателя излучения. Для различных датчиков и оптических рассеивателей излучения выдвигаются различные требования к геометрии квазипериодической внутренней структуры.

При разработке волоконно-оптических устройств, основанных на квазипериодической структуре микрополостей, существует проблема определения влияющих факторов, изменением которых можно добиться заданной заранее геометрии этой структуры. Необходимо выявить такие влияющие факторы и оценить их вклад в формирование структуры из микрополостей. Полученная информация в дальнейшем будет использована для создания методик управления параметрами внутриволоконной структуры микрополостей. Начальная стадия возникновения плазменной искры (начальная стадия пробоя) и процесс её распространения по волокну определяют форму, размеры и периодичной внутриволоконной структуры. С этой точки зрения, изучение процесса пробоя оптического волокна и движения плазменной искры по нему является актуальными задачами для разработки оптоволоконных устройств.

Изучение процессов пробоя оптического волокна и движения плазменной искры по нему является одной из актуальных задач в области разработки оптоволоконных устройств. В целом, наиболее значимый вклад в исследование эффекта плавления волокна на фундаментальном уровне был внесен работами Йо. Шуто (Y. Shuto), а также С. Тодороки (S. Todoroki). Этими авторами при моделировании процесса оптического пробоя в центре отрезка волокна используется уравнение теплопроводности совместно с уравнением изменения оптической мощности вдоль длины оптического волокна. Однако нет работ, в которых рассматривается процесс инициирования оптического пробоя на торце оптического волокна. Так же не было исследовано влияние магнитного поля на плазменный очаг, формируемый в процессе оптического пробоя. Автору диссертации не известны работы по изучению прочностных характеристик оптического волокна с полученной в ходе оптического пробоя квазипериодической внутренней структурой.

Целью диссертационной работы является определение факторов, влияющих на формирование структур микрополостей в кварцевом оптическом волокне в результате оптического пробоя, и влияния этих структур на свойства волокна.

Для достижения поставленной цели в рамках работы решались следующие задачи:

1. Экспериментальное исследование влияния магнитного поля различной интенсивности на геометрию квазипериодической внутренней структуры и скорость движения плазменного очага по оптическому волокну.

2. Экспериментальное исследование прочностных характеристик оптического волокна с квазипериодической структурой методом двухточечного изгиба и методом осевого растяжения.

3. Разработка тепловых математических моделей оптического пробоя в момент соприкосновения торца оптического волокна с поверхностью инициатора.

4. Численное исследование влияния характеристик оптического излучения (длины волны и мощности), материала инициатора и его теплофизических свойств, а также наличия воздушного зазора на время возникновения и пороговую мощность.

Научная новизна:

1. Впервые экспериментально исследована геометрия квазипериодической внутренней структуры оптического волокна, полученная при движении плазменной искры в магнитном поле. Магнитное поле влияет на движущуюся плазму, что приводит к изменениям геометрических параметров отдельных микрополостей в сердцевине оптического волокна.

2. Впервые зафиксировано расщепление внутриволоконной структуры под действием магнитного поля, когда некоторые микрополости разделяются на две неравные части – основная микрополость, размещенная на оси волокна, и дополнительная диаметром ~30 % от диаметра основной микрополости.

3. Представлены новые результаты исследования предела прочности оптического волокна SMF-28e с квазипериодической внутренней структурой микрополостей в полиимидном и акрилатном покрытиях методом двухточечного изгиба и осевого растяжения. Показано, что оптический пробой не приводит к значительным изменениям механических свойств защитных покрытий. При осевом растяжении волокно в акрилатном покрытии с внутренней структурой микрополостей сохраняет свою механическую прочность, в отличие от волокна с полиимидной защитной оболочкой.

4. Впервые разработаны тепловые математические модели, описывающие процесс возникновения оптического пробоя на торце оптического волокна при его идеальном и не идеальном соприкосновении с поверхностью инициатора. Модели основаны на уравнении теплопроводности с учетом тепловыделения из-за нелинейного поглощения излучения вблизи границы контакта, и уравнениях тепло- и массопереноса в воздушном зазоре между волокном и инициатором.

5. На основе математического моделирования теплопроводности оптического пробоя на торце оптического волокна впервые выявлено влияние длины волны и мощности излучения, а также профиля показателя преломления для коммерчески доступного оптического волокна SMF-28e, на пороговую мощность оптического пробоя, характерные времена, скорости и размеры плазменного очага.

6. Изучено, не исследованное ранее, влияние теплофизических свойств инициатора, таких как коэффициент теплопроводности, плотность материала и коэффициент теплоемкости на пороговое значение оптической мощности оптического пробоя, характерные времена образования плазменного очага и его размер.

7. Впервые выявлено значительное увеличение характерных времен и пороговой мощности оптического пробоя при наличии воздушного зазора по сравнению с идеальным соприкосновением волокна и инициатора

Теоретическая и практическая значимость.

Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в том, что изучены новые фундаментальные методы управления оптическим пробоем, инициированным методом соприкосновения торца волокна с инициатором. Исследовано влияние оптического излучения, параметров оптического волокна, теплофизических свойств инициатора и наличия воздушного зазора на возникновение оптического пробоя.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что результаты диссертации повышают управляемость процесса оптического пробоя, что может быть использовано при разработке волоконных рассеивателей, датчиков и фильтров. В отличие

от существующих методов для их создания не потребуются нарушение защитно-упрочняющего покрытия, снижающего исходную прочность и компактность волокна, а также дорогостоящая прецизионная механика. Высокотемпературные и химически стойкие датчики температуры на основе внутриволоконной структуры из микрополостей можно использовать при бурении скважин, разведке месторождений полезных ископаемых и других процессах нефтяной и газовой промышленности. Помимо этого, можно создавать комбинированные устройства, включающие в себя функционал датчика температуры и рассеивателя излучения. Такие устройства могут пригодиться в медицинских приложениях, где при воздействии излучением существует необходимость контролировать температуру рассеивателя для предотвращения ожогов тканей человека.

Методология и методы исследования.

Процесс оптического пробоя волокна можно разделить на два этапа: формирование плазменного очага на торце волокна и его движение по оптическому волокну. Первый этап происходит стремительно и локализован в области сердцевины оптического волокна из-за чего его сложно исследовать экспериментально, но можно исследовать с помощью математического моделирования. Алгоритм решения первого этапа оптического пробоя был реализован в пакете прикладных программ Comsol Multiphysics, в котором для решения различных физических и инженерных задач используется метод конечных элементов. Для решения задачи использовался модуль для расчета теплопереноса в твердых телах. В ходе исследования сходимость решения при уменьшении размера расчетной ячейки была выбрана оптимальная расчетная сетка.

Второй этап представляет сложную задачу для моделирования, т.к. требуется учесть термодинамику процесса, физику плазмы, гидродинамику течений расплавленного кварца и химические реакции кварцевого стекла при высоких температурах. Однако, второй этап доступен для экспериментальных исследований. Для этого было использовано современное высокотехнологичное оборудование, соответствующее международным стандартам. Для исследования предела прочности были использованы широко известные методы двухточечного изгиба и осевого растяжения.

Полученные в результате исследований данные представлены в виде аппроксимированных кривых с применением функции усреднения B-Spline. Для графического представления исследуемых зависимостей использовался пакет программ Origin, предназначенный для численного анализа данных и научной графики.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Доказано, что: магнитное поле влияет на процесс распространения плазменной искры, возникающей при оптическом пробое, и формирование структуры из микрополостей в сердцевине оптического волокна; сильное магнитное поле (~12 Тл) приводит к изменению геометрии внутриволоконной структуры: неоднородное поле влечет увеличение поперечных размеров отдельных микрополостей на ~7 %, однородное приводит к уменьшению поперечных размеров на ~2 % ввиду расщепления одной микрополости на две неравные части; слабое магнитное поле (~0,6 Тл) вызывает уменьшение скорости плазменной искры на ~13 %.

2. Определено, что предел прочности оптического волокна в акрилатном покрытии с полученной в результате оптического пробоя внутренней структурой, снижается на ~26-30 %, и оно остается пригодным для эксплуатации с механической точки зрения, в отличие от волокна в полиимидном покрытии, для которого предел прочности снижается на ~78-83 %.

3. Тепловые математические модели, описывающие процесс возникновения оптического пробоя на торце оптического волокна SMF-28e при его идеальном и неидеальном соприкосновении с поверхностью инициатора.

4. Для оптического волокна SMF28e численно получены значения характерных времен эволюции плазменного очага ~1-2 мкс, пороговых значений мощности ~200-400 мВт для длин волн излучения в диапазоне от 1080 до 2050 нм. Доказано влияние

теплофизических свойств инициатора на процесс возникновения оптического пробоя, а именно уменьшение времени возникновения пробоя и значения пороговой мощности при уменьшении коэффициента теплопроводности инициатора.

Достоверность результатов.

Достоверность результатов экспериментальных исследований обеспечивается использованием поверенных средств измерения, тщательной подготовкой и планированием эксперимента. Для интерпретации и оценки точности результатов использованы проверенные методики обработки экспериментальных данных. Достоверность результатов теоретических исследований обеспечивается использованием известного программного продукта, отлаженного, в частности, на задачах теплопроводности и широко применяемого для решения задач вычислительной термодинамики. В каждой математической модели проводилась тщательная процедура исследования численной сходимости решения с уменьшением размера расчетной ячейки сетки. Проводилось качественное и там, где возможно, количественное сопоставление результатов работы с результатами других авторов и экспериментальными данными.

Личный вклад.

Результаты второй главы опубликованы в работах [1, 9]. Постановка задач для натурального эксперимента выполнялась автором совместно с научным руководителем. В работе [1] автор исследования лично занимался сборкой экспериментальной установки, тестированием методик проведения экспериментальных исследований и обработкой результатов эксперимента; совместно с соавторами публикации автор проводил сбор данных и оформление научной статьи.

Результаты третьей главы опубликованы в работах [2, 7]. Работа [2] является переводной версией научной статьи [7], в которой автор самостоятельно проводил измерения и обработку результатов; совместно с соавторами выполнялись выбор методов измерений, отработка методик и написание научной статьи. Результаты исследований, описанных в главах 2 и 3 легли в основу патента на изобретение [9], где автор лично подготавливал материалы для заявки, которая была подана совместно со авторами.

Результаты четвертой главы опубликованы в работах [3-6, 8]. Разработка математических моделей выполнялась автором диссертации совместно с научным руководителем и соавторами работ. Разработка численного алгоритма, выбор численных методов, настройка модулей программного обеспечения, модифицирование решателей под рассматриваемые задачи и выполнение всех численных расчетов, включающих обработку результатов, производилась диссертанткой самостоятельно. Обсуждение результатов и написание научных статей производилось в составе научного коллектива и совместно с научным руководителем.

Апробация результатов.

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных семинарах и конференциях: Asia-Pacific Conference on Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics (APCOM-2022), Vladivostok, Russia, 2022 г.; Всероссийская школа-конференция молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках», Пермь, Россия, 2022 и 2023 г.; Optics and photonics international Congress (OPIC-2023), Yokohama, Japan, 2023 г.; Международный симпозиум «Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies» Санкт-Петербург, Россия, 2022 г.; INTERNATIONAL SYMPOSIUM Fundamentals of Laser Assisted Micro- & Nanotechnologies (FLAMN-22), St. Petersburg, Russia, 2022 г.; Двадцать третья Международная конференция по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС-25), поселок Дивноморское, Россия, 2023 г.; Всероссийская Диановская конференция по волоконной оптике (ВКВО), Пермь, Россия, 2021 и 2023 г.; Международный симпозиум «Неравновесные процессы в сплошных средах» (МПСС-2024), Пермь, Россия, 2024. Исследования в рамках

диссертационной работы были поддержаны Российским научным фондом грант № 23-21-00169: <https://rscf.ru/project/23-21-00169/>, а также фондом содействия инновациям в рамках программ «УМНИК-2019» и «СТАРТ-2021».

Диссертационная работа обсуждалась на семинарах кафедры общей физики ПНИПУ, теоретической физики ПГНИУ и на научно-технических советах ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания».

Соответствие шифру научной специальности:

Диссертация соответствует пунктам 1 - 3 шифра специальности «1.3.8. Физика конденсированного состояния».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ, из них 4 статьи в международных системах цитирования Web of Science, SCOPUS, 2 статьи в российских журналах, входящих в перечень ВАК по специальности 1.3.8, 2 статьи в прочих журналах, входящих в перечень ВАК и 1 патент.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, 2 - х разделов: «Основные результаты диссертации», «Перспективы развития и использования результатов» и списка цитированной литературы, включающего 165 наименований. Общий объем диссертации составляет 147 страниц и содержит 75 рисунков и 17 таблиц.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, аргументирована научная новизна, показана теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе содержится аналитический обзор научной литературы по теме диссертационного исследования. Подробно рассмотрены наиболее актуальные работы, касающиеся теоретических и экспериментальных исследований процессов возникновения оптического пробоя в оптическом волокне.

В пункте 1.1 представлены теоретические исследования оптического пробоя в волокне. Показано, что существует четыре основных модели, описывающих механизмы возникновения оптического пробоя в диэлектрике: модель, основанная на экзотермической химической реакции, модель самофокусировки излучения, модель тепловой линзы и модель обмена энергией при реакции фотозамещения. Первая модель дает качественное понимание основных протекающих в оптическом волокне процессов, однако она подходит только для волокон, легированных ионами германия. Модель самофокусировки излучения, предложенная Кашьяп и Блоу, основана на предположении, что показатель преломления сердцевины волокна зависит от интенсивности оптического излучения. В таком случае расчеты показывают возникновение оптического пробоя при достижении пороговой мощности, что сходится с экспериментальными результатами исследования оптического пробоя. Однако количественные результаты далеки от реально измеренных результатов. Хэнд и Рассел, опираясь на экспериментальные данные, показали, что при нагревании волокна скачкообразно увеличивается показатель поглощения излучения, что ведет к появлению эффекта тепловой линзы, из-за которого увеличивается показатель преломления. Модель тепловой линзы дает хорошие количественные результаты, ведь фокусное расстояние такой линзы совпадает с периодом внутренней структуры. Однако эта модель не объясняет экспериментально полученного резкого увеличения коэффициента поглощения излучения.

Модель обмена энергиями при реакции фотозамещения, разработанная советским ученым, академиком С.И. Яковленко, дополняет модель тепловой линзы, объясняя природу резкого увеличения коэффициента поглощения излучения. К причинам резкого роста приводят два независимых механизма. Первый механизм – это экспоненциальный

рост скорости реакции фотозамещения, при которой поглощается фотон. Второй механизм, приводящий к росту коэффициента поглощения излучения – это рост числа несвязных атомов кислорода при температуре, равной температуре плавления кварца, что резко увеличивает эффективность реакции фотозамещения. К недостаткам модели можно отнести сложность её практического использования, ведь конкретные формы потенциальных поверхностей системы $O + SiO$ остаются неизвестными.

В пункте 1.2 представлены основные модели формирования внутренней структуры: модель неустойчивости Рэля-Тэйлора, модель отталкивающихся зарядов и модель теплопроводности. Первые две модели имеют существенные недостатки, которые приводят к тому, что данные модели могут качественно описать процесс возникновения оптического пробоя и формирования внутренней структуры в оптическом волокне, однако их количественные параметры далеки от экспериментально полученных данных. Такая сложность обуславливается мультидисциплинарностью задачи, где необходимо рассматривать целостную постановку, применяя вместе методы, относящиеся к различным разделам науки, таким как термодинамика, физическая химия, физика плазмы и т.д. В модели теплопроводности реализована наиболее целостная модель, в основу которой легли изменение показателя преломления из модели самофокусировки, зависимость показателя преломления от коэффициента поглощения излучения из модели тепловой линзы и увеличение электропроводности волокна из модели, основанной на реакции фотозамещения. Отличие от последней модели заключается в том, что предлагают сконцентрировать внимание не на условной энергетической поверхности системы $SiO + O$, которую определяет реакция фотозамещения, а на высвободившихся в этой реакции свободных электронах. В таком случае расчет упрощается, а результаты хорошо согласуются с экспериментальными измерениями времени возникновения пробоя, его пороговой мощности и др. К недостаткам можно отнести то, что в расчётах эффект плавления инициируется локальным нагревом, имитирующим дуговой разряд, в середине исследуемого отрезка волокна. При том, что современные экспериментальные работы показывают, что наиболее надежным способом инициирования является метод соприкосновения торца волокна с инициатором.

В пункте 1.3 кратко описаны современные экспериментальные исследования, описывающие условия возникновения оптического пробоя, влияния оптической мощности на скорость движения плазменного очага и процесс формирования внутренней структуры. Экспериментальные работы академика Е.М. Дианова показывают влияние плотности мощности оптического излучения на скорость движения, которая при увеличении плотности мощности до $3,5 \text{ Вт/мкм}^2$ растет от 1 до 11 м/с. Зафиксированные Диановым экспериментальные значения максимальной температуры плазменной искры варьируются в пределах $5500 - 10500 \text{ К}$ в зависимости от плотности мощности излучения. Уделено внимание работам, посвященным изучению механизмов формирования отдельных микрополостей, а также выделены факторы, влияющие на поведение плазменного очага, распространяющегося по оптическому волокну. Выявлено, что размеры, квазипериодической внутренней структуры оптического волокна зависят размеров и скорости движения плазменного очага. Стоит отметить, что не было выявлено работ, которые бы

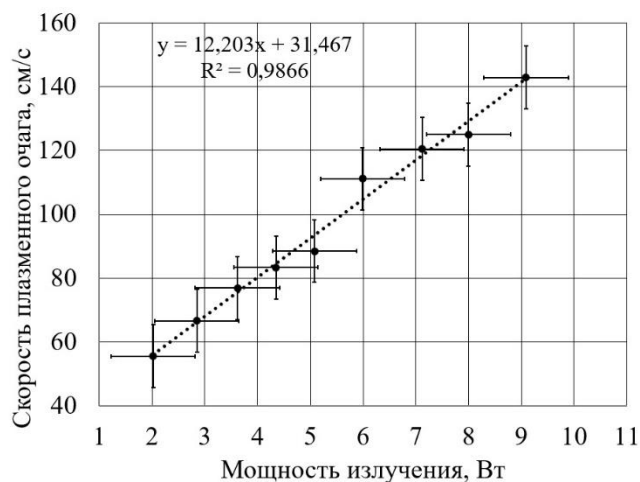


Рисунок 1 – Зависимость скорости плазменного очага от мощности излучения

показали влияние магнитного поля на плазменный очаг или влияние внутренней структуры на предел прочности оптического волокна.

В второй главе описываются результаты экспериментальных исследований влияния магнитного поля, которое воздействует на плазменную искру, во время ее распространения по оптическому волокну.

В пункте 2.1 приводится исследование влияния оптической мощности на оптический пробой, возникающий на торце оптического волокна. В рамках исследования проведено измерение скорости распространения плазменного очага, который формируется при соприкосновении торца волокна с поверхностью инициатора. Для этого была собрана экспериментальная установка, состоящая из волоконно-оптического лазера YFL-1100, выходной конец которого соединялся с оптическим волокном SMF-28e. В качестве инициатора использовалась металлическая пластина. Весь процесс фиксировался на высокочастотную камеру, а скорость рассчитывалась по последовательности кадров съемки как отношение смещения переднего засвеченного пикселя на каждом кадре относительно предыдущего за промежуток времени между кадрами. В результате была получена линейная зависимость скорости, показанная на рисунке 1. Выявлено, что значение пороговой мощности оптического пробоя для волокна SMF-28e составляет 1,3 Вт, при этом снижение оптической мощности замедляет плазменный очаг, и он полностью исчезает при мощности меньшей, чем 0,8 Вт. Этой мощности в условиях настоящего эксперимента недостаточно, чтобы инициировать оптический пробой, но она может поддержать уже возникшую плазменную искру.

В пункте 2.2 описывается исследование геометрии квазипериодической внутренней структуры, возникающей после прохождения плазменной искры по различным типам оптического волокна: одномодовом волокне с диаметром сердцевины 8,2 мкм и многомодовом с диаметром сердцевины 62,5 мкм. Для этого на экспериментальной установке, описанной в пункте 2.1, в волокнах различного типа был инициирован оптический пробой на торце волокна при одинаковых значениях выходной оптической мощности. Каждый образец волокна был разделен на 10 отрезков, на каждом из которых было измерено не менее 10 отдельных микрополостей с боковой и торцевой поверхности волокна. Для уменьшения потерь на границе раздела сред волокно помещалось в иммерсионный гель, чей показатель преломления идентичен показателю преломления сердцевины оптического волокна. Геометрия внутренней структуры измерялась с помощью металлографического микроскопа Olympus GX-51 в простом поляризованном свете с увеличением 50х. При исследовании выявлено, что при одинаковых условиях инициирования оптического пробоя в одномодовом волокне наблюдаются микрополости одинаковой формы, размера и периодичности, в то время как в многомодовом волокне структура состоит из повторяющихся блоков, состоящих из микрополостей разных форм и размеров. В одномодовом волокне диаметр и длина отдельных микрополостей составили $(2,7 \pm 0,5)$ мкм и $(6,9 \pm 0,7)$ мкм соответственно, а период $(13,2 \pm 0,7)$ мкм, в многомодовом волокне диаметр отдельных микрополостей составили $(3,4 \pm 0,5)$ мкм, длина повторяющихся блоков $(317,0 \pm 0,7)$ мкм соответственно, а период $(490,2 \pm 0,7)$ мкм. Погрешность определялась с помощью метода Стьюдента при надежности 95 %.

В пункте 2.3 приведено исследование влияния слабого и сильного магнитных полей на скорость движения плазменной искры и геометрию формируемой ею внутренней структуры. Экспериментальная установка состояла из волоконно-оптического лазера YFL-1100,

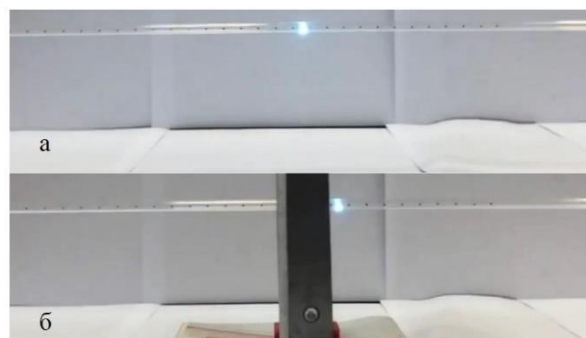


Рисунок 2 – Фотография плазменной искры через 5 секунд после инициирования: а) без постоянного магнита, б) с постоянным магнитом 0,6 Тл

отрезка оптического волокна SMF-28e, источника магнитного поля и металлической пластины, которая использовалась в качестве инициатора. Исследование проводилось совместно с лабораторией кинетических явлений Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН.

В качестве источника слабого магнитного поля использовался постоянный магнит с магнитной индукцией 0,6 Тл. По результатам измерения скорости в слабом магнитном поле обнаружилось, что в магнитном поле скорость плазменной искры уменьшается по сравнению со значением скорости, полученным без постоянного магнита. На рисунке 2 представлены фотографии плазменной искры через 5 секунд после иницирования оптического пробоя на торце волокна. На фотографии с постоянным магнитом, искра движется медленнее, что объясняется тем, что силы Лоренца, действующие на положительные ионы и отрицательные электроны, стремятся увеличить плазменную искру в поперечном размере, что приводит к тому, что часть энергии плазменной искры тратится на дополнительный прогрев сердцевины. В сильном магнитном поле измерения скорости не проводилось из-за особенностей оборудования для эксперимента.

В качестве источника сильного магнитного поля использовалась ЯМР-спектрометр Bruker Ultrashield 500 MHz WB Plus Solid State NMR, представленный на рисунке 3. Отрезок волокна размещался на п-образном держателе внутри ячейки ядерного магнитного резонатора Cryostat cf1200 spez (ЯМР) которая представляет собой металлический полый цилиндр. Далее ячейка помещалась в ЯМР-спектрометре, таким образом, чтобы верхняя часть П-образного держателя находилась между полюсами электромагнита с магнитной индукцией 11,7 Тл. Концы исследуемого волокна выводились через крышку ячейки. Один из концов волокна с помощью оптической розетки соединялся с выходным коннектором волоконного оптического лазера. Другой конец подводился к измерителю мощности Ophir NOVA II для определения выходной оптической мощности.

Схема экспериментальной установки, где римскими цифрами выделены области различного воздействия магнитного поля на движущуюся плазменную искру представлена на рисунке 4. Инициация плазменной искры происходит в области I, где магнитное поле ЯМР отсутствует. В области II искра движется в неоднородном магнитном поле ЯМР, причем величина магнитной индукции растет. В области III можно полагать магнитное поле однородным, магнитная индукция достигает максимального значения 11,7 Тл. В области IV искра вновь движется в неоднородном магнитном поле ЯМР, причем магнитная индукция уменьшается.

Далее из каждой области воздействия магнитного поля отбиралось 5 образцов оптических волокон. Каждый образец делился на десять равных частей, в каждом из которых измерялись геометрические параметры пяти отдельных полостей с боковой и торцевой поверхности волокна. Результаты измерений представлены в таблице 1, где стрелками указано увеличение (зеленая стрелка вверх) или уменьшение (красная стрелка вниз) размеров



Рисунок 3 – Фотография экспериментальной установки

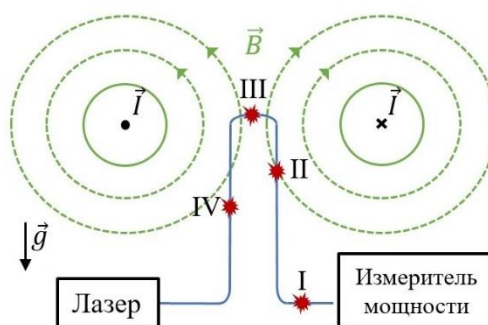


Рисунок 4 – Схема экспериментальной установки

микрополостей по сравнению с аналогичными параметрами вне магнитного поля ЯМР. Погрешность вычислялась методом Стьюдента при надежности 95 % и составила до 0,09 мкм. В неоднородном магнитном поле (области II и IV) возникает изменение поперечных размеров полости до 7 %, и продольных до 9 % в зависимости от направления распространения плазменной искры. Если направление движения и сила тяжести совпадают, то продольный размер микрополости увеличивается, если нет – уменьшается. В однородном магнитном поле (область III) происходит увеличение продольных размеров микрополости до 7 %, но поперечные размеры уменьшаются на 7 %. Это происходит из-за расщепления микрополости на две неравные части: основная на оси волокна и дополнительная микрополость-спутник. Дополнительная микрополость-спутник, представленная на рисунке 5, впервые зафиксирован автором настоящей работы. Он располагается на расстоянии $\approx 1,80$ мкм от основной микрополости, которая находится на оси волокна. Диаметр дополнительной микрополости-спутника составляет примерно 0,78 мкм. Результаты второй главы опубликованы в работе [1, 9].

Таблица 1 – Результаты измерений

Области	I	II	III	IV
d , мкм	2,49	2,66 ↑	2,47 ↓	2,67 ↑
L , мкм	6,75	6,34 ↓	7,23 ↑	7,34 ↓
P , мкм	12,1	11,9 ↓	12,4 ↑	12,0 ↓



Рисунок 5 – Фотография торцевого скола с основной и дополнительной микрополостями

В третьей главе исследуется предел прочности одномодовых оптических волокон в полиимидном и акрилатном защитных покрытиях с квазипериодической внутренней структурой и без нее.

В пункте 3.1 описаны основные механизмы разрушения оптического волокна, используемая при этом статистика Вейбулла и методы определения предела прочности.

В пункте 3.2 предел прочности волокна измерялся методом двухточечного изгиба на установке FiberSigma. Схема установки представлена на рисунке 6. Всего было исследовано по 14 образцов волокон с внутренней структурой и 14 образцов волокон без внутренних повреждений для каждой скорости нагружения: 10, 85, 630 и 3000 мкм/с. Результаты измерений представлены в таблице 2, где Δ - разность пределов прочности волокна до и после формирования структуры из микрополостей.

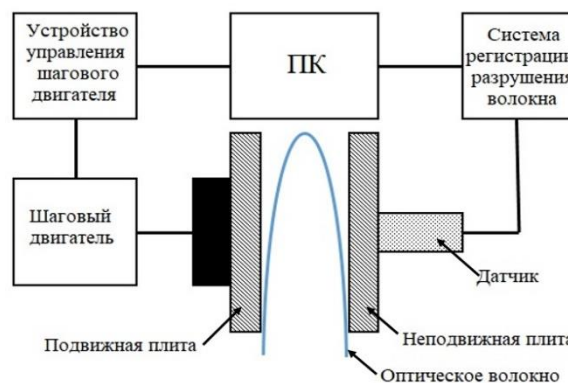


Рисунок 6 – Схема экспериментальной установки измерения прочности волокна методом двухточечного изгиба

Таблица 2 – Результаты измерений предела прочности методом двухточечного изгиба

Скорость нагружения, мкм/с	Минимальные значения предела прочности, ГПа					
	Полиимид до	Полиимид после	Δ	Акрилат до	Акрилат после	Δ
10	5,50	4,96	0,54	5,72	5,28	0,44
85	6,03	6,03	0,00	6,16	5,70	0,46
630	6,49	6,04	0,45	6,62	6,17	0,45
3000	6,90	6,39	0,54	6,94	6,43	0,51

По результатам исследования предел прочности уменьшается в среднем на 0,4 ГПа или 5-8 % для обоих видов защитного покрытия при максимальной скорости нагружения по сравнению с результатами неповрежденных волокон. Это позволяет предположить, что оптический пробой в кварцевом волокне не приводит к значительным изменениям механических свойств защитных покрытий.

В пункте 3.3 предел прочности волокна измерялся методом осевого растяжения на установке MTS Exceed E.42. Схема установки представлена на рисунке 7. Всего было исследовано по 14 образцов волокон с внутренней структурой и 14 образцов волокон без внутренних повреждений для каждого значения скорости нагружения: 10, 50, 100 и 500 мкм/с т.е. 226 образцов оптического кварцевого волокна длиной около 1 м. Результаты исследования предела прочности представлены в таблице 3, где Δ - разность пределов прочности волокна до и после формирования структуры из микрополостей.

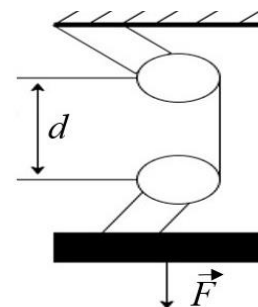


Рисунок 7 – Схема экспериментальной установки измерения прочности волокна методом осевого растяжения

Таблица 3 – Результаты измерений предела прочности методом осевого растяжения

Скорость нагружения, мкм/с	Минимальные значения предела прочности, ГПа					
	Полиимид до	Полиимид после	Δ	Акрилат до	Акрилат после	Δ
10	4,16	1,20	2,96	5,11	3,83	1,28
50	4,40	1,20	3,20	5,33	3,95	1,38
100	4,45	1,07	3,38	5,46	4,02	1,44
500	4,99	0,84	4,15	5,79	4,09	1,70

По результатам исследования предел прочности волокна в акрилатном покрытии уменьшился на 1,3-1,7 ГПа или 26-30 %, а волокна в полиимидном покрытии на 2,9-4,2 ГПа или 72-83 % по сравнению с результатами неповрежденных волокон. Таким образом, волокно в акрилатном покрытии с механической точки зрения остается пригодным для эксплуатации, так как предел прочности соответствует ГОСТ, а волокно в полиимидном покрытии – нет.

Результаты третьей главы опубликованы в работах [2, 7, 9].

В четвертой главе рассматривается процесс возникновения плазменного очага на торце оптического волокна при соприкосновении с поверхностью инициатора. Из-за того, что этот процесс происходит стремительно и локализован в области сердцевины оптического волокна, его сложно исследовать экспериментально, но можно исследовать с помощью математического моделирования.

В пункте 4.1 разработана тепловая математическая модель процесса возникновения оптического пробоя в оптическом волокне, вызванного идеальным контактом торца оптического волокна с поверхностью инициатора, расчетная область которой представлена на рисунке 8. Все домены в модели выполнены из различных материалов. Модель основана на уравнении теплопроводности в цилиндрических координатах:

$$\rho_i c_{pi} \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(k_i \text{grad} T) + Q, \quad (1)$$

где $i = 1, 2, 3, 4$ – номер домена в расчетной области, ρ_i – плотности материалов, кг/м³,

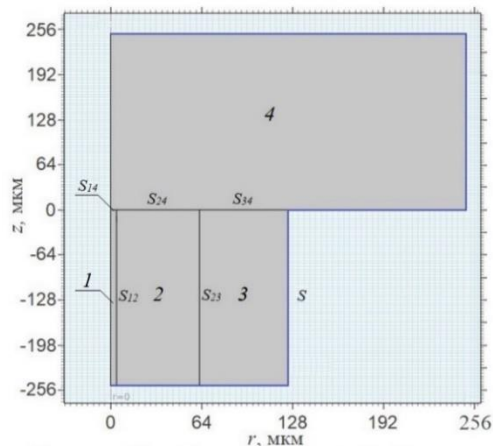


Рисунок 8 – Схема расчетной области: 1 – сердцевина, 2 – оболочка волокна, 3 – защитное покрытие, 4 – инициатор

c_{pi} – удельные теплоемкости материалов, Дж/(кг·К), k_i – теплопроводности материалов, Вт/(м·К), Q – источник тепла, Вт/м³.

На границах S_{12} , S_{14} , S_{23} , S_{24} , S_{34} соприкасающихся доменов расчетной области применяются условия сопряжения или баланса тепловых потоков. Начальная и окружающая температуры волокна и металлической пластины полагаются равными $T_0 = 293$ К. Внешняя граница расчетной области S считалась идеально теплопроводной, и на ней задавалась температура окружающей среды.

Последнее слагаемое уравнения теплопроводности Q описывает тепловыделение, которое возникает из-за взаимодействия оптического излучения, распространяющегося по волокну, с границей контакта торца волокна и металлической пластиной. Интенсивность теплового источника рассчитывается по формуле:

$$Q = \alpha \frac{P}{A_{eff}} \cdot \Gamma, \quad (2)$$

где $\alpha = (\alpha_0 + \alpha_e)$ – коэффициент поглощения волокна, м⁻¹, P – вводимая мощность излучения, Вт, Γ – стандартное распределение Гаусса, A_{eff} – эффективная площадь модового пятна, м².

Коэффициент поглощения α представляет собой сумму коэффициента поглощения при нормальных условиях $\alpha_0 \approx 1$ м⁻¹ при температурах близких к 293 К и коэффициента поглощения электронного газа α_e , появившегося при температуре выше 1273К. Нелинейное поглощение вызвано термической ионизацией соединения GeE' и приводит к возникновению электронного газа. В волокне, легированном германием 4 мол %, концентрация электронного газа вычисляется следующим образом:

$$n_e = n_p \exp\left(-\frac{E_f}{k_B T}\right), \quad (3)$$

где $E_f = 2,5$ эВ – энергия формирования иона GeE', $n_p = 1,72 \cdot 10^{21}$ см⁻³ – концентрация дефектов GeE' при нормальной температуре, k_B – постоянная Больцмана. Коэффициент поглощения излучения электронным газом в формуле (2) будет равен:

$$\alpha_e = \frac{k_0 \cdot n_1}{\sqrt{2}} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\mu_0 c_0 \sigma}{k_0 n_1^2}\right)^2} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \sim \frac{\mu_0 c_0 \sigma}{2n_1} = \frac{\mu_0 c_0}{2n_1} e \mu_e n_p \exp\left(-\frac{E_f}{k_B T}\right), \quad (4)$$

где n_1 – коэффициент преломления в сердцевине, μ_0 – магнитная постоянная, c_0 – скорость света в вакууме, k_0 – волновое число в вакууме, μ_e – это дрейфовая подвижность электронов, она варьируется от 7 до 63 см²/В·с, расчетах эта величина полагалась равной 50 см²/В·с, e – модуль заряда электрона, концентрация электронов $n_e = n_{GeE'}$.

Эффективная площадь модового пятна в (2), рассчитывается с помощью эффективного радиуса для каждой из длин волн:

$$A_{eff} = \pi a^2 \left(0,65 + \frac{1,619}{V^{3/2}} + \frac{2,879}{V^6} \right)^2 \quad (5)$$

где a – радиус сердцевины волокна, V – нормированная частота излучения.

Была исследована сходимость результатов при увеличении количества сеточных элементов. На рисунке 9 приведена зависимость максимальной температуры T_{max} , которая достигается в волокне с излучением 2 Вт через одну

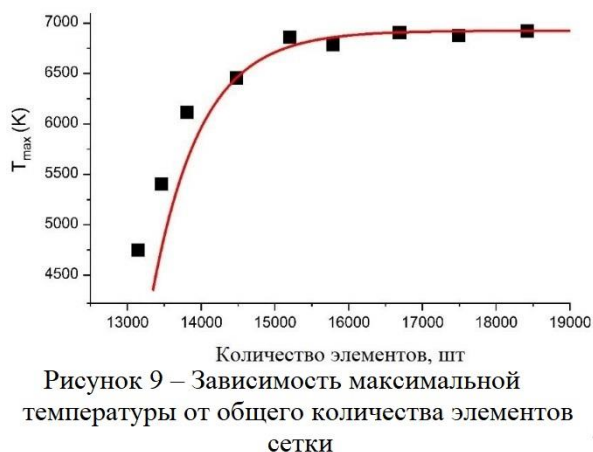


Рисунок 9 – Зависимость максимальной температуры от общего количества элементов сетки

физическую миллисекунду, от количества сеточных элементов в расчетной области. Решение сходится к значению $T_{\max} \approx 6700$ К, что совпадает с экспериментальными исследованиями Дианова Е.М, при этом общее количество элементов расчетной сетки превышает 15 000. Максимальный и минимальный линейные размеры ячейки сетки составили соответственно 2,5 мкм и 0,03 мкм, что позволяет проводить вычисления в рамках приближения сплошной среды.

Далее были определены границы температурных фронтов, соответствующих областям, где возможно возникновение различных фазовых состояний кварцевого стекла, а именно: жидкое, газообразное и плазма. Пример температурного поля для излучения с длиной волны $\lambda_0 = 1125$ нм через промежуток времени 1 мс после ввода излучения представлен на рисунке 10. В результате расчетов при идеальном контакте с инициатором исследованы следующие выходные параметры: времена возникновения области плазмообразования, ее размеры и форма, скорости движения температурных фронтов в волокне и пороговая мощность оптического пробоя. В качестве внешних факторов изменялись длина волны, оптическая мощность излучения, различные материалы инициатора и их теплофизические свойства.

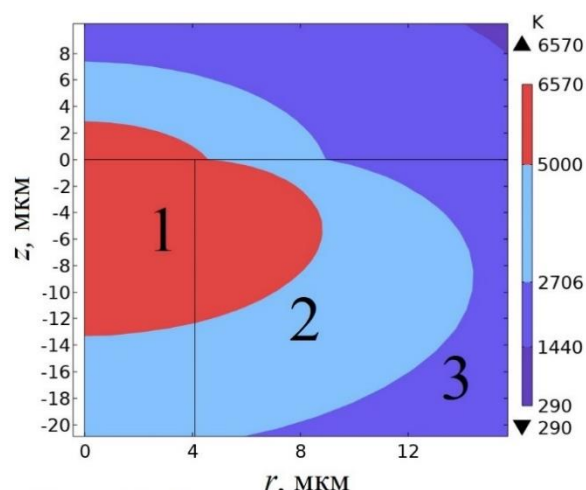


Рисунок 10 – Распределение температурного поля вблизи области контакта волокна с инициатором: 1 – область плазменного состояния кварцевого стекла, 2 – область газообразного состояния кварцевого стекла, 3 – область жидкого состояния кварцевого стекла

Время возникновения плазмы составило 0,7-1,2 мкс, пороговая мощность оптического пробоя – 270-630 мВт для длин волн излучения в диапазоне 1080-2050 нм. Наименьшие результаты для времени возникновения и пороговой мощности оптического пробоя были получены при инициаторе из дерева, что объясняется наименьшим коэффициентом теплопроводности.

В пункте 4.2 описана тепловая математическая модель процесса возникновения оптического пробоя в волокне, вызванного его неидеальным контактом с инициатором. Для этого в модель идеального контакта между волокном и инициатором и вокруг них была добавлена область, заполненная воздухом.

Тепломассоперенос воздуха описывался уравнениями:

1. уравнение движения:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + g \beta T \vec{\gamma}; \quad (6)$$

2. уравнение теплопереноса:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T = \chi \Delta T \quad (7)$$

3. уравнение непрерывности:

$$\text{div } \vec{v} = 0, \quad (8)$$

где t – время, с; \vec{v} – вектор скорости, м/с; T – температура, К; g – ускорение свободного падения, м/с², $\vec{\gamma}$ – единичный вектор, направлен вдоль оси Oz; ρ – плотность, кг/м³; ν – кинематическая вязкость, м²/с; χ – коэффициент теплопроводности, м²/с; β – коэффициент объемного расширения, К⁻¹.

В модели учитывалось тепловое излучение от оптического волокна и инициатора. Принималось, что и волокно, и инициатор поглощают все падающее на них электромагнитное излучение, т.е. являются абсолютно черным телом. Зависимость плотности потока собственного излучения абсолютно черного тела от абсолютной температуры рассчитывается по закону Стефана-Больцмана:

$$E_0 = \varepsilon_0 \sigma_0 (T_1^4 - T_2^4), \quad (9)$$

где $\varepsilon_0 = 1$ – интегральная степень черноты; $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана; T_1^4 – температура более нагретого тела, К; T_2^4 – температура менее нагретого тела, К.

При исследовании сходимости результатов с увеличением количества сеточных элементов решения выяснилось, что решение сходится к значению $T_{\max} \approx 6400$ К при общем количестве элементов расчетной сетки более, чем 32 000. При таком количестве сеточных элементов максимальный и минимальный линейные размеры ячейки сетки составили соответственно 3 мкм и 0,08 мкм. Применение уравнений сплошной среды для движения воздуха считается корректным, т.к. согласно расчетам, в ячейке минимального размера помещается не менее 280 молекул газа.

В результате расчетов были получены температурные поля оптического волокна, инициатора и воздуха и поле скорости воздуха между волокном и инициатором и вокруг них. Примеры температурного поля и поля скоростей для излучения с длиной волны $\lambda_0 = 1125$ нм и мощностью $P = 1$ Вт через промежуток времени 1 мс после ввода излучения для воздушного зазора 10 мкм приведены на рисунках 11 и 12 соответственно.

Сравнение характерных времен возникновения плазменного очага, его размеры и пороговая мощность оптического пробоя в результате расчета с идеальным и неидеальным контактом приведены в таблице 4. Расчётное значение пороговой мощности 0,4 Вт меньше полученного экспериментального значения данного параметра

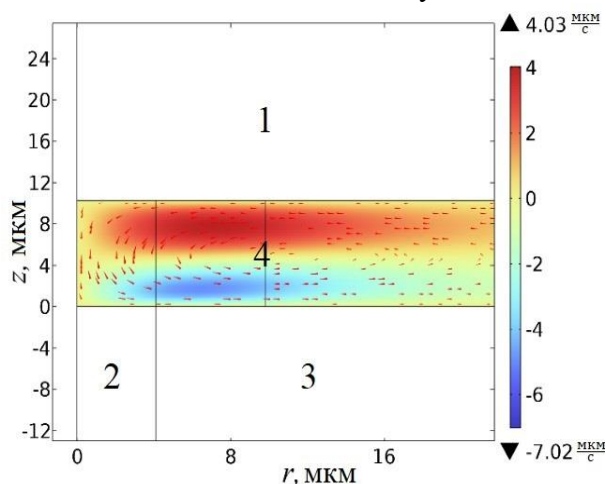


Рисунок 12 – Распределение поля скоростей вблизи области контакта волокна с инициатором:

1 - инициатор, 2 - сердцевина волокна, 3 - оболочка волокна, 4 - воздушный зазор

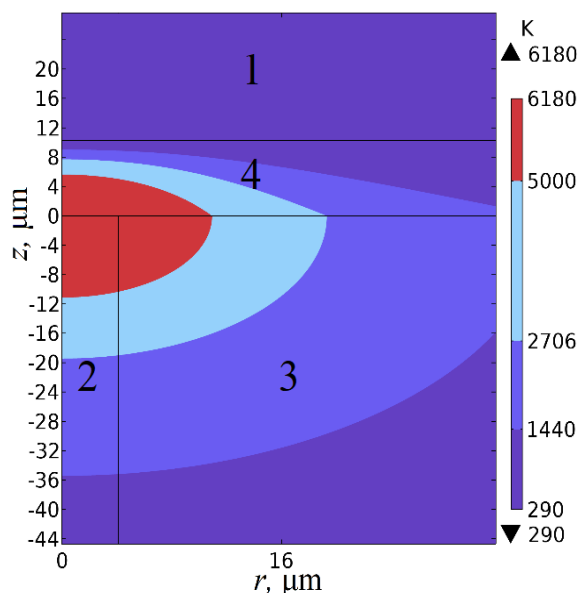


Рисунок 11 – Распределение температуры вблизи области контакта волокна с инициатором:

1 – инициатор, 2 – сердцевина волокна, 3 – оболочка волокна, 4 – воздушный зазор

1,3 Вт (см. главу 2) более, чем в 3 раза. Это можно объяснить несовпадением условий экспериментального и численного моделирования, а также несовершенством математической модели. Предполагается, что значительную роль сыграли неидеальный контакт волокна с инициатором, шероховатая поверхность инициатора и отсутствие прецизионной механики для установки и перемещения инициатора. Необходимо отметить, что в экспериментах С. Тодороки пороговая мощность составила 0,4 Вт для аналогичного волокна и оптического излучения, что позволяет использовать модель для прогнозирования экспериментов.

Таблица 4 – Сравнение результатов идеального и неидеальной контакта

Контакт инициатора и волокна	Размер зазора, мкм	t_0 , мкс	t_1 , мкс	t_2 , мкс	r_{\max} , мкм	z_{\max} , мкм	$P_{\text{пор}}$, мВт
Идеальный	0	0,17	0,73	2,14	9	13	270
Неидеальный	11,25 с тепломассопереносом	0,99	2,42	нет	нет	нет	410
	11,25 без тепломассопереноса	0,98	2,40	нет	нет	нет	410

Время возникновения плазмы составило 2,4 мкс, пороговая мощность оптического пробоя 410 мВт для длины волны излучения 1125 нм. Значения рассчитанных параметров в задаче с неидеальным контактом с учетом теплопереноса слабо отличается от значений, полученных без его учета. Следовательно, конвективный массоперенос слабо отводит тепло по сравнению с другими механизмами теплопереноса.

Результаты четвертой главы опубликованы в работах [3-6, 8].

В разделе «Перспективы развития и использование результатов» описаны дальнейшие направления исследования оптического пробоя. Они включают в себя разработку технологий формирования внутриволоконных структур с помощью оптического пробоя. На основе данной технологии могут быть созданы высокотемпературные и химически стойкие волоконные датчики, которые можно использовать при бурении скважин, разведке месторождений полезных ископаемых и других процессах горно-нефтяной промышленности. Также можно создавать комбинированные устройства, включающие в себя, например, датчик температуры и волоконный рассеиватель для применения в медицинских задачах.

Основные результаты диссертации.

1. Экспериментально получена линейная зависимость скорости распространения плазменного очага от мощности вводимого оптического излучения для значений оптической мощности, превышающей пороговое значение пробоя.
2. Выявлено, что при одинаковых условиях инициирования оптического пробоя в одномодовом волокне наблюдаются микрополости одинаковой формы, размера и периодичности, в то время как в многомодовом волокне структура состоит из повторяющихся блоков, состоящих из микрополостей разных форм и размеров. В одномодовом волокне диаметр и длина отдельных микрополостей составили $(2,7 \pm 0,5)$ мкм и $(6,9 \pm 0,7)$ мкм соответственно, а период $(13,2 \pm 0,7)$ мкм, в многомодовом волокне диаметр отдельных микрополостей составил $(3,4 \pm 0,5)$ мкм, длина повторяющихся блоков $(317,0 \pm 0,7)$ мкм соответственно, а период $(490,2 \pm 0,7)$ мкм.
3. Выявлено, что в результате оптического пробоя в одномодовом волокне полностью теряются волноводные свойства волокна, а в многомодовом – частично.
4. Показано, что магнитное поле влияет на плазменный очаг и структуру из микрополостей, которая возникает в волокне после ее прохождения. Слабое магнитное поле величиной 0,6 Тл влияет на скорость движения плазменной искры, замедляя ее на 14 % по сравнению с измерениями вне магнитного поля постоянного магнита. Сильное магнитное поле величиной 11,6 Тл приводит к изменению размеров отдельных микрополостей:
 - продольные размеры изменялись до 9 % в зависимости от направления распространения плазменной искры относительно векторов магнитной индукции и ускорения свободного падения.

- поперечные размеры изменялись в зависимости от величины магнитной индукции и структуры поля: в неоднородном магнитном поле увеличиваются на 5-7 %, в однородном уменьшаются на 1-2 % из-за расщепления микрополости.
5. Зафиксировано, что после прохождения плазменной искры по волокну в области сильного магнитного поля микрополости разделяются на две неравные части. Данный эффект был впервые описан автором настоящей диссертации. Дополнительная микрополость-сателлит диаметром примерно 0,78 мкм или 28% от диаметра основной полости располагается на расстоянии примерно 3-4 мкм от оси волокна.
 6. Экспериментально исследован предел прочности одномодовых оптических волокон в полиимидном и акрилатном защитных покрытиях с внутренней структурой из микрополостей, полученной после прохождения плазменной искры методами двухточечного изгиба и методом осевого растяжения:
 - При измерении методом двухточечного изгиба предел прочности изменяется примерно на 8 % для обоих видов защитного покрытия, что говорит о том, что оптический пробой, распространяясь по оптическому волокну, оставляет защитное покрытие практически неповрежденным, не добавляя дополнительных микродефектов в его структуре.
 - При измерении методом осевого растяжения снижение предела прочности оптического волокна составило: 72-83 % для волокна в полиимидном покрытии и 26-30 % для волокна в акрилатном покрытии. Волокно в акрилатном покрытии с механической точки зрения остается пригодным для эксплуатации, волокно в полиимидном покрытии – нет.
 7. Разработаны две тепловые математические модели, описывающие процесс возникновения оптического пробоя в оптическом волокне при его идеальном и неидеальном контакте с инициатором. Обе модели основаны на уравнении теплопроводности с учетом тепловыделения, происходящего при взаимодействии оптического излучения с границей контакта торца волокна и инициатора. При разработке моделей учитывались физические свойства волокна: его числовая апертура, показатель преломления сердцевины и оболочки, размер и форма модового пятна; оптические свойства излучения: длина волны, оптическая мощность; теплофизические свойства инициатора: коэффициент теплопроводности, плотность материала и коэффициент теплоемкости. В задаче с неидеальным контактом волокна и инициатора учитывались конвективный теплоперенос воздуха, перенос тепла излучением и теплопроводность. По результатам численных исследований:
 - выявлено, что при идеальном контакте инициатора и волокна время возникновения плазмы в волокне составило 0,7-1,2 мкс, пороговая мощность оптического пробоя – 270-630 мВт для длин волн излучения в диапазоне 1080-2050 нм;
 - выявлено, что при неидеальном контакте время возникновения плазмы составило 2,4 мкс, пороговая мощность оптического пробоя – 410 мВт для длины волны излучения 1125 нм, что совпадает с экспериментальными результатами С. Тодороки;
 - получены зависимости характерных времен (время возникновения плазмы в волокне и время оптического пробоя), размеров и форм плазменного очага, пороговой мощности оптического пробоя от материала инициатора и его теплофизических свойств; показано, что наибольшее влияние оказывает коэффициент теплопроводности;
 - доказано, что теплоперенос в зазоре между инициатором и торцом волокна слабо отводит тепло по сравнению с теплопроводностью и тепловым излучением.

Список основных публикаций автора по теме диссертации

В рецензируемых изданиях, индексируемых в базах данных Scopus, Web of Science или RSCI:

1. Konin Y.A., **Shcherbakova V.A.**, Perminov A.V., Petukhova A.Y. Study of micro-cavities formed by optical breakdown under the influence of a magnetic field // Optics Communications. 2022. Т. 517. С. 128242.
2. Konin, Y.A., **Scherbakova, V.A.**, Bulatov, M.I., Malkov, N.A., Lucenko, A.S., Starikov, S.S., Petrov, A.A. Structural characteristics of internal microcavities produced in optical fiber via the fuse effect // Journal of Optical Technology. 2021. Т. 88. №. 11. С. 672-677.
3. **Starikova V.A.**, Konin Y.A., Petukhova A.Y., Aleshkina S.S., Petrov A.A., Perminov A.V., Mathematical Model of Fuse Effect Initiation in Fiber Core // Algorithms. 2023. Т. 16. №. 7. С. 331.
4. **Старикова В.А.**, Перминов А.В. Влияние материала инициатора на процесс возникновения оптического пробоя в оптическом волокне // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 10. С. 853–866.

В рецензируемых изданиях перечня ВАК, соответствующих заявленной специальности:

5. **Старикова В.А.**, Конин Ю.А., Петухова А.Ю., Перминов А.В. Математическое моделирование температурных полей при пробое оптического волокна // Вестник Пермского университета. Физика. 2024. №. 1. С.24-32.
6. **Старикова В.А.**, Перминов А.В. Оптический пробой волокна при неидеальном контакте с инициатором // Вестник Пермского университета. Физика. 2024. №. 4. С. 05-13.

В прочих рецензируемых изданиях перечня ВАК:

7. Конин Ю. А., **Щербакова В.А.**, Булатов М.И., Мальков Н.А., Луценко А.С., Стариков, С.С., Петров АА. Исследование характеристик оптического волокна с внутренней структурой микронеоднородностей, сформированной с помощью эффекта плавления // Оптический журнал. 2021. Т. 88. №. 11. С. 80-89.
8. **Старикова В.А.**, Петухова А.Ю., Конин Ю.А., Перминов А.В. Возникновение плазменной искры при оптическом пробое оптического волокна // Фотон-экспресс. 2023. №. 6. С.396-397.
9. Конин Ю.А, **Щербакова В.А.** Петухова А.Ю. и др. Способ изготовления волоконно-оптических рассеивателей излучения // Патент на изобретение №2021137590 от 26.09.2023 г.