

ОТЗЫВ

официального оппонента, д. ф.-м. н. Шандарова Станислава Михайловича на диссертацию **Стариковой Виктории Александровны «Исследование структур микрополостей в кварцевом оптическом волокне при оптическом пробое»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Явление оптического пробоя твердых тел, наблюдаемое в оптических волоконных световодах и в нелинейных кристаллах при распространении интенсивного лазерного излучения, существенно ограничивает возможности увеличения выходной мощности волоконных лазеров и эффективности нелинейных спектральных преобразователей, то есть является негативным эффектом. Информация о физической природе этого эффекта довольно противоречива, поэтому необходимы исследования, направленные на ее изучение. С другой стороны, реализуемая в некоторых случаях при оптическом пробое периодическая структура возмущений оптических свойств сердцевины кварцевых волоконных световодов может быть использована в качестве чувствительного элемента датчиков физических полей, основанных на явлениях рассеяния. Такие чувствительные элементы являются аналогом брэгговских решеток, но их физический принцип работы основан на отражении от стенок микрополостей. Структура из микрополостей в этом случае представляет собой интерферометр Фабри-Перо. В связи с изложенным выше считаю, что рассматриваемая диссертационная работа, имеющая своей целью определение факторов, влияющих на формирование структур микрополостей в кварцевом оптическом волокне в результате оптического пробоя, и влияния этих структур на свойства волокна, представляется весьма актуальной и имеющей значительные перспективы как для ее развития, так и для практического использования разработанных в ней подходов и полученных результатов.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, изложения основных результатов, а также небольшого дополнительного раздела и списка литературы из 165 наименований. Она изложена на 147 страницах машинописного текста, включающего 75 рисунков и 17 таблиц.

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи диссертационного исследования, отражаются сведения о научной новизне и о теоретической и практической значимости полученных результатов; дано описание методологии и методов исследования; сформулированы основные положения, выносимые на защиту; обсуждается достоверность полученных результатов; приведены сведения об апробации материалов диссертации, соответствии специальности, публикациях и личном вкладе автора; описывается ее структура и объем.

Первая глава посвящена обзору исследований, относящихся к эффекту оптического пробоя, реализуемого при использовании интенсивного лазерного излучения. Автором описаны основные модели возникновения оптического пробоя в диэлектрических материалах и рассмотрены некоторые подходы к анализу сопровождающего его процесса формирования квазипериодической структуры микрополостей в кварцевых волоконных световодах. Заметное внимание в обзоре

уделяется результатам экспериментальных исследований оптического пробоя в кварцевых волокнах, в том числе методам его инициирования, параметрам образующейся при этом плазменной искры, процессу формирования внутриволоконной структуры. Здесь также обращается внимание на работы, авторы которых рассматривают такие структуры как сенсорные элементы для определения температуры, силы растяжения, а также вязкости и показателя преломления жидкости. В конце главы В.А. Старикова обсуждает описанные результаты, где выделяет недостатки существующих моделей оптического пробоя и формулирует задачи, решаемые далее в оригинальных главах диссертационной работы.

Во **второй главе** автором представлены результаты экспериментального исследования оптического пробоя в стандартных одномодовом и многомодовом волоконных световодах и влияния на него постоянного во времени магнитного поля. Для одномодового оптического волокна при длине волны излучения 1125 нм с использованием инициатора пробоя получено, что скорость распространения генерируемого плазменного очага имеет линейную зависимость от мощности в диапазоне от 2 до 9 Вт и порядок величины 100 см/с. Проведенное далее изучение геометрии структур, возникающих после прохождения данного очага по волокну двух типов, показало, что при одинаковых условиях инициирования пробоя в одномодовом волокне наблюдаются периодическая картина микрополостей одинаковой формы и размера, в то время как в многомодовом световоде такая структура состоит из повторяющихся блоков, содержащих микрополости разных форм и размеров. Здесь автором также представлены оригинальные результаты по исследованию влияния магнитного поля на скорость движения плазменного очага и геометрию формируемых при этом внутренних структур. Следует отметить, что в результате В.А. Стариковой впервые зафиксирована генерация дополнительной микрополости-сателлита, располагающейся на расстоянии около 1,8 мкм от основной, находящейся на оси волоконного световода.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию предела прочности оптического волокна со структурой из микрополостей, созданной в результате оптического пробоя. С использованием метода двухточечного изгиба показано, что оптический пробой не приводит к возникновению дополнительных дефектов в защитных покрытиях как полиимидного, так и акрилатного типов, для изученных автором волоконных световодов. При испытании методом осевого растяжения автором наблюдалось снижение прочности после пробоя, для оптических волокон с покрытиями обоих типов. Однако, если волокно с акрилатным покрытием еще остается пригодным для эксплуатации, то при полиимидной защитной оболочке оно уже не может быть использовано в качестве световода.

В **четвертой главе** представлены результаты проведенного автором математического моделирования оптического пробоя волоконных световодов. В.А. Стариковой разработаны математические модели тепловых процессов возникновения оптического пробоя, вызванного идеальным и неидеальным контактом торца оптического волокна с поверхностью инициатора. В расчетах на их основе учитывались волноводные свойства волокна, числовая апертура, показатели преломления сердцевины и оболочки, размер и форма модового пятна. Было уделено внимание анализу сходимости результатов и показано,

что полученный в результате минимальный размер ячейки расчетной сетки позволяет пользоваться приближением сплошной среды. По результатам математического моделирования определены границы температурных фронтов, соответствующие жидкому, газообразному и плазменному состоянию кварцевого стекла; определен промежуток времени возникновения оптического пробоя для излучения с различными длинами волн. Было получено, что при минимальных мощностях излучения время инициирования плазменного очага для различных длин волн оказывается примерно одинаковым и близким к значению 1 мс. Автором также обсуждаются вопросы, связанные с влиянием параметров инициатора на пороговую мощность оптического пробоя, что может дать дополнительную информацию о физических механизмах его возникновения.

В качестве **заключения** в диссертации приводится перечень ее основных результатов и небольшой по объему раздел **Перспективы развития и использования результатов**, в котором обращается внимание на возможность реализации волоконных сенсоров на основе регулярных и периодических структур, формирующихся в волоконных световодах при оптическом пробое.

Новизна полученных результатов, научных положений, выводов и рекомендаций

Все основные результаты работы, сделанные по ним выводы и рекомендации, а также выносимые на защиту научные положения, являются новыми. Среди наиболее значимых результатов, полученным в ходе проведенного В.А. Стариковой диссертационного исследования, представляется целесообразным отметить следующие:

- экспериментально исследована геометрия квазипериодической внутренней структуры оптического волокна, полученная в результате оптического пробоя, при движении плазменного очага в магнитном поле;
- зафиксировано изменение геометрических параметров отдельных микрополостей в сердцевине оптического волокна и расщепление квазипериодической структуры под действием магнитного поля, с появлением дополнительной микрополости-сателлита, располагающейся на расстоянии около 1,8 мкм от основной, находящейся на оси волоконного световода;
- разработаны основанные на эффектах теплопроводности математические модели инициации оптического пробоя на торце волоконного световода, позволившие выявить влияние длины волны и мощности излучения, а также профиля показателя преломления для коммерчески доступного оптического волокна SMF-28e, на пороговую мощность данного эффекта, а также на характерные времена, скорости движения и размеры плазменного очага.

Достоверность полученных результатов, научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректным использованием автором современных представлений о методах экспериментальных исследований и математического моделирования в области оптического материаловедения и волоконной оптики; применением передовых апробированных экспериментальных методик и паспортизированной аппаратуры; согласием данных автора, полученных математическим

моделированием, с результатами других исследователей и с собственными экспериментальными данными.

Теоретическая и практическая значимость полученных в работе результатов

Полученные результаты исследования представляют весомый вклад в физику обсуждаемых в диссертационной работе явлений и их применений в задачах волоконной оптики и оптического материаловедения. В частности, можно подчеркнуть теоретическую значимость изученных автором подходов к управляемому возникновению оптического пробоя при тепловом контакте с инициатором. С их использованием исследовано влияние параметров оптического излучения и оптического волокна, а также теплофизических свойств инициатора и наличия воздушного зазора, на возникновение оптического пробоя.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что ее результаты могут быть использованы при разработке и аппаратурной реализации измерительных систем на основе волоконных рассеивателей, датчиков и фильтров. В частности, это открывает возможности для создания комбинированных устройств, включающих в себя функционал датчика температуры и рассеивателя излучения.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, базируется на адекватном использовании предшествующих результатов, достаточном объеме корректных экспериментальных исследований и грамотном применении математического моделирования к анализу физических эффектов, наблюдаемых в кварцевых волоконных световодах при инициировании оптического пробоя.

В числе **недостатков диссертации** отмечу следующие.

1. Представленные в подразделе 2.2 результаты исследования геометрических параметров квазипериодической структуры микрополостей, создаваемых при оптическом пробое, являются недостаточно полными для оценки их использования в качестве рассеивателей и отражателей, аналогичных брэгговским решеткам. Судя по табл. 2.1, пространственный период структуры составляет 13,2 мкм, однако каков может быть ее продольный размер, как эти параметры зависят от длины волны и мощности инициирующего пробой оптического излучения? Какова амплитуда возмущений показателя преломления, имеют они преимущественно фазовый или амплитудный характер?
2. На рис. 4.17 и 4.18 представлены соответственно результаты расчетов для зависимостей от плотности инициатора времени релаксации фронта плазмообразования и пороговой мощности оптического пробоя, а на рис. 4.20 – зависимость этой мощности от коэффициента теплоемкости инициатора. В комментарии к рис. 4.18 автор сообщает, что все выходные параметры математической модели либо не зависят от плотности инициатора, либо зависят незначительно. На всех упомянутых рисунках не наблюдается регулярного поведения

рассчитываемых функций от аргумента, с их незначительными отклонениями от средних значений. Возможно, такое поведение связано с ошибками при проведении численных расчетов, и рассчитываемые функции реально следует аппроксимировать прямыми, параллельными оси абсцисс?

3. Текст диссертации содержит значительное количество опечаток, неудачных выражений и неточных сведений. Например, на стр. 14 автор сообщает, что «... открытие оптического пробоя в 1987 году было для физиков полнейшей неожиданностью». Ниже на этой же странице написано, что «Только после создания лазера с модулированной добротностью [100], работающего в режиме гигантского импульса, когда максимальные мощности достигают десятков мегаватт, и при достаточной фокусировке таких мощных лучей, впервые удалось наблюдать оптический пробой. Когда луч рубинового лазера, работающего в режиме гигантского импульса, пропустили через фокусирующую линзу, в воздухе в точке фокуса вспыхнула искра, как при обычном электрическом пробое разрядного промежутка. Об этом доложили на конференции в Париже в 1962 году П.Д. Мейкер (P.D. Maker), Р.В. Терхун (R.W. Terhune) и С.М. Сэвидж (C.V. Savage).».

Заключение

В диссертации последовательно излагаются все основные результаты, что позволило автору обосновать основные выводы и положения, выносимые на защиту. Рассматриваемая диссертационная работа является завершенным научно-исследовательским трудом, достойным претендовать на получение кандидатской степени по физико-математическим наукам. Она характеризуется **внутренним единством структуры**, основанным на последовательном рассмотрении методов экспериментального исследования и математического моделирования формирования структур микрополостей в кварцевых волоконных световодах в результате оптического пробоя. Полученные в ней результаты свидетельствуют об их соответствии поставленной цели и задачам.

Недостатки, отмеченные выше, не влияют на общую **положительную оценку работы**, которая выполнена на высоком научном и техническом уровне и вносит весомый вклад в физику обсуждаемых в ней явлений. Диссертация базируется на достаточном числе исходных данных, примеров и расчетов. Она аккуратно оформлена; по каждой главе и работе в целом сделаны выводы. Тема диссертационной работы соответствует паспорту специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния.

Текст диссертации соответствует как по содержанию, так и по качеству материалам, опубликованным автором в 9 работах, в том числе в 2-х статьях в журналах из перечня ВАК по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния, 4-х статьях в журналах, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, 1-м патенте на изобретение. Они неоднократно обсуждались на Российских и Международных конференциях и получили одобрение ведущих специалистов в области волоконной оптики.

Автореферат соответствует всем требованиям ВАК Минобрнауки РФ, правильно и полно отражая основное содержание диссертации.

В целом диссертационная работа Стариковой Виктории Александровны на тему «Исследование структур микрополостей в кварцевом оптическом волокне при оптическом пробое» полностью соответствует требованиям п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842 (ред. 25.01.2024) «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры электронных приборов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

 / Шандаров Станислав Михайлович

634050, Томская область
г. Томск, пр-т. Ленина, д. 40
тел. (3822) 41-38-87
e-mail: stanislav.m.shandarov@tusur.ru

Подпись Шандарова Станислава Михайловича заверяю:



Нач. общего отдела



/ С.В. Мощанская

«05» мая 2025 г.

Я, Шандаров Станислав Михайлович, даю согласие на включение персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

 / Шандаров Станислав Михайлович
«05» мая 2025 г.