

На правах рукописи



Пржиялковский Дмитрий Владимирович

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ
РЕШЁТОК МЕТОДОМ МНОГОПРОХОДНОЙ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ
ПОТОЧЕЧНОЙ ЗАПИСИ**

1.3.8 Физика конденсированного состояния

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН).

Научный руководитель: **Бутов Олег Владиславович**
доктор физико-математических наук,
заместитель директора по научной работе ИРЭ
им. В.А. Котельникова РАН.

Официальные оппоненты: **Кудряшов Сергей Иванович,**
доктор физико-математических наук, ведущий
научный сотрудник, заведующий лабораторией
лазерной нанофизики и биомедицины ФГБУН
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН.

Фотиади Андрей Александрович,
кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник, ФГБОУ ВО
«Ульяновский государственный университет».

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Федеральный
исследовательский центр «Институт общей
физики им. А.М. Прохорова Российской
академии наук».

Защита состоится « 20 » декабря 2024 г в 11 часов на заседании диссертационного совета 24.1.111.01 на базе ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН по адресу: 125009, Москва, ул. Моховая 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН <http://cplire.ru/rus/dissertations/Przhyalkovsky/index.html>

Автореферат разослан «___» _____ 2024 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.1.111.01
доктор физико-математических наук,
доцент, профессор РАН



Кузнецова
Ирен Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В последние десятилетия волоконные технологии находят всё большее применение в современной науке и технике. Актуальность использования данных технологий обуславливается их преимуществом в свете возрастающих потребностей в информационной емкости систем связи, растущими требованиями к высокоточным и распределенным сенсорным системам, лазерным технологиям.

Важным элементом волоконно-оптических систем является волоконная брэгговская решётка (ВБР) [1]. Благодаря своим уникальным свойствам ВБР и приборы на их основе находят широчайшее применение в современной телекоммуникации и системах связи, в области лазерных технологий, в системах контроля и мониторинга [2, 3]. Растущая популярность и широта применения ВБР показывает, что совершенствование методов создания волоконных брэгговских структур является важной научной и практической задачей.

Одной из перспективных технологий создания волоконных брэгговских структур является метод поточечной записи на основе фемтосекундного (ФС) излучения [4]. Совершенствование поточечных методов записи на основе ФС излучения, увеличение возможностей контроля технологического процесса получения волоконных брэгговских структур, изучение процессов, происходящих при создании ВБР, и неразрывно связанные с процессом записи свойства самих брэгговских решёток, являются предметом научного интереса данной работы.

Цели и задачи работы.

Настоящая диссертационная работа посвящена совершенствованию методов поточечной записи ВБР с помощью излучения фемтосекундного лазера, экспериментальному исследованию свойств получаемых структур и механизмов, лежащих в основе процесса записи.

Для достижения вышеуказанных целей в работе были поставлены следующие задачи:

1. Разработать многопроходную методику создания ВБР на основе схемы поточечной записи с целью увеличения возможностей контроля параметров ВБР, непосредственно в процессе записи.
2. Исследовать динамику изменения параметров ВБР при многопроходной схеме записи.
3. Исследовать влияние различных параметров записи на поведение спектральных характеристик, создаваемых брэгговских структур при многопроходной записи.
4. Исследовать поведение ВБР, созданных по предложенной схеме, при длительном высокотемпературном отжиге.
5. Изучить прочностные характеристики создаваемых волоконных брэгговских решёток

Научная новизна работы.

1. В рамках данной работы предложена и реализована новая многопроходная методика поточечной записи ВБР. Получен патент РФ на изобретение №2778978. Предложенная многопроходная методика записи позволяет использовать саму создаваемую брэгговскую решётку как датчик для исследования структурных изменений, что впервые было реализовано для методов направленной записи
2. Впервые исследована динамика изменения параметров ВБР в процессе многопроходной записи, на основе полученных данных сделаны выводы о природе взаимодействия излучения с материалом сердцевины световода при различных параметрах излучения фемтосекундного лазера
3. Проведены длительные термические испытания записанных ВБР, обнаружена немонотонная динамика эволюции параметров ВБР. Предложено качественное объяснение наблюдаемым эффектам.

4. Впервые обнаружено явление регенерации ВБР, полученных методом направленной записи в низколегированных германосиликатных волокнах с помощью фемтосекундного излучения без участия водорода в технологическом процессе.
5. Впервые исследованы прочностные характеристики ВБР в зависимости от энергии лазерных импульсов, используемых в процессе поточечной записи решеток.

Практическая значимость работы.

Предложенная и реализованная в рамках данной работы методика записи ВБР позволяет существенно расширить возможности контроля параметров непосредственно в процессе создания брэгговских структур, по сравнению с аналогичными методами их изготовления. Возможность осуществлять контроль процесса записи решёток *in situ* позволяет улучшить воспроизводимость параметров ВБР, увеличить точность попадания параметров в заранее обозначенные диапазоны значений, а также нивелировать или существенно снизить вклад случайных погрешностей и флуктуаций системы в процесс изготовления решёток. Предлагаемая схема является не только новым удобным средством производства высокоточных брэгговских структур с широкими возможностями контроля самого процесса, но и удобным инструментом научных изысканий, так как позволяет использовать саму создаваемую брэгговскую решётку как чувствительный элемент, фиксируя её параметры между итерациями записи, что впервые было реализовано для методов направленной записи.

Наблюдаемая динамика изменения спектральных характеристик ВБР при записи и термическом отжиге, данные о прочностных характеристиках позволяют сделать выводы о характере происходящих процессов, механизмах, ответственных за формирование и трансформацию брэгговских структур, оптимизировать характеристики получаемых ВБР в соответствии с условиями их эксплуатации. Полученные знания могут быть использованы не только для

улучшения и оптимизации технологии создания брэгговских структур, но и послужить основой новых разработок в области волоконной и интегральной фотоники.

Методология и методы исследования

Для записи брэгговских структур в настоящей работе использовалась специально разработанный универсальный экспериментальный комплекс на основе фемтосекундного лазера с модифицированной схемой управления излучением. Были созданы экспериментальные установки для проведения термических и механических испытаний ВБР. Методы экспериментального исследования образцов основывались на анализе их спектральных характеристик как в процессе их создания, так и в ходе внешнего механического и/или термического воздействия. Исследовались ВБР с различными характеристиками, записанные в волоконных световодах с различным составом сердцевины.

Положения, выносимые на защиту.

1. Предложенная методика многопроходной поточечной записи волоконных брэгговских решеток позволяет осуществлять контроль и корректировку параметров создаваемых брэгговских решёток, обеспечивая заранее заданную точность и воспроизводимость получаемых структур.
2. Изменения, вносимые в показатель преломления материала сердцевины волокна при записи по предложенной методике с помощью излучения фемтосекундного лазера, имеют комбинированный характер, т.е. присутствуют как положительные, так и отрицательные изменения показателя преломления.
3. При изотермическом отжиге волоконных брэгговских решеток, изготовленных в слаболегированном, не насыщенном водородом, германосиликатном волокне методом поточечной записи с помощью излучения фемтосекундного лазера наблюдается явление регенерации.

4. Механическая прочность брэгговских решеток, записанных поточечным методом с помощью излучения фемтосекундного лазера, имеет обратную зависимость от энергии импульсов записывающего излучения.

Степень достоверности и апробация работы.

Достоверность представленных в работе результатов обусловлена использованием широко известных методов спектральных исследований, термических и прочностных испытаний. В качестве контрольных образцов, с которыми проводилось сравнительное исследование ВБР, записанных по предложенной многопроходной методике, выступали образцы решеток, записанные «классическим» методом с использованием излучения лазера ультрафиолетового диапазона и фазовой маски. Полученные результаты не противоречат устоявшимся представлениям, приведенным в научной литературе, а дополняют их.

Результаты работы были представлены на отечественных и международных конференциях, среди которых: SPIE Optics + Optoelectronics Nonlinear Optics and Applications XII (2021), Всероссийская конференция по волоконной оптике ВКВО – 2021 (Пермь - 2021), Всероссийская конференция по волоконной оптике ВКВО – 2021 (Пермь - 2023), конференция-конкурс молодых учёных им. И.В. Анисимкина 16 (Москва - 2019), XI Международный семинар по волоконным лазерам (Новосибирск, академгородок – 2024), опубликованы в отечественных и международных рецензируемых изданиях, среди которых Applied Optics, Results in Physics, Optics & Laser Technology, Прикладная фотоника, Журнал Радиоэлектроники и в виде расширенных тезисов конференций (Proceedings of SPIE), Фотон Экспресс. Получен патент РФ на изобретение.

Основные результаты работы опубликованы в 10 работах, из них: 1 публикация в журналах, вошедших в Перечень изданий, рекомендованный ВАК, 1 публикация в журнале, входящем в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ), 4 публикации в зарубежных рецензируемых журналах,

входящих в Международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science, 4 публикации в трудах международных и российских конференций. Также за время выполнения диссертационной работы получен патент РФ RU 2778978.

Личный вклад диссертанта.

Данная диссертационная работа включает в себя результаты научной деятельности автора, проводимой в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН лаборатории «Оптоэлектронных и волоконно-оптических систем» №190. Планирование и постановка экспериментов, создание экспериментальных установок, получение экспериментальных данных, их обработка и интерпретация были осуществлены лично автором или при его непосредственном участии.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка условных обозначений и сокращений, списка литературы. Объём диссертации составляет 111 страниц. Диссертация включает в себя 26 рисунков, 2 таблицы и список цитируемой литературы, включающих 198 наименований.

Во введении обоснована актуальность исследуемой темы, сформулированы основные цели и задачи работы, показана научная новизна полученных результатов, их научная и практическая ценность, обсуждается методология и методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, обосновывается достоверность представленных результатов, их апробация, приведены данные о количестве опубликованных работ по теме диссертации и личном вкладе автора, представлена структура и объём работы.

В первой главе представлен обзор литературных данных касающихся истории и методик создания ВБР, приведена основная типология волоконных брэгговских решёток, актуальные на сегодняшний день модели и представления об эффектах и явлениях, лежащих в основе процесса записи. Также

представлены литературные данные касательно общепринятых моделей отжига ВБР, данные о воздействии температуры и деформации на брэгговские структуры, приведён обзор литературы по регенерированным решёткам. Рассматриваются вопросы прочностных характеристик волокна и ВБР.

Во второй главе представлен обзор предложенного поточечного метода создания волоконных брэгговских решёток на основе излучения фемтосекундного лазера и методов экспериментального исследования полученных образцов. **В разделе 2.1** дано описание новой методики многопроходной поточечной записи ВБР, схема экспериментальной установки, описан принцип её действия и отличия, выделяющие данную методику на фоне аналогов. Подобно описана схема синхронизации работы лазера и микропозиционеров, которая и лежит в основе предложенной многопроходной методики записи рис.1.

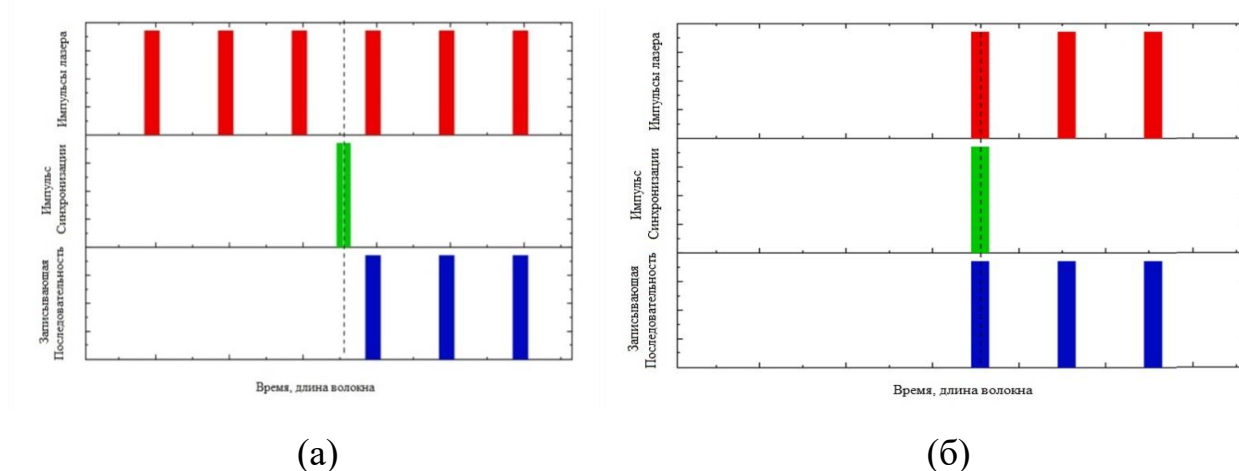
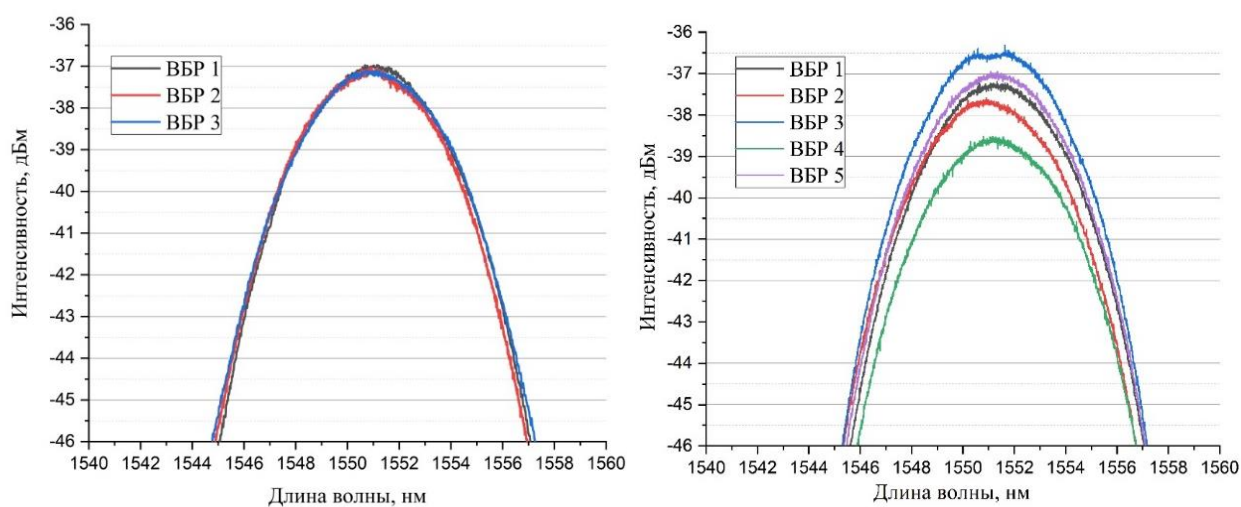


Рисунок 1 – Режимы работы лазера при записи решетки при простой синхронизации затвора (а) и с помощью новой схемы синхронизации генератора второго акустооптического модулятора (б).

Показано, что при предложенной схеме синхронизации, случайная дисперсия во времени прихода первого импульса записывающей последовательности в начальную точку формирования структуры оказывается на 2-3 порядка меньше, чем при классических способах синхронизации.

В разделах 2.2 и 2.3 Приведены методики термических и прочностных испытаний, полученных брэгговских структур, описаны схемы экспериментальных установок.

В третьей главе представлены результаты проведённых экспериментов по многопроходной записи волоконных брэгговских решёток. В разделе 3.1 показана работоспособность предложенного многопроходного метода записи. Наглядно продемонстрирована возможность высокоточной записи ВБР по сравнению с однопроходными методами. Так, на рисунке 2 приведены спектры отражения решеток, записанных новым методом (рис.2а) и по «классической» однопроходной методике (рис.2б). Из графиков видно, что запись ВБР новым методом обеспечивает высокую воспроизводимость параметров брэгговских структур по сравнению с однопроходным режимом.



(а)

(б)

Рисунок 2 – Спектры отражения трех слабых решеток, записанных с помощью многопроходного поточечного метода (а) в сравнении со спектрами пяти решёток, записанных в однопроходном режиме (б).

Возможность промежуточного контроля спектра решеток после каждой итерации записи позволяет выявить динамику формирования решеток и провести более глубокий анализ процессов, происходящих при взаимодействии излучения фемтосекундного лазера с кварцевым стеклом.

Так, в ходе проведенных экспериментов был обнаружен коротковолновый сдвиг брэгговской длины волны формируемых решёток при увеличении количества итераций записи (рисунок 3). Такое поведение спектров, согласно формуле (1) [1, 5] свидетельствует об отрицательном изменении среднего

эффективного показателя преломления структуры при очевидном сохранении ее периода:

$$m\lambda_B = 2n_{eff}L \quad (1)$$

где λ_B – длина волны брэгговского резонанса (брэгговская длина волны), m – порядок решетки, n_{eff} – эффективный показатель преломления решётки, L – период брэгговской структуры.

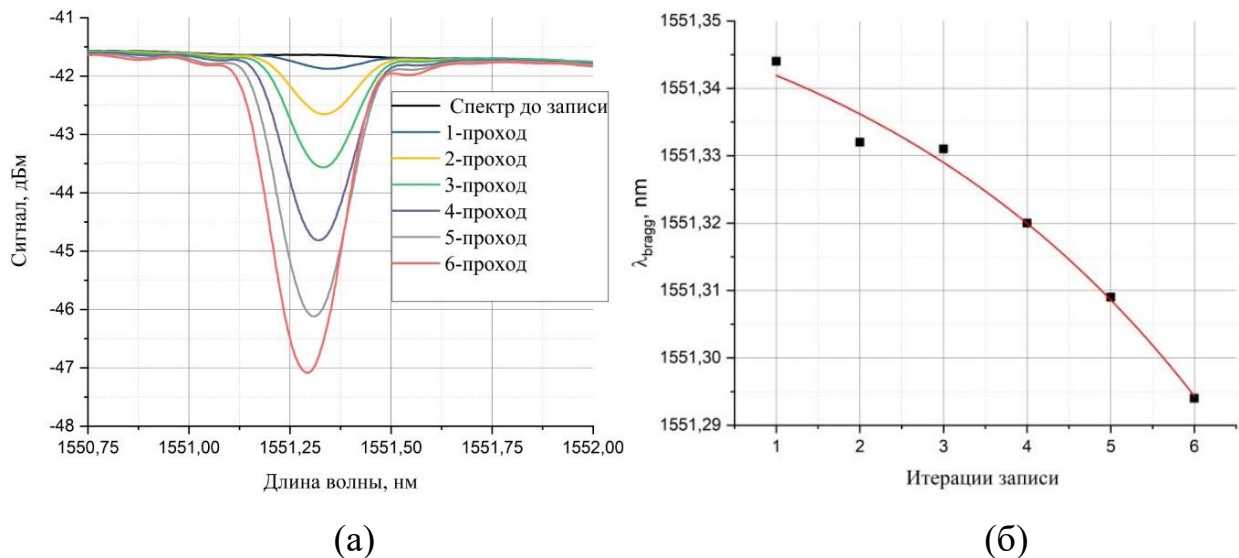


Рисунок 3 – Изменение спектра пропускания брэгговской решетки в зависимости от количества итераций записи (а), динамика изменения брэгговской длины волны к зависимости от количества проходов записи (б).

В разделе 3.2 исследуется динамика формирования брэгговских решеток в волокнах с различным легированием сердцевины в зависимости от энергии записывающего излучения. Показано, что основной вклад в формировании структуры ВБР вносят изменения в регулярной сетке стекла за счет многофотонного взаимодействия с излучением фемтосекундного лазера. Экспериментально показано влияние уровня легирования и состава материала сердцевины на процессы формирования брэгговских структур.

На рисунке 4 приведена динамика записи ВБР в волокнах с различным уровнем легирования сердцевины, продемонстрировано, что коротковолновое смещение длины волны брэгговского резонанса при многопроходной записи наблюдается во всех образцах, но величина сдвига может отличаться в зависимости от структуры световода.

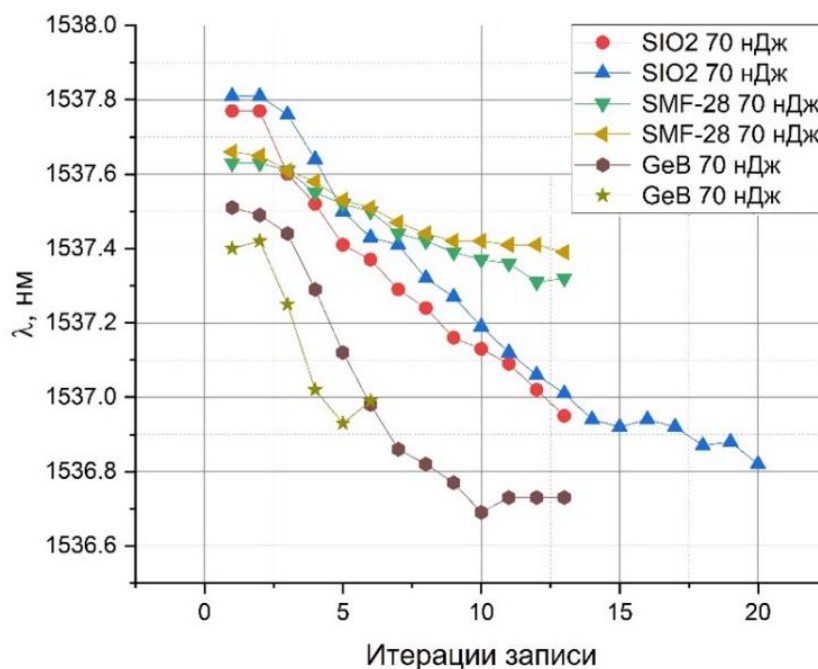


Рисунок 4 – Изменение брэгговской длины волны в процессе записи ВБР в различных образцах волоконного световода.

В разделе также рассматриваются механизмы формирования брэгговских решеток и причины наблюдаемых эффектов в экспериментах результатах. Делается предположение, что вносимые на этапе записи ВБР с помощью излучения фемтосекундного лазера, изменения среднего показателя преломления материала волокна, обладают комбинированной природой.

Предполагается, что отрицательный вклад в изменение показателя преломления связан с образованием нанопористой структуры стекла в центре экспонированной области штриха в результате неразрушающего воздействия фемтосекундного излучения [6]. Это приводит к перераспределению плотности вещества, за счёт чего на периферии экспонированной области наблюдается повышение плотности материала волокна, а, следовательно, и показателя преломления. Данное предположение демонстрирует красная кривая на рисунке 5 в виде распределения изменения показателя преломления по радиусу волоконного световода.

Однако само по себе перераспределение плотности вещества не приводит к изменению среднего показателя преломления по всему объему стекла.

Следует учесть, что существует неоднородное радиальное распределение энергии распространяющейся по волокну моды излучения (рис.5, синяя кривая), которое также неоднородно взаимодействует с фотоиндуцированным дефектом (штрихом решетки). В этом случае оказывается, что вносимые отрицательные изменения показателя преломления, делают больший вклад в изменение эффективного показателя преломления, по сравнению с периферийными областями положительного изменения показателя преломления, что и приводит к общему уменьшению среднего эффективного показателя преломления структуры и наблюдаемому коротковолновому сдвигу.

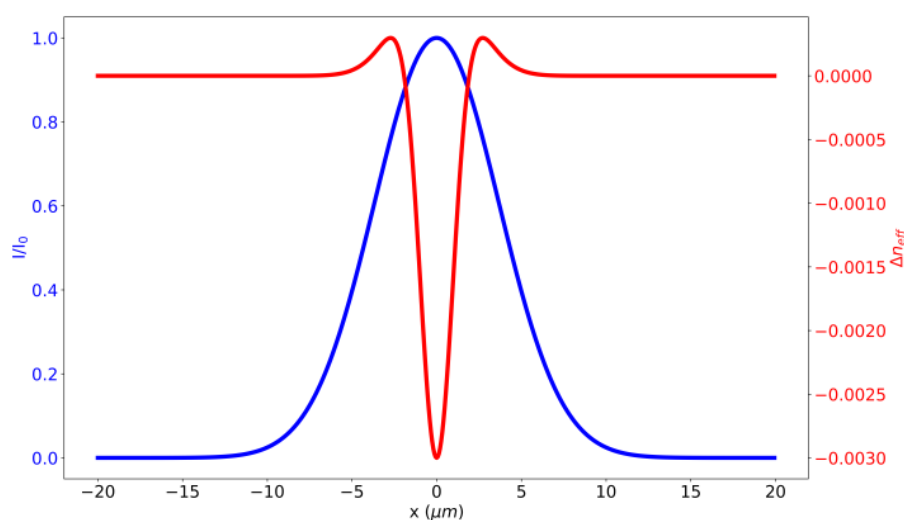


Рисунок 5 – Эффект перераспределения показателя преломления кварцевого стекла по радиусу волоконного световода вокруг точки воздействия лазерного излучения (красная кривая) и распределение поля моды распространяющегося по волокну излучения (синяя кривая).

Предложенная модель структуры штриха, как структурного элемента волоконной брэгговской решётки, была проверена на эксперименте с нецентральной записью ВБР (рисунок 6а). Предполагалось, что при записи решёток с отстройкой от центра сердцевины имеет место иное пересечение штрихов решётки с распространяющейся модой. Влияние отрицательных изменений показателя преломления в меньшей степени будут влиять на моду излучения, что в свою очередь, должно привести к уменьшению, при прочих равных, коротковолнового сдвига брэгговской длины. Подтверждение этой теории можно наблюдать на рисунке 6б, на котором демонстрируется динамика

сдвига брэгговского резонанса при центральной записи (черная кривая) и при отстройке от центра сердцевины на 2 мкм. Видно, что во втором случае сдвиг примерно вдвое меньше. Экспериментальные результаты совпадают с численными расчетами величины наблюдаемого эффекта.

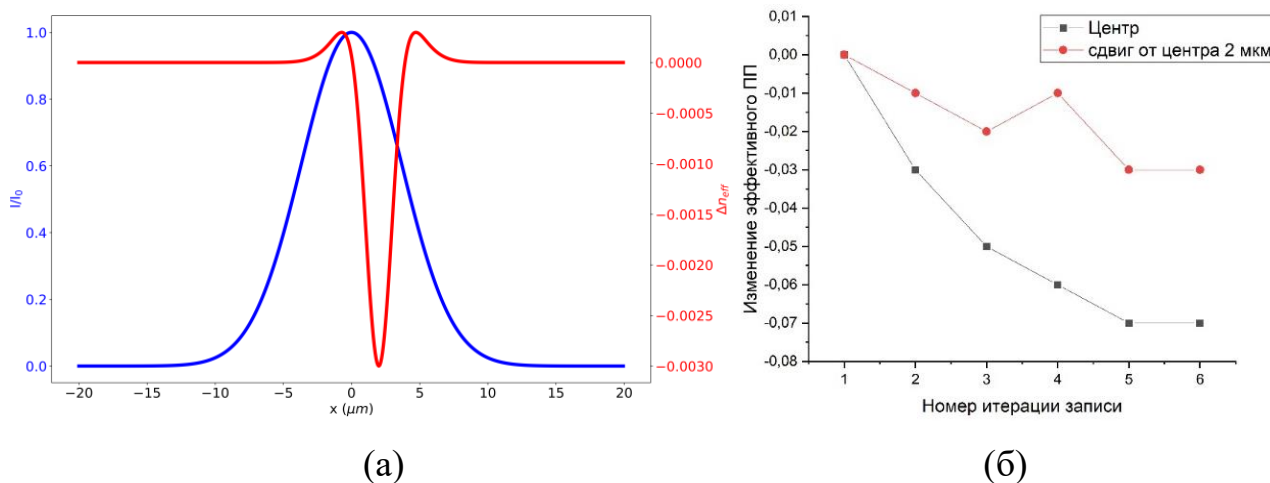


Рисунок 6 – эффект перераспределения плотности кварцевого стекла по радиусу волоконного световода вокруг точки воздействия лазерного излучения (красная кривая) и распределение поля моды волоконного световода (синяя кривая). Точка воздействия смещена относительно центра на 2 мкм (а). Изменение брэгговской длины волны при осевой записи решетки (черная кривая) и при смещении от центра волокна на 2 мкм (красная кривая) (б).

В четвёртой главе представлены результаты термических и прочностных испытаний ВБР, записанных поточечным методом с помощью излучения фемтосекундного лазера. В **разделе 4.1** в результате экспериментов по длительному изотермическому отжигу при температуре 650°C впервые продемонстрирован эффект регенерации брэгговских решеток, записанных с помощью фемтосекундного излучения без присутствия водорода в волокне с низким уровнем легирования германием (рисунок 7). Выдвинута гипотеза о преобладающей роли процессов кристаллизации в формировании регенерируемых брэгговских решеток.

На рисунке по оси ординат отложена NICC (2) [7];

$$NICC = \frac{\tanh^{-1}(\sqrt{R})}{\tanh^{-1}(\sqrt{R_0})} \quad (2)$$

где R – текущий коэффициент отражения решетки после отжига измеренный при комнатной температуре, а R_0 – коэффициент отражения решетки до начала эксперимента. Отражение R решётки определяется [5] (3)

$$R = \tanh^2\left(\frac{\pi\eta\Delta n_{mod}L}{\lambda_B}\right) = \tanh^2(\kappa L) \quad (3)$$

где η – интеграл перекрытия, определяющий долю мощности, распространяющейся по сердцевине волоконного световода, Δn_{mod} – модуляция показателя преломления на длине решётки, L – длина решётки, λ_B – длина волны брэгговского резонанса.

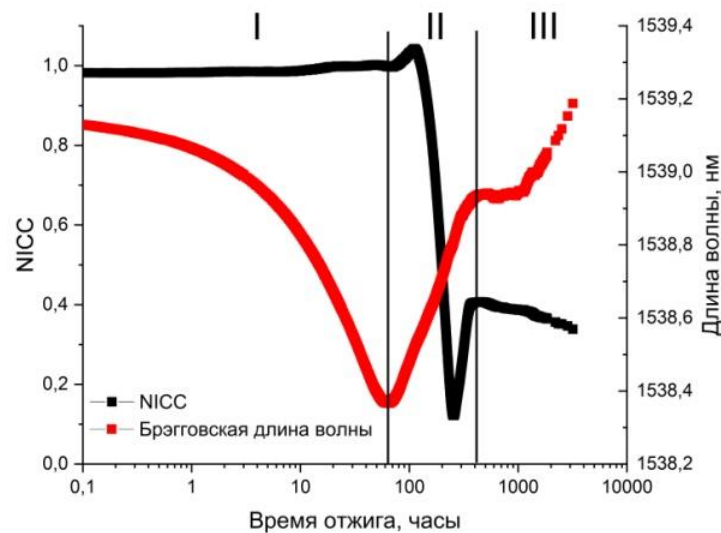


Рисунок 7 – Динамика изотермического отжига при температуре 650°С двух образцов ВБР, записанных поточечным методом излучением фемтосекундного лазера.

Под регенерацией волоконных брэгговских решёток традиционно понимают процесс, в рамках которого при воздействии высокой температуры брэгговская решётка распадается, то есть теряет свою отражательную способность, однако при продолжении воздействия температуры, восстанавливает часть отражательной способности (Рис.7, черная кривая). Традиционно, процесс регенерации ВБР связывают с релаксацией и перераспределением внутренних напряжений на границе сердцевины и оболочки в месте формирования брэгговской структуры[8, 9]. Обычно, это

явление наблюдается для решёток, записанных в высоколегированных волокнах[10]. Гораздо чаще встречаются работы, где это явление наблюдается для решёток, записанных в низколегированные волокна, но с содержанием молекулярного водорода[11, 12]. Многие авторы отмечают ведущую роль водорода, как катализатора процессов релаксации и перераспределения внутренних напряжений. Некоторые авторы полагают, что помимо описанного механизма, возможны ещё процессы связанные с эффектом кристаллизации стекла[10-12].

Из литературных данных известно, что процесс кристаллизации и зародышеобразования в объёмных стёклах происходит при существенно более высоких температурах (более 1000 °С). При этом, чем ниже температура, тем больше вязкость вещества препятствует зародышеобразованию. Однако существуют свидетельства, что на поверхности стёкол зародышеобразование и даже кристаллизация могут наблюдаться уже при 700 °С и даже при 500 °С. В работе предполагается, что в результате воздействия фемтосекундного излучения в фокальных точках формируемой волоконной брэгговской решётки создаётся большое количество оборванных связей и неоднородностей, что увеличивает подвижность структурных элементов кварцевого стекла. Кроме того, образование нанопористой структуры также приводит к уменьшению температурного порога образования зародышевых центров. Таким образом, формирование новой кристаллической фазы вещества в фокальной области приводит локальному положительному изменению показателя преломления, что и способствует сначала к потере отражательной способности решётки за счет эффекта компенсации фотоиндуцированных изменений, а затем к частичному её восстановлению благодаря превалирующему влиянию кристаллических новообразований на показатель преломления фотоиндуцированного дефекта. Гипотеза о главенствующей роли кристаллизации материала стекла в облученных участках при формировании регенерируемых брэгговских решеток может быть распространена и на другие типы ВБР, эффект регенерации которых описывается в литературе.

В ходе изотермического отжига решетки наблюдается немонотонная динамика изменения длины волны брэгговского резонанса, сопровождающая процесс регенерации (рис.7, красная кривая). Коротковолновый сдвиг на первом этапе эксперимента при сохранении уровня отражения решетки объясняется превалирующим влиянием эффекта релаксации внутренних напряжений на границе сердцевины и оболочки (рисунок 7 область I). Дальнейшее длинноволновое смещение на этапе II может быть частично объяснено ростом среднего эффективного показателя преломления в ходе регенерации решетки. Однако величина положительного смещения как на этапе II, так и в третьей фазе эксперимента превышает оценочные значения. Как показал дополнительный эксперимент, данный длинноволновый дрейф оказался результатом остаточных механических напряжений, которые испытывали исследуемые образцы при их установке в трубчатую печь.

В разделе 4.2 приведены результаты прочностных испытаний образцов записанных брэгговских решёток, их зависимость от режимов записи.

Рассматриваемые образцы исследовались на разрыв. Известно, что разрушение образца при определённом приложенном усилии - процесс вероятностный. В экспериментах была набрана статистика и построены статистические кривые Вейбулла. Экспериментальные данные были аппроксимированы вероятностной функцией Вейбулла (4) [13] (таблица 2):

$$F(\sigma_f) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma_f}{\sigma_0} \right)^{m_d} \right] \quad (4)$$

где σ_0 и m_d – параметр масштаба и формы Вейбулла соответственно, а F – вероятность разрыва образца от приложенного усилия. По своему смыслу σ_0 характеризует усреднённую прочность исследуемого вида дефекта. Отдельно был записан точечный дефект в виде штриха, который был записан путем многократного поперечного сканирования сердцевины излучением фемтосекундного лазера и который может рассматриваться как альтернатива слабым брэгговским решеткам для сенсорных систем на основе когерентной рефлектометрии.

Экспериментальные данные приедены на рисунке 8 и в таблице 1. Имеет место обратная зависимость прочности структуры от энергии импульса, при котором проводилась запись брэгговской решетки (последняя колонка в таблице 1), то есть при увеличении энергии импульса записывающего излучения наблюдается падение прочностных характеристик записываемых структур.

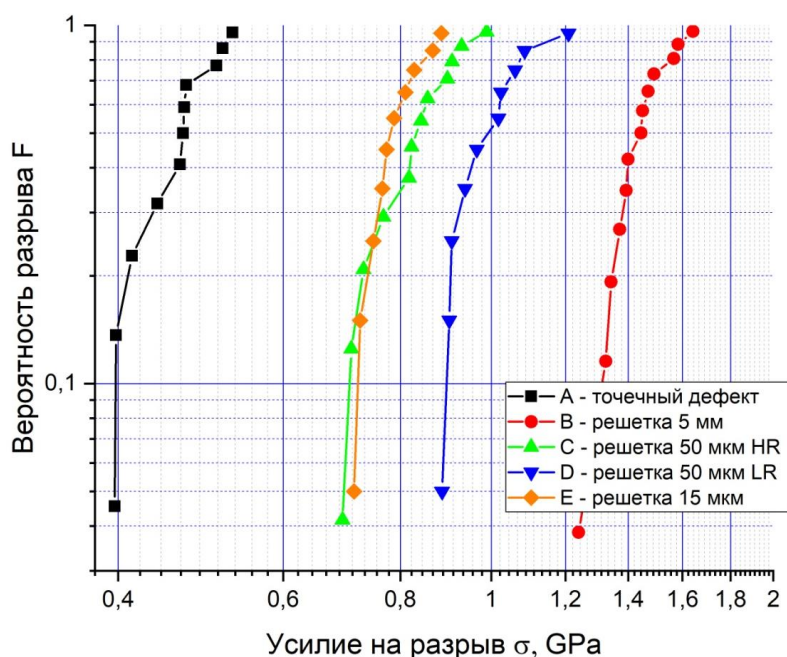


Рисунок 8 – Вероятность разрыва образцов F от приложенного усилия σ .

Таблица 1 – Коэффициенты Вейбулла и энергия лазерного импульса при записи образцов

Образец	Тип дефекта	σ_0	m_d	Энергия нДж
A	Точечный дефект (штрих)	0.4824	11.61663	-
B	Решетка 5 мм	1.4892	15.3456	67
C	Решетка 50 мкм HR	0.8698	11.61663	140
D	Решетка 50 мкм LR	1.0446	11.4006	110
E	Решетка 15 мкм	0.8157	16.2832	145

Как было отмечено ранее в основе воздействия фемтосекундного излучения на материал волокна лежат процессы многофотонного поглощения. В работе в качестве записывающего излучения используется вторая гармоника иттербиевого волоконного лазера с длиной волны излучения 532 нм (2.3 эВ). Известно, что край фундаментального поглощения у кварцевого стекла находится на уровне порядка 8.5-9.3 эВ [14]. Логично полагать, что в этом

случае в основе фемтосекундной записи будет лежать минимум четырёхфотонные процессы. Интересно, что зависимость усредненной прочности образцов (параметр масштаба σ_0), линейно зависит от корня 4-й степени от энергии импульса лазерного излучения, при которой производилась записи ВБР. Данный результат косвенно подтверждает превалирующую роль именно описанных выше четырехфотонных процессов при записи решеток.

Из приведённых данных в таблице 1 и рисунка 8 следует, что имеет место обратная зависимость между энергией импульса записывающего излучения и механической прочностью получаемых ВБР, то есть при увеличении энергии импульса записывающего излучения наблюдается падение прочностных характеристик волоконных брэгговских решёток.

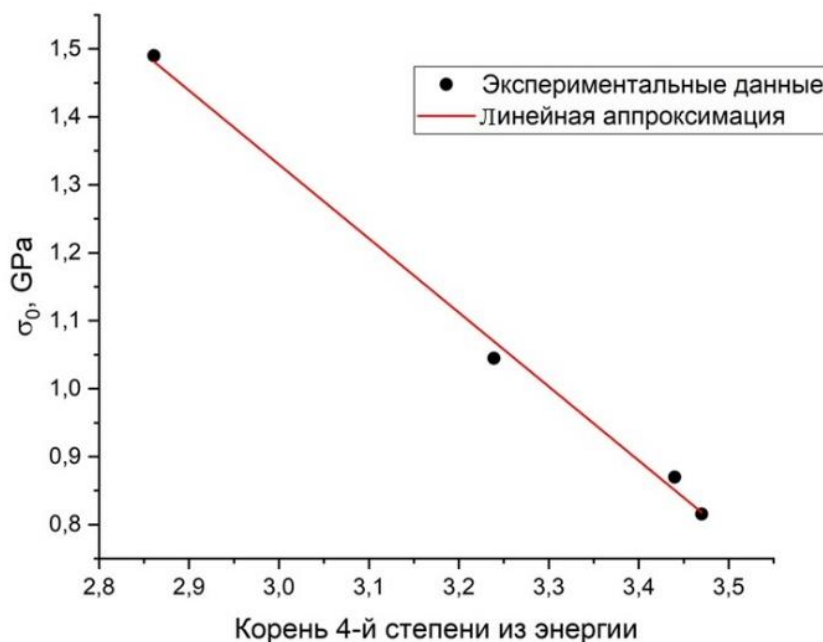


Рисунок 8 – Зависимость параметра масштаба от энергии импульса лазерного излучения.

В заключении приведены основные выводы данной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В рамках данной работы предложен, реализован и запатентован новый многопроходный метод записи ВБР с помощью излучения фемтосекундного лазера. Данный метод позволяет осуществлять контроль параметров изготавливаемой ВБР непосредственно в процессе записи, обеспечивая возможность высокоточного, воспроизводимого создания ВБР.
2. Впервые показана динамика записи ВБР многопроходным поточечным методом при помощи излучения фс-лазера с различной энергией импульсов в различных по составу сердцевины видах оптических волокон. В процессе записи ВБР наблюдается коротковолновый сдвиг длины волны брэгговского резонанса. Предложена модель комплексного штриха решётки с перераспределением плотности стекла вокруг точки воздействия излучения. Общее отрицательное изменение эффективного показателя преломления обусловлено особенностями распределения энергии поля моды излучения, распространяющегося по волоконному световоду.
3. Впервые продемонстрирован процесс регенерации волоконной брэгговской решетки, записанной в низколегированном германием волоконном световоде Corning SMF-28 без присутствия молекулярного водорода поточечным методом с помощью излучения фемтосекундного лазера. Процесс регенерации связывается с образованием зародышевых центров кристаллизации в облученных участках волокна. Гипотеза о главенствующей роли кристаллизации может быть распространена и на другие типы волокон и ВБР, демонстрирующих процесс регенерации при высоких температурах.
4. Экспериментально показано, что механическая прочность записанных брэгговских решеток поточечным методом с помощью излучения фемтосекундного лазера зависит от энергии в импульсе записывающего излучения. При этом, прочность обратно пропорциональна корню 4-й степени от энергии записывающего излучения.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ivan D. Laktaev, Dmitrii V. Przhiialkovskii, Vasily E. Ustimchik, Oleg V. Butov, "Thermal aging of Bragg gratings inscribed in pristine Ge- and N-doped fibers," *Applied Optics*, Vol. 58, No. 34, pp. 9326-9330, 2019
2. Dmitrii V. Przhiialkovskii, Oleg V. Butov, "High-precision point-by-point fiber Bragg grating inscription," *Results in Physics* 30 (2021), 104902
3. Д.В. Пржиялковский, О.В.Бутов, «Высокоточная запись брэгговских решеток поточечным методом», *Прикладная фотоника*, Т.8, №3 (2021)
4. Ivan Ulyanov, Dmitrii V. Przhiialkovskii, Oleg V. Butov, "Point-by-point inscription of chirped apodized fiber Bragg gratings for application as ultrashort pulse stretchers," *Results in Physics*, Volume 32, 2022, 105101
5. Oleg V. Butov, Dmitrii V. Przhiialkovskii, Alexey I. Lopunov, Alexey B. Pnev, "Strength properties of femtosecond-induced defects and weak Bragg gratings for distributed optical fiber sensors," *Optics & Laser Technology*, Volume 162, (July 2023), 109271
6. Д.В. Пржиялковский, Н.А. Плюскова, О.В. Бутов, «Регенерация волоконных брэгговских решеток, записанных поточечным методом с помощью излучения фемтосекундного лазера», *Журнал радиоэлектроники*, №8, 2024
7. Пржиялковский Д. В. и др. Особенности динамики поточечной записи брэгговских решеток с помощью излучения фемтосекундного лазера // *Фотон-экспресс*. – 2021. – №. 6. – С. 268-269.
8. Przhiialkovskii D. V., Butov O. V. Features of the dynamics of Bragg gratings inscription with femtosecond radiation // *Nonlinear Optics and Applications XII*. – SPIE, 2021. – Т. 11770. – С. 38-42.
9. Пржиялковский Д. В., Бутов О. В. Динамика формирования волоконных брэгговских решёток в процессе многопроходной записи излучением фемтосекундного лазера // *Фотон-экспресс*. – 2023. – №. 6 (190). – С. 273-274.
10. О.В. Бутов, Д.В. Пржиялковский, А.С. Шикин, А.И. Лопунов, Волоконные брэгговские решетки, записанные излучением фемтосекундного лазера: технология, свойства, перспективы // *Материалы XI Международного семинара по волоконным лазерам*. – 2024, – С.230

ЛИТЕРАТУРА

1. Fiber bragg gratings. / Kashyap R.: Academic press, 2009.
2. Fiber Bragg grating sensors: recent advancements, industrial applications and market exploitation. / Cusano A., Cutolo A., Albert J.: Bentham Science Publishers, 2011.
3. Vasil'ev S. A., Medvedkov O. I., Korolev I. G. e., Bozhkov A. S., Kurkov A. S., Dianov E. M. Fibre gratings and their applications // Quantum electronics. – 2005. – Т. 35, № 12. – С. 1085.
4. Mihailov S. J., Hnatovsky C., Abdukerim N., Walker R. B., Lu P., Xu Y., Bao X., Ding H., De Silva M., Coulas D. Ultrafast laser processing of optical fibers for sensing applications // Sensors. – 2021. – Т. 21, № 4. – С. 1447.
5. 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. – Т. 35, № 12. – С. 1085-1103.
6. Canning J., Lancry M., Cook K., Poumellec B. New theory of femtosecond induced changes and nanopore formation // Third Asia Pacific Optical Sensors Conference. – Т. 8351 –SPIE, 2012. – С. 572-578.
7. Erdogan T., Mizrahi V., Lemaire P., Monroe D. Decay of ultraviolet-induced fiber Bragg gratings // Journal of applied physics. – 1994. – Т. 76, № 1. – С. 73-80.
8. Celikin M., Barba D., Tagziria K., Haddad É., Ruediger A., Rosei F. Enhanced stability of higher UV-densified Fiber Bragg Gratings after thermal regeneration // Optics Communications. – 2019. – Т. 435. – С. 345-349.
9. Lancry M., Cook K., Poumellec B., Canning J. Investigation of structural glass relaxation in regenerated fiber Bragg gratings // Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides –Optica Publishing Group, 2016. – С. JT4A. 27.
10. Lindner E., Chojetzki C., Brückner S., Becker M., Rothhardt M., Bartelt H. Thermal regeneration of fiber Bragg gratings in photosensitive fibers // Optics express. – 2009. – Т. 17, № 15. – С. 12523-12531.
11. Polz L., Dutz F. J., Maier R. R., Bartelt H., Roths J. Regenerated Fibre Bragg Gratings: A critical assessment of more than 20 years of investigations // Optics & Laser Technology. – 2021. – Т. 134. – С. 106650.
12. Canning J., Stevenson M., Bandyopadhyay S., Cook K. Extreme silica optical fibre gratings // Sensors. – 2008. – Т. 8, № 10. – С. 6448-6452.
13. Kapron F. P., Yuce H. H. Theory and measurements for predicting stressed fiber lifetime // Optical engineering. – 1991. – Т. 30, № 6. – С. 700-708.
14. Saito K., Ikushima A. Absorption edge in silica glass // Physical Review B. – 2000. – Т. 62, № 13. – С. 8584.