

Минобрнауки России
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ
им. В.А. КОТЕЛЬНИКОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)

На правах рукописи



ПРЖИЯЛКОВСКИЙ ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ
РЕШЁТОК МЕТОДОМ МНОГОПРОХОДНОЙ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ
ПОТОЧЕЧНОЙ ЗАПИСИ

1.3.8 – Физика конденсированного состояния

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
Бутов Олег Владиславович

Москва – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	4
ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ИСТОРИЯ ВБР, ТИПОЛОГИЯ, МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ, СВОЙСТВА (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)	15
1.1 Принципы работы ВБР, основные свойства	15
1.2 Методы записи ВБР	18
1.2.1 Интерференционные методы записи ВБР	19
1.2.2 Методы направленной записи ВБР	23
1.3 Типология ВБР. Основные явления и свойства	29
1.4 Воздействие высоких температур на ВБР	35
1.5 Термоустойчивость различных типов ВБР	39
1.5.1 Ренерированные ВБР	40
1.6 Прочностные характеристики ВБР	44
1.7 Выводы к первой главе	46
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ЗАПИСИ И ИССЛЕДОВАНИЯ ВБР	49
2.1 Методика записи ВБР	49
2.2 Термические исследования ВБР.	55
2.3 Механические испытания	58
2.4 Выводы ко второй главе	59
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЗАПИСИ, МОДЕЛЬ И ОБУЖДЕНИЯ	60
3.1 Запись ВБР при помощи экспериментального записывающего комплекса	60
3.2 Механизмы формирования ВБР	67
3.3 Выводы к третьей главе	76
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕРМИЧЕСКИХ И ПРОЧНОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ	78

4.1 Изотермический отжиг и теория кристаллизации.....	78
4.2 Исследования прочностных характеристик	86
4.3 Выводы к четвёртой главе	94
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	96
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	98

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВБР	–	Волоконная брэгговская решетка
ПП	–	Показатель преломления
УФ	–	Ультрафиолет, ультрафиолетовый
УКИ	–	Ультракороткие импульсы
ФС	–	Фемтосекунды, фемтосекундный
ИК	–	Инфракрасный
NICCS	–	(англ. Normalized Integrated Couple Constant) Нормированная объединенная константа связи
DFB	–	(англ. Distributed Feedback) Распределенная обратная связь
FWHM	–	(англ. Full Width at Half Maximum) Ширина спектра на полувысоте

ВВЕДЕНИЕ

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.

Одним из важных элементов волоконно-оптических систем, является волоконная брэгговская решётка (ВБР). Данный элемент представляет собой внутриволоконную микроструктуру периодической модуляции показателя преломления (ПП) материала сердцевины вдоль оси волокна. Основным свойством ВБР является отражение определённой, как правило, узкой части спектра, проходящего через неё излучения, тогда как остальной спектр пропускается без изменений [1].

Благодаря своим уникальным свойствам ВБР и приборы на их основе находят широчайшее применение в самых разных отраслях науки и промышленности. Современная волоконная оптика и системы связи, лазерная техника и различные системы мониторинга широко используют брэгговские решётки как часть своей компонентной базы [1-7]. В ряде случаев волоконно-оптические решения являются чуть ли не единственно возможными для использования в условиях пожароопасных, химически агрессивных и радиационно-опасных условий эксплуатации [8, 9].

Благодаря чувствительности волоконной брэгговской решётки к внешним воздействиям, таким как температура или механическая деформация, ВБР может выступать чувствительным элементом датчиков этих физических величин [3-5]. При помощи же дополнительных устройств — трансдюсеров, брэгговская решётка может стать чувствительной к таким параметрам окружающей среды как давление, влажность и т.д. При некоторых условиях возможно создание прибора на основе ВБР с

выборочной чувствительностью к определённым, даже биологическим веществам и объектам [10-15], что открывает для подобных технологий широчайшее поле биологических, биохимических и биофизических применений.

Растущая популярность и широта применения ВБР показывает, что совершенствование методов создания волоконных брэгговских структур является важной научной и практической задачей.

В настоящий момент самым распространённым методом получения брэгговских структур является метод записи с помощью фазовой маски и лазерного излучения УФ диапазона [16]. Данный метод записи хорошо изучен с научной точки зрения и достиг высокого уровня технического совершенства. Однако метод имеет и недостатки. Для эффективной записи ВБР необходим достаточный уровень фоточувствительности материала волокна в УФ диапазоне, что не всегда выполнимо для большого числа стандартных телекоммуникационных световодов и коммерчески доступных образцов оптоволокна. Этот факт обуславливает необходимость применения или специальных волоконных световодов с достаточной исходной фоточувствительностью или методов искусственного повышения их фоточувствительности.

Решением обозначенной проблемы может стать использование лазеров ультракоротких импульсов (УКИ) в качестве источника записывающего излучения [17, 18]. Использование УКИ лазера позволяет решить основную проблему записи – низкую исходную фоточувствительность материала волокна без необходимости её искусственного повышения и связанных с этим проблем и издержек. Одной из перспективных технологий, в основе которой лежит использование фемтосекундного (ФС) лазера для записи ВБР, является метод поточечной записи. Помимо вышеописанных преимуществ, поточечные методы записи позволяют варьировать параметры и конфигурации записываемых волоконных структур в очень широких пределах. К недостаткам же поточечных методов записи можно отнести

ограниченные возможности *in situ* контроля процесса записи волоконных брэгговских решёток. Несмотря на то, что вопрос взаимодействия фемтосекундного излучения с прозрачными материалами изучается уже довольно давно, процесс записи волоконных брэгговских структур при помощи данного вида излучения остаётся до конца не изученным, а его влияние на свойства полученных подобным методом ВБР представляют не только практический, но и научный интерес.

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.

Цель работы

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию механизмов, лежащих в основе формирования ВБР под действием излучения фемтосекундного лазера, свойств получаемых структур, а также совершенствованию методов поточечной записи ВБР.

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

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.

Научная и практическая ценность 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.

Основные 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.

Достоверность

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.

Апробация работы

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 – 2023 (Пермь - 2023), XI Международный семинар по волоконным лазерам (Новосибирск, академгородок – 2024), конференция-конкурс молодых учёных им. И.В. Анисимкина 16 (Москва - 2019).

Результаты диссертации опубликованы в следующих отечественных и международных рецензируемых изданиях:

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

Получен патент РФ на изобретение №2778978.

Результаты диссертации опубликованы в следующих трудах отечественных и международных конференций:

1. Пржиялковский Д. В. и др. Особенности динамики поточечной записи брэгговских решеток с помощью излучения фемтосекундного лазера // *Фотон-экспресс*. – 2021. – №. 6. – С. 268-269.

2. 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.

3. 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.

4. 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

Личный вклад

Планирование и постановка экспериментов, получение экспериментальных данных, обработка и интерпретация результатов были осуществлены лично автором или при его непосредственном участии.

Структура, объем и краткое содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка условных обозначений и сокращений, списка литературы, а также списка иллюстративного материала. Полный объем диссертации составляет 111 страницы, включая 26 рисунков, 2 таблицы и список литературы, насчитывающий 198 наименований.

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 представлено описание новой методики многопроходной поточечной записи ВБР, схема экспериментальной установки, описан принцип её действия и отличия, выделяющие данную методику на фоне аналогов. Приведены методики исследования брэгговских структур, как непосредственно на этапе записи, так и при последующих термических и прочностных испытаниях полученных ВБР, описаны схемы экспериментальных установок.

В третьей главе представлены результаты проведённых экспериментов по многопроходной записи волоконных брэгговских решёток. Показана

динамика записи ВБР в волокнах с различным уровнем легирования сердцевины, продемонстрировано коротковолновое смещение длины волны брэгговского резонанса при многопроходной записи. Делается предположение, что вносимые на этапе записи ВБР с помощью излучения фемтосекундного лазера, изменения показателя преломления материала волокна, обладают комбинированной природой и имеет место как положительное изменение ПП, так и отрицательное.

В четвёртой главе представлены результаты термических испытаний ВБР. Впервые продемонстрирован эффект регенерации брэгговских решеток, записанных с помощью фемтосекундного излучения без присутствия водорода в волокне с низким уровнем легирования. Выдвинута гипотеза о преобладающей роли кристаллизации в формировании регенерируемых брэгговских решеток.

Приведены результаты прочностных испытаний образцов записанных брэгговских решёток, их зависимость от режимов записи.

В заключении приведены основные выводы данной работы.

ГЛАВА 1. ИСТОРИЯ ВБР, ТИПОЛОГИЯ, МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ, СВОЙСТВА (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

1.1 Принципы работы ВБР, основные свойства

Хорошо известно, что волоконная брэгговская решётка имеет в своей основе периодическую модуляцию показателя преломления вдоль оси волоконного световода. Свет, распространяющейся по сердцевине волокна, на границе участка ВБР с модуляцией ПП будет испытывать отражение. Так как структура периодическая, то благодаря явлению интерференции, для определённой части прошедшего через решётку оптического спектра будет наблюдаться резонансное уменьшение пропускания, то есть в спектре пропускания такой структуры будет наблюдаться узкий провал. В спектре же отражения на данной длине волны будет наблюдаться узкий пик. Описанное выше и составляет основную суть работы волоконной брэгговской решётки. В общем случае преломление/отражение на периодической структуре описывается законом Брэгга-Вульфа [19], который в случае ВБР имеет следующий вид (1) [20, 21]:

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

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

Как видно из формулы (1) длина волны брэгговского резонанса в основном определяется периодом модуляции ПП и его средним значением для ВБР.

Помимо длины волны брэгговского резонанса, важным параметром брэгговской решётки является отражательная способность. Коэффициент отражения ВБР определяется формулой (2) [20, 21]:

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

где R – коэффициент отражения решётки, η – интеграл перекрытия между структурой и распространяющейся в волокне модой излучения, Δn_{mod} – модуляция показателя преломления на длине решётки, L – длина решётки.

Из (2) следует, что отражательная способность ВБР в основном зависит от модуляции ПП в решётке, а также от длины брэгговской структуры. Стоит отметить, что длина брэгговской структуры непосредственно влияет на такой немаловажный параметр как спектральная ширина решётки. Спектральная ширина ВБР зависит от физической длины ВБР и от отражательной способности, то есть от глубины модуляции ПП решётки. Так для решётки 1 порядка спектральная ширина на полувисоте будет определяться выражением (3) [1].

$$2\Delta\lambda = \frac{\lambda_B^2}{\pi n_{eff}L} \sqrt{\tanh^{-1^2}(\sqrt{R}) + \pi^2} \quad (3)$$

В самом же простом случае, когда отражающая способность решётки не слишком велика и вклад в спектральную ширину решётки от глубины модуляции ПП пренебрежимо мал, т.е. при $\text{arth}^2 \sqrt{R} \ll \pi^2$ выражение (3) можно упростить до(4)

$$2\Delta\lambda \approx \frac{\lambda_B^2}{n_{eff}L} \quad (4)$$

Получается, что данная зависимость упрощается до обратно пропорциональной физической длине брэгговской структуры.

Как видно из формул (1) – (4) параметры ВБР зависят, с одной стороны от параметров световода, в котором они записаны, а с другой стороны от параметров записи самой решётки. Согласно же формуле (1) брэгговская длина волны определяется периодом записанной решётки Λ , и значением n_{eff} , очевидно, что данные параметры напрямую зависят не только от параметров световода и записанной ВБР, но и от внешних параметров окружающей среды, таких как температура и деформация.

Благодаря возможности отражать свет в узком спектральном диапазоне ВБР широко используется в качестве оптических фильтров и селекторов оптических каналов, а также зеркал для волоконных лазеров [2, 4, 7]. Кроме того, существует зависимость эффективного показателя преломления и периода брэгговской решётки от температуры. Помимо этого световод подвержен упругой деформации и под воздействием внешних напряжений может наблюдаться изменение периода структуры. Таким образом, ВБР можно использовать как чувствительный элемент датчиков различных физических величин [22-26].

Решетки с переменным периодом по длине могут быть использованы в качестве эффективных дисперсионных элементов, а наклонная запись штрихов решетки позволяет возбуждать оболочечные моды, что дает возможность использовать такие ВБР в качестве датчиков показателя преломления внешней среды [27].

Благодаря своим свойствам волоконные брэгговские решетки стали одним из распространенных элементов современных волоконно-оптических устройств и систем и изучение механизмов лежащих в основе их формирования, оптимизация параметров и эксплуатационных характеристик, разработка новых методов их создания является актуальной задачей современной прикладной фотоники.

1.2 Методы записи ВБР

Самая первая брэгговская волоконная решётка была получена практически случайно. В 1978 году Hill с коллегами проводил эксперимент, в ходе которого довольно интенсивное излучение лазера заводилось в торец волокна. Со временем интенсивность проходящего лазерного излучения снижалась, что, как выяснилось, было связано с образованием фотоиндуцированной периодической структуры в сердцевине волоконного световода. [7] Излучение лазера, войдя в структуру волоконного световода, образовало стоящую волну, в пучностях которой, благодаря фоточувствительности световода, показатель преломления материала волокна локально изменился, что и вызвало образование периодической структуры. Такую структуру потом и будут называть волоконной брэгговской решёткой.

Естественно, в последующие годы были предложены более эффективные методы записи ВБР. Современные методы записи в любом своём исполнении используют так называемую схему боковой засветки, она подразумевает, что записывающее излучение падает на волокно сбоку (а не в торец). Данная методика позволяет сделать процесс записи ВБР не только более контролируемым, но и расширить диапазон длин волн записываемых ВБР, который уже может не зависеть от длины волны излучения записывающего лазера.

Принципиально, методы записи ВБР делятся на две группы, к первой относятся интерференционные методы записи, а ко второй — методы направленной записи. Рассмотрим подробнее их отличия, особенности, пределы применимости и принципиальные трудности.

1.2.1 Интерференционные методы записи ВБР

Как уже было отмечено, к первой группе методов относятся интерференционные методы записи. Как правило, такая запись осуществляется с помощью лазерного излучения УФ диапазона, в котором многие легированные стекла обладают фоточувствительностью. В настоящий момент — это традиционные методы записи, которые имеют наибольшее распространение, они наиболее изучены как в научном, так и техническом отношении [1, 6, 16, 21, 28-32]. Большинство брэгговских волоконных решёток на сегодняшний день записываются именно этими методами [16, 32, 33].

В данном случае при помощи различных интерферометров и/или фазовых масок и боковой засветки в сердцевине волокна создаётся интерференционная картина. Благодаря фоточувствительности материала сердцевины волокна локально изменяется показатель преломления, тем самым и формируя брэгговскую волоконную решётку.

Данная группа технологий известна уже достаточно давно и хорошо себя зарекомендовала. Некоторые виды данной технологии, к примеру, запись при помощи пространственных интерферометров обладают такими преимуществами, как широкий диапазон перестройки параметров интерферометра, тем самым обеспечивая широкую вариативность записываемых ВБР. Однако пространственные интерферометры довольно сложны в использовании и очень чувствительны к таким параметрам установки, как когерентность записывающего источника и геометрия волокна.

Самым распространённым представителем данной группы методов является метод фазовой маски (рисунок 1.1) [16, 34]. Как правило, в качестве записывающего излучения также используются УФ лазеры. Суть данного подхода состоит в том, что периодическая модуляция интенсивности записывающего излучения создаётся специальной фазовой маской. В

большинстве практических случаев, волокно располагается непосредственно за фазовой маской, на которую падает записывающее излучение. К преимуществам данного метода записи можно отнести простоту работы и высокий уровень технического и научного совершенства технологии, что позволяет применять данную технологию для массовой записи.

Основной проблемой всех вышеописанных интерференционных методов записи является проблема фоточувствительности материала волокна. Очевидно, что для воздействия на материал волокна и изменения его ПП необходимо, чтобы этот материал обладал достаточным уровнем фоточувствительности в нужном диапазоне. Классические УФ лазеры не обладают достаточной энергией фотонов, чтобы эффективно воздействовать на все виды материалов, применяемых для создания оптического волокна [35, 36].

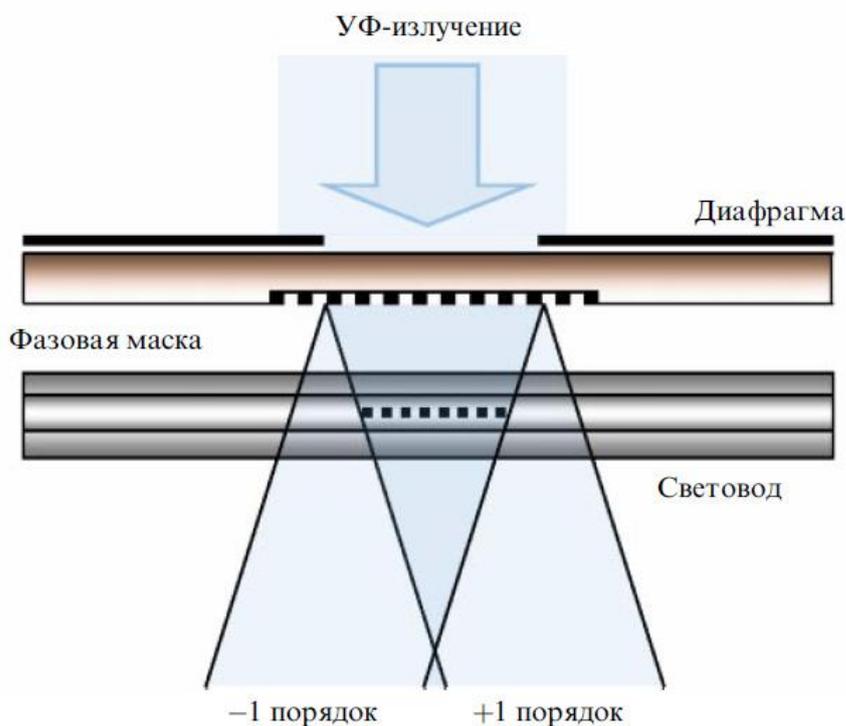


Рисунок 1.1 – Метод записи ВБР с помощью фазовой маски [34].

Решений этой проблемы может быть несколько. Одним из возможных решений является легирование самого оптического волокна ещё на этапе производства соответствующими веществами, которые повышают

фоточувствительность [37, 38]. Этот подход имеет право на жизнь, так как некоторые вещества, используемые при производстве оптических волокон, обладают необходимым свойством, к примеру, германий. Однако стоит помнить, что любые легирующие добавки в материал сердцевины/оболочки волокна даёт свой вклад в показатель преломления структуры. Так как одними из основных параметров оптического волокна являются такие параметры, как радиальный профиль распределения показателя преломления волокна и затухание (Затухание — параметр, показывающий, на сколько затухает сигнал, проходящий по волокну, в зависимости от пройденного по волокну расстояния, измеряется, как правило, в дБ/м, дБ/км), то очевидно, что добавление легирующих добавок в волокно в не проходит бесследно и может привести к изменению/ухудшению его световедущих характеристик. Поэтому не всегда удаётся подобрать концентрации легирующих добавок таким образом, чтобы волокно имело заданные параметры профиля распределения ПП, затухания и другие ключевые параметры, и при этом обладало достаточным уровнем фоточувствительности. Одним словом, данный подход не универсален и его применение возможно только в ограниченном числе случаев.

Самым широко распространённым решением проблемы фоточувствительности является приём насыщения волокна молекулярным водородом непосредственно перед записью [39, 40]. Оказывается, насыщение молекулярным водородом в ряде случаев существенно повышает фоточувствительность материала волокна, по сравнению со своим аналогом без насыщения. В подготовленное таким образом волокно возможно осуществлять запись интерференционными методами при помощи обычных 242 и 193 нм эксимерных УФ лазеров. Описанный выше метод получил самое широкое распространение, однако и он не лишён недостатков. Так, например, в литературе встречаются свидетельства, что решётки, записанные с применением описанной техники, обладают гораздо более слабыми характеристиками термоустойчивости [41-43]. Это может быть критично для

некоторых применений. Во-вторых, данный метод не универсален, результат процесса вхождения молекулярного водорода в материал волокна существенно зависит от легирующих компонентов самого волокна. Так, к примеру, на азотосиликатные волокна приём насыщения молекулярным водородом производит обратный эффект, снижая эффективность записи [42]. Помимо этого, есть свидетельства, что наличие в волокне водорода при записи брэгговских структур оказывает негативные эффекты на усилительные свойства активных волокон [2, 44, 45].

Ещё более экзотичным вариантом является реализация интерференционных методов записи при помощи использования в качестве источника фемтосекундного излучения [46-48]. На первый взгляд решение кажется потенциально интересным, так как благодаря своим уникальным свойствам фемтосекундное излучение может помочь преодолеть главную проблему — фоточувствительность материала волокна. Однако, на практике создать эффективную интерференционную схему записи ВБР, используя фемтосекундное излучение, оказывается достаточно затруднительно. Это связано с крайне малым пространственным размером ФС импульса, что вынуждает создавать интерференционные схемы (плечи интерферометра, например) с точностью, превышающей этот размер (порядка 100 мкм и менее). Схемы с применением фазовых масок использовать с фемтосекундным излучением чуть проще, однако малая когерентность излучения также накладывает свои технологические ограничения. Кроме того, для использования масочных технологий требует довольно высоких значений энергии импульсов записывающего излучения из-за необходимости экспонировать сразу значительную площадь маски (или хотя бы части маски), что в случае фемтосекундных источников это не всегда удобно. Также воздействие фокусированного ФС излучения приводит к повреждению элементов оптической схемы (в основном фазовых масок).

Если подытожить, интерференционные методы показывают свою работоспособность, часть из них получила широкое распространение.

Некоторые из них применимы для массовой, промышленной записи ВБР, однако есть общая проблема – низкая фоточувствительность большинства промышленных образцов волокон, которая может быть частично решена, но с описанными выше ограничениями.

1.2.2 Методы направленной записи ВБР

Принципиально иным подходом к записи волоконных брэгговских решёток является применение методов направленной записи. Как правило, в таких системах используются лазерные источники ультракоротких импульсов (УКИ) – субпико-, фемтосекундные лазеры, как правило, видимого или ближнего ИК диапазона, реже УФ-диапазона. Данные методы называются направленными или поточечными благодаря тому, что записывающее излучение фокусируется в одну точку непосредственно в сердцевине волокна и там, путём трансляции фокальной точки, создаётся микроструктура, без применения промежуточных интерферометров. К представителям данной группы методов относятся методы пошаговой записи элемента решетки (штриха) за один импульс (Point-By-Point [17, 18, 49-53], Line-By-Line [52, 54, 55], Plane-By-Plane [56, 57]) и метод сканирования (Core Scanning) [58, 59]. Типичная схема поточечной записи приведена на рисунке 1.2 [60].

В данных методах запись решетки производится сфокусированным излучением фемтосекундного лазера, причем, как правило, за один импульс формируется один элемент (штрих) брэгговской решетки (исключение составляют методы сканирования сердцевины). Волокно перемещается с заданной скоростью относительно точки фокусировки таким образом, что следующий импульс формирует следующий штрих решетки. Таким образом, период решетки определяется скоростью движения волоконного световода и частотой следования импульсов.

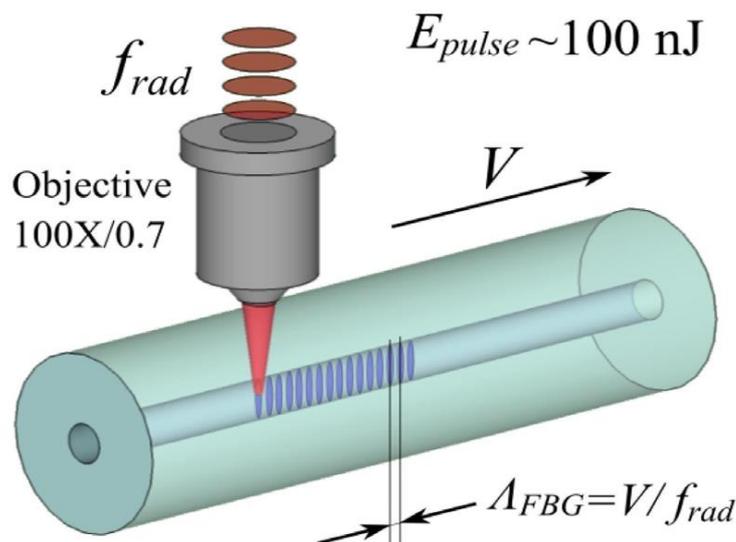


Рисунок 1.2 – Схема поточечной записи ВБР с помощью излучения фемтосекундного лазера [60].

Как уже отмечалось, данная группа методов в качестве записывающего излучения использует излучение УКИ лазеров, благодаря чему решается основная проблема всех интерференционных методов – низкая фоточувствительность волокна. Из-за крайне малой длительности импульса используемого УКИ излучения при фокусировке в фокальной точке достигаются значения интенсивности излучения порядка $10^{13} - 10^{14} \text{ Вт/см}^2$ [61, 62]. Такие значения интенсивности приводят к существенному повышению вероятности многофотонных процессов поглощения. Даже при использовании видимого или ИК-излучения с энергией фотонов 1,1-3,2 эВ возможно воздействие не только на примесные германосиликатные дефекты с уровнем возбуждения 3,7-6,7 эВ [63-65], но и на фундаментальную область поглощения кварцевого стекла, обусловленную шириной запрещенной зоны, которая составляет порядка 8,5-9,3 эВ [66, 67]. Таким образом, для большинства ФС источников при записи брэгговских решеток имеют место 3-5 фотонные процессы.

Методы направленной записи решают и другую проблему интерференционных методов, а именно – ограниченность фазовых масок и интерферометров. Как уже отмечалось, запись с помощью фазовой маски,

является наиболее распространённой технологией, однако каждая фазовая маска может обеспечить запись только в узком спектральном диапазоне (несколько нм). Очевидно, что для работы в широком диапазоне длин волн необходим большой набор масок. Помимо прочего, более универсальные в этом плане пространственные интерферометры мало подходят для массового производства решёток и тоже имеют технологические ограничения и спектральные пределы. В методах же направленной записи период брэгговской структуры определяется непосредственно движением микропозиционеров, которые транслируют волокно относительно фокальной точки (или наоборот, зависит от исполнения конкретной системы) и частотой работы лазера. Понятно, что в этом случае практически не существует спектральных ограничений на записываемые длины волн брэгговских решёток и конфигурации иных получаемых внутриволоконных объектов. Разрешение же получаемых структур зависит от условий фокусировки записывающего излучения и точности работы микропозиционеров.

Ещё одним немаловажным преимуществом поточечных методов записи является возможность записи ВБР без удаления слоя защитного полимера, поскольку для записи решетки используется, прозрачный для полимерного покрытия волокна, спектральный диапазон [17]. При этом, через полимерное покрытие, как и через кварцевую оболочку волокна, проходит несфокусированное излучение и влияние нелинейных эффектов в этих областях пренебрежимо мало. Удаление защитного покрытия может дополнительно приводить к необратимому ухудшению механической прочности зачищенного участка волокна [68-70]. В случае применения фемтосекундного излучения необходимость удаления защитного покрытия присутствует только при использовании непрозрачных покрытий, как правило, металлизированных, толстых графитовых или полимеров со специфическими красителями. Важно отметить, что в литературе встречаются публикации, в которых демонстрируется возможность записи интерференционными методами без снятия защитного полимера [71, 72],

однако данные технологии довольно редки, специфичны, не применяются для массовой записи ВБР и имеют ряд ограничений.

Отдельного упоминания заслуживает формирование методами направленной записи сложных волоконных структур, таких как чирпированные ВБР, решётки с фазовым сдвигом (так называемые π -shift решётки), брэгговские структуры высших порядков, решётки с наклонным расположением штрихов относительно центральной оси волокна и т.д. [73]. В случае интерференционных методов записи для большинства упомянутых структур единственным способом записи является метод фазовой маски. Причём для этого должны применяться специальные фазовые маски, с переменным периодом (в случае чирпированных решёток), с фазовым сдвигом для π -shift или кратно увеличенным периодом, что вносит значительные ограничения. Методы же направленной записи позволяют создавать самые разные структуры, без существенных изменений установки. Как правило, все компоненты подобных установок управляются программно, поэтому ход микроподвижки, частота работы лазера, мощность падающего излучения — это параметры, которые контролируются с помощью компьютера. Управляя данными параметрами можно создавать широчайший спектр различных микроструктур как внутри волокна, так и внутри планарных структур, трудности здесь носят больше инженерный характер, необходимо добиться идеально согласованной работы всех агрегатов системы [74].

Если подытожить, то к неоспоримым преимуществам методов направленной записи можно отнести большую вариативность записываемых структур без необходимости изменять что-либо в установке, способность преодолеть проблему низкой фоточувствительности материала волокна, возможность записывать ВБР без удаления защитного полимера и, как следствие, большая механическая прочность получающихся ВБР.

К недостаткам таких методов можно отнести более низкое качество решёток, по сравнению с интерференционными методами. Данный

недостаток связан с особенностями фокусировки записывающего излучения. Как уже отмечалось, в основе интерференционных методов записи лежит принцип проецирования интерференционной картины, полученной на том или ином интерферометре/фазовой маске, на волокно. Распределение интенсивности записывающего излучения в этом случае будет довольно близко к идеальному синусоидальному. В этом случае всё волокно по длине решётки будет так или иначе экспонировано, а модуляция показателя преломления будет пропорциональна экспонированной дозе. Согласно теоретическим представлениям это наиболее близкий к идеальному модулированный профиль показателя преломления, а значит и сама ВБР будет иметь наилучшие спектральные характеристики, с минимумом боковых и побочных пиков, серых и оболочечных потерь и резонансов высших порядков. В случае же методов направленной записи луч записывающего излучения фокусируется в одну точку, а периодичность структуры обеспечивается совместной работой микроподвижек и лазера. В этом случае, профиль модуляции показателя преломления будет существенно отличаться от синусоидального, так как периодическая структура будет состоять из множества отдельных элементов с довольно резкими границами, а не будет результатом интерференции с гладкими градиентными переходами. Поэтому для решёток, записанных методами направленной записи, данные недостатки будут проявляться в той ли иной мере в зависимости от конкретного метода записи и параметров установки. К примеру, очень распространённым недостатком является наличие коротковолнового хвоста возбуждаемых оболочечных мод, или наличие резонансов старших порядков. Однако для многих приложений качества данных решёток вполне достаточно, а некоторые из вышеописанных недостатков могут и вовсе не играть никакой роли или даже быть полезными для определённых применений. Ещё одним недостатком можно назвать более редкие и дорогие комплектующие самой установки, так как основными элементами любой подобной установки являются фемтосекундный лазер и высокоточные нанопозиционеры.

Самым же значимым недостатком, который зачастую и ограничивает применимость этой группы методов для массового производства ВБР, является невозможность *in situ* контроля процесса записи структур, о чём будет подробно написано в соответствующем разделе. Решению этой проблемы будет посвящена немалая часть настоящей работы.

Если подытожить, то на данный момент самым широко распространённым методом записи ВБР является метод фазовой маски, другие же представители группы интерференционных методов и представители группы методов направленной записи используются больше как лабораторные или узкоспециальные решения. Совершенствование методов направленной записи, увеличение средств контроля процесса записи и более глубокое понимание комплекса происходящих при этом явлений представляет не только научный, но и прикладной интерес и потенциально может привести к возможности более широкого использования данной группы методов вплоть до массового производства ВБР.

1.3 Типология ВБР. Основные явления и свойства

По сложившимся на сегодняшний день понятиям выделяют несколько типов ВБР, которые различаются как по своим свойствам, так и по методам их получения, а соответственно, и по физическим явлениям, лежащих в основе записи того или иного типа брэгговских решёток. Понятно, что именно физические процессы и их особенности будут определять свойства брэгговских структур и их принадлежность к тому или иному типу, поэтому будем рассматривать типологию решёток неразрывно с методами записи.

Физические явления, лежащие в основе классической интерференционной УФ-записи, изучены уже достаточно подробно, существуют модели, хорошо описывающие происходящие явления и способные достаточно точно предсказывать свойства будущих ВБР [1, 33]. Выделяют несколько типов решёток принципиально различающихся по своей природе, это решётки Типа I и Типа II, а также несколько экзотичный тип – Тип In (Тип IIa).

В основе записи решёток Типа I лежит фоточувствительность материала волокна, то есть воздействие УФ излучения на неоднородности и дефекты сетки материала сердцевины волокна, что приводит к перестройкам межатомных связей, образованию центров окраски, что в свою очередь приводит к изменению показателя преломления. Отметим, что изменение ПП имеет положительный знак, то есть в экспонированных областях брэгговской решётки наблюдается повышение показателя преломления. Данное воздействие происходит без физического разрушения материала и его заметной деформации [1]. Решётки данного типа являются одними из самых распространённых и обладают отличными спектральными характеристиками.

Принципиально другим типом ВБР являются решётки Типа II [1, 75]. Данный тип записывается при помощи того же самого оборудования, что и Тип I, однако для записи используется существенно большая мощность записывающего излучения. В результате чего в местах экспозиции в

максимумах интерференции происходит физическое повреждение, разрушение материала волокна, вследствие чего образуется дефект – структурный элемент брэгговской решетки. Решётки данного типа существенно уступают решёткам Типа I по прочностным и спектральным характеристикам, они имеют более неровный спектр и существенно большие шумы, вызванные решёткой. Однако данный Тип решёток имеет некоторые другие преимущества и особенности, к примеру, выдающуюся термоустойчивость, о чём более подробно будет сказано несколько ниже.

Ещё одним видом ВБР, который выделяют в отдельный тип, является Тип In или Тип Pa [1, 76-79]. Решётки данного типа получают следующим образом, на первом этапе производится запись решётки Типа I, затем, когда процесс записи решётки насыщается, запись не прекращают. На втором этапе, со временем под воздействием записывающего излучения решётка Типа I стирается (на спектре это выглядит как уменьшение отражательной способности ВБР), и при продолжении воздействия на месте стёртой решётки появляется новая решётка. Такую решётку и называют Тип In или Тип Pa. Запись данного типа решёток не сопровождается разрушением или повреждением материала сердцевины волокна, хотя и запись производится на несколько больших мощностях, чем запись решёток Типа I. При записи этого типа решёток образуются более стойкие дефекты, вызывающее отрицательное изменение ПП, отсюда и одно из названий такого типа решёток Тип In, где n – значит negative. В основе записи данного типа решёток полагают двуступенчатый механизм. На начальном этапе, воздействие УФ лазера на материал волокна аналогично записи решёток Тип I, то есть благодаря фоточувствительности материала, происходит положительное изменение показателя преломления экспонированных участков ВБР, наблюдается рост решётки с соответствующим длинноволновым сдвигом брэгговской длины волны. Однако дальнейшее экспонирование приводит к появлению локальных напряжений на границе сердцевины и оболочки в области штрихов решётки, что в некоторых случаях

даже приводит к неразрушающей деформации сердцевины [80]. Средний показатель преломления при этом уменьшается, что приводит к потере отражательной способности записываемой решётки с дальнейшим восстановлением оной, и к коротковолновому сдвигу длины волны брэгговского резонанса. Разнонаправленная динамика длины волны брэгговского резонанса является характерной для записи решёток данного типа.

Важную роль в записи данного типа решёток играет легирование материала сердцевины волокна. Помимо повышения фоточувствительности, наличие легирующих примесей создаёт внутренние напряжения в стекле. Наличие достаточного уровня внутренних напряжений в сетке стекла способствует процессу роста механических напряжений, лежащих в основе записи решёток Тип In (Тип IIa) на втором этапе. Поэтому запись решёток вышеупомянутого Тип In наблюдается в основном в высоколегированных волокнах и не встречается, к примеру, в стандартных телекоммуникационных световодах типа SMF-28 Corning,

Отдельно стоит отметить решетки типа Ih, т.е. решетки, записанные в волокнах, предварительно насыщенных молекулярным водородом под высоким давлением. Данный метод позволяет поднять фоточувствительность волокон с низким уровнем легирования сердцевины германием, таких, например, как телекоммуникационное волокно [81]. Динамика записи таких решеток схожа с динамикой формирования ВБР типа I, но в основе формирования брэгговской структуры лежат иные механизмы, связанные с формированием водородосодержащих связей, что обуславливает иные эксплуатационные свойства получаемых структур.

Стоит отметить, что приведённая классификация решёток и та типология решёток, которая будет упоминаться далее в работе, носят общий характер. То есть данные типы решёток однозначно различаются как по своим свойствам, так и по методам получения ВБР. По данным вопросам в научной литературе сложился определённый консенсус. Некоторые авторы

приводят более широкий список типов решёток [82], где выделяют больше типов решёток, которые разнятся по методам и условиям получения. В данной работе мы будем придерживаться более общей, устоявшейся типологии.

Следующие типы решёток будут уже относиться к методам записи при помощи излучения УКИ лазеров. Исторически сложилось, что такие решётки будут иметь в своей типологии приписку IR. К типам решёток, записываемых с помощью УКИ лазеров, относятся Тип I IR и Тип II IR [18, 48, 83-87]. Приставка IR (InfraRed) – дань истории, на заре появления технологии записи УКИ лазеров и их более-менее массового использования, большинство подобных источников были ближнего ИК диапазона. Соответственно и решётки, записанные с их помощью, стали маркировать IR. Даже сейчас большинство УКИ лазеров имеют длину волны генерации в пределах 800-1100 нм. По аналогии с классическими Типом I и Типом II, Тип I IR записывается без видимого повреждения, разрушения материала сердцевины волокна, тогда как Тип II IR, записывается с повреждением. В силу уже упомянутых особенностей УКИ излучения такие источники используются в основном в методах направленной записи. Реализация интерференционных методов записи ВБР на основе УКИ источников встречается сравнительно редко, как правило, используется метод фазовой маски.

В современной научной литературе основной механизм воздействия ФС излучения на прозрачные материалы полагают следующим, имеют место два сосуществующих процесса, многофотонное возбуждение и формирование плазмы твердого тела, в предельных случаях приводящее к лавинному пробое в веществе [88-91]. При воздействии импульса УКИ излучения на материал волокна за счёт многофотонного поглощения в системе происходит возбуждение носителей в зону проводимости. Этим же импульсом данные носители ускоряются электрическим полем, что может приводить к возбуждению других носителей в веществе, и так далее, то есть происходит лавинная ионизация. Так как импульс УК излучения очень

короткий, то в описываемых процессах в основном принимают участие носители заряда (электроны). Помимо прочего, появление большого количества носителей заряда в зоне проводимости дополнительно увеличивает и поглощение на свободных носителях, что приводит к появлению плазмы твёрдого тела. Получается, что взаимодействие носителей друг с другом превалирует над воздействием носителей с кристаллической решёткой, дефектами и тд. Понятно, что данный процесс, как правило, лимитирован длительностью импульса записывающего излучения, эффектами самофокусировки/самодефокусировки и отражающей способностью плазмы, которая увеличивается с увеличением плотности плазмы. После прекращения действия записывающего излучения плазма релаксирует, энергия посредством фононного взаимодействия передаётся уже и кристаллической решётке. Важно отметить, что проявление тех или иных механизмов зависит как от энергии импульса, так и от его длительности. Качественно, ситуация выглядит следующим образом, чем короче импульс, тем меньше времени будет у лавинного пробоя на своё развитие и тем больше равновесие будет смещено в сторону многофотонного поглощения/ионизации. Наглядно приоритет процессов, происходящих в стекле при воздействии на него фемтосекундного излучения в зависимости от энергии и длительности импульса, демонстрирует рисунок 1.3 [92]. Отметим, что абсолютные значения по осям зависят, в том числе, и от степени фокусировки, т.е. плотности энергии импульса в точке воздействия.

Существует несколько возможных сценариев. Когда энергии не слишком много и импульс довольно короткий, будет происходить изотропное перманентное повышение показателя преломления в фокальной точке (область 1, рисунок 1.3). Это ассоциируют с изменениями Тип I, обычно говорят о создании решеток Типа I [93] или Типа I IR [85, 94].

Если же энергии в импульсе будет очень много и импульс достаточной длительности, чтобы лавинный пробой мог в достаточной мере развиваться произойдёт локальное повреждение/разрушение материала, образование

микрополостей как следствие микровзрывов (область 3, рисунок 1.3). Обычно такой режим воздействия используется для микрообработки прозрачных материалов, к примеру, создание микроотверстий, микроканалов, микроканалов и т. д. [95, 96]. Созданные в таком режиме брэгговские волоконные решётки ожидаемо будут относиться к Типу II IR [85, 97].

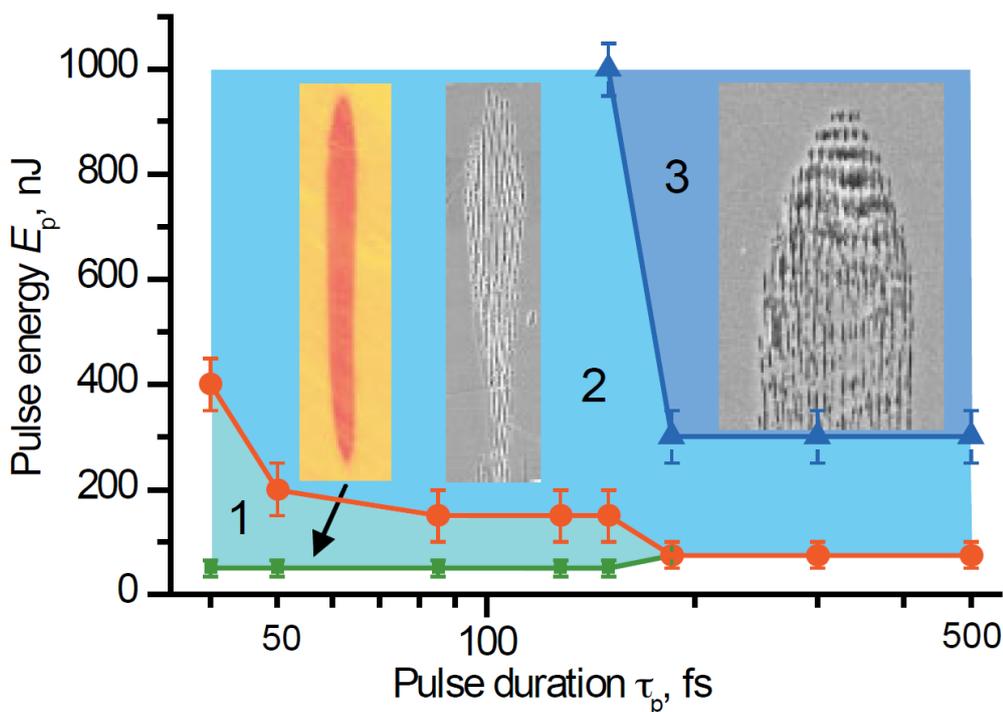


Рисунок 1.3 Результат воздействия фемтосекундного излучения на кварцевое стекло [92].

Для промежуточных значений энергии и длительности импульса будет происходить изменение показателя преломления, но анизотропное (область 2, рисунок 1.3). Анизотропия будет обусловлена созданием микрорешёток. Микрорешётки – есть результат взаимодействия плазмы твёрдого тела с полем индуцировавшего её фемтосекундного импульса. При таком взаимодействии могут наблюдаться процессы интерференции, что и обуславливает появление нанорешетки. Когда плазма остывает, данные колебания плотности застывают и образуют периодические микроstructures [88, 90]. Формирование решетки может сопровождаться и формированием пористой структуры с порами нанометрового размера [98, 99]. В этом случае

в области фокусировки модуляция ПП будет носить анизотропный характер, однако, в силу размера формируемой области, это не оказывает принципиального влияния на распространяющееся по волокну излучение и может восприниматься как однородный дефект с усредненным показателем преломления.

Таким образом, в зависимости от режимов записи и наблюдаемых эффектов могут формироваться брэгговские структуры, имеющие различные эксплуатационные свойства. Кроме того, изменения в области фокусировки лазерного излучения могут приводить к возникновению новых или релаксации существующих напряжений вблизи точки воздействия, что также может вносить свой вклад в спектральные и эксплуатационные характеристики записываемых ВБР.

1.4 Воздействие высоких температур на ВБР

Как уже было сказано, волоконные технологии обладают рядом преимуществ, что позволяет их использовать для решения широкого спектра задач в самых разных условиях. Зачастую, эксплуатация волоконно-оптических приборов происходит в довольно тяжёлых условиях, и неизменной составляющей тяжёлых условий работы являются повышенные температуры порядка нескольких сотен градусов Цельсия, а в некоторых случаях и выше тысячи [100-103]. Поэтому вопрос стабильности работы волоконно-оптических приборов при повышенных температурах является актуальной научной и технической задачей и по сей день.

В научной литературе вопрос, как ведёт себя брэгговская решётка при повышенных температурах, до сих пор остаётся открытым. На данный момент не сформировалось единой теории, которая бы описывала всё многообразие эффектов и явлений, наблюдаемых в поведении различных брэгговских структур при воздействии экстремальных температур. Если случай самых распространённых решёток, записанных интерференционными

методами при помощи УФ лазеров, изучен довольно глубоко и есть устоявшиеся теории [104-106] происходящих в процессе записи и эксплуатации таких решёток процессов и явлений, то в случае решёток, записанных при помощи УКИ лазеров, такого устоявшегося консенсуса ещё не сложилось.

Процессы записи ВБР и процессы их отжига связаны между собой. В самом базовом случае можно рассматривать волокно как невозмущённую систему, тогда процесс записи ВБР вносит в неё некоторые неравновесные изменения. В самом общем случае этот процесс можно рассматривать как образование некоторых обобщённых дефектов, имеющих соответствующие энергетические уровни. Носители могут захватываться на эти уровни, тем самым изменяя структуру вещества и соответственно его показатель преломления. Воздействие же температуры вызывает процессы, при которых захваченные носители за счёт тепловых эффектов выбрасываются с данных энергетических уровней, тем самым приводя систему в её изначальное равновесное состояние.

Данный обобщённый подход описывается широко распространённой феноменологической модели Эрдогана [106]. В данной модели подразумевается, что в процессе записи образуются центры с определённой энергией активации, которые и ответственны за изменение ПП системы. При воздействии температуры эти центры опустошаются, причём процесс этот случайный и зависит как от температуры, так и от времени. В модели Эрдогана постулируется, что данная зависимость имеет вид (5).

$$NISC = \frac{1}{1+A(t/t_1)^\alpha} \quad (5)$$

где t – время эксперимента в минутах. В данной формуле A и α величины безразмерные, а нормировочный множитель $t_1 \equiv 1$ мин. используется для согласования размерности. A и показатель степени α в общем случае зависят от температуры, а в случае изотермического отжига являются константами,

характеризующими динамику распада брэгговской структуры и, следовательно, ее термическую устойчивость.

Параметр NICC (Normalized Integrated Couple Constant) [106] является, фактически, нормированной величиной модуляции показателя преломления и связан с коэффициентом отражения решетки по формуле (6):

$$NICC = \frac{\tanh^{-1}(\sqrt{R})}{\tanh^{-1}(\sqrt{R_0})} \quad (6)$$

где R – текущий коэффициент отражения решетки после отжига измеренный при комнатной температуре, а R_0 – коэффициент отражения решетки до начала эксперимента.

Коэффициент отражения брэгговской решётки R [55] определяется по формуле (7) [21]

$$R = \tanh^2\left(\frac{\pi\eta\Delta n_{mod}L}{\lambda_B}\right) = \tanh^2(\kappa L) \quad (7)$$

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. Более обобщенным и универсальным параметром является сила решетки κ , который и определяет в общем случае величину эффекта, производимого структурой решетки на распространяющееся по волокну излучение на брэгговской длине волны.

Из формул (6) и (7) видно, что параметр NICC является, фактически, нормированной величиной модуляции показателя преломления Δn_{mod} или силы решетки κ .

Как видно из формулы (5), процесс распада ВБР подчиняется степенному закону, а характерное время восстановления структуры, подчиняющейся приведенной выше модели, зависит от температуры. Такой подход оказался довольно продуктивным особенно применительно к классическим решёткам Тип I, записанных интерференционными методами при помощи УФ лазеров. Оказалось, что упомянутые в модели центры

удалось ассоциировать с физическими дефектами и неоднородностями материала волокна, которые появляются/активируются в результате записи. Их поведение соответствует описанной модели, то есть процессы их активации/деактивации обратимы и зависят описанным образом от температуры и времени. Это позволяет экспериментально определить кривую распада решётки при конкретной температуре и экстраполировать эти данные на другую температуру, без необходимости проверять каждую конкретную температуру на практике. Ценность данного подхода в том, что он позволяет прогнозировать поведение ВБР.

Однако краеугольным камнем данного подхода является обратимость вносимых при записи изменений. Если же формируемые дефекты в стекле носят необратимый характер или же имеют некоторые пороговые температуры, выше предела плавления/размягчения самого материала волокна, то такая ситуация уже не вполне описывается данной моделью. Природа вносимых необратимых изменений может быть различна. Предполагается, что такие явления как локальное физическое разрушение материала сердцевины волокна, образование новых кристаллических фаз, образование стойких химических соединений, диффузия некоторых компонентов, релаксация внутренних напряжений приводят к необратимым изменениям показателя преломления, что в свою очередь приводит к отклонению от степенного закона (5). Такие необратимые изменения могут наблюдаться при записи брэгговских решеток при помощи излучения УКИ лазеров, особенно это касается методов направленной записи, в своей природе ведущих к более фундаментальным, необратимым изменениям самого материала.

Важной особенностью волоконных технологий является то, что волокно (в подавляющем числе случаев) является аморфным телом, переохлаждённой жидкостью. При нормальных условиях оно не проявляет свойств жидкости и ведёт себя как твёрдое тело, однако свойства жидкости начинают проявляться с ростом температуры. К примеру, у материала

волокна отсутствует температура фазового перехода из твёрдого состояния в жидкое, и можно говорить только о температуре размягчения, связанной с вязкостью материала. При длительном воздействии высоких температур механическое воздействие уже не приведёт к упругой деформации [107-109]. Именно поэтому, например, механические воздействия на ВБР уже не будут обратимыми. Подобный эффект, к примеру, упоминается в работе [110], в которой, в частности, говорится о возможности при помощи отжига ВБР и механических напряжений варьировать спектральные параметры решеток в некотором диапазоне.

1.5 Термоустойчивость различных типов ВБР

Базовой технологией создания ВБР является их запись с помощью ультрафиолетового излучения в фоточувствительном германосиликатном волоконном световоде. Как было отмечено выше, часто для повышения эффективности записи используют методику насыщения волоконного световода молекулярным водородом под высоким давлением. На практике, из-за относительно низкой устойчивости ВБР, полученных таким способом, к воздействию высоких температур применение приборов на их основе ограничено [41-43]. При этом само кварцевое стекло и волокна на его основе имеют достаточно высокий температурный порог работы. Поэтому вопросы создания ВБР с высокой термической стойкостью остаются актуальными с момента создания первых брэгговских сенсоров и по сей день [60, 111-115].

В литературе встречается множество работ, посвященных технологии создания высокотемпературных брэгговских решеток. И наиболее перспективными, с точки зрения устойчивости к температуре, были признаны два типа ВБР. К первому типу относятся решётки Типа II [82, 100, 116]. Как правило, запись таких решеток осуществляется методами направленной записи при помощи фемтосекундного излучения [85, 117, 118]. Другим, более экзотичным и наиболее термоустойчивым типом ВБР являются так

называемые регенерированные решётки. Такие решётки способны выдерживать длительное воздействие температуры вплоть до 1400 °С [103, 119, 120].

Оказалось, что самые распространённые решётки Типа I обладают довольно слабой термостабильностью и способны выдерживать температуры не более 350-450 °С [82, 100, 121]. Энергия связи полученных в результате UV воздействия дефектов, приводящих к изменению показателя преломления, сравнительно невелика и энергии отжига, даже при относительно невысокой температуре, достаточно, чтобы эффективно раскладывать их.

Другой же тип ВБР – Тип II гораздо более термоустойчив. Публикации указывают на то, что данный тип решёток хорошо себя показывает при высоких и очень высоких температурах, есть данные о стабильной работе таких решёток даже при температуре порядка 1200 градусов и более [82, 100, 116].

Ещё одним типом решёток является Тип II А. Некоторые исследования показывают, что данный тип решёток занимает некоторое промежуточное положение между Типом I и Типом II, они тоже способны выдерживать довольно высокие температуры, порядка 600-700 °С [82, 122].

Решётки Типа I IR [85, 117] представляют собой аналог традиционного Типа I. Однако в случае УКИ записи решётки этого типа обладают несколько большей термостабильностью и способны работать при температурах вплоть до 600 °С

Решётки Типа II IR [85, 117] являются аналогом решёток Типа II. Данный тип решёток тоже записывается с повреждением материала волокна, однако, как было отмечено в разделе 1.3, тоже обладает выдающейся термоустойчивостью (способен выдерживать порядка 1200 °С) [118],.

1.5.1 Ренерированные ВБР

Описанные выше типы решёток имеют свои сильные и слабые стороны и подходят для использования при различных температурах. Самым же необычным типом ВБР для высокотемпературных применений, стоящим особняком, являются регенерированные брэгговские волоконные решётки. Регенерированные решётки выделяют в отдельный тип из-за их специфического метода получения и специфических свойств. Процесс регенерации имеет несколько принципиальных этапов. На первом этапе происходит запись затравочной решётки. Далее затравочную решётку отжигают при определённой температуре, в результате чего затравочная решётка распадается и её отражательная способность падает до нуля, а на ее месте возникает новая (регенерированная) решётка. После окончания процесса регенерации такая решетка остается стабильной длительное время даже при температурах более 1000 °С .

Само понятие регенерации ВБР известно уже достаточно давно. Несмотря на многолетние исследования и различные, предложенные в научной литературе, механизмы, до сих пор нет единой сформированной модели этого эффекта, которая бы объясняла все наблюдаемые закономерности.

Изначально, была выдвинута диффузионная теория, которая подразумевала, что под воздействием записывающего излучения связи легирующих примесей разрушаются. При воздействии высокой температуры может происходить полная диссоциация и диффузия отдельных примесных атомов из экспонированных участков решётки в неэкспонированные и в оболочку. М. Fokine 2002 году в своей работе назвал такой тип решёток CCG – Chemical Composition Gratings [123, 124]. Эффект диффузии материала сердцевины в оболочку из облученных участков при отжиге ВБР проявляется, например, в волокнах с сердцевиной, легированной азотом [80, 125].

Следует отметить, что большинство регенерируемых решеток наблюдались в образцах, запись которых проводилась в германосиликатных волокнах, насыщенных молекулярным водородом. Германий является

довольно большим атомом, имеющим большое количество связей в структуре стекла и его диффузия маловероятна. В этом случае ключевую роль может играть водород. Была предложена теория, в которой основой формирования регенерируемых ВБР предполагалось образование молекулярной воды и диффузия ОН групп. Наличие в процессе записи молекулярного водорода, как стандартного средства повышения фоточувствительности, приводит к возможности образования ОН групп на этапе записи решётки. Далее эти ОН группы могут диффундировать и достраиваться до полноценной молекулы H_2O , которая и будет ответственна за термостабильные изменения показателя преломления [103, 126]. Но данная теория также не описывает в полной мере все наблюдаемые явления. Так, например, регенерация может наблюдаться в волокнах с высоким содержанием германия в сердцевине, решетки в которых были записаны без применения молекулярного водорода [102, 108, 127-129].

Как и в случае теории записи решеток, ряд авторов отдают ключевую роль в формировании регенерируемых брэгговских решеток, перераспределению напряжений в стекле при отжиге брэгговской структуры, что может приводить к появлению модуляции плотности материала волокна [130, 131].

И, наконец, теории, которые очень неуверенно, но начали появляться в литературе, связаны с эффектом кристаллизации стекла. В некоторых работах данная теория только озвучивается как один из возможных механизмов [129], в других – присутствует попытка объяснить возможное влияние образующихся кластеров на формирование регенерируемой решетки [103, 112, 132]. Как правило, такая теория кристаллизации неразрывно связана с присутствующими напряжениями в сетке стекла, в особенности на границе сердцевина/оболочка, и их возможной трансформацией. Немаловажная роль отводится и водороду, который является фактором создания модуляции напряжений в стекле, что и приводит, по мнению авторов, к неравномерной кристаллизации, образующей новую, регенерировавшую решетку [103, 112, 133]. Однако регенерация решеток наблюдалась и в волокне с полностью

удаленной оболочкой, что свидетельствует о наличии механизмов формирования регенерируемой брэгговской структуры внутри сердцевины [134], а также, как отмечалось выше, в волокнах, не прошедших этап насыщения молекулярным водородом.

Как можно видеть, до сих пор не существует стройной теории регенерации. Регенерируемые решетки могут наблюдаться как в высоколегированных, так и низколегированных волокнах, в присутствии водорода или без, записанные УФ-излучением или импульсами фемтосекундного лазера. В данной работе впервые демонстрируется регенерация решетки, записанной методом поточечной записи излучением фемтосекундного лазера в слаболегированном германосиликатном телекоммуникационном волокне Corning SMF-28 без присутствия водорода в технологических процессах. Принципиальным отличием при записи такой структуры является создание локальных, малых по размеру, дефектов в сердцевине волоконного световода, не имеющих прямого контакта с границей сердцевина/оболочка. В статье выдвигается оригинальная гипотеза формирования регенерируемой решетки за счет кристаллизации стекла непосредственно в облученных участках волокна.

1.6 Прочностные характеристики ВБР

Одной из важнейших эксплуатационных характеристик брэгговских решеток является их стойкость к механической деформации, прочность на разрыв, позволяющая использовать их, например, в качестве датчиков деформаций с широким динамическим диапазоном. Также в последнее время активно развивается когерентная рефлектометрия для распределенных сенсорных систем. Такие системы широко используются для контроля протяженных объектов, таких как трубопроводы, путепроводы, мосты и иные инженерные сооружения, а также для охраны периметров в качестве вибрационных и акустических сенсоров [135-146]. Однако у подобных систем имеется один общий недостаток – низкая чувствительность ввиду малой величины рассеянного в волоконном световоде сигнала. Для повышения уровня рассеяния в ряде случаев используются искусственно создаваемые дефекты в виде специально создаваемых фотоиндуцированных штрихов или слабых брэгговских решеток [147-160]. Подобные искусственные дефекты с одной стороны позволяют повысить уровень рассеяния сигнала, из-за чего волокна с такими дефектами иногда называют «искусственными рэлеевскими волокнами» [161], а с другой – создать системы фазочувствительной рефлектометрии с периодическими, записанными на определенном расстоянии, дефектами [149-152, 154, 157, 160].

Для создания подобных структур могут быть использованы лазеры ультрафиолетового диапазона, позволяющие создавать брэгговские решетки благодаря эффекту фоточувствительности [16, 29, 31, 162]. Одним из способов создания протяженных линий с искусственными отражателями, который лишен вышеуказанного недостатка, является запись брэгговских решеток непосредственно при вытяжке волоконного световода [29, 148, 153, 156, 163]. При этом запись решеток таким способом практически не приводит к потере прочностных характеристик световода [163]. Однако такой способ

имеет свои недостатки. Поскольку запись проводится в один импульс, для создания решеток требуется использование заготовок с повышенным уровнем фоточувствительности, что приводит к дополнительным нежелательным потерям [148, 164]. Кроме того, для получения необходимого уровня отражения решетки записываются длиной несколько миллиметров, что обуславливает узкий спектр отражения такой брэгговской решетки, тогда как для эффективной работы в распределенных сенсорных линиях ширина спектра отражения искусственного дефекта должна составлять не менее нескольких нанометров, что связано с возможными температурными перепадами в процессе эксплуатации сенсорной системы, а также с присутствием механических напряжений в сенсорном кабеле. Запись чирпированных решеток не решает проблему, так как с ростом коэффициента чирпа отражательная способность решетки уменьшается [165]. Оптимальным является создание спектрально неселективных дефектов или коротких брэгговских решеток с широким (несколько нанометров) спектром отражения [155, 157, 166, 167]. Такие структуры могут быть записаны после вытяжки световода с использованием классической схемы записи лазерным излучением ультрафиолетового диапазона в многоимпульсном режиме [16, 29, 31, 162]. Но для реализации такой записи участок волоконного световода должен быть зачищен от защитной оболочки, что, даже при последующем перепокрывании, приводит к резкому падению прочностных характеристик брэгговской решетки [68-70].

Именно прочностные характеристики сенсорного световода являются критическим параметром, определяющим технологию создания искусственных отражателей в волоконном световоде. При изготовлении оптического кабеля, а также при его установке, эксплуатации, деформация растяжения световода может составлять до 1% [168, 169] что соответствует усилию на разрыв порядка 0,7 GPa. Как отмечалось выше, этот факт обуславливает и необходимость создания широкополосных отражателей. Многообещающей выглядит запись дефектов и брэгговских решеток с

помощью излучения фемтосекундного лазера, которая позволяет эффективно записывать и слабые брэгговские решетки с широким спектром отражения [50, 69, 170]. Отсутствие необходимости снятия защитного покрытия обуславливает потенциальную прочность решеток, записанных таким способом. Действительно, в работах [71, 72] была продемонстрирована запись брэгговских решеток без снижения прочностных характеристик световода. Однако запись производилась излучением фемтосекундного лазера не поточечным методом, а с применением фазовой маски. При этом записывались решетки Тип I, что сложно обеспечить поточечным методом записи. Решетки Тип II, записанные с применением импульсов с большей энергией, показали крайне низкие прочностные характеристики на уровне 0,5 GPa [71]. При записи решеток поточечным методом требуется большая плотность энергии лазерного излучения, что, очевидно, может приводить к образованию дефектов, уменьшающих прочностные характеристики решеток. Одно из первых исследований в этой области было проведено в работе [62], в которой было показано пятикратное снижение прочностных характеристик световода при записи решетки поточечным методом. Тем не менее, метод, благодаря своим преимуществам, находит все большее применение при записи волоконных брэгговских структур. При этом сколько либо системных исследований прочности таких решеток, ее зависимости от параметров записи, в литературе не встречается.

1.7 Выводы к первой главе

Методы создания волоконных брэгговских решёток на основе УКИ излучения представляют большой научный и практический интерес, так как имеют ряд преимуществ по сравнению с "классическими" интерференционными методами на основе УФ лазеров. За счёт использования УКИ источников удаётся решить основную проблему записи - низкую фоточувствительность материала большинства распространённых

видов волокон. Слабым местом известных методов поточечной записи является довольно ограниченный контроль создаваемых ВБР и зачастую невозможность осуществления мониторинга процесса записи *in situ*. Разработка и совершенствование методов поточечной записи на основе ФС излучения является актуальной научной и прикладной задачей.

Брэгговские решётки, записанные с помощью излучения фс лазера, имеют свойства, отличные от своих аналогов, записанных с помощью УФ источников. Одним из важных отличий является возможность выдерживать более высокие температуры. Помимо этого, в основе записи с помощью УКИ источников лежат несколько иные механизмы, нежели в основе “классической” УФ записи. Отмечается, что решётки, создаваемые методами направленной записи не всегда можно отнести чётко к определённому типу решёток (к Типу I IR или Типу II IR). При некоторых условиях записанная брэгговская структура является комбинированным объектом, в котором присутствуют различные механизмы формирования дефектов.

Важным аспектом комплексного изучения брэгговских волоконных решёток является неразрывное рассмотрение процессов записи ВБР и процессов их термического отжига. Очень часто воздействие повышенной температуры является сопутствующим условием эксплуатации волоконно-оптических приборов. Поэтому длительный высокотемпературный отжиг является не только важным элементом научных изысканий, но и имеет большое прикладное значение. Изменения показателя преломления, индуцированные на этапе записи ВБР, под воздействием высоких температур постепенно релаксируют. Поэтому по динамике изменения спектральных характеристик ВБР при записи и в процессе высокотемпературного отжига можно сделать выводы о природе происходящих при этих процессах явлений. Также, такие феномены как, к примеру, регенерация ВБР при воздействии высоких температур могут дать дополнительную информацию о происходящих процессах.

Исследования механических характеристик ВБР, записанных тем или иным способом, носят важный как прикладной, так и исследовательский характер. С практической точки зрения, определение механической прочности записанных брэгговских структур позволяет определить, их эксплуатационные характеристики, к примеру, для возможности укладки в кабель участка волокна, содержащего ВБР. С научной же точки зрения, эти исследования интересны, для определения выявления механизмов формирования и разрушения фотоиндуцированных дефектов при различных режимах их записи.

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ЗАПИСИ И ИССЛЕДОВАНИЯ ВБР

2.1 Методика записи ВБР

Лимитирующим фактором поточечных методов записи [49, 52, 53] является дифракционный предел, обусловленный используемой длиной волны излучения, который ограничивает минимальный размер элементов создаваемой структуры. В случае записи брэгговских решеток типичное значение периода структуры составляет 300-600 нм для брэгговских длин волн в наиболее востребованном диапазоне 0,9-1,6 мкм. Таким образом, одной из основных технологических задач является минимизация экспонируемой области за счет выбора меньшей длины волны излучения. Кроме того, использование более коротких длин волн позволяет снизить нелинейность многофотонных процессов. С другой стороны, генерация гармоник высших порядков может приводить к высоким потерям в энергии импульса. В нашей работе был использован иттербиевый волоконный фемтосекундный лазер Оптосистемы FL300 с длиной волны генерации 1064 нм и максимальной энергией в импульсе 2 мкДж при его длительности порядка 400 фс. Излучение лазера было преобразовано во вторую гармонику (532 нм) что позволило уменьшить эффективную область фокусировки, минимизировав в достаточной степени область эффективной экспозиции материала световода и при этом сохранить уровень необходимой энергии в импульсе. Длительность преобразованного импульса на данной длине волны составляла порядка 320 фс. Эффективная запись решетки при данной длине волны и длительности импульса лазерного излучения наблюдается при энергиях в импульсе примерно от 40 до 200 нДж. Этот диапазон энергий соответствует данным, полученным другими исследователями [53, 171]. Исходя из параметров лазерного луча и оптической схемы, плотность

мощности лазерного излучения в центре фокального пятна можно оценить на уровне $10^{13} - 10^{14}$ Вт / см².

Одной из ключевых проблем существующих методов поточечной записи является невозможность контроля параметров получаемых брэгговских структур непосредственно в процессе записи. Запись решетки происходит в один проход по предварительно заданным параметрам. Однако, для записи решетки поточечным методом с заданными характеристиками, такими как брэгговская длина волны, контраст (коэффициент отражения), ширина спектра отражения, необходимо с высокой точностью контролировать уровень индуцированного изменения показателя преломления в местах облучения а, следовательно, и мощность записывающего лазерного излучения. Кроме того, контролю подлежит и позиционирование фокальной области в плоскости сечения световода. Ситуация резко усложняется, если есть необходимость записи несколько одинаковых решёток в едином отрезке волокна. В этом случае незначительная ошибка позиционирования или случайные флуктуации мощности могут привести к выходу параметров решётки за пределы расчётных и необходимости переписывать весь массив. Особенно следует отметить, что запись решеток осуществляется в многофотонном режиме, т.е. даже минимальные отклонения в средней энергии импульса могут существенно влиять на получаемый результат.

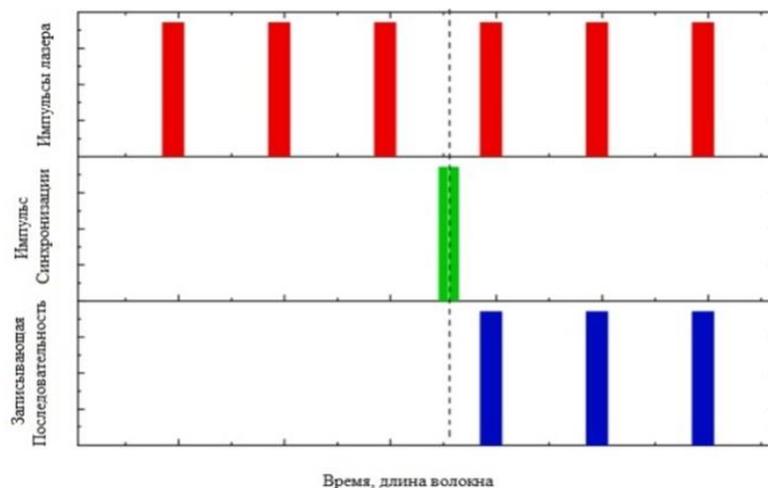
В качестве решения данной проблемы в нашей работе мы предлагаем новый подход высокоточного поточечного изготовления ВБР, а именно технологию с использованием многопроходной режима записи с промежуточным спектральным контролем параметров решетки. Идея многопроходной записи ранее была реализована для длиннопериодных решеток для увеличения их контраста [172]. Основной проблемой, ограничивающей применение такого метода для формирования брэгговских структур, является сложность синхронизации положения начала записи брэгговской решетки, из-за чего повторная запись ВБР происходит со

случайным сдвигом, приводя к ухудшению, а в ряде случаев, к стиранию ранее записанной решетки. Синхронизация положения позиционера с волокном и импульсов лазера сама по себе не является проблемой. Однако, в большинстве фемтосекундных лазеров последовательность импульсов формируется независимо от внешнего синхроимпульса, из-за чего и происходит сдвиг фазы при записи решетки. Для записи ВБР мы используем частоты в диапазоне 100 Гц – 2 кГц. Так как в большинстве лазеров внешняя синхронизация разрешает работу лазера через открытие внешнего затвора (с разными вариантами реализации) и пришедший на лазер внешний синхроимпульс никак не связан с внутренними режимами работы элементов лазера, то схема, работающая в указанном диапазоне частот, будет иметь неопределенность во времени прихода первого импульса после разрешения открытия затвора в 0,5-10 мс (рис. 2.1а). Получается, что при стандартных скоростях подачи микпозиционеров порядка 0,5-2 мм/сек, неопределенность в позиционировании стартового штриха может достигать величины периода самой записываемой брэгговской структуры. По этой причине, при повторном проходе новая структура может быть записана со случайным сдвигом (случайной фазой в диапазоне 2π) относительно записанной ранее решетки, что может привести к некорректному формированию структуры и потере характеристик брэгговской решетки.

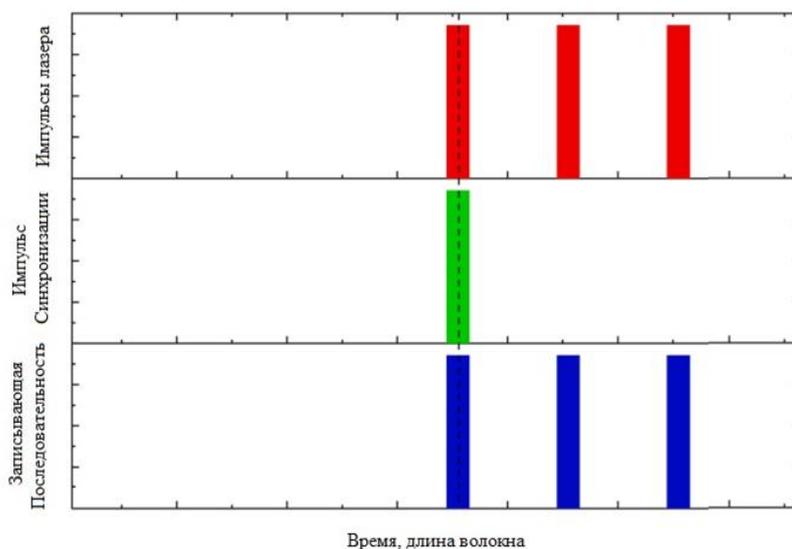
Возможным решением могла бы стать синхронизация позиционера с волокном по синхроимпульсу от лазера. Но запись при постоянной скорости движения волоконного световода требует время на ее стабилизацию, из-за чего крайне затруднительно обеспечить такой тип синхронизации.

Мы модифицировали схему работы лазера таким образом, что синхроимпульс запускает не разрешающий сигнал на открытие затвора, а генератор, обеспечивающий низкочастотную последовательность импульсов на акустооптический модулятор. Таким образом, первый импульс формируется в фиксированный период времени с точностью, заданной временным периодом между лазерными импульсами, идущими от

компрессора импульсов, т.е., в нашем случае, с точностью в 1 мкс, что на 3-4 порядка лучше, чем с простой синхронизацией по затвору. Таким образом может быть обеспечена высокая степень воспроизводимости положения штрихов брэгговской решетки при многочисленных проходах (рис. 2.1б).



а)



б)

Рисунок 2.1 – Режимы работы лазера при записи решетки при простой синхронизации затвора (а) и с помощью новой схемы синхронизации генератора второго акустооптического модулятора (б).

При таком подходе для обеспечения высокой воспроизводимости параметров брэгговской решетки, ее запись происходит с изначально меньшей мощностью излучения, но в несколько проходов, имитируя таким образом контроль дозы, как при записи решеток с помощью ультрафиолетового излучения. По результатам каждого прохода можно изменять среднюю энергию лазерного импульса для достижения требуемого результата с наперед заданной точностью. При этом, вероятность ошибки, возникающей из-за неверного позиционирования или из-за каких-либо ещё случайных факторов, в случае нескольких проходов может быть минимизирована или вовсе исключена.

Описанный выше принцип лёг в основу создания экспериментального комплекса для записи ВБР. Установка состоит из оптического стола на пневмоопорах, на котором установлено каменное основание. На данном основании смонтированы нанопозиционеры и большая часть оптической схемы. На рисунке 2.2 приведена принципиальная схема установки [74, 170].

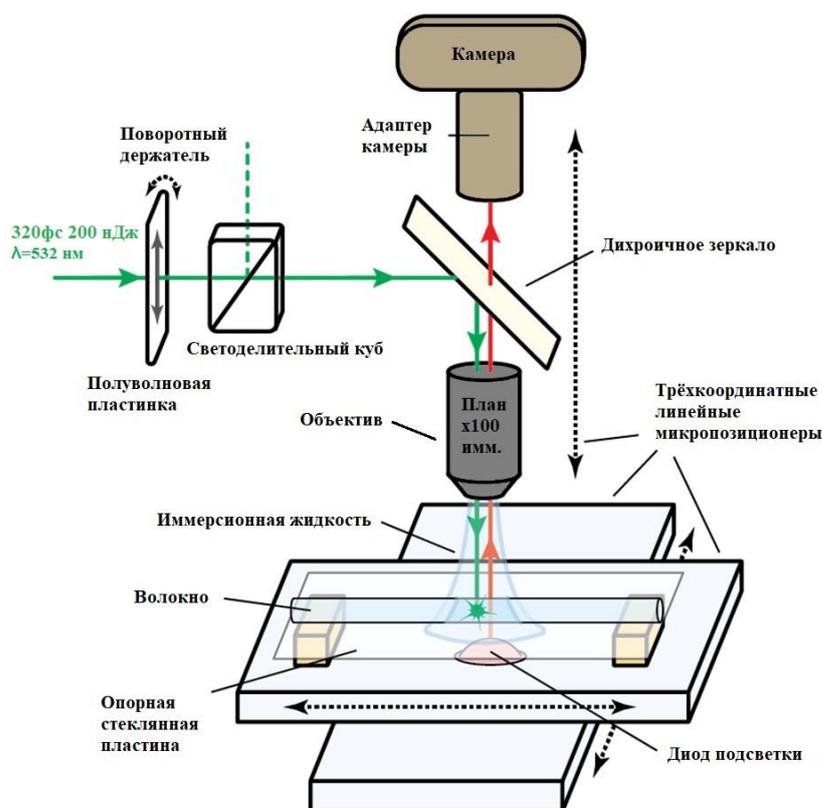


Рисунок 2.2 – Принципиальная схема установки для многопроходной записи волоконных брэгговских решёток при помощи излучения фемтосекундного лазера.

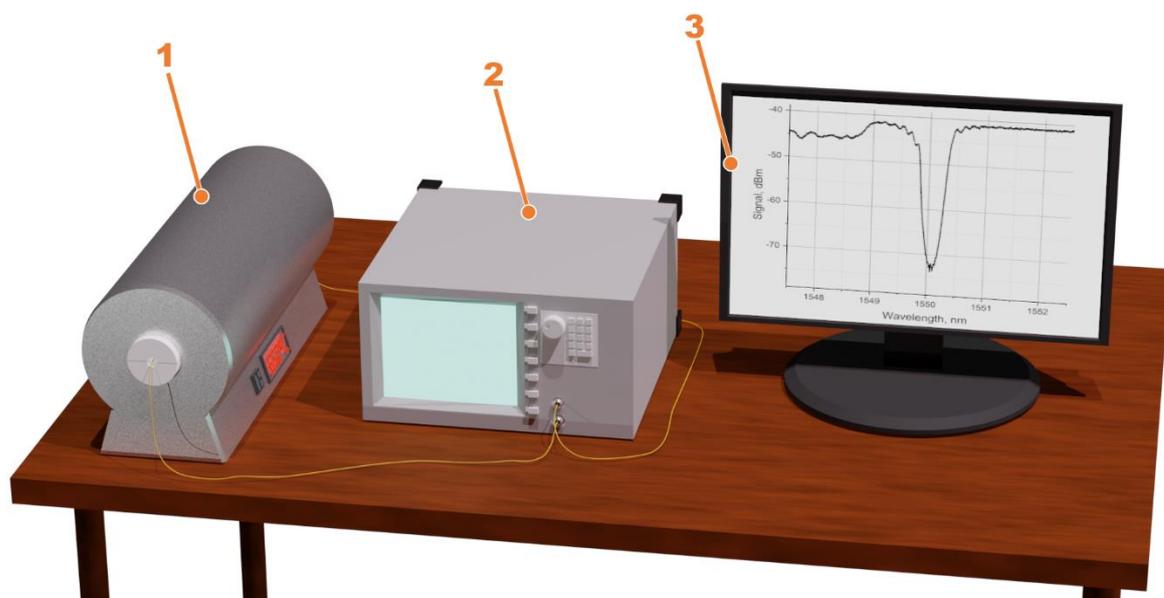
Фемтосекундное излучение лазера 1064 нм попадает в блок удвоения частоты, из которого выходит излучение на длине волны 532 нм. Далее данное излучение, проходя через оптическую систему, попадает на полуволновую пластину в поворотном держателе и далее проходит через светоделительный куб. Совместным действием моторизированной полуволновой пластины и светоделительного куба осуществляется контроль мощности излучения в системе. Далее излучение попадает уже непосредственно в объектив, который и фокусирует его. На каменном основании смонтированы трёхкоординатные нанопозиционеры на основе линейных сервоприводов, на вертикальной оси крепится объектив, на горизонтальных двух осях расположен держатель для волокна. Также на вертикальной оси установлена камера, которая осуществляет контроль процесса записи и служит как для предварительного наведения и настройки системы, так и для осуществления контроля технического процесса непосредственно во время записи. В состав экспериментального комплекса входят источники и приёмники излучения. Контроль спектра осуществляется непосредственно в процессе записи. Таким образом, при помощи фемтосекундного лазера, нанопозиционеров и оптической системы осуществляется процесс создания ВБР методом поточечной записи (Point-By-Point) в режиме «Single Shot», а за счёт предложенной нами системы синхронизации работы лазера и микроподвижек система может работать в многопроходном режиме, который позволяет осуществлять высокоточную запись ВБР с контролем и корректировкой выходных параметров решетки.

2.2 Термические исследования ВБР.

Для исследования экспериментальных образцов под действием температуры был выбран метод длительного изотермического отжига [43, 121, 173-178]. Как было отмечено выше, феноменологическая модель Эрдогана, предполагающая степенной закон термической релаксации дефектов и описывающая обратимую трансформацию фотоиндуцированных центров, не описывает необратимые изменения, происходящие, например, при регенерации решетки, при необратимых процессах диффузии, кристаллизации или неупругой деформации. Такие изменения будут проявляться на кривой изотермического отжига в виде отклонения от «классической» степенной функции деградации решетки.

Установка состоит из 2 основных агрегатов, это анализатор оптического спектра Agilent 86140В со встроенным источником и лабораторная трубчатая печь Nabertherm R50/500/12 (рисунок 2.3). Исследуемая ВБР помещается в капилляр, который установлен в печи. Использование капилляра помогает не допускать касания волокна нагревательных элементов печи. Далее решётка выдерживается при заданной температуре длительное время. Благодаря своей конструкции трубчатая печь внутри себя поддерживает температуру, при этом колебания температуры не превышают 1 градус. Анализатор спектра соединён с компьютером, что позволяет осуществлять автоматизированный сбор данных. Благодаря этому удалось увеличить время наблюдения и количество получаемых данных

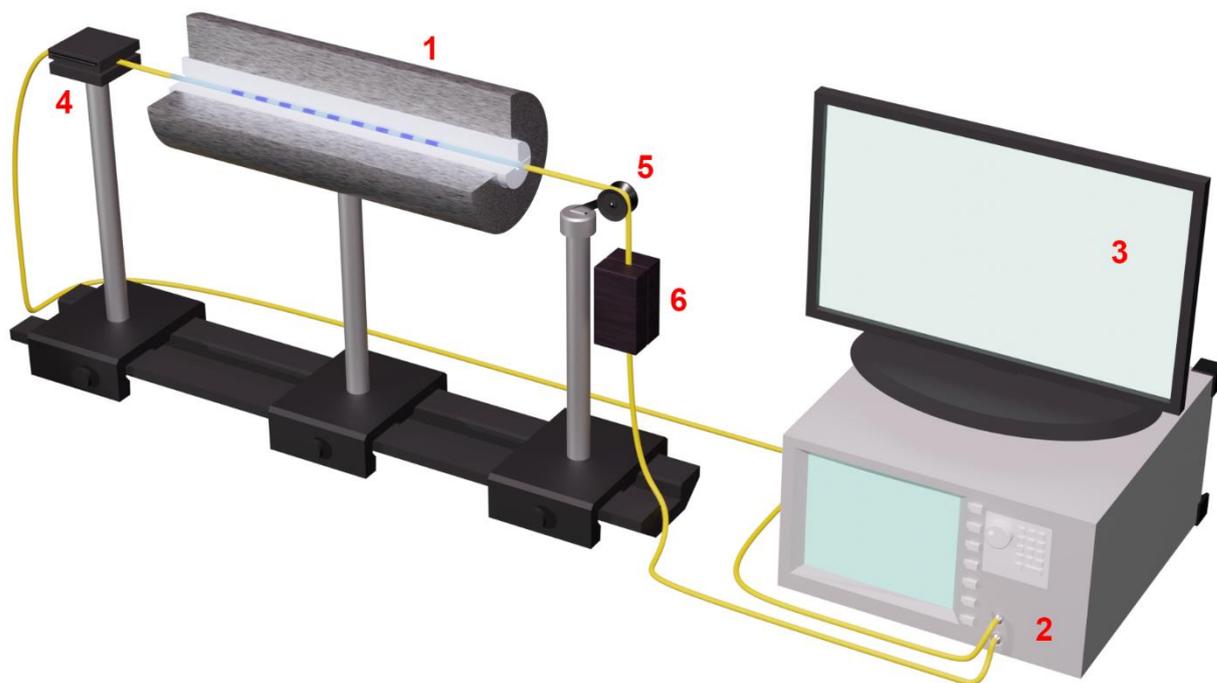
Стоит отметить, что при длительном воздействии высоких температур даже незначительные механические напряжения волокна могут вызывать его неупругие деформации и, как следствие, необратимые изменения параметров брэгговской структуры.



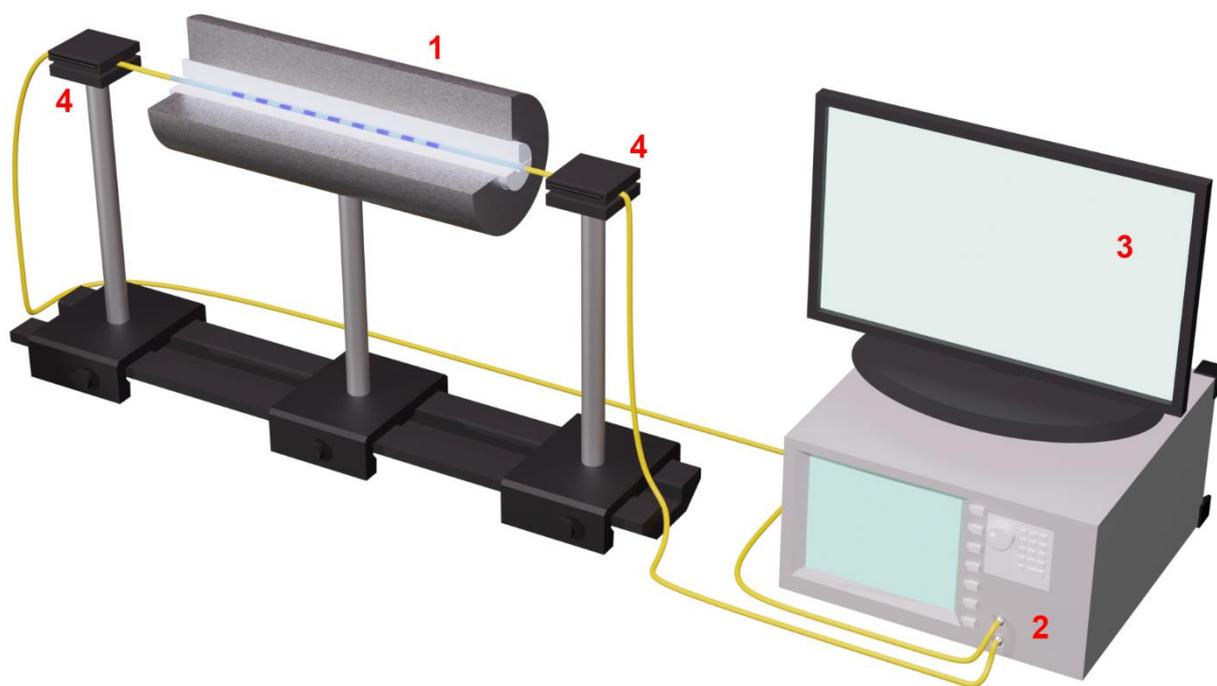
1 – трубчатая печь, 2 - анализатор оптического спектра Agilent 86140В со встроенным источником излучения, 3 – компьютер.

Рисунок 2.3 – Схема экспериментальной установки для длительного изотермического отжига

Для качественного понимания того, как ведут себя параметры брэгговских решёток при механическом воздействии на них при повышенных температурах, был предложен эксперимент с изотермическим отжигом решетки и контролируемым уровнем натяжения волокна (рисунок 2.4). ВБР помещалась в печь малого размера, один конец оптического волокна надёжно фиксировался недалеко от входа в печь, к другому же концу оптической линии через блок крепился груз. Груз выполнял функцию контролируемого механического натяжения (рисунок 2.4а). В другом же варианте эксперимента использовалась аналогичная по параметрам решётка, оба конца оптической линии надёжно фиксировались на специальных столиках таким образом, чтобы обеспечить максимально ненапряжённое состояние ВБР внутри печи (рисунок 2.4б). Сравнение результатов отжига решёток без натяжения и с натяжением явно показывают роль возможных механических напряжений в эволюции параметров ВБР при длительном воздействии высоких температур.



а)



б)

1 – малая трубчатая печь, 2 – анализатор оптического спектра Agilent 86140В со встроенным источником излучения, 3 – компьютер, 4 – держатель волокна с возможностью крепления волокна, 5 - вращающийся блок, 6 – груз на магнитном креплении.

Рисунок 2.4 – Схема экспериментальной установки для изотермического отжига с контролируемым натяжением.

2.3 Механические испытания

Одним из немаловажных параметров записываемых ВБР является их механическая прочность. Как уже отмечалось, запись решётки или иного внутриволоконного дефекта на участке волокна таки или иначе снижает его прочностные характеристики. Различные по своей природе дефекты будут приводить к различной потере прочности участка волокна. Проведя сравнительные испытания ВБР, записанных при различных условиях, с прочими видами волоконных структур, можно делать выводы, относительно физической природы и некоторых свойств вносимых при записи брэгговских решёток изменений материала. Эта информация дополнит картину, включающую в себя наблюдаемые изменения спектральных характеристик волоконных брэгговских решёток на этапе их записи в различных режимах, а также динамику изменений параметров ВБР во время термических испытаний.

Механические испытания проводились на специально сконструированном стенде для разрыва волокна. На фиксированном расстоянии на двух держателях крепятся концы участка волоконного световода с брэгговской решеткой. Одна из площадок установлена на прецизионном регулируемом микропозиционере. Один из концов волоконного световода подключен к портативному спектрометру, измеряющему спектр отраженного сигнала, MicronOptics SM125-200. Растяжение волокна происходит путем смещения микропозиционера, а величина относительного удлинения контролируется по величине смещения спектра отражения брэгговской решетки. Микропозиционер перемещается плавно с заданной скоростью. Эксперимент проводится до момента разрыва волоконного световода, при котором фиксируется последний спектр отражения. При длине базы между крепежом световода в 190 мм, средняя скорость удлинения при разрыве составляла 0.01 мм/с, то есть скорость относительного удлинения составляла примерно 0.003/мин.

Известно, что факт разрыва участка волокна с исследуемым образцом носит вероятностный характер. Поэтому для исследований разумно использовать статистический подход, который подразумевает испытание многих идентичных образцов в одинаковых условиях, что позволит сделать вывод и получить результаты на основе статистической выборки.

2.4 Выводы ко второй главе

Впервые была предложена, реализована и запатентована новая методика многопроходной записи ВБР на основе фемтосекундного лазера. Данная методика является глубокой модификацией известного метода направленной записи Point-by-Point в режиме Single Shot. Предложенная нами технология существенно расширяет возможности контроля технологического процесса создания волоконных брэгговских структур. Многопроходная схема позволяет осуществлять *in situ* мониторинг параметров изготавливаемой ВБР и оперативно подстраивать параметры установки между итерациями записи для достижения заданных параметров решётки. Данный подход позволяет использовать саму создаваемую брэгговскую решётку как чувствительный элемент для анализа эффектов взаимодействия материала с фемтосекундным лазерным излучением.

Для комплексного изучения процесса записи ВБР предложенным методом и параметров полученных образцов брэгговских решёток использовались стандартные методики исследования спектров и метод изотермического отжига. В качестве контрольных образцов отжигу подвергались и брэгговские структуры, записанные по “классической” технологии с применением фазовой маски излучения УФ-лазера. Для дополнительных экспериментов использовалась вариация изотермического отжига с контролем натяжения участка волокна с исследуемой ВБР.

Дополнительно были проведено исследование механической прочности ВБР, записанных при различных режимах работы фс-лазера.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЗАПИСИ, МОДЕЛЬ И ОБУЖДЕНИЯ

3.1 Запись ВБР при помощи экспериментального записывающего комплекса

В данном разделе представлены результаты записи брэгговских решеток предложенным многопроходным методом. На рисунке 3.1 представлены спектры пропускания брэгговской решетки в зависимости от количества проходов при ее записи. Запись решеток производилась в стандартном телекоммуникационном волокне Corning SMF-28e без удаления защитного полимера. Измерение спектров проводилось с помощью анализатора оптического спектра Agilent 86140B с разрешением по длине волны 0,06 нм. Средняя энергия импульса лазера при каждом проходе составляла 47 нДж. Длина решетки составляла 5 мм.

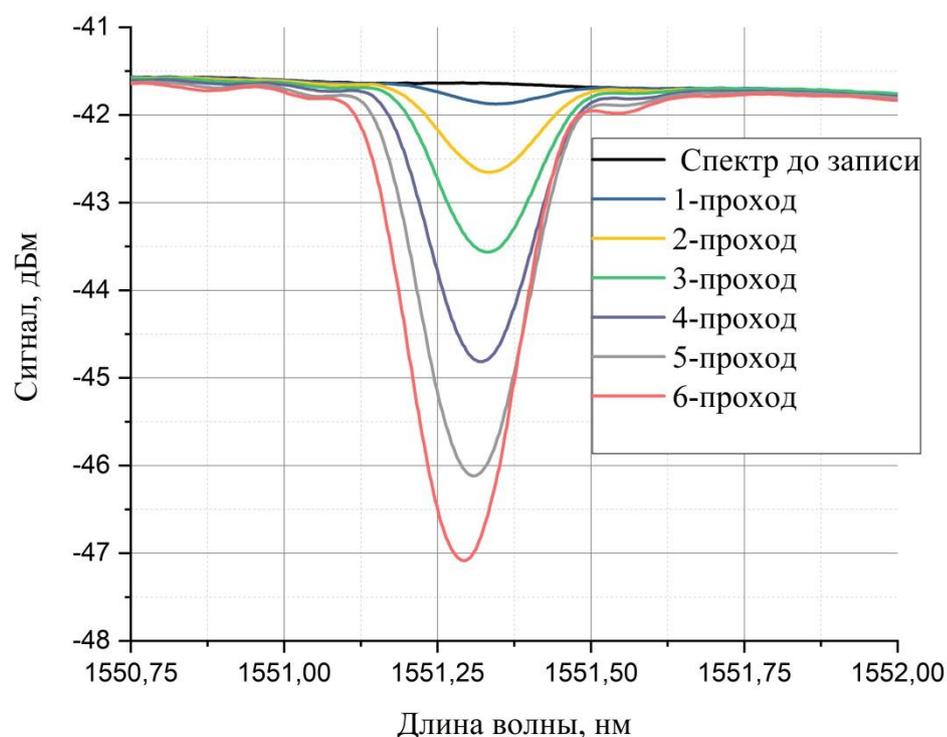


Рисунок 3.1 – Изменение спектра пропускания брэгговской решетки в зависимости от количества итераций записи.

Как видно из рисунка 3.1, наблюдается монотонный рост контраста (отражения) брэгговской решетки. Качество спектра ВБР на каждой итерации записи хорошее, спектры ровные, без заметных артефактов, при этом полная ширина брэгговской структуры $\delta\lambda$ составляет величину порядка 0,4 нм, что является близким к теоретическому значению спектра идеальной брэгговской структуры с данной длиной $L=5$ мм [5]. Это свидетельствует о высокой точности позиционирования записываемой структуры при многопроходной записи (8):

$$\delta\lambda = \frac{2\lambda_B}{N_B} \sqrt{1 + \left(\frac{\kappa L}{\pi}\right)^2} \quad (8)$$

где $N_B=L/\Lambda$ – количество штрихов решетки, Λ – ее период, а κ – постоянная связи, иначе называемая силой решетки, которая, как следует из формулы (7), определяется соотношением (9) [5]:

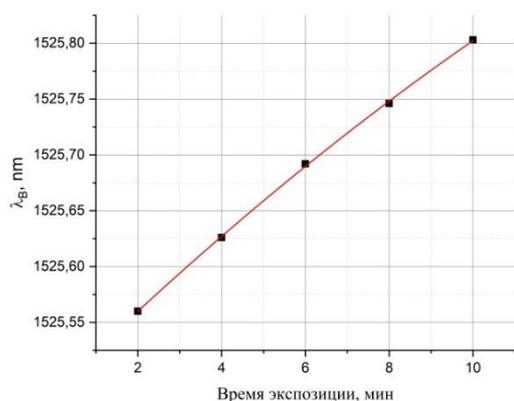
$$\kappa_B = \frac{\pi\Delta n_{\text{mod}}\eta}{\lambda_B} \quad (9)$$

В дальнейшем для удобства мы будем использовать обобщенную величину $\eta\Delta n_{\text{mod}}$ характеризующую контраст брэгговской решетки. Расчет данной величины из уровня отражения ВБР можно осуществить с помощью формулы (9) (на основе формулы (2)):

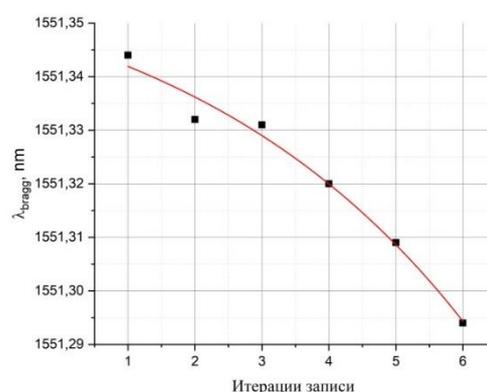
$$\eta\Delta n_{\text{mod}} = \frac{\lambda_B \tanh^{-1} \sqrt{R}}{\pi L} \quad (10)$$

Как уже отмечалось, применение новой методики многопроходной записи позволяет наблюдать изменение параметров решетки, которые отражают процессы, происходящие в сетке кварцевого стекла при воздействии на него фемтосекундного излучения. Получается, что сама

решётка становится датчиком изменений, происходящих в ней самой при многократном воздействии фокусированного фемтосекундного излучения на материал волокна. Так, например, при классической записи решеток в том же типе волоконного световода, но с помощью ультрафиолетового излучения, в облучаемых участках показатель преломления увеличивается с ростом экспонированной дозы (времени облучения) (рис.3.2а) [162]. В случае поточечной фемтосекундной записи видно, что брэгговская длина волны решетки λ_B смещается в сторону коротких длин волн (рис.3.1 и рис.3.2б), что, очевидно, свидетельствует об уменьшении среднего эффективного показателя преломления (n_{eff}) решетки исходя из формулы (1) за счет уменьшения показателя преломления облучаемых участков световода, поскольку период брэгговской структуры Λ , очевидно, остается неизменным. Причины наблюдаемых изменений будут подробно рассмотрены в следующем разделе.



(а)



(б)

Рисунок 3.2 – Изменение брэгговской длины волны при записи излучением эксимерного УФ-лазера (а) [162] и с помощью фемтосекундного излучения (б).

Однако стоит отметить, что фотоиндуцированные изменения показателя преломления не всегда приводят к пропорциональному увеличению модуляции показателя преломления в структуре решетки. Как известно, брэгговская длина волны отражает среднее изменение показателя преломления, согласно формуле (9), тогда как уровень отражения решетки

указывает на величину модуляции показателя преломления, или, в нашем случае, на величину $\eta\Delta n_{mod}$. На рисунке 3.3 показана динамика изменения данной величины в процессе многоитеррационной поточечной записи. Увеличение размеров фотоиндуцированного дефекта может приводить к «размытию», уменьшению контраста брэгговской структуры что, очевидно, будет отражаться и на динамике изменения параметра $\eta\Delta n_{mod}$.

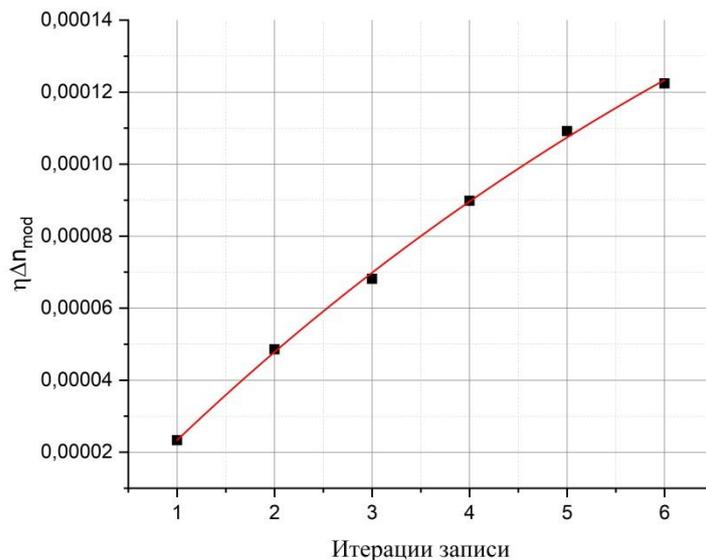


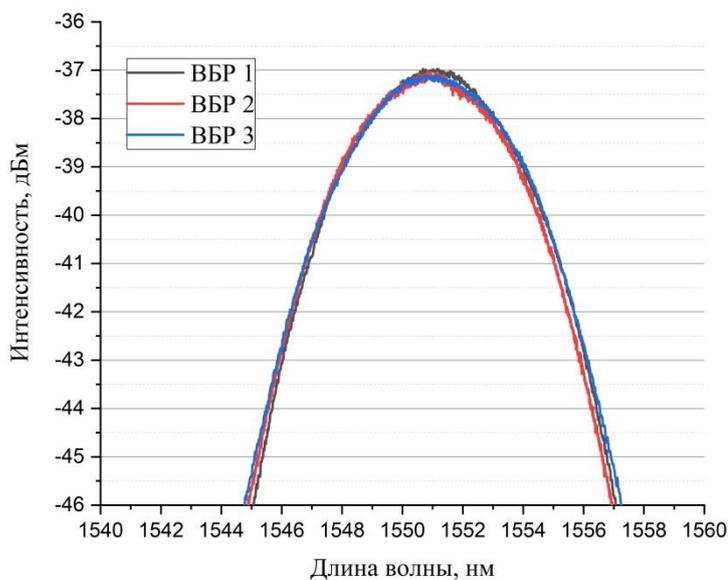
Рисунок 3.3 – Изменение контраста брэгговской структуры $\eta\Delta n_{mod}$ от количества итераций записи.

Как было отмечено во введении, для ряда задач имеется необходимость записывать решетки со строго одинаковым и хорошо контролируемым уровнем отражением. К таким задачам относятся, например, запись решеток для квазираспределенных акустических или сейсмических сенсорных систем, принцип работы которых основан на анализе интерференционной картины между двумя соседними слабыми брэгговскими решетками с помощью когерентного рефлектометра [150, 159]. Контраст интерференционной картины, а, соответственно, и чувствительность датчика напрямую зависят от степени совпадения решеток по длине волны и уровня отражения. При этом, волоконная линия может содержать до нескольких десятков и даже сотен решеток.

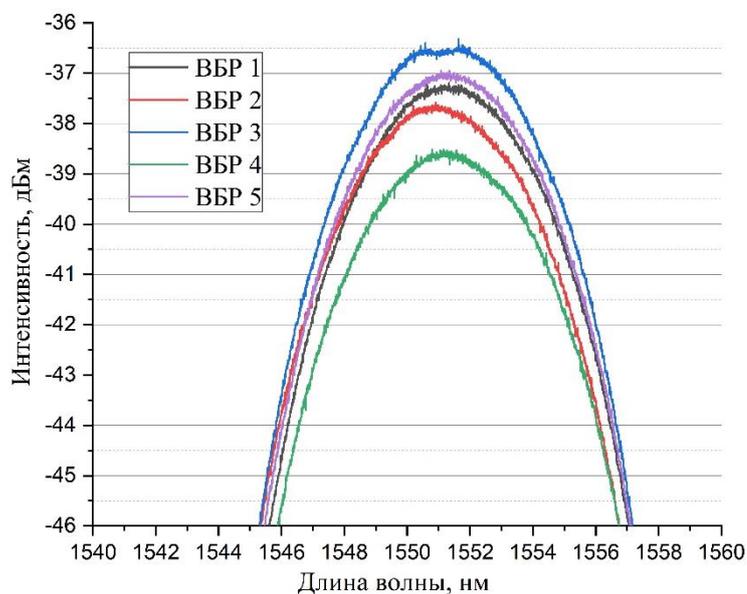
Другой задачей является создание структур резонаторов волоконных, в особенности одночастотных, лазеров, собранных как по классической схеме с двумя зеркалами [2, 179, 180], так и DFB-лазеров, представляющих собой длинную решетку, имеющую в своей структуре фазовый сдвиг [2, 181, 182].

Для таких задач точный контроль параметров записываемых решеток является критически важным. В случае поточечной записи такой контроль возможно осуществить с помощью предложенного многопроходного метода записи. После каждой итерации можно корректировать мощность излучения постепенно приближаясь к желаемому результату по уровню отражения формируемой брэгговской структуры. На рис.3.4а показан результат такой записи в виде спектра отражения трех одинаковых решеток. Особенным требованием к решеткам, работающим во всепогодных сенсорных линиях, является максимально возможная ширина спектра решетки, определяемая либо чирпированным периодом, либо, согласно формуле (8), малой длиной решетки L . Широкий спектр решеток необходим для их эффективного согласования с лазерным источником излучения сенсорной системы при различных температурах, а также при наличии возможных деформаций решеток, появившихся при изготовлении сенсорного кабеля. Решетки, спектр которых приведен на рисунке 3.4а, были записаны без чирпа и имели длину $L=0,1$ мм. Запланированный уровень отражения каждой из них составлял 0,1% (-37 дБм), а ширина спектра на полувысоте $\text{FWHM}=7$ нм. Как видно из графика, во всех трех образцах удалось воспроизвести запланированные параметры с точностью по отражению не хуже 0,2 дБ. Каждая из решеток была записана с помощью 4-10 итераций. На рисунок 3.4б для сравнения приведены спектры аналогичных решеток, записанных за 1 проход по классической схеме поточечной записи и одинаковыми заданными параметрами лазера. Видно, что разброс параметров решеток довольно значительный, несмотря на то, что записывались они при идентичных условиях.

На рисунке 3.5 показана рефлектограмма сенсорной линии для когерентной распределенной системы опроса, содержащей 34 слабые брэгговские решетки, записанные многопроходным методом. Как видно из графика, разброс отражения решеток составляет не более $\pm 0,5$ дБ, что соответствует заданному при изготовлении линии параметру.



(а)



(б)

Рисунок 3.4 – Спектры отражения трех слабых решеток, записанных с помощью многопроходного поточечного метода (а) в сравнении со спектрами пяти решёток, записанных в однопроходном режиме (б).

Таким образом, многопроходный метод формирования ВБР с помощью технологии поточечной записи фемтосекундным излучением лазера предоставляет собой как удобный инструмент для высокоточной записи брэгговских структур, так и метод изучения особенностей многофотонного взаимодействия лазерного излучения с сеткой стекла. Показано, что описанная методика позволяет с высокой точностью записывать широкий спектр волоконных брэгговских решёток.

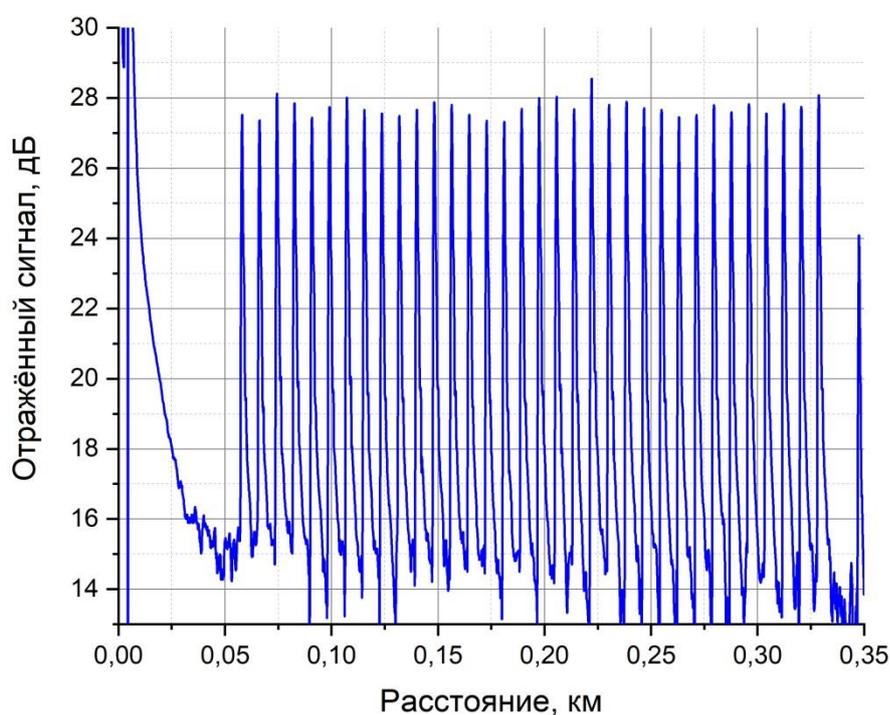


Рисунок 3.5 – Рефлектограмма сенсорной линии, содержащей 34 слабых ВБР, записанных в многопроходном режиме.

Отдельно следует выделить тот факт, что наблюдаемый на рисунках 3.1 и 3.2б коротковолновый сдвиг длины волны брэгговского резонанса говорит об отрицательном изменении среднего эффективного показателя преломления в процессе многопроходной записи. Можно сделать предположение о наличии отрицательной составляющей изменений ПП материала сердцевины волокна и её увеличении с количеством проходов записи. Это важно отметить для дальнейших рассуждений.

3.2 Механизмы формирования ВБР

Для выявления закономерностей создания ВБР в многопроходном режиме и механизмов, ответственных за их формирование, были проведены эксперименты, в которых варьировалась мощность записывающего излучения. Запись брэгговских решёток проводилась в волокнах с различной исходной фоточувствительностью, а именно, в стандартном телекоммуникационном волокне Corning SMF-28, имеющем низколегированную германием сердцевину, в волокне с нелегированной кварцевой сердцевиной (SiO_2), а также в фоточувствительном волокне с сердцевиной, легированной германием и бором (GeB).

Варьирование мощности записывающего излучения позволяло оценить пороговые, для каждого волокна, эффекты, а именно порог начала записи ВБР, порог различных переходных процессов. Кроме того, подбор мощности позволял с большей точностью наблюдать изменения в параметрах брэгговских решеток, а именно, особенности изменения брэгговской длины волны, а следовательно, и изменения среднего показателя преломления. Использование волокон с различным составом, позволяло определить особенности влияния исходной фоточувствительности световодов на процесс записи ВБР.

Важным фактором при записи ВБР является уровень пиковой мощности лазерного излучения. При малой мощности наибольшим образом должны проявляться эффекты, связанные с фоточувствительными центрами с меньшей, по сравнению с величиной запрещенной зоны, энергией. Эффект записи на низких энергиях заметен слабо, практически отсутствует сдвиг брэгговской волны. Оценка уровня отражения проводилась с помощью брэгговского интеррогатора MicronOptics SM125-200. Результаты экспериментов представлены на рисунках 3.6, 3.7 и 3.8.

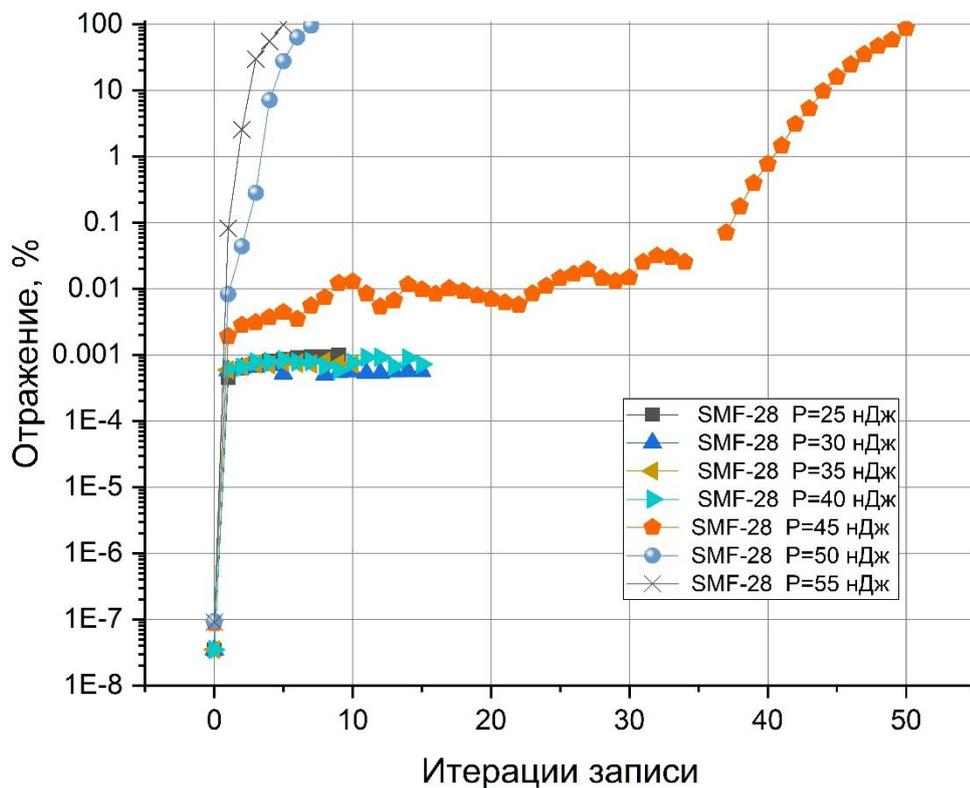


Рисунок 3.6 – Динамика изменения уровня отражения брэгговских решеток в процессе записи в волокне Corning SMF-28.

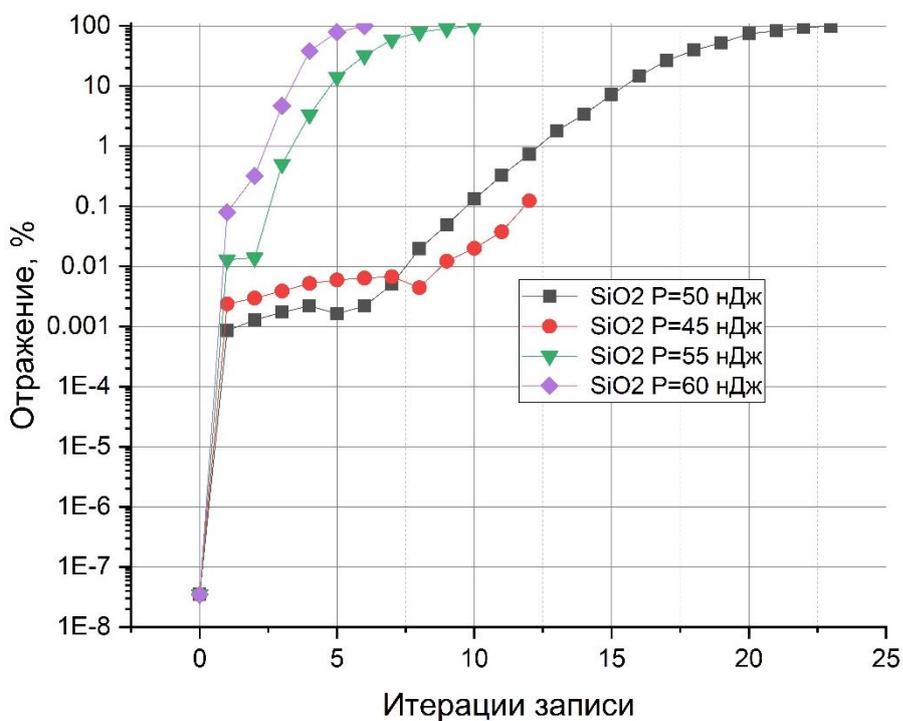


Рисунок 3.7 – Динамика изменения уровня отражения брэгговских решеток в процессе записи в волокне SiO2.

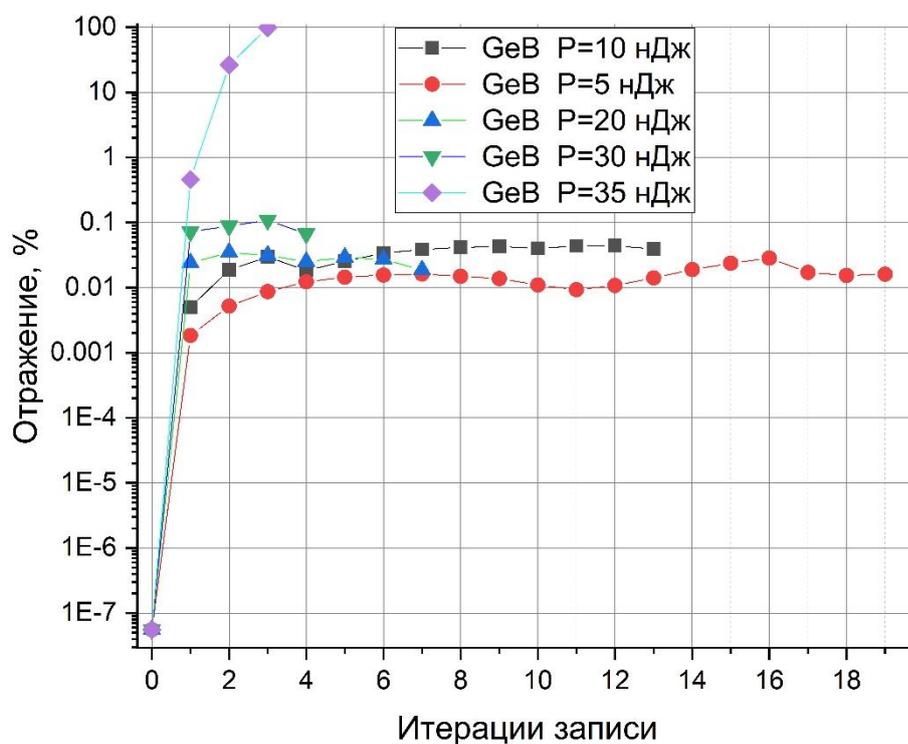


Рисунок 3.8 – Динамика изменения уровня отражения брэгговских решеток в процессе записи в волокне GeB.

График на рисунке 3.6 демонстрирует динамику записи решеток в трех различных волокнах - Corning SMF-28 с относительно низким уровнем легирования сердцевины германием, волокне с нелегированной сердцевиной (SiO₂) (рис.3.7) и фоточувствительном волокне с высокой концентрацией германия и бора в сердцевине (GeB) (рис. 3.8). Как видно из графика, динамика записи в первых двух волокнах схожа как по характеру, так и по уровню энергии в импульсе. Условно динамику записи можно разделить на три диапазона: быстрое формирование слабой брэгговской решетки с последующим эффектом насыщения, возможный дальнейший рост решетки после нескольких условно «безуспешных» итераций и быстрый рост высокоотражающей решетки при повышенных, не менее 50 нДж, энергиях записывающего излучения. Схожесть первых двух графиков свидетельствует о схожих механизмах формирования структуры. Однако следует отметить, что пороговое значение энергии в импульсе, при котором наблюдается запись структуры, в SMF-28 ниже, что связано с наличием фоточувствительных

центров, концентрация которых, однако, невелика. При малых, пороговых значениях энергий происходит многофотонное воздействие на отдельные связи этих центров, а при большей энергии и на связи регулярной сетки стекла с формированием кремниевых и германиевых E^- -центров. Такие центры обуславливают возникновение новых полос поглощения, приводящее, согласно соотношению Крамерса-Кронига, к увеличению показателя преломления. Это приводит к формированию слабой решетки с фиксированным уровнем насыщения, зависящем не только от концентрации легирующих добавок, но и от соотношения размера формируемых дефектов и диаметра поля моды, который несколько больше у образца SMF-28. Как следствие, наблюдаемый уровень насыщения у данного образца пропорционально меньше по сравнению с волокном с сердцевинной из нелегированного кварца, в котором размер поля моды составляет порядка 6 мкм против 10,4 мкм у SMF-28. Многократное воздействие на облученные ранее участки повышает вероятность возбуждения нескольких регулярных связей одного атома кремния и примесных дефектов. Дальнейшее воздействие на эти центры может уже приводить к эффектам формирования нанорешеток (структур с переменной плотностью) и нанополостей [98, 99]. Энергии и длительности лазерного импульса недостаточно для формирования лавинного пробоя и, как следствие, формирования микрополости по всему объему в точке воздействия, то формирования локальных нанопор за счет передачи лазерной энергии уже возбужденным связям, вполне вероятно. Как следствие, в объеме стекла формируется пористая структура. Данное предположение дополнительно подтверждается постепенным ростом уровня отражения брэгговской решетки с каждым последующим проходом. В случае лавинного пробоя, когда микрополость уже сформирована и последующее воздействие лазерного излучения хоть и может приводить к ее дальнейшему изменению, будет носить резко нелинейный характер. Результатом таких трансформаций является формирование высокоотражающей брэгговской решетки. Отметим, что

второй этап формирования решеток наблюдается в обоих образцах при одинаковом диапазоне энергий в импульсе, что дополнительно подтверждает превалирующую роль процессов, происходящих преимущественно в регулярной структуре кварцевого стекла. Аналогичный эффект наблюдается и при более высоких интенсивностях с той лишь разницей, что вероятность возбуждения нескольких связей атома значительно повышается уже с первого импульса. Кроме того, за счет дополнительной передачи энергии возбужденным электронам в точке фокусировки формируется плазма твердого тела, что и приводит к формированию нанорешеток и нанополостей уже с первого прохода, что и приводит к быстрому формированию высокоотражающей брэгговской решетки за малое число проходов.

Иную картину демонстрирует третий образец с высокой концентрацией германия и бора в сердцевине. Здесь отсутствует второй этап формирования брэгговской решетки, а уровень энергий, необходимый для записи многократно ниже. Если в случае первых двух световодов пороговая энергия, при которой наблюдается запись решеток, составляла не менее 40 нДж в импульсе, то в случае третьего образца запись наблюдается уже при энергии в 5 нДж. А при 35 нДж происходит быстрая запись высокоотражающей решетки. Очевидно, что здесь ведущую роль в формировании брэгговской структуры играют многочисленные фоточувствительные примесные центры с малой, относительно уровня запрещенной зоны кварцевого стекла, энергией возбуждения [65]. Таким образом, возбуждение этих центров возможно при меньшей степени многофотонных процессов, что и обуславливает низкий энергетический порог их активации.

Дальнейшее повышение энергии в импульсе повышает вероятность возбуждения более одной связи фоточувствительного центра и атомов регулярной сетки стекла, а также вероятность образования плазмы, что приводит к процессам аналогичным первым двум образцам с той лишь разницей, что необходимая энергия активации такого процесса ниже.

Важнейшим параметром, характеризующим брэгговскую решетку и процессы, происходящие при ее записи, является брэгговская длина волны. И, если уровень отражения (или сила решетки) пропорциональна величине модуляции эффективного показателя преломления вдоль волокна, то динамика изменения длины волны отражает изменение среднего эффективного показателя преломления. В разделе 3.1 был описан наблюдаемый коротковолновый сдвиг брэгговской длины волны при многопроходной записи излучением фемтосекундного лазера. Этот эффект воспроизводим и был получен нами во всех исследуемых образцах (рисунок 3.9). Как отмечалось выше, такое изменение может быть обусловлено лишь изменением среднего эффективного показателя преломления. Запись осуществлялась при энергии в импульсе 70 нДж, при этом величина изменения брэгговской длины волны в ходе эксперимента составляла для различных образцов (- 0,0003) – (- 0,0008), т.е. показатель преломления уменьшается. Это вполне согласуется с предположением об образовании пористой структуры в области воздействия лазерного излучения, в которой за счет образования микропустот будет наблюдаться именно уменьшение данного параметра.

Однако образование нанопор должно приводить к перераспределению плотности стекла по объему, вызывая уплотнение окружающего стекла. Как показано в [183-185], зависимость показателя преломления от плотности с достаточной точностью является линейной в широком диапазоне плотностей, как минимум, до 20% [184] и, следовательно, для расчёта изменения показателя преломления достаточно линейного приближения. В линейном приближении перераспределение плотности при фиксированном объеме материала не должно приводить к изменению среднего (интегрального) показателя преломления и не может, казалось бы, объяснить наблюдаемый коротковолновый сдвиг брэгговской длины волны при записи ВБР.

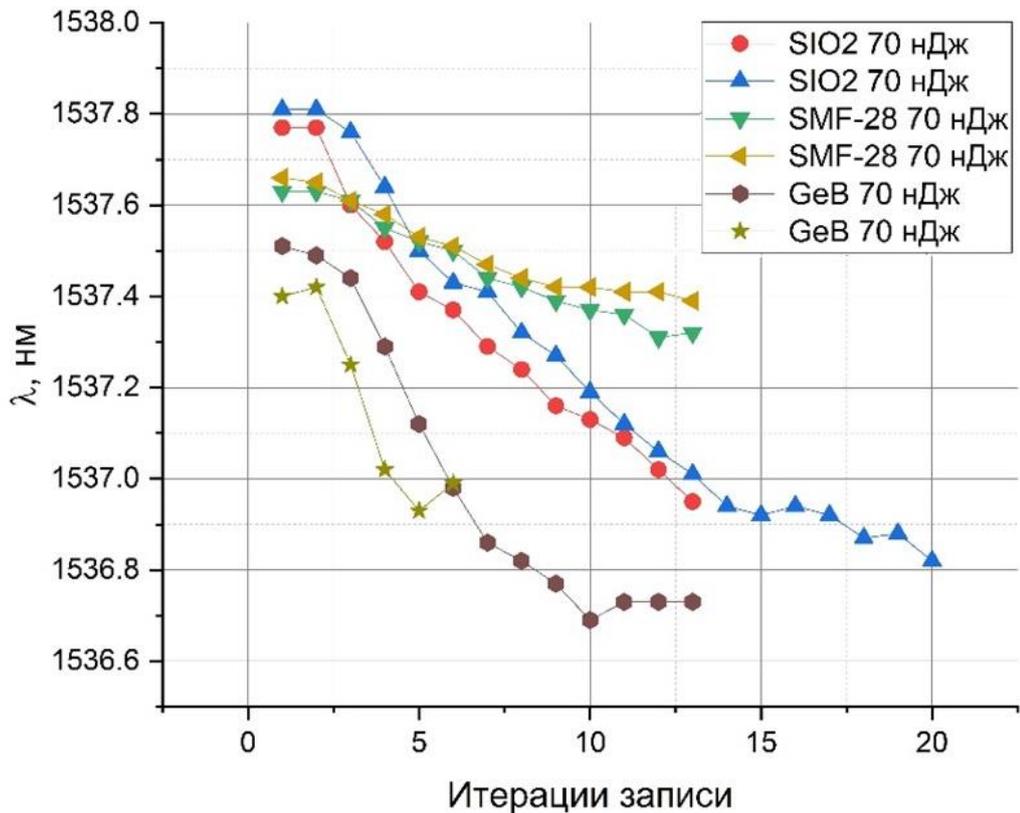
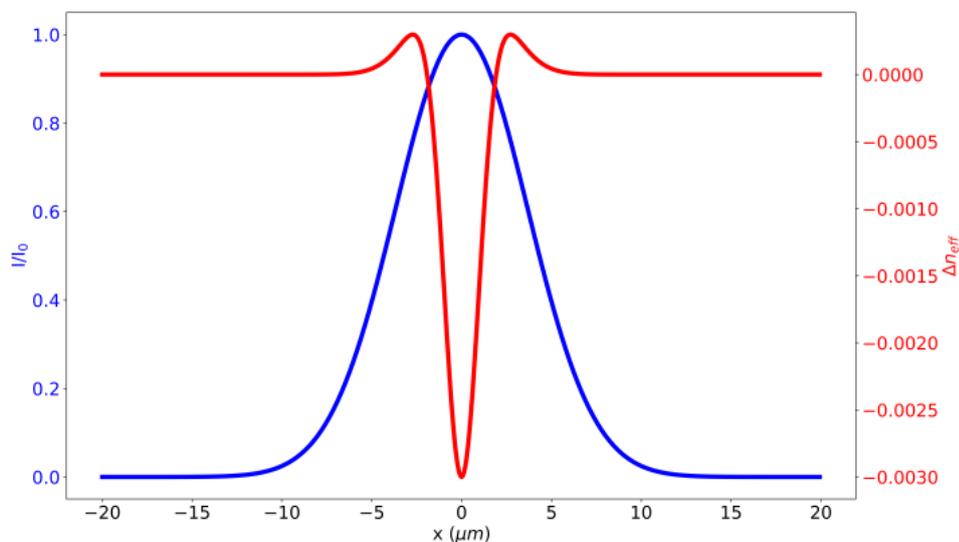


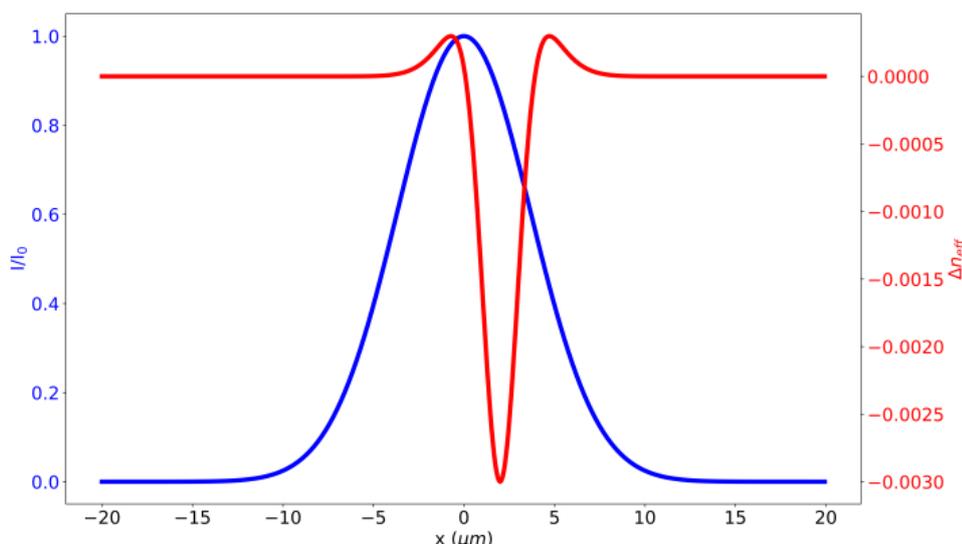
Рисунок 3.9 – Изменение брэгговской длины волны в процессе записи ВБР в различных образцах волоконного световода.

Здесь следует вспомнить, что распределение мощности проходящего излучения по сердцевине волоконного световода неравномерно и описывается функцией Бесселя [186]. Таким образом, в центре сердцевины плотность мощности максимальна и спадает с увеличением расстояния от центра волоконного световода. Соответственно, изменения показателя преломления в центре сердцевины также влияет больше, чем на ее периферии. Таким образом, даже при нулевом изменении интегрального показателя преломления по объему стекла эффективный показатель преломления может изменяться в ту или иную сторону. Данный эффект демонстрирует рисунок 3.10, в этом случае распределение поля по радиусу световода будет играть роль функции, обеспечивающей статистический вес наблюдаемых изменений показателя преломления по радиусу. Максимальные эффективные изменения показателя преломления будут наблюдаться в максимуме функции распределения поля моды и, соответственно, эффект

будет уменьшаться по мере удаления от центра сердцевины, т.е. в нашем случае будет наблюдаться отрицательные его изменения.



а)



б)

Рисунок 3.10 – Эффект перераспределения плотности кварцевого стекла по радиусу волоконного световода вокруг точки воздействия лазерного излучения (красная кривая) и распределение поля моды волоконного световода (синяя кривая). а) Точка воздействия находится в центре волоконного световода, б) точка воздействия смещена относительно центра на 2 мкм.

Также очевидно, что уменьшение поля моды при одинаковых размерах фотоиндуцированного дефекта также будет приводить к увеличению эффекта. Этим может объясняться больший отрицательный сдвиг

брэгговской длины волны в световодах с меньшей сердцевиной и, соответственно, меньшим диаметром поля моды. Данное предположение находит свое подтверждение при анализе данных, представленных на рисунке 3.9. При одинаковой энергии записи решетки коротковолновый сдвиг брэгговской длины волны для различных образцов разный. Так, для волокна Corning SMF-28 он составляет всего 0,3 нм, тогда как в образце с сердцевиной из нелегированного кварцевого стекла, а также в фоточувствительном волокне он превышает значение 0,8 нм. Отметим, что размер сердцевины в этих образцах составляет 4-5 мкм против 9 мкм у SMF-28.

Очевидно также, что эффект изменения эффективного показателя преломления для распространяющейся моды при прочих равных будет зависеть от положения точки воздействия лазерного излучения относительно центра сердцевины. Эффект отрицательного изменения показателя преломления в этом случае будет уменьшаться по мере ее удаления от центральной оси волокна, как показано на рисунке 3.10б. И, действительно, данное предположение находит экспериментальное подтверждение. На рисунке 3.11 приведена динамика изменения брэгговской длины волны решеток, записанных при одинаковых условиях, но отличающихся местом воздействия. Меньший сдвиг брэгговской длины волны по сравнению с рисунком 3.9 обусловлен меньшей энергией используемого в эксперименте излучения. В первом образце запись решетки производилась по центру волоконного световода, тогда как во втором область воздействия была сдвинута относительно центра на 2 мкм. Сдвиг брэгговской длины волны во втором случае меньше примерно в два раза, возможность чего подтверждается и оценочным моделированием. Так, например, при типичном изменении показателя преломления в центре лазерного воздействия на уровне -3×10^{-3} , среднем эффективном радиусе фотоиндуцированного пятна 1 мкм и диаметре поля моды у SMF-28 10,4 мкм величина изменения эффективного показателя преломления при центральной (осевой) записи ВБР

и при ее смещении на 2 мкм составляет $0,7 \times 10^{-4}$ и $0,45 \times 10^{-4}$, что вполне соответствует приведенным результатам с учетом ошибки эксперимента.

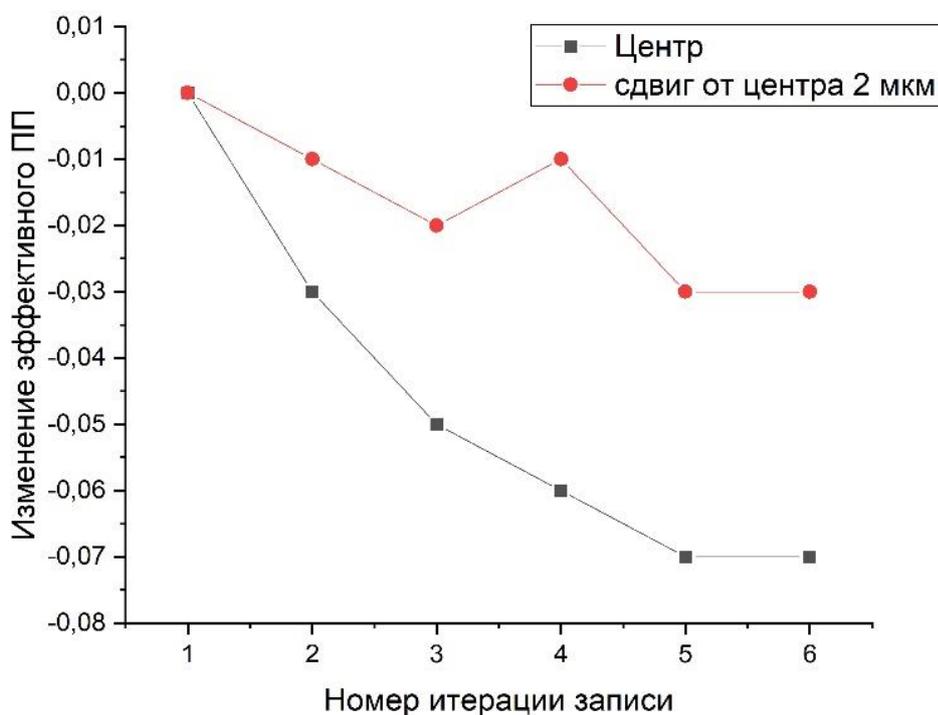


Рисунок 3.11 – Изменение брэгговской длины волны при осевой записи решетки (черная крива) и при смещении от центра волокна на 2 мкм (красная кривая).

3.3 Выводы к третьей главе

В данной главе продемонстрирована эффективность предложенной многопроходной методики записи волоконных брэгговских решёток. Полученные образцы ВБР имеют хорошее качество спектров и близкие к теоретическим характеристики. Продемонстрирована возможность высокоточной записи брэгговских решеток за счет их промежуточного спектрального контроля между итерациями записи.

Показана динамика записи ВБР многопроходным поточечным методом при помощи ФС лазера на различных мощностях записывающего излучения в различных по составу и исходной фоточувствительности видах оптических

волокон. При увеличении количества проходов записи наблюдается коротковолновый сдвиг длины волны брэгговского резонанса сопровождающийся монотонным ростом отражательной способности решётки, что свидетельствует об отрицательном изменении среднего эффективного показателя преломления структуры. Предложена модель комплексного штриха решётки, в которой в центре фокальной области происходит отрицательное изменение показателя преломления вещества за счёт образования пористой структуры стекла, приводящей к уменьшению его плотности. На краях фокальной области наблюдается область уплотнения, приводящая к положительному вкладу в изменение показателя преломления. Общее отрицательное изменение эффективного показателя преломления обусловлено особенностями распределения энергии в поле моды распространяющегося по волоконному световоду излучения. Наибольший вклад в эффективный показатель преломления вносят изменения в центре волоконного световода, где наблюдается максимум интенсивности распространяющегося излучения.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕРМИЧЕСКИХ И ПРОЧНОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

4.1 Изотермический отжиг и теория кристаллизации

Для более комплексного анализа полученных нами ВБР и механизмов их формирования и распада, проводились термические испытания. Как отмечалось, вопрос высокотемпературной стабильности брэгговских решёток и эволюции их параметров при повышенных температурах - крайне важный и актуальный вопрос как со стороны фундаментального, академического интереса, так и со стороны практического использования самих ВБР и приборов на их основе.

Длительный изотермический отжиг проводился по описанной в Главе 2 схеме, при температуре 650 °С. В качестве образца для сравнения был изготовлен образец ВБР, записанный в слаболегированном германосиликатном телекоммуникационном волокне Corning SMF-28. Запись производилась классическим методом, при помощи УФ излучения эксимерного лазера 193 нм и фазовой маски, без предварительного насыщения волокна молекулярным водородом [162]. Ввиду слабого уровня легирования сердцевины волокна, формирование такой решетки требует значительного времени экспонирования. При этом могут проявляться эффекты, нехарактерные для решеток, записанных в присутствии водорода, в которых для записи брэгговской структуры требуется многократно меньшее время.

Рассмотрим результаты, полученные на образце, записанном с помощью ультрафиолетового излучения с помощью эксимерного ArF-лазера. Как было отмечено выше, запись такой решетки в ненаводороженном слаболегированном волокне требует длительного времени экспонирования и сопровождается двумя эффектами – изменением показателя преломления облучаемых участков сердцевины за счет эффекта фоточувствительности, т.е.

образования новых центров поглощения на фотоиндуцированных дефектах и уплотнением материала в облучаемых участках. Второй эффект приводит к модуляции плотности стекла вдоль сердцевины волоконного световода, вносящий дополнительный эффект модуляции показателя преломления [130, 187]. Очевидно, что, хотя эти два эффекта и связаны между собой, релаксация напряжения и восстановление нарушенных связей может происходить с разной эффективностью и зависеть от времени и температуры воздействия. Как следствие, кривая изотермического распада может иметь неоднородность, обусловленную этими двумя механизмами.

На рисунке 4.1 представлены результаты длительного изотермического отжига данной решётки. В нашем эксперименте решетка отжигалась на протяжении 6 месяцев при температуре 650 °С. На первом этапе наблюдается «классический» распад решетки по экспоненциальному закону, который связан с частичным распадом фотоиндуцированных центров. Интересно, что данный этап сопровождается значительным уменьшением брэгговской длины волны, которое превосходит по модулю изменение длины волны отражения решетки при ее записи. Данный эффект может быть связан с релаксацией структуры кварцевого стекла, особенно в наиболее напряженных участках на границе сердцевина-оболочка. Такая релаксация вызывает изменение эффективного показателя преломления для распространяющейся моды излучения и напрямую не связана с эффектом распада самой брэгговской решетки. Однако, после примерно 60 часов термического воздействия начинается новый этап распада ВБР. При этом динамика изменения брэгговской длины волны меняет знак. Можно предположить, что такое изменение вызвано, по всей видимости, уже релаксацией, фотоиндуцированных, в первую очередь, продольных, напряжений внутри сердцевины, уменьшая модуляцию плотности внутри брэгговской решетки. Помимо этого, данный процесс понижает потенциальный барьер восстановления оставшихся фотоиндуцированных центров окраски, которые активно начинают релаксировать, также приводя к уменьшению контраста

ВБР. Увеличение брэгговской длины волны на данном этапе отчасти обусловлено именно релаксацией продольных напряжений, определяющих отрицательный вклад в средний показатель преломления фотоиндуцированной решетки. Третий этап отжига характеризуется остаточными эффектами релаксации фотоиндуцированных центров без видимых эффектов релаксации напряжений, о чем свидетельствует незначительная флуктуация брэгговской длины волны. При этом ее дальнейший рост на поздних этапах отжига обуславливается, по всей видимости, уже пластичной деформацией (удлинением) волокна и, не связан напрямую с термической эволюцией брэгговской структуры.

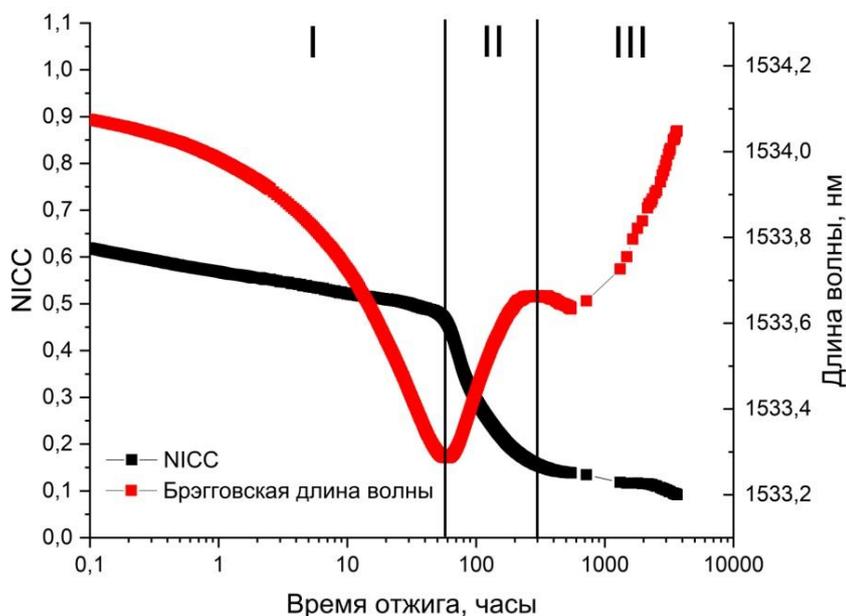


Рисунок 4.1 – Динамика термического отжига решетки, записанной ультрафиолетовым излучением.

Таким образом, динамика распада, как обратный процесс по отношению к записи брэгговской решетки, сопровождается двумя эффектами – восстановлением фотоиндуцированных центров и релаксацией внутренних напряжений в сетке стекла, обуславливающих, в том числе, дополнительную модуляцию показателя преломления вдоль сердцевины. При этом, данные

эффекты связаны между собой, о чем свидетельствует неоднородная динамика распада решетки. Отметим, что никаких эффектов регенерации решетки, записанной с помощью ультрафиолетового излучения, обнаружено не было.

Несколько иная картина наблюдается в образцах, записанных поточечным методом при помощи фемтосекундного излучения в том же самом волокне SMF-28 (рисунок 4.2). В процессе такой записи происходит формирование точечного дефекта в сердцевине, сопровождающееся, также как и в случае интенсивной УФ-записи, уплотнением сетки стекла в точке лазерного воздействия и возникновением дополнительных растягивающих напряжений в ближайшем окружении данного дефекта. В отличие от УФ-дефекта, где подобные напряжения вызывают модуляцию показателя преломления вдоль оси волоконного световода, точечное воздействие фемтосекундным излучением приводит к появлению напряжений в объеме стекла вокруг дефекта. Другим важным отличием является воздействие излучения на регулярную сетку стекла, приводящую за счет многофотонных процессов к возбуждению не только связей, ассоциированных с присутствием германия, но и регулярной структуры Si-O. Кроме того, высокая интенсивность излучения определяет высокую вероятность возбуждения более одной связи атома, что приводит к практически необратимой трансформации структуры стекла под действием внутренних напряжений с крайне высоким потенциальным барьером. Такая трансформация может обеспечить высокую термическую устойчивость решеток, записанных излучением фемтосекундного лазера.

Здесь следует обратить внимание на схожесть поведения брэгговской длины волны при термическом отжиге у решеток, записанных ультрафиолетовым излучением и излучением фемтосекундного лазера (рисунок 4.3). Брэгговская длина волны «фемтосекундных» решеток практически полностью повторяет динамику ультрафиолетовой ВБР за исключением величины роста длины волны на втором этапе трансформации.

Это свидетельствует о схожести эффектов, происходящих в брэгговских структурах и определяемых, в первую очередь, структурой и типом волоконного световода. На этом факте будут построены дальнейшие рассуждения.

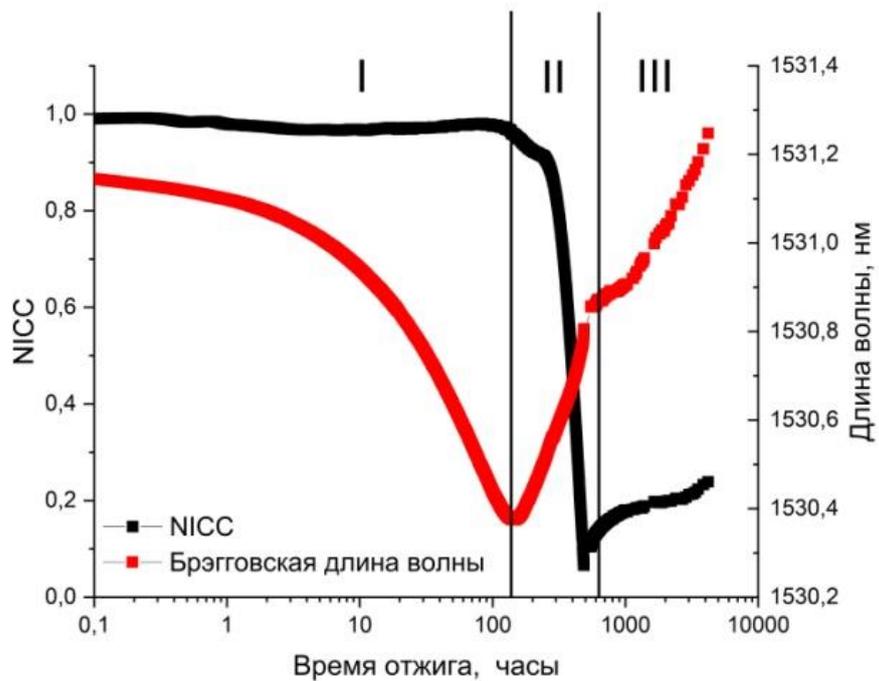
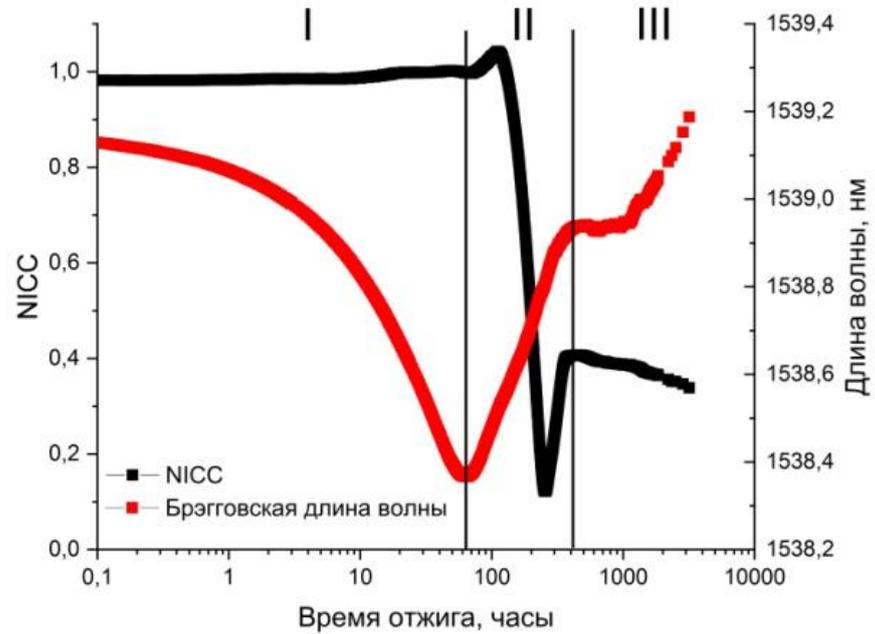


Рисунок 4.2 – Динамика термического отжига двух образцов ВБР, записанных поточечным методом излучением fs-лазера.

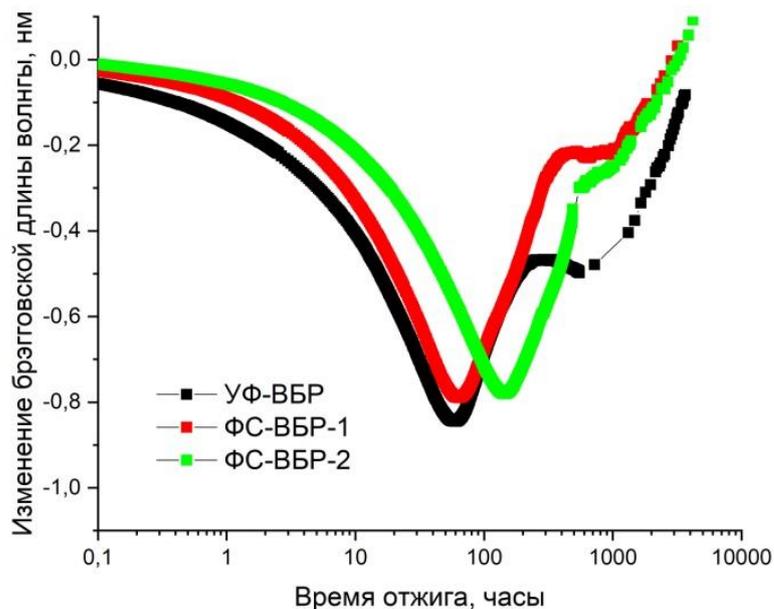


Рисунок 4.3 – Динамика изменения брэгговской длины волны в процессе изотермического отжига для различных образцов ВБР.

Как и в случае образца, записанного УФ-излучением, динамику термического отжига решетки можно разделить на три фазы. На первом этапе, также как и с УФ-образцом, наблюдается значительное уменьшение брэгговской длины волны с той лишь разницей, что отражательная способность решетки сохраняется. В ходе первого этапа еще сохраняется аксиальное распределение напряжений вокруг фотоиндуцированных центров лазерного фемтосекундного воздействия, которые находятся в центре сердцевины, вдали от границы сердцевина/оболочка, что и определяет сохранение уровня отражения решетки.

Второй этап характеризуется падением и частичным восстановлением уровня отражения, т.е. этапом возникновения регенерируемой брэгговской решетки. По всей видимости, природа данного явления связана с процессами кристаллизации внутри фотоиндуцированных дефектов. В общем случае эффективная кристаллизация кварцевого стекла происходит при более высоких температурах, обычно в диапазоне температур 1100-1600 °С. При большей температуре стекло начинает плавиться, препятствуя образованию

кристаллов, при более низкой – имеет слишком высокую вязкость, что препятствует необходимой трансформации для роста кристаллов [188, 189]. Однако, в случае фотоиндуцированных центров следует учесть, что они содержат много нарушенных связей регулярной сетки стекла, что обуславливает повышенную подвижность структурных элементов стекла – тетраэдров и возможность их перестройки с образованием кристаллических элементов. В литературе было показано, что эффективный рост кристаллов и эффективное образование зародышевых центров протекает при различных температурах. Так, например, в стекле Suprasil 2 при поверхностной кристаллизации при температуре 700 °С наблюдается образование малого количества крупных областей кристаллизации в течение нескольких часов, тогда как при температуре 500 °С образуется большая концентрация малых зародышевых центров при отжиге в течение нескольких суток [190]. Из-за ограниченной подвижности структурных элементов в облученных участках брэгговских решеток можно ожидать именно такое образование зародышевых центров в большом количестве, что и обуславливает образование регенерируемой брэгговской решетки. Изменение уровня отражения с одной стороны связано с продолжающимися процессами релаксации, в том числе и фотоиндуцированной аксиальной модуляции плотности, что уменьшает начальный контраст решетки, а с другой – с образованием кристаллических центров, формируемых, фактически, новую структуру брэгговской решетки. Образование кристаллических центров сопровождается уплотнением и созданием новых центров напряжений, что находит свое подтверждение при анализе их радиального распределения в регенерированной решетке [131]. Именно эти эффекты определяют динамику изменения отражения брэгговской структуры. На третьем этапе наблюдается стабилизация уровня отражения решетки, что связано с замедлением, эффектом насыщения процесса формирования новых кристаллических центров.

Увеличение длины волны на втором и третьем этапах эксперимента во многом обусловлены продольной деформацией волоконного световода в ходе проведения эксперимента которая, по всей видимости, обусловлена присутствием растягивающих сил из-за особенностей установки волоконного световода в печи. Подтверждением данного предположения являются результаты ускоренного эксперимента в малой печи, который был проведен при температуре 775 °С. В печи были установлены четыре идентичные брэгговские решетки, две из которых были подвержены постоянному растягивающему напряжению с помощью груза массой 40г. При этом две другие решетки были максимально изолированы от возможного внешнего воздействия. На рисунке 4.4 представлены результаты эксперимента. Как видно из графиков, у образца без нагрузки не наблюдается значительного роста длины волны, лишь небольшой участок графика имеет положительные изменения на уровне менее 0,1 нм, что, как было отмечено выше, связано, скорее всего, с релаксацией продольных напряжений в структуре брэгговской решетки.

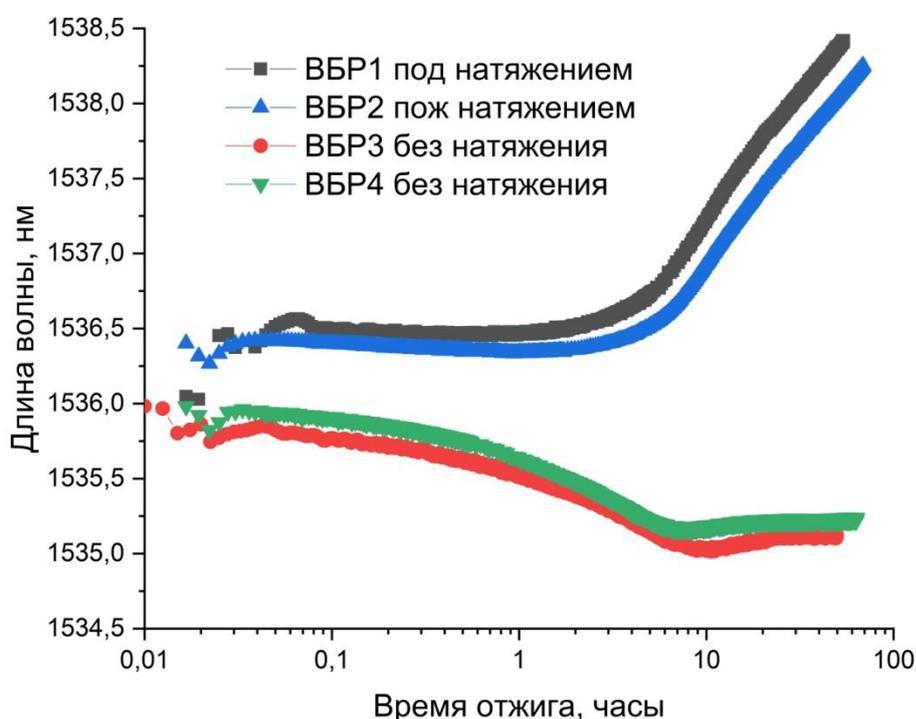


Рисунок 4.4 – Динамика изменения брэгговской длины волны в процессе отжига в зависимости от присутствия растягивающих внешних напряжений.

Таким образом, в данном разделе был продемонстрирован классический процесс появления регенерируемой решетки, который впервые наблюдался без присутствия молекулярного водорода в низколегированном германием волоконном световоде с решеткой, записанной поточечным методом с помощью излучения фемтосекундного лазера. Наблюдаемые изменения брэгговской длины волны в большей степени связаны с перераспределением напряжений внутри кварцевого стекла, а также с продольной деформацией волоконного световода в процессе эксперимента.

Гипотеза о главенствующей роли кристаллизации материала стекла в облученных участках при формировании регенерируемых брэгговских решеток может быть распространена и на другие типы ВБР. Так, например, наблюдается регенерация решеток, записанных УФ-излучением в высоколегированных волокнах без присутствия водорода [102, 108, 127-129]. Высоколегированное германосиликатное волокно имеет меньшую температуру плавления, а, соответственно, и температуру формирования кристаллов. В этом случае даже наличие небольшого количества фотоиндуцированных дефектов может являться прекурсором образования кристаллов, особенно при повышенных температурах. Дополнительным подтверждением данной теории является обратная зависимость температуры образования регенерируемой решетки от концентрации германия в сердцевине волоконного световода [127].

4.2 Исследования прочностных характеристик

Как было отмечено в первой главе, вопрос прочностных характеристик брэгговских решеток в целом и специальных отражателей для сенсорных систем в частности стоит наиболее остро при изготовлении и эксплуатации конечных систем. Особенно важно отметить, что брэгговские отражатели в сенсорных системах с когерентным опросом должны иметь широкий спектр отражения, а, следовательно, малую длину. При этом для достижения

необходимого уровня отражения требуется достаточно высокие значения энергии записывающего излучения. Кроме того, вместо брэгговских решеток могут быть использованы и точечные отражатели, запись которых с помощью излучения фемтосекундного лазера производится путем многократного экспонирования сердцевины волокна для создания точечного или штрихового дефекта.

В работе были исследованы решетки и точечные дефекты, записанные с использованием различной энергии импульса лазерного излучения для выявления зависимости прочностных характеристик от режимов записи. Точечный дефект записывался путем многократного сканирования сфокусированным лучом лазера в поперечном сечении световода до достижения уровня отражения 0,004%. Существенно большее значение отражения не удавалось получить с помощью одного точечного дефекта.

Поскольку искусственный элемент отражения должен иметь достаточно широкий спектр, как правило, не менее 7-10 нм, записывались слабые брэгговские решетки длиной 50 и 15 нм с коэффициентом отражения от 0,035 до 0,35 % (-35 дБ – -25 дВ), что лежит в верхнем диапазоне величины необходимого отражения [150, 154, 155, 157, 159, 167]. Для точного контроля смещения спектра отражения, рядом с короткими решетками была записана решетка с узким спектром с использованием предельно малой энергии в импульсе. Очевидно, можно ожидать, что с большей вероятностью разрыву будет подвержена решетка, записанная с использованием большей энергией лазерного импульса.

Такие же «классические» узкополосные брэгговские решетки, длиной 5 мм, также участвовали в тестах как самостоятельный объект для исследования. В таблице 1 приведены параметры записи различных групп отражателей.

Важно отметить, что все образцы решеток записывались в режиме одного прохода.

Таблица 1 – Параметры записи искусственных дефектов

Образец	Тип дефекта	Средний уровень отражения, %	Ширина спектра отражения на полувысоте (FWHM), нм	Средняя энергия в импульсе при записи, нДж
A	Точечный дефект (штрих)	0,004	-	-
B	Решетка 5 мм	80	0,2	67
C	Решетка 50 мкм HR	0,35	15	140
D	Решетка 50 мкм LR	0,035	15	110
E	Решетка 15 мкм	0,035	40	145

Типичные спектры отражения образцов из каждой серии, измеренные с помощью брэгговского интеррогатора MicronOptics SM-125-200 со спектральным диапазоном 1520-1570 нм, приведены на рисунке 4.5. Уровень отражения дефектов и слабых брэгговских решеток оценивался относительно уровня френелевского отражения от торца волоконного световода (примерно 3,5 %). Короткие и длинные решетки были записаны с различным периодом для удобства спектрального контроля. Брэгговская длина волны коротких решеток составляла 1530 нм, тогда как максимум отражения коротких ВБР приходился на длину волны 1559 нм.

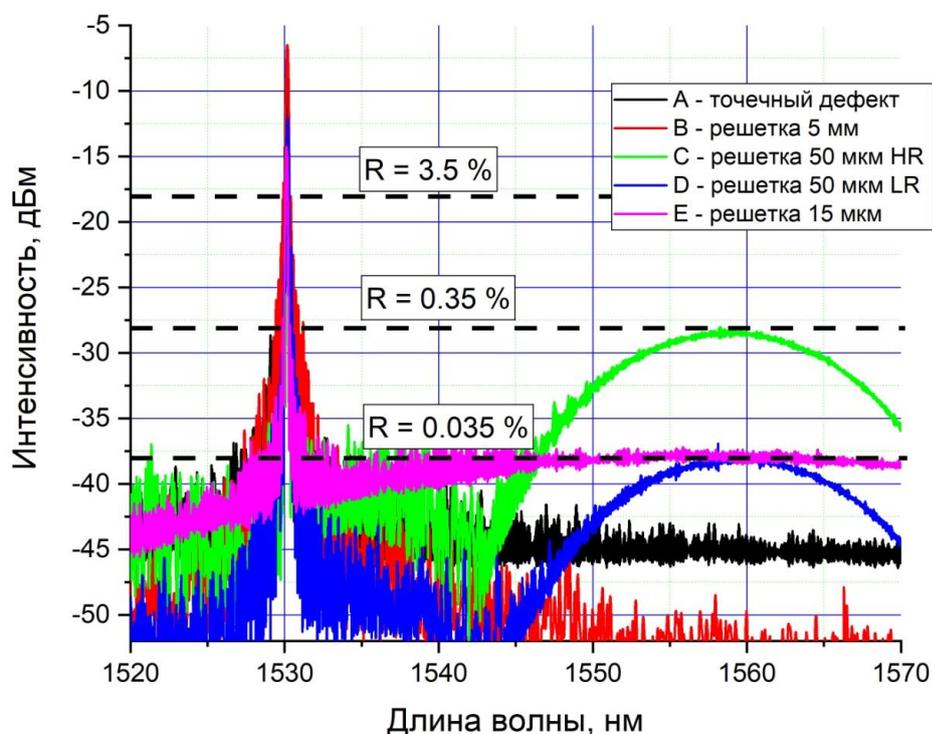


Рисунок 4.5 – Типичные спектры отражения образцов, использованных в эксперименте.

Экспериментальная установка подробно описана в Главе 2. Напомним, что оценка уровня натяжения при разрыве исследуемых образцов производится с помощью спектральных методов. По величине изменения брэгговской длины волны $\Delta\lambda_B$ можно вычислить величину удлинения световода исходя из соотношения (11) [191]:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \left(1 - \frac{n^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \right) \frac{\Delta l}{l} \quad (11)$$

где $\Delta l/l$ – относительное удлинение световода, p_{11} и p_{12} – компоненты тензора фотоупругости, которые для кварцевого стекла равны 0,12 и 0,27 соответственно, n – эффективный показатель преломления, равный 1,46, коэффициент Пуассона $\nu=0,16$. Уравнение (11) можно упростить до вида (12):

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (1 - p_e) \frac{\Delta l}{l} \quad (12)$$

где эффективный коэффициент фотоупругости p_e с учетом значений коэффициентов, приведенных выше, равен 0,22 [191, 192]. Усилие разрыва (уровень нагрузки) волоконного образца может быть вычислено по величине относительного удлинения световода $\Delta l/l$ по формуле (13):

$$\sigma = E_G \frac{\Delta l}{l} \quad (13)$$

где $E_G=70$ ГПа – модуль Юнга для стандартного волоконного световода [193-195].

По результатам проведенных измерения были построены графики Вейбулла в виде зависимости вероятности разрыва образца F от приложенного усилия (рисунок 4.6). Совокупная вероятность разрыва F для экспериментальных данных может быть вычислена по формуле (14) [196, 197]:

$$F = \frac{j-0.5}{N}, j = 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

где j – порядковый номер эксперимента в списке, составленном по возрастанию величины, при которой произошел разрыв, N – общее количество экспериментов.

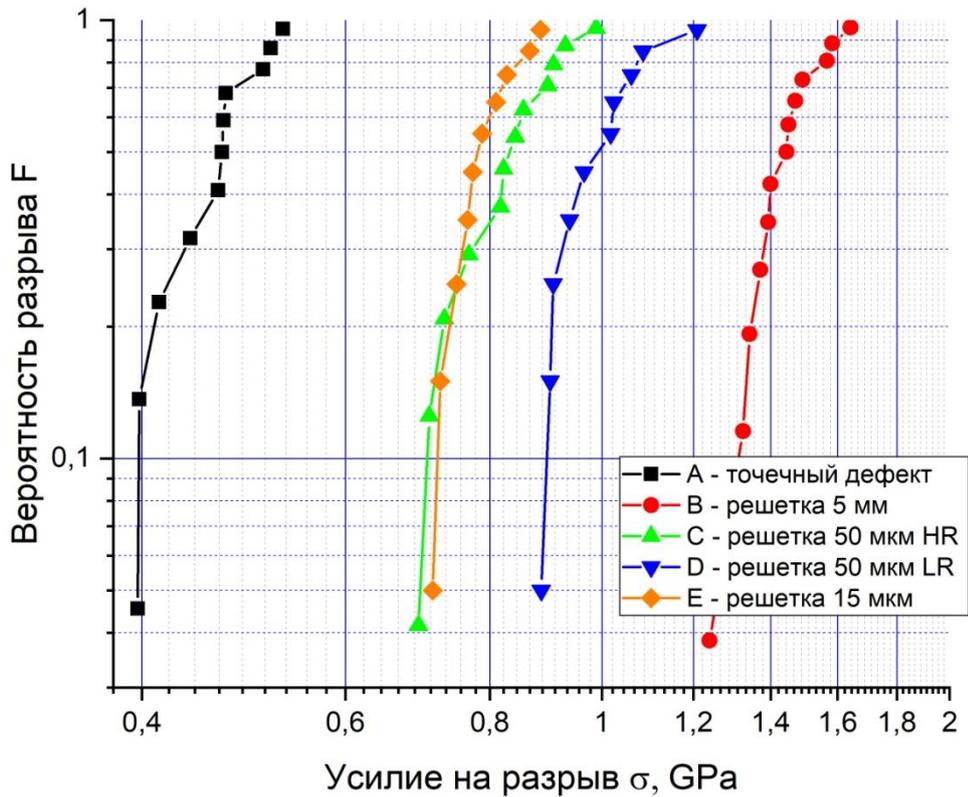


Рисунок 4.6 – Вероятность разрыва образцов F от приложенного усилия σ .

Экспериментальные данные могут быть аппроксимированы вероятностной функцией Вейбулла [198]:

$$F(\sigma_f) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma_f}{\sigma_0} \right)^{m_d} \right] \quad (15)$$

где σ_0 и m_d – параметр масштаба и формы Вейбулла соответственно.

Часто экспериментальная зависимость представляется в осях $x = \ln(\sigma)$ и $y = \ln(-\ln(1-F))$ и аппроксимируется преобразованным выражением (15) в форме линейной зависимости (16):

$$\ln \left(\ln \frac{1}{1-F(\sigma_f)} \right) = m_d \ln \left(\frac{\sigma_f}{\sigma_0} \right) = m_d \ln \sigma_f - m_d \ln \sigma_0 \quad (16)$$

Зависимость такого вида, а также прямые аппроксимации приведены на рисунке 4.7. Параметр масштаба σ_0 характеризует общую статистическую прочность образцов и может быть выражен через экспериментально найденное усредненное значение усилия на разрыв $\bar{\sigma}_f$, т.е. значение, при котором $F(\bar{\sigma}_f) = 0.5$ с помощью выражения (17) [198]:

$$\sigma_0 = \bar{\sigma}_f (\ln 2)^{-1/m_d} \quad (17)$$

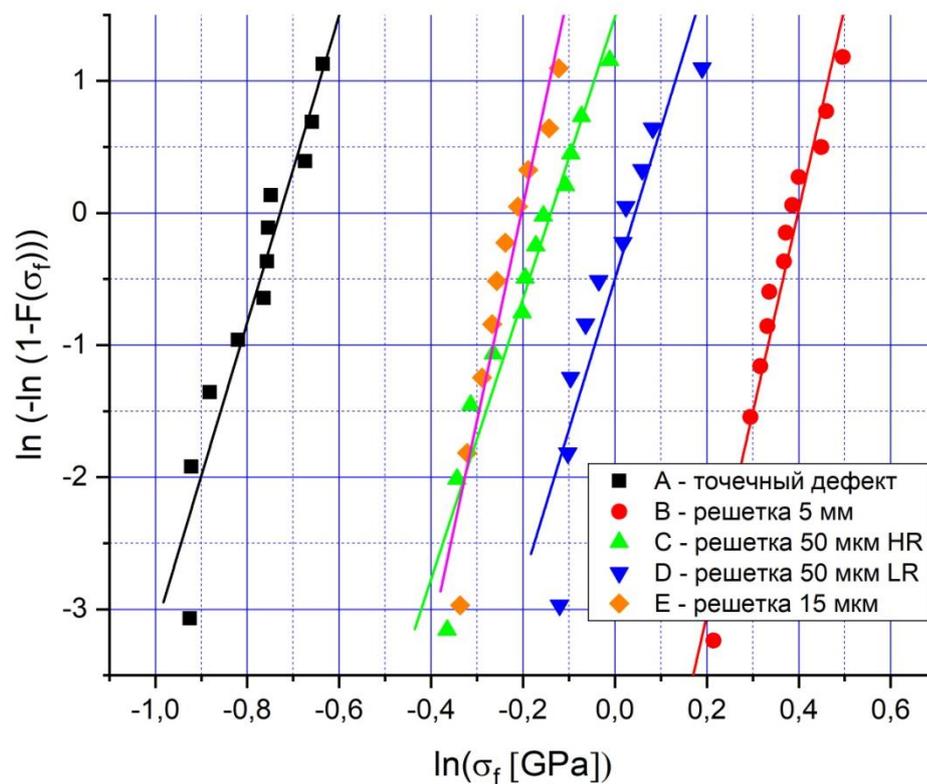


Рисунок 4.7 – Графики Вейбулла для исследованных образцов.

Фактически, параметр масштаба – это величина усилия при равенстве левой части уравнения (16) нулю, что соответствует вероятности разрыва образцов $F \approx 63.2 \%$.

В таблице 2 представлены параметры Вейбулла для каждой серии образцов, а также указана энергия в импульсе, при которой производилась запись брэгговских решеток.

Таблица 2 – 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 видно из таблицы и приведенных выше графиков, наблюдается однозначная зависимость вероятности разрыва решетки от энергии записывающего излучения. Как и ожидалось, наибольшую прочность продемонстрировали «длинные» решетки, записанные при минимальной энергии лазерных импульсов, прочность которых составляет в среднем почти 1.5 ГПа. С ростом энергии в импульсе прочностные характеристики образцов ожидаемо снижались. Наименьшей прочностью обладают точечные дефекты из-за высокой степени разрушения материала при их записи, что не позволяет их использовать в реальных сенсорных системах.

Запись решеток с помощью фемтосекундного излучения происходит в нелинейном, многофотонном режиме. Таким образом, можно ожидать, что в первом приближении эффект, производимый лазерным излучением на сетку кварцевого стекла, будет пропорционален степени многофотонности процесса. Энергия фотона с длиной волны излучения 532 нм составляет примерно 2.33 эВ, тогда как край фундаментального поглощения кварцевого стекла (energy gap) находится в районе 8,5 – 9,3 эВ [66, 67], из чего следует, что эффективное воздействие на сетку стекла будет осуществляться по меньшей мере при четырехфотонном процессе. В оценочных расчетах мы не учитываем возможную роль «классических» германосиликатных центров ввиду их относительно низкой концентрации в сетке стекла и малом влиянии их трансформации в наносимом дефекте на формирование брэгговских решеток. Таким образом можно ожидать, что прочность ВБР может быть пропорциональна эффекту воздействия лазерного излучения на кварцевое стекло, т.е. корню 4-й степени энергии в импульсе лазерного излучения.

На рисунке 4.8 приведена зависимость параметра масштаба σ_0 , отражающего, по сути, усредненную прочность дефектов от корня 4-й степени энергии импульса лазерного излучения, при которой производилась записи ВБР. В отличие от ВБР, каждый штрих которых наносился в один импульс, запись дефектов в виде поперечных штрихов осуществлялась в

многопроходном режиме и фактор их прочности не может быть учтен на приведенном на рисунке 4.8 графике.

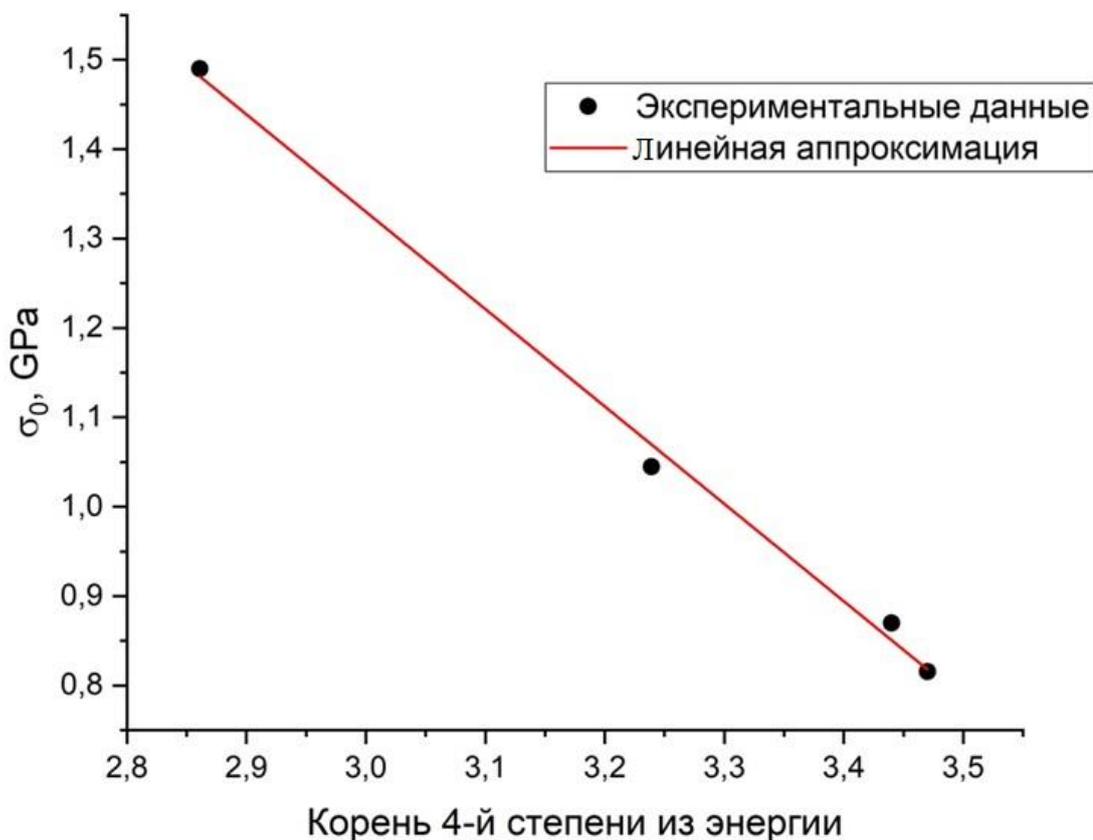


Рисунок 4.8 – Зависимость параметра масштаба от энергии импульса лазерного излучения.

Экспериментальные результаты, представленные в данных осях, были аппроксимированы линейной зависимостью. Верность приведенных выше рассуждений подтверждается результатами аппроксимации. При нулевой энергии в импульсе, т.е. в отсутствии воздействия, средняя прочность световода, согласно расчетам, должна составлять примерно 4,6 ГПа, что, с учетом возможной погрешности в эксперименте, с точностью лучше, чем 15% соответствует литературным данным по прочностным характеристикам необлученного световода (5,3 ГПа) [71] .

Таким образом, экспериментально показано, что механическая прочность записанных брэгговских решеток поточечным методом с помощью излучения фемтосекундного лазера зависит от энергии в импульсе

записывающего излучения, что следует учитывать при расчете и записи широкополосных брэгговских отражателей для распределенных сенсорных систем с когерентным опросом, а также при изготовлении других волоконных брэгговских решеток, критерии прочности которых является важным эксплуатационным параметром. При этом единичный дефект в виде поперечного штриха из-за своих низких прочностных характеристик не может быть использован в сенсорных кабелях ввиду высокой вероятности разрыва световода при изготовлении и установки оптического сенсорного кабеля.

4.3 Выводы к четвёртой главе

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. Термический отжиг проводился при фиксированной температуре 650 С. Процесс регенерации связывается с образованием зародышевых центров кристаллизации в облученных участках волокна, появление которых при данной температуре становится возможным благодаря большому количеству фотоиндуцированных разрывов регулярных связей, наличию фотоиндуцированных микрополостей и, как следствие повышенной подвижности структурных элементов кварцевого стекла. Гипотеза о главенствующей роли кристаллизации может быть распространена и на другие типы волокон и ВБР, демонстрирующих процесс регенерации при высоких температурах.

Нехарактерное поведение (увеличение) длины волны брэгговского резонанса исследуемых структур объясняется присутствием напряжений, возникающих при помещении образцов в печь. Из-за текучести материала и длительного воздействия высоких температур даже небольшие напряжения

способны вызвать неупругую деформацию участка волокна с брэгговской решёткой, что было подтверждено экспериментально.

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.

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 и исходной фоточувствительности 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.

Благодарности

Хочу поблагодарить своего научного руководителя Бутова Олега Владиславовича за чуткое научное руководство, человеческое отношение и участие на протяжении выполнения всей работы и огромный кредит доверия, выданный мне на начальном этапе.

Также хочу поблагодарить рецензентов за своевременное написание рецензий, ценные советы и дополнения, высказанные по данной работе.

Помимо этого, хочу поблагодарить коллектив лабораторий 190 и 195 за приятную рабочую атмосферу и человеческое участие в настоящей работе.

Отдельные слова благодарности хочу высказать моим родителям Пржиялковской Татьяне Васильевне и Пржиялковскому Владимиру Михайловичу. Их вклад в эту работу и поддержка - неоценимы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fiber bragg gratings. / Kashyap R.: Academic press, 2009.
2. Smirnov A. M., Bazakutsa A. P., Chamorovskiy Y. K., Nechepurenko I. A., Dorofeenko A. V., Butov O. V. Thermal switching of lasing regimes in heavily doped Er³⁺ fiber lasers // ACS Photonics. – 2018. – Т. 5, № 12. – С. 5038-5046.
3. Fiber optic sensors: fundamentals and applications. / Krohn D. A., MacDougall T., Mendez A.: Spie Press Bellingham, WA, 2014.
4. Fiber Bragg grating sensors: recent advancements, industrial applications and market exploitation. / Cusano A., Cutolo A., Albert J.: Bentham Science Publishers, 2011.
5. 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.
6. Othonos A. Fiber bragg gratings // Review of scientific instruments. – 1997. – Т. 68, № 12. – С. 4309-4341.
7. Hill K. O., Fujii Y., Johnson D. C., Kawasaki B. S. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication // Applied physics letters. – 1978. – Т. 32, № 10. – С. 647-649.
8. Butov O. V., Chamorovskiy Y. K., Bazakutsa A. P., Fedorov A. N., Igor'A S. Optical fiber sensor for deformation monitoring of fuel channels in industrial nuclear reactors // Optical Fiber Sensors –Optica Publishing Group, 2018. – С. TuE103.
9. Butov O. V., Chamorovskii Y. K., Golant K. M., Shevtsov I. A., Fedorov A. N. Fibers and sensors for monitoring nuclear power plants operation // 23rd International Conference on Optical Fibre Sensors. – Т. 9157 –SPIE, 2014. – С. 121-124.
10. Tomyshev K., Dolzhenko E. I., Vasilyeva A. D., Yurina L. V., Butov O. V. Selective fiber optic TFBG-assisted biosensors featuring functional coatings // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2023. – Т. 384. – С. 133618.
11. Syabekova M., Amantayeva A., Vangelista L., González-Vila Á., Caucheteur C., Tosi D. Ultralow limit detection of soluble HER2 biomarker in serum with a fiber-optic ball-tip resonator assisted by a tilted FBG // ACS Measurement Science Au. – 2022. – Т. 2, № 4. – С. 309-316.
12. Li B., Zhang R., Bi R., Olivo M. Applications of Optical Fiber in Label-Free Biosensors and Bioimaging: A Review // Biosensors. – 2022. – Т. 13, № 1. – С. 64.
13. Syabekova M., Korganbayev S., González-Vila Á., Caucheteur C., Shaimerdenova M., Ayupova T., Bekmurzayeva A., Vangelista L., Tosi D. Functionalized etched tilted fiber Bragg grating aptasensor for label-free protein detection // Biosensors and Bioelectronics. – 2019. – Т. 146. – С. 111765.
14. Tomyshev K. A., Tazhetdinova D. K., Manuilovich E. S., Butov O. V. High-resolution fiber optic surface plasmon resonance sensor for biomedical applications // Journal of Applied Physics. – 2018. – Т. 124, № 11.
15. Chiavaioli F., Baldini F., Tombelli S., Trono C., Giannetti A. Biosensing with

- optical fiber gratings // *Nanophotonics*. – 2017. – Т. 6, № 4. – С. 663-679.
16. Hill K. O., Malo B., Bilodeau F., Johnson D., Albert J. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask // *Applied Physics Letters*. – 1993. – Т. 62, № 10. – С. 1035-1037.
17. Dostovalov A., Wolf A., Babin S. Femtosecond point-by-point inscription of fiber Bragg gratings through the polyimide coating // *2014 International Conference Laser Optics –IEEE, 2014*. – С. 1-1.
18. Martinez A., Dubov M., Khrushchev I., Bennion I. Direct writing of fibre Bragg gratings by femtosecond laser // *Electronics Letters*. – 2004. – Т. 40, № 19. – С. 1.
19. Bragg W., Thomson J., Friedrich H. Mr Bragg, Diffraction of short electromagnetic waves, etc. 43 // *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society: Mathematical and physical sciences*. – Т. 17 –, 1914. – С. 43.
20. Варжель С. Волоконные брэгговские решетки // *СПб.: Университет ИТМО*. – 2015. – Т. 65.
21. 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.
22. Theodosiou A. Recent Advances in Fiber Bragg Grating Sensing // *Sensors*. – 2024. – Т. 24, № 2. – С. 532.
23. Rohan R., Venkadeshwaran K., Ranjan P. Recent advancements of fiber Bragg grating sensors in biomedical application: a review // *Journal of Optics*. – 2024. – Т. 53, № 1. – С. 282-293.
24. Xu S., Li X., Wang T., Wang X., Liu H. Fiber Bragg grating pressure sensors: a review // *Optical Engineering*. – 2023. – Т. 62, № 1. – С. 010902-010902.
25. Bonopera M. Fiber-bragg-grating-based displacement sensors: Review of recent advances // *Materials*. – 2022. – Т. 15, № 16. – С. 5561.
26. Sahota J. K., Gupta N., Dhawan D. Fiber Bragg grating sensors for monitoring of physical parameters: A comprehensive review // *Optical Engineering*. – 2020. – Т. 59, № 6. – С. 060901-060901.
27. Albert J., Shao L. Y., Caucheteur C. Tilted fiber Bragg grating sensors // *Laser & Photonics Reviews*. – 2013. – Т. 7, № 1. – С. 83-108.
28. de Groot P. J., de Lega X. C., Dawson J. W., MacDougall T. W., Lu M., Troll J. R. Interferometer design for writing Bragg gratings in optical fibers // *Interferometry XI: Techniques and Analysis*. – Т. 4777 –SPIE, 2002. – С. 31-38.
29. Askins C., Putnam M., Williams G., Friebele E. Stepped-wavelength optical-fiber Bragg grating arrays fabricated in line on a draw tower // *Optics letters*. – 1994. – Т. 19, № 2. – С. 147-149.
30. Russell P. S. J., Archambault J.-L., Reekie L. Fibre gratings // *Physics World*. – 1993. – Т. 6, № 10. – С. 41.
31. Patrick H., Gilbert S. L. Growth of Bragg gratings produced by continuous-wave ultraviolet light in optical fiber // *Optics letters*. – 1993. – Т. 18, № 18. – С. 1484-1486.
32. Meltz G., Morey W. W., Glenn W. H. Formation of Bragg gratings in optical

- fibers by a transverse holographic method // *Optics letters*. – 1989. – Т. 14, № 15. – С. 823-825.
33. Hill K. O., Meltz G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview // *Journal of lightwave technology*. – 1997. – Т. 15, № 8. – С. 1263-1276.
34. Бутов О. В., Томышев К. А., Нечепуренко И. А., Дорофеенко А. В., Никитов С. А. Волоконные брэгговские решётки с наклонными штрихами и сенсоры на их основе // *Успехи физических наук*. – 2022. – Т. 192, № 12. – С. 1385-1398.
35. Hill K., Albert J., Bilodeau F., Johnson D., Malo B., Theriault S. Enhanced photosensitivity in lightly doped standard telecommunication fibre exposed to high fluence ArF excimer laser light // – 1995.
36. Albert J., Malo B., Hill K., Bilodeau F., Johnson D., Theriault S. Comparison of one-photon and two-photon effects in the photosensitivity of germanium-doped silica optical fibers exposed to intense ArF excimer laser pulses // *Applied physics letters*. – 1995. – Т. 67, № 24. – С. 3529-3531.
37. Albert J., Malo B., Bilodeau F., Johnson D., Hill K., Hibino Y., Kawachi M. Photosensitivity in Ge-doped silica optical waveguides and fibers with 193-nm light from an ArF excimer laser // *Optics letters*. – 1994. – Т. 19, № 6. – С. 387-389.
38. Williams D., Ainslie B., Armitage J., Kashyap R., Campbell R. Enhanced UV photosensitivity in boron codoped germanosilicate fibres // *Electronics Letters*. – 1993. – Т. 29, № 1. – С. 45-47.
39. Partovi A., Erdogan T., Mizrahi V., Lemaire P., Glass A., Fleming J. Volume holographic storage in hydrogen treated germano-silicate glass // *Applied physics letters*. – 1994. – Т. 64, № 7. – С. 821-823.
40. Lemaire P. J., Atkins R., Mizrahi V., Reed W. High pressure h₂ loading as a technique for achieving ultrahigh uv photosensitivity and thermal sensitivity in geO₂ doped optical fibres // *Electronics Letters*. – 1993. – Т. 13, № 29. – С. 1191-1193.
41. Lancry M., Niay P., Bailleux S., Douay M., Depecker C., Cordier P., Riant I. Thermal stability of the 248-nm-induced presensitization process in standard H₂-loaded germanosilicate fibers // *Applied optics*. – 2002. – Т. 41, № 34. – С. 7197-7204.
42. Leconte B. Contribution à l'étude de la photosensibilité des fibres en silice sous l'effet d'une insolation par un laser à ArF; Lille 1, 1998.
43. Patrick H., Gilbert S. L., Lidgard A., Gallagher M. Annealing of Bragg gratings in hydrogen-loaded optical fiber // *Journal of Applied Physics*. – 1995. – Т. 78, № 5. – С. 2940-2945.
44. Bazakutsa A., Rybaltovsky A., Umnikov A., Butov O. Photobleaching of UV-induced defects in Er/Al-doped glasses for fiber lasers // *Optical Materials Express*. – 2020. – Т. 10, № 10. – С. 2669-2678.
45. Bazakutsa A., Rybaltovsky A., Butov O. Effect of hydrogen loading and UV irradiation on the gain of Er³⁺-doped fibers // *JOSA B*. – 2019. – Т. 36, № 9. – С. 2579-2586.

46. Thomas J., Voigtlaender C., Becker R. G., Richter D., Tuennermann A., Nolte S. Femtosecond pulse written fiber gratings: a new avenue to integrated fiber technology // Book Femtosecond pulse written fiber gratings: a new avenue to integrated fiber technology / EditorWiley Online Library, 2012. – C. 709-723.
47. Fu L., Marshall G., Bolger J., Steinvurzel P., Mägi E., Withford M., Eggleton B. Femtosecond laser writing Bragg gratings in pure silica photonic crystal fibres // Electronics Letters. – 2005. – T. 41, № 11. – C. 1.
48. Zagorulko K., Kryukov P., Larionov Y. V., Rybaltovsky A., Dianov E., Chekalin S., Matveets Y. A., Kompanets V. Fabrication of fiber Bragg gratings with 267 nm femtosecond radiation // Optics Express. – 2004. – T. 12, № 24. – C. 5996-6001.
49. Xu X., He J., He J., Xu B., Chen R., Yang K., Liao C., Yang Y., Wang Y. Slit Beam Shaping for Femtosecond Laser Point-by-Point Inscription of High-Quality Fiber Bragg Gratings // Journal of Lightwave Technology. – 2021. – T. 39, № 15. – C. 5142-5148.
50. Xu B., He J., Du B., Xiao X., Xu X., Fu C., He J., Liao C., Wang Y. Femtosecond laser point-by-point inscription of an ultra-weak fiber Bragg grating array for distributed high-temperature sensing // Optics Express. – 2021. – T. 29, № 20. – C. 32615-32626.
51. Pallarés-Aldeiturriaga D., Roldán-Varona P., Rodríguez-Cobo L., López-Higuera J. M. Optical fiber sensors by direct laser processing: A review // Sensors. – 2020. – T. 20, № 23. – C. 6971.
52. Fuerbach A., Bharathan G., Ams M. Grating inscription into fluoride fibers: a review // IEEE Photonics Journal. – 2019. – T. 11, № 5. – C. 1-11.
53. Dostovalov A., Wolf A., Parygin A., Zyubin V., Babin S. Femtosecond point-by-point inscription of Bragg gratings by drawing a coated fiber through ferrule // Optics express. – 2016. – T. 24, № 15. – C. 16232-16237.
54. Huang B., Shu X. Line-by-Line inscription of phase-shifted fiber Bragg gratings with femtosecond laser // Asia Communications and Photonics Conference –Optica Publishing Group, 2015. – C. ASu2A. 60.
55. Zhou K., Dubov M., Mou C., Zhang L., Mezentsev V. K., Bennion I. Line-by-line fiber Bragg grating made by femtosecond laser // IEEE Photonics Technology Letters. – 2010. – T. 22, № 16. – C. 1190-1192.
56. 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. – T. 21, № 4. – C. 1447.
57. Lu P., Mihailov S. J., Ding H., Grobnc D., Walker R. B., Coulas D., Hnatovsky C., Naumov A. Y. Plane-by-plane inscription of grating structures in optical fibers // Journal of Lightwave Technology. – 2017. – T. 36, № 4. – C. 926-931.
58. Antipov S., Ams M., Williams R. J., Magi E., Withford M. J., Fuerbach A. Direct infrared femtosecond laser inscription of chirped fiber Bragg gratings // Optics express. – 2016. – T. 24, № 1. – C. 30-40.
59. Williams R. J., Krämer R. G., Nolte S., Withford M. J. Femtosecond direct-writing of low-loss fiber Bragg gratings using a continuous core-scanning

- technique // Optics letters. – 2013. – T. 38, № 11. – C. 1918-1920.
60. Deng Y., Jiang J. Optical fiber sensors in extreme temperature and radiation environments: A review // IEEE Sensors Journal. – 2022. – T. 22, № 14. – C. 13811-13834.
61. Saliminia A., Bérubé J.-P., Vallée R. Refractive index-modified structures in glass written by 266nm fs laser pulses // Optics Express. – 2012. – T. 20, № 25. – C. 27410-27419.
62. Martinez A., Dubov M., Khrushchev I., Bennion I. Photoinduced modifications in fiber gratings inscribed directly by infrared femtosecond irradiation // IEEE photonics technology letters. – 2006. – T. 18, № 21. – C. 2266-2268.
63. Neustruev V. Colour centres in germanosilicate glass and optical fibres // Journal of Physics: Condensed Matter. – 1994. – T. 6, № 35. – C. 6901.
64. Nishii J., Kitamura N., Yamanaka H., Hosono H., Kawazoe H. Ultraviolet-radiation-induced chemical reactions through one-and two-photon absorption processes in GeO₂-SiO₂ glasses // Optics Letters. – 1995. – T. 20, № 10. – C. 1184-1186.
65. Golant K., Butov O., Denisov A., Mashinsky V., Sazhin O., Smith C., Muraviov S. Oxygen deficient centres in germanosilicate glassy films synthesised by hydrogen free plasmachemical deposition // PHYSICS AND CHEMISTRY OF GLASSES. – 2004. – T. 43, № C; SPI. – C. 131-136.
66. Saito K., Ikushima A. Absorption edge in silica glass // Physical Review B. – 2000. – T. 62, № 13. – C. 8584.
67. Weinberg Z., Rubloff G., Bassous E. Transmission, photoconductivity, and the experimental band gap of thermally grown SiO₂ films // Physical Review B. – 1979. – T. 19, № 6. – C. 3107.
68. Yoon H.-J., Kim C.-G. The mechanical strength of fiber Bragg gratings under controlled UV laser conditions // Smart materials and structures. – 2007. – T. 16, № 4. – C. 1315.
69. Kang D.-H., Park S.-O., Hong C.-S., Kim C.-G. Mechanical strength characteristics of fiber Bragg gratings considering fabrication process and reflectivity // Journal of intelligent material systems and structures. – 2007. – T. 18, № 4. – C. 303-309.
70. Wei C. Y., James S. W., Ye C.-C., Tatam R. P., Irving P. Influence of process route on mechanical and sensing performance of fiber Bragg grating optical sensors // Smart Structures and Materials 1999: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials. – T. 3670 –SPIE, 1999. – C. 164-170.
71. Habel J., Boilard T., Frenière J.-S., Trépanier F., Bernier M. Femtosecond FBG written through the coating for sensing applications // Sensors. – 2017. – T. 17, № 11. – C. 2519.
72. Bernier M., Trépanier F., Carrier J., Vallée R. High mechanical strength fiber Bragg gratings made with infrared femtosecond pulses and a phase mask // Optics letters. – 2014. – T. 39, № 12. – C. 3646-3649.
73. Zhao J., Zhao Y., Peng Y., Lv R.-q., Zhao Q. Review of femtosecond laser

- direct writing fiber-optic structures based on refractive index modification and their applications // *Optics & Laser Technology*. – 2022. – T. 146. – C. 107473.
74. Ulyanov I., Przhiialkovskii D. V., Butov O. V. Point-by-point inscription of chirped apodized fiber Bragg gratings for application as ultrashort pulse stretchers // *Results in Physics*. – 2022. – T. 32. – C. 105101.
75. Askins C. G., Williams G. M., Bashkansky M., Friebele E. J. Fiber Bragg reflectors by single excimer pulse // *Fiber Optic Smart Structures and Skins V*. – T. 1798 –SPIE, 1993. – C. 66-71.
76. Canning J., Moss D., Aslund M., Bazylenko M. A study of negative index grating growth in germanosilicate planar waveguides // *Optical and quantum electronics*. – 1999. – T. 31, № 5. – C. 469-480.
77. Canning J., Åslund M. Correlation of ultraviolet-induced stress changes and negative index growth in type IIa germanosilicate waveguide gratings // *Optics letters*. – 1999. – T. 24, № 7. – C. 463-465.
78. Dianov E., Golant K., Khrapko R., Kurkov A., Leconte B., Douay M., Bernage P., Niay P. Grating formation in a germanium free silicon oxynitride fibre // *IEE Colloquium on Optical Fibre Gratings (Digest No. 1997/037)* –IET, 1997. – C. 4/1-4/6.
79. Dianov E., Golant K., Khrapko R., Kurkov A., Leconte B., Douay M., Bernage P., Niay P. STRONG BRAGG GRATINGS FORMATION IN GERMANIUM-FREE NITROGEN-DOPED SILICA FIBERS // *Optical Fiber Communication Conference* –Optica Publishing Group, 1997. – C. PD5.
80. Butov O. V., Golant K. M. Core-cladding structure transformation in silica optical fibers caused by UV-induced Bragg grating inscription // *Proceedings of XX International Congress on Glass* –The Ceramic Society of Japan, Tokyo, Japan, 2004. –.
81. Lemaire P. J., Atkins R. M., Mizrahi V., Reed W. A. High pressure H₂ loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO₂ doped optical fibres // *Electronics Letters*. – 1993. – T. 29, № 13. – C. 1191-1193.
82. Canning J. Fibre gratings and devices for sensors and lasers // *Laser & Photonics Reviews*. – 2008. – T. 2, № 4. – C. 275-289.
83. Liao C., Li Y., Wang D., Sun T., Grattan K. Morphology and Thermal Stability of Fiber Bragg Gratings for Sensor Applications Written in H₂ Free and H₂-Loaded Fibers by Femtosecond Laser // *IEEE Sensors Journal*. – 2010. – T. 10, № 11. – C. 1675-1681.
84. Thomas J., Wikszak E., Clausnitzer T., Fuchs U., Zeitner U., Nolte S., Tünnermann A. Inscription of fiber Bragg gratings with femtosecond pulses using a phase mask scanning technique // *Applied Physics A*. – 2007. – T. 86. – C. 153-157.
85. Smelser C. W., Mihailov S. J., Grobncic D. Formation of Type I-IR and Type II-IR gratings with an ultrafast IR laser and a phase mask // *Optics express*. – 2005. – T. 13, № 14. – C. 5377-5386.
86. Wikszak E., Burghoff J., Will M., Nolte S., Tünnermann A., Gabler T.

Recording of fiber Bragg gratings with femtosecond pulses using a “point by point” technique // Conference on Lasers and Electro-Optics –Optica Publishing Group, 2004. – C. CThM7.

87. Mihailov S. J., Smelser C. W., Lu P., Walker R. B., Grobncic D., Ding H., Henderson G., Unruh J. Fiber Bragg gratings made with a phase mask and 800-nm femtosecond radiation // Optics letters. – 2003. – T. 28, № 12. – C. 995-997.

88. He J., Xu B., Xu X., Liao C., Wang Y. Review of femtosecond-laser-inscribed fiber bragg gratings: Fabrication technologies and sensing applications // Photonic Sensors. – 2021. – T. 11, № 2. – C. 203-226.

89. Itoh K., Watanabe W., Nolte S., Schaffer C. B. Ultrafast processes for bulk modification of transparent materials // MRS bulletin. – 2006. – T. 31, № 8. – C. 620-625.

90. Shimotsuma Y., Kazansky P. G., Qiu J., Hirao K. Self-organized nanogratings in glass irradiated by ultrashort light pulses // Physical review letters. – 2003. – T. 91, № 24. – C. 247405.

91. Schaffer C. B., Brodeur A., Mazur E. Laser-induced breakdown and damage in bulk transparent materials induced by tightly focused femtosecond laser pulses // Measurement Science and Technology. – 2001. – T. 12, № 11. – C. 1784.

92. Taylor R., Hnatovsky C., Simova E. Applications of femtosecond laser induced self-organized planar nanocracks inside fused silica glass // Laser & Photonics Reviews. – 2008. – T. 2, № 1-2. – C. 26-46.

93. Zhang Y., Lin C., Liao C., Yang K., Li Z., Wang Y. Femtosecond laser-inscribed fiber interface Mach–Zehnder interferometer for temperature-insensitive refractive index measurement // Optics Letters. – 2018. – T. 43, № 18. – C. 4421-4424.

94. Smelser C. W., Mihailov S. J., Grobncic D. Hydrogen loading for fiber grating writing with a femtosecond laser and a phase mask // Optics Letters. – 2004. – T. 29, № 18. – C. 2127-2129.

95. Zhang F., Xu X., He J., Du B., Wang Y. Highly sensitive temperature sensor based on a polymer-infiltrated Mach–Zehnder interferometer created in graded index fiber // Optics Letters. – 2019. – T. 44, № 10. – C. 2466-2469.

96. Yang F., Jin W., Lin Y., Wang C., Lut H., Tan Y. Hollow-core microstructured optical fiber gas sensors // Journal of Lightwave Technology. – 2016. – T. 35, № 16. – C. 3413-3424.

97. Li Y., Liao C., Wang D., Sun T., Grattan K. Study of spectral and annealing properties of fiber Bragg gratings written in H₂-free and H₂-loaded fibers by use of femtosecond laser pulses // Optics express. – 2008. – T. 16, № 26. – C. 21239-21247.

98. Canning J., Lancry M., Cook K., Weickman A., Brisset F., Poumellec B. Anatomy of a femtosecond laser processed silica waveguide // Optical Materials Express. – 2011. – T. 1, № 5. – C. 998-1008.

99. Canning J., Lancry M., Cook K., Poumellec B. New theory of femtosecond induced changes and nanopore formation // Third Asia Pacific Optical Sensors Conference. – T. 8351 –SPIE, 2012. – C. 572-578.

100. Mihailov S. J. Fiber Bragg grating sensors for harsh environments // *Sensors*. – 2012. – T. 12, № 2. – C. 1898-1918.
101. Jewart C. M., Wang Q., Canning J., Grobnic D., Mihailov S. J., Chen K. P. Ultrafast femtosecond-laser-induced fiber Bragg gratings in air-hole microstructured fibers for high-temperature pressure sensing // *Optics letters*. – 2010. – T. 35, № 9. – C. 1443-1445.
102. Lindner E., Chojetztki C., Brueckner S., Becker M., Rothhardt M., Vlekken J., Bartelt H. Arrays of regenerated fiber Bragg gratings in non-hydrogen-loaded photosensitive fibers for high-temperature sensor networks // *Sensors*. – 2009. – T. 9, № 10. – C. 8377-8381.
103. Canning J., Stevenson M., Bandyopadhyay S., Cook K. Extreme silica optical fibre gratings // *Sensors*. – 2008. – T. 8, № 10. – C. 6448-6452.
104. Poumellec B., Lancry M. Kinetics of thermally activated physical processes in disordered media // *Fibers*. – 2015. – T. 3, № 3. – C. 206-252.
105. Poumellec B. Links between writing and erasure (or stability) of Bragg gratings in disordered media // *Journal of non-crystalline solids*. – 1998. – T. 239, № 1-3. – C. 108-115.
106. Erdogan T., Mizrahi V., Lemaire P., Monroe D. Decay of ultraviolet-induced fiber Bragg gratings // *Journal of applied physics*. – 1994. – T. 76, № 1. – C. 73-80.
107. Shao L.-Y., Canning J., Wang T., Cook K., Tam H.-Y. Viscosity of silica optical fibres characterized using regenerated gratings // *Acta Materialia*. – 2013. – T. 61, № 16. – C. 6071-6081.
108. Bueno A., Kinet D., Megret P., Caucheteur C. Fast thermal regeneration of fiber Bragg gratings // *Optics letters*. – 2013. – T. 38, № 20. – C. 4178-4181.
109. Shao L.-Y., Wang T., Canning J., Cook K., Tam H.-Y. Bulk regeneration of optical fiber Bragg gratings // *Applied optics*. – 2012. – T. 51, № 30. – C. 7165-7169.
110. Zhang Y., Ren Y., Dong M., Meng F., Zhu L. Thermal characteristics of Fabry–Perot cavity based on regenerated fiber Bragg gratings // *Chinese Optics Letters*. – 2018. – T. 16, № 12. – C. 120601.
111. Mihailov S. J. Femtosecond laser-induced Bragg gratings in silica-based fibers for harsh environment sensing // *APL Photonics*. – 2023. – T. 8, № 7.
112. 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. – T. 134. – C. 106650.
113. Grobnic D., Hnatovsky C., Dedyulin S., Walker R. B., Ding H., Mihailov S. J. Fiber Bragg grating wavelength drift in long-term high temperature annealing // *Sensors*. – 2021. – T. 21, № 4. – C. 1454.
114. Dedyulin S., Timakova E., Grobnic D., Hnatovsky C., Todd A. D., Mihailov S. J. Accurate measurements of a wavelength drift in high-temperature silica-fiber Bragg gratings // *Metrology*. – 2021. – T. 1, № 1. – C. 1-16.
115. Chanet N., Corre Y., Cotillard R., Gaspar J., Laffont G., Pocheau C., Caulier G., Dechelle C., De Gentile B., Destouches C. Design and integration of femtosecond Fiber Bragg gratings temperature probes inside actively cooled ITER-

- like plasma-facing components // *Fusion Engineering and Design*. – 2021. – T. 166. – C. 112376.
116. Wang Q., Jewart C. M., Canning J., Grobncic D., Mihailov S. J., Chen K. P. High-temperature fiber Bragg grating sensors in microstructured fibers for harsh environment applications // *Fiber Optic Sensors and Applications VII*. – T. 7677 –SPIE, 2010. – C. 119-125.
117. Smelser C. W., Grobncic D., Mihailov S. J. High-Reflectivity Thermally Stable Ultrafast Induced Fiber Bragg Gratings in H₂-Loaded SMF-28 Fiber // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2009. – T. 21, № 11. – C. 682-684.
118. Li Y., Yang M., Wang D., Lu J., Sun T., Grattan K. Fiber Bragg gratings with enhanced thermal stability by residual stress relaxation // *Optics express*. – 2009. – T. 17, № 22. – C. 19785-19790.
119. Mohd Nazal N., Lai M.-H., Lim K.-S., Gunawardena D. S., Chong W.-Y., Yang H.-Z., Ahmad H. Demarcation energy properties of regenerated fiber Bragg grating sensors in few-mode fibers // *Optica Applicata*. – 2018. – T. 48, № 2.
120. Yang H. Z., Qiao X. G., Das S., Paul M. C. Thermal regenerated grating operation at temperatures up to 1400 C using new class of multimaterial glass-based photosensitive fiber // *Optics letters*. – 2014. – T. 39, № 22. – C. 6438-6441.
121. Kannan S., Guo J. Z., Lemaire P. J. Thermal stability analysis of UV-induced fiber Bragg gratings // *Journal of lightwave technology*. – 1997. – T. 15, № 8. – C. 1478-1483.
122. Groothoff N., Canning J. Enhanced type IIA gratings for high-temperature operation // *Optics letters*. – 2004. – T. 29, № 20. – C. 2360-2362.
123. Fokine M. Thermal stability of oxygen-modulated chemical-composition gratings in standard telecommunication fiber // *Optics letters*. – 2004. – T. 29, № 11. – C. 1185-1187.
124. Fokine M. Thermal stability of chemical composition gratings in fluorine-germanium-doped silica fibers // *Optics Letters*. – 2002. – T. 27, № 12. – C. 1016-1018.
125. Butov O., Golant K., Nikolin I. Ultra-thermo-resistant Bragg gratings written in nitrogen-doped silica fibres // *Electronics Letters*. – 2002. – T. 38, № 11. – C. 523-525.
126. Zhang B., Kahrizi M. High-temperature resistance fiber Bragg grating temperature sensor fabrication // *IEEE sensors journal*. – 2007. – T. 7, № 4. – C. 586-591.
127. Kumar J., Mahakud R., Mokhariwale A., Prakash O., Dixit S., Nakhe S. Studies on thermal regeneration and temperature stability of type-I FBGs written in Ge-B codoped and Ge doped fibers by a kHz repetition rate nanosecond 255 nm beam // *Optics Communications*. – 2014. – T. 320. – C. 109-113.
128. Lindner E., Canning J., Chojetzki C., Brückner S., Becker M., Rothhardt M., Bartelt H. Thermal regenerated type IIA fiber Bragg gratings for ultra-high temperature operation // *Optics communications*. – 2011. – T. 284, № 1. – C. 183-185.
129. Lindner E., Chojetzki C., Brückner S., Becker M., Rothhardt M., Bartelt H.

Thermal regeneration of fiber Bragg gratings in photosensitive fibers // *Optics express*. – 2009. – T. 17, № 15. – C. 12523-12531.

130. 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. – T. 435. – C. 345-349.

131. 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. – C. JT4A. 27.

132. Lu L., Yang Y. The Formation Mechanism for Regenerated Fiber Bragg Grating Based on Non-uniform Crystallization // *Optical Fiber Sensors* –Optica Publishing Group, 2023. – C. W4. 56.

133. Bandyopadhyay S., Canning J., Biswas P., Stevenson M., Dasgupta K. A study of regenerated gratings produced in germanosilicate fibers by high temperature annealing // *Optics express*. – 2011. – T. 19, № 2. – C. 1198-1206.

134. Yang H., Chong W. Y., Cheong Y. K., Lim K.-S., Pua C., Harun S. W., Ahmad H. Thermal regeneration in etched-core fiber Bragg grating // *IEEE Sensors Journal*. – 2013. – T. 13, № 7. – C. 2581-2585.

135. Zhirnov A. A., Choban T. V., Stepanov K. V., Koshelev K. I., Chernutsky A. O., Pnev A. B., Karasik V. E. Distributed acoustic sensor using a double sagnac interferometer based on wavelength division multiplexing // *Sensors*. – 2022. – T. 22, № 7. – C. 2772.

136. Stepanov K. V., Zhirnov A. A., Koshelev K. I., Chernutsky A. O., Khan R. I., Pnev A. B. Sensitivity improvement of phi-OTDR by fiber cable coils // *Sensors*. – 2021. – T. 21, № 21. – C. 7077.

137. Bado M. F., Casas J. R. A review of recent distributed optical fiber sensors applications for civil engineering structural health monitoring // *Sensors*. – 2021. – T. 21, № 5. – C. 1818.

138. Ma P., Sun Z., Liu K., Jiang J., Wang S., Zhang L., Weng L., Xu Z., Liu T. Distributed fiber optic vibration sensing with wide dynamic range, high frequency response, and multi-points accurate location // *Optics & Laser Technology*. – 2020. – T. 124. – C. 105966.

139. Lu P., Lalam N., Badar M., Liu B., Chorpening B. T., Buric M. P., Ohodnicki P. R. Distributed optical fiber sensing: Review and perspective // *Applied Physics Reviews*. – 2019. – T. 6, № 4.

140. Jousset P., Reinsch T., Ryberg T., Blanck H., Clarke A., Aghayev R., Hersir G. P., Henniges J., Weber M., Krawczyk C. M. Dynamic strain determination using fibre-optic cables allows imaging of seismological and structural features // *Nature communications*. – 2018. – T. 9, № 1. – C. 2509.

141. Ding Z., Wang C., Liu K., Jiang J., Yang D., Pan G., Pu Z., Liu T. Distributed optical fiber sensors based on optical frequency domain reflectometry: A review // *Sensors*. – 2018. – T. 18, № 4. – C. 1072.

142. Barrias A., Casas J. R., Villalba S. A review of distributed optical fiber sensors for civil engineering applications // *Sensors*. – 2016. – T. 16, № 5. – C. 748.

143. Lu Y., Zhu T., Chen L., Bao X. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR // *Journal of lightwave Technology*. – 2010. – T. 28, № 22. – C. 3243-3249.
144. Juarez J. C., Maier E. W., Choi K. N., Taylor H. F. Distributed fiber-optic intrusion sensor system // *Journal of lightwave technology*. – 2005. – T. 23, № 6. – C. 2081-2087.
145. Shatalin S. V., Treschikov V. N., Rogers A. J. Interferometric optical time-domain reflectometry for distributed optical-fiber sensing // *Applied optics*. – 1998. – T. 37, № 24. – C. 5600-5604.
146. Dakin J. P. Distributed optical fiber sensors // *Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors II*. – 1993. – T. 1797. – C. 76-108.
147. Tang J., Wang G., Lv W., Cheng C., Gan W., Yang M. Distributed acoustic sensing system based on inserting-zero Golay coding with ultra-weak fiber Bragg gratings // *IEEE Sensors Journal*. – 2022. – T. 22, № 16. – C. 15985-15990.
148. Popov S. M., Butov O. V., Kolosovskii A. O., Voloshin V. V., Vorob'ev I. L., Isaev V. A., Ryakhovskii D. V., Vyatkin M. Y., Rybaltovskii A., Fotiadi A. A. Optical fibres with an inscribed fibre Bragg grating array for sensor systems and random lasers // *Quantum Electronics*. – 2021. – T. 51, № 12. – C. 1101.
149. Yatseev V., Zotov A., Butov O. Combined frequency and phase domain time-gated reflectometry based on a fiber with reflection points for absolute measurements // *Results in Physics*. – 2020. – T. 19. – C. 103485.
150. Stepanov K. V., Zhirnov A. A., Chernutsky A. O., Koshelev K. I., Pnev A. B., Lopunov A. I., Butov O. V. The sensitivity improvement characterization of distributed strain sensors due to weak fiber Bragg gratings // *Sensors*. – 2020. – T. 20, № 22. – C. 6431.
151. Stepanov K., Zhirnov A., Chernutsky A., Choban T., Pnev A., Lopunov A., Butov O. Spatial resolution improvement for phi-OTDR sensors via weak fiber Bragg gratings // *2020 International Conference Laser Optics (ICLO) –IEEE, 2020*. – C. 1-1.
152. Kharasov D. R., Bengalskii D. M., Vyatkin M. Y., Nanii O. E. e., Fomiryakov E., Nikitin S. P., Popov S. M., Chamorovsky Y. K., Treshchikov V. N. Extending the operation range of a phase-sensitive optical time-domain reflectometer by using fibre with chirped Bragg gratings // *Quantum Electronics*. – 2020. – T. 50, № 5. – C. 510.
153. Popov S. M., Butov O. V., Kolosovskii A. O., Voloshin V. V., Vorob'ev I. L., Isaev V. A., Vyatkin M. Y., Fotiadi A. A., Chamorovsky Y. K. Optical fibres and fibre tapers with an array of Bragg gratings // *Quantum Electronics*. – 2019. – T. 49, № 12. – C. 1127.
154. Tong Y., Li Z., Wang J., Wang H., Yu H. High-speed Mach-Zehnder-OTDR distributed optical fiber vibration sensor using medium-coherence laser // *Photonic Sensors*. – 2018. – T. 8. – C. 203-212.
155. Tang J., Li L., Guo H., Yu H., Wen H., Yang M. Distributed acoustic sensing system based on continuous wide-band ultra-weak fiber Bragg grating array // *2017 25th Optical Fiber Sensors Conference (OFS) –IEEE, 2017*. – C. 1-4.

156. Zaitsev I., Butov O., Voloshin V., Vorob'ev I., Vyatkin M. Y., Kolosovskii A., Popov S., Chamorovskii Y. K. Optical fiber with distributed Bragg-type reflector // *Journal of Communications Technology and Electronics*. – 2016. – T. 61. – C. 639-645.
157. Zhu F., Zhang Y., Xia L., Wu X., Zhang X. Improved Φ -OTDR sensing system for high-precision dynamic strain measurement based on ultra-weak fiber Bragg grating array // *Journal of Lightwave Technology*. – 2015. – T. 33, № 23. – C. 4775-4780.
158. Xia L., Zhang Y., Zhu F., Cao C., Zhang X. The performance limit of Φ -OTDR sensing system enhanced with ultra-weak fiber Bragg grating array // *2015 International Conference on Optical Instruments and Technology: Optical Sensors and Applications*. – T. 9620 –SPIE, 2015. – C. 9-15.
159. Wang C., Shang Y., Liu X.-H., Wang C., Yu H.-H., Jiang D.-S., Peng G.-D. Distributed OTDR-interferometric sensing network with identical ultra-weak fiber Bragg gratings // *Optics express*. – 2015. – T. 23, № 22. – C. 29038-29046.
160. Luo Z., Wen H., Guo H., Yang M. A time-and wavelength-division multiplexing sensor network with ultra-weak fiber Bragg gratings // *Optics Express*. – 2013. – T. 21, № 19. – C. 22799-22807.
161. Popov S., Butov O., Bazakutsa A., Vyatkin M. Y., Chamorovskii Y. K., Fotiadi A. Random lasing in a short Er-doped artificial Rayleigh fiber // *Results in Physics*. – 2020. – T. 16. – C. 102868.
162. Butov O. V. Bragg gratings inscription in weakly-doped fibers // *Results in Physics*. – 2019. – T. 15. – C. 102542.
163. Chamorovskiy Y. K., Butov O. V., Kolosovskiy A., Popov S., Voloshin V., Vorob'ev I., Vyatkin M. Y. Metal-coated Bragg grating reflecting fibre // *Optical Fiber Technology*. – 2017. – T. 34. – C. 30-35.
164. Guo H., Yu H., Wu Y., Li X., Zheng Y., Tang J. Preparation of photosensitive fibers for weak fiber Bragg grating arrays // *Physics Procedia*. – 2013. – T. 48. – C. 184-190.
165. Tosi D. Review of chirped fiber Bragg grating (CFBG) fiber-optic sensors and their applications // *Sensors*. – 2018. – T. 18, № 7. – C. 2147.
166. Yang T., Xiao Y., Ran Z., He X., Shao T., Wang W., Li K., Sun D., Qin X., He Z. Design of a weak fiber Bragg grating acoustic sensing system for pipeline leakage monitoring in a nuclear environment // *IEEE Sensors Journal*. – 2021. – T. 21, № 20. – C. 22703-22711.
167. Wang C., Shang Y., Zhao W.-A., Liu X.-H., Wang C., Yu H.-H., Yang M.-H., Peng G.-D. Distributed acoustic sensor using broadband weak FBG array for large temperature tolerance // *IEEE Sensors Journal*. – 2018. – T. 18, № 7. – C. 2796-2800.
168. Niuro Y. Optical fiber submarine cable system development at KDD // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. – 1983. – T. 1, № 3. – C. 467-478.
169. Kojima N., Miyajima Y., Murakami Y., Yabuta T., Kawata O., Yamashita K., Yoshizawa N. Studies on designing of submarine optical fiber cable // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 1982. – T. 30, № 4. – C.

579-586.

170. Przhiiialkovskii D. V., Butov O. V. High-precision point-by-point fiber Bragg grating inscription // *Results in Physics*. – 2021. – T. 30. – C. 104902.

171. Bukharin M., Skryabin N., Khudyakov D., Vartapetov S. Writing of 3D optical integrated circuits with ultrashort laser pulses in the presence of strong spherical aberration // *Journal of Physics: Conference Series*. – T. 747 –IOP Publishing, 2016. – C. 012054.

172. Dostovalov A. V., Wolf A. A. e., Babin S. A. Long-period fibre grating writing with a slit-apertured femtosecond laser beam* // *Quantum Electronics*. – 2015. – T. 45, № 3. – C. 235.

173. Fokine M. Formation of thermally stable chemical composition gratings in optical fibers // *JOSA B*. – 2002. – T. 19, № 8. – C. 1759-1765.

174. Wang Q., Hidayat A., Niay P., Douay M. Influence of blanket postexposure on the thermal stability of the spectral characteristics of gratings written in a telecommunication fiber using light at 193 nm // *Journal of Lightwave Technology*. – 2000. – T. 18, № 8. – C. 1078-1083.

175. Razafimahatratra D., Niay P., Douay M., Poumellec B., Riant I. Comparison of isochronal and isothermal decays of Bragg gratings written through continuous-wave exposure of an unloaded germanosilicate fiber // *Applied optics*. – 2000. – T. 39, № 12. – C. 1924-1933.

176. Åslund M., Canning J. Annealing properties of gratings written into UV-presensitized hydrogen-outdiffused optical fiber // *Optics Letters*. – 2000. – T. 25, № 10. – C. 692-694.

177. Chisholm K., Sugden K., Bennion I. Effects of thermal annealing on Bragg fibre gratings in boron/germania co-doped fibre // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 1998. – T. 31, № 1. – C. 61.

178. Dong L., Liu W. Thermal decay of fiber Bragg gratings of positive and negative index changes formed at 193 nm in a boron-codoped germanosilicate fiber // *Applied optics*. – 1997. – T. 36, № 31. – C. 8222-8226.

179. Smirnov A., Butov O. Pump and thermal impact on heavily erbium-doped fiber laser generation // *Optics Letters*. – 2021. – T. 46, № 1. – C. 86-89.

180. Rybaltovsky A., Butov O., Vasiliev S., Nechepurenko I., Egorova O., Semjonov S., Galagan B., Denker B., Sverchkov S. Continuous-wave operation of an erbium-doped short-cavity composite fiber laser // *Results in Physics*. – 2020. – T. 16. – C. 102832.

181. Skvortsov M., Wolf A., Dostovalov A., Vlasov A., Akulov V., Babin S. Distributed feedback fiber laser based on a fiber Bragg grating inscribed using the femtosecond point-by-point technique // *Laser Physics Letters*. – 2018. – T. 15, № 3. – C. 035103.

182. Butov O. V., Rybaltovsky A. A., Bazakutsa A. P., Golant K. M., Vyatkin M. Y., Popov S. M., Chamorovskiy Y. K. 1030 nm Yb 3+ distributed feedback short cavity silica-based fiber laser // *JOSA B*. – 2017. – T. 34, № 3. – C. A43-A48.

183. Kitamura N., Fukumi K., Nishii J., Ohno N. Relationship between refractive index and density of synthetic silica glasses // *Journal of applied physics*. – 2007. –

T. 101, № 12.

184. Tan C., Arndt J., Xie H. Optical properties of densified silica glasses // *Physica B: Condensed Matter*. – 1998. – Т. 252, № 1-2. – С. 28-33.

185. Kitamura N., Toguchi Y., Funo S., Yamashita H., Kinoshita M. Refractive index of densified silica glass // *Journal of non-crystalline solids*. – 1993. – Т. 159, № 3. – С. 241-245.

186. Nanostructured and Subwavelength Waveguides: fundamentals and applications. / Skorobogatiy M.: John Wiley & Sons, 2012.

187. Douay M., Xie W., Taunay T., Bernage P., Niay P., Cordier P., Poumellec B., Dong L., Bayon J., Poignant H. Densification involved in the UV-based photosensitivity of silica glasses and optical fibers // *Journal of Lightwave technology*. – 1997. – Т. 15, № 8. – С. 1329-1342.

188. Таганцев Д. К. Стеклообразные материалы: учебное пособие для вузов по направлению подготовки магистров "Техническая физика" // – 2010.

189. Aggregatzustände: die zustandsänderungen der materie in abhängigkeit von druck und temperatur; mit 127 figuren im text. / Tammann G.: L. Voss, 1922.

190. Lezzi P. J., Evke E. E., Aaldenberg E. M., Tomozawa M. Surface crystallization and water diffusion of silica glass fibers: Causes of mechanical strength degradation // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2015. – Т. 98, № 8. – С. 2411-2421.

191. Kersey A. D., Davis M. A., Patrick H. J., LeBlanc M., Koo K. P., Askins C. G., Putnam M. A., Fribele E. J. Fiber grating sensors // *Journal of lightwave technology*. – 1997. – Т. 15, № 8. – С. 1442-1463.

192. Sheng H.-J., Fu M.-Y., Chen T.-C., Liu W.-F., Bor S.-S. A lateral pressure sensor using a fiber Bragg grating // *IEEE photonics technology letters*. – 2004. – Т. 16, № 4. – С. 1146-1148.

193. Campopiano S., Cutolo A., Cusano A., Giordano M., Parente G., Lanza G., Laudati A. Underwater acoustic sensors based on fiber Bragg gratings // *Sensors*. – 2009. – Т. 9, № 6. – С. 4446-4454.

194. Antunes P., Lima H., Monteiro J., André P. Elastic constant measurement for standard and photosensitive single mode optical fibres // *Microwave and Optical Technology Letters*. – 2008. – Т. 50, № 9. – С. 2467-2469.

195. Pigeon F., Pelissier S., Mure-Ravaud A., Gagnaire H., Veillas C. Optical fibre Young modulus measurement using an optical method // *Electronics letters*. – 1992. – Т. 11, № 28. – С. 1034-1035.

196. Gu X., Guan L., He Y., Zhang H. B., Herman R. High-strength fiber Bragg gratings for a temperature-sensing array // *IEEE Sensors Journal*. – 2006. – Т. 6, № 3. – С. 668-671.

197. Shimokawa T., Liao M. Goodness-of-fit tests for type-I extreme-value and 2-parameter Weibull distributions // *IEEE transactions on reliability*. – 1999. – Т. 48, № 1. – С. 79-86.

198. Kapron F. P., Yuce H. H. Theory and measurements for predicting stressed fiber lifetime // *Optical engineering*. – 1991. – Т. 30, № 6. – С. 700-708.