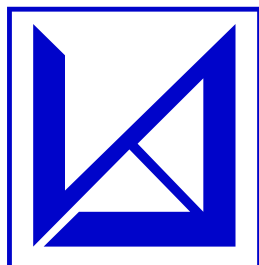


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
НАУКИ ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ЭЛЕКТРОМЕТРИИ  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИАиЭ  
СО РАН)



На правах рукописи

Вольф Алексей Анатольевич

**ПОТОЧЕЧНАЯ ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ЗАПИСЬ  
БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК В  
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ВОЛОКОННЫХ  
СВЕТОВОДАХ**

Специальность 01.04.05 — «Оптика»

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:  
доктор физико-математических наук, член-корреспондент, директор ИАиЭ  
СО РАН  
Бабин Сергей Алексеевич

Новосибирск — 2020

## Оглавление

	Стр.
<b>Введение</b> . . . . .	<b>5</b>
<b>Глава 1. Физические принципы фемтосекундной лазерной записи и теория волоконных брэгговских решеток</b> . . . .	<b>13</b>
1.1 Модификации показателя преломления в объеме прозрачного материала с помощью фемтосекундных импульсов . . . . .	14
1.2 Волоконная брэгговская решетка показателя преломления . . . .	16
1.2.1 Поперечные моды волоконных световодов и теория связанных мод . . . . .	19
1.2.2 Запись ВБР с помощью фс лазерных импульсов видимого и ИК диапазонов . . . . .	25
<b>Глава 2. Поточечная запись ВБР в одномодовых волоконных световодах с полиимидным защитным покрытием</b> . . . .	<b>31</b>
2.1 Запись однородных ВБР методом протяжки волоконного световода через феррулу . . . . .	32
2.1.1 Влияние ошибок позиционирования фс модификаций на спектральные характеристики ВБР . . . . .	34
2.1.2 Экспериментальная установка для фс поточечной записи ВБР . . . . .	38
2.1.3 Стабилизации положения сердцевины волоконного световода . . . . .	42
2.1.4 Схема измерения спектральных характеристик ВБР . . . .	44
2.1.5 Запись коротких ВБР . . . . .	46
2.1.6 Запись длинных ВБР . . . . .	52
2.1.7 Выводы по Параграфу 2.1 . . . . .	54
2.2 Запись волоконных брэгговских решеток с фазовыми сдвигами в структуре . . . . .	55
2.2.1 Схемы записи и опроса ВБР с фазовыми сдвигами в структуре . . . . .	57

2.2.2	Схема РОС-лазера на основе ВБР с фазовыми сдвигами в структуре в эрбиевом ВС . . . . .	60
2.2.3	ВБР с фазовым $\pi$ -сдвигом в структуре в пассивном волоконном световоде . . . . .	61
2.2.4	РОС-лазер на основе ВБР с фазовым $\pi$ -сдвигами в структуре в активном волоконном световоде . . . . .	65
2.2.5	Выводы по Параграфу 2.2 . . . . .	68
<b>Глава 3. Запись ВБР в 7-сердцевинных волоконных световодах</b>		<b>70</b>
3.1	Запись ВБР в 7-сердцевинном волоконном световоде с прямыми сердцевинами . . . . .	72
3.1.1	Схемы записи и опроса массивов ВБР в 7-сердцевинных волоконных световодах . . . . .	72
3.1.2	Запись однородных ВБР в 7-сердцевинном волоконном световоде с прямыми сердцевинами . . . . .	75
3.1.3	Запись неоднородных ВБР в 7-сердцевинном волоконном световоде с прямыми сердцевинами . . . . .	78
3.2	Запись ВБР в 7-сердцевинном волоконном световоде с закрученными по спирали сердцевинами . . . . .	81
3.2.1	Оценка длины ВБР в закрученной боковой сердцевине 7-сердцевинного волоконного световода . . . . .	81
3.2.2	Однопроходная запись массива ВБР в 7-сердцевинном волоконном световоде с закрученными боковыми сердцевинами . . . . .	83
3.2.3	Запись массива ВБР в выбранной сердцевине 7-сердцевинного волоконного световода с закрученными боковыми сердцевинами . . . . .	86
3.2.4	Точечная запись массива ВБР в 7-сердцевинном волоконном световоде с закрученными боковыми сердцевинами . . . . .	88
3.3	Выводы по Главе 3 . . . . .	91

<b>Глава 4. Запись ВБР в многомодовом волоконном световоде с градиентным профилем показателя преломления и ВКР лазер на их основе . . . . .</b>	<b>93</b>
4.1 Запись ВБР в многомодовом волоконном световоде с параболическим профилем показателя преломления фс лазерными импульсами . . . . .	95
4.2 Селектирование основной поперечной моды в волоконном ВКР-лазере с прямой диодной накачкой с помощью фс поточечной ВБР . . . . .	102
4.3 Выводы по Главе 4 . . . . .	106
<b>Заключение . . . . .</b>	<b>108</b>
<b>Благодарности . . . . .</b>	<b>111</b>
<b>Список сокращений и условных обозначений . . . . .</b>	<b>112</b>
<b>Список литературы . . . . .</b>	<b>113</b>



## Введение

В последние несколько десятилетий волоконные брэгговские (ВБР) нашли широкое применение в системах волоконно-оптической связи, волоконных лазерах и системах удаленного мониторинга физических величин.

Традиционный метод создания волоконных решеток (ВБР) основан на использовании УФ лазерного излучения и фоточувствительных волоконных световодов (например, стандартный германосиликатный световод, подвергнутый насыщению сетки стекла молекулярным водородом) [1]. Альтернативным и бурно развивающимся направлением создания волоконных решеток является технология модификации показателя преломления с помощью фемтосекундных (фс) лазерных импульсов. Для фс импульсов изменение показателя преломления происходит через механизм нелинейного (многофотонного) поглощения, что делает возможным запись в нефоточувствительных материалах, а также прямую запись через защитное покрытие волоконного световода, которое прозрачно для инфракрасного фс лазерного излучения [2]. Помимо перечисленных выше важных достоинств, было продемонстрировано, что решетки, записанные фс лазерными импульсами, имеют высокую температурную стабильность (до 1500 °С для сапфировых волоконных световодов [3]), а также устойчивы к  $\gamma$ -излучению ( $>100$  кГр [4]).

Существует два основных метода создания ВБР с помощью фс лазерных импульсов — запись с помощью фазовой маски [5], подобно тому как ВБР пишутся УФ излучением в области интерференционной картины за маской, и точечная запись [6], при которой каждый штрих решетки создается за счет поглощения одного фс лазерного импульса в фокальной области микрообъектива. Каждый из методов имеет свои особенности — как преимущества, так и недостатки. Например, в методе с использованием фазовой маски это фиксированная резонансная длина волны отражения ВБР, зависящая от периода фазовой маски, и относительно высокая энергия фс лазерных импульсов, при которой происходит запись ВБР ( $\sim 0.1$ – $1$  мДж). Данные проблемы решаются при точечной записи, поскольку период ВБР в данном случае может меняться в больших пределах за счет изменения скорости перемещения волоконного световода и/или частоты следования лазерных импульсов. В то же время, при прямой фокусировке фс излучения вглубь материала порог модификации показателя пре-

ломления достигается при энергиях лазерных импульсов  $\sim 10$  нДж, а уровень энергии, необходимый для записи стандартных ВБР, составляет  $\sim 100$  нДж. Это преимущество делает метод поточечной записи привлекательным с точки зрения выбора источника фс лазерных импульсов. Так, например, сравнимый уровень энергии достигается в более дешевых и стабильных лазерных системах с чисто волоконной схемой генерации. Благодаря точному контролю над положением области модификации показателя преломления внутри прозрачного материала, метод поточечной записи получил широкое распространение для создания ВБР с нестандартной геометрией. Ограниченная в малом объеме ( $\sim 1-10$  мкм<sup>3</sup>) модуляция показателя преломления делает возможным запись ВБР в волоконных световодах со сложной пространственной структурой, в частности, многомодовых и многосердцевидных волоконных световодах.

**Целью** диссертационной работы является разработка методов прямой фемтосекундной записи периодических структур показателя преломления (волоконных решеток) в специализированных волоконных световодах для сенсорных и лазерных применений.

Для реализации поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Разработать физические принципы и основы технологии фс поточечной записи коротких ( $< 1$  мм) и длинных (50 мм) ВБР через защитное покрытие одномодового волоконного световода, определить факторы, влияющие на выходные спектральные характеристики ВБР, исследовать выходные спектральные характеристики полученных ВБР (коэффициент отражения, ширина резонансного пика, величина наведенного двулучепреломления);
2. Разработать метод формирования одного или нескольких фазовых сдвигов в структуре ВБР в процессе фс поточечной записи, исследовать спектральные характеристики полученных ВБР с фазовым  $\pi$ -сдвигом (амплитуда и спектральная ширина резонансного провала, величина наведенного двулучепреломления) в зависимости от длины ВБР и положения фазового сдвига;
3. Изготовить ВБР с фазовым  $\pi$ -сдвигом в структуре активного  $\text{Er}^{3+}$  световода с сохранением поляризации, образующую резонатор волоконного лазера с распределенной обратной связью, исследовать выходные характеристики лазера (дифференциальная эффективность, ширина

- линии генерации, отношение сигнал-шум, относительный шум интенсивности);
4. Разработать метод фс поточечной записи однородных и неоднородных ВБР в каждой из сердцевин 7-сердцевинного волоконного световода с прямыми сердцевинами, исследовать влияние изгибной деформации на спектральные характеристики ВБР.
  5. Разработать метод фс поточечной записи ВБР в каждой из сердцевин 7-сердцевинного волоконного световода с закрученными по спирали сердцевинами, исследовать влияние изгибной деформации на спектральные характеристики ВБР.
  6. Исследовать влияние пространственного положения фс поточечной ВБР, записанной в многомодовом градиентном волоконном световоде, на эффективность селектирования поперечных мод. Создать ВБР, селектирующую основную поперечную моду  $LP_{01}$  световода, исследовать данную ВБР в качестве выходного зеркала резонатора ВКР-лазера с прямой диодной накачкой.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, в котором приведены основные результаты работы.

В **Главе 1** рассмотрены физические основы процессов, протекающих в процессе поглощения фс импульсов в объеме прозрачного материала, в частности кварцевого стекла. Обзорный материал, посвященный поперечным модам в волоконных световодах, а также основы теории связанных мод помогут читателю данной диссертации получить представление о спектральных свойствах ВБР, а также параметрах, влияющих на эти свойства. Наконец, обзор методов фс лазерной записи ВБР, приведенный в данной Главе 1, позволит составить историческую картину об основных этапах развития технологии, а также получить представление о существующих технологических ограничениях, связанных с тем или иным методом записи ВБР.

В **Главе 2** предлагается новый метод поточечной записи ВБР путем протяжки покрытого волоконного световода через прозрачную стеклянную феррулу с помощью высокоточного линейного позиционера. Для уменьшения влияния ошибок позиционирования в поперечном направлении в методе используется обратная связь между положением сердцевины ВС и точкой фокусировки фс лазерного пучка. Отличительными особенностями метода является отсутствие необходимости снятия защитного пластикового покрытия ВС, а также высокая

производительность, которая достигается за счет значительного упрощения процедуры настройки начального положения ВС. Для экспериментов был выбран специализированный одномодовый ВС с полиимидным защитным покрытием, стойким к высоким температурам (до 300 °С при долговременном воздействии). Сначала для оптимизации эффективности записи были созданы образцы однородных ВБР 1-го, 2-го и 3-го порядков и выбран порядок, в котором достигается наибольший коэффициент связи ВБР. Далее показана возможность создания ВБР с разной длиной – от 0.1 мкм до 50 мм. Для полученных образцов изучены спектральные характеристики (коэффициент отражения и пропускания, ширина резонансной линии, величина наведенного двулучепреломления), а также проведено сравнение спектральных характеристик с расчетными.

Далее производится доработка уже созданной экспериментальной схемы с целью записи ВБР с фазовыми сдвигами в структуре. В частности, в схему записи добавлен пьезоактюатор, который в заданный момент производит продольное смещение волокна на заданную величину. По предложенной технике были созданы образцы ВБР с одним и двумя фазовыми  $\pi$ -сдвигами в структуре в пассивном волоконном световоде без сохранения поляризации и активном эрбиевом волоконном световоде с сохранением поляризации. Последний был использован в качестве резонатора РОС-лазера, что является первой известной демонстрацией РОС-лазера на основе фемтосекундной поточечной ВБР. Были измерены спектральные характеристики полученных образцов ВБР с фазовыми сдвигами (коэффициент пропускания, ширина окна пропускания, поляризационная чувствительность), а также выходные характеристики РОС-лазера (дифференциальная эффективность, отношение сигнал-шум, относительная интенсивность шума, ширина линии генерации).

В **Главе 3** приводятся результаты исследования по поточечной записи ВБР в 7-сердцевинных волоконных световодах с помощью ИК фемтосекундных (фс) лазерных импульсов. Представлены экспериментальные результаты по записи массивов фс поточечных ВБР в двух разных типах 7-сердцевинных ВС, имеющих как прямые, так и закрученные по спирали сердцевинны. Показано, что расположение ВБР в массиве, а также их резонансные длины волн, могут быть заданы требуемым образом, как в продольном, так и в поперечном направлениях МВС, при этом модификация может быть произведена через защитное покрытие световода. Данная возможность имеет важное значение для сенсорных применений, в которых волокно испытывает механическое воздей-

ствии. Способ записи ВБР в выбранной сердцевине МВС с закрученными боковыми сердцевинами реализован впервые. Обсуждаются особенности метода записи, и делаются оценки геометрических параметров таких ВБР.

**Главе 4** приводятся результаты исследования по поточечной записи ВБР в многомодовом волоконном световоде с градиентным профилем показателя преломления с помощью ИК фс лазерных импульсов. В частности, проводится запись образцов ВБР в центральной части ММ ВС при разных величинах энергии фс лазерных импульсов. Кроме этого, исследуется возможность селектирования высших мод с помощью ВБР, записанных при поперечном сдвиге области модификации относительно центра сердцевины. Для созданных образцов ВБР исследуются особенности спектральных характеристик, а также с помощью оптического микроскопа производится визуализация.

Также в Главе 4 исследуется возможность селектирования основной поперечной моды в ВКР-лазере на основе градиентного ММ ВС с прямой диодной накачкой. Для этого в качестве выходного зеркала используется образец слабоотражающей фс поточечной ВБР. Показано, что в такой конфигурации при ваттных уровнях выходной мощности качество пучка может быть существенно улучшено по сравнению с другими работами по ВКР-лазерам с прямой диодной накачкой, вплоть до селектирования основной поперечной моды.

#### **Научная новизна:**

1. Предложена новая техника фс поточечной записи ВБР через защитное покрытие путем протяжки волоконного световода через прозрачную феррулу. Отклонения сердцевины относительно точки фокусировки фс излучения, возникающие в процессе протяжки волоконного световода через феррулу, компенсируются с помощью системы автоподстройки.
2. Предложен новый метод формирования фазовых сдвигов при фс поточечной записи ВБР с использованием пьезоэлемента, который в заданный момент смещает волоконный световод по направлению его движения на заданную величину. Осуществлена запись 37-мм ВБР с фазовым  $\pi$ -сдвигом в активном  $\text{Er}^{3+}$  волокне с сохранением поляризации. При использовании данной ВБР в схеме РОС-лазера получена генерация одночастотного лазерного излучения на длине волны 1550 нм при накачке лазерным диодом на длине волны 976 нм. Линия генерации имеет ширину 20 кГц, отношение сигнал-шум выходной мощности 71 дБ, относительный шум интенсивности  $-96$  дБ/Гц на частоте 690 кГц.

3. Впервые продемонстрирована возможность записи неоднородных ВБР в каждой из сердцевин 7-сердцевинного волоконного световода с прямыми сердцевинами.
4. Впервые продемонстрирована возможность записи ВБР в каждой из сердцевин 7-сердцевинного волоконного световода с закрученными по спирали сердцевинами. На основе точечного массива ВБР создан векторный изгибный датчик, позволяющий с высокой точностью восстановить не только величину радиуса изгиба в области записи массива ВБР, но и направление изгиба.
5. Впервые изучена возможность селектирования поперечных мод в многомодовом градиентном волоконном световоде с помощью ВБР, созданных методом фс поточечной записи. Показано, что использование слабоотражающей поточечной ВБР, записанной в центральной области многомодового градиентного волоконного световода, в качестве выходного зеркала резонатора ВКР-лазера с прямой диодной накачкой позволяет получить рекордное для данной схемы лазера качество выходного пучка ( $M^2 = 1.2$  при мощности генерации 5 Вт).

**Практическая значимость** Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, имеют высокое практическое значение для ряда прикладных задач. В частности, короткие и длинные ВБР могут быть использованы в распределенных волоконно-оптических системах мониторинга физических величин [7; 8]. ВБР с фазовыми сдвигами в структуре являются ключевым элементом в лазерных системах с распределенной обратной связью [9], а также могут быть использованы в качестве высокочувствительных датчиков физических величин [10; 11]. Результаты, полученные по записи ВБР в выбранной сердцевине многосердцевинного волоконного световода, имеют высокое практическое значение для создания распределенных трёхмерных датчиков изгиба [12; 13], многопараметрических датчиков [14–16], а также распределенных брэгговских зеркал для волоконных лазеров на основе данного типа волоконного световода [17; 18]. Результаты, полученные для поточечных ВБР в многомодовом градиентном волоконном световоде, позволяют значительно улучшить выходные характеристики ВКР-лазера [19; 20].

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Метод фс поточечной записи ВБР путем протяжки волоконного световода через прозрачную феррулу позволяет производить запись корот-

- ких и длинных ВБР через полиимидное защитное покрытие световода. Система компенсации ошибок смещения волокна позволяет создавать длинные (50 мм) ВБР с выходными спектральными характеристиками хорошо согласующимися с расчетными;
2. Метод формирования фазовых сдвигов в структуре ВБР с помощью пьезоэлемента, совершающего быстрый сдвиг волокна в заданный момент и на заданную величину, позволяет создавать ВБР с минимальной спектральной шириной окна пропускания;
  3. Метод формирования фазовых сдвигов в структуре длинных ВБР при фс поточечной записи делает возможным создание резонаторов лазера с распределенной обратной связью в активных волоконных световодах;
  4. Метод фокусировки фс импульсов в заданный объем 7-сердцевинного волоконного световода с прямыми сердцевинами позволяет производить запись однородных и неоднородных ВБР в каждой сердцевине;
  5. Метод фокусировки фс импульсов в заданный объем 7-сердцевинного волоконного световода с закрученными по спирали сердцевинами в совокупности с угловым контролем ориентации волоконного световода позволяет производить запись ВБР в каждой сердцевине;
  6. Метод фс поточечной записи ВБР в центральной части сердцевины многомодового градиентного волоконного световода позволяет эффективно селективировать основную поперечную моду  $LP_{01}$  в спектре отражения оптического сигнала от ВБР. Отстройка положения области модификации ВБР от центра оси световода приводит к более эффективной селекции поперечных групп мод более высоких порядков.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались автором лично на Российском семинаре по волоконным лазерам (Новосибирск, 2016 и 2018 гг.), международном симпозиуме Fundamentals of Laser Assisted Micro- & Nanotechnologies (FLAMN) (Санкт-Петербург, 2016 г.), международной конференции Conference on Lasers & Electro-Optics / Europe and European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC) (Мюнхен, Германия, 2015, 2017 и 2019 гг.), международной конференции International Conference Laser Optics (ICLO) (Санкт-Петербург, 2016 и 2018 гг.), международной конференции SPIE Photonics Europe (Страсбург, Франция, 2018 г.), европейском воркшопе European Workshop on Optical Fibre Sensors (EWOFS) (Лимассол, Кипр, 2019 г.).

**Личный вклад.** Основные результаты получены автором лично. В ходе выполнения работ автор принимал активное участие в выборе направления исследований и постановке задач, провел эксперименты, осуществил обработку и анализ полученных результатов, подготовил материалы для публикаций.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в **15** печатных изданиях, **5** из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК РФ [19; 21–24], **9** – сборниках трудов конференций [25–33], **1** – в прочих изданиях [34].

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, благодарностей, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы. Полный объём диссертации составляет 128 страниц, включая 56 рисунков и 4 таблицы. Список литературы содержит 151 наименование.



## Глава 1. Физические принципы фемтосекундной лазерной записи и теория волоконных брэгговских решеток

Достижения в области генерации сверхкоротких фемтосекундных ( $1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$ ) лазерных импульсов способствовали стремительному развитию новых технологий микромодификации и микрообработки различных материалов, которые имеют неоспоримые преимущества по сравнению с воздействием лазерных импульсов большей длительности [35; 36]. В случае диэлектриков это, в первую очередь, возможность 3-мерной модификации показателя преломления практически любых нефоточувствительных материалов, прозрачных для данной длины волны лазерного излучения [37], что открыло перспективы для создания различных оптических устройств: волноводов в кристаллах и аморфных стеклах [38; 39], поляризационных элементов [40], направленных ответвителей [41] и периодических структур показателя преломления внутри различных световодов [42], среди которых особое место занимают волоконные брэгговские решетки (ВБР) [5; 6].

Для понимания преимуществ технологии записи ВБР с помощью фс излучения в Главе будут рассмотрены физические основы процессов, протекающих в процессе поглощения фс импульсов в объеме прозрачного материала, в частности кварцевого стекла. Обзорный материал, посвященный поперечным модам в волоконных световодах, а также основы теории связанных мод помогут читателю данной диссертации получить представление о спектральных свойствах ВБР, а также параметрах, влияющих на эти свойства. Наконец, обзор методов фс лазерной записи ВБР, приведенный в данной Главе, позволит составить историческую картину об основных этапах развития технологии, а также получить представление о существующих технологических ограничениях, связанных с тем или иным методом записи ВБР.

## 1.1 Модификации показателя преломления в объеме прозрачного материала с помощью фемтосекундных импульсов

Процесс поглощения фс лазерного импульса, сфокусированного вглубь материала, можно условно разделить на следующие этапы [37; 43]: нелинейное поглощение излучения и ионизация вещества, перенос энергии возбужденных электронов решетке материала, разогрев материала до высокой температуры и его последующее остывание до первоначальной температуры. Механизм взаимодействия фс лазерного импульса с прозрачным материалом в корне отличается от механизмов свойственных импульсам с длительностью более пикосекунды, поскольку для субпикосекундных импульсов временные рамки возбуждения электронов меньше времени рассеяния фотонов на электронах ( $\sim 1$  пс). Это значит, что воздействие фс импульса на материал заканчивается до того, как разогретые электроны передадут энергию решетке материала. Тепловая диффузия вне фокального объема будет минимизирована и, следовательно, воздействие останется локализованным. В то же время, за счет сверхкороткой длительности лазерного импульса в фокальной области интенсивность излучения достигает рекордных значений ( $\sim 10$  ТВт/см<sup>2</sup>), когда первостепенную роль начинают играть нелинейные процессы. Одним из таких процессов является процесс многофотонной ионизации, характерными параметрами которого являются порог многофотонной ионизации  $I_{\text{МРА}}$  и коэффициент фотонности процесса  $K \geq E_g/\hbar\omega$ , где  $E_g$  – ширины запрещенной зоны материала,  $\hbar\omega$  – энергия фотона. Коэффициент фотонности (целое число) определяет минимальное количество фотонов, который необходим для преодоления электроном ширины запрещенной зоны материала и перехода из валентной зоны в зону проводимости. Так, для кварцевого стекла, для которого  $E_g = 7.6$  эВ, и длины волны фс излучения 800 нм фотонность процесса  $K = 5$ , а  $I_{\text{МРА}} = 25$  ТВт/см<sup>2</sup>. Помимо многофотонной ионизации свободные электроны в диэлектрике могут возникнуть вследствие туннельной ионизации в сильном поле проходящего через материал излучения. В данном случае происходит деформация кулоновского потенциала и электрон может туннелировать через потенциальный барьер. Такой тип ионизации реализуется для большой амплитуды поля и низкой частоты падающего излучения. При промежуточном варианте туннельной и многофо-

тонной ионизации электрон может поглотить энергию нескольких фотонов и далее туннелировать через потенциальный барьер.

В зависимости от параметров фс излучения на начальном этапе основной вклад в ионизацию электронов могут вносить как многофотонная, так и туннельная ионизация [44]. При последовательном поглощении свободным электроном нескольких фотонов с суммарной энергией, превышающей ширину запрещенной зоны, и последующей ударной ионизации происходит переход связанного электрона в зону проводимости. Повторение этого процесса приводит к лавинообразному росту плотности свободных электронов. За счет данного процесса происходит дальнейший лавинообразный рост плотности плазмы, из-за чего такой процесс носит название лавинной ионизации. Рост плотности плазмы продолжается до достижения критической плотности плазмы  $\rho_{BD} = \epsilon_0 m_e \omega_p^2 / q_e^2$ , где  $m_e$  – эффективная масса электрона,  $\omega_p$  – плазменная частота,  $q_e$  – заряд электрона. Когда плазменная частота сравнивается с частотой падающего излучения, то плазма становится непрозрачной. Считается, что оптический пробой наступает именно при достижении внутри материала данного значения плотности плазмы. Для длины волны 1026 нм значение критической плотности плазмы составляет  $\rho_{BD} \approx 10^{21} \text{ см}^{-3}$ .

В дальнейшем энергия образованной плазмы перераспределяется посредством электрон-фононных взаимодействий в энергию решетки материала, приводя к различным видам модификации. Режим модификации зависит не только от параметров фс излучения (длина волны, длительность и энергия импульса), но также от условий фокусировки и свойств прозрачного материала. Всего выделяют три вида модификаций, характерных для кварцевого стекла: плавное изменение показателя преломления, формирование двулучепреломляющего изменения показателя преломления, образование пустот [43].

При записи волоконных брэгговских решеток, основным материалом которых является кварцевое стекло, преимущественно реализуется режим плавного изменения показателя преломления, а энергия фс импульсов составляет  $\sim 10\text{--}100$  нДж. В работе [45] было показано, что воздействие фс импульсов с длиной волны 800 нм, длительностью 130 фс и энергией 0.1–6 мкДж, сфокусированных в кварцевое стекло с помощью линзы с числовой апертурой  $NA=0.55$ , приводит к локальному уплотнению материала в области воздействия лазерного излучения. Данные, полученные путем исследования модифицированного материала методом рамановской спектроскопии, показали рост количества

трех- и четырехчленных кольцевых структур в сетке кварцевого стекла, вместо пяти и шестичленных, преобладающих в немодифицированной области. Наличие таких кольцевых структур приводит к увеличению плотности материала, и, следовательно, росту показателя преломления. Известно также, что при структурных изменениях в объеме прозрачного материала под действием фс лазерного излучения происходят и другие процессы, например, образование центров окраски  $E'$  (положительно заряженных кислородных вакансий) [46] и немостиковых дырочных центров кислорода, или НВОНС-центров (англ. *Non-Bridging Oxygen Hole Center*) [35]. Известно, что данные дефекты не вносят существенного вклада в изменение показателя преломления материала, поскольку образцы, которые подвергались термическому отжигу для устранения этих дефектов, не возвращаются к исходному показателю преломления [41]. Помимо вышеизложенных причин также выделяют тепловую модель, в соответствии с которой увеличение показателя преломления в области фокусировки фс импульсов происходит за счет стремительного ( $\sim 10^8$  К/с [47]) охлаждения материала с высоких температур, достигаемых за счет образовавшейся плазмы.

## 1.2 Волоконная брэгговская решетка показателя преломления

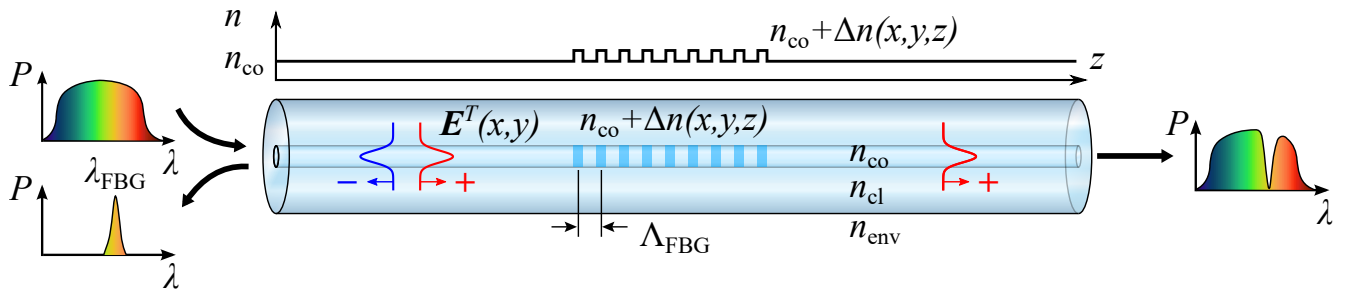


Рисунок 1.1 — Волоконная брэгговская решетка.

Волоконная брэгговская решетка (ВБР) представляет собой участок волоконного световода (ВС) в сердцевине которого индуцирована периодическая модуляция показателя преломления с периодом  $\Lambda_{\text{FBG}}$ . Схематичное представление такой структуры представлено на Рис. 1.1. Направляемым модам  $E_{\mu}(r, z) = E_{\mu}(r)e^{-i\beta_{\mu}z}$ , распространяющимся в ВС, соответствует набор постоянных распространения  $\beta_{\mu} = 2\pi n_{\mu}^{\text{eff}}/\lambda$ , которые в отсутствии возмущения  $\Delta n(x, y, z)$  распространяются без взаимодействия друг с другом. Наличие периодического воз-

мушения в виде структуры ВБР определяет резонансное взаимодействие между модами ВС. Такое взаимодействие обычно описывается с помощью теории связанных мод, в рамках которой предполагается, что на определенной длине волны моды, удовлетворяющие условию фазового синхронизма, могут эффективно передавать друг другу энергию. Кроме того, предполагается, что в присутствии слабого периодического возмущения распределение поля таких мод остаётся неизменным. Таким образом, две моды, имеющие постоянные распространения  $\beta_\mu$  и  $\beta_\nu$ , взаимодействуют на решетке показателя преломления, если выполняются условие:

$$\beta_\mu(\lambda) \pm \beta_\nu(\lambda) - \frac{2\pi m}{\Lambda_{\text{FBG}}} = 0, \quad (1.1)$$

где  $m$  – целое положительное число, порядок, в котором реализуется брэгговский резонанс. Если постоянные распространения одного знака, то происходит взаимодействие противоположно направленных мод, если разного, то сонаправленных мод.

Так, для одномодового ВС, поддерживающего распространение единственной поперечной моды  $\text{LP}_{01}$ , резонансная длина волны отражения моды на структуре ВБР описывается выражением:

$$2\beta_{01} - \frac{2\pi m}{\Lambda_{\text{FBG}}} = 0, \quad (1.2)$$

откуда может быть получена резонансная длина волны брэгговской решетки:

$$\lambda_{\text{FBG}} = \frac{2n_{\text{eff}}\Lambda_{\text{FBG}}}{m}. \quad (1.3)$$

В общем случае, структура ВБР, записанная в сердцевине одномодового ВС с постоянным показателем преломления  $n_{\text{co}}$ , может быть рассмотрена как малое возмущение  $\Delta n_{\text{co}}(x,y,z)$  и записана через следующее выражение (Рис. 1.1):

$$\begin{aligned} n_{\text{FBG}}(x,y,z) &= n_{\text{co}} + \Delta n_{\text{co}}(x,y,z) = \\ &= n_{\text{co}} + \sum_{m=1}^{\infty} \Delta n_m(x,y) \cos \left[ \frac{2\pi m}{\Lambda_{\text{FBG}}} z + \varphi_m(z) \right] \end{aligned} \quad (1.4)$$

В данном выражении  $\Delta n_m(x,y)$  – поперечная составляющая модуляции показателя преломления в порядке отражения  $m$ . Как продольная, так и поперечная

составляющие  $\Delta n_{\text{co}}(x, y, z)$  во многом обусловлены способом, а также режимом записи ВБР (мощность лазерного излучения, энергия импульсов, время экспозиции и т.д.), о чем более подробно будет рассказано в Пункте 1.2.2. Например, для стандартного метода записи ВБР с помощью интерференционных методов и УФ лазерного излучения, в области сердцевины индуцируется модуляция показателя преломления, близкая к синусоидальной, период которой соответствует первому порядку отражения ВБР ( $m = 1$ ). Для такого случая выражение 1.4 упрощается до вида:

$$n_{\text{FBG}}(z) = n_{\text{co}} + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda}z\right) = n_{\text{co}} + \overline{\Delta n} \left[1 + s \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda}z\right)\right] \quad (1.5)$$

где  $\overline{\Delta n}$  – постоянная составляющая модуляции показателя преломления,  $s$  – видность модуляции показателя преломления.

Отметим, что волоконные брэгговские решетки являются одним из ключевых элементов волоконной оптики, поскольку имеют широкий диапазон применений, включающий в себя датчики физических величин, волоконные лазеры, спектральные фильтры и многое другое. С момента первой экспериментальной реализации ВБР в 1978 г. группой Хилла [49] активно исследуются методы их создания, возможности их использования, а также теория взаимодействия мод ВС с разными по геометрии структурами ВБР. Использование численных моделей, основанных на решении уравнений связанных мод, позволяет производить расчет спектральных характеристик ВБР с произвольным профилем показателя преломления, что широко используется при моделировании оптических систем в которых присутствуют ВБР.

К задачам экспериментальных исследований ВБР можно отнести:

- разработку методов создания высококачественных периодических структур в сердцевине волоконного световода с помощью лазерного излучения;
- исследование фоточувствительности волоконных световодов с разными легирующими добавками к разным длинам волн лазерного излучения;
- разработку методов записи ВБР с неоднородным профилем показателя преломления (наклонные, чирпированные, аподизированные и т.д.);
- исследование влияния режимов записи ВБР на их спектральные свойства и эксплуатационные характеристики;

- использование ВБР для измерения физических величин (температура, деформация, влажность, акустические колебания и т.д.) в волоконно-оптических сенсорных системах.

Далее будут рассмотрены основы теории связанных мод, а также приведены некоторые полезные выражения, которые помогут читателю данной диссертации получить представление о спектральных свойствах ВБР, а также параметрах, влияющих на эти свойства.

### 1.2.1 Поперечные моды волоконных световодов и теория связанных мод

Перед тем как перейти к теоретическому описанию взаимодействия поля моды волоконного световода со структурой ВБР будет полезным рассмотреть, что из себя представляет волоконный световод. Наиболее распространенным случаем можно считать волоконные световоды цилиндрической формы с цилиндрической световедущей сердцевиной. Как правило, в качестве основного материала оболочки волоконного световода используют чистое кварцевое стекло ( $\text{SiO}_2$ ) с показателем преломления  $n_{cl}$ , а материала сердцевины – германо-силикатное стекло с показателем преломления  $n_{co} > n_{cl}$ . В зависимости от длины волны и размера сердцевины световод может поддерживать распространение как одной, так и множества поперечных мод.

Распространение монохроматической электромагнитной волны с длиной волны  $\lambda$  и волновым числом  $k = 2\pi/\lambda$  в такой диэлектрической структуре описывается волновым уравнением Гельмгольца, которое, в свою очередь, получается из системы уравнений Максвелла [50]:

$$\Delta E + n^2(r)k^2 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0, \quad \text{где} \quad \Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \quad (1.6)$$

Предполагая возможность разделения переменных, будем искать решение данного дифференциального уравнения в виде:

$$E(r, \varphi, z, t) = F(r) e^{i\eta\varphi} e^{-i\beta z} e^{i\omega t}, \quad (1.7)$$



где  $F(r)$  – радиальная составляющая поля,  $\eta$  – азимутальное число,  $\beta$  – постоянная распространения,  $\omega$  – угловая частота.

Подстановка данного решения приводит Ур. 1.6 форме:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial r} + \left[ n(r)^2 k^2 - \beta^2 - \frac{\eta^2}{r^2} \right] = 0 \quad (1.8)$$

Для волоконного световода со ступенчатым профилем показателя преломления вида:

$$n(r) = \begin{cases} n_{\text{co}}, & \text{при } r \leq a \\ n_{\text{cl}} < n_{\text{co}}, & \text{при } r > a \end{cases}, \quad (1.9)$$

решением полученного дифференциального уравнения является набор функций Бесселя первого рода  $J_\eta(x)$  и модифицированных функций Бесселя второго рода  $K_\eta(x)$ . Для связанных мод, когда постоянная распространения  $\beta$  принимает ряд значений в диапазоне  $kn_{\text{cl}} < \beta < kn_{\text{co}}$ :

$$F(r) = \begin{cases} J_\eta(k_T r), & \text{при } r \leq a \\ K_\eta(\gamma r), & \text{при } r > a \end{cases}. \quad (1.10)$$

Параметры  $k_T = \sqrt{n_{\text{co}}^2 k^2 - \beta^2}$  и  $\gamma = \sqrt{\beta^2 - n_{\text{cl}}^2 k^2}$  определяют скорость изменения  $F(r)$  в сердцевине и оболочке соответственно. Большая величина  $k_T$  означает большее число осцилляций радиального распределения в оболочке. Большее значение  $\gamma$  означает более быстрый спад и меньшее проникновение волны в оболочку. Сумма квадратов  $k_T$  и  $\gamma$  остается постоянной:  $k_T^2 + \gamma^2 = (n_{\text{co}}^2 - n_{\text{cl}}^2)k^2 = \text{NA}^2 k^2$ . Поэтому если  $k_T$  растет, то  $\gamma$  убывает, и поле проникает глубже в оболочку. Для значений  $k_T$ , превосходящих  $\text{NA}k$ , величина  $\gamma$  становится мнимой, и волна перестает быть связанной в оболочке.

Чтобы рассчитать распределение поперечных мод, необходимо определить значения, которые принимает  $\beta$ . Условие непрерывности электрического и магнитного полей на границе раздела сердцевины и оболочки ( $r = a$ ), позволяет получить характеристическое уравнение, или дисперсионное соотношение относительно  $\beta$ . Для слабонаправленных волоконных световодов, для которых  $n_{\text{co}} - n_{\text{cl}} \ll 1$ , такое соотношение имеет вид:

$$X \frac{J_{\eta \pm 1}(X)}{J_\eta(X)} = \pm Y \frac{K_{\eta \pm 1}(Y)}{K_\eta(Y)}, \quad \text{где } X = k_T a \quad \text{и} \quad Y = \gamma a. \quad (1.11)$$



Для каждого азимутального индекса  $\eta$  характеристическое уравнение имеет множество решений, т.е. дискретных значений постоянной распространения  $\beta_{\eta\mu}$ , каждое из которых соответствует моде. Индекс  $\mu$  характеризует радиальное распределение моды.

Отметим, что поперечные моды характеризуется двумя ортогональными поляризационными состояниями. Линейно поляризованная мода  $(\eta, \mu)$  обычно обозначается как мода  $LP_{\eta\mu}$  (от англ. *linearly polarized*). Обе ортогональных поляризационных составляющих моды  $(\eta, \mu)$  имеют одну и ту же постоянную распространения и одинаковое пространственное распределение.

Волоконный световод, сердцевина которого поддерживает распространение единственной (фундаментальной) моды  $LP_{01}$ , называют одномодовым. Данный тип световода используется в Главах 2 и 3 при записи фс поточечных ВБР через защитное полиимидное покрытие. Поперечная составляющая электрического поля для такой моды близка к гауссовому распределению и описывается как:

$$E_{01}(r) = E_0 \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right) \quad (1.12)$$

где  $r_0$  – радиус поля моды.

Другим типом волоконных световодов, которые широко используются в телекоммуникационных и лазерных системах, является многомодовый (ММ) световод с градиентным профилем показателя преломления сердцевины. В Главе 4 исследуются особенности записи фс поточечных ВБР в данном типе световода, а также демонстрируются преимущества таких ВБР при использовании в схеме ВКР-лазера с прямой диодной накачкой. Частным случаем градиентных волоконных световодов являются световоды с параболическим профилем показателя преломления сердцевины:

$$n(r) = \begin{cases} n_{co} \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^2}, & \text{при } r \leq a, \\ n_{co} \sqrt{1 - 2\Delta} = n_{cl}, & \text{при } r > a, \end{cases} \quad (1.13)$$

где  $n_{co}$  – максимальное значение показателя преломления сердцевины,  $n_{cl}$  – показатель преломления оболочки,  $a$  – радиус сердцевины,  $\Delta = (n_{co}^2 - n_{cl}^2)/2n_{co}^2$  – относительное изменение показателя преломления.

Для ММ ВС с таким профилем сердцевины номер группы мод можно охарактеризовать числом  $g = 2\mu + |\eta| - 1$ , где  $\eta$  и  $\mu$  – азимутальное и радиальное

числа соответственно. Распределение поперечного поля моды  $LP_{\eta\mu}$  описываются следующим выражением:

$$E_{\eta\mu}(r, \varphi, z) = \tilde{E}_{\eta\mu} \left( \frac{r}{r_0} \right)^\eta \exp \left( -\frac{r^2}{2r_0^2} \right) L_{\mu-1}^{|\eta|} \left( \frac{r^2}{r_0^2} \right) e^{i\eta\varphi} e^{-i\beta z}, \quad (1.14)$$

где  $r_0$  – радиус поля основной моды  $LP_{01}$ ,  $L_\mu^\eta(x)$  – полином Лагерра.

Общее число мод для ММ ВС с параболическим профилем быть оценено как  $N = n_{\text{co}}^2 k^2 r_0^2 \Delta / 2$ . В области длины волны 1.55 мкм данное число составляет  $\approx 340$ , а в области длины волны 1 мкм  $\approx 820$ . На Рис. 1.2 приведено расчетное распределение электрического поля для первых 5 групп мод ММ ВС Corning 62.5/125 на длине волны 1.55 мкм. Для каждой из поперечных мод представлена только одна поляризационная составляющая.

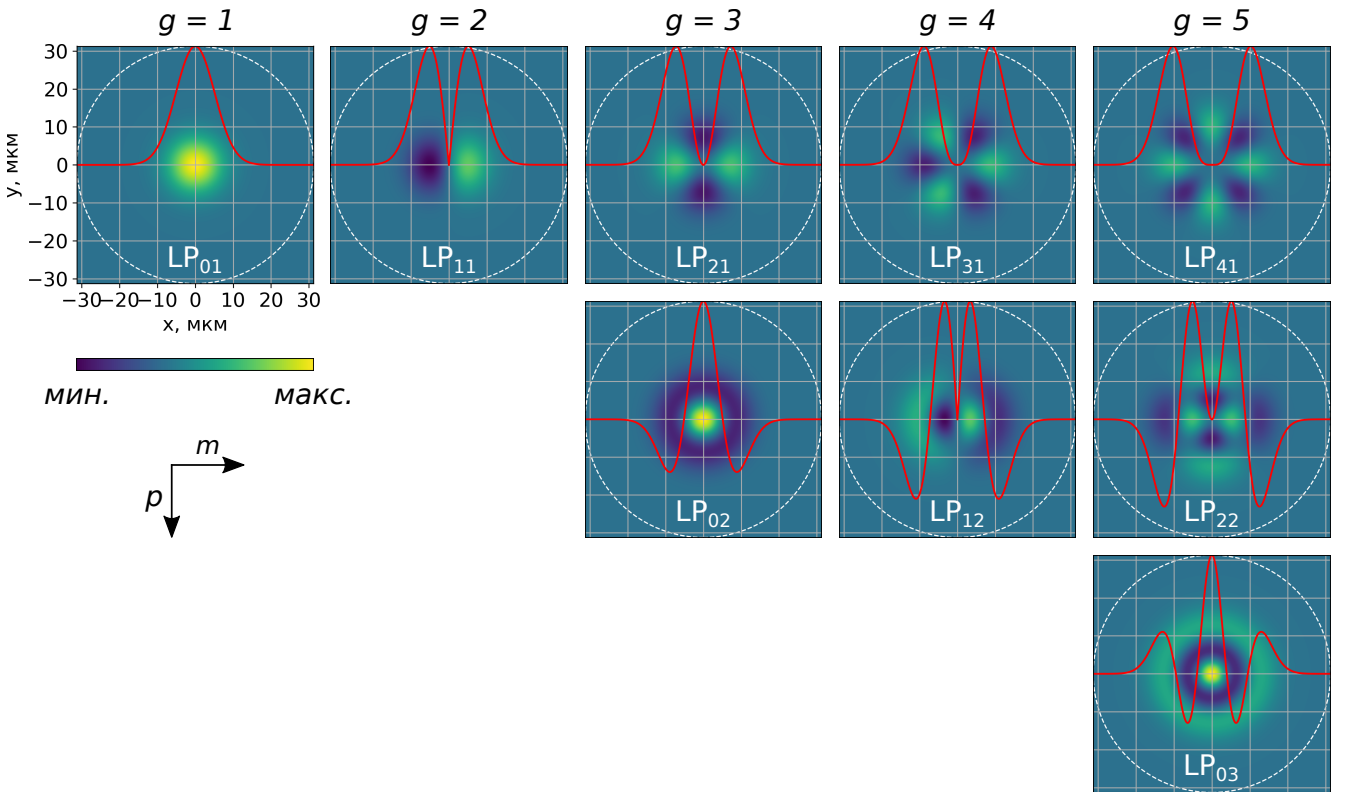


Рисунок 1.2 — Распределение электрического поля для первых 5 групп мод ММ ВС Corning 62.5/125 на длине волны 1550 нм.

Взаимодействие мод волоконного световода на структуре ВБР может быть описано с помощью теории связанных мод [51]. Данная теория является хорошим инструментом для получения количественной информации о дифракционной эффективности и спектральных свойствах ВБР. Численное решение уравнений связанных мод позволяет рассчитать выходные характеристики неоднородных ВБР, включая аподизированные, chirпированные и наклонные [52]. В

приближении идеальной моды мы предполагаем, что в отсутствие возмущения электрическое поле в волоконном световоде может быть записано как суперпозиция идеальных мод для которых распределение электрического поля имеет следующий вид:

$$\vec{E}(r, \varphi, z, t) = \sum_{\mu} \left[ A_{\mu}(z) \vec{E}_{\mu}(r, \varphi) e^{i\beta_{\mu}z} + B_{\mu}(z) \vec{E}_{\mu}(r, \varphi) e^{-i\beta_{\mu}z} \right] e^{-i\omega t}, \quad (1.15)$$

где  $A_{\mu}(z)$  и  $B_{\mu}(z)$  – медленно меняющиеся амплитуды мод, распространяющихся вдоль оптической оси световода в направлениях  $+z$  и  $-z$  соответственно. Поперечные составляющие поля  $\vec{E}_{\mu}(x, y)$  описывают как сердцевинные, так и оболочечные моды. В идеальном волноводе поперечные моды ортогональны друг другу и между ними не происходит обмена энергией.

В то же время, наличие возмущения диэлектрической проницаемости  $\Delta\varepsilon(r, \varphi, z)$  приводит к тому, что между модами возникает связь. Для  $\mu$ -й моды такая связь описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dA_{\mu}}{dz} = i \sum_{\nu} A_{\nu} K_{\nu\mu}(z) e^{i(\beta_{\nu} - \beta_{\mu})z} + i \sum_{\nu} B_{\nu} K_{\nu\mu}(z) e^{-i(\beta_{\nu} + \beta_{\mu})z} \\ \frac{dB_{\mu}}{dz} = -i \sum_{\nu} A_{\nu} K_{\nu\mu}(z) e^{i(\beta_{\nu} + \beta_{\mu})z} - i \sum_{\nu} B_{\nu} K_{\nu\mu}(z) e^{-i(\beta_{\nu} - \beta_{\mu})z} \end{cases} \quad (1.16)$$

В данной системе уравнений  $K_{\nu\mu}(z)$  – поперечная составляющая коэффициента связи для мод  $\nu$  и  $\mu$ , которая выражается через соотношение:

$$K_{\nu\mu}(z) = \frac{\omega}{4} \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \Delta\varepsilon(r, \varphi, z) \vec{E}_{\nu}(r, \varphi) \vec{E}_{\mu}^*(r, \varphi) r dr d\varphi, \quad (1.17)$$

где  $\Delta\varepsilon(r, \varphi, z) \approx 2n_{co}\Delta n_{co}(r, \varphi, z)$  при условии что  $\Delta n_{co}(r, \varphi, z) \ll n_{co}$ .

Таким образом, зная распределения полей для всех групп мод конкретного световода, численное решение системы уравнений 1.16 позволяет определить эволюцию полей мод вдоль произвольного возмущения диэлектрической проницаемости в волоконном световоде. Однако, на практике решение системы для трехмерного случая представляется ресурсоемкой задачей, поэтому зачастую используется ряд упрощений, который позволяет получить полезные аналитические выражения для случая одномодового световода.

Введем вспомогательные коэффициенты

$$\sigma_{\nu\mu}(z) = \frac{\omega n_{\text{co}}}{2} \overline{\Delta n_{\text{co}}}(z), \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \vec{E}_{\nu}(r, \varphi) \vec{E}_{\mu}^*(r, \varphi) r dr d\varphi, \quad (1.18)$$

$$\kappa_{\nu\mu}(z) = \frac{s}{2} \sigma_{\nu\mu}(z), \quad (1.19)$$

через которые коэффициент связи (выражение 1.17) может быть переписан в виде

$$K_{\nu\mu}(z) = \sigma_{\nu\mu}(z) + 2\kappa_{\nu\mu}(z) \cos \left[ \frac{2\pi}{\Lambda} z + \varphi(z) \right]. \quad (1.20)$$

Отметим, что полученное выражение для коэффициента связи имеет вид, аналогичный модуляции показателя преломления ВБР, записанной в области сердцевинны волоконного световода (выражение 1.5). Подобно предыдущему случаю, параметр  $s$  обозначает видность коэффициента связи.

Рассматривая моды с идентичным распределением поля, т.е. моду с амплитудой  $A(z) \equiv A_{\nu}(z)$ , которая отражается в идентичную встречную моду с амплитудой  $B(z) \equiv B_{\nu}(z)$ , систему уравнений 1.16 можно упростить используя т.н. “синхронное приближение” [51]:

$$\begin{cases} \frac{dR}{dz} = i\hat{\sigma}R(z) + i\kappa S(z) \\ \frac{dS}{dz} = -i\hat{\sigma}S(z) - i\kappa^*R(z) \end{cases} \quad (1.21)$$

где  $R(z) = A(z)e^{i\delta z - \varphi/2}$ ,  $S(z) = B(z)e^{-i\delta z + \varphi/2}$ ,  $\kappa = \kappa_{\nu\nu}$ ,

$$\hat{\sigma} = \delta + \sigma - \frac{1}{2} \frac{d\varphi}{dz}, \quad (1.22)$$

$$\delta = \beta - \frac{\pi}{\Lambda_{\text{FBG}}} = 2\pi n_{\text{co}} \left[ \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{\text{FBG}}} \right]. \quad (1.23)$$

Коэффициент  $\hat{\sigma}$  носит название обобщенного коэффициента связи, а  $\delta$  – отстройка от брэгговского резонанса.

В частности, для однородной брэгговской решетки в одномодовом волоконном световоде, которая имеет постоянный период ( $d\varphi/dz = 0$ ) и амплитуду модуляции показателя преломления:

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{2\pi}{\lambda} \overline{\Delta n_{\text{co}}} \\ \kappa &= \kappa^* = \frac{\pi}{\lambda} s \overline{\Delta n_{\text{co}}} \end{aligned} \quad (1.24)$$

В таком приближении уравнения из системы 1.21 становятся обыкновенными дифференциальными уравнениями первого порядка с постоянными коэффициентами. Соответствующие решения уравнений могут быть найдены при задании граничных условий для брэгговской решетки с длиной  $L$ , лежащей в диапазоне  $[-L/2; L/2]$ . Предположив, что на “входе” решетки амплитуда  $R(-L/2) = 1$ , а отраженная волна не распространяется за пределы решетки, т.е.  $S(L/2) = 0$ , амплитуда отраженной волны может быть записана как:

$$\rho = \frac{S(-L/2)}{R(-L/2)} = \frac{-\kappa \sinh(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2}L)}{\hat{\sigma} \sinh(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2}L) + i\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2} \cosh(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2}L)}, \quad (1.25)$$

а мощность как

$$r = |\rho|^2 = \frac{\sinh^2(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2}L)}{\cosh^2(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2}L) - \frac{\hat{\sigma}^2}{\kappa^2}}. \quad (1.26)$$

Из полученной формулы может быть посчитан максимальный коэффициент отражения:

$$r_{\max} = \tanh^2(\kappa L). \quad (1.27)$$

На практике данный коэффициент используется для оценки коэффициента связи, при известных значения длины и коэффициента отражения ВБР, либо для подбора желаемого коэффициента отражения путем вариации амплитуды модуляции показателя преломления и длины ВБР.

### 1.2.2 Запись ВБР с помощью фс лазерных импульсов видимого и ИК диапазонов

Запись ВБР с помощью фс лазерных импульсов ИК диапазона ( $\lambda = 800$  нм,  $\Delta t = 120$  фс,  $f_{\text{las}} = 1$  кГц,  $E_p = 300$  мкДж) впервые была осуществлена в 2003 году методом экспозиции сердцевины ВС через фазовую маску [5]. При такой записи периодическая модуляция показателя преломления возникает в результате интерференции  $\pm 1$  порядков дифракции после прохождения фс импульса через фазовую маску (Рис. 1.3), а период ВБР  $\Lambda_{\text{FBG}}$  определяется периодом фазовой маски  $\Lambda_{\text{PM}}$  согласно следующему выражению:  $\Lambda_{\text{FBG}} = \Lambda_{\text{PM}}/2$ .

Как и в случае когда используются УФ лазерные источники, для достижения порога модификации перед фазовой маской размещают цилиндрическую линзу, которая фокусирует излучение в сердцевине световода, тем самым увеличивая его интенсивность. При этом область модификации уменьшается в поперечном направлении к оси волокна, что, с одной стороны, требует более точной настройки положения фс пучка для попадания в область сердцевины одномодового световода, с другой стороны, в случае записи ВБР в многомодовом ВС, требует дополнительного сканирования в поперечном направлении для увеличения поперечной площади модификации сердцевины и, соответственно, увеличения интеграла перекрытия с высшими модами световода [53]. Следует отметить, что в случае фс импульсов, на видность интерференционной картины значительно влияет пространственная когерентность лазерного излучения. В частности, для наиболее эффективной записи требуется подбор оптимального расстояния между ВС и фазовой маской [54].

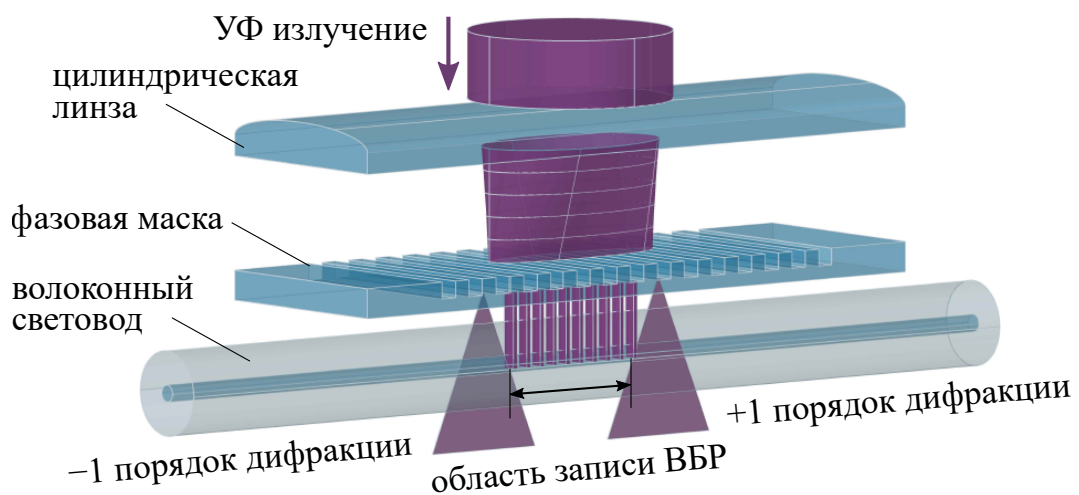


Рисунок 1.3 — Записи ВБР путем экспозиции УФ лазерного излучения через фазовую маску.

С помощью метода фс записи через фазовую маску были продемонстрированы различные геометрии ВБР: однородные, чирпированные, аподизированные; в различных типах световодах: одномодовых, маломодовых, многомодовых [53]; без удаления защитного акрилового или полиимидного покрытия [55], в фотонно-кристаллических световодах, в различных активных световодах, а также в сапфировых световодах для высокотемпературных измерений [53]. Отметим, что метод фс записи через фазовую маску имеет ряд ограничений и недостатков. Основной заключается в том, что длина волны ВБР задается периодом фазовой маски. Следовательно, для записи массива ВБР с отличающимися дли-

нами волн резонансных пиков требуется иметь широкий набор фазовых масок, которые необходимо постоянно заменять в процессе записи. Кроме того, метод записи требователен к энергии фс лазерных импульсов ( $\sim 0.1\text{--}1$  мДж), что сильно ограничивает выбор фс лазерных систем, которые могут использоваться для записи ВБР.

В 2004 году был предложен метод фс поточечной (англ. *point-by-point*) записи ВБР [6], где использовалась титан-сапфировая лазерная система ( $\lambda = 800$  нм,  $\Delta t = 150$  фс,  $f_{\text{las}} = 1$  кГц,  $E_p \sim 100$  нДж), а перемещение ВСв области фокусировки фс импульсов осуществлялось с помощью двухкоординатного линейного позиционера. При таком подходе каждый штрих решетки создается за счет поглощения одного фс лазерного импульса при равномерном перемещении ВС (Рис. 1.4). Соответственно, период ВБР зависит от скорости перемещения волокна  $v_{\text{tr}}$  и частоты следования лазерных импульсов  $f_{\text{las}}$  согласно следующему выражению:  $\Lambda_{\text{FBG}} = v_{\text{tr}}/f_{\text{las}}$ . Если частота следования фс лазерных импульсов является постоянной величиной, период ВБР может легко изменяться путем вариации  $v_{\text{tr}}$  непосредственно в ходе записи массивов ВБР с различными резонансными длинами волн. Кроме этого, при поточечной записи возможно создание различных профилей показателя преломления ВБР. Так, например, для записи линейно chirпированных ВБР волоконный световод должен двигаться с постоянным ускорением [56].

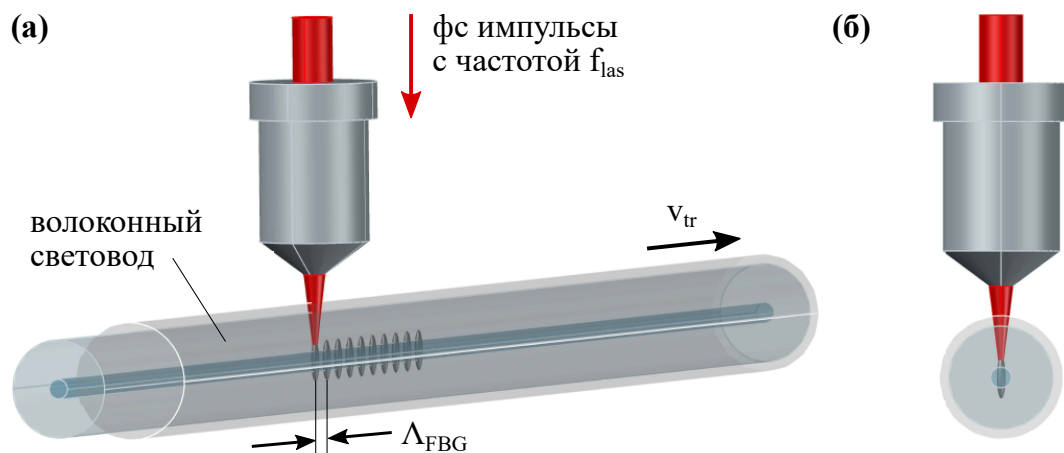


Рисунок 1.4 — Прямая фокусировка фс импульсов при поточечной записи ВБР.

Существует два основных подхода для реализации поточечной схемы записи ВБР. Первый из них заключается в том, что волокно закрепляется на 3-мерном позиционере и перемещается таким образом, чтобы точка фокусировки оставалась в сердцевине волокна на протяжении всей длины ВБР [6]. Данный



подход имеет основной недостаток, связанный с трудностью настройки, поскольку для записи качественной ВБР ошибки в позиционировании должны быть много меньше диаметра поля моды ВС по 3 координатам, что проблематично реализовать на практике, особенно при записи сравнительно длинных ВБР. Также требуется компенсировать кривизну боковой поверхности световода для уменьшения абберации при фокусировке излучения. Второй подход основывается на протягивании волокна через прозрачную феррулу [57]. Фокусировка излучения осуществляется через шлифованную плоскую грань феррулы, что позволяет минимизировать абберации, связанные с кривизной боковой поверхности волокна. Более того, требования к точности позиционирования в поперечном к оси волокна направлении в данном случае ниже, т.к. смещения волокна из точки фокусировки ограничены границами феррулы. Данная схема была несколько модифицирована для записи ВБР через защитную оболочку, что чаще всего требуется на практике [21], о чем более подробно будет рассказано в Параграфе 2.1. В частности, диаметр канала феррулы превосходил внешний диаметр волоконного световода с покрытием на 10–20 мкм, для предотвращения заклинивания волокна при протяжке из-за вариации толщины защитного покрытия. При этом феррула размещается на пьезопозиционере, который компенсирует смещения волокна в ферруле для обеспечения точной фокусировки внутри сердцевины световода [21]. Более того, модифицированная схема записи позволяет относительно просто реализовать записи ВБР с фазовыми сдвигами в структуре [22], о чем более подробно будет рассказано в Параграфе 2.2. С помощью поточечной схемы записи, так же как и в случае записи через фазовую маску, были продемонстрированы различные типы ВБР: однородные, чирпированные [57], аподизированные [58], в различных типах световодов: одномодовых, многомодовых, без удаления защитного акрилового или полиимидного покрытия, в различных активных световодах. Несомненным достоинством фс поточечного метода записи является относительно низкое требование к энергии фс импульсов ( $\sim 10\text{--}100$  нДж). Для экспериментальной реализации метода выбор может быть сделан в пользу более дешевых и компактных фемтосекундных лазерных систем с полностью волоконной схемой. Несмотря на высокую степень гибкости поточечного метода записи ВБР, у данного метода есть существенный недостаток, а именно малый поперечный размер области модификации ( $\sim 1$  мкм), что приводит к малой величине интеграла перекрытия ВБР



с полем моды ВС. Особенно данное ограничение становится критическим при записи высокоотражающих ВБР, а также ВБР в ММ световодах [59].

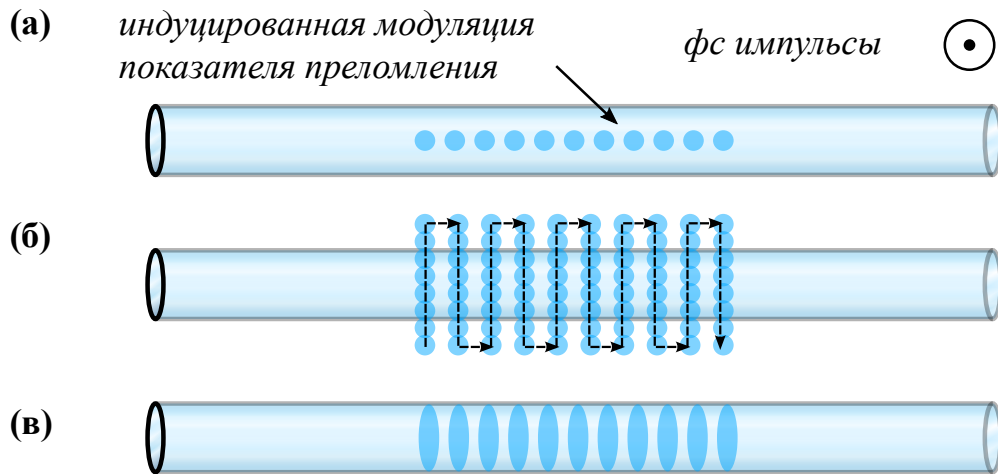


Рисунок 1.5 — Вид структуры ВБР при различных методах прямой фокусировки фс импульсов в область сердцевины ВС: (а) запись гауссовым пучком (поточечная), (б) запись гауссовым пучком с поперечным сканированием, (в) запись астигматическим гауссовым пучком.

Для решения данной проблемы были предложены два модифицированных метода поточечной записи. В первом методе путем наложения одиночных модификаций формируется непрерывная линия в поперечном к оптической оси ВС направлении, отсюда метод получил название — метод записи линиями (англ. *line-by-line*) [60]. Данная линия может полностью пересекать сердцевину одномодового ВС или значительную часть сердцевины многомодового ВС (Рис. 1.5б). При этом период ВБР задается последовательным смещением волокна после записи каждой линии. В работе [60] перемещение ВС осуществлялось с помощью двухкоординатного позиционера Aerotech ABL1000 со скоростью до 500 мкм/с, что, при длине линий 30 мкм, соответствует производительности  $\approx 17$  линий в секунду. Отметим, что такая величина является крайне низкой при с точки зрения записи стандартных ВБР, с длиной  $\sim 1\text{--}10$  мм. Метод непрерывного сканирования сердцевины волокна (англ. *core-scanning technique*) позволяет несколько ускорить процесс записи и реализовать высокоотражающие ВБР с малыми внерезонансными потерями [61]. Однако данный метод имеет недостаток при записи ВБР высших порядков, связанный с наклонном штрихов решетки, которые способствуют появлению сильной связи с оболочечными модами ВС.

Одним из последних представленных в литературе является модифицированный поточечный метод записи ВБР (англ. *plane-by-plane*), предложенный в

2017 г. [62]. Данный метод основан на фокусировке в область сердцевины ВС астигматического гауссового пучка. Для достижения астигматизма перед записывающим объективом размещается цилиндрической линзы. При этом подбор фокусного расстояния линзы, а также расстояния между линзой и объективом, позволяет изменять форму модификации в перпендикулярном к оси ВС направлении, как это показано на Рис. 1.5в. В частности, на примере ВС типа SMF-28 было показана возможность записи ВБР, перекрывающей площадь сердцевины световода. По этой причине могут быть получены высокоотражающие ВБР с относительно низкими внрезонансными потерями. Кроме того, данный метод легко позволяет записывать наклонные ВБР путем поворота цилиндрической линзы вокруг оптической оси. К недостаткам метода можно отнести более высокое требование к энергии фс импульсов ( $\sim 1-10$  мкДж), чем в случае поточечной записи.

## Глава 2. Поточечная запись ВБР в одномодовых волоконных световодах с полиимидным защитным покрытием

В данной Главе приводятся результаты исследования по поточечной записи волоконных брэгговских решеток (ВБР) в одномодовых волоконных световодах (ВС) с полиимидным защитным покрытием с помощью ИК фемтосекундных (фс) лазерных импульсов. В частности, обсуждается влияние возмущение коэффициента связи ВБР на её выходные спектральные характеристики, описана схема экспериментальной установки записи поточечных ВБР с помощью фемтосекундных лазерных импульсов, описан метод стабилизации положения ВС относительно фс лазерного пучка, приводится детальное описание схемы измерения характеристик ВБР с высоким спектральным разрешением, сравниваются результаты по записи однородных ВБР 1-го, 2-го и 3-го порядков, приводятся результаты по записи ультракоротких (до 100 мкм) и длинных (50 мм) ВБР. Далее, выработанный подход используется для создания ВБР с одним и двумя фазовыми сдвигами в структуре в пассивном одномодовом ВС, проводится характеристика созданных образцов ВБР с фазовым  $\pi$ -сдвигом, приводятся результаты по записи ВБР с фазовым  $\pi$ -сдвигом в структуре в активном эрбиевом ВС с сохранением поляризации. Последний образец используется в качестве резонатора волоконного лазера с распределенной обратной связью, проводится характеристика режима генерации.

Изложенные в данной Главе результаты опубликованы в работах [21; 22] и были представлены на конференциях [25; 27–29]. Способ изготовления волоконных брэгговских решеток в нефоточувствительных волоконных световодах зарегистрирован в качестве патента [63].

## 2.1 Запись однородных ВБР методом протяжки волоконного световода через феррулу

Существует большое разнообразие подходов к записи ВБР, как с помощью лазерных источников УФ диапазона (например, вторая гармоника  $\text{Ar}^+$  газового лазера,  $\text{KrF}$  эксимерный лазер), так и фемтосекундных лазерных систем видимого или ИК диапазона (титан-сапфировый,  $\text{Yb:KGW}$  лазеры и их гармоники) (см. Пункт 1.2.2). Среди них, фс поточечной метод записи представляется одним из наиболее перспективных, поскольку позволяет управлять продольной и поперечной геометрией записываемой структуры, а именно: периодом и резонансной длиной волны ВБР, коэффициентом связи, интегралом перекрытия с полем моды ВС [64], вводить фазовые сдвиги в структуру [65], позиционировать ВБР в выбранном объеме внутри ВС, что представляет интерес при селектировании поперечных мод в многосердцевинных и многомодовых ВС [20; 66]. Кроме того, поточечный метод является наименее требовательным к энергии фс импульсов, что делает возможным его реализацию при использовании более доступных фс лазерных систем. Так, в случае поточечной записи ВБР диапазон энергий фс импульсов составляет  $\sim 10\text{--}100$  нДж [67], в случае записи ВБР астигматическим пучком  $\sim 1\text{--}10$  мкДж [62], в случае фс записи через фазовую маску энергия достигает значений  $\sim 1$  мДж [5].

Благодаря своим достоинствам поточечный метод записи ВБР с помощью фс лазерных импульсов [6] получил широкое распространение при проведении научных исследований, а также лег в основу коммерческих станций по записи ВБР с помощью фс лазерного излучения [68–70]. Коммерциализация фс технологии поточечной записи ВБР, которая произошла в течение последних 5 лет, позволила значительно расширить рынок волоконных сенсорных систем. В частности, распространение получили высокотемпературные волоконные сенсоры на основе фс ВБР, записанных через специализированное защитное покрытие (например, полиимид [55] или ORMOCER [71]), а также сенсоры на основе волоконных световодов, устойчивых к радиационному воздействию (чисто кварцевая или фторированная сердцевина) [72] и высоким температурам (до  $1000$  °С для кварцевых волоконных световодов) [73]. В настоящее время, ВБР созданные по технологии фс записи имеют высокий потенциал в области биомедицинских исследований, при создании медицинских устройств для малоинвазивной хирур-

гии [12;74], а также при создании “умных” композитных материалов, например, углепластиковых панелей, мониторинг состояния которых может производиться в процессе их эксплуатации [75].

Несмотря на успехи фс технологии при создании ВБР со сложной геометрией [57;76], некоторые научные и технологические проблемы записи всё ещё остаются нерешенными или малоосвещенными в литературе. Так, например, одной из сложностей, возникающей в процессе фс записи ВБР, является точное позиционирование области модификации показателя преломления относительно сердцевины волоконного световода, а также поддержание данного положения вдоль всей длины структуры.

В данном Параграфе предлагается новый метод поточечной записи ВБР путем протяжки покрытого волоконного световода через прозрачную стеклянную феррулу с помощью высокоточного линейного позиционера. Для уменьшения влияния ошибок позиционирования в поперечном направлении в методе используется обратная связь между положением сердцевины ВС и точкой фокусировки фс лазерного пучка. Отличительными особенностями метода является отсутствие необходимости снятия защитного пластикового покрытия ВС, а также высокая производительность, которая достигается за счет значительного упрощения процедуры настройки начального положения ВС. Для экспериментов был выбран специализированный одномодовый ВС с полиимидным защитным покрытием, стойким к высоким температурам (до 300 °С при долговременном воздействии). Сначала для оптимизации эффективности записи были созданы образцы однородных ВБР 1-го, 2-го и 3-го порядков и выбран порядок, в котором достигается наибольший коэффициент связи ВБР. Далее показана возможность создания ВБР с разной длиной – от 0.1 мкм до 50 мм. Для полученных образцов изучены спектральные характеристики (коэффициент отражения и пропускания, ширина резонансной линии, величина наведенного двулучепреломления), а также проведено сравнение спектральных характеристик с расчетными.

### 2.1.1 Влияние ошибок позиционирования фс модификаций на спектральные характеристики ВБР

Стандартные одномодовые ВС, рассчитанные на работу в области длин волн 1.55 мкм, имеют цилиндрическую сердцевину с типичным диаметром 8.2 мкм и диаметром поля моды  $10.4 \pm 0.5$  мкм на длине волны 1.55 мкм (например, Corning SMF-28). В то же время, одиночный фс импульс с гауссовым поперечным распределением индуцирует в области фокусировки модификацию показателя преломления в форме эллипсоида [77]. При этом ориентация такой модификации совпадает с направлением распространения фс излучения. Это связано с тем фактом, что порог нелинейного поглощения лазерного излучения достигается в определенном объеме, в котором интенсивность превышает критическую ( $\sim 20$  ТВт/см<sup>2</sup> для кварцевого стекла). Для гауссового пучка, распространяющегося в прозрачной среде с показателем преломления  $n = 1.45$  вдоль оси  $Y$  интенсивность может быть записана в форме [78]:

$$I(x, y, z) \sim \frac{1}{1 + y^2/y_R^2} \exp \left[ -\frac{2(x^2 + z^2)}{w_0(1 + y^2/y_R^2)} \right] \quad (2.1)$$

где  $w_0 = \lambda/\pi n \text{NA}$  – перетяжка пучка в области фокусировки объектива с апертурой NA,  $y_R = knw_0^2/2$  – рэлеевская длина,  $\lambda$  и  $k = 2\pi/\lambda$  – длина волны и волновое число в вакууме соответственно. Так, например, для лазерного излучения с длиной волны  $\lambda = 1.03$  мкм и объектива с числовой апертурой NA = 0.3 перетяжка пучка будет составлять  $w_0 \approx 0.75$  мкм. На Рис. 2.1 приведен пример расчетного распределения интенсивности в плоскости  $XY|_{z=0}$  для пучка с указанными параметрами.

Следует отметить что приведенное выше распределение интенсивности рассчитано для линейного режима фокусировки, когда гауссов пучок сохраняет свою форму по мере распространения. В действительности, в нелинейном приближении, существует множество факторов, влияющих на форму высокоинтенсивного фс пучка. Среди таких факторов можно отметить керровскую нелинейность, приводящую к самофокусировке лазерного излучения, образование ион-электронной плазмы, которая приводит к расфокусировке (см. Параграф 1.1). В общем случае для моделирования распространения высокоинтен-

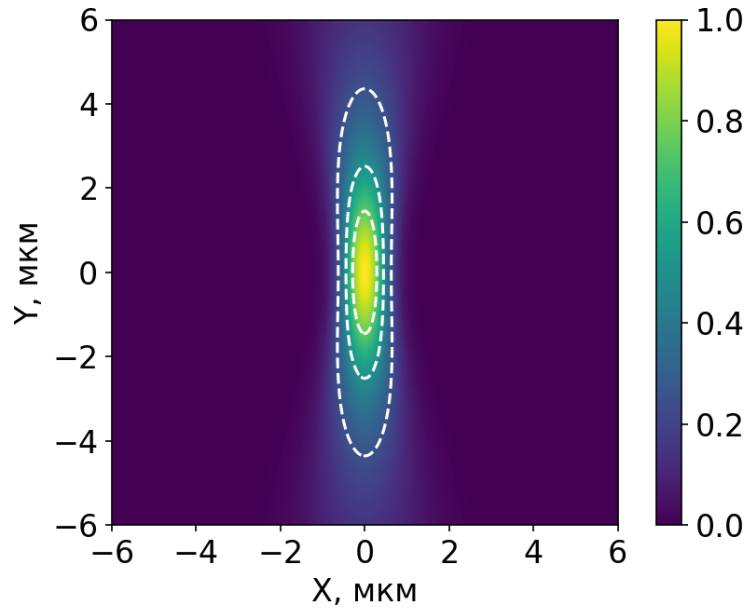


Рисунок 2.1 — Нормированное распределение интенсивности вблизи области фокусировки для гауссового пучка распространяющегося вдоль оси  $Y$ .

Изолинии соответствуют значениям 0.25, 0.5 и 0.75 от максимальной интенсивности.

сивных лазерных импульсов в среде применяется численный счет нелинейного уравнения Шрёдингера [79; 80].

Таким образом, при записи поточечных ВБР в стандартных ВС достигается лишь частичное перекрытие поля моды с областью фс модификации показателя преломления. Положение области фокусировки фс импульсов относительно сердцевины будет определять интеграл перекрытия между полем моды ВС и индуцированной модификацией показателя преломления  $\eta$ . При этом максимальное значение интеграла перекрытия будет достигаться при совмещении геометрических центров фс модификации и поля моды ВС. Если в случае однородной ВБР коэффициент связи постоянен и может быть представлен как  $\kappa = \pi\Delta n_{\text{mod}}\eta/\lambda_{\text{FBG}}$ , то для ВБР с переменным интегралом перекрытия коэффициент связи имеет вид [64]:

$$\kappa(z) = \frac{\omega}{4} \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \Delta\varepsilon(r, \varphi, z) \vec{E}(r, \varphi, z) \vec{E}^*(r, \varphi, z) r dr d\varphi \quad (2.2)$$

где  $\Delta\varepsilon(r, \varphi, z)$  – возмущение диэлектрической проницаемости обусловленное наличием ВБР,  $E(r) = E_0 \exp(-r^2/r_0^2)$  – радиальная составляющая поля поперечной моды сердцевины одномодового ВС,  $r_0$  – радиус поля моды.

Наличие ошибок позиционирования фс модификаций в структуре ВБР (Рис.2.2), приводящих к поперечному возмущению коэффициента связи вдоль оптической оси ВС, делает аналитический расчет спектральных характеристик ВБР затруднительным, а результат сложнопредсказуемым [81]. Минимизация таких ошибок позволит производить запись более качественных ВБР.

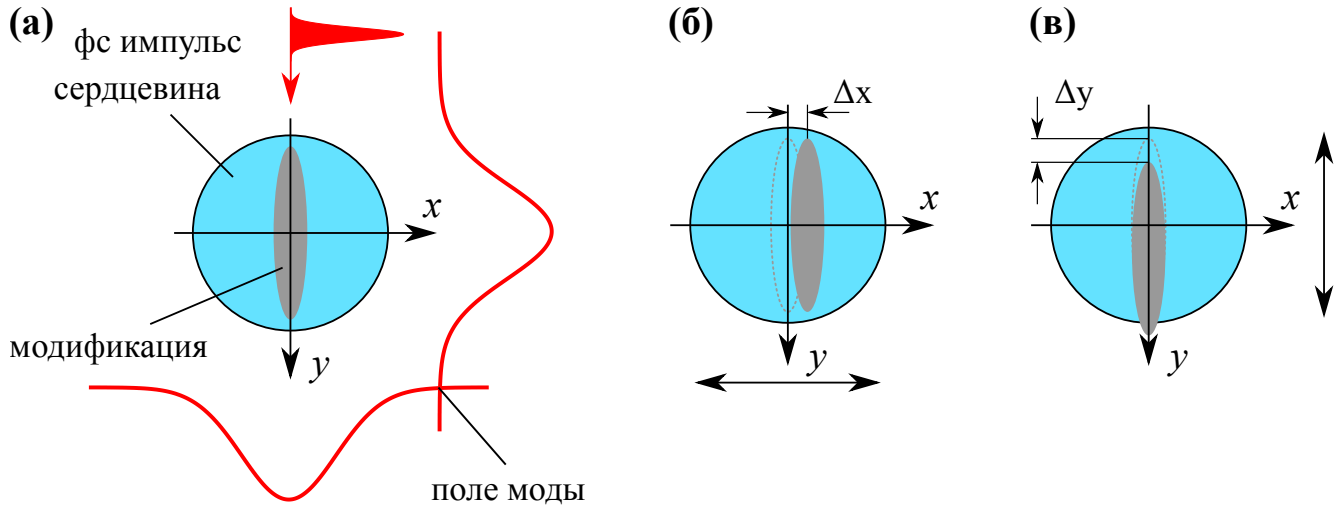


Рисунок 2.2 — Модификация центральной части сердцевины ВС (а), ошибки позиционирования модификации возникающие в процессе записи ВБР (б)–(в).

С точки зрения экспериментальной реализации метода фс поточечной записи, точное позиционирование модификации в области сердцевины ВС на всей длине ВБР представляется сложной задачей, ввиду высокого требования к точности выравнивания ВС по координатам. Стандартный подход фс поточечной записи ВБР [6] основан на подготовке специального “бутерброда”, состоящего из предметного стекла, на которое укладывается группа ВС, покровного стекла, которым накрываются ВС, и иммерсионной жидкости, которой заполняется свободное пространство между стеклами и ВС. Далее, такой “бутерброд” размещается на 5-координатном позиционере (3-координатный линейный транслятор и 2-координатный угловой столик) и подводится в область фокусировки фс лазерных импульсов. После этого происходит выравнивание подготовленного образца по углу для обеспечения плоскостности, и проверяется прямолинейность ВС вдоль выбранного направления записи ВБР (оптической оси ВС). Как правило, такая процедура отнимает длительное время (от 10 до 30 минут) и делает запись длинных однородных ВБР трудоемкой.

Влияние возмущения коэффициента связи на спектральные характеристики ВБР может быть рассмотрено на следующем примере. В работе [81] по-



казано, что ВБР 1-го порядка, коэффициент связи которой промодулирован гармоническим сигналом с частотой  $\gamma \ll 2\pi/\Lambda$ , кроме основного брэгговского резонанса на длине волны  $\lambda_{\text{FBG}} = 2n_{\text{co}}^{\text{eff}}\Lambda$  будет иметь два дополнительных резонанса с отстройкой  $\Delta\lambda_{\pm} = 2n_{\text{co}}^{\text{eff}}\Lambda/(1 \pm \frac{2\pi}{\gamma\Lambda})$ . При определенных условиях коэффициент отражения дополнительных резонансов может быть сопоставим с основным. Так, например, для ВБР с периодом  $\Lambda_{\text{FBG}} = 0.535$  мкм, и частотой возмущения  $\gamma = 0.1$  мкм<sup>-1</sup> величина отстройки дополнительных пиков составляет  $\Delta\lambda_{\pm} \approx \pm 13$  нм при  $n_{\text{co}}^{\text{eff}} = 1.45$ . Для более низких частот ( $\gamma \leq 0.0075$  мкм<sup>-1</sup>), величина отстройки уменьшается до 1 нм и становится сравнимой с типичной шириной основного брэгговского резонанса ( $\Delta\lambda_{\text{FBG}} \sim 0.1$  нм для ВБР длиной  $L \sim 1$  мм и резонансной длиной волны  $\lambda_{\text{FBG}} \approx 1.55$  мкм).

Случай, когда во время поточечной записи ВБР сердцевина ВС случайным образом отклоняется от точки фокусировки фс пучка, будет соответствовать продольному показателю преломления вида:

$$n(z) = n_{\text{co}} + \alpha(z)\Delta n_{\text{mod}} \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda}z\right) \quad (2.3)$$

где  $\Delta n_{\text{mod}}$  – амплитуда модуляции показателя преломления для ВБР с невозмущенным коэффициентом связи,  $\alpha(z) = \delta n_0 + \delta n_1 \sin(\gamma_1 z + \varphi_1) + \dots + \delta n_N \cos(\gamma_N z + \varphi_N)$  – внесенное в структуру ВБР многочастотное возмущение.

Для иллюстрации влияния возмущения коэффициента связи на спектральные характеристики были численно посчитаны спектры отражения для однородной ВБР ( $\alpha(z) = 1$ ) и ВБР, чья амплитуда модуляции показателя преломления имеет многочастотное возмущение (Рис. 2.3). Для расчета использовалась численная схема, реализующая решение уравнений связанных мод [52]. В обоих случаях длина ВБР составляла 5 мм и  $\Delta n_{\text{mod}} = 2.35 \times 10^{-4}$ . Для ВБР с многочастотным возмущением модуляции частота  $\gamma_i$  варьировалась в диапазоне от 0.0009 до 0.003 мкм<sup>-1</sup>, амплитуда возмущения  $\delta n_i$  от 0.33 до 0.51, а также задавались разные случайные значения фазы  $\varphi_i$ . Огибающая амплитуды модуляции показателя преломления использованная в расчетах приведена на Рис. 2.4.

Далее будет рассмотрена экспериментальная реализация метода фс поточечной записи ВБР, который позволяет компенсировать подобные ошибки позиционирования.

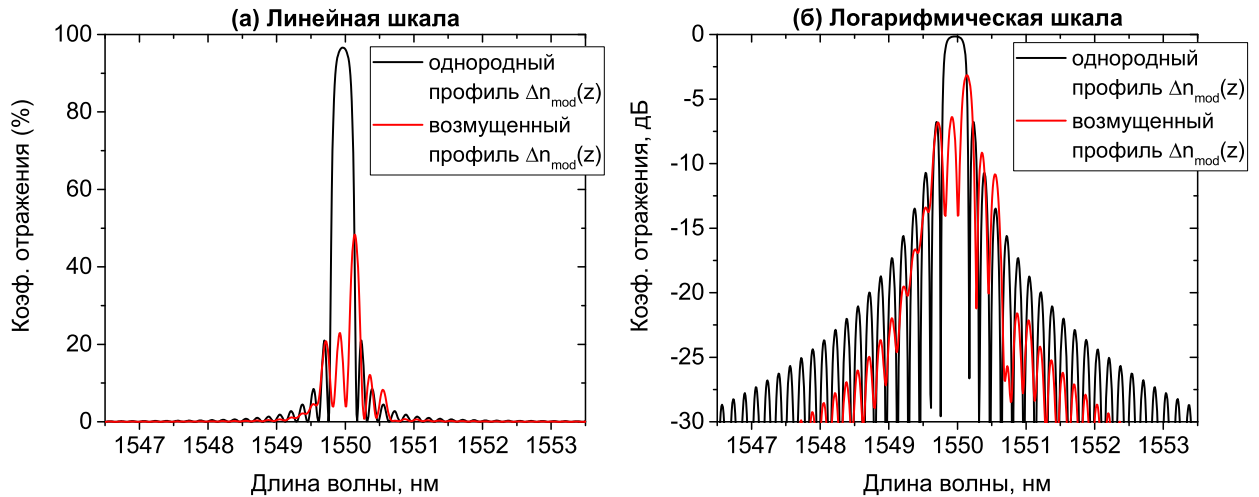


Рисунок 2.3 — Сравнение спектров отражения ВБР с возмущенным и невозмущенным продольным профилем  $\Delta n_{\text{mod}}(x)$  в линейном (а) и логарифмическом (б) масштабах.

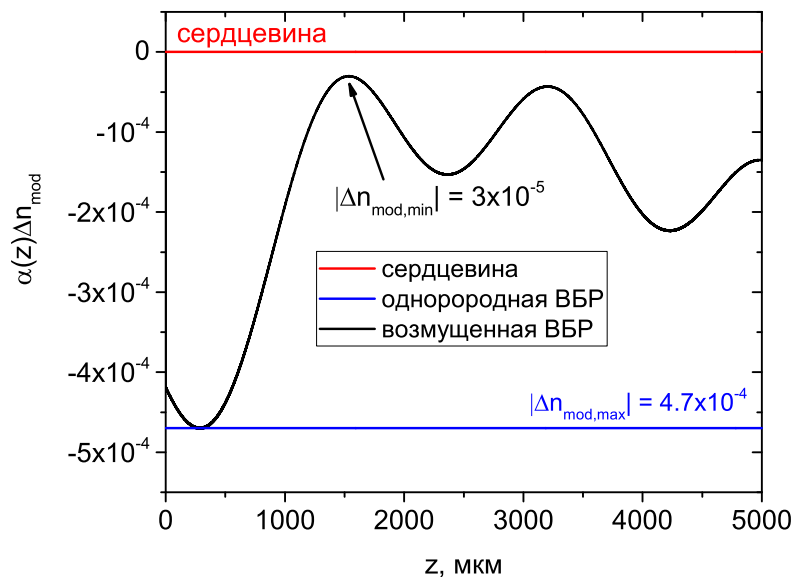


Рисунок 2.4 — Огибающая амплитуды модуляции показателя преломления, использованная в расчетах.

### 2.1.2 Экспериментальная установка для фс поточечной записи ВБР

Запись ВБР осуществлялась на модифицированной установке прецизионной фс лазерной модификации материалов (Рис. 2.5). Ключевыми элементами данной установки являются Yb:KMG фемтосекундный лазер Light Conversion PHAROS 6W (см. Таблицу 1) и высокоточная линейная платформа позици-

онирования Aerotech ABL1000 (технические параметры указаны в Таблице 2). Энергия импульсов лазерного излучения контролировалась высокочувствительным фотодиодным измерителем энергии импульсов Ophir PD10-pJ и набором нейтральных светофильтров. Лазерный пучок, с помощью системы поворотных зеркал и делителей пучка, заводился на вход микрообъектива Mitutoyo 100× Plan Apo NIR HR ( $NA = 0.70$ , разрешающая сила  $0.4 \text{ мкм @ } 550 \text{ нм}$ , глубина резкости  $\pm 0.6 \text{ мкм @ } 550 \text{ нм}$ ). Оптическое волокно, в сердцевину которого производилась фокусировка пучка, продевалось через стеклянную феррулу со шлифованной боковой поверхностью, как это показано на вставке Рис. 2.5. Необходимость шлифовки была обусловлена снижением влияния линзирования лазерного излучения на поверхности феррулы. Внешний диаметр феррулы составлял 3 мм, внутренний диаметр выбирался таким образом, чтобы между поверхностью волокна и стенками феррулы оставался зазор 2–10 мкм. Свободное пространство канала заполнялось иммерсионной жидкостью – глицерином. Это в свою очередь позволяло протягивать волокно через канал свободно (без трения), а также снизить влияние aberrаций для проходящего лазерного излучения. Для подстройки положения волокна в области фокусировки фс лазерного излучения феррула крепилась на 3-координатном пьезопозиционере Thorlabs MAX312D с диапазоном перемещений  $20 \times 20 \times 20 \text{ мкм}$ . С помощью светодиодной подсветки и КМОП-камеры PixeLINK PL-B741 (разрешение  $1280 \times 1024$  пикселей) выполнялась визуализация волоконного световода в области фокусировки лазерного излучения. Управление указанными выше устройствами осуществлялось с помощью компьютера под управлением специализированного программного обеспечения, разработанного в Институте автоматизации и электротехники СО РАН.

Процедура записи фс поточечных ВБР была следующей. Сначала свободный конец волоконного световода продевался через феррулу, затем фиксировался с помощью специализированного зажима установленного на 3-координатной платформе позиционирования Aerotech ABL1000. При помощи микроактюаторов положение феррулы (волокна) устанавливалось таким образом, чтобы поглощение фемтосекундных импульсов происходило в центральной области сердцевины. Далее на платформу Aerotech отправлялась команда, приводящая платформу, а следовательно и волокно, в состояние равномерного прямолинейного движения. После короткой задержки, когда скорость платформы стабилизировалась, открывался затвор фемтосекундного лазера. Скорость движения

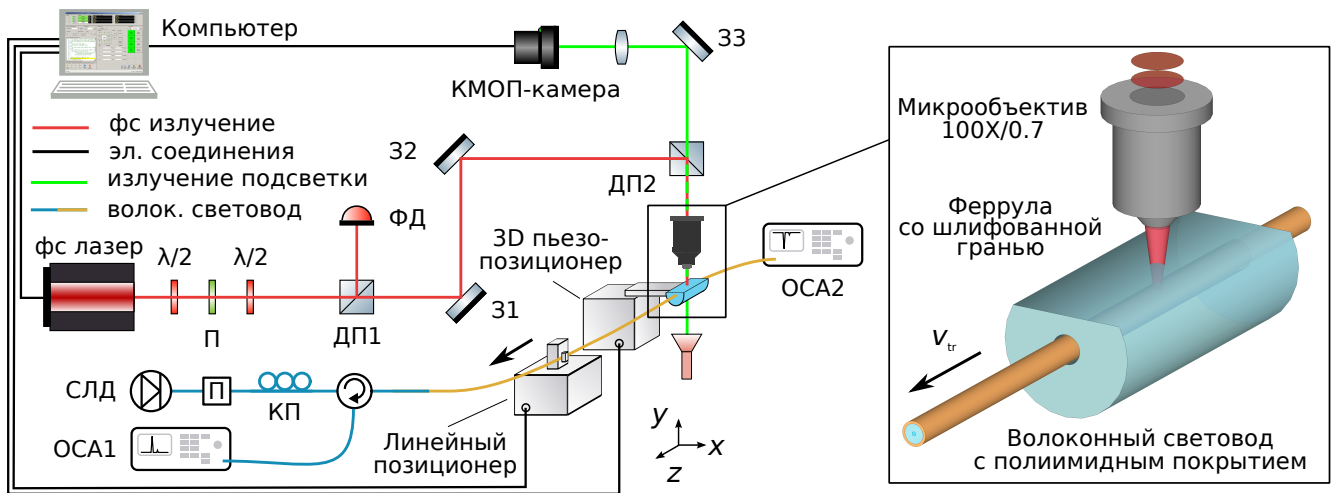


Рисунок 2.5 — Схема установки для поточечной записи ВБР фемтосекундными лазерными импульсами.

Обозначения: СЛД – суперлюминесцентный диод, П – поляризатор, КП – контроллер поляризации, ДП – делитель пучка, З – поворотное зеркало, ФД – фотодиодный измеритель энергии лазерных импульсов, ОСА – оптический спектральный анализатор.

Таблица 1 — Технические характеристики фемтосекундного лазера Light Conversion PHAROS 6W.

Активный кристалл	Yb:KGW
Длина волны, $\lambda$	1026 нм
Длительности импульса, $t_p$	232 фс
Энергия импульса, $E_p$	$\leq 200$ мкДж
Частота повторения импульсов, $\nu$	1...200 кГц
Мода	TEM <sub>00</sub>
Качество пучка, $M^2$	<1.2
Поляризация	линейная

Таблица 2 — Технические характеристики высокоточной платформы 3D позиционирования Aerotech ABL1000.

Система привода	линейный бесщёточный сервопривод
Область перемещений	100
Точность позиционирования	200 нм
Повторяемость перемещений	50 нм
Разрешение энкодера	0.5 нм
Плоскостность	$\pm 0.4$ мкм

волокна и частота лазерных импульсов выбирались таким образом, чтобы полученная структура имела необходимый период  $\Lambda_{\text{FBG}} = v_{\text{tr}}/f_{\text{las}}$ , где здесь  $v_{\text{tr}}$  – скорость перемещения волокна,  $f_{\text{las}}$  – частота следования фс лазерных импульсов. В свою очередь, резонансная длина волны ВБР определялась выражением

$$\lambda_{\text{FBG}} = \frac{2n_{\text{co}}^{\text{eff}}\Lambda}{m} = \frac{2n_{\text{co}}^{\text{eff}}v_{\text{tr}}}{mf_{\text{las}}} \quad (2.4)$$

где  $m$  – порядок резонанса. Во всех экспериментах частота следования импульсов устанавливалась в значение  $f_{\text{las}} = 1$  кГц. Так, для ВБР первого порядка с резонансной длиной волны  $\lambda_{\text{FBG}} \simeq 1550$  нм скорость перемещения ВС составляла  $v_{\text{tr}} \simeq 0.535$  мм/с. Время протяжки волокна и время, в течение которого затвор лазера оставался открыт,  $\Delta T$  обеспечивали набор необходимой длины структуры ВБР  $L = v_{\text{tr}}/\Delta T$ . Энергия фс лазерных импульсов выбиралась таким образом, чтобы обеспечить необходимый коэффициент связи ВБР. Управление всеми указанными выше параметрами в совокупности позволяло обеспечить необходимые спектральные характеристики записываемой ВБР – коэффициенты отражения и пропускания, ширину резонанса.

Основная часть экспериментов по фс записи поточечных ВБР, описываемая далее, производилась в одномодовом ВС с полиимидным защитным покрытием Fiberscore SM1500(9/125)P, технические параметры которого приведены в Таблице 3. За исключением защитной оболочки, характеристики данного ВС близки к характеристикам стандартного телекоммуникационного ВС типа SMF-28. К основным преимуществам полиимидного защитного покрытия можно отнести высокую адгезию с кварцевой оболочкой волокна, химическую инертность, а также стойкость к высоким температурам (400 °С при кратковременном воздействии и 300 °С при долговременном). Данные свойства выгодно отличают ВС при его использовании в волоконно-оптических сенсорных системах, функционирующих в агрессивных средах. Предложенная в данной работе технология записи ВБР не требует удаления защитного покрытия волокна, поскольку полиимидный слой является прозрачным для используемого ИК лазерного излучения. Это, в свою очередь, снижает время подготовки ВС к записи, а также позволяет сохранить его прочностные характеристики.

Таблица 3 — Технические характеристики волоконного световода Fibercore SM1500(9/125)P.

Рабочий диапазон длин волн	1520–1650 нм
Длина волны отсечки	1350–1520 нм
Числовая апертура, NA	0.13–0.15
Диаметр поля моды, MFD	8.5–9.9 мкм @ 1550 нм
Коэффициент затухания	$\leq 0.6$ дБ/км @ 1550 нм
Диаметр оболочки	$125 \pm 1$ мкм
Диаметр защитного покрытия	$145 \pm 5$ мкм
Материал защитного покрытия	полиимид
Рабочая температура	от $-55$ до $+300$ °C

### 2.1.3 Стабилизации положения сердцевинки волоконного световода

Как было упомянуто ранее, случайные отклонения положения фс модификации относительно сердцевинки волоконного световода вносят возмущение в коэффициент связи ВБР, что приводит к искажению его резонансного спектра. Для компенсации таких отклонений была разработана система обратной связи, которая “на лету” компенсировала ошибки позиционирования. В работе системы можно выделить следующие основные шаги. Сначала, с помощью механических микроактюаторов центр сердцевинки ВС подводился в область фокусировки фс излучения. Затем с помощью КМОП-камеры, работающей с частотой 40 кадров/с, захватывалось изображение данной области, как это показано на Рис. 2.6а. Полученное изображение фильтровалось с целью увеличения контраста границ сердцевинки оптического волокна (Рис. 2.6б). Для фильтрованного изображения производилось построчное суммирование и усреднение интенсивности. На полученной кривой выделялись две группы точек, соответствующих начальным положениям левой ( $y_l(t = 0)$ ) и правой ( $y_r(t = 0)$ ) границ сердцевинки ВС (Рис. 2.6в). В процессе записи ВБР (движения волокна), когда границы смещались в одном из направлений (координаты  $y_l(t = t_i)$  и  $y_r(t = t_i)$  соответственно), на пьезопозиционер Thorlabs отправлялась команда, смещающая феррулу с ВС в обратном направлении на величину

$$\Delta y(t_i) = \frac{y_r(0) - y_l(0)}{2} - \frac{y_r(t_i) - y_l(t_i)}{2}. \quad (2.5)$$

Таким образом, поперечное положение волоконного световода удерживалось в фиксированном положении в процессе всего цикла записи ВБР, тем самым минимизируя возмущение коэффициента связи.

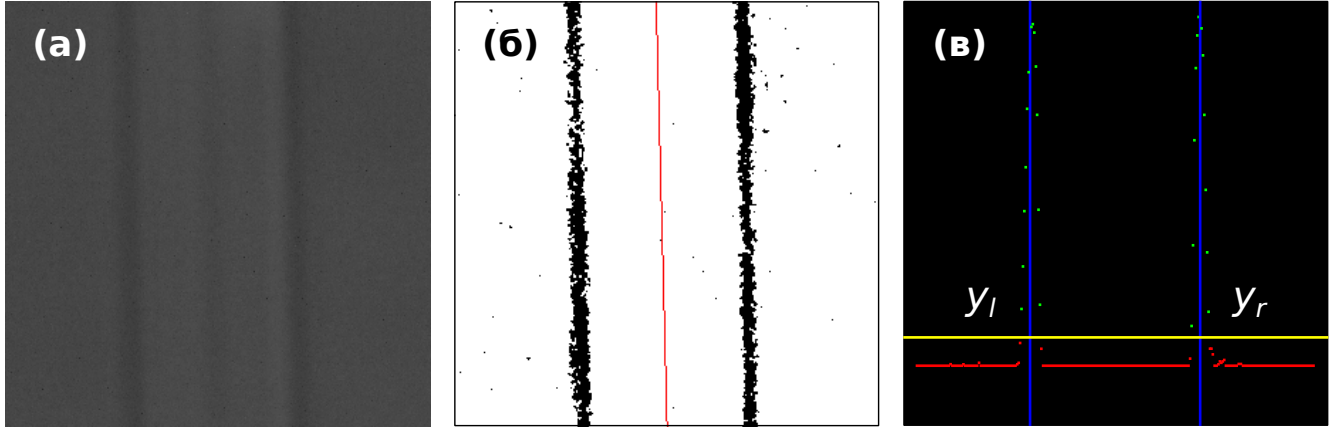


Рисунок 2.6 — Исходное изображение области сердцевинки волокна полученное с помощью КМОП-камеры (а), обработанное изображение (б), профиль интенсивности границ сердцевинки (в).

Эксперимент по тестированию системы стабилизации, в котором ВС протягивался через канал феррулы с постоянной скоростью  $v_{tr} \approx 0.5$  мкм/с, производился для феррулы с внутренним диаметром 152 мкм и волоконного световода Fibercore SM1500(9/125)P с внешним диаметром 143 мкм. Таким образом, ширина свободного зазора, в котором ВС мог свободно перемещаться, составляла  $\approx 9$  мкм. В эксперименте, когда была включена обратная связь, амплитуда поперечного смещения сердцевинки от заданного начального положения не превышала величину  $\Delta y = \pm 0.35$  мкм в момент захвата изображения. В то же время в отсутствие обратной связи, когда ВС мог свободно перемещаться между стенками канала феррулы, отклонения достигали величины  $\Delta y = \pm 4.5$  мкм. В дальнейшем, при записи ВБР, работающая система автоподстройки позволяла минимизировать возмущение коэффициента связи решетки и делала эксперименты более повторяемыми.



### 2.1.4 Схема измерения спектральных характеристик ВБР

При исследовании спектральных характеристик записанных образцов ВБР использовались две разные схемы. Первая представлена на общей схеме экспериментальной установки, представленной на Рис. 2.5. Сначала излучение от широкополосного источника света, работающего в области длин волн 1550 нм суперлюминесцентного диода (СЛД) Thorlabs SLD1550S-A2, проходило через поляризатор (П) и контроллер поляризации (КП). Линейно поляризованное излучение заводилось на вход волоконно-оптического циркулятора (порт 1), сохраняющего поляризационное состояние, и попадало в порт 2, к которому была приварена исследуемая ВБР. Контроллер поляризации позволял установить необходимый состав поляризационных мод при попадании сигнала на ВБР. Излучение, проходящее через данный порт, регистрировалось на оптическом спектральном анализаторе (ОСА2), за счет чего получался спектр пропускания ВБР. Использование коннектора, имеющего малый угол шлифовки торца, позволяло минимизировать обратное отражение сигнала. Излучение, отраженное от ВБР в обратную сторону и попадающее в порт 3, регистрировалось с помощью ОСА1, за счет чего получался спектр отражения ВБР. В качестве устройства регистрации использовался оптический спектральный анализатор Yokogawa AQ6370D (диапазон измерения длины волны 600–1700 нм, динамический диапазон до 78 дБ, разрешающая способность до 0.02 нм, точность измерения длины волны до  $\pm 0.01$  нм, воспроизводимость измерения длины волны  $\pm 0.005$  нм).

Для измерения спектральных характеристик ВБР с более высоким разрешением была собрана альтернативная схема (Рис. 2.7). Поляризованное излучение от перестраиваемого одночастотного лазера с распределенной обратной связью (РОС-лазера), имеющего длину волны  $\lambda \approx 1550$  нм и ширину линии генерации  $\sim 10$  кГц, проходило через волоконно-оптический изолятор и контроллер поляризации (КП) направлялось в циркулятор (порт 1), после чего попадало на тестируемую ВБР приваренную к порту 2. Отраженный от ВБР сигнал возвращался на циркулятор и попадал в порт 3, после чего регистрировался с помощью высокоскоростного фотодиода Thorlabs DET08CFC (InGaAs, спектральный диапазон чувствительности 800–1700 нм, полоса пропускания 5 ГГц) подключенного к двухканальному осциллографу Tektronix TBS1000 (ОСЦ). Для



устранения обратного отражения от торца ВС, после ВБР приваривался дополнительный волоконно-оптический изолятор. Перестройка длины волны генерации волоконного РОС-лазера осуществлялась за счет линейного растяжения его резонатора (ВБР с фазовым  $\pi$ -сдвигом, записанная в активном эрбиевом ВС) с помощью пьезоактюатора (спектральная область перестройки  $\Delta\lambda \approx 23$  нм). Кроме того, резонатор РОС-лазера размещался в термостатированном корпусе, вариация температуры которого позволяла выставить спектральную область сканирования длины волны лазера. После того, как спектральная область сканирования совмещалась с положением резонанса исследуемой ВБР, на пьезоактюатор РОС-лазера подавался пилообразный сигнал от высоковольтного генератора сигналов. Одновременное измерение сигналов с генератора и фотодиода на осциллографе позволяло определить зависимость амплитуды сигнала с фотодиода относительно напряжения на пьезоэлементе, которое пересчитывалось в длину волны лазера. Таким образом, описанная схема позволяла производить измерения характеристик ВБР со спектральным разрешением, во много раз превышающим разрешение оптического спектрального анализатора Yokogawa AQ6370D.

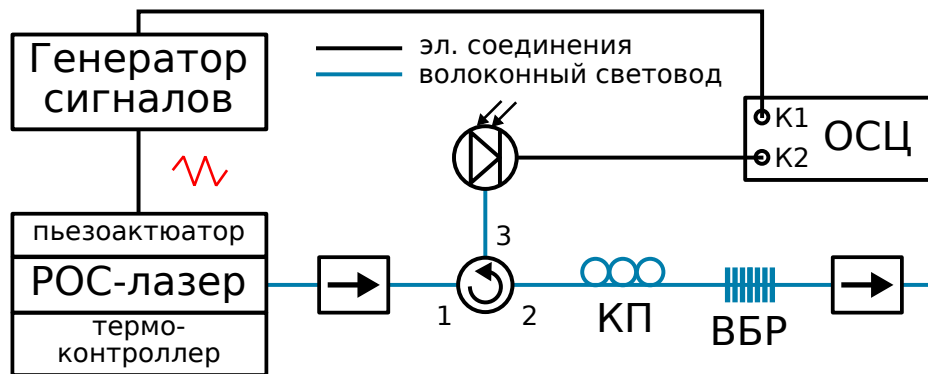


Рисунок 2.7 — Схема измерений характеристик ВБР с высоким спектральным разрешением.

Обозначения: КП – контроллер поляризации, ВБР – волоконная брэгговская решетка, ОСЦ – осциллограф.

### 2.1.5 Запись коротких ВБР

К коротким ВБР относят структуры, имеющие длину  $\sim 100$  мкм. Такие ВБР используются для точечных измерений с высоким пространственным разрешением, а также для регистрации акустических колебаний [82]. Кроме того, ВБР с короткой длиной и низким коэффициентом отражения находят применение в квазираспределенных сенсорных системах с временным разделением сигнала [83]. Запись таких структур представляет сложность при использовании голографических методов записи, поскольку при ограничении размера лазерного пучка с помощью щелевой апертуры значительную роль играют дифракционные эффекты, которые приводят к сильной неоднородности интенсивности лазерного излучения в области сердцевины ВС. При записи играют роль как ширина апертуры, так и расстояние от апертуры до волокна, поскольку данное расстояние определяет тип дифракции (Фраунгофера или Френеля). При этом, чем меньше размер щелевой апертуры, тем сильнее становятся данные эффекты. Это, в свою очередь, ограничивает минимальную возможную длину ВБР при голографической записи, а также вносит продольную неоднородность в её коэффициент связи [84].

Одним из ключевых достоинств метода фс поточечной записи ВБР является возможность контроля длины структуры с точностью до одного отдельного штриха. Это достигается путем управления движением ВС в области фокусировки фс импульсов, а также управлением затвора фс лазера. В отличие от голографических методов, такой подход позволяет добиться однородного продольного профиля модуляции показателя преломления.

Ограничительным фактором при использовании коротких ВБР является относительно небольшой коэффициент отражения ( $\sim 0.1\text{--}1\%$ ), что связано с ограничением на величину модуляции показателя преломления, которая может быть индуцирована с помощью лазерного излучения. Такое ограничение присуще как фс, так и УФ методам записи. Для увеличения модуляции показателя преломления применяются специализированные волоконные световоды с повышенной фоточувствительностью [85], а также различные техники увеличения значения перекрытия модификации с модой сердцевины ВС (см. Пункт 1.2.2). Тем не менее стандартные измерительные приборы, применяемые при работе с ВБР, оптические анализаторы спектра и интеррогаторы, имеют достаточно

широкий динамический диапазон, как правило, 50 дБ и выше, что является достаточным для работы со слабоотражающими ВБР.

Эксперимент по записи фс поточечных ВБР 1-го порядка производился для длин 100 и 200 мкм, с резонансной длиной волны  $\lambda_{\text{FBG}} \approx 1550$  нм. Энергия фемтосекундных лазерных импульсов устанавливалась в значение  $E_p = 200$  нДж. Для заданного периода  $\Lambda_{\text{FBG}} = 0.535$  мкм количество штрихов составило 186 и 373 соответственно. На Рис. 2.8 показаны измеренные спектры отражения созданных образцов, а также расчетные спектры, полученные из аналитического приближения (см. Пункт 1.2.1). Хорошее совпадение между экспериментальными и расчетными спектрами свидетельствует о высоком качестве полученных структур. Измеренные значения коэффициентов отражения составили 2.34 и 6.9%, спектральные ширины на полувысоте 7.37 и 3.58 нм для ВБР длиной 100 и 200 мкм соответственно. Расчетные значения коэффициентов связи составили  $1.54$  и  $1.39$   $\text{мм}^{-1}$  для ВБР длиной 100 и 200 мкм соответственно.

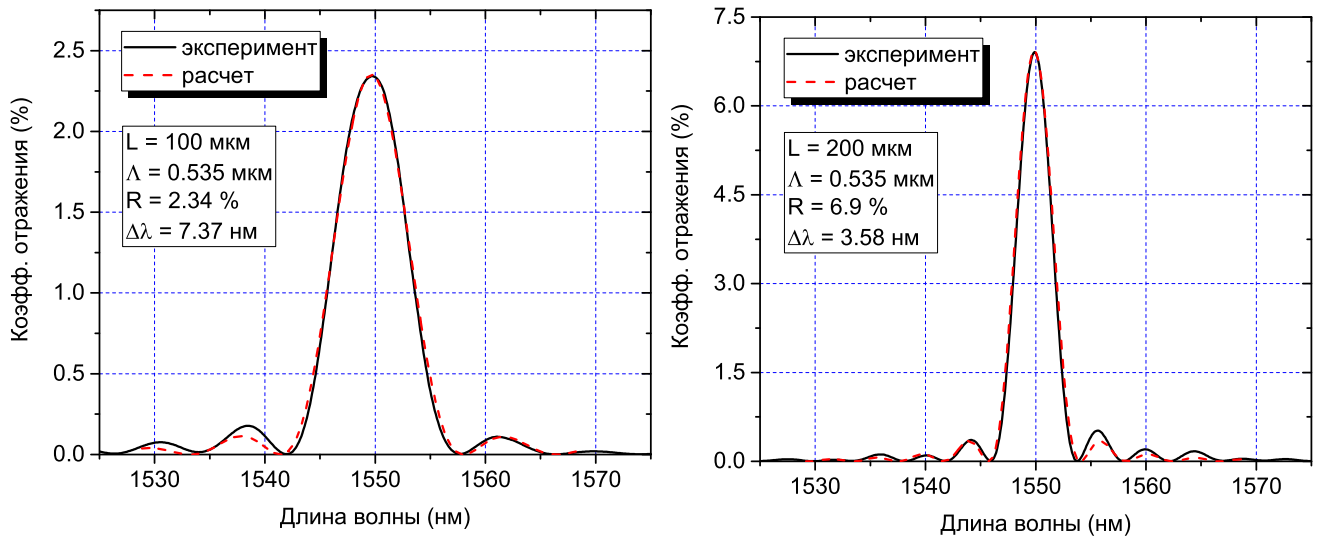


Рисунок 2.8 — Экспериментальные и расчетные спектры отражения коротких поточечных ВБР длиной 100 мкм (а) и 200 мкм (б).

При коэффициенте связи  $\kappa = 1.5$   $\text{мм}^{-1}$  однородная ВБР достигает коэффициента отражения  $R = 95\%$  на длине  $L_{\text{FBG}} \approx 1.5$  мм. Такие ВБР, с длиной  $\sim 1$  мм, являются наиболее распространенными при использовании в качестве распределенных зеркал волоконных лазеров, а также в качестве чувствительного элемента волоконно-оптического сенсора при измерении температуры и деформации.

В следующем эксперименте была записана серия образцов поточечных ВБР с длиной 3 мм и разным порядком брэгговского резонанса ( $m = 1, 2, 3$ ).

Соответствующие периоды ВБР были  $\Lambda_1 = 0.535$ ,  $\Lambda_2 = 1.07$  и  $\Lambda_3 = 1.605$  мкм. Сначала исследовались спектральные характеристики ВБР 1-го порядка, для которой измерялись спектры отражения (Рис. 2.9) и пропускания (Рис. 2.10). Ввиду того, что модификация показателя преломления, индуцированная фс импульсами, имеет поперечную анизотропию [77], измерение спектров производилось для разных состояний линейной поляризации, когда направление поляризации совпадает с направлением записи (медленная ось) и когда поляризация повернута на  $90^\circ$  относительно направления записи (быстрая ось).

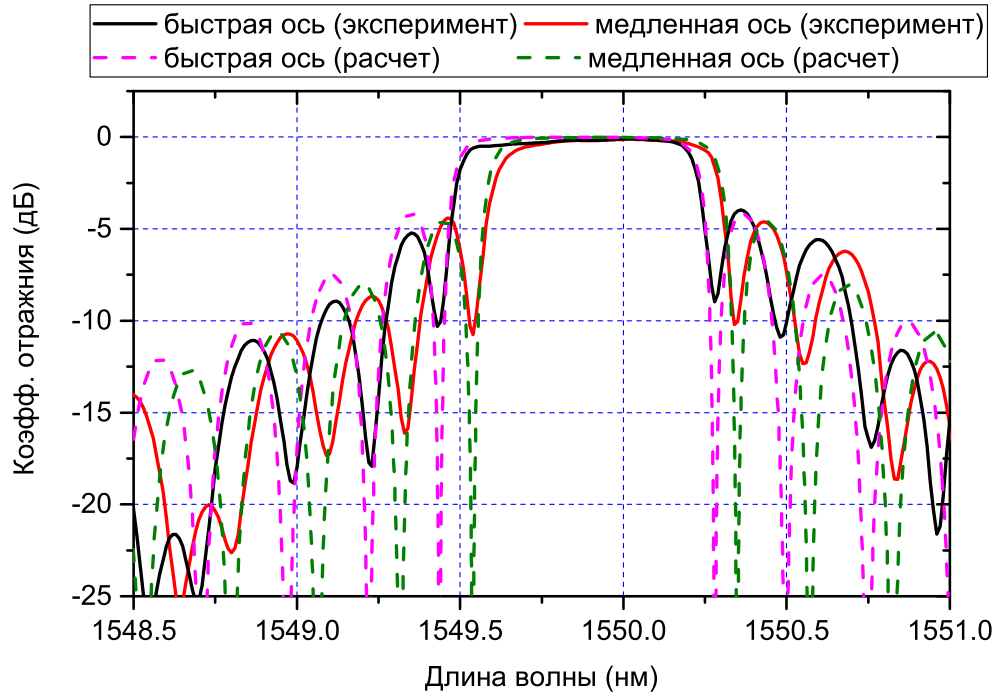


Рисунок 2.9 — Спектры отражения поточечной ВБР 1-го порядка длиной с  $L_{\text{FBG}} = 3$  мм, измеренные для разных углов поворота линейной поляризации ( $0^\circ$  и  $90^\circ$  относительно направления ориентации ВБР).

Для медленной и быстрой поляризационных осей эффективные значения показателя преломления сердцевины  $n_{\text{slow}}^{\text{eff}}$  и  $n_{\text{fast}}^{\text{eff}}$  могут быть рассмотрены независимо. Следовательно, каждой поляризационной оси будет соответствовать свой брэгговский резонанс. Зная величину отстройки между двумя брэгговскими резонансами, можно рассчитать величину двулучепреломления:

$$\Delta\lambda_p = \frac{2(n_{\text{slow}}^{\text{eff}} - n_{\text{fast}}^{\text{eff}})\Lambda_{\text{FBG}}}{m} = \frac{2\delta n\Lambda_{\text{FBG}}}{m} \quad (2.6)$$

$$\Rightarrow \delta n = \frac{m\Delta\lambda_p}{2\Lambda_{\text{FBG}}}. \quad (2.7)$$

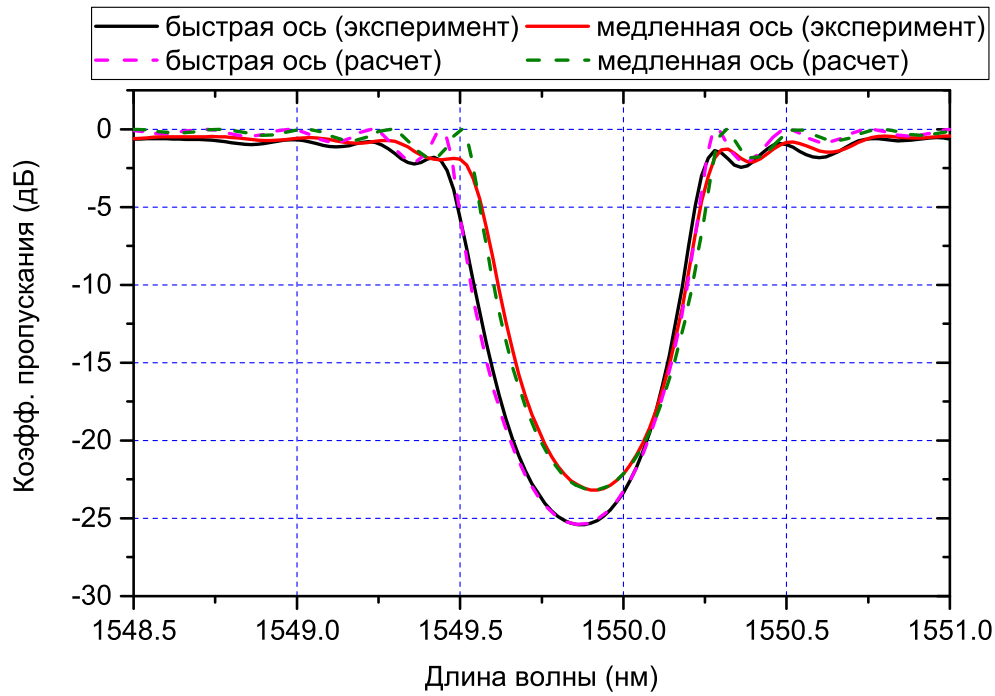


Рисунок 2.10 — Спектры пропускания поточечной ВБР 1-го порядка длиной  $L_{\text{FBG}} = 3$  мм измеренные для разных углов поворота линейной поляризации ( $0^\circ$  и  $90^\circ$  относительно направления ориентации ВБР).

Для полученного образца ВБР 1-го порядка величина отстройки брэгговского резонанса составила  $\Delta\lambda_p = 44$  пм, что соответствует двулучепреломлению  $\delta n = 4.1 \times 10^{-5}$ . Следует отметить, что полученное значение по порядку величины сравнимо с двулучепреломлением специализированных ВС с сохранением поляризации, для которых  $\delta n \sim 10^{-5} - 10^{-4}$ , а также значительно превосходит остаточное (естественное) двулучепреломление одномодовых волокон без сохранения поляризации ( $\delta n \leq 10^{-7}$ ). Для сравнения, ВБР, записанные с помощью УФ методов, демонстрируют значения ( $\delta n \sim 10^{-6}$ ) [86].

Ещё одной важной характеристикой ВБР является уровень оптических потерь вне брэгговского резонанса. Для фс поточечных ВБР исследование природы потерь производилось в работе [87], в которой показано, что основной вклад в потери вносит дифракционное рассеяние на дефектах, индуцированных фс лазерным излучением. В работе [67] авторы производят оптимизацию параметров записи для минимизации оптических потерь на структуре ВБР. В частности, было показано, что потери напрямую зависят от энергии фс лазерных импульсов и, соответственно, типа режима фс модификации (Тип I или Тип II). Несмотря на то, что в спектре пропускания глубина провала брэгговского резонанса может достигать нескольких десятков дБ (или  $>99\%$ ), поте-

ри могут значительно ограничивать коэффициент отражения. Аналитическое выражение максимального коэффициента отражения для ВБР с однородным уровнем потерь  $\alpha$  вдоль структуры имеет следующий вид:

$$R_{\text{loss}} = \left| \frac{i\kappa}{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \kappa^2} \coth(\sqrt{\alpha^2 + \kappa^2} L)} \right|^2 \quad (2.8)$$

Для изготовленного образца ВБР 1-го порядка уровень внерезонансных потерь в длинноволновой области составил  $-0.3$  дБ. С учетом этого уровня потерь и формулы 2.8 коэффициент отражения составляет  $-0.22$  дБ или 97.8%.

При измерении пропускания ВБР в более широком спектральном диапазоне (Рис. 2.11) в коротковолновой области можно увидеть наличие более слабых резонансных линий, которые отсутствуют в спектре отражения. Данные резонансы связаны с возникновением слабой связи между поперечной модой, распространяющейся по сердцевине, и сонаправленными модами, распространяющимися по оболочке. Амплитуда таких резонансов зависит от множества факторов: формы штриха ВБР, геометрии ВС, показателя преломления внешней среды. В частности, приведенный спектр был измерен для ВС с полиимидным покрытием.

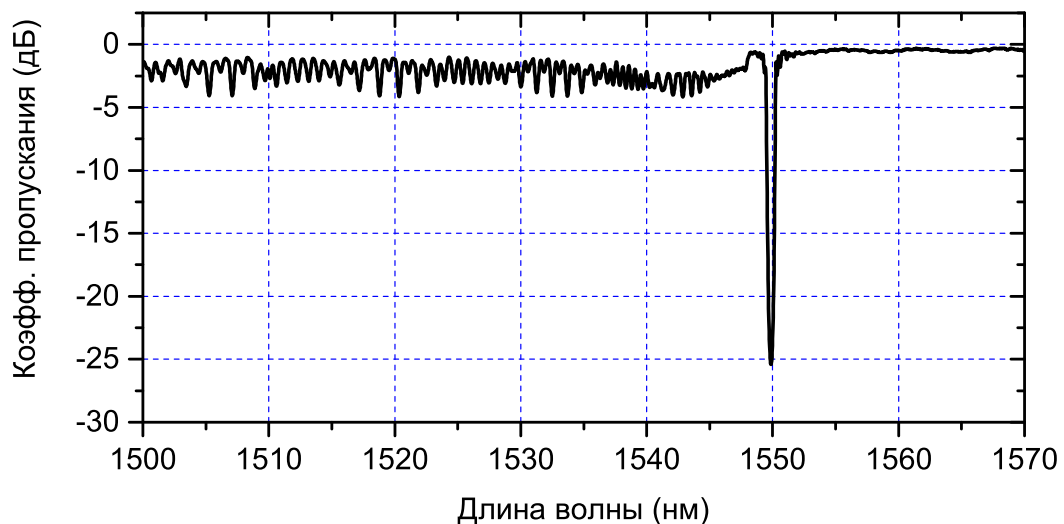


Рисунок 2.11 — Спектр пропускания поточечной ВБР 1-го порядка длиной  $L_{\text{FBG}} = 3$  мм, измеренный в широком диапазоне длин волн для быстрой поляризационной оси.

В зависимости от условий фокусировки и энергии лазерных импульсов максимальный коэффициент связи может быть реализован в разных порядках ВБР. По этой причине были записаны дополнительные образцы ВБР 2-го и

3-го порядков при той же энергии импульсов 200 нДж. Из спектров пропускания на Рис. 2.12 видно, что глубина провала брэгговского резонанса составляет  $-19$  дБ (98.7%) для 2-го и  $-8.4$  дБ (85.5%) для 3-го порядка при измерении вдоль быстрой поляризационной оси. Таким образом, для используемых условий фокусировки и области энергий фс лазерных импульсов запись наиболее эффективных ВБР осуществляется в 1-м порядке.

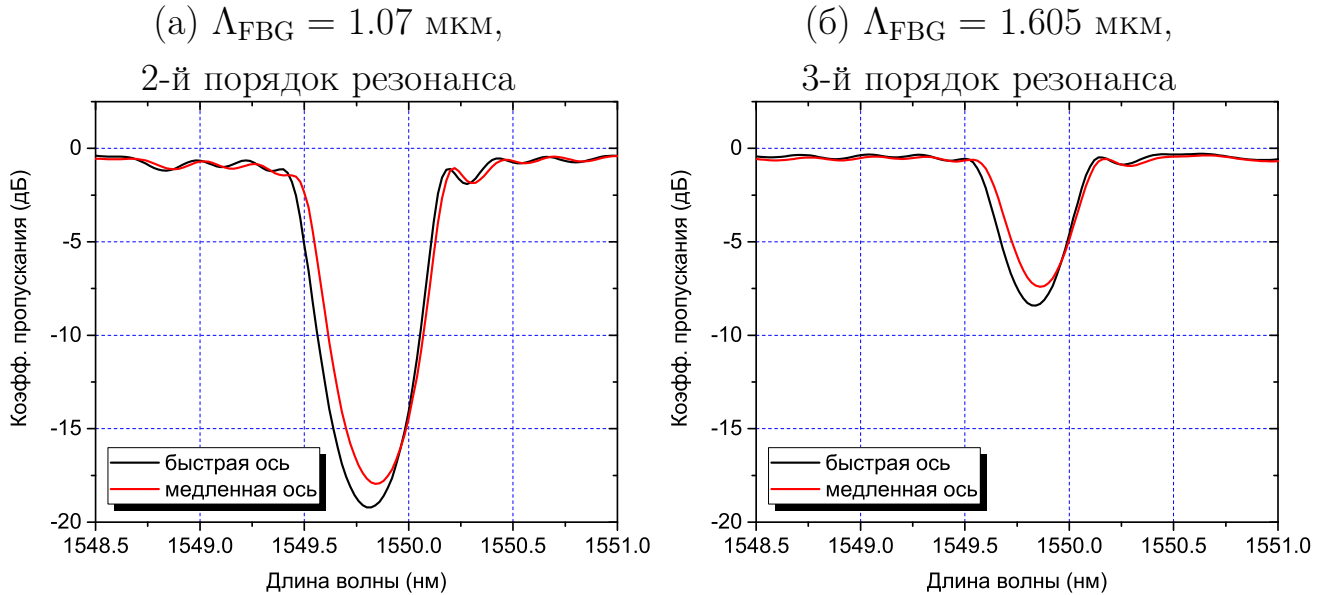


Рисунок 2.12 — Спектры пропускания поточечных ВБР 2-го и 3-го порядков длиной  $L_{\text{FBG}} = 3$  мм, измеренные в разных линейных поляризациях (угол поворота относительно направления ориентации ВБР  $0^\circ$  и  $90^\circ$ ).

### 2.1.6 Запись длинных ВБР

Создание высококачественных ВБР с длиной  $>10$  мм имеет большое прикладное значение для ряда приложений волоконной оптики [88;89]. В частности, длинные ВБР используются в качестве чувствительного элемента в распределенных системах мониторинга температуры и деформации с высоким пространственным разрешением ( $<1$  мм) [8]. Использование длинных ВБР с узкой резонансной линией отражения в качестве распределенных зеркал позволяет ограничить количество продольных мод резонатора в схеме волоконного лазера на основе редкоземельных элементов [90]. К одной из разновидностей таких лазеров можно отнести лазер с распределенной обратной связью [91], который, благодаря введенному в структуру ВБР фазовому сдвигу, позволяет добиться одночастотного режима генерации с шириной линии  $\sim 0.1\text{--}1$  кГц.

К настоящему времени, основные результаты по созданию длинных ВБР получены для голографической технологии записи с использованием фазовой маски и УФ источников лазерного излучения [92]. При такой записи резонансная длины волны определяется периодом фазовой маски, а на ВС накладывается требование фоточувствительности. Как правило, максимальная длина ВБР будет ограничена максимальной длиной фазовой маски [93]. Запись ВБР с отличающейся резонансной длиной волны требует смены фазовой маски, что снижает технологическую гибкость метода, а также приводит к удорожанию производства. Так, например, стоимость изготовления 100-мм фазовой маски может достигать  $\approx 10\,000$  долларов США. В работе [92] было показано, что с помощью специализированного интерферометра с интегрированным в схему электрооптическим фазовым модулятором, а также высокоточного линейного позиционера, длина ВБР может быть увеличена до 1 м. Однако, сложная процедура предварительной калибровки и фиксированная резонансная длина волны ВБР лишают предложенный способ гибкости при создании длинных периодических структур. Таким образом, изучение возможности создания длинных ВБР с помощью метода фемтосекундной поточечной записи, который лишен упомянутых выше недостатков УФ метода, представляется перспективной задачей.

В эксперименте по созданию длинных ВБР исследовалось два режима записи – с включенной и выключенной системой автоподстройки положения ВС, описанной в Пункте 2.1.3. В первом случае устанавливалась энергия фс лазер-



ных импульсов  $E_p = 85$  нДж, во втором  $E_p = 105$  нДж. Каждый из образцов имел длину  $L_{\text{FBG}} = 50$  мм и период  $\Lambda_{\text{FBG}} = 0.535$  мкм (1-й порядок резонанса). Как видно из рисунка 2.13а, при записи в режиме свободной протяжки спектр ВБР состоит из набора резонансных пиков с общей шириной  $\Delta\Lambda_{\text{FBG}} = 93$  пм. Похожим образом выглядит спектр ВБР с возмущенным коэффициентом связи, полученный ранее из численного счета (Рис. 2.3б). В то же время, в режиме активной стабилизации сердцевины ВС относительно точки фокусировки фс лазерного пучка спектр отражения ВБР (Рис. 2.13б) имеет ширину  $\Delta\Lambda_{\text{FBG}} = 16.5$  пм. При измерении данного спектра использовалась схема, приведенная на Рис. 2.7. Относительно хорошее соответствие между результатом измерения и расчетом свидетельствует о высоком качестве созданной структуры, а также положительном влиянии обратной связи.

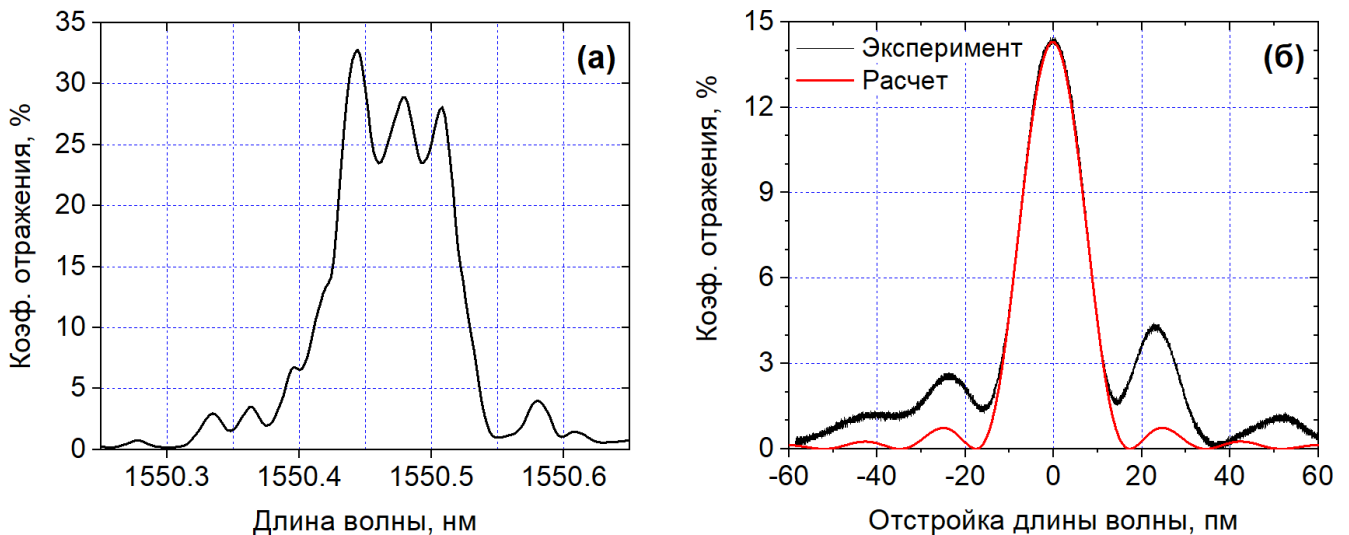


Рисунок 2.13 — Спектры отражения 50-мм поточечных ВБР 1-го порядка созданных при выключенной (а) и включенной (б) системе автоподстройки поперечного положения ВС.

Использованное при расчете значение коэффициента связи  $\kappa = 7.96 \times 10^{-3} \text{ мм}^{-1}$ . В то же время, для длинных ВБР, используемых в качестве чувствительного элемента в распределенных системах мониторинга с высоким пространственным разрешением, минимально достижимая модуляция и коэффициент связи будут определять максимальную базу измерений. Другими словами, сигнал источника, с помощью которого осуществляется измерение, должен проходить всю длину ВБР. Так, например, для решетки с коэффициентом отражения  $R \leq 90\%$  и длиной  $L_{\text{FBG}} = 1$  м коэффициент связи не должен превышать величину  $\kappa = 1.8 \times 10^{-3} \text{ мм}^{-1}$ . При фс поточечной записи

уменьшение коэффициента связи ВБР может быть достигнуто за счет уменьшения энергии фс импульсов, что с одной стороны приведет к уменьшению размера модификации, с другой – к уменьшению величины модуляции показателя преломления  $\Delta n_{\text{mod}}$ , а также за счет уменьшения интеграла перекрытия между фс модификацией и полем поперечной моды ВС, что достигается при поперечном смещении модификации относительно центра сердцевины [64].

### 2.1.7 Выводы по Параграфу 2.1

Таким образом, в данном Параграфе был описан новый метод фемтосекундной поточечной записи ВБР в ВС с полиимидным защитным покрытием. Были созданы образцы ВБР с длиной от 0.1 до 50 мм, для которых были исследованы спектральные характеристики (коэффициенты отражения и пропускания, ширина резонансной линии, поляризационная чувствительность), а также проведено сравнение с расчетными спектрами. Было показано, что разработанная система стабилизации сердцевины ВС относительно точки фокусировки фс импульсов позволяет значительно улучшить спектральные характеристики длинных ВБР и добиться их хорошего соответствия с расчетными. Предложенный метод записи обладает высокой гибкостью и производительностью. В частности, запись ВБР может производиться как в ВС без защитного покрытия, так и с защитным покрытием разного типа (полиимид, акрилат, ORMOCER), прозрачного для длины волны используемого фс лазерного излучения. Всё это делает метод привлекательным для создания специализированных ВБР с расширенными эксплуатационными характеристиками для сенсорных и лазерных применений.

## 2.2 Запись волоконных брэгговских решеток с фазовыми сдвигами в структуре

ВБР с фазовыми сдвигами в структуре имеют широкий круг применений в лазерных и сенсорных устройствах, среди которых волоконные лазеры с распределенной обратной связью (РОС-лазеры) [94], многочастотные волоконные лазеры для линий связи со спектральным уплотнением каналов [95], волоконно-оптические датчики для одновременного измерения температуры и растяжения [96], высокочувствительные элементы для детектирования ультразвука [11], элементы для оптической обработки и фильтрации сигналов [97; 98]. При голографической записи ВБР фазовые сдвиги могут быть введены в структуру решетки за счет использования специализированной фазовой маски [99], либо путем сдвига фазовой маски в процессе записи [86]. Также фазовый сдвиг может быть индуцирован в процессе постобработки однородной ВБР, в частности, путем экспозиции УФ излучения в область сердцевины в выбранной точке ВБР [100], воздействием на волоконный световод ИК излучением  $\text{CO}_2$  лазера [101] или электрическим дуговым разрядом [102].

Технология фс модификации прозрачных материалов позволяет расширить эксплуатационные характеристики ВБР за счет особенностей механизма поглощения фс лазерных импульсов. По этой причине, эффективная методика введения фазовых сдвигов в структуру ВБР при прямой фокусировке фс импульсов в сердцевину ВС имеет высокое прикладное значение. При фс поточечной записи фазовый сдвиг может быть получен за счет введения задержки в источник тактовых импульсов 1 кГц титан-сапфирового лазера [57], либо за счет селектирования выходных импульсов 5 кГц лазера с помощью электро-оптического модулятора [65]. Также, в работе [103] было показано, что при записи волноводных ВБР в объеме стеклянного образца фазовый сдвиг можно создать при помощи высокочастотного 500 кГц лазера и акустооптического модулятора, выпускающего фс импульсы короткими последовательностями. В таком случае длительность последовательности задавала величину модуляции показателя преломления для каждого отдельного штриха ВБР. Когда запись ВБР производится методами поперечного сканирования сердцевины, фазовый сдвиг может быть получен за счет продольного сдвига ВС, что достигается

путем согласованного управления затвором лазера и высокоточным позиционером, осуществляющим перемещение ВС [104].

Несмотря на разнообразие методов записи ВБР с фазовыми сдвигами в структуре, каждый из упомянутых выше имеет свои ограничения и недостатки. Для метода записи с использованием фазовой маски это фиксированная резонансная длина волны ВБР. Для фс поточечного метода, когда ВС размещается между двумя плоскопараллельными стеклянными пластинами, это трудоемкая процедура выравнивания начального положения волокна, а также возникновение ошибок позиционирования в структуре ВБР вследствие изгибов волокна вдоль прямой траектории записи. При записи ВБР с использованием высокочастотных последовательностей фс импульсов требуется производить подбор длительности последовательности и энергии в отдельном импульсе для задания точного значения необходимого фазового сдвига. При использовании методов поперечного сканирования производительность записи составляет  $\sim 1-10$  штрихов/с, или 1 мм/мин, что делает процесс неэффективным при записи структур с длиной  $> 10$  мм. По этой причине задача создания качественных ВБР с фазовыми сдвигами в структуре необходимой длины, например, 30–50 мм для применения в качестве резонатора РОС-лазера [91], представляется актуальной для методов, основанных на прямой фокусировке фс лазерных импульсов в область сердцевинки ВС.

Как было показано в Параграфе 2.1, минимизация ошибок, а следовательно и улучшение качества выходных характеристик ВБР, может быть достигнуто за счет применения метода поточечной записи ВБР путем протягивания волоконного световода через прозрачную феррулу и техники автоподстройки положения сердцевинки ВС. В текущем Параграфе производится доработка уже созданной экспериментальной схемы с целью записи ВБР с фазовыми сдвигами в структуре. В частности, в схему записи добавлен пьезоактюатор, который в заданный момент производит продольное смещение волокна на заданную величину. По предложенной технике были созданы образцы ВБР с одним и двумя фазовыми  $\pi$ -сдвигами в структуре в пассивном волоконном световоде без сохранения поляризации и активном эрбиевом волоконном световоде с сохранением поляризации. Последний был использован в качестве резонатора РОС-лазера, что является первой известной демонстрацией РОС-лазера на основе фемтосекундной поточечной ВБР. Были измерены спектральные характеристики полученных образцов ВБР с фазовыми сдвигами (коэффициент пропускания, шири-

на окна пропускания, поляризационная чувствительность), а также выходные характеристики РОС-лазера (дифференциальная эффективность, отношение сигнал-шум, относительная интенсивность шума, ширина линии генерации).

### 2.2.1 Схемы записи и опроса ВБР с фазовыми сдвигами в структуре

Эксперименты по записи ВБР с фазовыми сдвигами в структуре проводились на установке подробно описанной в Пункте 2.1.2. Упрощенная схема, поясняющая принцип введения в структуру ВБР фазовых сдвигов, приведена на Рис. 2.14. Зажим для волокна, который при записи однородных ВБР был жестко закреплен на высокоточном линейном позиционере Aerotech, в данном случае был установлен на пьезоактюатор (Пьезо2) с направлением смещения вдоль движения позиционера. Во время записи ВБР в выбранный момент на пьезоактюатор подавалось добавочное напряжение  $\Delta U = 5.3$  В, что обеспечивало дополнительное смещение волокна вдоль направления его движения на величину  $\Delta z_{\text{gap}} \simeq 0.27$  мкм. Данное смещение примерно соответствовало величине  $\Lambda_{\text{FBG}}/2$ , где  $\Lambda_{\text{FBG}} = 0.535$  мкм – период ВБР 1-го порядка имеющей резонанс вблизи длины волны 1550 нм. В общем случае величина смещения пьезоактюатора зависит от используемой модели и может варьироваться в широких пределах ( $\sim 0.01$ -10 мкм). Величина и момент продольного смещения актюатора, а следовательно и ВС, устанавливались через управляющий компьютер, который также обеспечивал согласованность работы других устройств, участвующих в процессе записи. Важно отметить, что при подаче на пьезоактюатор разницы напряжения  $\Delta U = 5.3$  В, время релаксации пьезоактюатора составляет около 200 мкс (см. Рис. 2.15), что меньше выбранного интервала следования лазерных импульсов (1 мс). Синхронизация времени испускания фс лазерных импульсов и момента срабатывания пьезоактюатора позволяла вводить фазовые сдвиги в структуру ВБР без прерывания процесса движения ВС и записи ВБР.

Как и в предыдущих экспериментах основная часть образцов ВБР записывалась в ВС с полиимидным защитным покрытием Fibercore SM1500(9/125)P, характеристики которого указаны в Таблице 3. Запись резонатора РОС-лазера производилась в активном эрбиевом ВС с сохранением поляризации Coractive

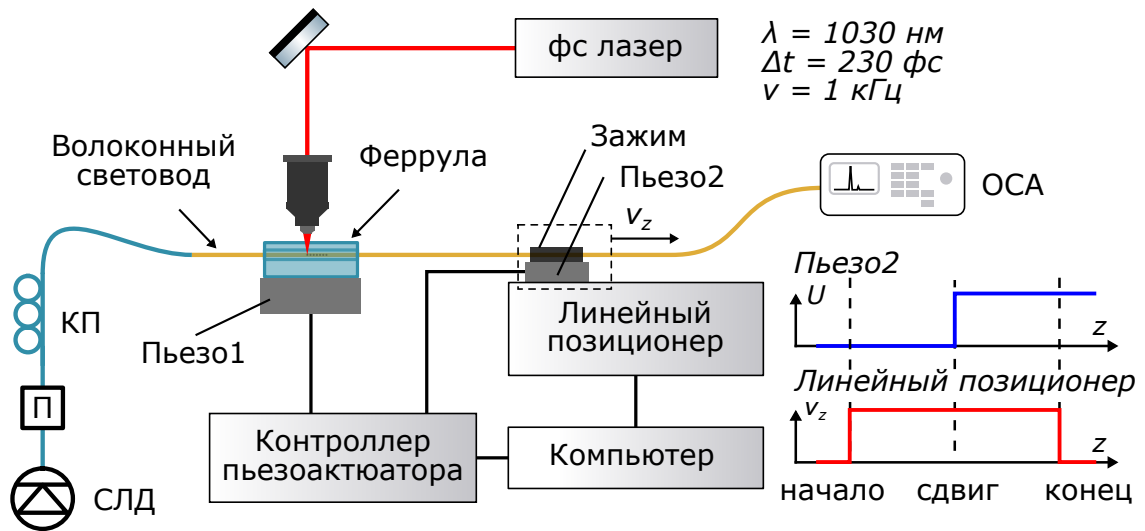


Рисунок 2.14 — Упрощенная схема установки для записи ВБР с фазовыми сдвигами в структуре.

СЛД – суперлюминесцентный диод, П – поляризатор, КП – контроллер поляризации, ОСА – оптический спектральный анализатор, Пьезо1 и Пьезо2 – пьезоактюаторы для контроля поперечного положения ВС в области фокусировки фс излучения и введения в структуры ВБР фазового сдвига соответственно.

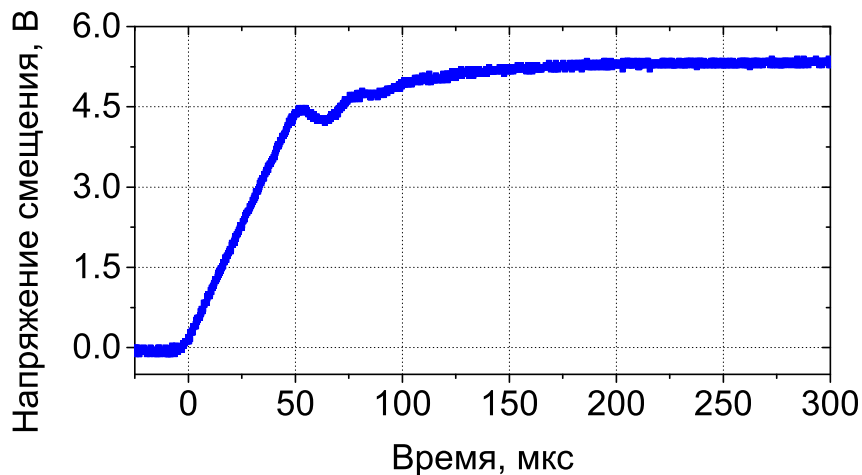


Рисунок 2.15 — Осциллограмма напряжения  $U$  на пьезоактюаторе (Пьезо2) в момент совершения фазового  $\pi$ -сдвига.

ER35-7-PM (тип PANDA, коэффициент поглощения сердцевины  $35 \pm 5$  дБ/м на длине волны 1530 нм, диаметр модового пятна  $6.5 \pm 0.5$  мкм, числовая апертура 0.22, двулучепреломление сердцевины  $\geq 1.4 \times 10^{-4}$ ). Во время записи ВБР использовался режим автоподстройки поперечного положения сердцевины ВС относительно точки фокусировки фс лазерных импульсов, который описан ранее в Пункте 2.1.3.

Для измерения спектральных характеристик записанных образцов ВБР использовались две схемы. Первая, приведенная на Рис. 2.14, позволяла измерить спектры пропускания для разных поляризационных осей ВБР в широком диапазоне длин волн. В качестве источника оптического сигнала служил суперлюминесцентный диод. Волоконно-оптические поляризатор и контроллер поляризации позволяли поворачивать угол линейной поляризации относительно осей ВБР. Регистрация спектров осуществлялась с помощью оптического спектрального анализатора Yokogawa AQ6370D. Вторая схема (Рис. 2.16) представляла собой модификацию ранее описанной схемы (Рис. 2.7) и позволяла измерять спектры пропускания ВБР в узком диапазоне с высоким спектральным разрешением. Как и в предыдущем случае источником узкополосного лазерного излучения служил 10-кГц РОС-лазер с перестройкой длины волны. пилообразный сигнал с генератора сигналов подавался на пьезоактюатор РОС-лазера, что приводило к растяжению резонатора на величину  $\approx 50$  микрострейн и перестройке его длины волны на величину  $\approx 50$  пм. Положение спектральной области, в которой осуществлялось сканирование, задавалось посредством термоконтроллера на основе элемента Пельтье. Для совмещения спектральной области резонанса исследуемого образца ВБР с фазовым  $\pi$ -сдвигом с областью сканирования РОС-лазера использовались оптические спектральные анализаторы ОСА1 и ОСА2. Оптический сигнал от РОС-лазера после прохождения через исследуемую ВБР с фазовым сдвигом в структуре измеряется с помощью 5-ГГц фотодиода Thorlabs DET08CFC и двухканального осциллографа Tektronix TBS1000 (ОСЦ).

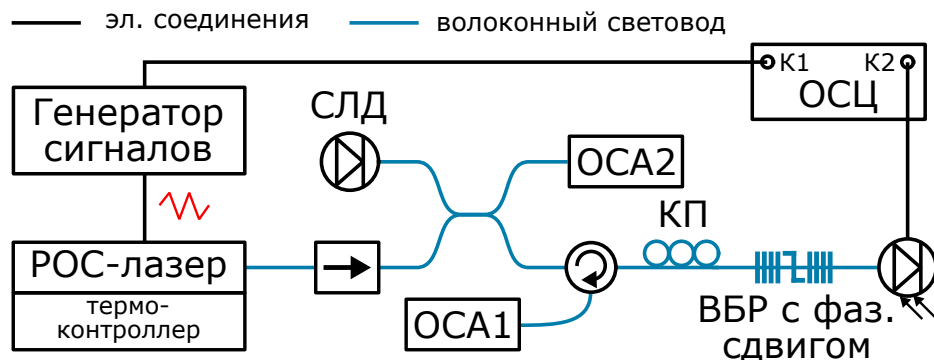


Рисунок 2.16 — Схема опроса ВБР с фазовыми сдвигами на основе перестраиваемого РОС-лазера.

СЛД – суперлюминесцентный диод, ОСА1 и ОСА2 – оптические спектральные анализаторы, КП – контроллер поляризации, ОСЦ – осциллограф.



### 2.2.2 Схема РОС-лазера на основе ВБР с фазовыми сдвигами в структуре в эрбиевом ВС

Схема эрбиевого РОС-лазера, собранного на основе фс поточечной ВБР с фазовым  $\pi$ -сдвигом в структуре, приведена на Рис. 2.17. Излучение накачки полупроводникового лазерного диода с длиной волны 976 нм и выходной мощностью до 600 мВт заводилось в одномодовый спектрально-селективный ответвитель 980/1550 нм, после чего попадало в активный легированный ионами эрбия участок ВС с записанной ВБР, имеющей фазовый  $\pi$ -сдвиг в структуре. Лазерная генерация, длина волны которой приблизительно совпадала с резонансной длиной волны ВБР, происходила в прямом и обратном направлении. Для устранения отражения сигнала накачки от торца ВС после ВБР ставился волоконный изолятор. Регистрация генерируемого в обратную сторону лазерного излучения осуществлялась с помощью измерительного блока, включающего в себя:

1. 5 ГГц фотодиод Thorlabs DET08CFC и радиочастотный анализатор сигналов Agilent N9010A для измерения относительного шума интенсивности (параметр RIN, от англ. *relative intensity noise*);
2. Оптический спектральный анализатор Yokogawa AQ6370D для измерения мощности генерации и отношения сигнал-шум (параметр SNR, от англ. *signal-to-noise ratio*)
3. Схема измерения ширины линии генерации лазерного излучения, основанная на интерферометре Маха-Цендера (Рис. 2.18).

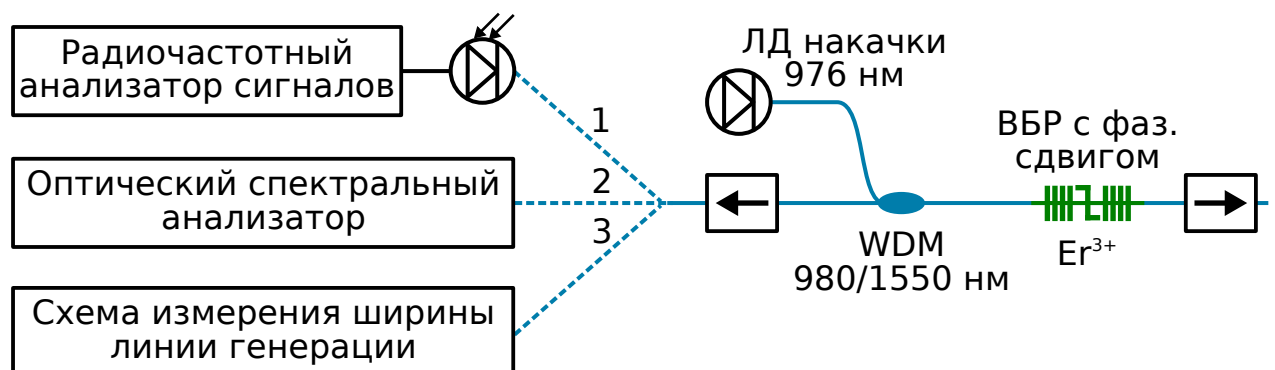


Рисунок 2.17 — Схема эрбиевого РОС-лазера на основе поточечной ВБР с фазовым  $\pi$ -сдвигом в структуре.



Принцип измерения ширины линии генерации РОС-лазера основан на методе автогетеродина, измерении биений двух оптических сигналов, прошедших через волоконно-оптический интерферометр Маха-Цендера [105]. В одном плече интерферометра был установлен акусто-оптический модулятор (АОМ), который работал на частоте  $\Omega = 80$  МГц и смещал пик биений на соответствующую частоту. В другом плече находилась линия задержки, которая представляла из себя две катушки одномодового ВС с общей длиной  $L_d \approx 56$  км. Время задержки сигнала  $\tau_d \approx 271$  мкс соответствует предельному спектральному разрешению  $1/\tau_d \approx 3.6$  кГц. После прохождения интерферометра сигналы складывались через волоконный объединитель и регистрировалось с помощью 5 ГГц фотодиода Thorlabs DET08CFC, подключенного к радиочастотному анализатору сигналов Agilent N9010A.

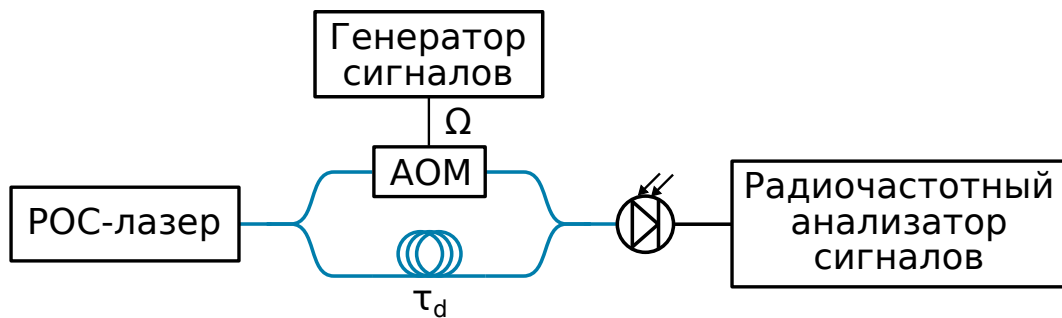


Рисунок 2.18 — Схема измерения ширины линии генерации РОС-лазера методом автогетеродина.

### 2.2.3 ВБР с фазовым $\pi$ -сдвигом в структуре в пассивном волоконном световоде

На Рис. 2.19 приведены спектры пропускания 8.6-мм ВБР с фазовым  $\pi$ -сдвигом в структуре. Положение фазового сдвига соответствует геометрическому центру ВБР. Энергия фс лазерных импульсов во время записи была  $E_p = 165$  нДж. Как и в случае записи однородных ВБР, измерение спектральных характеристик производилось для быстрой и медленной поляризационных осей. При этом использовались две схемы измерения: с помощью оптического спектрального анализатора с разрешающей способностью 20 пм (2.5 ГГц) и одночастотного перестраиваемого лазера с шириной линии генерации  $\sim 10$  кГц (см.

Пункт 2.1.4). Измеренная величина отстройки между поляризационными осями  $\Delta\lambda_p \approx 37$  нм, которая обусловлена анизотропией индуцируемой модификации показателя преломления, соответствует двулучепреломлению  $\delta n = 3.46 \times 10^{-5}$ . Спектральная ширина линии пропускания на уровне  $-3$  дБ составляет 7.5 нм и 15.5 нм для быстрой и медленной поляризационных осей соответственно, что по порядку величины сравнимо с измерениями, проведенными в работе [65] для фс поточечных ВБР 2-го порядка.

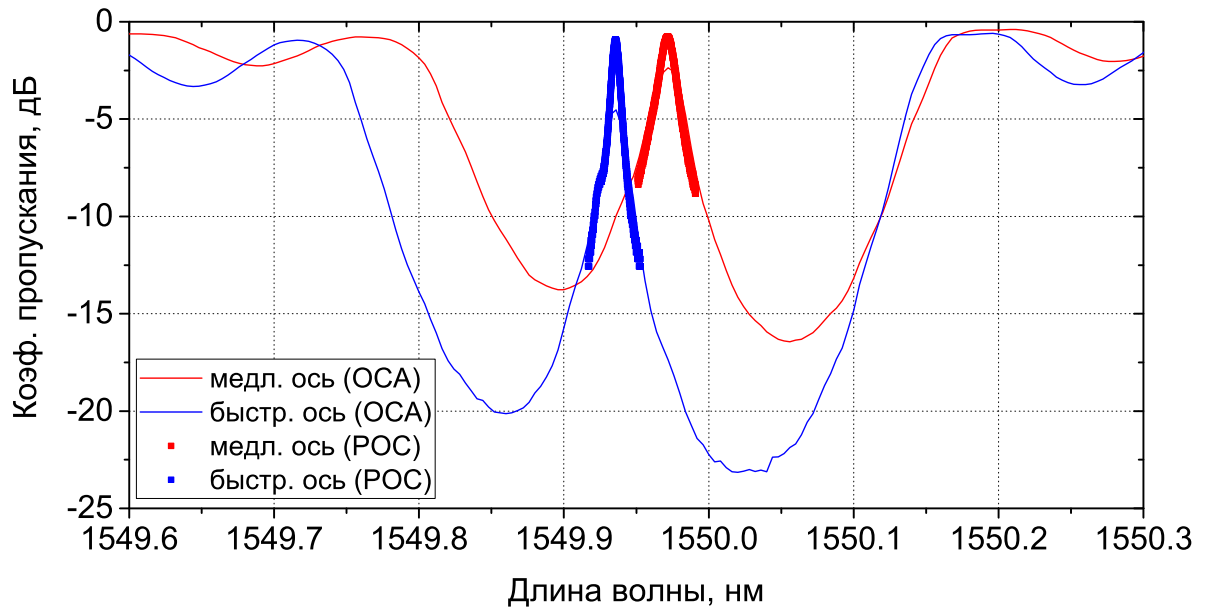


Рисунок 2.19 — Спектр пропускания 8.6-мм ВБР с фазовым  $\pi$ -сдвигом в центре структуры измеренный для быстрой и медленной поляризационных осей с помощью ОСА и перестраиваемого РОС-лазера.

Результат последующего увеличения длины ВБР с фазовым  $\pi$ -сдвигом в структуре представлен на Рис. 2.20 ( $L_{\text{FBG}} = 17.1$  мм) и Рис. 2.21 ( $L_{\text{FBG}} = 34.2$  мм). Регистрация спектров полученных структур производилась с использованием схемы изображенной на Рис. 2.16. В обоих случаях, для уменьшения уровня нерезонансных потерь, энергия фс лазерных импульсов была снижена до  $E_p = 140$  нДж. Для ВБР длиной 17.1 мм измеренная ширина линии пропускания составила 3.2 и 7.7 нм для быстрой и медленной поляризационных осей соответственно (Рис. 2.20а–б). Для ВБР длиной 34.2 мм аналогичные значения уменьшились до значений 0.55 и 1.15 нм для быстрой и медленной поляризационных осей соответственно (Рис. 2.21а–б). Спектр пропускания, измеренный для смешанного поляризационного состояния (Рис. 2.20в), показывает, что отстройка длины волны для разных поляризационных осей сокращается до значения  $\Delta\lambda_p \approx 18.8$  нм, что соответствует двулучепреломлению  $\delta n = 1.76 \times 10^{-5}$ .

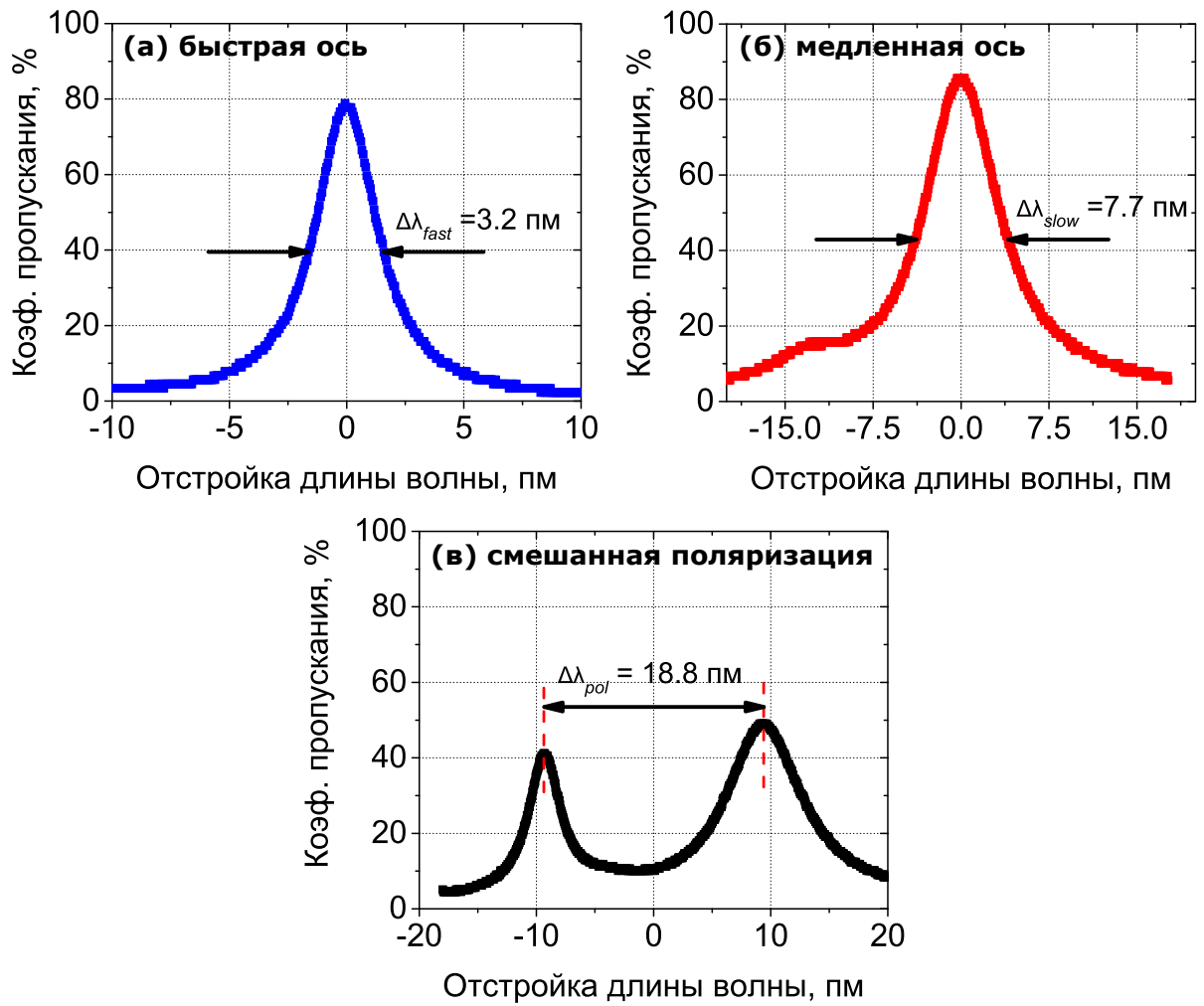


Рисунок 2.20 — Спектр пропускания 17.1-мм ВБР с фазовым  $\pi$ -сдвигом в центре структуры, измеренный для быстрой (а) и медленной (б) поляризационных осей, а также для комбинации состояний (в).

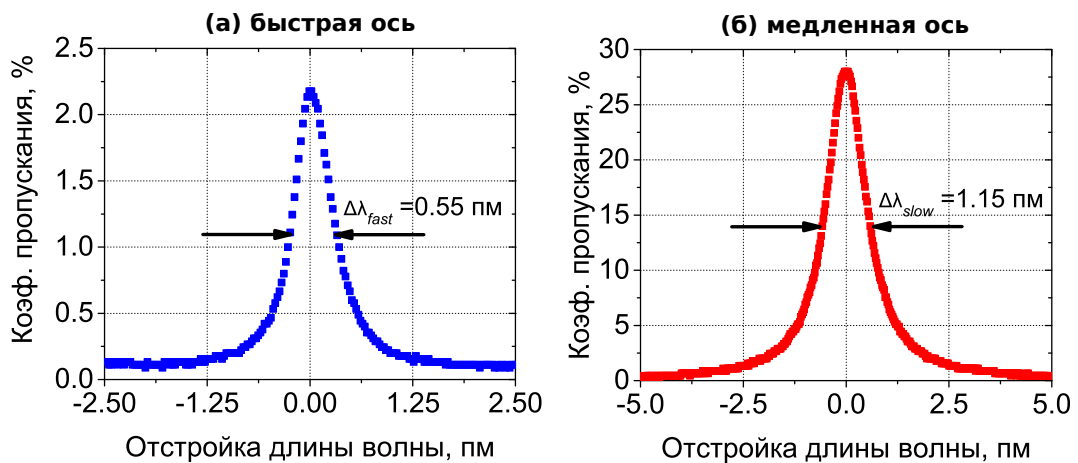


Рисунок 2.21 — Спектр пропускания 34.2-мм ВБР с фазовым  $\pi$ -сдвигом в центре структуры, измеренный для быстрой (а) и медленной (б) поляризационных осей.

Структуры ВБР, имеющие нескольких фазовых сдвигов, широко применяются для обработки и фильтрации оптических сигналов. Так, например, в работе [98] показано, что ВБР с двумя и тремя фазовыми сдвигами могут формировать квазипрямоугольный спектральный фильтр, в работе [97] продемонстрирован демультиплексор для волоконно-оптических линий связи со спектральным уплотнением. В работе [95] ВБР с фазовым сдвигом используется в качестве фильтра в волоконном лазере с возможностью переключения по длине волны.

Экспериментальная демонстрация возможности задания нескольких фазовых сдвигов в структуре была произведена для ВБР длиной  $L_{\text{FBG}} = 8$  мм, в которой два  $\pi$ -сдвига были расположены на расстояниях  $1/3L_{\text{FBG}}$  (2.66 мм) и  $2/3L_{\text{FBG}}$  (5.33 мм) от начала решетки. Спектры пропускания полученной структуры, измеренные для медленной и быстрой поляризационных осей, а также численно рассчитанные, представлены на Рис. 2.22. Хорошее соответствие между экспериментальными и расчетными данными свидетельствует о высокой точности положения и величине фазовых сдвигов полученной ВБР.

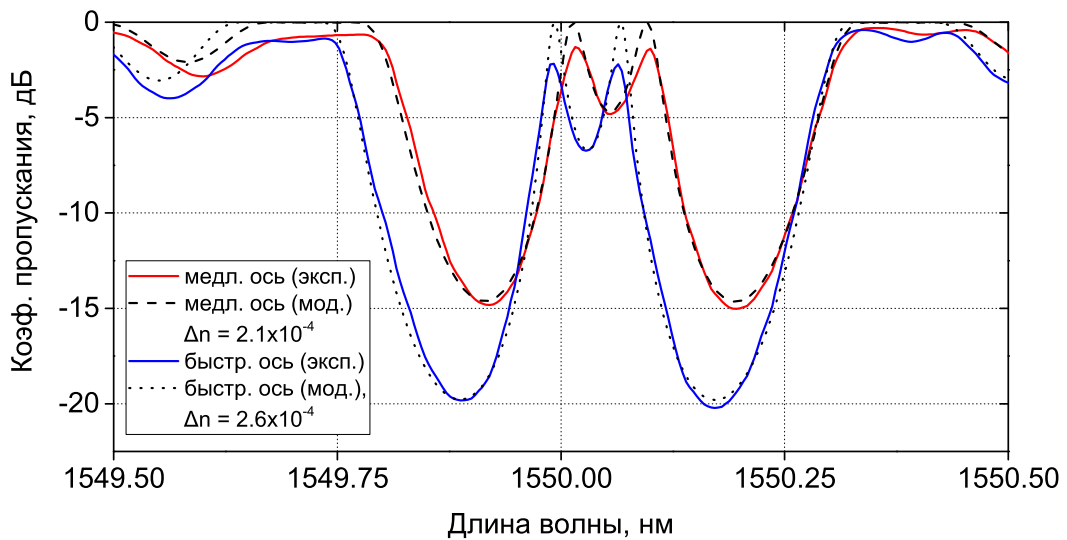


Рисунок 2.22 — Экспериментальные и расчетные спектры пропускания 8-мм ВБР с двумя фазовыми  $\pi$ -сдвигами в структуре для разных поляризационных осей.

## 2.2.4 РОС-лазер на основе ВБР с фазовым $\pi$ -сдвигами в структуре в активном волоконном световоде

Принципиальная возможность создания высококачественных ВБР с фазовыми сдвигами в структуре, продемонстрированная в предыдущем Пункте, открывает широкие возможности для создания резонаторов РОС-лазеров в новых материалах, нефоточувствительных к поглощению УФ излучения. Кроме того, возможность задать резонансную длину волны ВБР делает метод фемтосекундной поточечной записи более гибким и дешевым при производстве резонаторов РОС-лазеров, поскольку не требует использования дорогостоящей фазовой маски для каждой отдельной резонансной длины волны.

В данном Пункте для создания резонатора РОС-лазера методом фс поточечной записи был использован одномодовый ВС с сохранением поляризации Coractive ER35-7-PM, легированный ионами эрбия. Перед записью ВБР защитное акриловое покрытие волокна зачищалось, а феррула, через которую осуществлялась протяжка ВС, заменялась на феррулу с внутренним диаметром 127 мкм. Это позволяло минимизировать ошибки фокусировки фс импульсов в область сердцевины волокна, возникающие из-за неровности защитного покрытия. Поскольку тип волокна (PANDA) подразумевает наличие дополнительных стержней в оболочке ВС, необходимых для наведения анизотропии в области сердцевины, перед записью волокно ориентировалось таким образом, чтобы направление распространения фс пучка совпадало с быстрой поляризационной осью волокна. Это позволяло избежать дополнительных aberrаций, возникающих вследствие прохождения фс излучения через стержни. Созданный образец ВБР имел длину  $L_{\text{FBG}} = 37$  мм, период  $\Lambda_{\text{FBG}} = 0.532$  мкм и содержал фазовый  $\pi$ -сдвиг в центре структуры. Энергия фемтосекундных импульсов при записи была установлена в значение  $E_p = 130$  нДж. Спектры пропускания полученной структуры измерялись для разных поляризационных осей (Рис. 2.23) оптического спектрального анализатора с разрешением 20 пм.

Полученный образец ВБР с фазовым  $\pi$ -сдвигом был установлен в схему РОС-лазера (Рис. 2.17) для дальнейшего изучения режима генерации. Сначала при помощи оптического анализатора спектров был измерен спектр лазера (Рис. 2.24а) и его дифференциальная эффективность (Рис. 2.24б). Как можно видеть из Рис. 2.24а, лазерная генерация происходит при достаточно высоком

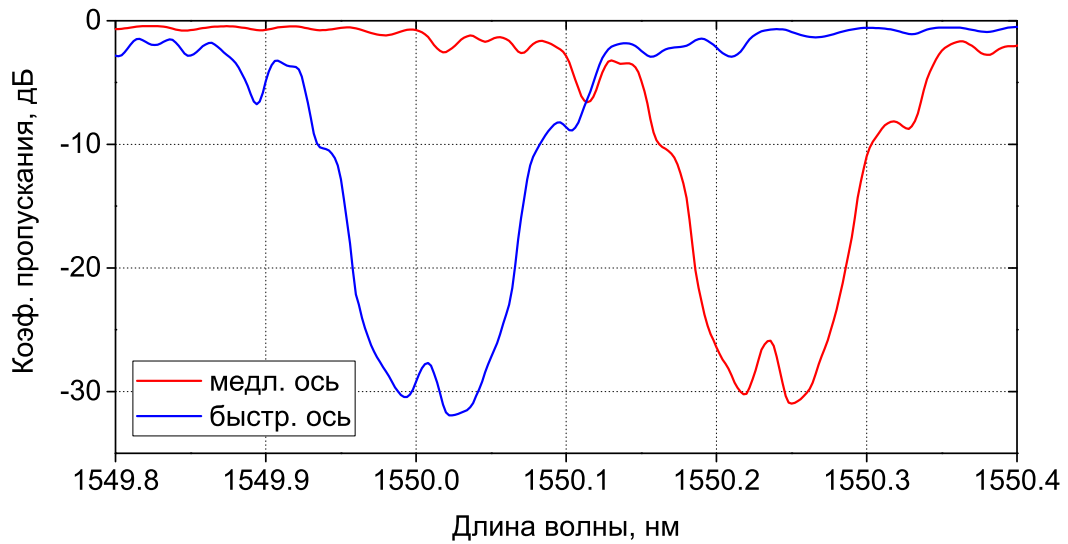


Рисунок 2.23 — Спектры пропускания 37-мм ВБР с фазовым  $\pi$ -сдвигом в структуре записанной в активном эрбиевом ВС с сохранением поляризации.

соотношении сигнал-шум (до 71 дБ), при этом на всем диапазоне мощности накачки генерация наблюдалась только для одной поляризационной моды, что свидетельствует об одночастотности режима. Из Рис. 2.24б видно, что порог генерации достигался при мощности накачки 10 мВт, а значение дифференциальной эффективности составило 0.1%. Такая эффективность является типичной для волоконных РОС-лазеров на основе ВС, легированных исключительно ионами эрбия, и обусловлена относительно малым значением сечения поглощения накачки [106]. Как правило, конфигурация РОС-лазера, используемая в данной работе, используется в качестве задающего источника, в то время как внешняя схема усиления делает возможным увеличить выходную мощность до величин  $\sim 1$ –10 Вт при сохранении шумовых и спектральных характеристик задающего лазера.

Одной из важных характеристик непрерывных лазеров является относительный шум интенсивности, который определяется как спектральная плотность мощности тока, производимого в фотодиоде при поглощении лазерного излучения, нормированная на средний фототок. Данная характеристика имеет критическое значение при использовании РОС-лазера в системах оптической рефлектометрии, а также при использовании резонатора РОС-лазера в качестве чувствительного элемента в сенсорной системе [107]. Как правило, флуктуация выходной мощности РОС-лазера определяется, прежде всего, флуктуацией мощности накачки, что в свою очередь приводит к релаксационным осцилляциям [108].

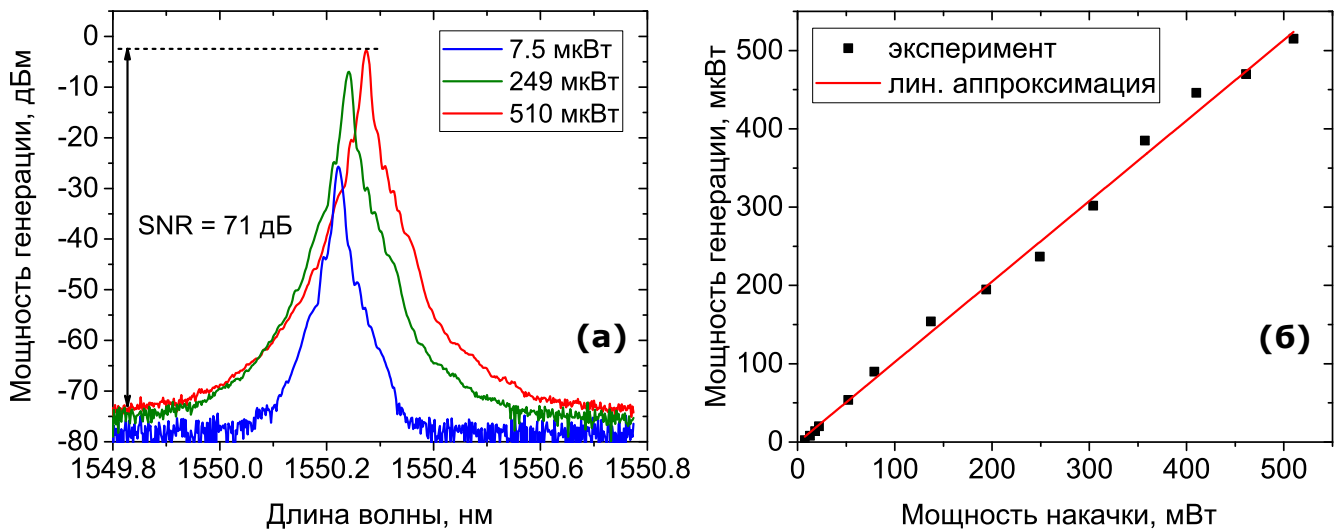


Рисунок 2.24 — (а) Спектр эрбиевого РОС-лазера, измеренный для обратного направления генерации лазерного излучения при мощности накачки 505 мВт. (б) Зависимость мощности генерации РОС-лазера от мощности накачки для обратного направления генерации лазерного излучения.

Для измерения относительного шума интенсивности собранного РОС-лазера использовался 5-ГГц фотодиод Thorlabs DET08CFC и радиочастотный анализатор сигналов Agilent N9010A. Спектральная плотность мощности фототока приведена на Рис. 2.25а. Как видно из рисунка, пик релаксационных осцилляций находится на частоте  $\approx 690$  кГц, а амплитуда пика достигает величины  $-96$  дБ/Гц, что является типичными значениями для РОС-лазера на основе ВС, легированного ионами эрбия. В общем случае относительный шум интенсивности зависит от ряда параметров, включая материал ВС, параметры ВБР, а также мощность и качество накачки [107].

Ширина линии генерации РОС-лазера при максимальной достигнутой выходной мощности 510 мВт была измерена с помощью описанной ранее схемы автогетеродина (Рис. 2.18). Спектр биений, усредненный по времени  $>1$  с, представлен на Рис. 2.25б. Ширина пика биений составила  $\approx 40$  кГц на полувысоте амплитуды, что соответствует ширине линии генерации РОС лазера  $\approx 20$  кГц. Стоит отметить, что полученное значение является типичным для ширины, измеренной на длительных временах [106]. В то же время, на более коротких временных интервалах значение ширины РОС-лазера может достигать 10 Гц.



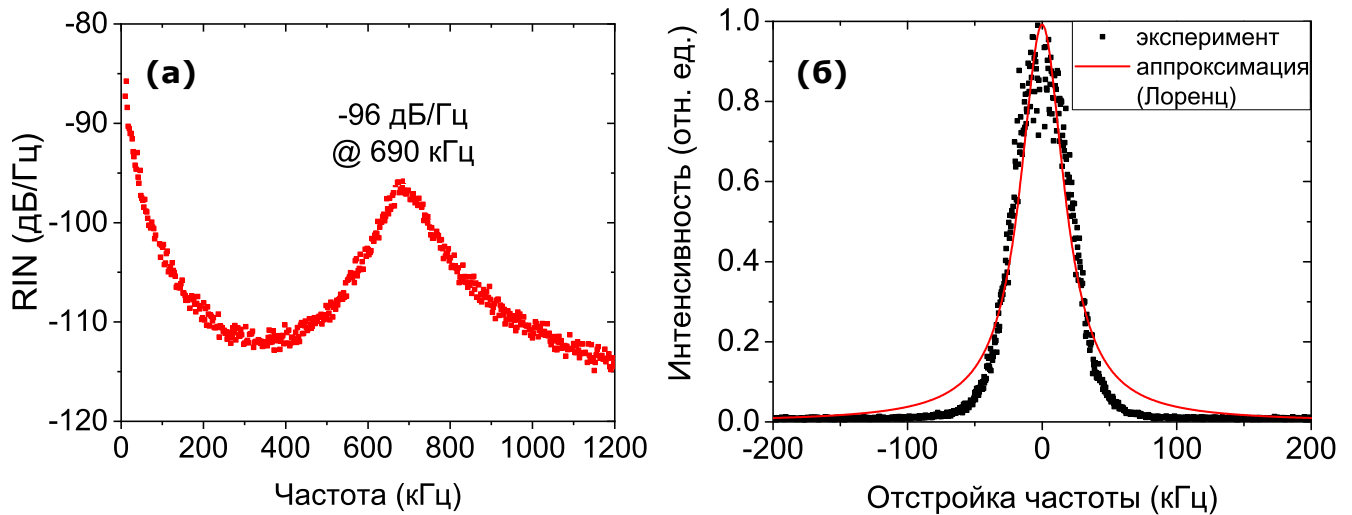


Рисунок 2.25 — (а) Спектральная плотность мощности относительного шума интенсивности РОС-лазера. (б) Спектр биений излучения РОС-лазера прошедшего волоконно-оптический интерферометр Маха-Цендера.

### 2.2.5 Выводы по Параграфу 2.2

Таким образом, в Параграфе демонстрируется новый прямой метод записи ВБР с фазовыми сдвигами в структуре с использованием фс лазерных импульсов. Для ВБР, записанных в пассивном ВС с полиимидным защитным покрытием, достигнута длина структуры 34.2 мм, активном ВС типа PANDA без защитного покрытия – 37 мм. Было показано, что фазовые сдвиги могут быть заданы в нескольких точках вдоль ВБР. Амплитуды провалов на резонансной длине волны ВБР достигали  $>30$  дБ, а ширина полосы пропускания  $<1$  пм, что является рекордно малым значением для ВБР с фазовым сдвигом, записанной фс поточечным методом. РОС-лазер, собранный на основе ВБР с фазовым  $\pi$ -сдвигом в активном эрбиевом ВС, имел ширину линии генерации  $\approx 20$  кГц на длине волны  $\approx 1550$  нм. Значение сигнал-шум достигало величины 71 дБ, а пик релаксационных осцилляций имел амплитуду  $-96$  дБ/Гц на частоте  $\approx 690$  кГц.

Отметим, что экспериментальные результаты по записи ВБР с фазовым сдвигом в структуре с помощью фс поточечного метода, представленные в этом Параграфе, имеют одни из лучших качественных характеристик (длина и полоса пропускания) из представленных в литературе, хотя и уступают полученным методом записи ВБР с помощью УФ излучения и фазовой маски, где были продемонстрированы ВБР с длиной до 50 см [109]. Тем не менее, метод поточечной



фс записи имеет ряд неоспоримых преимуществ перед указанным методом, а именно – гибкость при задании резонансной длины волны ВБР и возможность создания нескольких фазовых сдвигов с выбранным значением и положением вдоль ВС. Эти преимущества делают метод привлекательным для изготовления ВБР с фазовыми сдвигами для обработки оптических сигналов, распределенных отражателей для датчиков и лазеров с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

### Глава 3. Запись ВБР в 7-сердцевинных волоконных световодах

Многосердцевинными волоконными световодами (МВС) называют световоды, имеющие две и более сердцевинны. Существует большое разнообразие такого типа волоконных световодов: фотонно-кристаллические [110], полые с “подвешенными” сердцевинами [111], с близко расположенными сердцевинами, между которыми возникает перекрестная связь, и разнесенными сердцевинами без перекрестной связи [112], с закрученными по спирали сердцевинами [113]. Как правило, основной целью использования таких световодов является пространственное уплотнение оптического сигнала [114]. В настоящее время МВС являются темой исследований в таких областях как оптические линии связи с высокой пропускной способностью [114], усиление и когерентное сложение лазерного излучения [115], волоконно-оптические датчики [116], изучение механизмов нелинейного распространения лазерного излучения по таким волноводам [117], микроскопия без дополнительных оптических элементов [118], оптическая обработка сигналов с использованием методов радиофотоники [119]. По сравнению с сенсорными решениями, использующими ВС с одной световедущей сердцевиной [120], волоконно-оптические датчики на основе МВС являются более компактными и гибкими, что особенно важно при создании робототехнических устройств для минимально инвазивных хирургических манипуляций [12].

Запись волоконных брэгговских решеток (ВБР) в многосердцевинных волоконных световодах является предметом исследований последних двух десятилетий. Первые результаты по записи были получены для голографического метода [121] и метода, использующего фазовую маску [122]. В обоих случаях модификация МВС производилась при помощи УФ излучения. При этом воздействие УФ излучения распространялось на все сердцевинны одновременно, что приводило к записи в них ВБР с одинаковой резонансной длиной волны. Однако, многие задачи требуют наличия в выбранной сердцевине ВБР с индивидуальными характеристиками. В работе [119] показано, что выбор оптимальной ширины УФ лазерного пучка, а также расстояния между МВС и фазовой маской позволяет добиться селекции требуемой сердцевинны при записи ВБР. Тем не менее, данный подход является мало практичным для создания массивов ВБР, в которых каждая из структур имеет индивидуальные характеристики.

В данной Главе приводятся результаты исследования по поточечной записи ВБР в 7-сердцевинных волоконных световодах с помощью ИК фемтосекундных (фс) лазерных импульсов. Будут представлены экспериментальные результаты по записи массивов фс поточечных ВБР в двух разных типах 7-сердцевинных ВС, имеющих как прямые, так и закрученные по спирали сердцевинны. Будет показано, что расположение ВБР в массиве, а также их резонансные длины волн, могут быть заданы требуемым образом, как в продольном, так и в поперечном направлениях МВС, при этом модификация может быть произведена через защитное покрытие световода. Данная возможность имеет важное значение для сенсорных применений, в которых волокно испытывает механическое воздействие. Способ записи ВБР в выбранной сердцевине МВС с закрученными боковыми сердцевинами реализован впервые. Обсуждаются особенности метода записи, и делаются оценки геометрических параметров таких ВБР. Результаты работы могут быть интересны для ряда областей, в которых используются МВС: точечное измерение направления и величины изгиба, а также распределенное восстановление формы световода [13; 123–125], структурный мониторинг композитных материалов, радиофотоника [119].

Изложенные в данной Главе результаты опубликованы в работах [24; 34] и были представлены на конференциях [30–33].

### 3.1 Запись ВБР в 7-сердцевинном волоконном световоде с прямыми сердцевинами

#### 3.1.1 Схемы записи и опроса массивов ВБР в 7-сердцевинных волоконных световодах

Как было показано в Главе 2, метод фс поточечной записи ВБР путем протяжки ВС через канал прозрачной феррулы со шлифованной боковой гранью обладает высокой степенью гибкости и производительности. Для модификации 7-сердцевинных ВС была произведена адаптация данного метода. В частности, стенки феррулы шлифовались под углом  $90^\circ$ , что позволяло точно выставить точку модификации показателя преломления внутри МВС по двум направлениям (плоскость XY), как это показано на Рис. 3.1. Фокусировка фс лазерного пучка и визуализация МВС в плоскости XZ осуществлялась с помощью микрообъектива Mitutoyo 50× Plan Apo NIR HR ( $NA = 0.65$ , разрешающая сила  $0.42 \text{ мкм} @ 550 \text{ нм}$ , глубина резкости  $\pm 0.65 \text{ мкм} @ 550 \text{ нм}$ ). Дополнительный объектив устанавливался для визуализации положения МВС в плоскости YZ. Положение области фокусировки фс лазерного пучка варьировалось в зависимости от сердцевин, в которой производилась запись. При модификации центральной сердцевины перетяжка фс пучка находилась в центральной части МВС, при модификации боковых сердцевин фокус смещалась в поперечном направлении на расстояние, соответствующее расстоянию между центрами сердцевин. Модификация МВС с прямыми сердцевинами производилась через защитное полиимидное покрытие. При этом использовалась феррула с диаметром внутреннего канала  $\approx 160 \text{ мкм}$ , что немногим превосходит внешний диаметр световода ( $154 \text{ мкм}$ ). В случае МВС с закрученными боковыми сердцевинами модификация производилась через защитное акрилатное покрытие. В данном случае диаметр оболочки световода составлял  $186.7 \text{ мкм}$ , а диаметр внутреннего канала феррулы  $\approx 202 \text{ мкм}$ . Фиксация МВС на линейном трансляторе Aerotech AVL1000 осуществлялась с помощью специализированного зажима с угловой степенью свободы (Thorlabs HFR007). Это позволяло выставить необходимую ориентацию МВС перед записью ВБР.

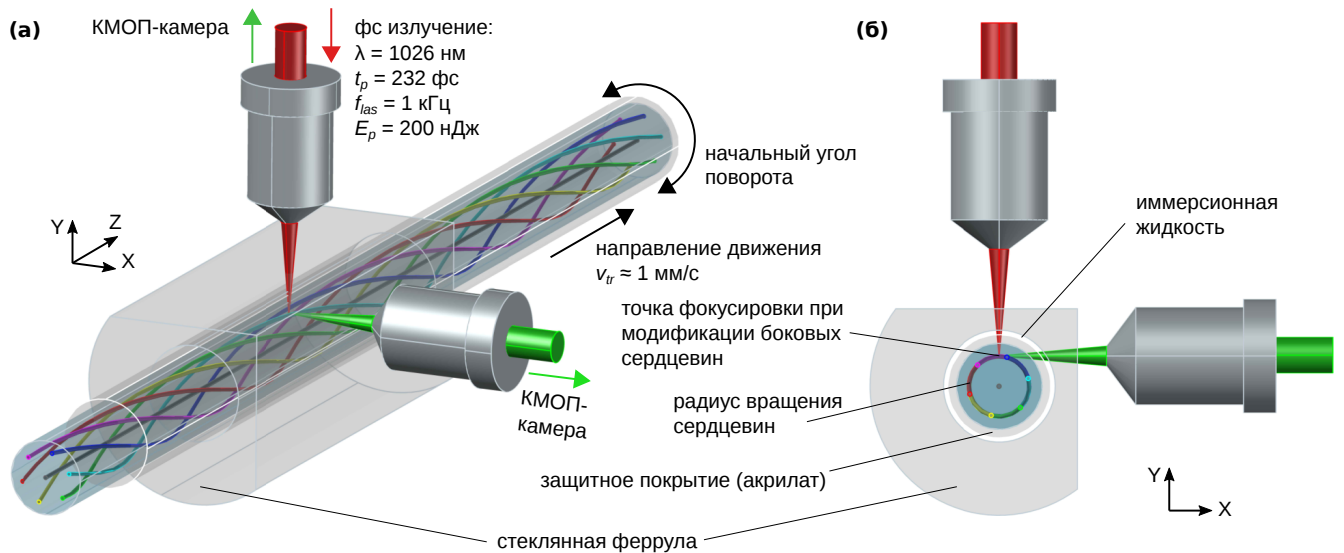


Рисунок 3.1 — Фокусировка фс пучка при поточечной записи ВБР в MBC со скрученными сердцевинами.

Для эксперимента по записи массивов ВБР было выбрано два типа 7-сердцевинных ВС со слабой перекрестной связью между сердцевинами: с прямыми сердцевинами (НЦВО РАН, г. Москва) и боковыми сердцевинами закрученными по спирали (Fibercore SSM-7C1500(6.1/125)). Схематичное представление поперечного сечения для указанных MBC представлено на Рис. 3.2, а основные технические характеристики данных световодов сведены в Таблицу 4. В обоих случаях ВС имели 1 центральную сердцевину и 6 боковых сердцевин, расположенных в углах правильного шестиугольника. Сердцевины были удалены друг от друга на расстояние 40.5 мкм для MBC НЦВО РАН и 35 мкм для MBC Fibercore SSM-7C1500(6.1/125)). Все сердцевинки поддерживали распространение оптического сигнала в одномодовом режиме в области длин 1450–1600 нм. Для MBC с закрученными по спирали сердцевинами период витка был  $L_p = 15.4$  мм.

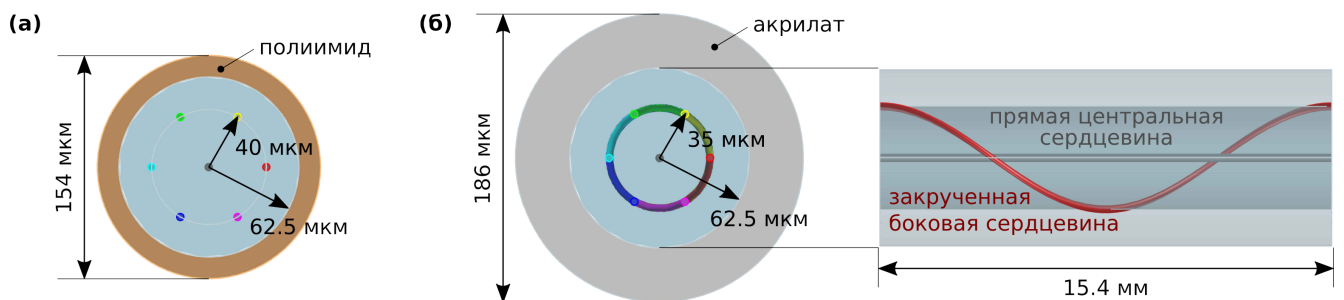


Рисунок 3.2 — Геометрические параметры 7-сердцевинных волоконных световодов, используемых в экспериментах: (а) НЦВО РАН и (б) Fibercore SSM-7C1500(6.1/125).

Таблица 4 — Технические характеристики 7-сердцевинных волоконных световодов ИЦВО РАН и Fibercore SSM-7C1500(6.1/125) [126].

	ИЦВО РАН	Fibercore SSM-7C1500(6.1/125)
Расположение сердцевин	гексагональное + центральная сердцевина	
Материал защитного покрытия	полиимид	акрилат
Расстояние между сердцевинами	40.5 мкм	35 мкм
Диаметр кварцевой оболочки	125 мкм	125.6 мкм
Диаметр защитного покрытия	154 мкм	185.7 мкм
Диаметр модового пятна	5.7 мкм @ 1550 нм	6.3 мкм @ 1550 нм
Длина волны отсечки	1450 нм	1381 нм
Числовая апертуры	0.21	0.2
Период витка боковой сердцевинны	–	15.4 мм
Ошибка поперечного положения сердцевинны	–	0.5 мкм

Для измерения спектральных характеристик созданных массивов ВБР была собрана схема, приведенная на Рис. 3.3. Излучение от широкополосного источника света, суперлюминесцентного диода (СЛД) Thorlab SLD1550S-A2, заводилось на вход волоконного циркулятора и далее поочередно направлялось в каналы специализированного устройства ввода/вывода, совместимого с тестируемым МВС. На одном конце устройства ввода/вывода имело 7 одномодовых каналов (С1–7), а с другой 7-сердцевинный световод. Нумерация сердцевин в поперечном сечении МВС соответствует представленной на Рис. 3.3. Каждый из каналов устройства ввода/вывода направлял излучение оптический сигнал в одну из сердцевин МВС. Используемые в данной работе устройства ввода/вывода обеспечивали коэффициент обратного отражения менее –40 дБ и уровень вносимых оптических потерь менее 1 дБ. Для подавления широкополосного френелевского отражения дальний конец МВС шлифовался под углом 7°. Регистрация отраженных и проходящих сигналов производилась оптическим спектральным анализатором (ОСА) Yokogawa AQ6370D.

На Рис. 3.4 приведен другой вариант схемы опроса ВБР, записанных в разных сердцевинах МВС через один оптический канал. В отличие от предыду-

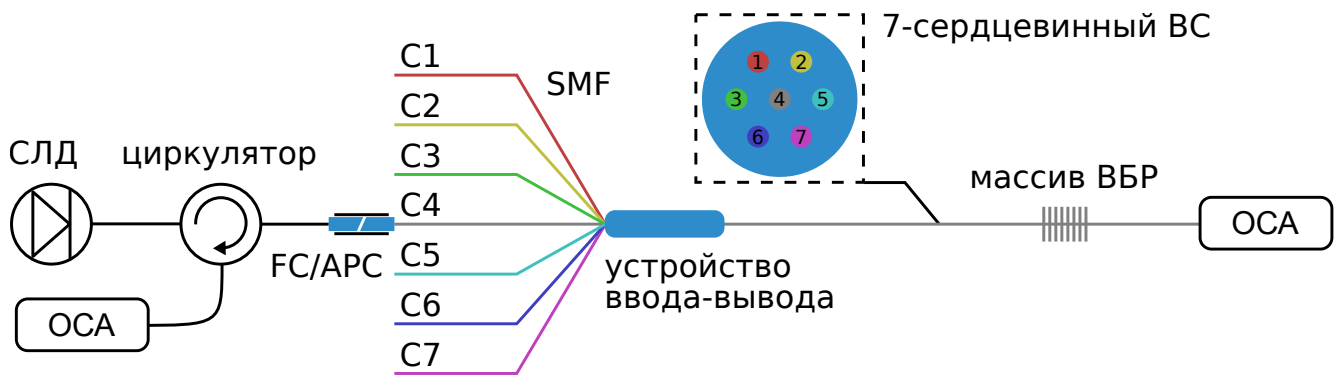


Рисунок 3.3 — Схема опроса отдельных сердцевин 7-сердцевинного волоконного световода.

щей схемы (Рис. 3.3), сигналы отражения с четырех сердцевин складывались и одновременно регистрировались оптическим спектральным анализатором с помощью  $2 \times 4$  волоконно-оптического разветвителя, что не требовало физического переключения выхода циркулятора между входными каналами устройства ввода/вывода или использования дополнительного оптического переключателя. В общем случае, использование разветвителя с большим количеством каналов ввода/вывода позволяет складывать разные оптические сигналы при заведении в требуемые сердцевинки, а также производить одновременное измерение спектров пропускания/отражения для данных сердцевин МВС.

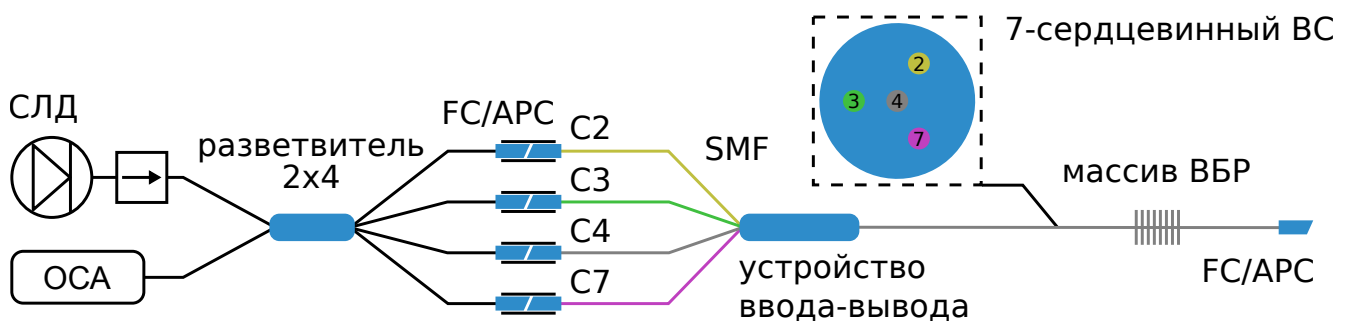


Рисунок 3.4 — Одноканальная схема опроса группы сердцевин 7-сердцевинного ВС, содержащего массив ВБР с разными резонансными длинами волн.

### 3.1.2 Запись однородных ВБР в 7-сердцевинном волоконном световоде с прямыми сердцевинами

Сначала тестирование вышеописанных схем по записи и опросу ВБР в МВС производилось для световода с прямыми сердцевинами, изготовленного

НЦВО РАН (г. Москва), чьи параметры приведены в Таблице 4. Наличие полиимидного защитного покрытия выгодно отличает данный тип МВС перед коммерчески доступными, которые имеют акрилатное защитное покрытие. Отметим, что в ряде применений механическая и температурная “выносливость” датчика на основе МВС является крайне критическим фактором. Это требование распространяется как на материал защитного покрытия волокна, так и на модифицированную часть МВС, в которую записываются ВБР. В частности, при встраивании МВС в композитный материал требуется высокая степень адгезии защитного покрытия как со стеклянной оболочкой МВС так и с внешним материалом [127;128]. При спекании композитных материалов, например, эпоксидных/углеволоконных препрегов, температура может достигать 180 °С [75], для эпоксидных/полиимидных композитов 350 °С [129]. Кроме того, температурная стойкость датчиков на основе МВС является важным фактором при стерилизации медицинского инструмента путем термообработки в автоклаве.

Для демонстрации работоспособности модифицированной схемы (Рис. ??) записи был создан массив, состоящий из 12 ВБР: 6 в центральной сердцевине (4) и 6 в боковой сердцевине (1). Все ВБР в массиве имели однородный профиль показателя преломления, фиксированную длину  $L = 2$  мм и фиксированное продольное расстояние между центрами соседних структур равное 5 мм. Сначала запись производилась в центральной сердцевине, при этом периоды ВБР менялись последовательно с  $\Lambda_1 = 1.036$  мкм до  $\Lambda_6 = 1.093$  мкм. Изменение периода на  $\Delta\Lambda \approx 11.4$  нм между соседними ВБР позволило спектрально разделить их резонансы на величину  $\Delta\Lambda \approx 16.7$  нм. После записи массива ВБР в центральной сердцевине (4) волоконный световод смещался в начальную координату в продольном направлении, а затем в поперечном направлении, таким образом, чтобы фокус записывающего объектива переместился в боковую сердцевину (1). Далее производилась модификация данной сердцевины, при которой ВБР записывались в той же последовательности, что и в случае сердцевины (4). При этом длины ВБР и промежутки между ними сохранялись. Результат измерения спектров отражения отдельных сердцевины представлен на Рис. 3.5. На Рис. 3.6 приведена микрофотография участка одной из ВБР записанных в боковой сердцевине МВС.



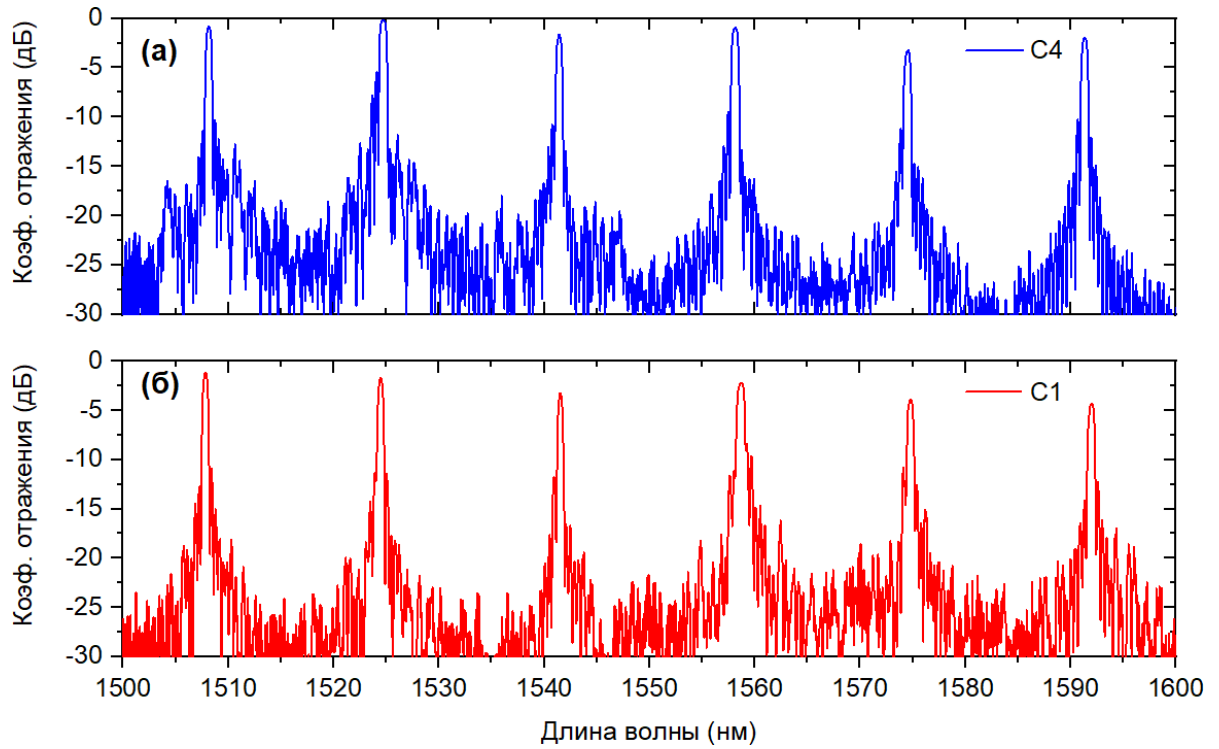


Рисунок 3.5 — Спектры отражения массивов ВБР, записанных в центральной сердцевине (4) (а) и боковой сердцевине (1) (б) 7-сердцевинного волоконного световода НЦВО РАН.

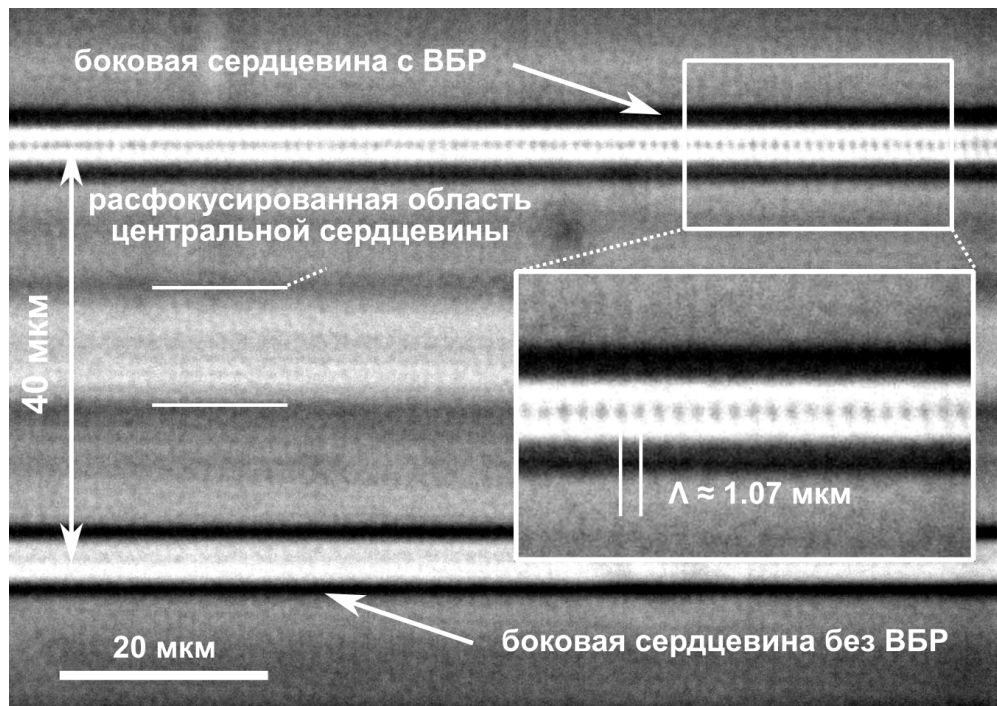


Рисунок 3.6 — Микрофотография участка ВБР, записанной в боковой сердцевине 7-сердцевинного волоконного световода НЦВО РАН.

### 3.1.3 Запись неоднородных ВБР в 7-сердцевинном волоконном световоде с прямыми сердцевинами

В следующем эксперименте производилась запись линейно chirпированной ВБР с длиной  $L = 10$  мм, начальным периодом  $\Lambda_s = 1.07$  мкм и конечным периодом  $\Lambda_f = 1.072$  мкм. Скорость изменения периода ВБР составила  $\Delta\Lambda/L = 0.2$  нм/мм. Для записи была выбрана одна из боковых сердцевины МВС. После записи структуры участок МВС, содержащий ВБР, изгибался на радиус  $R = 32.5$  мм, после чего проворачивался вокруг своей оси. При повороте осуществлялась регистрация спектров отражения. На Рис. 3.7 представлены спектры, соответствующие выпрямленному участку МВС, а также минимальному и максимальному спектральному сдвигу, величина которого составила  $\Delta\lambda = \pm 1.45$  нм при заданном радиусе изгиба. Из рисунка видно, что форма спектра, а также отражательная способность ВБР, не подвергаются значительному изменению при заданном радиусе изгиба.

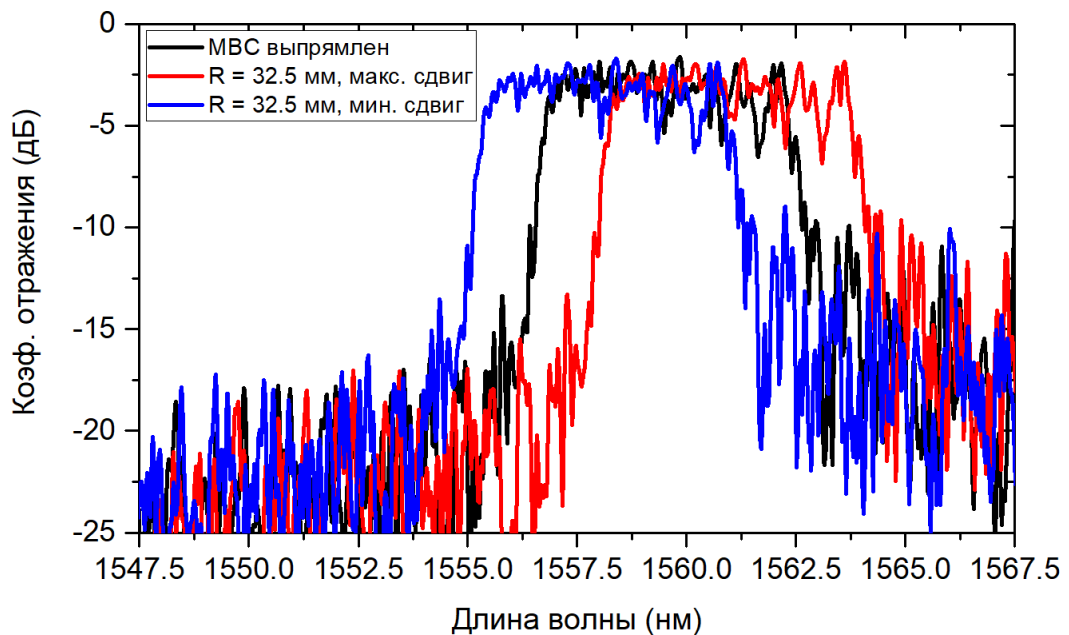


Рисунок 3.7 — Спектры отражения линейно chirпированной ВБР, записанной в одной из боковых сердцевины 7-сердцевинного волоконного световода НЦВО РАН. Спектры измерялись для выпрямленного участка МВС (черный) и изогнутого (красный и синий).

Далее проводилось сравнение спектральных характеристик однородной и аподизированной ВБР, записанных в центральной сердцевине МВС. Длина

каждого из образцов была 2 мм, а период структуры 1.074 мкм. В случае аподизированной ВБР начальное положение точки фокусировки фс импульсов находилось вне сердцевины волокна на расстоянии 10 мкм от её центра, конечное положение находилось на расстоянии 10 мкм с противоположной стороны, что обеспечивало переменный коэффициент перекрытия области модификации показателя преломления с полем моды выбранной сердцевины. На Рис. 3.8 приведены спектры пропускания/отражения для созданных образцов. Как видно из приведенных спектров, степень подавления боковых пиков, или параметр SLSR (от англ. *side-lobe suppression ratio*), находится на уровне 7.5 дБ для однородной ВБР и 13.5 дБ для аподизированной. Более широкий спектр аподизированной ВБР обусловлен её меньшей эффективной длиной. В частности, при заданных параметрах записи, длина, на которой ВБР пересекает сердцевину, составляет около 0.55 мм.

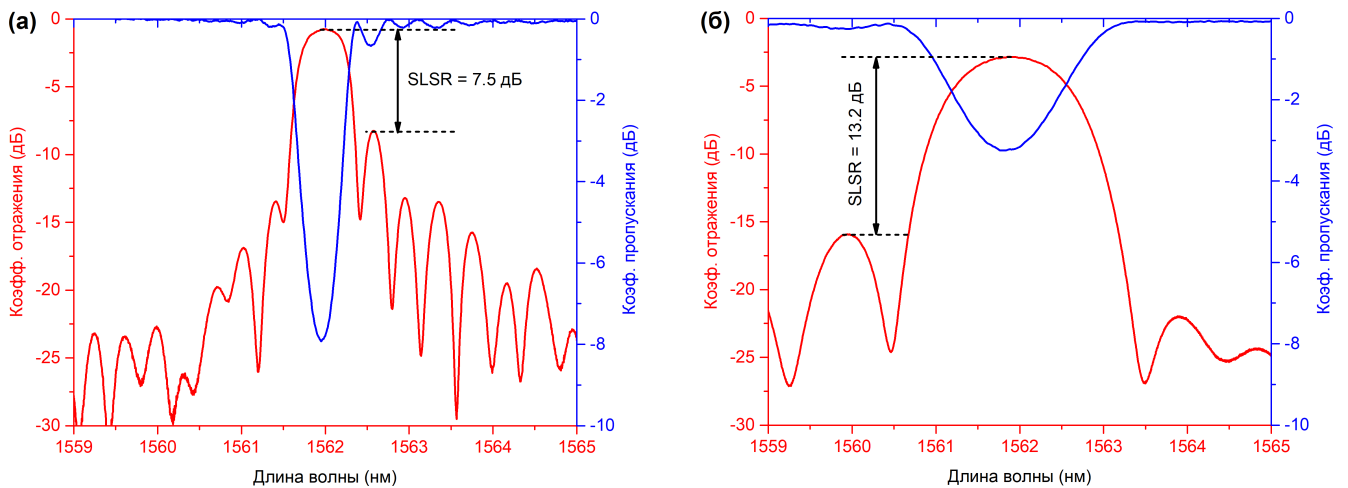


Рисунок 3.8 — Спектры отражения/пропускания однородной (а) и аподизированной (б) ВБР, записанных в центральной сердцевине 7-сердцевинного волоконного световода НЦВО РАН.

Один из образцов аподизированных ВБР был записан в выбранной боковой сердцевине МВС. За счет снижения энергии фс лазерных импульсов полученный образец имел меньший коэффициент отражения и более высокую степень подавления боковых пиков ( $SLSR = 17.3$  дБ). Участок МВС с записанной ВБР изгибался на радиус  $R = 32.5$  мм, после чего световод поворачивался вокруг своей оси. На Рис. 3.9 представлены спектры, соответствующие минимальному и максимальному спектральному сдвигу пика отражения ВБР, зарегистрированным в процессе вращения. Как и в случае с chirпированной ВБР, изгибная деформация не приводит к заметному изменению отражатель-

ной способности ВБР, а также формы резонансного пика. Измеренная величина спектрального сдвига также составила  $\Delta\lambda = \pm 1.45$  нм. Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования МВС с записанными в сердцевинах ВБР для задач восстановления величин радиуса и направления изгиба волоконного световода с помощью записанных в световоде ВБР.

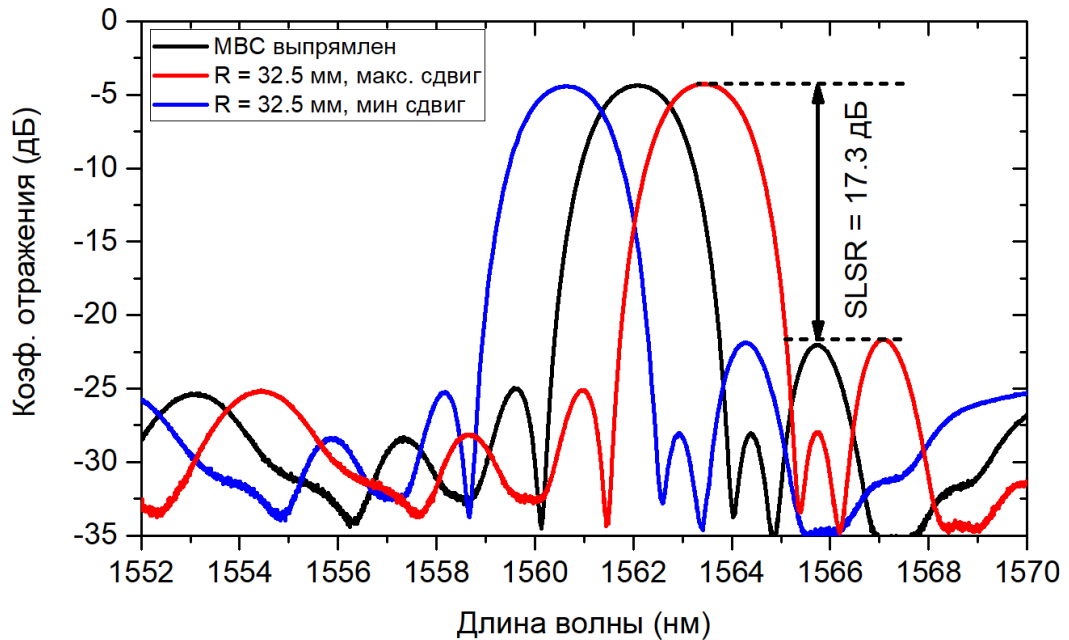


Рисунок 3.9 — Спектры отражения аподизированной ВБР, записанной в одной из боковых сердцевинок 7-сердцевинного волоконного световода НЦВО РАН. Спектры измерялись для выпрямленного участка МВС (черный) и изогнутого (красный и синий).

## 3.2 Запись ВБР в 7-сердцевинном волоконном световоде с закрученными по спирали сердцевинами

### 3.2.1 Оценка длины ВБР в закрученной боковой сердцевине 7-сердцевинного волоконного световода

Для лучшего понимания изложенных ниже результатов по записи ВБР в 7-сердцевинном ВС с закрученными по спирали боковыми сердцевинами полезно сделать некоторые предварительные оценки. Для начала рассмотрим процесс записи одной ВБР в выбранной боковой сердцевине. Установим точку фокусировки фс пучка на поверхность вращения боковых сердцевин (Рис. 3.10). Теперь, перемещая МВС в продольном направлении с выбранной скоростью и облучая его фс лазерными импульсами запишем непрерывный трек ВБР. Каждый раз, когда трек будет пересекать одну из боковых сердцевин, для мод, распространяющихся по данной сердцевине, будет выполняться условие фазового синхронизма, следствие чего реализуется резонансное отражение оптического сигнала на брэгговской длине волны.

Теперь возьмем участок МВС длиной  $L_p/6 = 15.4/6 = 2.567$  мм. На таком участке каждая из периферийных сердцевин осуществляет поворот на  $60^\circ$  и перемещается по дуге на расстояние  $P_c/6 = 2\pi R/6 = 36.65$  мкм в плоскости XY, как это показано на Рис. 3.10а. Разворот цилиндрической поверхности, на которой лежит сердцевина и производится запись ВБР, на плоскость позволяет свести задачу к двумерному случаю. В полученной плоскости можем построить прямоугольный треугольник, катетами которого будут служить указанные выше расстояния ( $L_p/6$  и  $P_c/6$ ), а гипотенуза будет соответствовать оптической оси боковой сердцевины (Рис. 3.10б). Поскольку трек ВБР пересекает сердцевину под углом  $\alpha = \arctg(P_c/L_p) \approx 0.8^\circ$ , то записанная ВБР будет иметь переменный коэффициент связи вдоль оптической оси сердцевины. При линейной скорости вращения сердцевины вдоль оси Z записанная в области сердцевины периодическая структура будет иметь продольный коэффициент связи, аподизированный гауссовой функцией. Для прямых одномодовых ВС подобный режим записи (аподизации) был реализован в работе [130], где в процессе записи ВБР производилось смещение ВС в поперечном направлении с постоянной скоростью.

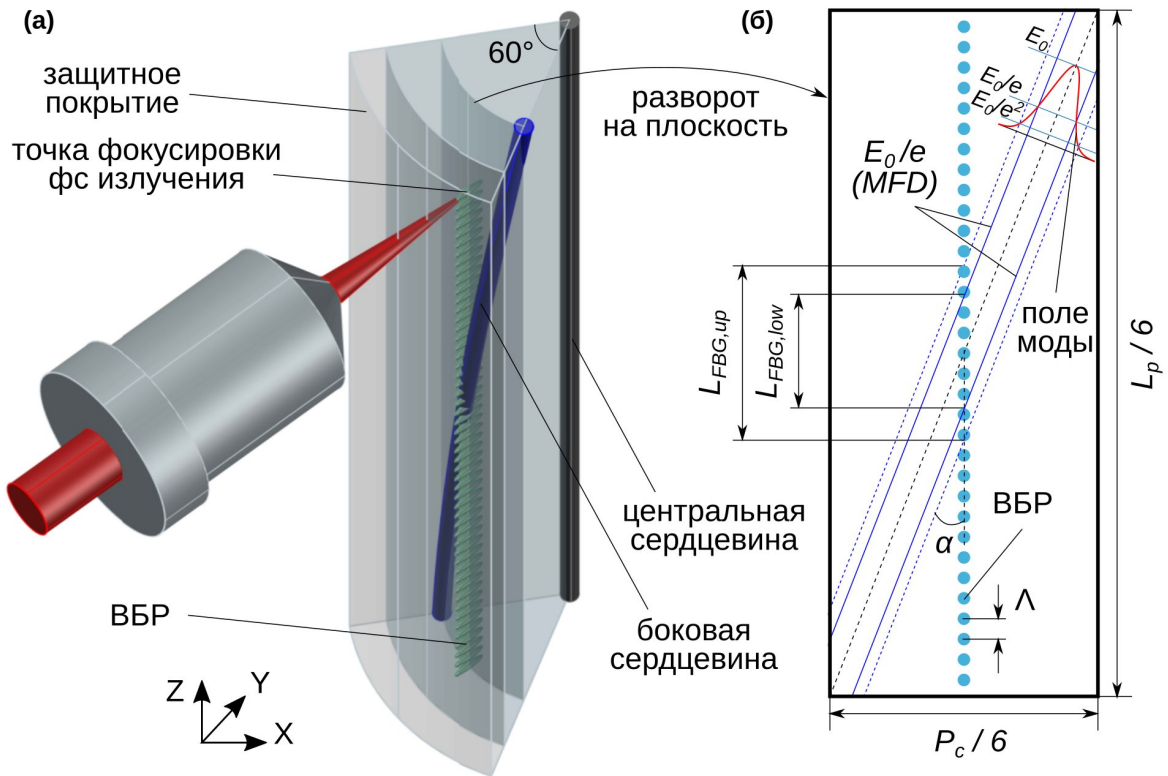


Рисунок 3.10 — (а) Схематичное представление процесса записи одиночной ВБР в закрученной боковой сердцевине МВС. (б) Цилиндрическая поверхность участка МВС с записанной ВБР развернутая на плоскость.

Зная длину сердцевин в ограниченном сегменте ВС ( $L_p/6 = 2.567$  мм) и зная диаметр поля моды сердцевин МВС (MFD= 6.3 мкм), можно оценить область, на которой реализуется взаимодействие поля моды с записанной структурой ВБР. Если считать, что поле взаимодействует со структурой ВБР только в пределах MFD (уровень эл. поля  $E > E_0/e$ ), то можно получить нижнюю оценку длины ВБР  $L_{FBG,low} = MFD/\sin(\alpha) = 441$  мкм. В действительности взаимодействие ВБР с полем моды простирается на большую область чем MFD. Так, считая что поле моды взаимодействует со структурой ВБР в пределах уровня поля ( $E > E_0/e^2$ ), можно получить верхнюю оценку длины ВБР  $L_{FBG,up} = 622$  мкм.

В общем случае, несколько боковых сердцевин МВС могут быть модифицированы в процессе однократной процедуры записи. Действительно, при длине трека ВБР, равному периоду вращения боковой сердцевин будет осуществляться последовательная модификация каждой из боковых сердцевин. Кроме того, управляя скоростью движения МВС, а также состоянием затвора фс лазера, можно установить период и резонансную длину волны ВБР для



каждой сердцевинки в отдельности, как показано на Рис. 3.11. Далее будет показано, что описанный метод позволяет создавать массивы ВБР с различной пространственной структурой в 7-сердцевинном ВС с закрученными по спирали боковыми сердцевинками.

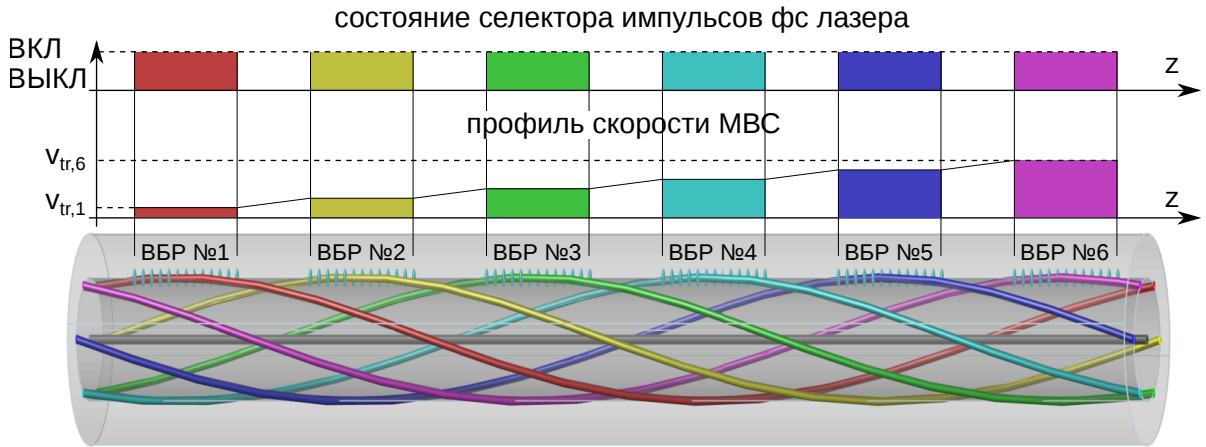


Рисунок 3.11 — Диаграмма состояний затвора фс лазера и профиля скорости МВС при записи продольного массива ВБР в боковых сердцевинах.

### 3.2.2 Однопроходная запись массива ВБР в 7-сердцевинном волоконном световоде с закрученными боковыми сердцевинами

В нашем случае для записи ВБР был выбран 2-й порядок резонанса, при котором для резонансной длины волны  $\lambda_{\text{FBG}} \approx 1550$  нм период структуры  $\Lambda_{\text{FBG}} \approx 1.07$  мкм. Сначала при выбранном значении энергии  $E_p = 200$  нДж был записан непрерывный трек ВБР. Далее в области записи был выполнен скол МВС под прямым углом и с помощью оптического микроскопа произведена съемка торца. Из полученной микрофотографии (Рис. 3.12) видно, что область модификации показателя преломления находится точно в области вращения боковых сердцевин. Сама модификация имеет форму эллипсоида длиной  $h = 13$  мкм и шириной  $w = 1$  мкм. Продольная неоднородность модификации, а именно, более контрастная центральная область, может быть связана с возникновением микропустоты [77], что является отличительной чертой ВБР Типа II.

Для проверки повторяемости режима записи для разных боковых сердцевин был записан образец продольного массива ВБР длиной  $L_p$ , что соответствовало полному витку периферийных сердцевин, а следовательно, последова-

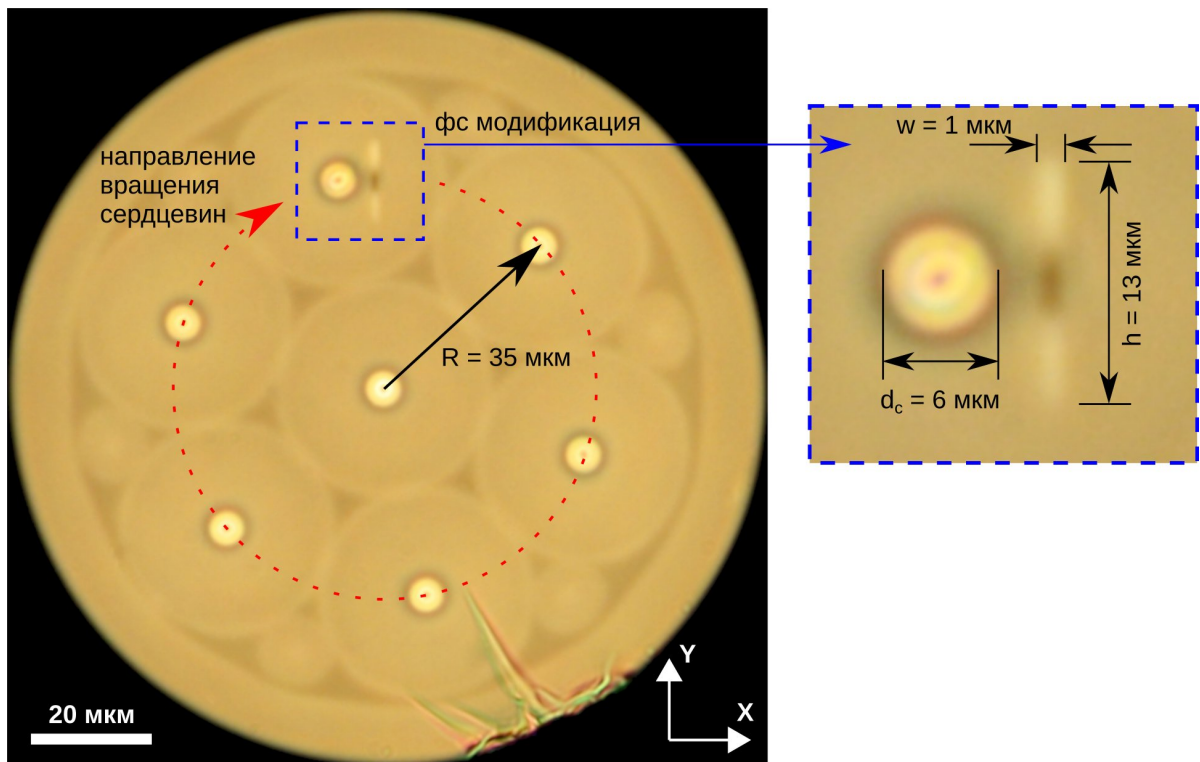


Рисунок 3.12 — Микрофотография скола МВС с закрученными боковыми сердцевинами в области записи трека ВБР.

тельной записи в них периодической структуры. Во время записи точка фокусировки фс пучка находилась в фиксированном положении, период структуры оставался постоянным и был равен  $\Lambda = 1.07$  мкм, что соответствовало резонансной длине волны  $\lambda = 1552.4$  нм. Для созданного образца были измерены спектры отражения каждой из сердцевин (Рис. 3.13а) с использованием схемы, приведенной на Рис. 3.3. Как видно из спектров коэффициент отражения варьировался в пределах от  $-3.7$  до  $-1.1$  дБ (43–78%), а центральная длина волны от 1552.05 до 1552.8 нм, ширина резонанса на полувысоте от 2.2 до 2.95 нм, коэффициент подавления боковых пиков (SLSR) от 12.8 до 14.9 дБ. Различие в параметрах может быть обусловлено неидеальностью геометрии МВС (ошибке позиционирования сердцевин), ошибке позиционирования фс модификации по глубине в процессе протяжки, а также отличием в мощности заводимых в сердцевину сигналов, что обусловлено небольшой вариацией потерь на каждом измерительном канале устройства ввода/вывода. Отсутствие сигнала отражения в центральной сердцевине 4 указывает на селективность записи ВБР и на отсутствие перекрестной связи с другими сердцевинами, содержащими ВБР. Спектр пропускания, измеренный для ВБР в периферийной сердцевине 1 (Рис. 3.13б), показывает, что вблизи брэгговского резонанса уровни потерь в



коротковолновой и длинноволновой области отличаются. Известно, что потери в коротковолновой области возникают из-за связи между модой сердцевины и модами оболочки ВС, тогда как потери в длинноволновой области связаны с широкополосными потерями, возникающими из-за дифракционного рассеяния на фотоиндуцированных неоднородностях в области записи ВБР [87].

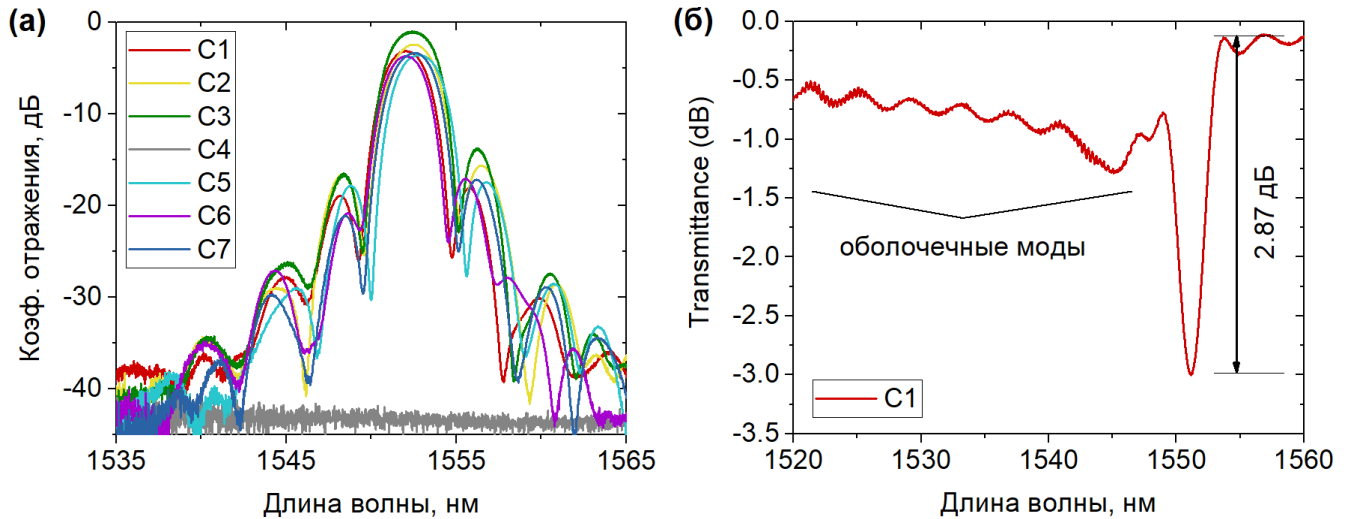


Рисунок 3.13 — (а) Спектры отражения продольного массива ВБР с фиксированным периодом ( $\Lambda = 1.07$  мкм), записанного за один проход в разных периферийных сердцевинах ВС с закрученными боковыми сердцевинами. (б) Спектр пропускания, измеренный для ВБР, записанной в сердцевине **1**.

В следующем эксперименте при записи продольного массива ВБР в боковых сердцевинах МВС для каждой отдельной ВБР задавалась своя резонансная длина волны. Для этого после записи очередной ВБР затвор фс лазера закрывался, а скорость движения ВС изменялась, как это показано на Рис. 3.11. Начальный период ВБР был  $\Lambda_1 = 1.091$  мкм, конечный  $\Lambda_6 = 1.056$  мкм, шаг изменения периода  $\Delta\Lambda = 0.07$  мкм, что соответствовало изменению резонансной длины волны на  $\Delta\lambda \approx 10$  нм. Спектры отражения, измеренные для полученного массива, приведены на Рис. 3.14.

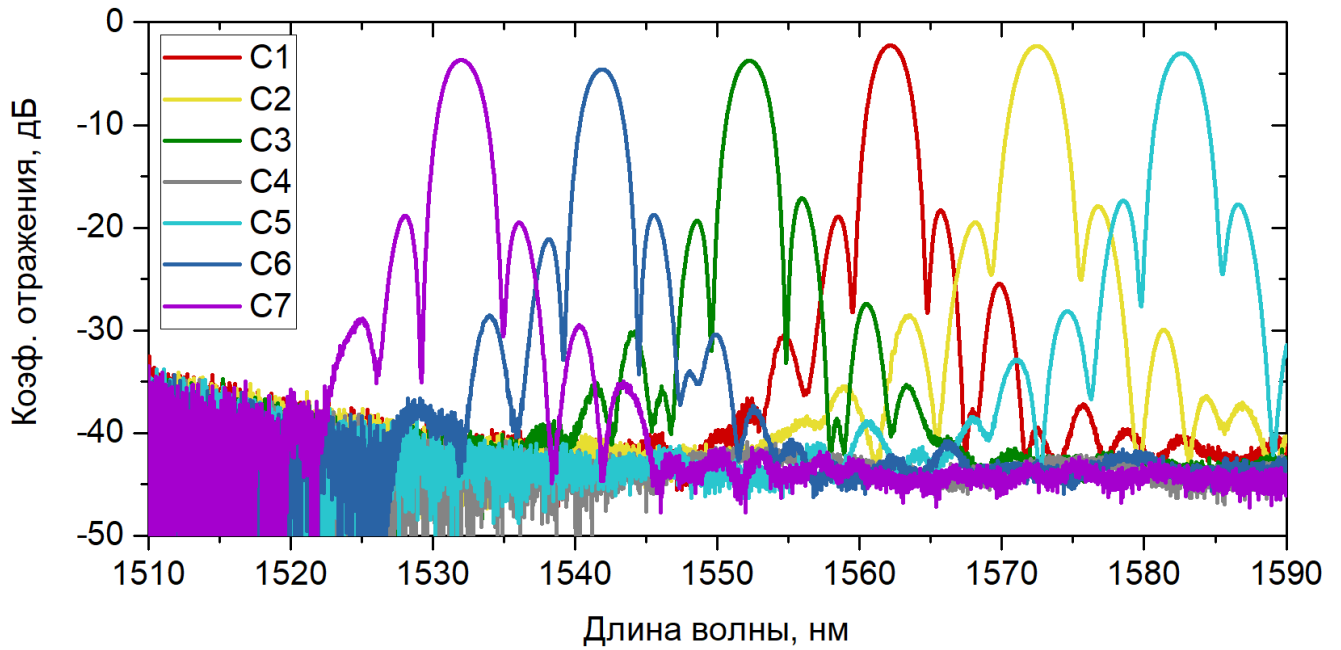


Рисунок 3.14 — Спектры отражения продольного массива ВБР с переменным периодом ( $\Lambda = \Lambda_1 \dots \Lambda_6$ ), записанного за один проход в разных боковых сердцевинах 7-сердцевинного ВС с закрученными боковыми сердцевинами.

### 3.2.3 Запись массива ВБР в выбранной сердцевине 7-сердцевинного волоконного световода с закрученными боковыми сердцевинами

Для того, чтобы показать возможность последовательной модификации одной выбранной сердцевины, центральной или боковой, был проделан следующий эксперимент. Сначала запись продольного массива ВБР производилась в центральной сердцевине. Поскольку данная сердцевина не подвержена кручению, в ней записывались однородные ВБР с длиной  $L_{\text{FBG}} = 1$  мм и периодами  $\Lambda_1 = 1.084$  мкм,  $\Lambda_2 = 1.07$  мкм и  $\Lambda_3 = 1.056$  мкм. Для этого точка фокусировки  $f_s$  лазерного пучка смещалась в область сердцевины, а ориентация МВС устанавливалась таким образом, чтобы в процессе записи лазерное излучение не пересекало боковые сердцевин. Это обусловлено тем, что материал сердцевин, который имеет высокую концентрацию германия, может частично поглощать проходящее через сердцевину лазерное излучение и тем самым влиять на значение энергии в области фокусировки. Энергия лазерных импульсов оставалась той же, что и в предыдущих экспериментах  $E_p = 200$  нДж. Измерение спектров отражения массива производилось со стороны коротковолновой ВБР после за-

писи очередной ВБР в массиве (Рис. 3.15). Это позволило оценить вносимые ВБР внерезонансные потери. Как видно из рисунка, коэффициент отражения для самой дальней ВБР в массиве (№3) уменьшился на 0.88 дБ. Такое ослабление сигнала отражения соответствуют суммарным потерям, которые сигнал испытывает при прохождении ВБР №1–2 туда и обратно. Таким образом, потери на рассеяние, которые вносит запись одной ВБР, в данном эксперименте составили 0.22 дБ/ВБР (4.9%).

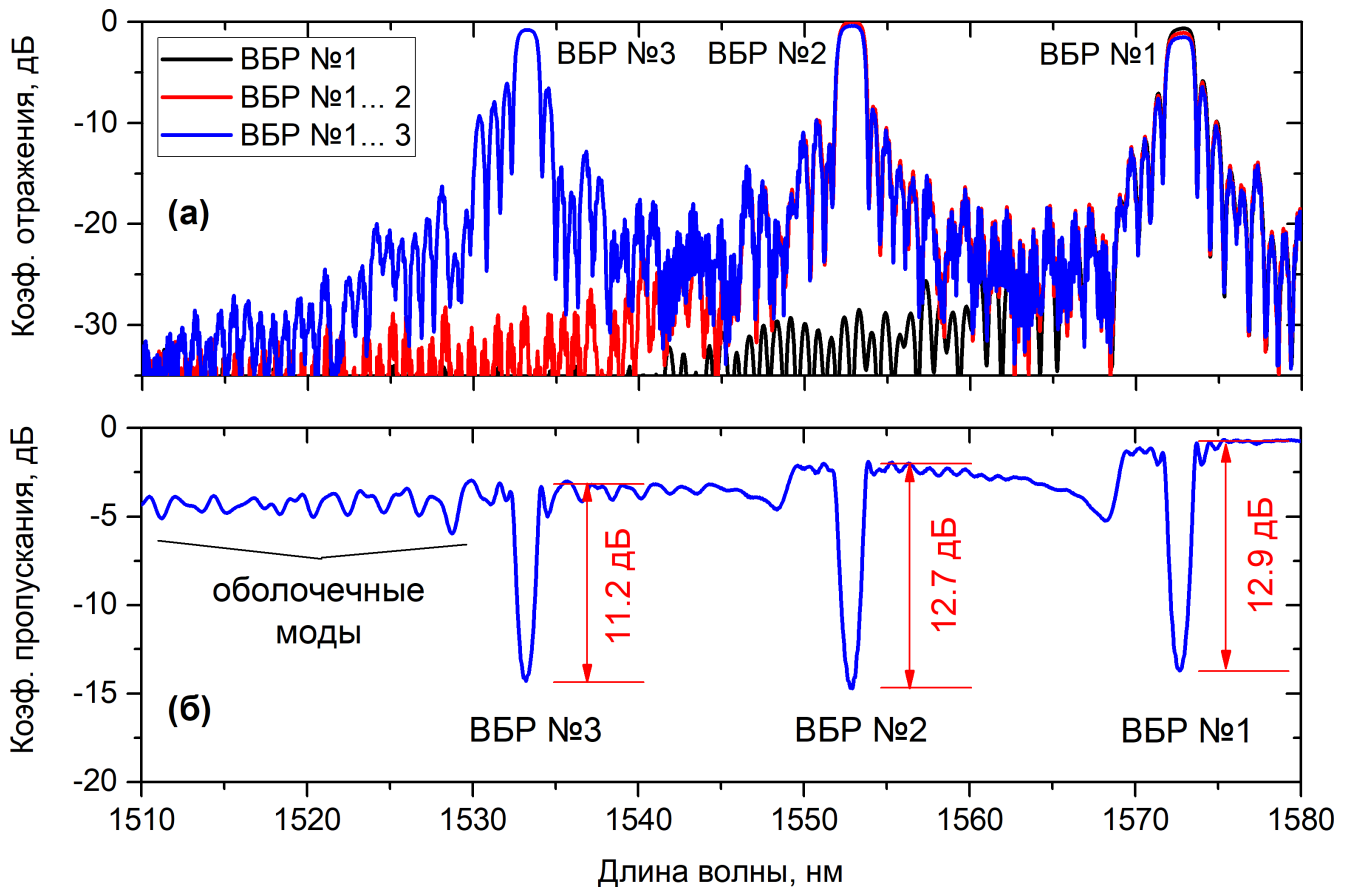


Рисунок 3.15 — Спектры отражения (а) и пропускания (б) продольного массива ВБР, записанного в центральной сердцевине 7-сердцевинного ВС с закрученными боковыми сердцевинами.

Подобный эксперимент был проделан для боковой сердцевины МВС. В данном случае затвор фс лазера удерживался в закрытом состоянии для “пропуска” сердцевин, в которых запись не требуется, и в открытом состоянии, чтобы записать ВБР в желаемую сердцевину. Измерение спектра отражения созданного массива производилось со стороны коротковолновой ВБР после записи очередной ВБР в массиве (Рис.3.16). Как видно из рисунка, в процессе записи коэффициент отражения для самой дальней ВБР в массиве уменьшился на 1.27 дБ. Эти потери соответствуют суммарным потерям, которые

сигнал испытывает при прохождении ВБР №1–5 туда и обратно. Таким образом, потери на рассеяние, которые вносит запись одной ВБР, составляют 0.127 дБ/ВБР (2.88%). Хотя величина внерезонансных потерь существенна по сравнению с ВБР созданными по УФ технологии, она может быть снижена до значений  $<1\%$ /ВБР за счет дальнейшей оптимизации режима записи [67]. Использование опросного оборудования с широким динамическим диапазоном ( $>40$  дБ) также может позволить значительно увеличить число ВБР в сердцевине (опросном канале).

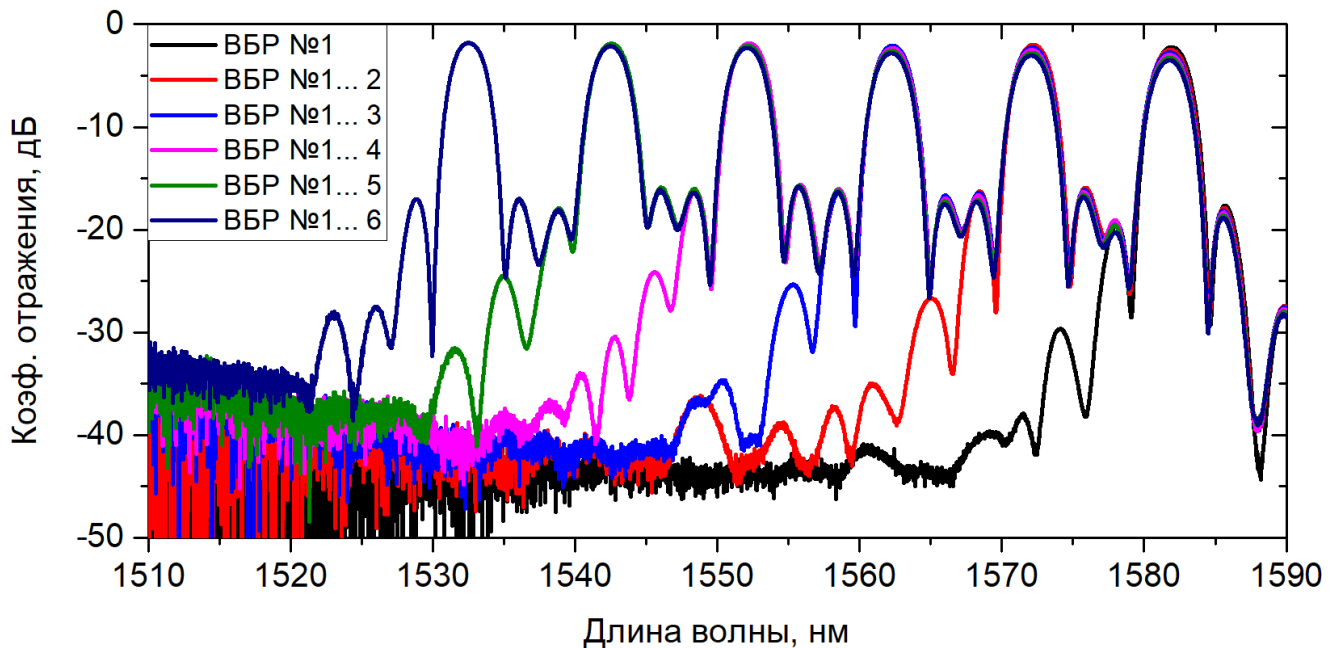


Рисунок 3.16 — Спектры отражения продольного массива ВБР, записанного в выбранной боковой сердцевине 7-сердцевинного ВС с закрученными боковыми сердцевинами.

### 3.2.4 Точечная запись массива ВБР в 7-сердцевинном волоконном световоде с закрученными боковыми сердцевинами

Возможность модификации выбранных сердцевин МВС, которая достигается при фс поточечной записи, может использоваться для создания массивов ВБР в поперечном сечении ВС. Такие массивы, благодаря спектральной чувствительности к направлению и величине изгиба, являются ключевым элементом трехмерного векторного датчика формы/изгиба. Когда каждая ВБР в

массиве значительно отстроена от другой в спектральной области, массив может быть использован в измерительных системах с разделением по длине волны и опрашиваться через один оптический канал.

Для реализации схемы, изображенной на Рис. 3.4, на выбранном участке МВС был записан массив, состоящий из четырех ВБР совмещенных друг с другом в продольном направлении. Запись осуществлялась в центральной (4) и трех в периферийных сердцевинах (7, 2, 3), как это показано на Рис. 3.4. Резонансные длины ВБР были  $\lambda_4 = 1522.7$  нм,  $\lambda_7 = 1542$  нм,  $\lambda_2 = 1562.4$  нм и  $\lambda_3 = 1582.1$  нм соответственно. После записи очередной ВБР в боковой сердцевине, производился возврат в продольную точку, в которой начиналась запись, а МВС поворачивался вокруг своей оси на угол  $120^\circ$ . Для этого использовался специализированный зажим с угловой степенью свободы, установленный на линейном трансляторе Aerotech ABL1000. Спектр отражения созданного массива, измеренный для выпрямленного участка МВС с помощью схемы, изображенной на Рис. 3.4, приведен на Рис. 3.17а.

Далее, содержащий массив участок МВС был намотан виток к витку на цилиндрические поверхности с радиусами  $R_1 = 3.75$  мм и  $R_2 = 7.15$  мм так, чтобы область с записанными ВБР оказалась в середине намотки. Полученные спектры показаны на Рис. 3.17б–в синим и красным цветами соответственно. Как можно видеть из рисунка, для боковых сердцевин происходит значительное смещение резонансных пиков ВБР на максимальную величину  $\Delta\lambda_2 \approx 5.5$  нм для  $R_2 = 7.15$  мм и  $\Delta\lambda_2 \approx 9.85$  нм для  $R_1 = 3.75$  мм. Знак величины смещения свидетельствует о характере деформации ВБР: положительное смещение соответствует растяжению, отрицательное – сжатию. В то же время амплитуда смещения свидетельствует об удаленности ВБР от нейтральной плоскости изгиба, поскольку чем больше данная величина, тем больше деформация ВБР и, следовательно, сдвиг резонансной длины волны ВБР.

Для определения величины изгибной деформации по спектральным сдвигам резонансных длин волн ВБР был использован метод, описанный в [131]. В данном методе величина относительного продольного растяжения/сжатия в  $i$ -й сердцевине  $\Delta l_i/l = \varepsilon_i$ , вызванная изгибом МВС, связана с вектором парциальной кривизны  $\mathbf{k}_i$  для этой сердцевины. Этот вектор указывает из центра МВС в направлении центра  $i$ -й сердцевины (или в противоположном направлении, в зависимости от знака  $\varepsilon_i$ ) и имеет длину, пропорциональную величине дефор-

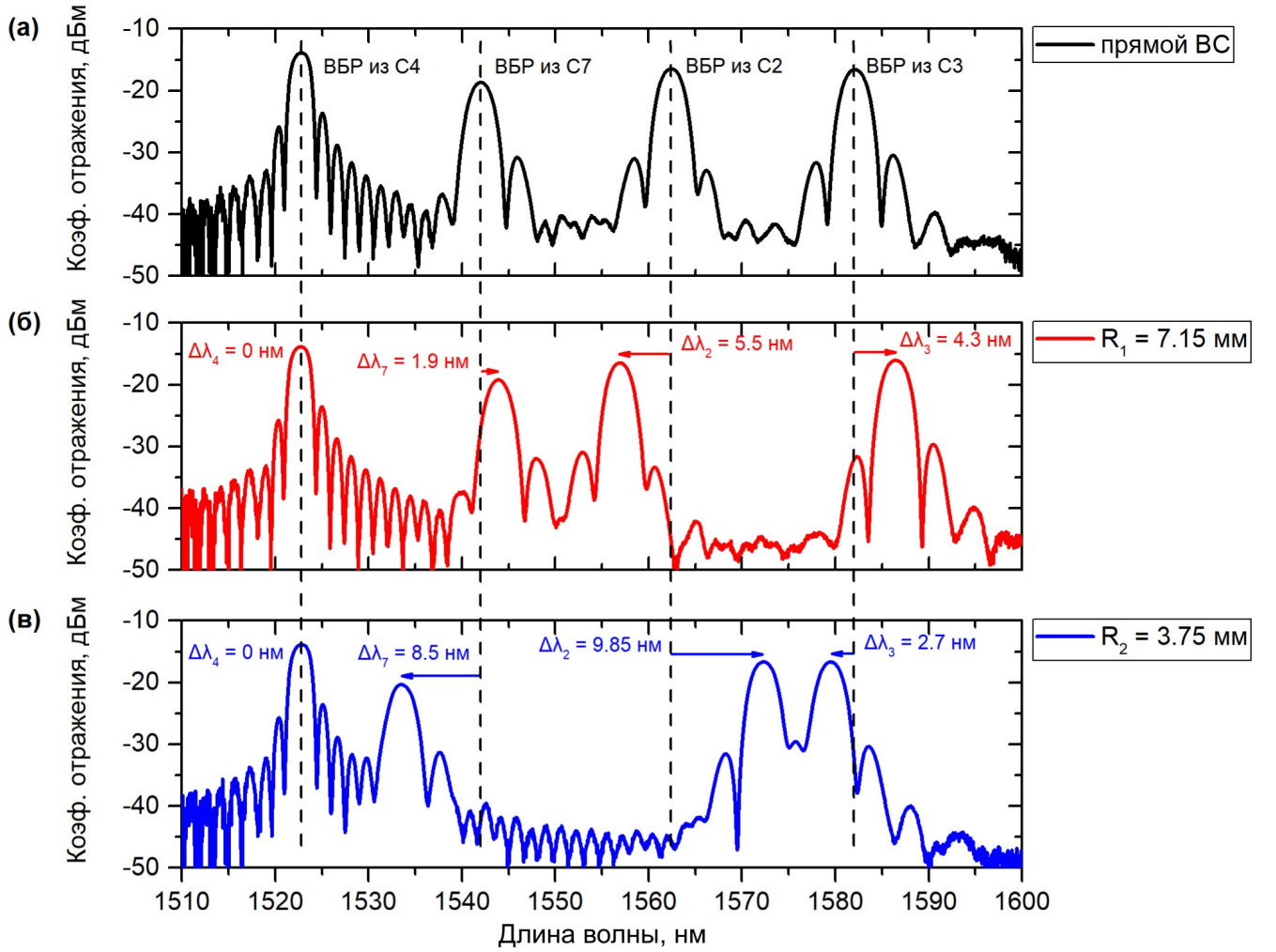


Рисунок 3.17 — Спектры отражения поперечного массива ВБР, записанного в центральной (4) и трех боковых (7, 2, 3) сердцевинах 7-сердцевинного ВС с закрученными боковыми сердцевинами. Измерение производилось в случае выпрямленного участка МВС (а) и в случае намотки МВС на цилиндр с радиусом  $R_1 = 7.15$  мм (б) и  $R_2 = 3.75$  мм (в).

мации. Суммирование векторов  $\mathbf{k}_i$  дает общий вектор кривизны МВС в точке измерения:

$$\mathbf{k} = -\frac{1}{r} \left( \sum_{i=2,3,7} \varepsilon_i \cos \theta_i \mathbf{n}_x + \sum_{i=2,3,7} \varepsilon_i \sin \theta_i \mathbf{n}_y \right), \quad (3.1)$$

где  $\mathbf{n}_x$  и  $\mathbf{n}_y$  — единичные векторы в направлении координат  $x$  и  $y$  соответственно,  $r$  — расстояние между сердцевинами,  $\theta_i$  — угол между  $i$ -й сердцевиной и осью  $x$  (Рис. 3.18). Отсюда радиус кривизны может быть записан как  $R = N/2|\mathbf{k}|$ , а угол направления изгиба как  $\theta = \angle(\mathbf{k}, \mathbf{n}_x)$ .

Для спектров ВБР, измеренных в случае радиуса изгиба  $R_2 = 7.15$  мм (Рис. 3.17б), были посчитаны коэффициенты чувствительности ВБР к дефор-

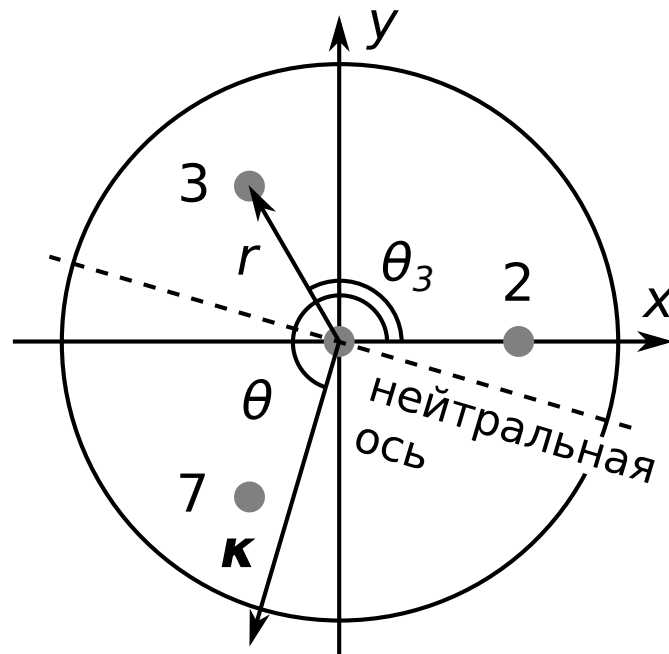


Рисунок 3.18 — Геометрия сечения МВС и параметры для расчета величины изгибной деформации.

мации  $\Delta\lambda_i/\varepsilon_i$ , усредненное значение которых оказалось равным 1.2 пм/микрострейн. Полученный коэффициент примерно равен типичному значению коэффициента чувствительности ВБР для германосиликатных ВС  $\approx 1$  пм/микрострейн в области длин волн 1.55 мкм. Используя коэффициент мы рассчитали радиус кривизны для случая намотки МВС на цилиндрическую поверхность с радиусом  $R_2 = 3.75$  мм, который оказался равен  $R_{2,calc} = 3.86$  мм. Таким образом, погрешность измерения радиуса кривизны составила 3%. Данная ошибка может быть связана с некоторым ослаблением петли МВС после намотки, которое могло привести к увеличению радиуса. Заметим, что амплитуды резонансных пиков ВБР в массиве остаются практически неизменным даже при существенно малом радиусе изгиба  $R_2 = 3.75$  мм, что свидетельствует о низких изгибных потерях созданного датчика.

### 3.3 Выводы по Главе 3

Таким образом, в Главе был продемонстрирован новый универсальный способ записи ВБР в 7-сердцевинных ВС с прямыми и закрученными по спирали сердцевинами с помощью фс поточечного метода. В случае МВС с прямы-



ми сердцевинами было показано, что массив ВБР может быть записан как в центральной, так и выбранной боковой сердцевине световода. Более того, для создаваемых структур могут быть заданы как поперечный, так и продольный профили модуляции показателя преломления, что было продемонстрировано на примере записи аподизированной и чирпированной ВБР. Показано, что спектры отражения ВБР, записанных в боковой сердцевине световода, не подвергаются значительным искажениям при радиусах изгиба 32.5 мм. В случае МВС с закрученными по спирали сердцевинами было показано, что массив ВБР в выбранной сердцевине может быть записан за одну итерацию. На основе точечного массива ВБР в 7-сердцевинном ВС с закрученными по спирали сердцевинами был продемонстрирован векторный датчик изгиба, позволяющий измерять радиус кривизны и направление изгиба с помощью одноканальной схемы опроса. При этом погрешность измерения радиуса кривизны составила 3%. Полученные результаты открывают возможность разработки компактных многопараметрических датчиков физических величин и гибких датчиков формы для микроробототехники, в частности, для малоинвазивных хирургических инструментов.



## Глава 4. Запись ВБР в многомодовом волоконном световоде с градиентным профилем показателя преломления и ВКР лазер на их основе

В отличие от широко используемых одномодовых волоконных световодов (ВС), с диаметром сердцевины, как правило, не превосходящим 10 мкм, многомодовые (ММ) могут иметь диаметр сердцевины  $\sim 100$  мкм. При этом профиль показателя преломления сердцевины ММ ВС может быть как ступенчатым, так и градиентным. В зависимости от диаметра, профиля показателя преломления и длины волны такие ВС могут поддерживать распространение большого количества поперечных мод, число которых может достигать десятки тысяч. Особенности распространения оптического излучения по таким ВС приводятся в работах [132; 133].

В настоящее время многомодовые ВС являются темой исследований в таких областях как оптические линии связи с высокой пропускной способностью [114], мощные волоконные лазеры с улучшенными выходными характеристиками [20], высокотемпературные оптические измерения (до 1500 °С для сапфировых волоконных световодов) [3], изучение механизмов нелинейного распространения лазерного излучения по таким волноводам [134].

Для записи структур показателя преломления в многомодовых ВС широко применяется технология экспозиции фоточувствительной сердцевины УФ лазерным излучением [135; 136]. В таком случае модификация показателя преломления происходит во всей фоточувствительной области материала, а её локализация в объеме и, в частности, в поперечном сечении сердцевины, не может быть достигнута. Данное ограничение может быть преодолено за счет использования технологии фемтосекундной (фс) записи [6]. Точное позиционирование модификации в продольном и поперечном сечении ММ ВС позволяет создавать структуры показателя преломления, такие как волоконные брэгговские решетки (ВБР), в заданном объеме сердцевины ММ ВС, что может быть использовано для пространственного и спектрального селективного распространения поперечных мод в данном типе световода.

В данной Главе приводятся результаты исследования по поточечной записи ВБР в многомодовом волоконном световоде с градиентным профилем показателя преломления с помощью ИК фс лазерных импульсов. В частности,

проводится запись образцов ВБР в центральной части ММ ВС при разных величинах энергии фс лазерных импульсов. Кроме этого, исследуется возможность селектирования высших мод с помощью ВБР, записанных при поперечном сдвиге области модификации относительно центра сердцевины. Для созданных образцов ВБР исследуются особенности спектральных характеристик, а также с помощью оптического микроскопа производится визуализация.

Также в Главе исследуется возможность селектирования основной поперечной моды в ВКР-лазере на основе градиентного ММ ВС с прямой диодной накачкой. Для этого в качестве выходного зеркала используется образец слабоотражающей фс поточечной ВБР. Показано, что в такой конфигурации при ваттных уровнях выходной мощности качество пучка может быть существенно улучшено по сравнению с другими работами по ВКР-лазерам с прямой диодной накачкой, вплоть до селектирования основной поперечной моды.

Изложенные в данной Главе результаты опубликованы в работах [19;23] и представлены на конференциях [26;31]. Способ селектирования поперечных мод многомодового волоконного лазера зарегистрирован в качестве патента [137].

#### 4.1 Запись ВБР в многомодовом волоконном световоде с параболическим профилем показателя преломления $\phi$ с лазерными импульсами

Как и в случае с одномодовыми ВС, запись структур показателя преломления производилась на установке, представленной на Рис. 2.5, с модифицированным узлом записи/наблюдения (Рис. 3.1), что позволяло контролировать положение области фокусировки  $\phi$ с импульсов по двум поперечным координатам. Градиентный ММ ВС Corning 62.5/125, для которого производились эксперименты, имел диаметр сердцевины 62.5 мкм, диаметр стеклянной оболочки 125 мкм, числовую апертуру  $NA = 0.275$  и акрилатную оболочку диаметром  $245 \pm 5$  мкм. Ввиду того, что оболочка имела более высокую шероховатость, а также допускала концентричность сердцевины до 12 мкм, перед записью она удалялась для минимизации ошибок позиционирования ВБР. Таким образом, запись ВБР производилась в зачищенном ММ ВС через феррулу с диаметром внутреннего канала 127 мкм.

Сначала запись ВБР производилась при фокусировке  $\phi$ с лазерного пучка в центральную часть сердцевины при относительно большой энергии импульсов  $E_p = 300$  нДж. Длина образца ВБР составила 5.26 мм, период  $\Lambda_{\text{FBG}} = 0.526$  мкм, что соответствует первому порядку отражения вблизи длины волны 1550 нм. На Рис. 4.1 приведена микрофотография скола многомодового ММ ВС в области записи ВБР. Как видно из рисунка, размер области модификации вдоль направления распространения  $\phi$ с импульсов составил  $\approx 30$  мкм, что обеспечивало перекрытие модификации сразу с несколькими группами поперечных мод.

Для измерения спектральных характеристик образца использовалась схема, приведенная на Рис. 4.2а. Особенностью схемы является использование одномодовых компонент, с помощью которых оптический сигнал заводился на вход ММ ВС. Отрезок ММ ВС, в котором производилась запись ВБР, имел длину  $\sim 10$ –15 см. При измерении спектров данный участок выпрямлялся, что позволяло избежать межмодовой перекачки мощности. В качестве широкополосного источника оптического сигнала выступал суперлюминесцентный диод Thorlabs SLD1550S-A2, излучение от которого заводилось на одномодовый циркулятор. Пройдя через циркулятор, сигнал попадал в многомодовый ВС, со-

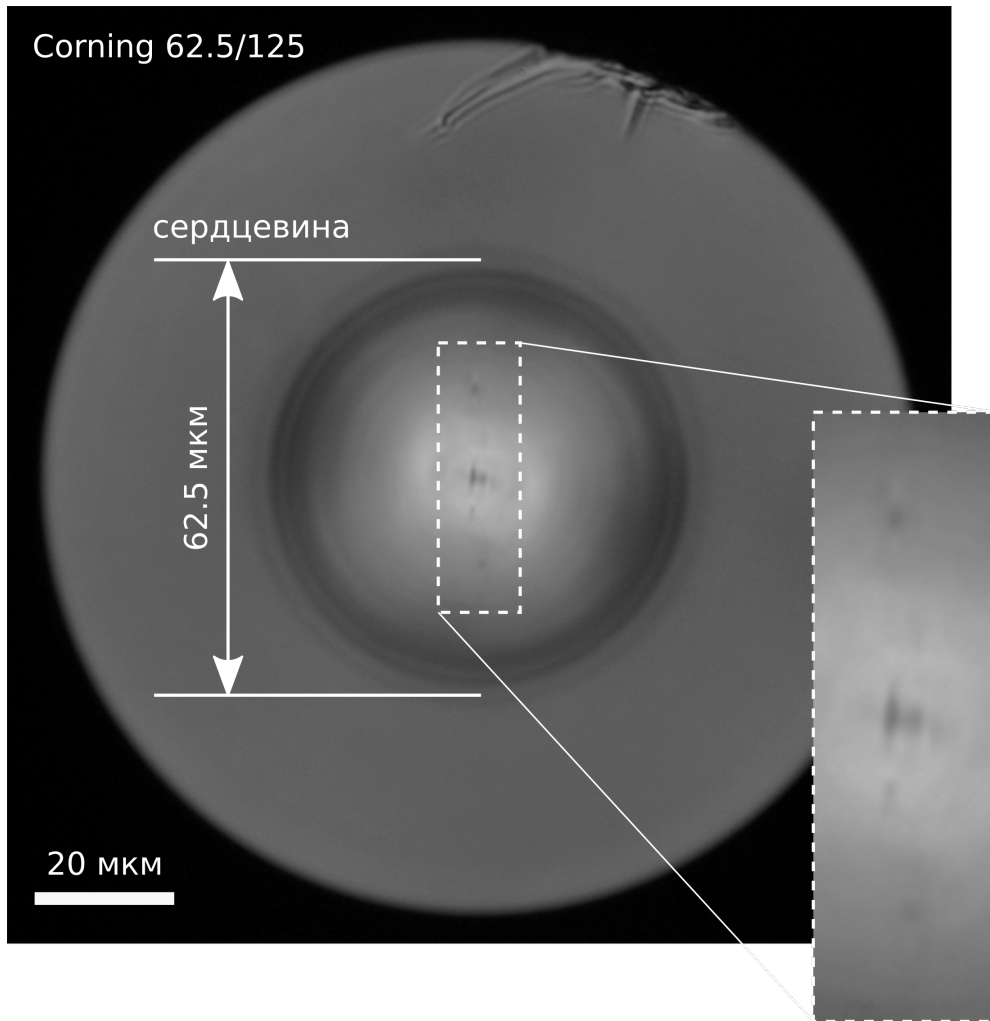


Рисунок 4.1 — Микрофотография скела многомодового ВС в области записи ВБР.

держаций ВБР. При сварке одномодового и ММ ВС центры сердцевин совмещались. Отраженный и прошедший сигналы регистрировались с помощью оптического спектрального анализатора (ОСА). На Рис. 4.2б приведен спектр отражения образца ВБР, где можно четко различить 4 группы мод, при этом с ростом номера группы заметно уменьшается амплитуда резонансного пика. Это обусловлено тем, что на стыке одномодового и многомодового ВС наибольшая доля мощности оптического сигнала переходит в основную моду  $LP_{01}$  и в меньшей степени распределилась по группам мод с более высоким номером. Доля мощности  $\eta_\mu$  для каждой из мод ММ ВС может быть рассчитана через интеграл перекрытия между модой одномодового ВС  $E_{SM}(\rho, \varphi)$  (Corning SMF-28e+) и ММ ВС  $E_{MM,\mu}(\rho, \varphi)$  (Corning 62.5/125):

$$\eta_\mu = \frac{\iint E_{SM}(\rho, \varphi) E_{MM,\mu}(\rho, \varphi) \rho d\rho d\varphi}{\sqrt{\iint |E_{SM}(\rho, \varphi)|^2 \rho d\rho d\varphi} \sqrt{\iint |E_{MM,\mu}(\rho, \varphi)|^2 \rho d\rho d\varphi}} \quad (4.1)$$

Следует отметить, что вычисление интеграла перекрытия может дать только приближенные значения. В действительности на его величину может значительно влиять режим и качество сварки, так как при этом происходит взаимная диффузия между ВС, вследствие чего может происходить деформация поля мода моды в области сварки.

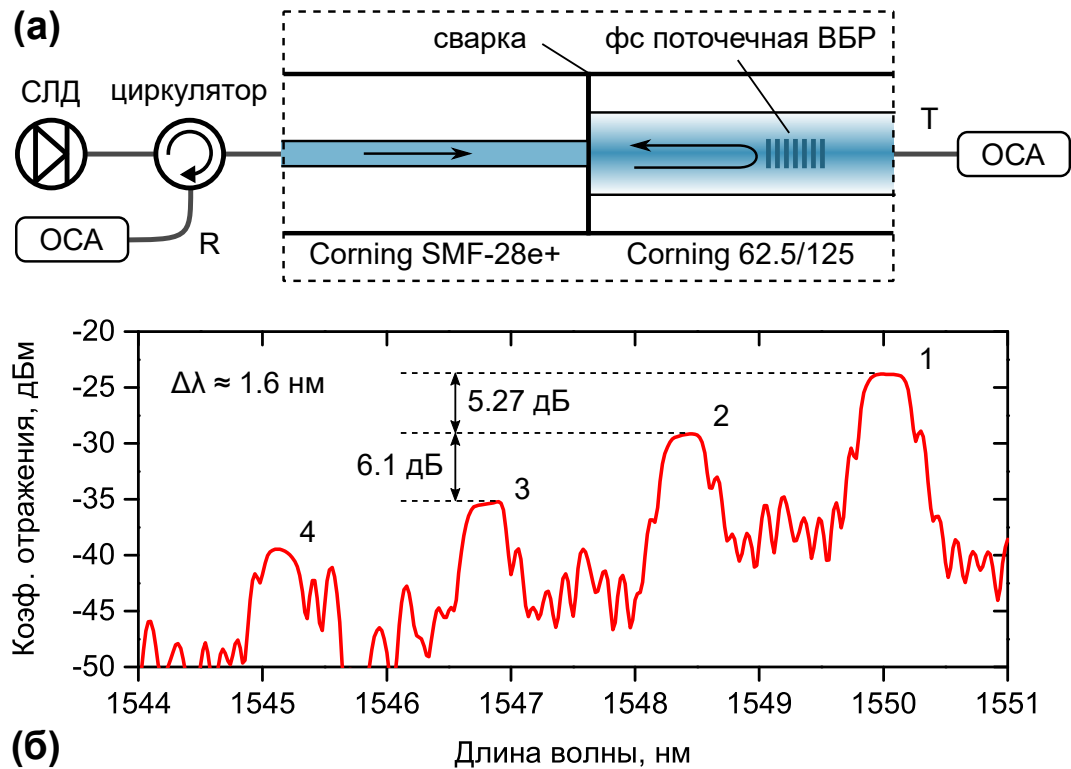


Рисунок 4.2 — Спектр отражения ВБР, записанной в многомодовом ВС с градиентным профилем показателя преломления.

Измерение спектра пропускания для записанного образца ВБР (Рис. 4.3а-б) показывает, что для всех девяти видимых групп мод (длины волн 1537–1551 нм) резонансные провалы имеют амплитуду 10.5–17 дБ, что свидетельствует об эффективном перекрытии поля этих групп мод со структурой ВБР. Также можно заметить, что по мере роста номера группы также происходит усиление межмодового взаимодействия, о чем свидетельствует рост промежуточных резонансов. Резонансы, расположенные в коротковолновой области ( $<1537$  нм), обусловлены возникновением связи между сердцевинными и оболочечными модами ВС. Так, при измерении спектра пропускания для решетки, погруженной в иммерсионную жидкость, резонансы исчезают (Рис. 4.3б), т.к. для оболочечных мод нарушается условие полного внутреннего отражения, и оптический сигнал выходит из оболочки в окружающую среду.

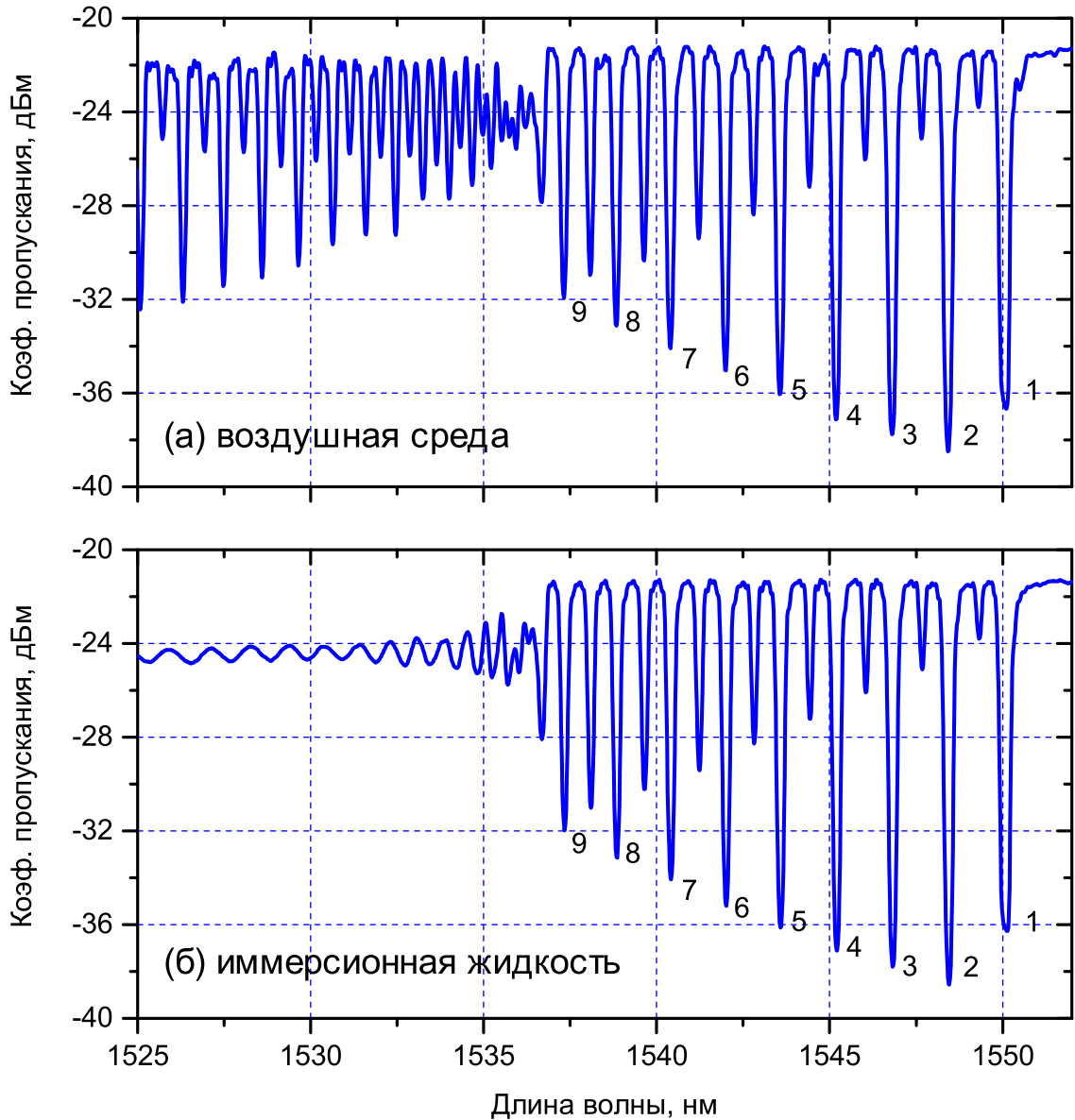


Рисунок 4.3 — Спектры пропускания ВБР, записанной в ММ ВС с градиентным профилем показателя преломления: (а) измерение производилось в воздушной окружающей среде, б) в иммерсионной жидкости (глицерине).

В следующем эксперименте были записаны два массива ВБР в ММ ВС. Первый состоял из трех однородных ВБР длиной 5.26 мм, записанных последовательно друг за другом в центральной части сердцевины. Энергия фс импульсов была снижена до  $E_p = 180$  нДж для уменьшения размера модифицируемой области. Все три ВБР имели разный период и резонансную длину волны, что позволяло спектрально разделить резонансы при измерении сигнала отражения (Рис. 4.5а). Как видно из рисунка, для всех ВБР мода LP<sub>11</sub> (группа 2) имела амплитуду, значительно подавленную относительно резонанса моды LP<sub>01</sub> (группа 1). Разница амплитуд варьировалась от 15.3 до 21.6 дБ, что значительно превышает аналогичную разницу для ВБР, созданной при более высокой энергии фс импульсов (Рис. 4.2б). Второй массив состоял из трех однородных ВБР записанных параллельно друг другу. Сначала производилась запись ВБР №1 в центральной части сердцевины при энергии фс импульсов  $E_p = 180$  нДж, затем запись ВБР №2 и ВБР №3 в периферийной части сердцевины при энергии импульсов  $E_p = 270$  нДж. Все ВБР были совмещены по продольной координате, а поперечный отступ вдоль оси  $x$  составил  $\approx 10$  мкм. На Рис. 4.4 приведена микрофотография скола многомодового ВС в области записи данного массива ВБР. Как видно из спектра отражения (Рис. 4.5б), для резонансов, связанных с периферийными ВБР №2–3, бóльшую амплитуду имеет пик, связанный с модой LP<sub>11</sub> (группа 2), несмотря на то что доля мощности оптического сигнала в данной моде значительно меньше, чем для моды LP<sub>01</sub> (группа 1). Это свидетельствует о возможности эффективного спектрального селектирования групп мод, имеющих распределение поля вне центральной части сердцевины ММ ВС.

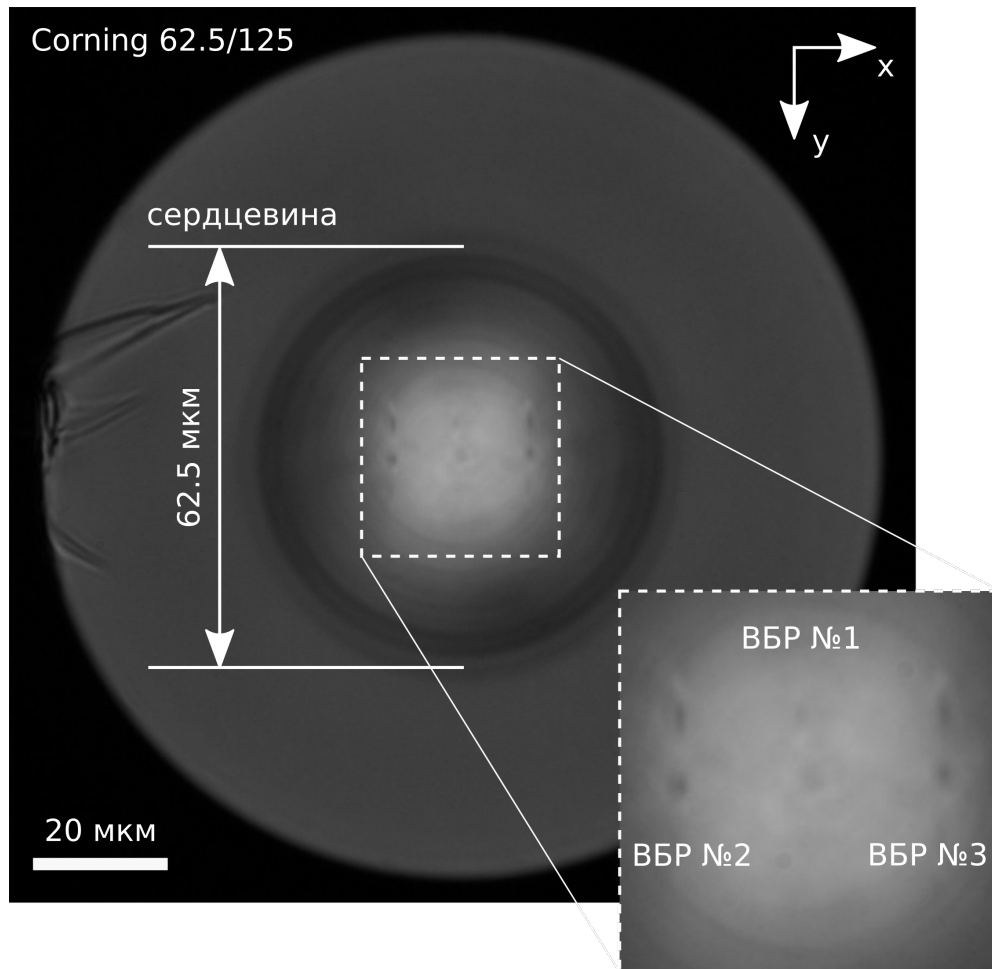


Рисунок 4.4 — Микрофотография скола многомодового ВС в области записи массива ВБР.



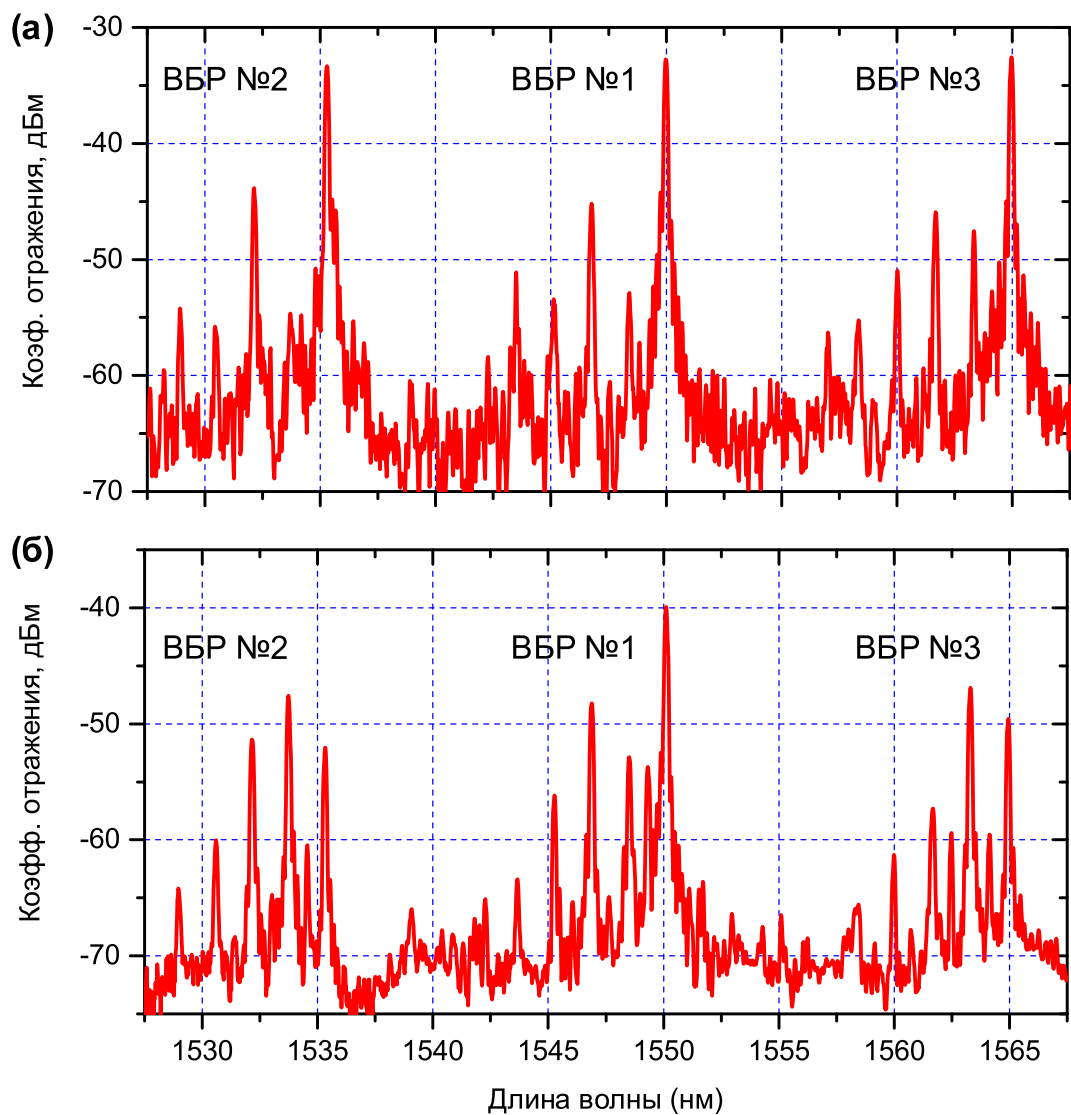


Рисунок 4.5 — Спектры отражения массива ВБР, записанного в ММ ВС с градиентным профилем показателя преломления:

- а) запись производилась в центральной части сердцевины последовательно,  
 б) ВБР №1–3 записаны параллельно, при этом ВБР №1 записана в центральной части сердцевины, а ВБР №2–3 с отступом  $\approx 10$  мкм.

## 4.2 Селектирование основной поперечной моды в волоконном ВКР-лазере с прямой диодной накачкой с помощью фс поточечной ВБР

Волоконные лазеры, работающие на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния света (ВКР-лазеры), перспективны как источники излучения, перестраиваемого в широком диапазоне длин волн. В качестве усиливающей среды ВКР-лазеров обычно используют пассивные одномодовые световоды, а накачка осуществляется в сердцевину световода одномодовыми волоконными лазерами. В отличие от лазеров на редкоземельных элементах с фиксированными спектральными областями, ВКР-лазеры могут работать почти на любой длине волны, отстоящей на величину стоксова сдвига от длины волны накачки, и перестраиваться в пределах широкого контура ВКР-усиления. Для ВКР-лазеров характерен малый квантовый дефект, малое время отклика на индуцированную накачкой усиление, низкий уровень спонтанного излучения, отсутствие эффекта фотопотемнения, являющегося проблемой для волоконных лазеров, генерирующих в области  $\sim 1$  мкм, в частности, иттербиевого (Yb) волоконного лазера [138].

В то же время генерация ВКР-лазеров на длинах волн  $\leq 1$  мкм затруднена из-за отсутствия мощных одномодовых источников накачки в коротковолновой области, например, нижний предел для Yb волоконного лазера составляет 980 нм [138]. Альтернативным подходом может служить накачка ВКР-лазеров напрямую коммерчески доступными ММ лазерными диодами, так как их мощность в диапазоне 915–980 нм уже превышает 100 Вт для одного модуля. Пучок излучения ММ накачки можно эффективно завести в относительно большую сердцевину ММ пассивного световода с градиентным профилем показателя преломления [139].

Схема ВКР-лазера на основе градиентного ММ ВС приведена на Рис. 4.6. Для защиты мощных ММ ЛД аналогично работе [140] использовалась схема заведения излучения с помощью объёмной оптики. Излучение накачки мощного ММ ЛД заводилось в сердцевину световода Corning 62.5/125 с помощью коллимирующих линз Л1–2 с эффективностью  $>70\%$ . В отличие от работы [140], заведенная мощность ММ ЛД на 915 нм была увеличена до  $\approx 60$  Вт, что позво-

лило уменьшить длину градиентного световода до 1.1 км. Селективные зеркала З1–З3 разделяли излучение ВКР-генерации и накачки.

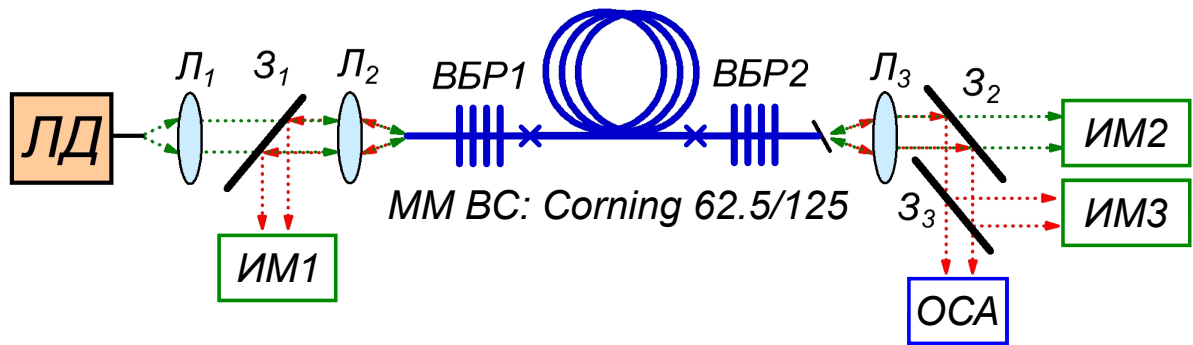


Рисунок 4.6 — Схема ВКР-лазера на основе градиентного ММ ВС.

Линейный резонатор был образован высокоотражающей ВБР1, записанной в интерференционной схеме УФ излучением в сердцевине градиентного световода Corning 62.5/125, и прямым сколом световода, обеспечивающим френелевское отражение  $R_2 \approx 4\%$ . Кроме того, для селективирования основной моды градиентного ММ ВС на выход лазера устанавливалась ВБР2, записанная в центральной области сердцевины излучением фс лазера методом поточечной записи. Для сравнения также использовалась выходная УФ ВБР2. При этом торец выходного световода скалывался под углом более  $10^\circ$  для уменьшения обратной связи, возникающей за счёт френелевского отражения. ВБР, созданная методом фс поточечной записи, имела длину 1.3 мм и период  $\Lambda_{\text{FBG}} = 0.645$  мкм, что соответствовало 2-му порядку отражения на длине волны  $\approx 0.954$  мкм. Коэффициент отражения данной ВБР был оценен как  $R_2 \approx 4\%$ , ширина резонансного спектра для основной моды  $\text{LP}_{01}$  составила  $\Delta\lambda_{\text{FBG},01} = 0.21$  нм. На Рис. 4.7а сплошной и штриховой линиями изображены спектры отражения плотной УФ ВБР1 и выходной фс поточечной ВБР2 соответственно.

Сначала было проведено сравнение спектров генерации ВКР-лазера длиной 2.5 км для нескольких типов выходных зеркал (Рис. 4.8а). В случае использования неселективного по модам френелевского отражения от выходного торца волоконного световода наблюдается генерация относительно однородного спектра шириной  $>1$  нм (штриховая линия). Для выходной УФ ВБР2, использовавшейся также в работе [140], наблюдается трехпиковая структура с расстоянием между пиками  $\approx 0.6$  нм, отвечающая отражению трёх отдельных групп мод градиентного световода с малыми поперечными индексами (штрихпунктирная линия). Компонента на длине волны 954 нм соответствует основной моде, а номер группы увеличивается в коротковолновую сторону. Ширина спектра от-

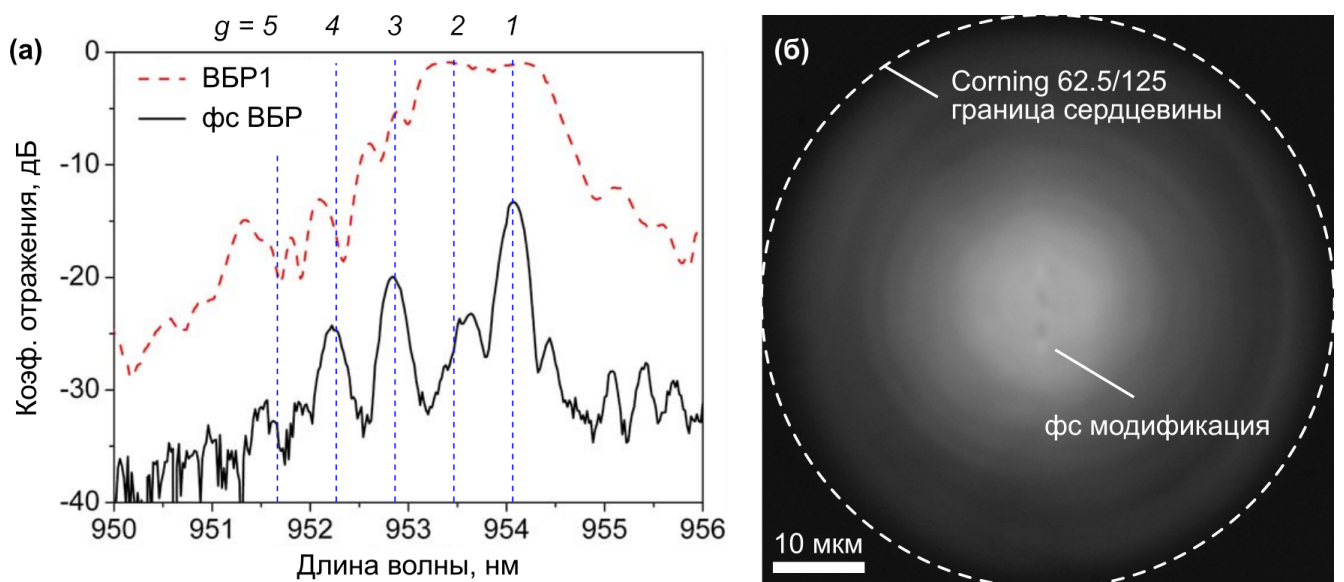


Рисунок 4.7 — (а) Спектры отражения плотной (штриховая линия) УФ ВБР и выходной (сплошная линия) фс поточечной ВБР. (б) Микрофотография скола ММ ВС в области записи выходной ВБР, сделанная для идентичного образца.

ражения для каждой группы мод мала, поэтому спектр генерации различных групп хорошо различается. Для плотной ВБР1 спектр отражения относительно широк, что не позволяет разрешить отдельные резонансы. При установке выходной фс ВБР2 наблюдается двухпиковый спектр генерации с расстоянием между пиками  $\approx 1.2$  нм (сплошная линия). Видно, что вторая группа мод, отстоящая на 0.6 нм от основной на длине волны 953.6 нм, не выходит в генерацию. Можно также отметить, что амплитуда пиков, соответствующих группам мод более высокого порядка, относительно мала. В случае с фс ВБР2 пик на длине волны 953 нм не стабилен по времени и не всегда появляется в спектре генерации.

Как и в работе [140], эффективность генерации заметно падала при установке УФ выходной ВБР вместо отражения от прямого скола. В то же время при установке фс выходной ВБР вместо отражения от прямого скола мощность генерации практически не изменялась, что в сочетании с хорошей модовой селективностью подтверждало перспективность использования данной конфигурации резонатора. В дальнейших экспериментах длина лазера была сокращена до 1.1 км. На Рис. 4.8б показано, что спектр генерации лазера при фиксированной выходной мощности 4.8 Вт незначительно изменяется при уменьшении длины резонатора. Следует отметить, что периодическое появление дополнительного пика на длине волны 953 нм, соответствующего модам более высокого порядка наблюдалось только в лазере длиной 2.5 км. При сокращении длины

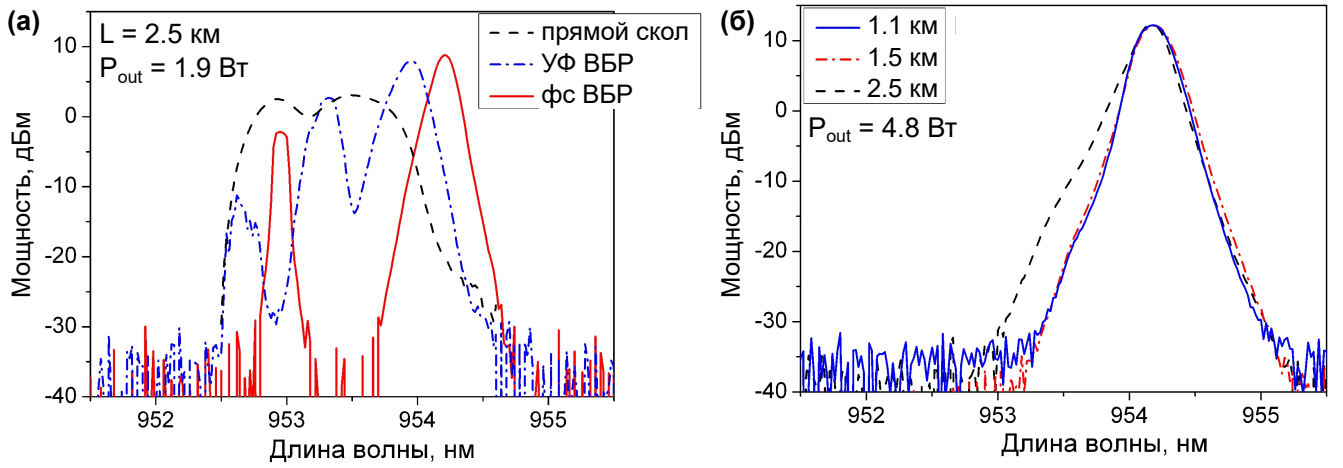


Рисунок 4.8 — Спектр генерации ВКР-лазера длиной 2.5 км при выходной мощности 1.9 Вт для разных типов выходного зеркала: торец сколотого под прямым углом световода и ВБР, записанные с помощью непрерывного УФ или импульсного фс лазеров (штриховая, штрихпунктирная и сплошная линии соответственно). (б) Спектр генерации ВКР-лазера с фс выходной ВБР при мощности генерации 4.8 Вт для длин лазера 2.5, 1.5 и 1.1 км (штриховая, штрихпунктирная и сплошная линии соответственно).

градиентного световода наблюдался стабильный одномодовый режим генерации. Независимые измерения выходного пучка для лазера длиной 1.1 км показали, что значение его параметра качества  $M^2$  было лучше, чем 1.2 при выходной мощности от 5 до 10 Вт, т. е. генерация близка к одномодовой.

Проведённые измерения показали хорошее соответствие между резонансными спектрами отражения ВБР (Рис. 4.7) и генерации лазера (Рис. 4.8а). Более подробно остановимся на описании спектра отражения ММ ВБР в градиентном световоде. Спектр состоит из набора эквидистантных пиков, для расстояния между которыми  $\Delta\lambda$  можно выписать упрощенное выражение [135]:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2 \cdot NA}{2\pi a n_{cl}^2}, \quad (4.2)$$

где  $\lambda$  — длина волны отражения ВБР,  $2a$  — диаметр сердцевины,  $n_{cl}$  — показатель преломления оболочки. Исходя из характеристик используемого световода ( $NA = 0.275$ ,  $2a = 62.5$  мкм,  $n_{cl} = 1.45$ ) и длины волны  $\lambda = 954$  нм, можно вычислить расстояние между пиками для отдельных групп мод  $\Delta\lambda = 0.61$  нм. Полученное значение хорошо согласуется с расстоянием между пиками, наблюдаемыми в спектре генерации, при установке выходной УФ ВБР в ВКР-лазере. Вместе с тем вдвое большее расстояние между пиками, наблюдаемое при уста-

новке выходной фс ВБР, можно объяснить отсутствием пика отражения для моды второй группы из-за малой величины интеграла перекрытия этой моды с записанной в центральной части сердцевины световода фс ВБР.

Для оценки малости интеграла перекрытия полей мод световода с областью фотомодификации в фс ВБР отметим, что диаметр основной моды градиентного световода Corning 62.5/125 можно оценить как  $2r_0 \approx 9.8$  мкм [141], а область фотомодификации имеет форму эллипса в поперечном сечении световода с характерным размером главных осей  $\approx 1$  и  $\approx 10$  мкм соответственно. Можно отметить, что несмотря на сравнимый размер модового диаметра и области фотомодификации в одном из направлений, интегралы перекрытия малы для мод с отличным от нуля азимутальным индексом  $\eta$ . Таким образом, только моды с индексом  $\eta = 0$  имеют максимальное перекрытие мод с ВБР, записанной вблизи центра световода, поэтому только пики отражения таких мод ( $LP_{01}$  из первой группы,  $LP_{02}$  из третьей группы) появляются в спектре отражения фс ВБР и, соответственно, в спектре генерации ВКР-лазера при использовании этой выходной решетки.

### 4.3 Выводы по Главе 4

Таким образом, в работе продемонстрированы возможности технологии фс записи при создании ВБР в ММ ВС с градиентным параболическим профилем показателя преломления. Показано, что точное позиционирование фс модификации в поперечном сечении сердцевины световода позволяет осуществлять спектральное селектирование разных групп поперечных мод. Полученные результаты могут быть использованы для создания датчиков физических величин и ММ волоконных лазеров с контролируемым модовым составом.

Использование фс поточечной ВБР в качестве выходного зеркала резонатора ВКР-лазера с прямой накачкой ММ ЛД позволяет достичь высокого качества пучка ( $M^2 < 1.2$ ) генерируемого излучения при уровне выходной мощности  $>5$  Вт. Конфигурация резонатора ВКР-лазера на основе ВБР позволяет перейти к полностью волоконной схеме, а мощность и эффективность генерации могут быть увеличены при комбинировании меньшей длины световода с

большей мощностью накачки, а также при применении специальных мер подавления ВКР-генерации высших порядков.



## Заключение

Таким образом, данная работа наглядно демонстрирует, что технология фемтосекундной модификации показателя преломления в объеме прозрачных материалов, и в частности технология поточечной записи волоконных брэгговских решеток (ВБР), имеет ряд неоспоримых преимуществ при работе со специализированными волоконными световодами. Экспериментально исследованы особенности записи ВБР в волоконных световодах с разной геометрией (одномодовые, многомодовые и многосердцевинные), имеющих полимерное защитное покрытие (полиимид и акрилат), предложены новые экспериментальные методы записи коротких и длинных ВБР, а также ВБР с фазовыми сдвигами.

Сформулируем основные результаты, полученные в данной работе:

1. Продемонстрирован новый метод фс поточечной записи ВБР через защитное покрытие путем протяжки волоконного световода через феррулу, который позволяет записывать как короткие (0.1 мм), так и длинные (50 мм) ВБР. Отклонения сердцевинны, возникающие в процессе протяжки через феррулу, компенсируются с помощью системы автоподстройки. В результате в одномодовом пассивном световоде с полиимидным защитным покрытием созданы образцы ВБР, чьи спектральные характеристики имеют хорошее соответствие с расчетными. В случае короткой ВБР (0.1 мм) ширина резонанса составила 7.37 нм при коэффициенте отражения 2.34%, в случае длинной ВБР (50 мм) ширина резонанса составила 16.5 пм при коэффициенте отражения 14.3%.
2. Предложен новый метод введения фазовых сдвигов в структуре ВБР при фс поточечной записи. Задание фазового сдвига осуществляется в процессе записи ВБР при помощи пьезоэлемента, который в заданный момент быстро смещает волокно по направлению его движения на заданную величину. Для демонстрации работоспособности метода, в пассивном одномодовом волокне были записаны ВБР длиной до 34 мм с одним и двумя фазовыми  $\pi$ -сдвигами. Запись ВБР осуществлялась через защитное полиимидное покрытие световода. Экспериментально измеренная ширина окна пропускания 34-мм ВБР с фазовым  $\pi$ -сдвигом составила 0.55 пм, что является минимальным известным значением, полученным для метода фс поточечной записи. Показано, что 37-мм

- ВБР с фазовым  $\pi$ -сдвигом, записанная в активном эрбиевом световоде с сохранением поляризации, может быть использована в качестве резонатора волоконного лазера с распределенной обратной связью. Получена лазерная генерация одночастотного излучения на длине волны 1550 нм при накачке лазерным диодом на длине волны 976 нм, ширина линии генерации составила 20 кГц, и отношение сигнал-шум выходной мощности 71 дБ.
3. Предложен способ записи однородных и неоднородных ВБР в каждой из сердцевин 7-сердцевинного ВС с прямыми сердцевинами с помощью фс поточечного метода. Предложен способ записи ВБР в каждой из сердцевин 7-сердцевинного ВС с закрученными по спирали сердцевинами с помощью фс поточечного метода. На основе точечного массива ВБР в 7-сердцевинном ВС с закрученными по спирали сердцевинами продемонстрирован векторный датчик изгиба, позволяющий измерять радиус кривизны и направление изгиба световода с помощью одноканальной схемы опроса. Точность измерения радиуса изгиба составила 3%.
  4. Изучена возможность селектирования поперечных мод в многомодовом (ММ) волоконном световоде с помощью ВБР, созданных методом фемтосекундной поточечной записи. Запись ВБР осуществлялась в ММ волокне с градиентным профилем показателя преломления Corning 62.5/125. Показано, что пространственное положение ВБР в поперечном сечении волокна определяет количество и эффективность отражения поперечных мод ММ волоконного световода. Так, например, наиболее эффективное селектирование основной моды  $LP_{01}$  происходит при модификации центральной части сердцевины. Запись дополнительной смещенной в поперечном направлении ВБР приводит к увеличению отраженной мощности кольцевых мод. Использование слабоотражающей поточечной ВБР, записанной в центральной области световода Corning 62.5/125, в качестве выходного зеркала резонатора ВКР-лазера с прямой диодной накачкой позволило получить рекордное для данного типа лазера качество выходного пучка  $M^2 = 1.2$  при мощности генерации 5 Вт.

Отметим, что многие из экспериментальных подходов, предложенных в данной работе, были использованы в ряде публикаций, посвященных волоконно-

оптическим сенсорам и лазерам. В частности, результаты по записи однородных ВБР в одномодовых ВС через защитное полимерное покрытие были использованы в работе [75], где сенсоры на основе ВБР были интегрированы в углепластиковый композитный материал, и в работе [142], где массив ВБР использовался для распределенной термометрии в процессе лазерной абляции биологической ткани. Результаты, связанные с записью ВБР с фазовыми сдвигами, позволили реализовать эрбиевый РОС-лазер ( $\lambda \approx 1550$  нм) с селективированием одной поляризационной моды [143], первый волоконный гольмиевый РОС-лазер ( $\lambda \approx 2070$  нм) [144], ультракороткий эрбиевый РОС-лазер ( $\lambda \approx 1550$  нм) на основе композитного фосфоросиликатного световода [145]. Результаты по записи ВБР в многосердцевинных волоконных световодах были использованы при создании трехмерного датчика формы [146], а также при создании ВКР-лазеров на основе двухсердцевинного световода с перекрестной связью между сердцевинами [17; 18]. Результаты по записи ВБР в многомодовых волоконных световодах с градиентным профилем показателя преломления были использованы в ряде работ для пространственного и спектрального селективирования основной моды в мощных волоконных ВКР-лазерах с прямой диодной накачкой [20; 147–151].

## Благодарности

Самую первую и главную благодарность я выражаю своему научному руководителю — *Сергею Алексеевичу Бабину*, который предложил интересную тему для диссертации, а также направлял и консультировал по ряду вопросов связанных с её выполнением. Отдельную благодарность я выражаю своим ближайшим коллегам, с которыми мы провели множество часов продумывая эксперименты и готовя материалы к публикациям, а именно — *Александру Достовалову, Михаилу Скворцову, Софье Абдуллиной, Александру Парыгину, Сергею Каблукону и Екатерине Евменовой (Злобиной)*. Продуктивности работы во многом способствовала дружественная атмосфера, сложившаяся в Лаборатории волоконной оптики Института автоматизации и электрометрии СО РАН. Богатый опыт сотрудников лаборатории позволил освоить множество уникальных экспериментальных методов в области физики лазеров и волоконной оптики. Наконец, я признателен своим родителям, *Анатолию Вольфу* и *Людмиле Андреевой*, и старшей сестре, *Анне Айхлер-Вольф*, за то, что всегда поддерживали меня и до сих пор это делают.

*Алексей Вольф*

*23 октября 2020 г.*

*Новосибирский Академгородок*

## Список сокращений и условных обозначений

фс	фемтосекунда ( $10^{-15}$ с), фемтосекундный (как правило, к фемтосекундным импульсам относят импульсы с длительностью $\sim 1-100$ фс, при поглощении которых наблюдается определенный режим модификации материалов)
ВС	волоконный световод
МВС	многосердцевинный волоконный световод
ММ ВС	многомодовый волоконный световод
ВБР	волоконная брэгговская решетка
ВКР	вынужденное комбинационное рассеяние
РОС	распределенная обратная связь
$\lambda$	длина волны лазерного излучения в вакууме
$k = 2\pi/\lambda$	волновое число в вакууме
$\lambda_{\text{FBG}}$	резонансная длина волны волоконной брэгговской решетки
$\Lambda_{\text{FBG}}$	период волоконной брэгговской решетки
$\Delta\lambda$	спектральная ширина оптического сигнала
$n_{\text{co}}$	показатель преломления сердцевины волоконного световода
$n_{\text{cl}}$	показатель преломления оболочки волоконного световода
$n_{\text{env}}$	показатель преломления внешней среды
$\Delta n$	амплитуда модуляции показателя преломления
$\kappa$	коэффициент связи волоконной брэгговской решетки
$\delta n$	величина двулучепреломления
$n_{\text{fast}}$	показатель преломления для быстрой поляризационной оси
$n_{\text{slow}}$	показатель преломления для медленной поляризационной оси
$\lambda_{\text{fast}}$	длина волны оптического сигнала для быстрой поляризационной оси
$\lambda_{\text{slow}}$	длина волны оптического сигнала для медленной поляризационной оси
NA	числовая апертура линзы/объектива
$E_p$	энергия лазерного импульса
$\Delta t_p$	длительность лазерного импульса
$f_{\text{las}}$	частота следования лазерных импульсов
$v_{\text{tr}}$	скорость перемещения волокна

## Список литературы

1. *Vasil'ev S. A., Medvedkov O. I., Korolev I. G. et al.* Fibre gratings and their applications // *Quantum Electronics*. — 2005. — Vol. 35, no. 12. — Pp. 1085–1103.
2. *Martinez A., Khrushchev I. Y., Bennion I.* Direct inscription of Bragg gratings in coated fibers by an infrared femtosecond laser // *Optics Letters*. — 2006. — Vol. 31, no. 11. — P. 1603.
3. *Grobncic D., Mihailov S. J., Smelser C. W., Ding H.* Sapphire fiber Bragg grating sensor made using femtosecond laser radiation for ultrahigh temperature applications // *IEEE Photonics Technology Letters*. — 2004. — Vol. 16, no. 11. — Pp. 2505–2507.
4. *Mihailov S. J.* Fiber Bragg Grating Sensors for Harsh Environments // *Sensors*. — 2012. — Vol. 12, no. 12. — Pp. 1898–1918.
5. *Mihailov S. J., Smelser C. W., Lu P. et al.* Fiber Bragg gratings made with a phase mask and 800-nm femtosecond radiation // *Optics Letters*. — 2003. — Vol. 28, no. 12. — P. 995.
6. *Martinez A., Dubov M., Khrushchev I., Bennion I.* Direct writing of fibre Bragg gratings by femtosecond laser // *Electronics Letters*. — 2004. — Vol. 40, no. 19. — P. 1170.
7. *Cooper D. J. F., Coroy T., Smith P. W. E.* Time-division multiplexing of large serial fiber-optic Bragg grating sensor arrays // *Applied Optics*. — 2001. — Vol. 40, no. 16. — P. 2643.
8. *Ricchiuti A. L., Barrera D., Sales S. et al.* Long weak FBG sensor interrogation using microwave photonics filtering technique // *IEEE Photonics Technology Letters*. — 2014. — Vol. 26, no. 20. — Pp. 2039–2042.
9. *Nikulin M. A., Churin D. E., Vlasov A. A., Podivilov E. V.* Distributed feedback ytterbium fiber laser: experiment and analytical model // *Journal of the Optical Society of America B*. — 2010. — Vol. 27, no. 7. — P. 1414.

10. *Gatti D., Galzerano G., Janner D. et al.* Fiber strain sensor based on a pi-phase-shifted Bragg grating and the Pound-Drever-Hall technique // *Optics Express*. — 2008. — Vol. 16, no. 3. — P. 1945.
11. *Rosenthal A., Razansky D., Ntziachristos V.* High-sensitivity compact ultrasonic detector based on a pi-phase-shifted fiber Bragg grating // *Optics Letters*. — 2011. — Vol. 36, no. 10. — P. 1833.
12. *Shi C., Luo X., Qi P. et al.* Shape Sensing Techniques for Continuum Robots in Minimally Invasive Surgery: A Survey // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. — 2017. — Vol. 64, no. 8. — Pp. 1665–1678.
13. *Khan F., Denasi A., Barrera D. et al.* Multi-Core Optical Fibers With Bragg Gratings as Shape Sensor for Flexible Medical Instruments // *IEEE Sensors Journal*. — 2019. — Vol. 19, no. 14. — Pp. 5878–5884.
14. *Pevec S., Donlagic D., Donlagić D.* Multiparameter fiber-optic sensors : a review // *Optical Engineering*. — 2019. — Vol. 58, no. 7. — P. 072009.
15. *Madrigal J., Barrera D., Sales S.* Regenerated Fiber Bragg Gratings in Multicore Fiber for Multi-Parameter Sensing // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. — 2020. — Vol. 26, no. 4. — Pp. 1–6.
16. *Wolf A., Bronnikov K., Dostovalov A. et al.* Multiparameter point sensing with the FBG-containing multicore optical fiber // Proc. SPIE 11354, Optical Sensing and Detection VI / Ed. by F. Berghmans, A. G. Mignani. — Strasbourg, France: SPIE, 2020. — P. 113540F.
17. *Skvortsov M. I., Abdullina S. R., Wolf A. A. et al.* Narrowband Raman fibre laser based on a dual-core optical fibre with FBGs inscribed by femtosecond radiation // *Quantum Electronics*. — 2018. — Vol. 48, no. 12. — Pp. 1089–1094.
18. *Skvortsov M. I., Abdullina S. R., Wolf A. A. et al.* Random Raman fiber laser based on a twin-core fiber with FBGs inscribed by femtosecond radiation // *Optics Letters*. — 2019. — Vol. 44, no. 2. — Pp. 295–298.
19. *Каблюков С. И., Злобина Е. А., Скворцов М. И. и др.* Селекция мод в волоконном ВКР-лазере с прямой диодной накачкой при использовании ВБР в многомодовом градиентном световоде // *Квантовая электроника*. — 2016. — Т. 46, № 12. — С. 1106–1109.



20. *Zlobina E. A., Kablukov S. I., Wolf A. A. et al.* Nearly single-mode Raman lasing at 954 nm in a graded-index fiber directly pumped by a multimode laser diode // *Optics Letters*. — 2017. — Vol. 42, no. 1. — Pp. 9–12.
21. *Dostovalov A. V., Wolf A. A., Parygin A. V. et al.* Femtosecond point-by-point inscription of Bragg gratings by drawing a coated fiber through ferrule // *Optics Express*. — 2016. — Vol. 24, no. 15. — Pp. 16232–16237.
22. *Wolf A., Dostovalov A., Skvortsov M. et al.* Femtosecond-pulse inscription of fiber Bragg gratings with single or multiple phase-shifts in the structure // *Optics & Laser Technology*. — 2018. — Vol. 101. — Pp. 202–207.
23. *Вольф А. А., Достовалов А. В., Вабниц С., Бабин С. А.* Фемтосекундная запись структур показателя преломления в многомодовых и многосердцевинных волоконных световодах // *Квантовая электроника*. — 2018. — Т. 48, № 12. — С. 1128–1131.
24. *Wolf A., Dostovalov A., Bronnikov K., Babin S.* Arrays of fiber Bragg gratings selectively inscribed in different cores of 7-core spun optical fiber by IR femtosecond laser pulses // *Optics Express*. — 2019. — Vol. 27, no. 10. — P. 13978.
25. *Wolf A. A., Dostovalov A. V., Babin S. A.* Direct writing of long-period and fiber Bragg gratings in specialty fibers by femtosecond laser pulses at the wavelength of 1026 nm // 2015 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC). — Munich, Germany: 2015. — Pp. CM–4.2.
26. *Wolf A. A., Dostovalov A. V., Babin S. A.* Fiber core overlapping in femtosecond fiber Bragg gratings inscription // *Fundamentals of Laser Assisted Micro- & Nanotechnologies (FLAMN-16): Program*. — St. Petersburg, Russia: 2016. — Pp. PS2–54.
27. *Вольф А. А., Достовалов А. В., Парыгин А. В. и др.* Запись ВБР для точечных и распределенных измерений фс излучением // 7-й Российский семинар по волоконным лазерам: материалы семинара. — Новосибирск, Россия: ИАиЭ СО РАН, 2016. — С. 206–207.

28. *Wolf A. A., Dostovalov A. V., Parygin A. V. et al.* Direct femtosecond-pulse inscription of fiber Bragg gratings with special characteristics for sensing and laser applications // 2016 International Conference Laser Optics (LO). — St. Petersburg, Russia: IEEE, 2016. — Pp. R5–9.
29. *Wolf A. A., Skvortsov M. I., Dostovalov A. V., Babin S. A.* Femtosecond-pulse inscription of phase-shifted fiber Bragg gratings for distributed feedback lasers // 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC). — Munich, Germany: IEEE, 2017. — Pp. CM–4.6.
30. *Wolf A. A., Yakushin S. S., Kotyushev M. Yu. et al.* Femtosecond pulse inscription of FBGs in multicore fibers and their applications // 2018 International Conference Laser Optics (ICLO). — St. Petersburg, Russia: IEEE, 2018. — P. 93.
31. *Вольф А. А., Достовалов А. В., Вабниц С., Бабин С. А.* Фемтосекундная запись структур показателя преломления в многомодовых и многосердцевинных волоконных световодах // 8-й Российский семинар по волоконным лазерам: материалы семинара. — Новосибирск, Россия: ИАиЭ СО РАН, 2018. — С. 200–201.
32. *Wolf A., Bronnikov K., Dostovalov A., Babin S.* Femtosecond pulse inscription of 3D arrays of Bragg gratings in selected cores of a multicore optical fiber // 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC). — Munich, Germany: IEEE, 2019. — Pp. CM–4.6.
33. *Wolf A., Bronnikov K., Yakushin S. et al.* Femtosecond point-by-point inscription of 3D FBG arrays in 7-core fibers with straight and twisted cores // Proc. of SPIE Vol. 11199, Seventh European Workshop on Optical Fibre Sensors / Ed. by K. Kalli, G. Brambilla, S. O. O’Keeffe. — Limassol, Cyprus: SPIE, 2019. — P. 1119934.
34. *Вольф А. А., Достовалов А. В., Семёнов С. Л. и др.* Создание однородных и неоднородных ВБР в 7-сердцевинном волоконном световоде методом фемтосекундной поточечной записи // *Прикладная фотоника*. — 2019. — Т. 6, № 1-2. — С. 48–56.

35. *Sugioka Koji*. Progress in ultrafast laser processing and future prospects // *Nanophotonics*. — 2017. — Vol. 6, no. 2. — Pp. 393–413.
36. *Malinauskas M., Žukauskas A., Hasegawa S. et al.* Ultrafast laser processing of materials: from science to industry // *Light: Science & Applications*. — 2016. — Vol. 5, no. 8. — P. e16133.
37. *Gattass R. R., Mazur E.* Femtosecond laser micromachining in transparent materials // *Nature Photonics*. — 2008. — Vol. 2, no. 4. — Pp. 219–225.
38. *Davis K. M., Miura K., Sugimoto N., Hirao K.* Writing waveguides in glass with a femtosecond laser // *Optics Letters*. — 1996. — Vol. 21, no. 21. — P. 1729.
39. *Cerullo G., Osellame R., Taccheo S. et al.* Femtosecond micromachining of symmetric waveguides at 1.5 microm by astigmatic beam focusing // *Optics Letters*. — 2002. — Vol. 27, no. 21. — Pp. 1938–1940.
40. *Beresna M., Gecevicius M., Kazansky P. G., Gertus T.* Radially polarized optical vortex converter created by femtosecond laser nanostructuring of glass // *Applied Physics Letters*. — 2011. — Vol. 98, no. 20. — P. 201101.
41. *Homoelle D., Wielandy S., Gaeta A. L. et al.* Infrared photosensitivity in silica glasses exposed to femtosecond laser pulses. // *Optics Letters*. — 1999. — Vol. 24, no. 18. — Pp. 1311–3.
42. *Kondo Y., Nouchi K., Mitsuyu T. et al.* Fabrication of long-period fiber gratings by focused irradiation of infrared femtosecond laser pulses // *Optics Letters*. — 1999. — Vol. 24, no. 10. — Pp. 646–648.
43. *Itoh K., Watanabe W., Nolte S., Schaffner C. B.* Ultrafast processes for bulk modification of transparent materials // *MRS Bulletin*. — 2006. — Vol. 31, no. 8. — Pp. 620–625.
44. *Schaffner 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. — Vol. 12, no. 11. — Pp. 1784–1794.

45. *Chan J. W., Huser T., Risbud S., Krol D. M.* Structural changes in fused silica after exposure to focused femtosecond laser pulses // *Optics Letters*. — 2001. — Vol. 26, no. 21. — Pp. 1726–8.
46. *Chan J. W., Huser T. R., Risbud S. H., Krol D. M.* Modification of the fused silica glass network associated with waveguide fabrication using femtosecond laser pulses // *Applied Physics A: Materials Science and Processing*. — 2003. — Vol. 76, no. 3. — Pp. 367–372.
47. *Sakakura M., Terazima M., Shimotsuma Y. et al.* Heating and rapid cooling of bulk glass after photoexcitation by a focused femtosecond laser pulse // *Optics Express*. — 2007. — Vol. 15, no. 25. — P. 16800.
48. *Ams M., Marshall G. D., Dekker P. et al.* Investigation of Ultrafast Laser-Photonic Material Interactions: Challenges for Directly Written Glass Photonics // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. — 2008. — Vol. 14, no. 5. — Pp. 1370–1381.
49. *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. — Vol. 32, no. 10. — Pp. 647–649.
50. *Saleh B. E. A., Teich M. C.* Fundamentals of Photonics. — 3rd Edition edition. — Wiley, 2020. — P. 1520.
51. *Kogelnik H.* Theory of Optical Waveguides // *Guided-Wave Optoelectronics* / Ed. by T. Tamir. — Berlin, Heidelberg: Springer, 1988. — Pp. 7–88.
52. *Erdogan T.* Fiber grating spectra // *Journal of Lightwave Technology*. — 1997. — Vol. 15, no. 8. — Pp. 1277–1294.
53. *Mihailov S. J., Grobncic D., Smelser C. W. et al.* Bragg grating inscription in various optical fibers with femtosecond infrared lasers and a phase mask // *Optical Materials Express*. — 2011. — Vol. 1, no. 4. — P. 754.
54. *Smelser C. W., Grobncic D., Mihailov S. J.* Generation of pure two-beam interference grating structures in an optical fiber with a femtosecond infrared source and a phase mask // *Optics Letters*. — 2004. — Vol. 29, no. 15. — P. 1730.

55. *Mihailov S. J., Grobncic D., Walker R. B. et al.* Bragg grating writing through the polyimide coating of high NA optical fibres with femtosecond IR radiation // *Optics Communications*. — 2008. — Vol. 281, no. 21. — Pp. 5344–5348.
56. *Antipov S., Ams M., Williams R. J. et al.* Direct infrared femtosecond laser inscription of chirped fiber Bragg gratings // *Optics Express*. — 2016. — Vol. 24, no. 1. — P. 30.
57. *Marshall G. D., Williams R. J., Jovanovic N. et al.* Point-by-point written fiber-Bragg gratings and their application in complex grating designs // *Optics Express*. — 2010. — Vol. 18, no. 19. — P. 19844.
58. *Williams R. J., Krämer R. G., Nolte S. et al.* Detuning in apodized point-by-point fiber Bragg gratings: insights into the grating morphology // *Optics Express*. — 2013. — Vol. 21, no. 22. — P. 26854.
59. *Yang S., Hu D., Wang A.* Point-by-point fabrication and characterization of sapphire fiber Bragg gratings // *Optics Letters*. — 2017. — Vol. 42, no. 20. — P. 4219.
60. *Zhou K., Dubov M., Mou C. et al.* Line-by-line fiber bragg grating made by femtosecond laser // *IEEE Photonics Technology Letters*. — 2010. — Vol. 22, no. 16. — Pp. 1190–1192.
61. *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. — Vol. 38, no. 11. — P. 1918.
62. *Lu P., Mihailov S. J., Ding H. et al.* Plane-by-Plane Inscription of Grating Structures in Optical Fibers // *Journal of Lightwave Technology*. — 2018. — Vol. 36, no. 4. — Pp. 926–931.
63. *Достовалов А. В., Бабин С. А., Вольф А. А. и др.* Способ изготовления волоконных брэгговских решеток в нефоточувствительных волоконных световодах. — Патент РФ, RU 2610904 C1, от 11.01.2016.
64. *Thomas J., Jovanovic N., Becker R. G. et al.* Cladding mode coupling in highly localized fiber Bragg gratings: modal properties and transmission spectra // *Optics Express*. — 2011. — Vol. 19, no. 1. — Pp. 325–341.

65. *Burgmeier J., Waltermann C., Flachenecker G., Schade W.* Point-by-point inscription of phase-shifted fiber Bragg gratings with electro-optic amplitude modulated femtosecond laser pulses // *Optics Letters*. — 2014. — Vol. 39, no. 3. — P. 540.
66. *Donko A., Beresna M., Jung Y. et al.* Point-by-point femtosecond laser micro-processing of independent core-specific fiber Bragg gratings in a multi-core fiber // *Optics Express*. — 2018. — Vol. 26, no. 2. — P. 2039.
67. *Williams R. J., Jovanovic N., Marshall G. D. et al.* Optimizing the net reflectivity of point-by-point fiber Bragg gratings: the role of scattering loss // *Optics Express*. — 2012. — Vol. 20, no. 12. — P. 13451.
68. FemtoFBG: Microfabrication Workstation, Fiber Bragg Grating, fs Laser Direct-Writing. — URL: <https://www.newport.com/p/FemtoFBG>.
69. FemtoFiberTec GmbH. — URL: <https://www.femtofibertec.de/en/>.
70. Femtotech LLC. — URL: <http://femtotech.ru>.
71. *Habisreuther T., Hailemichael E., Ecke W. et al.* ORMOCER Coated Fiber-Optic Bragg Grating Sensors at Cryogenic Temperatures // *IEEE Sensors Journal*. — 2012. — Vol. 12, no. 1. — Pp. 13–16.
72. *Fu L. B., Marshall G. D., Bolger J. A. et al.* Femtosecond laser writing Bragg gratings in pure silica photonic crystal fibres // *Electronics Letters*. — 2005. — Vol. 41, no. 11. — P. 638.
73. *Martinez A, Khrushchev I.Y., Bennion I.* Thermal properties of fibre Bragg gratings inscribed point-by-point by infrared femtosecond laser // *Electronics Letters*. — 2005. — Vol. 41, no. 4. — P. 176.
74. *Schena E., Tosi D., Saccomandi P. et al.* Fiber optic sensors for temperature monitoring during thermal treatments: An overview // *Sensors*. — 2016. — Vol. 16, no. 7. — Pp. 1–20.
75. *Shishkin V. V., Terentyev V. S., Kharenko D. S. et al.* Experimental method of temperature and strain discrimination in polymer composite material by embedded fiber-optic sensors based on femtosecond-inscribed FBGs // *Journal of Sensors*. — 2016. — Vol. 2016. — P. 3230968.

76. *Jovanovic N., Fuerbach A., Marshall G. D. et al.* Fibre Grating Inscription and Applications // *Femtosecond Laser Micromachining: Photonic and Microfluidic Devices in Transparent Materials* / Ed. by R. Osellame, G. Cerullo, R. Ramponi. — Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. — Vol. 123. — Pp. 197–225.
77. *Jovanovic N., Thomas J., Williams R. J. et al.* Polarization-dependent effects in point-by-point fiber Bragg gratings enable simple, linearly polarized fiber lasers // *Optics Express*. — 2009. — Vol. 17, no. 8. — Pp. 6082–6095.
78. *Cheng Y., Sugioka K., Midorikawa K. et al.* Control of the cross-sectional shape of a hollow microchannel embedded in photostructurable glass by use of a femtosecond laser // *Optics Letters*. — 2003. — Vol. 28, no. 1. — Pp. 55–57.
79. *Dostovalov A. V., Wolf A. A., Babin S. A. et al.* Numerical investigation of the effect of the temporal pulse shape on modification of fused silica by femtosecond pulses // *Quantum Electronics*. — 2012. — Vol. 42, no. 9. — Pp. 799–804.
80. *Dostovalov A. V., Wolf A. A., Mezentsev V. K. et al.* Quantitative characterization of energy absorption in femtosecond laser micro-modification of fused silica // *Optics Express*. — 2015. — Vol. 23, no. 25. — P. 32541.
81. *Nemykin A. V., Shapiro D. A.* Influence of statistical errors in refractive index on fibre Bragg grating reflection // *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. — 2009. — Vol. 11, no. 1. — P. 015703.
82. *Davis C., Robertson D., Brooks C. et al.* Reduced length fibre Bragg gratings for high frequency acoustic sensing // *Measurement Science and Technology*. — 2014. — Vol. 25, no. 12. — P. 125105.
83. *Wang Y., Gong J., Wang D. Y. et al.* A quasi-distributed sensing network with time-division-multiplexed fiber bragg gratings // *IEEE Photonics Technology Letters*. — 2011. — Vol. 23, no. 2. — Pp. 70–72.
84. *Hnatovsky C., Grobncic D., Mihailov S. J.* Through-the-coating femtosecond laser inscription of very short fiber Bragg gratings for acoustic and high temperature sensing applications // *Optics Express*. — 2017. — Vol. 25, no. 21. — P. 25435.



85. *Smelser C. W., Mihailov S. J., Grobncic D. et al.* Impact of hydrogen loading on the fabrication of fiber Bragg gratings with ultrafast 800 nm laser radiation // Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides. — Monterey, California, United States: Optical Society of America, 2003. — P. PD3.
86. *Vlasov A. A., Churin D. E., Babin S. A.* Specifics of Bragg gratings inscription and characterization in polarization-maintaining Yb-doped fiber for DFB lasers // *Laser Physics*. — 2010. — Vol. 20, no. 12. — Pp. 2045–2049.
87. *Aslund M. L., Jovanovic N., Groothoff N. et al.* Optical loss mechanisms in femtosecond laser-written point-by-point fibre Bragg gratings. // *Optics Express*. — 2008. — Vol. 16, no. 18. — Pp. 14248–14254.
88. *Komukai T., Tamura K., Nakazawa M.* An efficient 0.04-nm apodized fiber Bragg grating and its application to narrow-band spectral filtering // *IEEE Photonics Technology Letters*. — 1997. — Vol. 9, no. 7. — Pp. 934–936.
89. *Liu Y., Dong L., Pan J. J., Gu C.* Strong phase-controlled fiber Bragg gratings for dispersion compensation // *Optics Letters*. — 2003. — Vol. 28, no. 10. — Pp. 786–788.
90. *Zyskind J. L., Mizrahi V., DiGiovanni D. J., Sulhoff J. W.* Short single frequency erbium-doped fibre laser // *Electronics Letters*. — 1992. — Vol. 28, no. 15. — P. 1385.
91. *Sejka M., Varming P., Hubner J., Kristensen M.* Distributed feedback Er<sup>3+</sup>-doped fibre laser // *Electronics Letters*. — 1995. — Vol. 31, no. 17. — Pp. 1445–1446.
92. *Gagné M., Loranger S., Lapointe J., Kashyap R.* Fabrication of high quality, ultra-long fiber Bragg gratings: up to 2 million periods in phase // *Optics Express*. — 2014. — Vol. 22, no. 1. — Pp. 21550–21557.
93. *Martin J., Ouellette F.* Novel writing technique of long and highly reflective in-fibre gratings // *Electronics Letters*. — 1994. — Vol. 30, no. 10. — Pp. 811–812.
94. *Kringlebotn J. T., Archambault J.-L., Reekie L., Payne D. N.* Er<sup>3+</sup>:Yb<sup>3+</sup>-codoped fiber distributed-feedback laser // *Optics Letters*. — 1994. — Vol. 19, no. 24. — P. 2101.

95. *Li M., Chen X., Fujii T. et al.* Multiwavelength fiber laser based on the utilization of a phase-shifted phase-only sampled fiber Bragg grating // *Optics Letters*. — 2009. — Vol. 34, no. 11. — P. 1717.
96. *Guan B.-O., Tam H.-Y., Tao X.-M., Dong X.-Y.* Simultaneous strain and temperature measurement using a superstructure fiber Bragg grating // *IEEE Photonics Technology Letters*. — 2000. — Vol. 12, no. 6. — Pp. 675–677.
97. *Agrawal G. P., Radic S.* Phase-shifted fiber Bragg gratings and their application for wavelength demultiplexing // *IEEE Photonics Technology Letters*. — 1994. — Vol. 6, no. 8. — Pp. 995–997.
98. *Wei L., Lit J. W. Y.* Phase-shifted Bragg grating filters with symmetrical structures // *Journal of Lightwave Technology*. — 1997. — Vol. 15, no. 8. — Pp. 1405–1410.
99. *Kashyap R., Mckee P. F., Armes D.* UV written reflection grating structures in photosensitive optical fibres using phase-shifted phase masks // *Electronics Letters*. — 1994. — Vol. 30, no. 23. — Pp. 1977–1978.
100. *Canning J., Sceats M. G.* pi-phase-shifted periodic distributed structures in optical fibres by UV post-processing // *Electronics Letters*. — 1994. — Vol. 30, no. 16. — Pp. 1344–1345.
101. *Fang X., He X. Y., Liao C. R. et al.* A new method for sampled fiber Bragg grating fabrication by use of both femtosecond laser and CO2 laser // *Optics Express*. — 2010. — Vol. 18, no. 3. — P. 2646.
102. *Jiang Y., Yuan Y., Xu J. et al.* Phase-shifted fiber Bragg grating inscription by fusion splicing technique and femtosecond laser // *Optics and Lasers in Engineering*. — 2016. — Vol. 86. — Pp. 236–241.
103. *Grenier J. R., Fernandes L. A, Aitchison J. S. et al.* Femtosecond laser fabrication of phase-shifted Bragg grating waveguides in fused silica // *Optics Letters*. — 2012. — Vol. 37, no. 12. — P. 2289.
104. *Huang B., Shu X.* Line-by-Line inscription of phase-shifted fiber Bragg gratings with femtosecond laser // *Asia Communications and Photonics Conference 2015*. — Hong Kong, Hong Kong: 2015. — P. ASu2A.60.

105. *Okoshi T., Kikuchi K., Nakayama A.* Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum // *Electronics Letters*. — 1980. — Vol. 16, no. 16. — P. 630.
106. *Turitsyn S. K., Babin S. A., Churkin D. V. et al.* Random distributed feedback fibre lasers // *Physics Reports*. — 2014. — Vol. 542, no. 2. — Pp. 133–193.
107. *Cranch G. A., Flockhart G. M. H., Kirkendall C. K.* Distributed feedback fiber laser strain sensors // *IEEE Sensors Journal*. — 2008. — Vol. 8, no. 7. — Pp. 1161–1172.
108. *Cranch G. A., Englund M. A., Kirkendall C. K.* Intensity noise characteristics of erbium-doped distributed-feedback fiber lasers // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. — 2003. — Vol. 39, no. 12. — Pp. 1579–1586.
109. *Loranger S., Lambin-Iezzi V., Wahbeh M., Kashyap R.* Stimulated Brillouin scattering in ultra-long distributed feedback Bragg gratings in standard optical fiber // *Optics Letters*. — 2016. — Vol. 41, no. 8. — P. 1797.
110. *Michaille L., Bennett C. R., Taylor D. M., Shepherd T. J.* Multicore photonic crystal fiber lasers for high power/energy applications // *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*. — 2009. — Vol. 15, no. 2. — Pp. 328–336.
111. *Frazaõ O., Silva R. M., Kobelke J., Schuster K.* Temperature- and strain-independent torsion sensor using a fiber loop mirror based on suspended twin-core fiber // *Optics Letters*. — 2010. — Vol. 35, no. 16. — Pp. 2777–2779.
112. *Saitoh K., Matsuo S.* Multicore Fiber Technology // *Journal of Lightwave Technology*. — 2016. — Vol. 34, no. 1. — Pp. 55–66.
113. *Westbrook P. S., Feder K. S., Kremp T. et al.* Distributed sensing over meter lengths using twisted multicore optical fiber with continuous bragg gratings // *Furukawa Review*. — 2017. — no. 48. — Pp. 26–32.
114. *Richardson D. J., Fini J. M., Nelson L. E.* Space-division multiplexing in optical fibres // *Nature Photonics*. — 2013. — Vol. 7, no. April. — Pp. 354–362.

115. *Prevost F., Lombard L., Primot J. et al.* Coherent beam combining of a narrow-linewidth long-pulse Er<sup>3+</sup>-doped multicore fiber amplifier // *Optics Express*. — 2017. — Vol. 25, no. 9. — P. 9528.
116. *Antonio-Lopez J. E., Eznaveh Z. S., LiKamWa P. et al.* Multicore fiber sensor for high-temperature applications up to 1000°C. // *Optics Letters*. — 2014. — Vol. 39, no. 15. — Pp. 4309–12.
117. *Chekhovskoy I. S., Sorokina M. A., Rubenchik A. M. et al.* On demand spatial beam self-focusing in hexagonal multi-core fiber // *IEEE Photonics Journal*. — 2018. — Vol. 10, no. 1. — Pp. 1–1.
118. *Andresen E. R., Bouwmans G., Monneret S., Rigneault H.* Toward endoscopes with no distal optics: video-rate scanning microscopy through a fiber bundle. // *Optics Letters*. — 2013. — Vol. 38, no. 5. — Pp. 609–11.
119. *Gasulla I., Barrera D., Hervás J., Sales S.* Spatial Division Multiplexed Microwave Signal processing by selective grating inscription in homogeneous multicore fibers // *Scientific Reports*. — 2017. — Vol. 7, no. August 2016. — P. 41727.
120. *Xu R., Yurkewich A., Patel R. V.* Curvature, Torsion, and Force Sensing in Continuum Robots Using Helically Wrapped FBG Sensors // *IEEE Robotics and Automation Letters*. — 2016. — Vol. 1, no. 2. — Pp. 1052–1059.
121. *Gander M. J., MacPherson W. N., McBride R. et al.* Bend measurement using Bragg gratings in multicore fibre // *Electronics Letters*. — 2002. — Vol. 36, no. 2. — P. 120.
122. *Flockhart G. M. H., MacPherson W. N., Barton J. S. et al.* Two-axis bend measurement with Bragg gratings in multicore optical fiber // *Optics Letters*. — 2003. — Vol. 28, no. 6. — Pp. 387–389.
123. *Miller G. A., Askins C. G., Friebele E. J.* Shape sensing using distributed fiber optic strain measurements // Proc. SPIE 5502, Second European Workshop on Optical Fibre Sensors. — Santander, Spain: 2004. — Pp. 528–531.
124. *Klute S., Duncan R., Fielder R. et al.* Fiber-Optic Shape Sensing and Distributed Strain Measurements on a Morphing Chevron // 44th AIAA Aerospace Sci-

- ences Meeting and Exhibit. — Reno, Nevada, United States: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006. — Pp. 1–23.
125. *Westbrook P. S., Kremp T., Feder K. S. et al.* Continuous Multicore Optical Fiber Grating Arrays for Distributed Sensing Applications // *Journal of Lightwave Technology*. — 2017. — Vol. 35, no. 6. — Pp. 1248–1252.
126. Fibercore: Multicore Fiber. — URL: <https://www.fibercore.com/product/multicore-fiber>.
127. *Weisbrich M., Holschemacher K.* Comparison between different fiber coatings and adhesives on steel surfaces for distributed optical strain measurements based on Rayleigh backscattering // *Journal of Sensors and Sensor Systems*. — 2018. — Vol. 7, no. 2. — Pp. 601–608.
128. *Satori K., Fukuchi K., Kurosawa Y. et al.* Polyimide-coated small-diameter optical fiber sensors for embedding in composite laminate structures // Proc. SPIE 4328, Smart Structures and Materials 2001: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials. — Newport Beach, California, United States: 2003. — P. 285.
129. *Yang S.-Y., Ji M.* Polyimide Matrices for Carbon Fiber Composites // *Advanced Polyimide Materials: Synthesis, Characterization and Applications* / Ed. by S.-Y. Yang. — Elsevier, 2018. — Pp. 93–136.
130. *Williams R. J., Voigtländer C., Marshall G. D. et al.* Point-by-point inscription of apodized fiber Bragg gratings // *Optics Letters*. — 2011. — Vol. 36, no. 15. — P. 2988.
131. *Moore J. P., Rogge M. D.* Shape sensing using multi-core fiber optic cable and parametric curve solutions // *Optics Express*. — 2012. — Vol. 20, no. 3. — P. 2967.
132. *Feit M. D., Fleck J. A.* Light propagation in graded-index optical fibers // *Applied Optics*. — 1978. — Vol. 17, no. 24. — P. 3990.
133. *Hallam A. G.* Mode control in multimode optical fibre and its applications: Ph.D. thesis / Aston University. — 2007.

134. *Krupa K., Tonello A., Shalaby B. M. et al.* Spatial beam self-cleaning in multimode fibres // *Nature Photonics*. — 2017. — Vol. 11, no. 4. — Pp. 237–241.
135. *Mizunami T., Djambova T. V., Niho T., Gupta S.* Bragg gratings in multimode and few-mode optical fibers // *Journal of Lightwave Technology*. — 2000. — Vol. 18, no. 2. — Pp. 230–235.
136. *Schmid M. J., Müller M. S.* Measuring Bragg gratings in multimode optical fibers // *Optics Express*. — 2015. — Vol. 23, no. 6. — P. 8087.
137. *Бабин С. А., Вольф А. А., Достовалов А. В. и др.* Способ селекции поперечных мод многомодового волоконного лазера. — Патент РФ, RU 2654987 C1, от 10.04.2017.
138. *Richardson D. J., Nilsson J., Clarkson W. A.* High power fiber lasers: current status and future perspectives [Invited] // *Journal of the Optical Society of America B*. — 2010. — Vol. 27, no. 11. — P. B63.
139. *Baek S. H., Roh W. B.* Single-mode Raman fiber laser based on a multimode fiber // *Optics Letters*. — 2004. — Vol. 29, no. 2. — P. 153.
140. *Zlobina E. A., Kablukov S. I., Skvortsov M. I. et al.* 954 nm Raman fiber laser with multimode laser diode pumping // *Laser Physics Letters*. — 2016. — Vol. 13, no. 3. — P. 035102.
141. *Mafi A.* Pulse propagation in a short nonlinear graded-index multimode optical fiber // *Journal of Lightwave Technology*. — 2012. — Vol. 30, no. 17. — Pp. 2803–2811.
142. *Morra F., De Landro M., Korganbayev S. et al.* Spatially resolved thermometry during laser ablation in tissues: Distributed and quasi-distributed fiber optic-based sensing // *Optical Fiber Technology*. — 2020. — Vol. 58, no. May. — P. 102295.
143. *Skvortsov M. I., Wolf A. A., Dostovalov A. V. et al.* Distributed feedback fiber laser based on a fiber Bragg grating inscribed using the femtosecond point-by-point technique // *Laser Physics Letters*. — 2018. — Vol. 15, no. 3. — P. 035103.

144. Wolf A. A., Skvortsov M. I., Kamynin V. A. et al. All-fiber holmium distributed feedback laser at 2.07  $\mu\text{m}$  // *Optics Letters*. — 2019. — Vol. 44, no. 15. — P. 3781.
145. Skvortsov M. I., Wolf A. A., Vlasov A. A. et al. Advanced distributed feedback lasers based on composite fiber heavily doped with erbium ions // *Scientific Reports*. — 2020. — Vol. 10, no. 1. — P. 14487.
146. Bronnikov K., Wolf A., Yakushin S. et al. Durable shape sensor based on FBG array inscribed in polyimide-coated multicore optical fiber // *Optics Express*. — 2019. — Vol. 27, no. 26. — Pp. 38421–38434.
147. Evmenova E. A., Kuznetsov A. G., Nemov I. N. et al. 2nd-order random lasing in a multimode diode-pumped graded-index fiber // *Scientific Reports*. — 2018. — Vol. 8, no. 1. — P. 17495.
148. Glick Ya., Shamir Y., Wolf A. A. et al. Highly efficient all-fiber continuous-wave Raman graded-index fiber laser pumped by a fiber laser // *Optics Letters*. — 2018. — Vol. 43, no. 5. — P. 1027.
149. Evmenova E. A., Kablukov S. I., Nemov I. N. et al. High-efficiency LD-pumped all-fiber Raman laser based on a 100  $\mu\text{m}$  core graded-index fiber // *Laser Physics Letters*. — 2018. — Vol. 15, no. 9. — P. 095101.
150. Kuznetsov A. G., Kablukov S. I., Wolf A. A. et al. 976 nm all-fiber Raman laser with high beam quality at multimode laser diode pumping // *Laser Physics Letters*. — 2019. — Vol. 16, no. 10. — P. 105102.
151. Zlobina E. A., Kablukov S. I., Wolf A. A. et al. Generating high-quality beam in a multimode LD-pumped all-fiber Raman laser // *Optics Express*. — 2017. — Vol. 25, no. 11. — P. 12581.