

На правах рукописи



A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Волф' (Wolf).

**Вольф Алексей Анатольевич**

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

Специальность 01.04.05 —  
«Оптика»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН).

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

Официальные оппоненты: **Иванов Олег Витальевич**,  
доктор физико-математических наук,  
Ульяновский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, г. Ульяновск,  
ведущий научный сотрудник

**Вартапетов Сергей Каренович**,  
кандидат физико-математических наук,  
Общество с ограниченной ответственностью  
“Оптосистемы”, г. Москва, г. Троицк,  
директор

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН), г. Москва

Защита состоится 29 декабря 2020 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета Д 003.005.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН) по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАиЭ СО РАН.

Автореферат разослан 4 ноября 2020 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 003.005.02,  
доктор физико-математических наук



Ильичев Л. В.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** 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 поточечная 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 поточечной 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 преломления 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. Благо-

даря 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 ( $\sim 1\text{--}10\text{ мкм}^3$ ) модуляция показателя преломления делает возможным запись ВБР в волоконных световодах со сложной пространственной структурой, в частности, многомодовых и многосердцевинных 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 ( $< 1\text{ мкм}$ ) и длинных (50 мкм) 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 селективного поперечных мод. Со-

здать ВБР, селективирующую основную поперечную моду LP<sub>01</sub> световода, исследовать данную ВБР в качестве выходного зеркала резонатора ВКР-лазера с прямой диодной накачкой.

### **Научная новизна:**

1. Предложена новая техника фс поточечной записи ВБР через защитное покрытие путем протяжки волоконного световода через прозрачную феррулу. Отклонения сердцевин 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 Er<sup>3+</sup> 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 селективного 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 монито-

ринга 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].

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

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

дит 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) (Лимасол, 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 **6** печатных изданиях, **5** из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, **9** — в сборниках трудов конференций, **1** — в прочих изданиях.

## Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы. Далее приводится краткое изложение содержания работы по главам. В конце приводится список публикаций и формулируются защищаемые положения.

В **Главе 1** рассмотрены физические основы процессов, протекающих при поглощении фс импульсов в объеме прозрачного материала, в частности, кварцевого стекла. Обзорный материал, посвященный поперечным модам в волоконных световодах, а также основы теории связанных мод дают читателю представление о спектральных свойствах ВБР и параметрах, влияющих на эти свойства.

Волоконная брэгговская решетка (ВБР) представляет собой участок волоконного световода (ВС), в сердцевине которого индуцирована периодическая модуляция показателя преломления с периодом  $\Lambda_{\text{FBG}}$  (Рис. 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 отсутствие возмущения распространяются без взаимодействия друг с

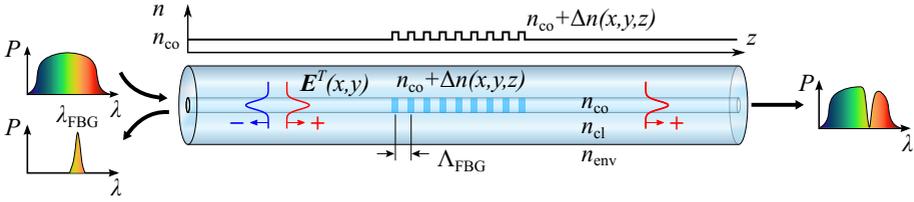


Рис. 1 — Волоконная брэгговская решетка.

другом. Наличие периодического возмущения  $\Delta n(x, y, z)$  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. Так, две моды, имеющие постоянные распространения  $\beta_\mu$  и  $\beta_\nu$ , взаимодействуют на решетке показателя преломления, если выполняются условие:

$$\beta_\mu \pm \beta_\nu - \frac{2\pi m}{\Lambda_{\text{FBG}}} = 0,$$

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. В частности, для одномодового ВС, поддерживающего распространение единственной поперечной моды  $\text{LP}_{01}$ , резонансная длина волны брэгговской решетки выражается как:

$$\lambda_{\text{FBG}} = \frac{2n_{\text{eff}}\Lambda_{\text{FBG}}}{m}.$$

Обзор методов фс лазерной записи ВБР, приведенный в Главе 1, позволяет составить историческую картину об основных этапах развития технологии, а также получить представление о существующих технологических ограничениях, связанных с тем или иным методом записи ВБР. Особое внимание в Главе 1 уделяется фс поточечному методу записи ВБР, при котором каждый штрих решетки создается за счет поглощения одного фс лазерного импульса при равномерном перемещении ВС (Рис. 2). В таком случае 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 массива ВБР с различными резонансными длинами волн.

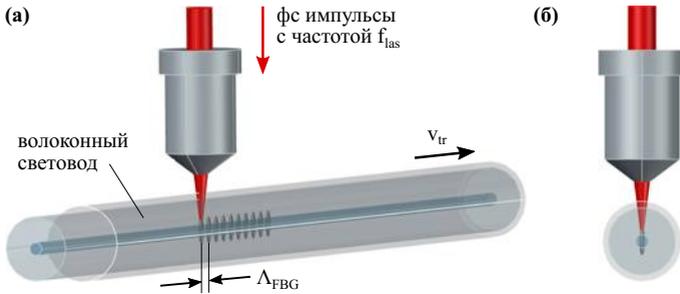


Рис. 2 — Прямая фокусировка фс импульсов при поточечной записи ВБР.

В **Главе 2** предлагается новый метод фс поточечной записи ВБР путем протяжки ВС с защитным полимерным покрытием через прозрачную стеклянную феррулу с помощью высокоточного линейного позиционера (Рис. 3). Ключевыми элементами созданной установки являются Yb:KMG фемтосекундный лазер Light Conversion PHAROS 6W ( $\lambda = 1026$  нм,  $\Delta t_p = 232$  фс,  $E_p \sim 100$  мкДж,  $f_{las} = 1$  кГц) и высокоточная линейная платформа позиционирования Aerotech ABL1000. Лазерный пучок с помощью системы поворотных зеркал и делителей пучка заводился на вход микрообъектива Mitutoyo 100× Plan Apo NIR HR ( $NA = 0.70$ ). Волоконный световод, в сердцевину которого производилась фокусировка пучка, продевался через феррулу со шлифованной боковой поверхностью, как это показано на вставке Рис. 3. Шлифовка позволяла компенсировать линзирование 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  $\approx 10$  мкм. Свободное пространство канала заполнялось иммерсионной жидкостью – глицерином. Это позволяло протягивать ВС через канал без трения, а также снизить влияние aberrаций для проходящего лазерного излучения. Для подстройки положения ВС в области фокусировки фс лазерного излучения феррула крепилась на 3-координатном пьезопозиционере Thorlabs MAX312D с диапазоном перемещений  $20 \times 20 \times 20$  мкм. С помощью светодиодной подсветки и КМОП-камеры выполнялась визуализация ВС в области фокусировки лазерного излучения. 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 уменьшения влияния ошибок позиционирования в поперечном направлении в методе используется обратная связь между положением сердцевинки ВС и точкой фокусировки фс лазерного пучка.

Эксперименты по фс поточечной записи ВБР производились в специализированном одномодовом ВС Fibercore SM1500(9/125)P с полиимидным защитным покрытием, стойким к высоким температурам (до 300 °С).

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 в области длины волны 1550 нм. 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 (Рис. 4).

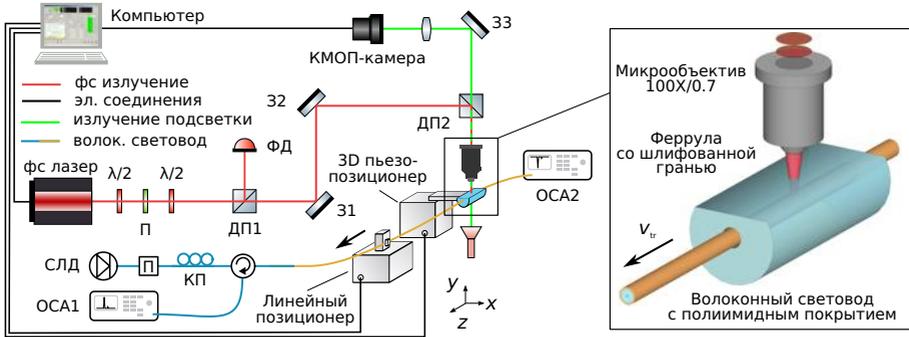


Рис. 3 — Схема установки для поточечной записи ВБР фемтосекундными лазерными импульсами. СЛД – суперлюминесцентный диод, П – поляризатор, КП – контроллер поляризации, ОСА1-2 – оптические спектральные анализаторы, ДП1-2 – делители пучка, 31-3 – поворотные зеркала, ФД – фотодиодный измеритель энергии лазерных импульсов.

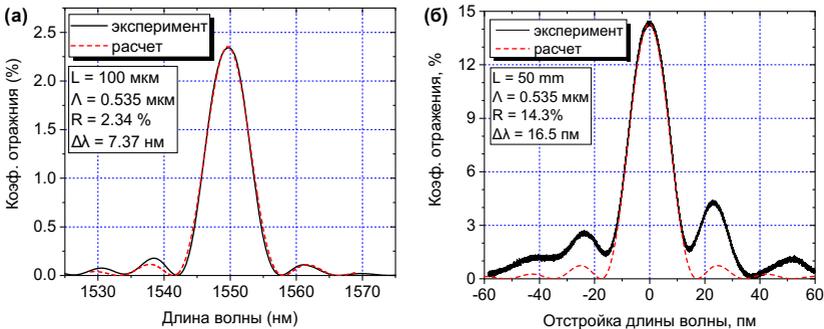


Рис. 4 — Экспериментальные и расчетные спектры отражения фс поточечных ВБР длиной 100 мкм (а) и 50 мм (б).

Далее производилась доработка уже созданной экспериментальной установки (Рис. 3) с целью записи ВБР с фазовыми  $\pi$ -сдвигами в структуре в пассивном ВС с полиимидным защитным покрытием (Fiberscore SM1500(9/125)P) и активном эрбиевом ВС с сохранением поляризации (Coractive ER35-7-PM). Зажим для волокна, который при записи однород-

ных ВБР был жестко закреплен на высокоточном линейном позиционере Aerotech ABL1000, в данном случае был установлен на пьезоактюатор с направлением смещения вдоль движения позиционера. Во время записи ВБР в выбранный момент на пьезоактюатор подавалось добавочное напряжение, что обеспечивало смещение ВС 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. Величина и момент продольного смещения актюатора, а вместе с ним и ВС, устанавливались через управляющий компьютер, который также обеспечивал согласованность работы других устройств, участвующих в процессе записи.

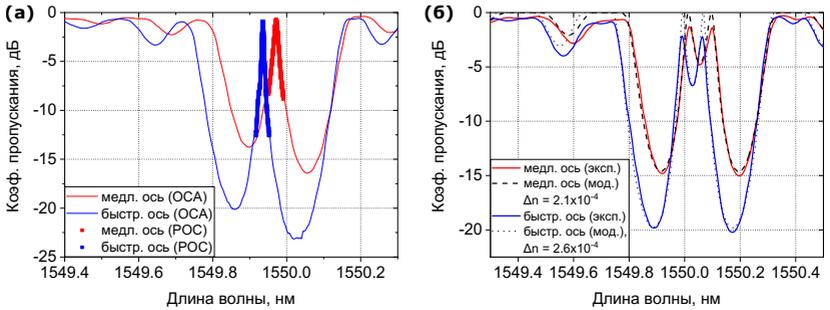


Рис. 5 — (а) Спектры пропускания 8.6-мм ВБР с фазовым  $\pi$ -сдвигом в центре структуры, измеренные для быстрой и медленной поляризационных осей с помощью ОСА и перестраиваемого РОС-лазера. (б) Экспериментальные и расчетные спектры пропускания 8-мм ВБР с двумя фазовыми  $\pi$ -сдвигами в структуре для быстрой и медленной поляризационных осей.

На Рис. 5а приведены спектры пропускания 8.6-мм ВБР с фазовым  $\pi$ -сдвигом в центре структуры. Измеренная величина отстройки между поляризационными осями  $\Delta\lambda_p \approx 37$  пм, 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 пм и 15.5 пм для быстрой и медленной поляризационных осей соответственно. 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. Хорошее соответствие между экспериментальными и расчетными данными (Рис. 5б), полученными для спектров пропускания записанной ВБР, свидетельствует о высокой точности положений и величин фазовых сдвигов.

Экспериментальная возможность записи ВБР с фазовым  $\pi$ -сдвигом в структуре была использована для создания волоконного эрбиевого лазера с

распределенной обратной связью (РОС-лазера). Резонатором данного лазера служила 37-мм ВБР с фазовым  $\pi$ -сдвигом в центре, записанная фс поточечным методом в одномодовом ВС с сохранением поляризации Coractive ER35-7-PM, легированном ионами эрбия. Излучение накачки лазерного диода с длиной волны 976 нм и выходной мощностью до 600 мВт заводилось в спектрально-селективный ответвитель 980/1550 нм, после чего попадало в активный участок ВС, содержащий ВБР. Измерение выходных характеристик РОС-лазера производилось для лазерной генерации, направленной в противоположном направлении относительно направления накачки. Сначала при помощи оптического спектрального анализатора был измерен спектр генерации РОС-лазера (Рис. 6а) и его дифференциальная эффективность (Рис. 6б). Как можно видеть из Рис. 6а, лазерная генерация происходит при достаточно высоком 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. 6б видно, что порог генерации достигался при мощности накачки 10 мВт, а значение дифференциальной эффективности составило 0.1%. Для измерения относительного шума интенсивности собранного РОС-лазера использовался 5-ГГц фотодиод Thorlabs DET08CFC и радиочастотный анализатор сигналов Agilent N9010A. Из измеренной спектральной плотности мощности фототока были получены амплитуда и частота пика релаксационных осцилляций:  $-96$  дБ/Гц на частоте  $\approx 690$  кГц. Ширина линии генерации РОС-лазера при максимальной достигнутой выходной мощности 510 мВт была измерена с помощью схемы автогетеродина [20]. Ширина пика биений, измеренная при усреднении по времени  $>1$  с, составила  $\approx 40$  кГц на полувысоте амплитуды, что соответствует ширине линии генерации РОС лазера  $\approx 20$  кГц.

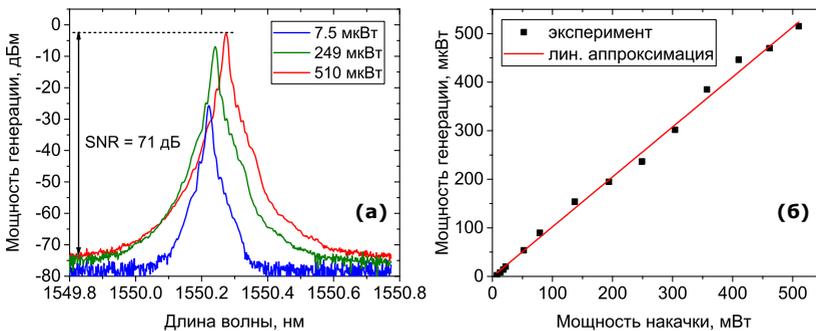


Рис. 6 — (а) Спектр эрбиевого РОС-лазера, измеренный для обратного направления генерации лазерного излучения при мощности накачки 505 мВт. (б) Зависимость мощности генерации РОС-лазера от мощности накачки для обратного направления генерации лазерного излучения.

В **Главе 3** приводятся экспериментальные результаты по фс поточечной записи ВБР в многосердцевинных волоконных световодах (МВС). Запись массивов ВБР производилась в двух типах 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) с периодом витка 15.4 мм). Схематичное представление поперечного сечения для указанных 7-сердцевинных ВС представлено на Рис. 7. В обоих случаях ВС имели одну центральную сердцевину и шесть боковых сердцевин, расположенных в углах правильного шестиугольника. Все сердцевинки поддерживали распространение оптического сигнала в одномодовом режиме в области длин волн 1450–1600 нм. Модификация 7-сердцевинного ВС с прямыми сердцевинами (НЦВО РАН) производилась через защитное полиимидное покрытие. При этом использовалась феррула с диаметром внутреннего канала  $\approx 160$  мкм, что немногим превосходит внешний диаметр световода (154 мкм). В случае 7-сердцевинного ВС с закрученными боковыми сердцевинами (Fibercore SSM-7C1500(6.1/125)) модификация производилась через защитное акрилатное покрытие. В данном случае диаметр оболочки световода составлял 186.7 мкм, а диаметр внутреннего канала феррулы  $\approx 202$  мкм. В ходе экспериментов было 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. Способ записи ВБР в закрученной по спирали боковой сердцевине МВС реализован впервые в данной работе. Обсуждаются особенности метода записи и делаются оценки геометрических параметров таких ВБР.

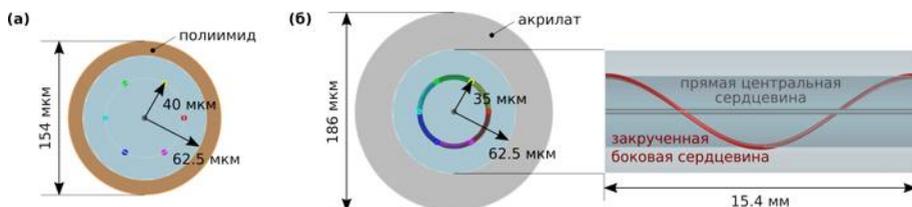


Рис. 7 — Геометрические параметры 7-сердцевинных волоконных световодов, используемых в экспериментах: (а) НЦВО РАН и (б) Fibercore SSM-7C1500(6.1/125).

При модификации 7-сердцевинных ВС был использован видоизмененный узел фокусировки фс лазерных импульсов. В частности, стенки феррулы шлифовались под углом  $90^\circ$ , что позволяло точно выставить точку модификации показателя преломления внутри МВС по двум направлениям, как это показано на Рис. 8. Фокусировка фс лазерного пучка и визуализация МВС в плоскости XZ осуществлялась с помощью микрообъектива Mitutoyo  $50\times$  Plan Apo NIR HR ( $NA = 0.65$ ). Дополнительный объектив

устанавливался для визуализации положения МВС в плоскости YZ. Положение области фокусировки  $f_c$  лазерного пучка варьировалось в зависимости от сердцевины, в которой производилась запись. Фиксация МВС на линейном трансляторе Aerotech ABL1000 осуществлялась с помощью специализированного зажима с угловой степенью свободы. Это позволяло выставить необходимую ориентацию МВС перед записью ВБР.

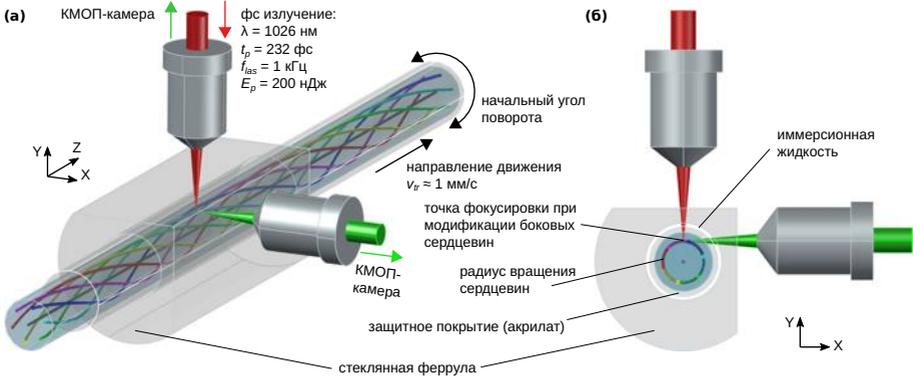


Рис. 8 — Фокусировка  $f_c$  пучка при поточечной записи ВБР в МВС со скрученными сердцевинами.

Сначала в одной из боковых сердцевины 7-сердцевинного волоконного световода НЦВО РАН производилась запись линейно chirпированной ВБР с длиной  $L = 10$  мм, которая имела начальный период  $\Lambda_s = 1.07$  мкм и конечный период  $\Lambda_f = 1.072$  мкм. 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. 9а 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. Далее производилась запись аподизированной ВБР в следующей боковой сердцевине МВС. Длина образца составила  $L = 2$  мм, а период структуры  $\Lambda = 1.074$  мкм. Для обеспечения переменного коэффициента перекрытия области модификации показателя преломления с полем моды выбранной сердцевины начальное положение точки фокусировки  $f_c$  импульсов находилось вне сердцевины волокна на расстоянии 10 мкм от её центра, а конечное положение находилось на расстоянии 10 мкм с противоположной стороны. При заданных параметрах записи длина, на которой ВБР пересекает сердцевину, составляет около 0.55 мм. Как видно из спектра отражения (Рис. 9б), коэффициент подавления боковых пиков находится на уровне 17.3 дБ. Как и в случае с chirпированной ВБР,

изгибная деформация ( $R = 32.5$  мм) не приводит к заметному изменению отражательной способности ВБР, а также изменению формы резонансного пика. Измеренная величина спектрального сдвига также составила  $\Delta\lambda = \pm 1.45$  нм. Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования МВС для задач восстановления величин радиуса и направления изгиба волоконного световода с помощью записанных в световоде ВБР.

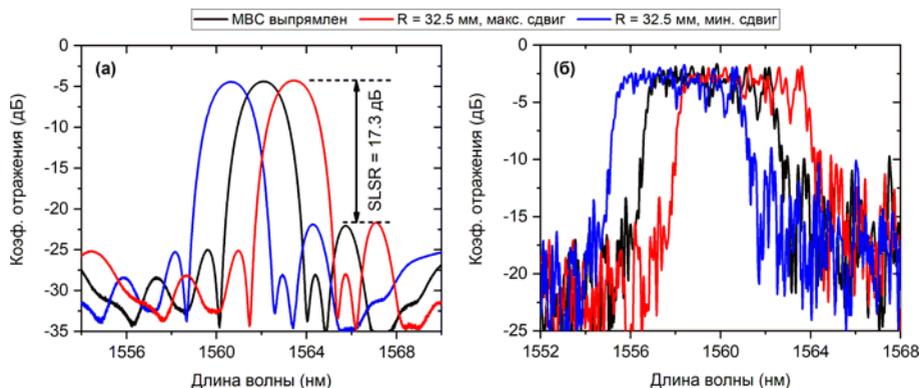


Рис. 9 — Спектры отражения линейно аподизированной (а) и чирпированной (б) ВБР, записанных в боковых сердцевинах 7-сердцевинного волоконного световода НЦВО РАН. Спектры измерялись для выпрямленного участка МВС (черный) и изогнутого (красный и синий).

Для того, чтобы показать возможность записи массива ВБР в выбранной закрученной боковой сердцевине 7-сердцевинного ВС Fiberscore SSM-7C1500(6.1/125) был проделан следующий эксперимент. Сначала фокус микрообъектива смещался в поперечном направлении относительно центра МВС на расстояние 35 мкм. Таким образом точка фс модификации показателя преломления находилась на радиусе вращения боковых сердцевин. В процессе записи 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.10). 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 [21].

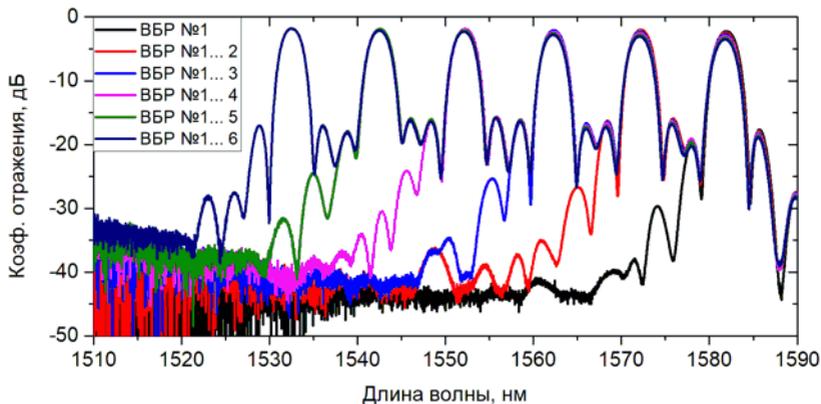


Рис. 10 — Спектры отражения массива ВБР, записанного в выбранной боковой сердцевине 7-сердцевинного ВС с закрученными боковыми сердцевинами.

В **Главе 4** приводятся результаты исследования по фс поточечной записи ВБР в многомодовом волоконном световоде (ММ ВС) с градиентным профилем показателя преломления Corning 62.5/125. 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 сердцевинны. Для созданных образцов ВБР исследуются особенности спектральных характеристик, а также с помощью оптического микроскопа производится визуализация.

Наглядная демонстрация спектрально-селективных свойств фс поточечных ВБР была продемонстрирована в эксперименте, в котором три однородных ВБР длиной 5.26 мм записывались в центральной части сердцевинны (Рис. 11). Сначала производилась запись ВБР №1 в центральной части сердцевинны при энергии фс импульсов  $E_p = 180$  нДж, затем запись ВБР №2 и ВБР №3 в периферийной части сердцевинны при энергии импульсов  $E_p = 270$  нДж. Все ВБР были совмещены по продольной координате, а поперечный отступ вдоль оси  $x$  составил  $\approx 10$  мкм. Как видно из спектра отражения (Рис. 12), для резонансов, связанных с периферийными ВБР №2–3, бóльшую амплитуду имеет пик, связанный с модой  $LP_{11}$  (группа 2), несмотря на то, что доля мощности оптического сигнала в данной моде значительно меньше, чем для моды  $LP_{01}$  (группа 1).

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

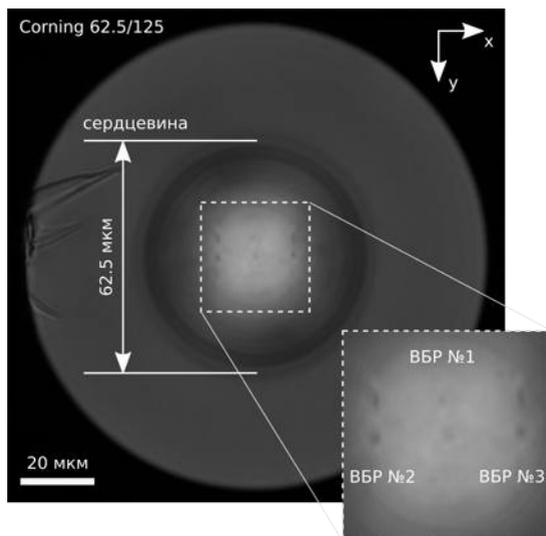


Рис. 11 — Микрофотография скоса многомодового ВС в области записи массива ВБР.

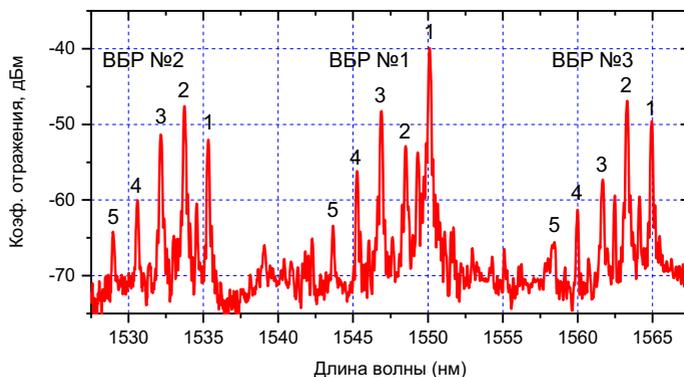


Рис. 12 — Спектры отражения массива ВБР, записанного в ММ ВС с градиентным профилем показателя преломления: ВБР №1 записана в центральной части сердцевины, а ВБР №2–3 с отступом  $\approx 10$  мкм.

может быть существенно улучшено по сравнению с другими работами по ВКР-лазерам с прямой диодной накачкой, вплоть до селективного возбуждения основной поперечной моды.

Схема ВКР-лазера на основе градиентного ММ ВС приведена на Рис. 13. Для защиты мощных ММ ЛД аналогично работе [22] 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 [22], заведенная мощность ММ ЛД на 915 нм была увеличена до  $\approx 60$  Вт, что позволило уменьшить длину градиентного световода до 1.1 км. Селективные зеркала З1–3 разделяли излучение ВКР-генерации и накачки.

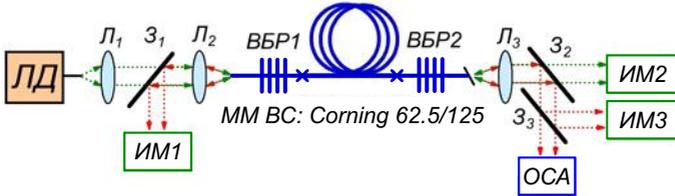


Рис. 13 — Схема ВКР-лазера на основе градиентного ММ ВС.

Сначала было проведено сравнение спектров генерации ВКР-лазера длиной 2.5 км для нескольких типов выходных зеркал (Рис. 14а). 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 [22], 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. 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.

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. 14б показано, что спектр генерации лазера при фиксированной выходной мощности 4.8 Вт незначительно изменяется при уменьшении длины резонатора. При сокращении длины градиентного световода наблюдался стабильный одномодовый режим генерации. Независимые измерения выходного пучка для лазера длиной 1.1 км показали, что

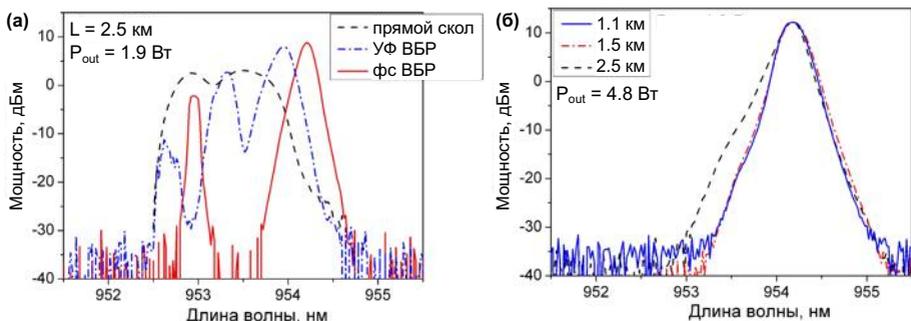


Рис. 14 — Спектр генерации ВКР-лазера длиной 2.5 км при выходной мощности 1.9 Вт для разных типов выходного зеркала: торец сколотого под прямым углом световода и ВБР, записанные с помощью непрерывного УФ или импульсного фс лазеров. (б) Спектр генерации ВКР-лазера с фс выходной ВБР при мощности генерации 4.8 Вт для длин лазера 2.5, 1.5 и 1.1 км.

значение его параметра качества  $M^2$  было лучше, чем 1.2, т. е. генерация близка к одномодовой.

В **закл<sup>ю</sup>чении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

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 сердцевины, 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 нм 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 нм, что является минимальным известным значением, полу-

- ченным 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.

## Наиболее значимые публикации автора по теме диссертации

1. Femtosecond point-by-point inscription of Bragg gratings by drawing a coated fiber through ferrule / A. V. Dostovalov, A. A. Wolf, A. V. Parygin, V. E. Zyubin, S. A. Babin // Optics Express. — 2016. — т. 24, № 15. — с. 16232–16237.

2. Селекция мод в волоконном ВКР-лазере с прямой диодной накачкой при использовании ВБР в многомодовом градиентном световоде / С. И. Каблуков, Е. А. Злобина, М. И. Скворцов, И. Н. Немов, А. А. Вольф, А. В. Достовалов, С. А. Бабин // Квантовая электроника. — 2016. — т. 46, № 12. — с. 1106—1109.
3. Femtosecond-pulse inscription of fiber Bragg gratings with single or multiple phase-shifts in the structure / A. Wolf, A. Dostovalov, M. Skvortsov, K. Raspopin, A. Parygin, S. Babin // Optics & Laser Technology. — 2018. — т. 101. — с. 202—207.
4. Фемтосекундная запись структур показателя преломления в многомодовых и многосердцевинных волоконных световодах / А. А. Вольф, А. В. Достовалов, С. Вабниц, С. А. Бабин // Квантовая электроника. — 2018. — т. 48, № 12. — с. 1128—1131.
5. Arrays of fiber Bragg gratings selectively inscribed in different cores of 7-core spun optical fiber by IR femtosecond laser pulses / A. Wolf, A. Dostovalov, K. Bronnikov, S. Babin // Optics Express. — 2019. — т. 27, № 10. — с. 13978.

## Список литературы

1. Fibre gratings and their applications / S. A. Vasil'ev, O. I. Medvedkov, I. G. Korolev, A. S. Bozhkov, A. S. Kurkov, E. M. Dianov // Quantum Electronics. — 2005. — т. 35, № 12. — с. 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. — т. 31, № 11. — с. 1603.
3. Sapphire fiber Bragg grating sensor made using femtosecond laser radiation for ultrahigh temperature applications / D. Grobnic, S. J. Mihailov, C. W. Smelser, H. Ding // IEEE Photonics Technology Letters. — 2004. — т. 16, № 11. — с. 2505—2507.
4. *Mihailov S. J.* Fiber Bragg Grating Sensors for Harsh Environments // Sensors. — 2012. — т. 12, № 12. — с. 1898—1918.
5. Fiber Bragg gratings made with a phase mask and 800-nm femtosecond radiation / S. J. Mihailov, C. W. Smelser, P. Lu, R. B. Walker, D. Grobnic, H. Ding, G. Henderson, J. Unruh // Optics Letters. — 2003. — т. 28, № 12. — с. 995.
6. Direct writing of fibre Bragg gratings by femtosecond laser / A. Martinez, M. Dubov, I. Khrushchev, I. Bennion // Electronics Letters. — 2004. — т. 40, № 19. — с. 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. — т. 40, № 16. — с. 2643.
8. Long weak FBG sensor interrogation using microwave photonics filtering technique / *A. L. Ricchiuti, D. Barrera, S. Sales, L. Thevenaz, J. Capmany* // *IEEE Photonics Technology Letters*. — 2014. — т. 26, № 20. — с. 2039–2042.
9. Distributed feedback ytterbium fiber laser: experiment and analytical model / *M. A. Nikulin, D. E. Churin, A. A. Vlasov, E. V. Podivilov* // *Journal of the Optical Society of America B*. — 2010. — т. 27, № 7. — с. 1414.
10. Fiber strain sensor based on a pi-phase-shifted Bragg grating and the Pound-Drever-Hall technique / *D. Gatti, G. Galzerano, D. Janner, S. Longhi, P. Laporta* // *Optics Express*. — 2008. — т. 16, № 3. — с. 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. — т. 36, № 10. — с. 1833.
12. Shape Sensing Techniques for Continuum Robots in Minimally Invasive Surgery: A Survey / *C. Shi, X. Luo, P. Qi, T. Li, S. Song, Z. Najdovski, T. Fukuda, H. Ren* // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. — 2017. — т. 64, № 8. — с. 1665–1678.
13. Multi-Core Optical Fibers With Bragg Gratings as Shape Sensor for Flexible Medical Instruments / *F. Khan, A. Denasi, D. Barrera, J. Madrigal, S. Sales, S. Misra* // *IEEE Sensors Journal*. — 2019. — т. 19, № 14. — с. 5878–5884.
14. *Pevac S., Donlagic D., Donlagic D.* Multiparameter fiber-optic sensors : a review // *Optical Engineering*. — 2019. — т. 58, № 7. — с. 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. — т. 26, № 4. — с. 1–6.
16. Multiparameter point sensing with the FBG-containing multicore optical fiber / *A. Wolf, K. Bronnikov, A. Dostovalov, V. Simonov, V. Terentyev, S. Babin* // *Proc. SPIE 11354, Optical Sensing and Detection VI* / под ред. F. Berghmans, A. G. Mignani. — Strasbourg, France : SPIE, 2020. — 113540F.
17. Narrowband Raman fibre laser based on a dual-core optical fibre with FBGs inscribed by femtosecond radiation / *M. I. Skvortsov, S. R. Abdullina, A. A. Wolf, I. A. Lobach, A. V. Dostovalov, S. A. Babin* // *Quantum Electronics*. — 2018. — т. 48, № 12. — с. 1089–1094.

18. Random Raman fiber laser based on a twin-core fiber with FBGs inscribed by femtosecond radiation / M. I. Skvortsov, S. R. Abdullina, A. A. Wolf, A. V. Dostovalov, A. A. Vlasov, I. A. Lobach, S. Wabnitz, S. A. Babin // Optics Letters. — 2019. — т. 44, № 2. — с. 295–298.
19. Nearly single-mode Raman lasing at 954 nm in a graded-index fiber directly pumped by a multimode laser diode / E. A. Zlobina, S. I. Kablukov, A. A. Wolf, A. V. Dostovalov, S. A. Babin // Optics Letters. — 2017. — т. 42, № 1. — с. 9–12.
20. *Okoshi T., Kikuchi K., Nakayama A.* Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum // Electronics Letters. — 1980. — т. 16, № 16. — с. 630.
21. Optimizing the net reflectivity of point-by-point fiber Bragg gratings: the role of scattering loss / R. J. Williams, N. Jovanovic, G. D. Marshall, G. N. Smith, M. J. Steel, M. J. Withford // Optics Express. — 2012. — т. 20, № 12. — с. 13451.
22. 954 nm Raman fiber laser with multimode laser diode pumping / E. A. Zlobina, S. I. Kablukov, M. I. Skvortsov, I. N. Nemov, S. A. Babin // Laser Physics Letters. — 2016. — т. 13, № 3. — с. 035102.

