

ОТЗЫВ

официального оппонента Вартапетова Сергея Кареновича
на диссертационную работу Вольфа Алексея Анатольевича

на тему:

«ПОТОЧЕЧНАЯ ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ЗАПИСЬ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК
В СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ»,

представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.05 — «Оптика»

Диссертационная работа А.А. Вольфа посвящена исследованию физических принципов и основ поточечной записи волоконных Брэгговских решеток (ВБР) с помощью фемтосекундных (фс) лазерных импульсов. Технологии и методы записи ВБР в специализированных волоконных световодах активно исследуются в ведущих научных лабораториях во всем мире. Создание специальных отражающих и селектирующих Брэгговских структур в волоконных световодах позволяет успешно их применять при создании волоконных лазеров и датчиков. Основная **новизна** исследования заключается в том, что предложена техника поточечной записи ВБР в волоконном световоде с защитным покрытием при протяжке волоконного световода через прозрачную феррулу, предложен метод формирования фазовых сдвигов при фс поточечной записи ВБР с использованием пьезоэлемента, продемонстрирована возможность записи ВБР в каждой из сердцевин 7-сердцевинного волоконного световода с прямыми сердцевинами и с сердцевинами закрученными по спирали, изучена возможность селектирования поперечных мод в многомодовом градиентном волоконном световоде с помощью ВБР, созданных методом фемтосекундной поточечной записи.

Разработка методов создания специальных Брэгговских структур в волоконных световодах необходима для создания современных систем мониторинга физических величин, лазеров с уникальными характеристиками и для улучшения качества излучения некоторых лазерных систем. Поэтому выбранная тема исследований **актуальна и практически значима** для создания волоконных компонентов со специальными оптическими характеристиками, которые востребованы в научных и технологических целях.

К наиболее значимым и новым результатам, представленным в диссертационной работе следует отнести:

1. Предложен новый метод формирования фазовых сдвигов при фемтосекундной поточечной записи ВБР с использованием подвижки на базе пьезоэлемента. Осуществлена запись 37-мм ВБР с фазовым π -сдвигом в активном 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.

2. Впервые продемонстрирована возможность записи неоднородных ВБР в каждой из сердцевин 7-сердцевинного волоконного световода с прямыми сердцевинами.

3. 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.

4. 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).

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации 128 страниц, 56 рисунков и 4 таблицы. Список цитированной литературы содержит 151 наименование.

Во **введении** раскрывается актуальность диссертационной работы, определены задачи, изложена структура диссертации и приведено ее краткое содержание, а также сформулированы положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе рассмотрены физические основы процессов, протекающих в процессе поглощения фс импульсов в объеме прозрачного материала, в частности кварцевого стекла. Представлен обзор литературы, посвященный поперечным модам в волоконных световодах, основам теории связанных мод и методам фемтосекундной лазерной записи ВБР.

Во второй главе представлен новый метод поточечной записи ВБР путем протяжки волоконного световода с защитным покрытием через прозрачную стеклянную феррулу с помощью высокоточного линейного позиционера. Показана возможность создания ВБР с разной длиной, а также с фазовыми сдвигами в структуре. Для полученных образцов изучены спектральные характеристики, а также проведено сравнение спектральных характеристик с расчетными.

Третья глава посвящена исследованию поточечной записи ВБР в 7-сердцевинных волоконных световодах с помощью фемтосекундных лазерных импульсов. Представлены экспериментальные результаты по записи массивов ВБР в двух разных типах 7-сердцевинных волоконных световодов, имеющих как прямые, так и закрученные по спирали сердцевинны. Способ записи ВБР в сердцевинах многомодового волоконного световода с закрученными боковыми сердцевинами реализован впервые. Обсуждаются особенности метода записи, и делаются оценки геометрических параметров таких ВБР.

В четвертой главе представлены результаты исследования поточечной записи ВБР в многомодовом волоконном световоде с градиентным профилем показателя преломления с помощью фемтосекундных лазерных импульсов. Также исследуется возможность селективного селектирования основной поперечной моды в ВКР-лазере на основе градиентного многомодового волоконного световода с прямой диодной накачкой. Для этого в качестве выходного зеркала используется образец слабоотражающей ВБР, созданной с помощью поточечной записи фемтосекундным лазером. Показано, что в такой конфигурации при уровнях выходной мощности до нескольких ватт качество пучка может быть существенно улучшено по сравнению с известными образцами ВКР-лазеров с прямой диодной накачкой, вплоть до селективного селектирования основной поперечной моды.

В диссертационной работе получены следующие научные результаты:

1. Автором продемонстрирован новый метод фемтосекундной поточечной записи ВБР через защитное покрытие путем протяжки волоконного световода через прозрачную 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 нм при коэффициенте отражения 14.3%.

2. Предложен новый метод введения фазовых сдвигов в структуре ВБР при фемтосекундной поточечной записи. Задание фазового сдвига осуществляется в процессе записи ВБР при помощи продольного сдвига волокна с помощью 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 π -сдвигами. Запись ВБР осуществлялась через защитное полиимидное покрытие световода. Экспериментально измеренная ширина окна пропускания 34-мм ВБР с фазовым π -сдвигом составила 0.55 нм, что является минимальным известным значением, полученным для метода фемтосекундной поточечной записи. Показано, что 37-

мм ВБР с фазовым π -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, а также каждой из сердцевин 7-сердцевинного ВС с закрученными по спирали сердцевинами с помощью фемтосекундного поточечного метода. На основе точечного массива ВБР в 7-сердцевинном волоконном световоде 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 LP₀₁ 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

Результаты, приведенные в данной работе, можно считать обоснованными и достоверными, поскольку получены с использованием стандартных методов, современного экспериментального оборудования и подкреплены наглядными результатами моделирования. Материалы диссертационного исследования опубликованы в авторитетных российских и зарубежных научных изданиях, а ссылки на эти работы не содержат существенной критики или опровержений результатов. Широкие возможности применения полученных результатов в науке и технике показывают практическую ценность проведенных исследований.

Обширный обзор литературы достаточно полно раскрывает этапы становления исследуемой тематики и не оставляет сомнений в новизне полученных результатов и научных положений, сформулированных в диссертации Вольфа А. А.

По диссертационной работе имеются следующие **замечания**:

1. В работе используется коммерчески доступный фокусирующий объектив с высокой числовой апертурой, рассчитанный на фокусировку излучения на поверхность материала, при этом в работе данный объектив используется для фокусировки излучения в объем прозрачного материала. В работе отсутствуют данные о глубине фокусировки и оценка искажения размера фокального объема при фокусировке в объем материала, что является важным параметром для исследуемых применений. В работе не приведена расходимость излучения фемтосекундного лазера, что препятствует корректной оценке размера перетяжки в фокусе объектива.
3. Согласно формуле, из параграфа 2.1.1 и характеристик экспериментальной установки, приведенных в параграфе 2.1.2 можно оценить, что диаметр перетяжки лазерного излучения составляет около 0,3 мкм. В тоже время период штрихов при записи ВБР в большинстве экспериментов около 0,5 мкм. Данные величины являются весьма близкими, что требует дополнительного исследования влияния диаметра перетяжки (области модификации) лазерного излучения на результат формирования ВБР.
4. В работе представлена система автоподстройки положения сердцевины волоконного световода относительно области фокусировки фемтосекундных лазерных импульсов. Частота подстройки согласно работе не выше 40 раз в секунду, в тоже время при частоте лазера 1кГц за время между подстройкой происходит запись 25 штрихов ВБР. В работе не показана достаточность быстрогодействия данной системы, что особенно важно для записи коротких ВБР, а также не описана методика оценки ошибок позиционирования в изготовленных ВБР.
5. В работе не произведена оценка изменения показателя преломления после воздействия фемтосекундных импульсов.
6. В параграфе 4.2. «Селектирование основной поперечной моды в волоконном ВКР-лазере с прямой диодной накачкой с помощью фс поточечной ВБР» представлены результаты использования ВБР созданной методом фемтосекундной поточечной записи в качестве одного из зеркал резонатора ВКР лазера. При этом в работе не отражены причины выбора ВБР с отражением именно 4%.
7. В параграфе 4.2. «Селектирование основной поперечной моды в волоконном ВКР-лазере с прямой диодной накачкой с помощью фс поточечной ВБР» период записанной решетки $\Lambda_{\text{FBG}} = 0.645$ мкм, в тоже время размер области модификации ≈ 1 мкм, то есть штрихи записаны с перекрытием. Не отмечено, как это отражается на качестве ВБР.

Сделанные замечания являются второстепенными и не сказываются на общей положительной оценке работы. Диссертация Вольфа А.А. является законченным научным исследованием, обладающим значительно научной значимостью. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в

15 научных работах, из которых 9 в трудах конференции, 5 в ведущих профильных российских и зарубежных журналах из списка ВАК.

Таким образом, диссертационная работа Вольфа А.А. «Поточечная фемтосекундная запись брэгговских решеток в специализированных волоконных световодах» является завершенной научно-исследовательской работой, соответствующей специальности 01.04.05 — «Оптика», полностью отвечает требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 — «Оптика».

Официальный оппонент:

директор, Общество с ограниченной ответственностью «Оптосистемы»
кандидат физико-математических наук

Вартапетов Сергей Каренович



Почтовый адрес:

108841, г. Москва, г. Троицк, Калужское ш., д.4/1

Тел.: +7 (495) 231-08-48

e-mail: vartapetov@optosystems.ru

Специальность ВАК – 01.04.03 «Радиофизика»