

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИАиЭ СО РАН,  
чл.-корр. РАН  
Бабин Сергей Алексеевич

22 октября 2020 г.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН)

Диссертация «Поточечная фемтосекундная запись брэгговских решеток в специализированных волоконных световодах» выполнена в лаборатории №17 ИАиЭ СО РАН.

В период подготовки диссертации соискатель Вольф Алексей Анатольевич работал в ИАиЭ СО РАН в должностях инженера-программиста и младшего научного сотрудника.

В 2013 году окончил магистратуру Физического факультета Новосибирского государственного университета по направлению «Физика».

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2020 году ИАиЭ СО РАН.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, член-корреспондент Бабин Сергей Алексеевич, заведующий лабораторией №17 ИАиЭ СО РАН, директор ИАиЭ СО РАН.

Диссертация «Поточечная фемтосекундная запись брэгговских решеток в специализированных волоконных световодах» была рассмотрена на межлабораторном семинаре учебно-научного центра «Квантовая оптика» ИАиЭ СО РАН 15 октября 2020 года.

На семинаре присутствовали:

Шалагин Анатолий Михайлович, акад. РАН, ИАиЭ СО РАН

Бабин Сергей Алексеевич, чл.-корр. РАН, ИАиЭ СО РАН

Каблуков Сергей Иванович, д.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Подивилов Евгений Вадимович, д.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Шапиро Давид Абрамович, д.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Фруммин Леонид Лазаревич, д.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Корольков Виктор Пвлович, д.т.н., ИАиЭ СО РАН  
Перминов Сергей Вадимович, к.ф.-м.н., ИФП СО РАН  
Лобач Иван Александрович, к.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН  
Кузнецов Алексей Геннадьевич, к.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН  
Терентьев Вадим Станиславович, к.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН  
Харенко Денис Сергеевич, к.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН  
Абдулина Софья Рафисовна, к.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН  
Мезенцев Владимир Константинович, к.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН  
Достовалов Александр Владимирович, к.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН  
Ватник Илья Дмитриевич, к.ф.-м.н., НГУ  
Немыкин Антон Владимирович, ИАиЭ СО РАН  
Скворцов Михаил Игоревич, ИАиЭ СО РАН  
Немов Илья Николаевич, ИАиЭ СО РАН  
Ткаченко Алина Юрьевна, ИАиЭ СО РАН  
Гаськов Максим Петрович, НГУ  
Калмыков Николай Игоревич, НГУ

По результатам рассмотрения диссертации принято следующее заключение

#### **Актуальность**

Традиционный метод создания волоконных решеток (ВБР) основан на использовании УФ лазерного излучения и фоточувствительных волоконных световодов. Альтернативным и бурно развивающимся направлением создания ВБР 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 запись через защитное покрытие волоконного световода, которое прозрачно для видимого/ИК фс лазерного излучения. Поточечный метод записи ВБР с помощью фс лазерных импульсов можно отнести к наиболее перспективным, поскольку он позволяет контролировать целый ряд параметров решетки: длину, период, функцию продольного коэффициента связи. Благодаря точному контролю над положением области модификации показателя преломления внутри волоконного световода, метод поточечной записи получил широкое распространение для создания ВБР с нестандартной геометрией. Ограниченная в малом объеме (~1-10 мкм<sup>3</sup>) модуляция показателя преломления делает возможным запись ВБР в волоконных

световодах со сложной пространственной структурой, в частности, многомодовых и многосердцевинных волоконных световодах.

Основная цель диссертационного исследования Вольфа А. А. сформулирована как разработка методов прямой фемтосекундной записи периодических структур показателя преломления (волоконных решеток) в специализированных волоконных световодах для сенсорных и лазерных применений. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

- 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;
- 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 в зависимости от длины ВБР и положения фазового сдвига;
- 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;
- 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.
- 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.
- Исследовать влияние пространственного положения фс поточечной ВБР, записанной в многомодовом градиентном волоконном световоде, на эффективность селектирования поперечных мод. Создать ВБР, селектирующую основную поперечную моду  $\text{LP}_{01}$  световода, исследовать данную ВБР в качестве выходного зеркала резонатора ВКР-лазера с прямой диодной накачкой.

#### **Личное участие соискателя**

В ходе выполнения работ Вольф А. А. планировал все эксперименты, принимал активное участие их проведении, моделировании, обработке и обсуждении результатов, подготовке статей. При выполнении диссертационной работы Вольф А. А. проявил себя

квалифицированным научным сотрудником, способным самостоятельно решать задачи и проводить исследования на высоком научном уровне.

### **Научная новизна**

В диссертации получены следующие новые научные результаты:

- 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.
- 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 лазера с распределенной обратной связью 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.
- Впервые продемонстрирована возможность записи неоднородных ВБР в каждой из сердцевин 7-сердцевинного волоконного световода с прямыми сердцевинами.
- 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.
- 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).

### **Степень достоверности результатов**

Все полученные результаты не противоречат известным научным положениям, экспериментам и теоретическим результатам других работ. Все экспериментальные

результаты получены с применением современных методов исследования, а измерения проведены с помощью точных калиброванных приборов. Научные положения и выводы, сформулированные в диссертации, обоснованы полученными в работе экспериментальными и расчётными результатами.

#### **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. ВБР с фазовыми сдвигами в структуре являются ключевым элементом в лазерных системах с распределенной обратной связью, а также могут быть использованы в качестве высокочувствительных датчиков физических величин. Результаты, полученные по записи ВБР в выбранной сердцевине многосердцевинного волоконного световода, имеют высокое практическое значение для создания распределенных трёхмерных датчиков изгиба, многопараметрических датчиков, а также распределенных брэгговских зеркал для волоконных лазеров на основе данного типа волоконного световода. Результаты, полученные для поточечных ВБР в многомодовом градиентном волоконном световоде, позволяют значительно улучшить выходные характеристики ВКР-лазера.

#### **Соответствие специальности**

Диссертационная работа соответствует специальности 01.04.05 «Оптика», так как тематика и методы исследования соответствуют паспорту специальности в части физико-математических наук.

#### **Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем**

Результаты работ по теме диссертации были доложены на следующих конференциях и семинарах: Российский семинар по волоконным лазерам (Новосибирск, 2016 и 2018 гг.), Международный симпозиум Fundamentals of Laser Assisted Micro- & Nanotechnologies (FLAMN) (Санкт-Петербург, 2016 г.), Международная конференция Conference on Lasers & Electro-Optics / Europe and European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC) (Мюнхен, Германия, 2015, 2017 и 2019 гг.), Международная конференция International Conference Laser Optics (ICLO) (Санкт-Петербург, 2016 и 2018 гг.), Международная конференция SPIE Photonics Europe (Страсбург, Франция, 2018 г.), Европейский воркшоп European Workshop on Optical Fibre Sensors (EWOFS) (Лимассол, Кипр, 2019 г.).

Результаты диссертационной работы достаточно подробно и в полном объёме отражены в шести опубликованных печатных работах в российских и зарубежных рецензируемых научных журналах:

1. Каблуков С. И., Злобина Е. А., Скворцов М. И., Немов И. Н., Вольф А. А., Достовалов А. В., Бабин С. А. 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.
2. Dostovalov A. V., Wolf A. A., Parygin A. V., Zyubin V. E., Babin S. A. 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.
3. Wolf A., Dostovalov A., Skvortsov M., Raspopin, K., Parygin A., Babin S. 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.
4. 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.
5. 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.

Диссертация «Поточечная фемтосекундная запись брэгговских решеток в специализированных волоконных световодах» Вольфа Алексея Анатольевича рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 «Оптика».

Председатель семинара

академик РАН



Шалагин А.М.