



УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИАиЭ СО РАН

Чл.-корр. РАН

Бабин Сергей Алексеевич

«21» октября 2024 г

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Диссертация «Исследование волоконных лазеров на основе регулярной и случайной распределенной обратной связи на структурах, сформированных методом фемтосекундной поточечной записи» выполнена в лаборатории волоконной оптики (№17) ИАиЭ СО РАН.

В период подготовки диссертации соискатель Скворцов Михаил Игоревич работал в ИАиЭ СО РАН в должностях инженера-программиста и младшего научного сотрудника.

В 2015 г. окончил магистратуру физического факультета Новосибирского государственного университета по направлению подготовки 03.04.02 «Физика». Прошёл обучение в аспирантуре ИАиЭ СО РАН (2015-2019 гг.) по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия», специальности 01.04.05 «Оптика».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов № 24/4 выдана 08 октября 2024 г. ИАиЭ СО РАН.

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

Диссертация «Исследование волоконных лазеров на основе регулярной и случайной распределенной обратной связи на структурах, сформированных методом фемтосекундной поточечной записи» была рассмотрена на объединенном семинаре УНЦ Квантовая Оптика и Информационные технологии и системы Института автоматики и электрометрии СО РАН 3 октября 2024 года.

На семинаре присутствовали:

Шалагин Анатолий Михайлович, д.ф.-м.н., академик РАН, профессор, ИАиЭ СО РАН

Бабин Сергей Алексеевич, д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН, ИАиЭ СО РАН

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

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

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

Корольков Виктор Павлович, д.т.н. ИАиЭ СО РАН

Достовалов Александр Владимирович, к.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Симонов Виктор Александрович, к.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Тереньтев Вадим Станиславович, к.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Абдуллина Софья Рафисовна, к.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Харенко Денис Сергеевич, к.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Микерин Сергей Львович, к.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Коляда Наталья Александровна, к.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Иваненко Алексей Владимирович, к.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Евменова Екатерина Алексеевна, к.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Ватник Илья Дмитриевич, к.ф.-м.н., НГУ

Лобач Иван Александрович, к.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Ткаченко Алина Юрьевна, к.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Немов Илья Николаевич, ИАиЭ СО РАН

Поддубровский Никита Романович, ИАиЭ СО РАН

Колесникова Алёна Юрьевна, НГУ

Мункуева Жибзэма Этигэловна, ИАиЭ СО РАН

По результатам рассмотрения диссертации принято следующее заключение:

Актуальность работы

Исследование волоконных лазеров на основе регулярной и случайной распределенной обратной связи на структурах, сформированных методом фемтосекундной поточечной записи, является важным направлением для научных и прикладных приложений. В оптимальной конфигурации такие лазеры являются одночастотными, а актуальность их применения обусловлена спектральными характеристиками: точный выбор длины волны излучения, высокое значение сигнал/шум, узкая линии генерации. Из-за простоты экспериментальной схемы

наиболее часто применяемой конфигурацией волоконного одночастотного излучателя является лазер на основе распределенной обратной связи (РОС-лазер). Резонатор данной лазерной системы представляет собой волоконную брэгговскую решётку (ВБР) с фазовым сдвигом, изготовленную в активном волокне. Традиционная методика по реализации фазового сдвига заключается в дополнительной засветке УФ-излучением определенной области ВБР. При этом длина самого резонатора составляет несколько сантиметров, что затрудняет использование такой структуры в сенсорных приложениях. Кроме того, из-за асимметричной геометрии волоконного световода и самой методики изготовления резонатора УФ методикой в спектре генерации, как правило, присутствуют две поляризационные моды. Методика поточечной фемтосекундной записи позволяет изготавливать ВБР с уникальными характеристиками: запись возможна в нефоточувствительных волокнах и в широком диапазоне длин волн, фазовый сдвиг реализуется в малой области внутри структуры ВБР, наведенная величина двулучепреломления на порядок превышает значение остаточного двулучепреломления волокна.

Таким образом, целью диссертационной работы Скворцова М.И. является исследование возможностей улучшения характеристик РОС-лазера за счет применения методики поточечной фемтосекундной записи: достижение генерации единственной поляризационной моды, минимизация геометрических размеров такого резонатора, а также применение случайных структур, в том числе изготовленных с использованием поточечной методики записи, для уменьшения спектральной ширины линии излучения и получения одночастотной генерации, перестраиваемой по спектру, как альтернатива РОС-лазеру. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

- Расчет параметров резонатора (ВБР с фазовым сдвигом) для достижения генерации одночастотного излучения на основе коммерчески доступного эрбиевого волоконного световода. Реализация РОС-лазера на основе данного резонатора, исследование выходных характеристик.
- Поиск подходящего высоколегированного эрбиевого световода и реализация РОС-лазера на основе ВБР с фазовым сдвигом, имеющей минимальную длину резонатора. Исследование выходных характеристик.
- Оценка величины сужения ширины линии генерации РОС-лазера в конфигурации с дополнительной случайной РОС (СРОС) за счет рэлеевского рассеяния в многокилометровой катушке одномодового волоконного световода. Экспериментальное исследование эффекта сужения и сравнение значений

мгновенной ширины линии генерации для конфигураций РОС-лазера и гибридной схемы, включающей СРОС. Сравнение эффекта сужения линии для гибридных конфигураций с применением СРОС в виде катушки одномодового волокна и искусственной случайной структуры, записанной с применением поточечной фемтосекундной методики в относительно коротком отрезке волокна.

- Реализация одночастотного лазера в схеме с кольцевым и линейным резонатором со СРОС на случайных структурах, изготовленных с помощью поточечной фемтосекундной методики записи, исследование мощностных и спектральных характеристик.

Личное участие соискателя

Основные экспериментальные результаты были получены Скворцовым М.И. лично или при непосредственном участии. Соискатель был вовлечен на всех этапах: от постановки задачи до сборки экспериментальных схем, обработки и анализа данных. Кроме того, Скворцовым М.И. лично докладывались результаты на научных конференциях, а также проводилось их дальнейшее оформление для публикаций в высокорейтинговых научных журналах. При выполнении диссертационной работы соискатель проявил себя как квалифицированный специалист, умеющий работать в коллективе, решать сложные задачи, а также проводить исследования высокого научного уровня.

Новизна

В диссертации получены следующие новые научные результаты:

- Впервые реализован и исследован волоконный РОС-лазер на основе ВБР с фазовым сдвигом в качестве резонатора, изготовленной с применением фемтосекундной поточечной методики, генерирующий единственную поляризационную моду без физического воздействия на него (скручивания). Длина структуры составила 32 мм, выходная мощность одночастотного излучения на длине волны генерации 1550 нм соответствовала 700 мкВт при мощности накачки 525 мВт на длине волны 980 нм. Ширина линии генерации, измеренная на временах ~ 100 мксек, при максимальной выходной мощности равнялась 17 кГц, отношение сигнал-шум для оптического спектра составило ≈ 70 дБ, уровень относительного шума интенсивности соответствовал -85 дБ/Гц на частоте 660 кГц.

- Реализован волоконный РОС-лазер с рекордно короткой длиной резонатора (5,3 мм), изготовленного с применением фемтосекундной поточечной методики в высоколегированном композитном эрбиевом световоде. Спектральные и мощностные характеристики соответствовали аналогичным параметрам для РОС-лазера с типичной длиной резонатора в несколько сантиметров.
- Предложен и экспериментально реализован метод сужения мгновенной ширины линии генерации РОС-лазера до субгерцовых значений с применением дополнительной СРОС за счет рэлеевского рассеяния в многокилометровой катушке одномодового волоконного световода. Продемонстрирована возможность сужения линии с использованием СРОС за счет искусственной случайной структуры, записанной фемтосекундной поточечной методикой.
- Реализован узкополосный эрбиевый лазер с полуоткрытым резонатором, где в качестве слабоотражающего распределенного зеркала впервые использовалась СРОС на основе 10-см искусственной случайной рэлеевской структуры, изготовленной с помощью поточечной фемтосекундной методики формирования искусственных неупорядоченных структур внутри волоконного световода и имеющей высокий уровень наведенного обратного рассеяния. В данной конфигурации реализован одночастотный режим генерации с шириной линии ~ 10 кГц и выходной мощностью до ~ 3 мВт. При более высоких мощностях (до 100 мВт) продемонстрирована маломодовая генерация с узкой линией (< 3.3 пм). В совокупности с механическим растяжением ВБР для данной схемы получена перестройка длины волны узкополосной генерации в диапазоне 1533.4–1545 нм.
- Реализован одночастотный эрбиевый лазер в кольцевой конфигурации, где в резонатор была включена СРОС на основе искусственной случайной рэлеевской структуры. Общая длина структуры составила ≈ 4 м и состояла из 8 отражателей длиной 12 см каждый. Для данного лазера был получен одночастотный режим во всем диапазоне генерации при максимальной выходной мощности 7.8 мВт на длине волны излучения 1535 нм, ширина линии, измеренная на временах ~ 100 мксек, не превышала 750 Гц.

Степень достоверности результатов

Все полученные результаты не противоречат известным научным положениям, экспериментам и теоретическим результатам других работ. Все экспериментальные результаты получены с помощью апробированных методик и точных калиброванных

приборов. Результаты работы опубликованы в ведущих рецензируемых мировых журналах и представлены на международных конференциях, что свидетельствует об обоснованности и достоверности сделанных выводов.

Практическая значимость

Результаты работы могут быть использованы для создания одночастотного лазера на основе распределенной обратной связи с селекцией поляризационных мод, что имеет особое значение для генерации второй гармоники. Субгерцовый источник излучения на основе гибридной схемы, состоящей из РОС-лазера и СРОС, перспективен для применения в когерентной рефлектометрии. Одночастотные лазеры на основе случайной распределенной обратной связи, имеющие характеристики, аналогичные характеристикам РОС-лазера и возможностью перестройки частоты, также могут быть применены в таких областях как телекоммуникация, генерация второй гармоники, спектроскопия, сенсорные применения и др. При этом использование фемтосекундной поточенной методики записи регулярных и случайных структур показателя преломления позволяет создать одночастотные лазеры с улучшенными характеристиками в компактном исполнении

Соответствие специальности

Диссертационная работа соответствует специальности 1.3.6 (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

Основные результаты работы докладывались автором лично на Российском семинаре по волоконным лазерам (Новосибирск 2018, 2020 и 2022 гг.), Всероссийской конференции по волоконной оптике (Пермь 2021 и 2023 гг.), Международной конференции International Conference Laser Optics (ICLO) (Санкт-Петербург, 2018 и 2022 гг.), Международной конференции OSA Advanced Photonics Congress (Вашингтон, США, онлайн, 2020), 29-ом Международном семинаре по лазерной физике LPHYS 2021 (онлайн, 2021г).

Результаты диссертационной работы достаточно подробно отражены в 8-и публикациях в рецензируемых научных журналах, индексируемых в российских и международных базах данных и входящих в перечень журналов ВАК.

1. *Skvortsov M.I. et al.* Distributed feedback fiber laser based on a fiber Bragg grating inscribed using the femtosecond point-by-point technique // *Laser Physics Letters*. IOP, 2018. Vol. 15. P. 035103.
2. *Wolf A.A., Skvortsov M.I. et al.* All-fiber holmium distributed feedback laser at 2.07 μm // *Opt. Lett.*, OL. Optica Publishing Group, 2019. Vol. 44, № 15. P. 3781–3784.
3. *Skvortsov M.I. et al.* Advanced distributed feedback lasers based on composite fiber heavily doped with erbium ions // *Sci Rep*. Nature Publishing Group, 2020. Vol. 10, № 1. P. 14487.
4. *Skvortsov M.I. et al.* Single-frequency erbium-doped fibre laser with random distributed feedback based on disordered structures produced by femtosecond laser radiation // *Quantum Electronics*. IOP, 2021. Vol. 51. P. 1051–1055.
5. *Skvortsov M.I. et al.* Extreme Narrowing of the Distributed Feedback Fiber Laser Linewidth Due to the Rayleigh Backscattering in a Single-Mode Fiber: Model and Experimental Test // *Photonics*. 2022. Vol. 9. P. 590.
6. *Skvortsov M.I. et al.* Narrow-Linewidth Er-Doped Fiber Lasers With Random Distributed Feedback Provided By Artificial Rayleigh Scattering // *J. Lightwave Technol.*, JLT. IEEE, 2022. Vol. 40, № 6. P. 1829–1835.
7. *Dostovalov A.V., Skvortsov M.I. et al.* Continuous and discrete-point Rayleigh reflectors inscribed by femtosecond pulses in singlemode and multimode fibers // *Optics Laser Technology*. 2023. Vol. 167. P. 109692.
8. *Skvortsov M.I. et al.* Single-Frequency Ring Fiber Laser with Random Distributed Feedback Provided by Artificial Rayleigh Scattering // *Photonics*. 2024. Vol. 11. P. 103.

Диссертация «Исследование волоконных лазеров на основе регулярной и случайной распределенной обратной связи на структурах, сформированных методом фемтосекундной поточечной записи» Скворцова Михаил Игоревича рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 (01.04.05) «Оптика».

Председатель семинара

д. ф.-м. н., профессор, академик РАН

Секретарь семинара

к. ф.-м. н.

 Шалагин А.М.



Лобач И.А.