



УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИАиЭ СО РАН

Чл.-корр. РАН

Бабин Сергей Алексеевич

«02» октября 2024 г

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Диссертация «Разработка и применение эрбиевых непрерывных одночастотных самосканирующих лазеров» выполнена в лаборатории оптических сенсорных систем ИАиЭ СО РАН.

В период подготовки диссертации соискатель Поддубровский Никита Романович работал в ИАиЭ СО РАН в должности инженера-программиста (2021-2023 гг.) и и.о. инженера-исследователя (2023-2024 гг.), а также проходил обучение в аспирантуре ИАиЭ СО РАН в период с 2023 г. по настоящее время.

В 2023 г. окончил магистратуру физического факультета Новосибирского государственного университета по направлению подготовки 03.04.02 «Физика».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов № 24/3 выдана 01 октября 2024 г. ИАиЭ СО РАН.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук Лобач Иван Александрович, ведущий научный сотрудник лаборатории оптических сенсорных систем ИАиЭ СО РАН.

Диссертация «Разработка и применение эрбиевых непрерывных одночастотных самосканирующих лазеров» была рассмотрена на объединенном семинаре УНЦ Квантовая Оптика и Информационные технологии и системы Института автоматики и электрометрии СО РАН 19 сентября 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

Суровцев Николай Владимирович, д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН, профессор, ИАиЭ СО РАН

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

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

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

Чаповский Павел Львович, д.ф.-м.н., ИАиЭ СО РАН

Потатуркин Олег Иосифович, д.т.н., профессор РАН, 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

Дробышев Роман Владимирович, ИАиЭ СО РАН

Береза Алексей Сергеевич, ИАиЭ СО РАН

Ефремов Владислав Дмитриевич, ИАиЭ СО РАН

Колесникова Алёна Юрьевна, НГУ

Волоси Виталий Михайлович, ИАиЭ СО РАН

По результатам рассмотрения диссертации принято следующее заключение:

Актуальность работы

Разработка и исследование узкополосных перестраиваемых источников излучения является важным направлением для науки и различных приложений. В частности, высокий интерес представляет изучение волоконных лазеров. В случае волоконных лазеров, перспективным способом получения одночастотной перестраиваемой генерации является использование динамических решеток населенности. Использование динамических решеток, формирующихся в усиливающих активных волокнах, позволило достигнуть режима самосканирования длины волны. Самосканирующие лазеры (ССЛ) обеспечивают генерацию с перестройкой длины волны без внешнего управления, при этом диапазон перестройки может достигать 25 нм, а мгновенная ширина линии не превышает 1 МГц. Как правило, ССЛ генерируют

короткие микросекундные импульсы, что ограничивает время накопления полезного сигнала (а значит и отношение сигнал-шум) в прикладных задачах на основе импульсных ССЛ. По этой причине в качестве объекта исследования Поддубровского Н.Р. был выбран новый тип ССЛ – непрерывные ССЛ, или ССЛ с непрерывной динамикой интенсивностью. Основным достоинством непрерывных ССЛ является возможность длительного (единицы миллисекунд) накопления сигнала на каждой частоте. Ожидается, что непрерывные ССЛ могут оказаться полезными в ряде приложений, требующих генерации перестраиваемого узкополосного излучения. По этой причине, выбранное направление исследования является актуальным.

В рамках исследования Поддубровским Н.Р. был впервые разработан эрбиевый непрерывный одночастотный ССЛ. Был предложен метод декомпозиции продольных мод, и с его помощью впервые проведен высокоразрешающий анализ динамики отдельных продольных мод непрерывного ССЛ. Также проведен анализ когерентных свойств излучения эрбиевого непрерывного ССЛ. Помимо этого, был детально изучен процесс перехода от одной продольной моды к другой и взаимодействие различных продольных мод во время перехода. Было предложено объяснение процесса непрерывного сканирования в терминах конкуренции динамических решеток поглощения и усиления. Проведенный анализ и сделанные выводы могут быть весьма полезны в дальнейшей разработке и изучении непрерывных ССЛ.

Далее разработанный эрбиевый непрерывный одночастотный ССЛ был применен в трех практических приложениях: терагерцовой спектроскопии, когерентной оптической частотной рефлектометрии и бриллюэновском анализе. В случае когерентной оптической частотной рефлектометрии показано, что длительная одночастотная генерация непрерывного ССЛ оказывается весьма полезной в улучшении отношения сигнал/шум. В случае бриллюэновского анализа за счет использования непрерывных эрбиевых ССЛ оказывается возможным опрос длинных волоконных линий. Таким образом, изучаемые лазеры оказываются полезны в задачах, связанных с волоконной сенсорикой, что еще раз подтверждает актуальность выбранного направления исследований.

Личное участие соискателя

В ходе выполнения работ Поддубровский Н.Р. принимал активное участие в постановке задач, проведении экспериментов, анализе и обсуждении результатов, а также презентации результатов на научных конференциях и оформлении результатов в

виде научных публикаций. При выполнении диссертационной работы Поддубровский Н.Р. 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:

1. Предложен и реализован метод декомпозиции продольных мод для анализа временной эволюции отдельных продольных мод лазера. С использованием метода проведен анализ модовой динамики эрбиевого и иттербиевого непрерывных одночастотных самосканирующих лазеров. Установлено, что непрерывная динамика интенсивности представляет собой последовательность перекрывающихся одночастотных импульсов прямоугольной формы – модовых импульсов – с длительностью до 5 мс и 1 мс для эрбиевых и иттербиевых лазеров соответственно.
2. Впервые для эрбиевого волоконного лазера получено непрерывное одночастотное самосканирование длины волны. Диапазон перестройки составляет 30 пм вблизи длины волны 1560.2 нм. Показан переход от стабильной непрерывной одночастотной генерации к непрерывному самосканированию длины волны с ростом мощности накачки. Установлено, что в случае непрерывного одночастотного самосканирования длины волны в ходе одного модового импульса наблюдается чирп частоты, с максимальной отстройкой частоты в 40 кГц, а ширина линии генерации не превышает 4 кГц.
3. Предложена качественная модель, объясняющая режим непрерывного одночастотного самосканирования длины волны. Наблюдаемая динамика в эрбиевом лазере обусловлена конкуренцией ДРН поглощения и усиления, формирующихся в линейной и кольцевой части резонатора соответственно.
4. Показано, что во время перехода между соседними модовыми импульсами в эрбиевом непрерывном самосканирующем лазере происходит четырехволновое смешение, приводящее к росту интенсивности близких мод, не участвующих в переходе, до уровня 4% от средней мощности.
5. Продемонстрирована возможность использования эрбиевого непрерывного самосканирующего лазера для трех приложений. В схеме когерентного оптического рефлектометра частотной области показаны измерения с пространственным разрешением 2 см и длиной линии 5.35 м. Показано уменьшение уровня шумовой

подложки с ростом количества точек усреднения и достижение чувствительности измерений, на 20 дБ превосходящей уровень сигнала рассеяния света Рэлея. В схеме генерации перестраиваемого излучения терагерцового диапазона показан диапазон перестройки ~6 ГГц вблизи частоты 100 ГГц. В схеме бриллюэновского анализатора показаны распределенные измерения с пространственным разрешением 10 м и чувствительностью 2 МГц при длине линии 24.9 км.

Степень достоверности результатов

Все полученные результаты не противоречат известным научным положениям и экспериментальным результатам других работ. Все измерения производились с помощью апробированных методик и точных 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 данной работы могут быть использованы при разработке непрерывных самосканирующих лазеров. В свою очередь, режим непрерывного самосканирования может оказаться востребован при построении волоконно-оптических систем измерения различных физических величин (таких, как температура или механические деформации). Значительная часть диссертационной работы посвящена демонстрации практической ценности разработанных источников.

Соответствие специальности.

Диссертационная работа соответствует специальности 1.3.6 (01.04.05) «Оптика», так как основным объектом исследования является волоконный самосканирующий лазер, а также схемы опроса волоконно-оптических датчиков, реализованные на основе этого лазера в соответствии с направлением исследований паспорта специальности 1.3.6 (01.04.05) «Разработка базовых принципов построения источников светового излучения и функционирования фотонных и оптоэлектронных устройств. Лазерная спектроскопия, оптические прецизионные измерения, стандарты частоты и времени, квантовые сенсоры.»

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

Основные результаты работы докладывались соискателем лично на следующих конференциях и семинарах: международная конференция «*SPIE/COS Photonics Asia*» (Наньтун, КНР, 2021 г.), международная конференция «*SPIE/COS Photonics Asia*» (Пекин, КНР, 2022 г.), международная конференция «*International conference laser optics (ICLO)*» (г. Санкт-Петербург, 2022 г.), «*Всероссийская конференция по волоконной оптике (ВКВО)*» (г. Пермь, 2021 г.), «*Всероссийская конференция по волоконной оптике (ВКВО)*» (г. Пермь, 2023 г.), международная конференция «*24 International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*» (Алтай, Россия, 2023 г.).

Результаты диссертационной работы подробно отражены в 6-ти публикациях в рецензируемых научных журналах, индексируемых в российских и международных базах данных. 6 публикаций из списка входят в перечень журналов ВАК.

- 1) *Drobyshev R. V., Poddubrovskii N. R., Lobach I. A., Kablukov S. I.* High-resolution spectral analysis of long single-frequency pulses generated by a self-sweeping Yb-doped fiber laser // *Laser Physics Letters*. — 2021. — Т. 18. — №. 8. — С. 085102.
- 2) *Poddubrovskii N. R., Lobach I. A., Kablukov S. I.* Regular mode-hopping dynamics in Erbium-doped ring fiber laser with saturable absorber // *Optics & Laser Technology*. — 2022. — Т. 156. — С. 108568.
- 3) *Poddubrovskii N. R., Lobach, I. A., Podivilov E. V., Kablukov S. I.* Time-resolved mode analysis in Er-doped self-sweeping ring fiber laser // *Laser Physics Letters*. — 2022. — Т. 19. — №. 12. — С. 125102.
- 4) *Poddubrovskii N. R., Drobyshev R. V., Lobach I. A., Kablukov S. I.* Fiber lasers based on dynamic population gratings in rare-earth-doped optical fibers // *Photonics*. – MDPI. — 2022. — Т. 9. — №. 9. — С. 613.
- 5) *Poddubrovskii N. R., Lobach I. A., Kablukov S. I.* Signal Processing in Optical Frequency Domain Reflectometry Systems Based on Self-Sweeping Fiber Laser with Continuous-Wave Intensity Dynamics // *Algorithms*. — 2023. — Т. 16. — №. 5. — С. 260.
- 6) *Poddubrovskii N. R., Lobach I. A., Kablukov S. I.* Microwave-free BOTDA based on a continuous-wave self-sweeping laser // *Optics Letters*. — 2024. — Т. 49. — №. 2. — С. 282-285.

Диссертация «Разработка и применение эрбиевых непрерывных одночастотных самосканирующих лазеров» Поддубровского Никиты Романовича рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 (01.04.05) «Оптика».

Председатель семинара

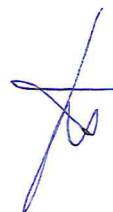
д. ф.-м. н., профессор, академик РАН



Шалагин А.М.

Секретарь семинара

к. ф.-м. н.



Лобач И.А.