

На правах рукописи

A handwritten signature in black ink, consisting of several loops and a horizontal line at the top.

Поддубровский Никита Романович

**Разработка и применение эрбиевых непрерывных одночастотных
самосканирующих лазеров**

1.3.6 «Оптика»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск - 2024

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

Научный руководитель: **Лобач Иван Александрович**
кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт автоматики и
электрометрии Сибирского отделения Российской
академии наук, г. Новосибирск

Официальные оппоненты: **Скворцов Михаил Николаевич**
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт лазерной физики
Сибирского отделения Российской академии
наук, г. Новосибирск

Фотиади Андрей Александрович
кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник,
Научно-исследовательский технологический
институт им. С.П. Капицы Ульяновского
государственного университета, г. Ульяновск

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт общей физики
им. А.М. Прохорова Российской академии наук,
г. Москва

Защита диссертации состоится «24» декабря 2024 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.028.01 (Д 003.005.02) при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматики и электрометрии СО РАН, адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАиЭ СО РАН и на сайте: <https://www.iae.nsk.su/ru/dissertationcouncil>.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
д.ф.-м.н.



Ильичев Л.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Исследование узкополосных перестраиваемых по частоте лазеров является важным направлением для различных приложений [1]. Особый интерес представляют волоконные лазеры ввиду их многочисленных достоинств: возможность получения высоких выходных мощностей, простота сборки и настройки [2]. Перспективным способом получения узкополосной перестраиваемой генерации в случае волоконных лазеров является использование динамических решеток населенности (ДРН) [3]. Одним из подтипов лазеров на основе ДРН являются так называемые самосканирующие лазеры (ССЛ) [4]. ССЛ способны обеспечить перестройку длины волны без внешнего управления с диапазоном перестройки до 25 нм и шириной линии не более 1 МГц [4-5]. Как правило, ССЛ генерируют микросекундные импульсы, соответствующие отдельным продольным модам лазера [4]. Актуальность разработки ССЛ была уже показана в ряде практических направлений, включающих, например, когерентную оптическую частотную рефлектометрию [6]. Однако, импульсная динамика с длительными «периодами темноты» ограничивает их практическую применимость. В частности, оказывается невозможным длительное накопление сигнала на каждой частоте. Помимо этого, до 90% сигнала невозможно использовать при измерении, поскольку они отвечают нулевой интенсивности излучения. По этой причине в качестве объекта исследования был выбран новый тип ССЛ – ССЛ с непрерывной динамикой интенсивности, или непрерывные ССЛ, которые были впервые продемонстрированы в 2020 году в работах [7-8].

Как и классические импульсные ССЛ, непрерывные ССЛ обеспечивают пассивную перестройку длины волны без внешнего

управления. Однако, основным достоинством последних является длительная генерация излучения (до единиц мс) на каждой частоте. За счет длительной генерации одночастотного излучения потенциально возможно осуществить накопление, что может существенно улучшить отношение сигнал/шум систем на основе непрерывных ССЛ. Особый интерес при этом представляет разработка эрбиевых лазеров по причине высокой значимости диапазона вблизи длины волны 1550 нм, соответствующей минимуму потерь в оптоволокне. По этой причине, разработка и применение непрерывных эрбиевых ССЛ является актуальным направлением исследований. Однако, на момент начала исследования не было представлено объяснение причин наблюдаемого режима непрерывного сканирования, не были изучены свойства излучения и динамика продольных мод. Помимо этого, не были показаны практические приложения непрерывных ССЛ.

Цель работы

Цель диссертационного исследования состояла в разработке, изучении и применении непрерывных одночастотных самосканирующих эрбиевых волоконных лазеров.

Задачи работы

Основные задачи, которые было необходимо решить для достижения цели:

- 1) Разработать непрерывный одночастотный волоконный эрбиевый самосканирующий лазер;
- 2) Разработать методы для анализа подобного типа генерации лазера и провести детальный анализ модовой динамики разработанных лазеров;

- 3) Разработать качественную модель, объясняющую наблюдаемый режим непрерывного самосканирования длины волны;
- 4) Продемонстрировать практическую ценность разработанных лазеров.

Научная новизна

К научной новизне работы могут быть отнесены следующие моменты:

- Проведен высокоразрешающий анализ модовой динамики непрерывного одночастотного самосканирующего лазера.
- Продемонстрирован режим непрерывного одночастотного сканирования в эрбиевом лазере.
- Показано использование непрерывных одночастотных самосканирующих лазеров в трех практических приложениях: терагерцовая спектроскопия, когерентная оптическая частотная рефлектометрия и бриллюэновский анализ.

Практическая значимость

Полученные результаты обладают высокой практической значимостью, поскольку они значительно углубляют понимание режима непрерывного одночастотного самосканирования, а также показывают возможность использования непрерывных одночастотных самосканирующих лазеров в различных сенсорных приложениях.

Апробация работы

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.).

Защищаемые положения

1. Метод декомпозиции продольных мод на основе процедуры гетеродинирования и оконного преобразования Фурье позволяет восстанавливать эволюцию интенсивности отдельных продольных мод лазера.
2. В эрбиевом волоконном лазере с сигма-резонатором возможно получение непрерывного одночастотного самосканирование длины волны с генерацией последовательности перекрывающихся одночастотных импульсов прямоугольной формы.
3. Во время перехода между двумя соседними одночастотными импульсами в эрбиевом непрерывном одночастотном самосканирующем лазере происходит четырехволновое смешение с участием другой пары соседних по частоте продольных мод.
4. Применение непрерывного одночастотного самосканирующего лазера в схеме бриллюэновского анализа позволяет достичь пространственного разрешения и чувствительности не хуже 10 метров и 2 МГц соответственно при длине линии не менее 24.9 км.

Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 6 публикациях в рецензируемых научных журналах, индексируемых в российских и международных базах данных [А1-А6].

Личный вклад автора

Основные результаты получены автором лично. В ходе выполнения работ автор принимал активное участие в выборе направления исследований и постановке задач, проводил теоретический анализ и осуществлял эксперименты, проводил обработку измерений, принимал участие в обсуждении и подготовке статей для публикации.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения, списка публикаций по теме и списка цитируемой литературы, а также списка обозначений и сокращений. Работа изложена на 138 страницах, содержит 53 рисунка и 2 таблицы. Список литературы состоит из 149 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** представлено введение, в котором описывается состояние области исследования, обосновывается актуальность темы диссертации, дается обзор публикаций, посвященных одночастотным и перестраиваемым лазерам. Описаны основные подходы достижения одночастотной генерации в полупроводниковых и волоконных лазерах. Проведен обзор работ, посвященных одночастотным волоконным лазерам на основе ДРН, формирующихся в поглощающих волокнах. Отмечено, что

работа ССЛ также связана с формированием ДРН. Однако, в отличие от стабильных одночастотных лазеров, в случае ССЛ генерация является импульсной. Также рассмотрены пионерские работы, в которых описана непрерывная динамика интенсивности ССЛ и сформулированы цель и задачи, направленные на исследование лазеров данного типа. Далее формулируется новизна и практическая значимость исследования, а также защищаемые положения. В конце введения приводится изложение основного содержания работы по главам.

Вторая глава посвящена методам теоретического и экспериментального исследования лазерного излучения. В разделе 2.1 представлено описание принципов спектральной селекции на основе ДРН. Описано, что ДРН, формирующиеся в поглощающих волокнах, приводят к стабилизации длины волны, в то время как ДРН, формирующиеся в усиливающих волокнах, приводят к модовым перескокам. В разделах 2.2-2.4 описаны методы автогомодинирования и гетеродинирования, которые далее используются для анализа излучения лазеров. Наконец, в разделе 2.5 представлено описание предложенного метода декомпозиции продольных мод. Данный метод позволяет восстанавливать эволюцию интенсивности отдельных продольных мод для некоторого их набора. Для этого необходимо осуществить оптическое гетеродинирование, оконное преобразование Фурье от сигнала биений и полосовую фильтрацию в границах, отвечающих интерференции между локальным осциллятором и i -той продольной модой. При этом оказывается возможным восстановление эволюции интенсивности данной продольной моды.

Третья глава посвящена разработке непрерывных одночастотных ССЛ и изучению свойств их излучения. В разделе 3.1 описаны результаты, посвященные иттербиевому ССЛ с сигма-резонатором. Схема лазера представлена на Рис. 1(а). Динамика интенсивности (Рис. 2(а)) отвечает

непрерывному одночастотному самосканированию. Участки непрерывной генерации разделены двухчастотными всплесками интенсивности, период повторения которых составлял 800 мкс.

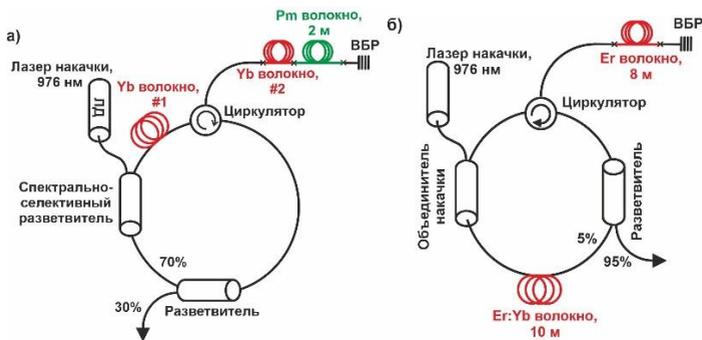


Рис. 1. Схема а) итербиевого и б) эрбиевого ССЛ с сигма-резонатором.

Генерация происходила вблизи длины волны 1064 нм, диапазон перестройки составил около 60 пм. Была реализована декомпозиция продольных мод. В результате было установлено, что генерация представляет собой последовательность перекрывающихся импульсов прямоугольной формы, соответствующих отдельным продольным модам – модовым импульсам (Рис. 2(б)). Помимо этого показано, что в ходе отдельных модовых импульсов наблюдается экспоненциальный чирп частоты с отстройкой до 700 кГц. В конце раздела 3.1 обсуждены полученные результаты.

Далее в разделе 3.2 представлены результаты, посвященные разработке эрбиевого непрерывного ССЛ с сигма-резонатором (схема представлена на Рис. 1(б)). В динамике длины волны наблюдался переход от стабилизации длины волны к самосканированию при увеличении мощности накачки (Рис. 3(а)-(г)). Диапазон перестройки составил около 20 пм, генерация происходила вблизи центральной длины волны 1560.2 нм. При этом динамика интенсивности была аналогична случаю итербиевого непрерывного одночастотного ССЛ – одночастотная генерация со всплесками

интенсивности. Период повторения всплесков в случае регулярного самосканирования составлял 3-4 мс. Излучение эрбиевого ССЛ было изучено с использованием метода автогомодинирования. Было установлено, что между соседними всплесками происходит одночастотная генерация с шириной линии не более 4 кГц, при этом наблюдается экспоненциальный чирп с максимальной отстройкой частоты до 40 кГц.

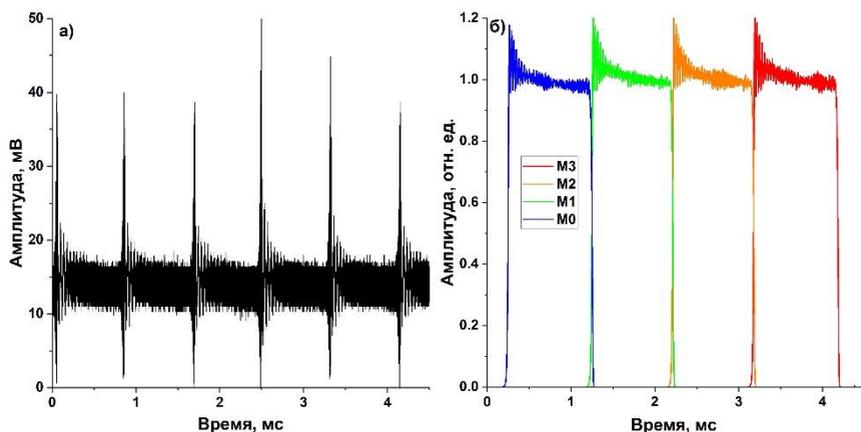


Рис. 2 а) динамика интенсивности иттербиевого ССЛ, б) восстановленная эволюция отдельных продольных мод.

Далее была осуществлена декомпозиция продольных мод (Рис. 4(а), (б)). Было установлено, что аналогично случаю иттербиевого ССЛ излучение представляло собой последовательность одночастотных модовых импульсов прямоугольной формы. При этом, в процессе перехода от одной моды к другой, наблюдается прирост интенсивности соседних продольных мод (Рис. 4(б)). Данный прирост интенсивности был описан в терминах процессов четырехволнового взаимодействия (пунктирные линии на Рис. 4(б)). Установлено, что в результате интенсивности мод, не участвующих непосредственно в переходе, могут возрастать до 4% от суммарной

интенсивности. Глава 3 завершается заключением, включающим качественное описание режима непрерывного сканирования в терминах конкуренции между ДРН поглощения и усиления.

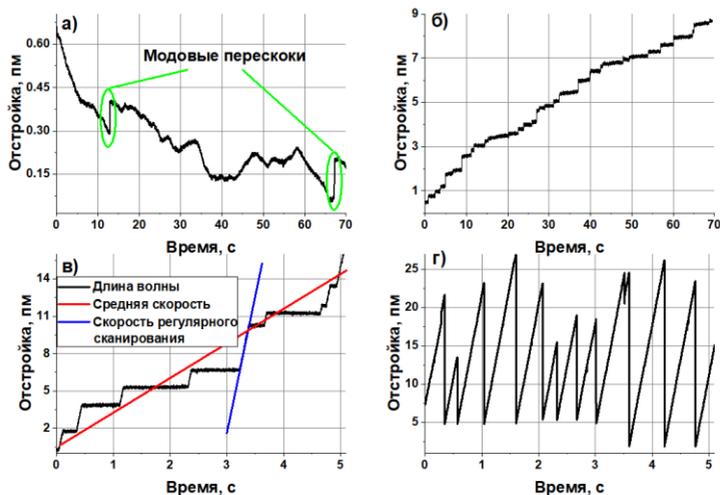


Рис. 3. Динамика длины волны эрбиевого непрерывного одночастотного ССЛ при мощностях накачки (а) 0.51, (б) 0.6, (в) 0.65 и (г) 0.68 Вт.

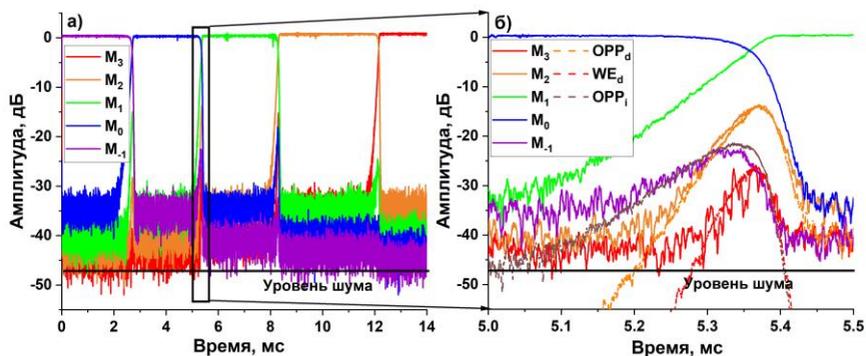


Рис. 4. а) восстановленная эволюция отдельных продольных мод эрбиевого непрерывного ССЛ, б) увеличенный участок перехода.

Четвертая глава посвящена практическим приложениям разработанных непрерывных одночастотных ССЛ. В качестве первого приложения, описанного в разделе 4.1, выступила терагерцовая спектроскопия. Описана схема установки и методика анализа сигналов. Показано, что с использованием эрбиевого непрерывного одночастотного ССЛ можно осуществлять генерацию перестраиваемого терагерцового излучения. Диапазон перестройки составил 6 ГГц, он оказался ограничен диапазоном перестройки ССЛ. Спектральное разрешение составило 50 МГц.

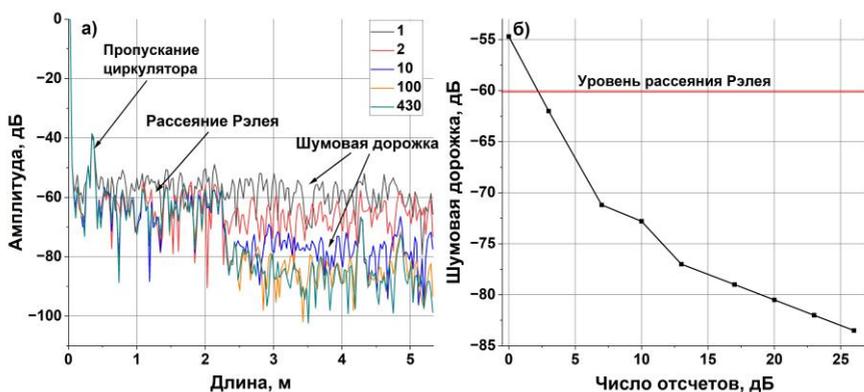


Рис. 5. а) Рефлектограммы для различного числа отсчетов при усреднении, б) зависимость уровня шумовой дорожки от числа отсчетов.

В разделе 4.2 описано использование эрбиевого непрерывного одночастотного ССЛ для когерентной оптической частотной рефлектометрии. При использовании непрерывных ССЛ, пропадают «периоды темноты». По этой причине для построения рефлектограмм проводилось усреднение по всей длине модового импульса и последующее преобразование Фурье. Рефлектограммы строились для различного числа отсчетов осциллографа на каждой частоте ССЛ (Рис. 5 (а)). Отмечено, что при увеличении числа отсчетов значительно уменьшается уровень шумов. При числе отсчетов 10 и более

становится различимой разница между уровнем шумов и рассеянием Рэля. Выигрыш в отношении сигнал/шум достигает 25 дБ (Рис. 5(б)).

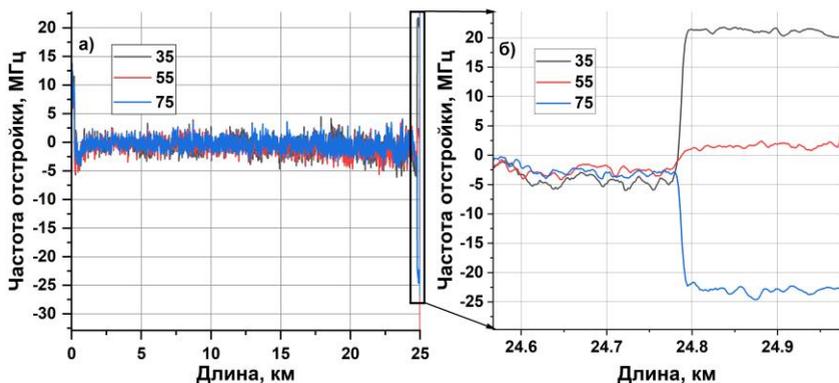


Рис. 6. а) зависимость отстройки бриллюэновского сдвига частоты от координаты, б) увеличенное изображение области перехода к нагреваемому участку.

В разделе 4.3. представлены результаты, посвященные использованию непрерывного эрбиевого одночастотного ССЛ для проведения бриллюэновского анализа. Путём перестройки частоты прописывался спектр бриллюэновского усиления, при этом длительная одночастотная генерация ССЛ позволила опросить волоконную линию длиной 24.9 км. Последние 200 метров волоконной линии были помещены в термокамеру для контролируемого нагрева. В результате была получена зависимость отстройки бриллюэновского сдвига частоты от центрального значения (Рис. 6(а)). Разные цвета линий отвечают измерениям при различных температурах термокамеры. Отчетливо виден выделяющийся участок в конце линии, для которого осуществлялся нагрев (Рис. 6(б)). Пространственное разрешение составило 10 м, погрешность определения изменения бриллюэновского сдвига на конце линии была оценена в 2 МГц.

Наконец, раздел 4.4. содержит итоги применений непрерывных одночастотных ССЛ в представленных приложениях, а также сравнение результатов с импульсными ССЛ.

Заключение содержит формулировку результатов данной работы.

Основные 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.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

- A1. *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.
- A2. *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.
- A3. *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.

- A4. *Podubrovskii N. R., Drobyshch 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.
- A5. *Podubrovskii 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.
- A6. *Podubrovskii 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.

Список цитируемых работ

- [1] *Cousin J., Masselin, P., Chen W., Boucher D., Kassi S., Romanini D., Szriftgiser P.* Application of a continuous-wave tunable erbium-doped fiber laser to molecular spectroscopy in the near infrared // *Applied Physics B*. — 2006. — Т. 83. — С. 261-266.
- [2] *Дианов Е. М.* Волоконные лазеры // *Успехи физических наук*. — 2004. — Т. 174. — №. 10. — С. 1139-1142.
- [3] *Zhang K., Kang J. U.* C-band wavelength-swept single-longitudinal mode erbium-doped fiber ring laser // *Opt. Express*. — 2008. — Т. 16. — №. 18. — С. 14173.
- [4] *Lobach I. A., Kablukov S. I., Podivilov E. V., Babin S. A.* Broad-range self-sweeping of a narrow-line self-pulsing Yb-doped fiber laser // *Opt. Express*. — 2011. — Т. 19. — №. 18. — С. 17632.
- [5] *Lobach I. A., Kablukov S. I., Melkumov M. A., Khopin V. F., Babin S. A., Dianov E. M.* Single-frequency Bismuth-doped fiber laser with quasi-

- continuous self-sweeping // *Optics Express*. — 2015. — T. 23. — №. 19. — C. 24833-24842.
- [6] *Tkachenko A. Y., Lobach I. A., Kablukov S. I.* Coherent optical frequency-domain reflectometer based on a fibre laser with frequency self-scanning // *Quantum Electronics*. — 2019. — T. 49. — №. 12. — C. 1121.
- [7] *Kashirina E. K., Lobach I. A., Kablukov S. I.* Dual-longitudinal-mode CW self-sweeping operation in Er-doped fiber laser // *Optics Letters*. — 2020. — T. 45. — №. 24. — C. 6659-6662.
- [8] *Wen Z., Wang K., Chen H., Lu B., Bai J.* Self-sweeping ytterbium-doped fiber laser based on a fiber saturable absorber // *Applied Physics Express*. — 2020. — T. 14. — №. 1. — C. 012005.