

На правах рукописи



Жданов Иннокентий

**Исследование генерации
сильночирпованных диссипативных
солитонов в области нормальной дисперсии
на длинах волн более 1,5 мкм**

1.3.6 – Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2022

Работа выполнена в *Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук.*

Научный руководитель: **Харенко Денис Сергеевич**
канд. физ.-мат. наук, ФГБУН Институт автоматики и электрометрии СО РАН

Официальные оппоненты: **Анашкина Елена Александровна**

д.ф.-м.н., ФГБУН ФИЦ Институт прикладной физики РАН

Иваненко Алексей Владимирович

доктор философии (PhD), Новосибирский Государственный Университет

Ведущая организация: ФГБУН ФИЦ «Институт общей физики имени А. М. Прохорова РАН», г. Москва

Защита состоится «_____» _____ 2022 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета *24.1.028.01 (Д 003.005.02)* при *Институте автоматики и электрометрии СО РАН*, расположенном по адресу: *630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, д.1*

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке *Института автоматики и электрометрии СО РАН*.

Автореферат разослан «_____» _____ 2022 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
Д-р физ.-мат. наук,

Ильичёв Л. В.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. На сегодняшний день лазеры стали неотъемлемой частью нашей жизни и имеют огромное количество применений буквально во всех отраслях [1]. Особо можно выделить импульсные волоконные лазеры в связи с их компактностью и отсутствием необходимости юстировок. Излучение в области 1,55 мкм обладает некоторыми преимуществами: оно безопасно для глаз, здесь находится минимум потерь оптических световодов, что и обуславливает широкое применение источников данного спектрального диапазона в оптических телекоммуникациях. В дополнение к этому для эрбиевых волоконных лазеров на 1,55 мкм имеется развитая элементная и волоконная база. Интерес к импульсным лазерам в последнее время также связан с активным развитием нелинейной многофотонной микроскопии [2], оптической когерентной томографии и когерентной антистоксовой спектроскопии комбинационного рассеяния [3]. При изучении биологических объектов особого внимания заслуживают длины волн вблизи 1,3 и 1,7 мкм, где находятся так называемые «окна прозрачности» воды [4, 5]. Поэтому разработка волоконных источников мощных импульсов для создания компактных систем нелинейной микроскопии, применения в телекоммуникациях и метрологии является актуальной задачей до сих пор.

Степень разработанности темы исследования. Волоконные источники импульсного излучения эрбиевого диапазона активно изучаются и развиваются на протяжении многих лет, однако с каждым годом появляется все больше работ по новым методам и схемам генерации, а также активно изучаются факторы, влияющие на режим генерации.

Рассматривая волоконные источники импульсного излучения вблизи 1,7 мкм, на момент постановки задачи и начала работы не было обнаружено публикаций, демонстрирующих реализацию такого рода установок. Однако в ходе работы были достигнуты успехи в этом направлении. Развитие получили прямые методы генерации: тулиевые [6–8], тулий-гольмиевые [9] активные световоды и волокна с висмутовыми активными центрами, раз-

витыми в НИЦВО им. Дианова [10, 11]. Параллельно этому также развивались методы генерации за счет нелинейного преобразования: параметрические генераторы [5] и ВКР [12]

Цели и Задачи. Целью данной работы является исследование возможности создания волоконного источника мощных фемтосекундных импульсов с центральной длиной волны более 1,5 мкм, а также создания на его основе источника импульсов с центральной длиной волны 1,6-1,7 мкм за счет эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР). Для достижения поставленной цели необходимо решить следующий ряд задач:

- Разделить эффекты нелинейного вращения поляризации и эволюции диссипативного солитона для получения импульсов наибольшей энергии в волоконном резонаторе с нормальной суммарной дисперсией в области длин волн 1,5 мкм.
- Определить оптимальную схему волоконного резонатора и подходящие составляющие его компоненты, при которых будет достигаться наибольшая энергия генерируемых импульсов.
- Провести усиление генерируемых импульсов до значений выше порога ВКР.
- Продемонстрировать генерацию рамановских диссипативных солитонов (РДС) с длиной волны 1,6-1,7 мкм методом синхронной накачки внешнего волоконного резонатора, а также провести характеризацию генерируемых импульсов.

Научная новизна данной работы состоит в существенном расширении спектрального диапазона генерации мощных фемтосекундных импульсов, за счет получения излучения на новых длинах волн посредством эффекта ВКР. Этого предполагается достичь, с одной стороны, за счет разделения физических процессов, происходящих при распространении импульса в волоконном резонаторе, что ранее демонстрировалось только на примере итербиевого волоконного лазера. С другой стороны, за счёт создания условий для генерации когерентных импульсов на стоксовой

длине волны, путём введения слабой обратной связи или синхронной накачке внешнего резонатора. В результате данное исследование позволит создать качественно новый волоконный источник мощных фемтосекундных импульсов в области 1,5-1,7 мкм с высокими эксплуатационными характеристиками и широким спектром применений.

Практическая значимость. Результаты данной работы могут быть использованы для создания волоконных импульсных систем спектроскопии и нелинейной микроскопии в диапазоне второго окна прозрачности воды, что имеет особое значение для комплексного осмотра биологических объектов, а также мониторинга атмосферных явлений. Также они могут быть использованы для создания системы оптической когерентной томографии для изучения биологических объектов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Генерация сильночирпованных диссипативных солитонов вблизи 1,55 мкм может быть получена в волоконном резонаторе с пространственным разделением эффектов нелинейного вращения поляризации и дисперсионного и нелинейного набегов фазы.
2. Шумы эрбиевой активной среды, определяемые в том числе направлением накачки, ограничивают энергию генерируемых сильночирпованных диссипативных солитонов за счет наличия перехода к генерации шумоподобных импульсов. Влияние шумов может быть подавлено использованием спектрального фильтра, обладающего высоким контрастом.
3. В резонаторе с пространственным разделением эффектов нелинейного вращения поляризации и дисперсионного и нелинейного набегов фазы возможно получение генерации солитонов, управляемых дисперсией с частотой повторения менее 15 МГц.

4. С помощью синхронной накачки внешнего резонатора импульсами с несущей длиной волны 1550 нм может быть получено когерентное импульсное излучение с центральной длиной волны вблизи 1,7 мкм (1680 нм) посредством эффекта вынужденного комбинационного рассеяния.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием проверенного набора методик, используемых как для непосредственно сборки установки, так и при проведении измерений. Все результаты соотносились с известными существующими моделями описания явлений, происходящих в волоконных лазерах, и результатами численного счета. Также результаты неоднократно докладывались на всероссийских и международных конференциях и публиковались в ведущих рецензируемых научных изданиях.

Апробация работы. Результаты работы были легли в основу 6-ти публикаций в рецензируемых отечественных и международных изданиях, а также представлены на 13-ти конференциях, включая школы молодых ученых: 10-й Международный семинар по волоконным лазерам 2022 (2022, Новосибирск, Россия); 29th Annual International Laser Physics Workshop 2021 (LPHYS'21, 2021, онлайн); SPIE Optics + Photonics 2020 Digital Forum (2020, онлайн); Всероссийская конференция по волоконной оптике (2019, Пермь, Россия); Summer School on Nonlinear Photonics (2019, Сколково, Москва, Россия); 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/ Europe-EQEC, 2019, Мюнхен, Германия); Nonlinear Photonics International Summer School (2018, Академгородок, Новосибирск, Россия); 8-й Российский семинар по волоконным лазерам 2018 (2018, Академгородок, Новосибирск, Россия); Всероссийская конференция по волоконной оптике (2017, Пермь, Россия); 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/ Europe-EQEC, 2017, Мюнхен, Германия); 2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS, 2017, Санкт-Петербург, Россия); 7-й Российский семинар по во-

локонным лазерам 2016 (2016, Академгородок, Новосибирск, Россия); Молодежная конкурс-конференция Фотоника и Оптические Технологии (ФОиТ, 2016, Академгородок, Новосибирск, Россия).

Личный вклад автора. В ходе работы автором лично была проведена сборка и характеристика волоконного задающего генератора, он также принимал участие в постановке задачи, анализе экспериментальных данных и численного счета. Проведена постановка эксперимента по генерации рамановских диссипативных солитонов во внешнем резонаторе и измерению параметров полученных импульсов.

Работа состоит из Введения, обзора литературы, описания методов и основной части, где описана вся экспериментальная работа, а также Заключение. Объем диссертации состоит из 96 страниц, включая 45 рисунков и 7 таблиц. Библиографический перечень включает в себя 99 наименований.

Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи работы, аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения, а также дано описание структуры работы.

В первой главе дано введение в базовые понятия используемые в работе. Даны описания различных импульсных режимов, которые могут быть получены в волоконном лазере во всем диапазоне суммарной дисперсии резонатора (от аномальной до нормальной). Приведены наиболее важные работы, связанные с генерацией каждого типа импульсов и дан краткий анализ преимуществ и недостатков описываемых режимов. Перспективнее всего для получения высокэнергетичных импульсов представляется режим генерации чирпованных диссипативных солитонов, получаемых в нормальной дисперсии.

Следующий большой раздел посвящен различным способам

достижения синхронизации мод в волоконных лазерах. Рассмотрены наиболее известные типы насыщающихся поглотителей как материальных, так и основанных на керровской нелинейности (нелинейное вращение поляризации и нелинейные петлевые зеркала). Приведены аргументы для использования системы с нелинейным вращением поляризации в качестве насыщающегося поглотителя.

Последний раздел главы посвящен рассмотрению достижений в области волоконных источников излучения вблизи 1,7 мкм. Рассмотрены как прямые источники, активные волокна, легированные тулием, тулий-гольмием или висмутом, так и косвенные источники, где генерация импульсов осуществляется путем преобразования импульсов накачки за счет нелинейных эффектов. К последней группе относятся параметрическое четырехволновое смешение и вынужденное комбинационное рассеяние.

Во второй главе собраны методы, используемые в ходе всей последующей работы. Рассмотрен метод пространственного разделения физических процессов, применяемый во всех конфигурациях задающего лазера. Суть метода заключается в разделении резонатора на две части: одну без сохранения поляризации излучения, где происходит нелинейное вращение, и вторую большую часть, где поляризация остается неизменной, в которой происходит спектральная фильтрация, нелинейный и дисперсионный набеги фазы.

Помимо этого рассмотрены две основные схемы спектральных фильтров: волоконный фильтр Лео и перестраиваемый фильтр на основе двойного коллиматора и дифракционной решетки. Остальные разделы посвящены описанию технических методик и моделей, используемых в ходе работы.

В третьей главе отражены основные экспериментальные результаты работы с задающим генератором. Была собрана полностью волоконная схема эрбиевого лазера с реализацией пространственного разделения физических процессов. В виду того, что вблизи 1,5 мкм стандартные одномодовые волокна имеют аномальную дисперсию, то для обеспечения суммарной нормальной дисперсии резонатора требовалось использовать специальные волокна со скомпенсированной дисперсией (DCF). Была проведена

комплексная оптимизация резонатора как по взаимному положению элементов, так и в пространстве «длина DCF - ширина спектрального фильтра» с целью получения стабильного самостартующего одноимпульсного режима. В результате была получена генерация chirпованных импульсов с энергией 0,9 нДж и длительностью после сжатия в волоконном компрессоре 165 фс (спектр приведен на рис. 1).

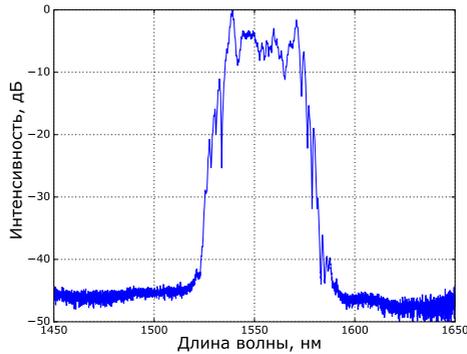


Рис. 1. *Оптический спектр получаемых импульсов после оптимизации резонатора*

Дальнейшие работы были посвящены увеличению энергии генерируемых импульсов за счет удлинения резонатора. Осуществить это стало возможным благодаря использованию волокна РМ Raman, обладающего не только высокой нормальной дисперсией, но и сохранением поляризации. Была исследована зависимость энергии выходных импульсов от направления накачки (рис. 2) после удлинения резонатора. Наблюдалось увеличение энергии до значений 3,3-3,7 нДж в случае сонаправленной накачки и порядка 5,1-5,9 нДж в случае накачки в противоположном направлении. Однако в последней конфигурации спектр импульсов уширился и стал более гладкий, что не характерно для СЧДС(рис. 3 слева).

Было проведено моделирование с целью выявления наличия перехода от режима СЧДС к данному типу импульсов, который

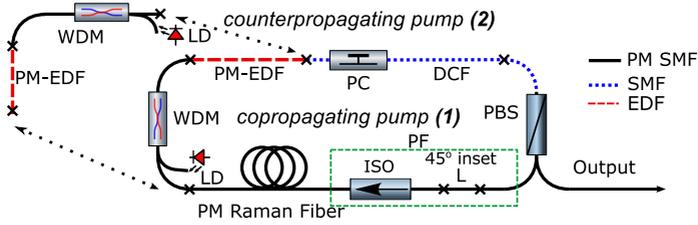


Рис. 2. Схема полностью волоконного лазера после удлинения. Конфигурациями (1) и (2) обозначены схемы с накачкой в совпадающем и противоположном направлении: **WDM** — спектрально-селективный ответвитель; **EDF** — активное волокно, легированное ионами эрбия; **PC** — контроллер поляризации; **DCF** — волокно с компенсированной дисперсией; **PBS** — поляризационный делитель пучка; **ISO** — волоконный оптический резонатор; **SF** — спектральный фильтр; **SMF** — одномодовое волокно; **PM SMF** — одномодовое волокно с сохранением поляризации; **LD** — лазерный диод; **PM Raman Fiber** — рамановское волокно с сохранением поляризации.

был экспериментально охарактеризован как шумподобный. Благодаря коллегам из Института вычислительных технологий СО РАН было проведено моделирование, в ходе которого были найдены решения, соответствующие генерируемому в эксперименте импульсам (рис. 3). Выявлено, что изменение уровня шума активной среды может привести к разрушению внутренней когерентности импульса и спровоцировать переход. Немаловажным является также то, что это влияние может быть скомпенсировано спектральным фильтром, то есть чем выше шум усилителя, тем более высокий контраст фильтра необходимо использовать. Таким образом дальнейшее увеличение энергии импульса было затруднено, и для достижения порога ВКР было решено использовать внешний волоконный усилитель.

Исходя из полученных данных потребовался спектральный фильтр с более высоким контрастом, чтобы заменить уже использовавшийся волоконный фильтр Лио. Был собран фильтр на основе дифракционной решетки и двойного волоконного коллиматора, и собрана схема волоконного лазера, в котором была

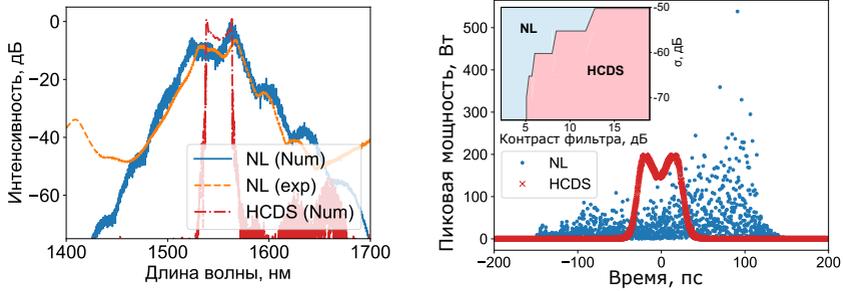


Рис. 3. Сопоставление расчетных спектров импульсов с экспериментальным (слева) и распределение пиковой мощности вдоль импульса (справа). Представлены расчетные спектры как СЧДС так и шумоподобных импульсов. На вставке изображены области существования ДС и шумоподобных импульсов в пространстве «контраст фильтра – уровень шума (σ)»

получена генерация СЧДС (см. рис.4). В данной конфигурации имелась возможность перестройки по центральной длине волны, а также тонкая подстройка частоты обхода резонатора на величину порядка нескольких сотен герц. Мощность выходных импульсов составила 16,7 и 0,8 мВт с выхода НВП и непосредственно перед фильтром соответственно.

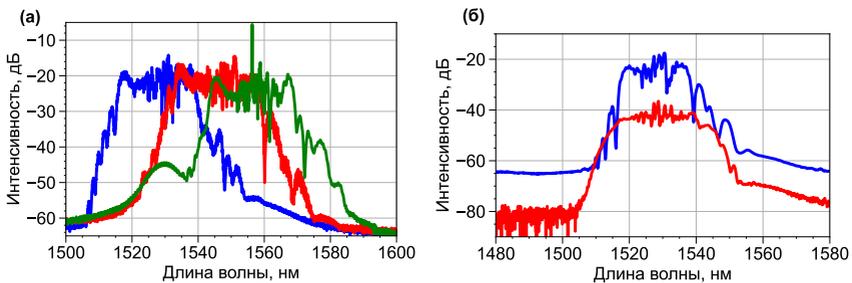


Рис. 4. Пример перестройки спектра импульсов по центральной длине волны (а). Сравнение спектров импульсов на выходе из поляризационного делителя пучка и волоконного ответвителя (б)

Были рассмотрены, совместно с коллегами из лаборатории

волоконной оптики ИАиЭ, возможные схемы усиления генерируемых импульсов с минимизацией нелинейных искажений, в результате чего получено усиление порядка 24 дБ, что было использовано для получения генерации ВКР импульсов.

В качестве альтернативы задающего генератора исследовалась возможность создания волоконного источника солитонов, управляемых дисперсией, в резонаторе с пространственным разделением физических процессов. В процессе работы была предложена схема оценки дисперсии групповых скоростей второго и третьего порядка исходя из изменения распределения пиков Келли при сокращении длины активного световода. Обозначены потенциальные сложности данного метода и предложены варианты их преодоления. Была продемонстрирована многоимпульсная генерация СУД в суммарной дисперсии резонатора по обеим сторонам от нуля. Результаты третьей главы опубликованы в работах [1–4].

В четвертой главе рассматриваются вопросы генерации импульсного излучения, в частности рамановских диссипативных солитонов, за счет преобразования импульса накачки во внешнем резонаторе вследствие ВКР и факторов, влияющих на эффектив-

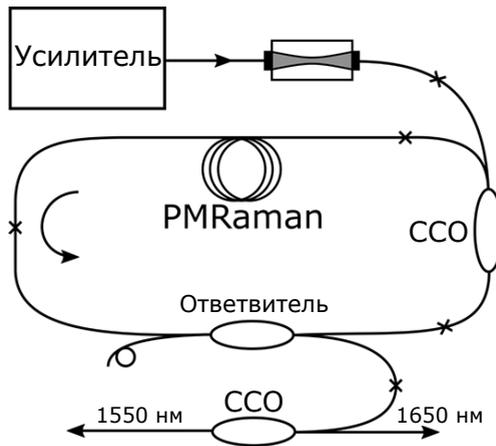


Рис. 5. Схема генератора РДС, используемая в эксперименте: ССО – спектрально-селективный ответвитель.



Рис. 6. Спектры сигнала задающего генератора и получаемых стоксовых импульсов

ность преобразования, в частности, согласование частот обхода задающего генератора и внешнего резонатора. Базовая концепция рассмотрена на примере уже существующей и работающей установки, позволяющей получать импульсы вблизи 1,3 мкм. На данной установке исследовалась возможность усиления импульсов за счет вторичного взаимодействия с отработанным импульсом накачки. Была продемонстрирована потенциальная возможность такого способа, однако уровень усиления составил в среднем 3 дБ и сопровождался излишней модуляцией спектра как накачки, так и сигнала.

Опираясь на полученный опыт, была реализована волоконная схема, представленная на рис. 5. Схема была оптимизирована по длинам используемых световодов для грубого согласования частот обходов, после чего тонкой перестройкой частоты повторения резонатора за счет фильтра достигалось точное (менее 5 Гц) согласование. При этом впервые наблюдалась генерация чирпованных рамановских диссипативных солитонов вблизи 1,7 мкм (см. рис. 6). Была проведена оценка эффективности

преобразования, составившая 85%, что выше как для преобразования параметрическим генератором и так и в случае тулиевого волоконного лазера. Также обнаружено, что дальнейшее повышение мощности приводит к началу генерации стоксового импульса следующего порядка, что было проверено экспериментально. Результаты данной главы частично опубликованы в работах [5, 6].

В Заключение сформулированы и перечисленные результаты работы:

1. Исследована генерация сильночирпованных диссипативных солитонов в волоконном резонаторе с пространственным разделением эффектов нелинейного вращения поляризации и эволюции импульса на длине волны 1550 нм. Были проведены эксперименты по увеличению энергии импульсов за счет удлинения резонатора. Продемонстрировано увеличение энергии с 0,9 до 3,3-3,9 нДж.
2. Проведено моделирование с целью выявления факторов, влияющих на переход «сильночирпованные диссипативные солитоны - шумоподобные импульсы», в результате чего было обнаружено, что одним из таковых факторов является шум активной среды. Установлено, что увеличение уровня шумов на 10 дБ может быть подавлено использованием спектрального фильтра, обладающего контрастом более 12 дБ.
3. В качестве альтернативы генератору сильночирпованных диссипативных солитонов был создан источник солитонов, управляемых дисперсией, с длинным резонатором и пространственным разделением эффектов нелинейного вращения поляризации и эволюции импульса, в котором продемонстрирована только многоимпульсная генерация. Суммарная дисперсия групповых скоростей второго и третьего порядка всего резонатора и активных волокон определялась из распределения пиков Келли в режиме генерации солитонов в аномальной дисперсии. Обозначена проблема, связанная с необходимостью прецизионной и непрерывной подстройки внутррезонаторной дисперсии в лазере.

4. Установлено, что наиболее реализуемой стратегией для генерации рамановских диссипативных солитонов на длинах волн 1,6-1,7 мкм является вариант «задающий генератор – усилитель – внешний резонатор».
5. Для генератора сильночирпованных диссипативных солитонов собран перестраиваемый фильтр на объемной дифракционной решетке и двойном волоконном коллиматоре. Такая конфигурация позволила получить генерацию целевых импульсов с перестраиваемой длиной волны. Дополнительно было произведено сравнение ширины спектра импульса в различных точках резонатора: из поляризационного делителя пучка и непосредственно перед фильтром.
6. Проведены эксперименты и моделирование усиления импульсов, определены параметры оптимальной конфигурации усилителя, позволяющей получить усиление до энергии 29,8 нДж без значительных нелинейных искажений импульсов, что оказалось достаточно для использования данных импульсов в качестве накачки внешнего резонатора и дальнейшего получения рамановских диссипативных солитонов с длиной волны вблизи 1,7 мкм.
7. Основным достижением данной работы является получения генерации рамановских диссипативных солитонов на длинах волн 1,7 мкм. Продемонстрировано, что метод генерации такого вида импульсов во внешнем резонаторе может быть успешно использован в других спектральных диапазонах.
8. Была исследована зависимость оптического спектра получаемых импульсов от мощности импульса накачки. Показана рекордная эффективность преобразования в 85%. Из полученных данных следует, что дальнейший рост энергии рамановского диссипативного солитона ограничен появлением стоксового импульса следующего порядка.

А также даны предложения по дальнейшим потенциальным направлениям развития работы.

Цитированная литература

1. *Chang G., Wei Zh.* Ultrafast fiber lasers: an expanding versatile toolbox // *Iscience*. — 2020. — Vol. 23, no. 5. — P. 101101.
2. *Zipfel W. R., Williams R. M., Webb W. W.* Nonlinear magic: multiphoton microscopy in the biosciences // *Nature biotechnology*. — 2003. — Vol. 21, no. 11. — P. 1369–1377.
3. *Freudiger C. W., Yang W., Holtom G. R. et al.* Stimulated Raman scattering microscopy with a robust fibre laser source // *Nature photonics*. — 2014. — Vol. 8, no. 2. — P. 153–159.
4. *Xu C., Wise F. W.* Recent advances in fibre lasers for nonlinear microscopy // *Nature Photonics*. — 2013. — Vol. 7, no. 11. — P. 875–882.
5. *Qin Y., Batjargal O., Cromey B., Kieu K.* All-fiber high-power 1700 nm femtosecond laser based on optical parametric chirped-pulse amplification // *Optics express*. — 2020. — Vol. 28, no. 2. — P. 2317–2325.
6. *Li C., Wei X., Kong C. et al.* Fiber chirped pulse amplification of a short wavelength mode-locked thulium-doped fiber laser // *APL Photonics*. — 2017. — Vol. 2, no. 12. — P. 121302.
7. *Chen Sh., Chen Y., Liu K. et al.* All-fiber short-wavelength tunable mode-locked fiber laser using normal dispersion thulium-doped fiber // *Optics Express*. — 2020. — Vol. 28, no. 12. — P. 17570.
8. *Chen J.-X., Zhan Z.-Y., Li C. et al.* 1.7 μm Tm-fiber chirped pulse amplification system with dissipative soliton seed laser // *Optics Letters*. — 2021. — Vol. 46, no. 23. — P. 5922.
9. *Noronen T., Okhotnikov O., Gumenyuk R.* Electronically tunable thulium-holmium mode-locked fiber laser for the 1700-1800 nm wavelength band // *Optics Express*. — 2016. — Vol. 24, no. 13. — P. 14703.
10. *Firstov S. V., Alyshev S. V., Riumkin K. E. et al.* Laser-Active Fibers Doped with Bismuth for a Wavelength Region of 1.6-1.8 μm // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. — 2018. — Vol. 24, no. 5.
11. *Khegai A., Melkumov M., Riumkin K. et al.* NALM-based bismuth-doped fiber laser at 1.7 μm // *Optics letters*. — 2018. —

Vol. 43, no. 5. — P. 1127–1130.

12. *Soboń G., Martynkien T., Tarnowski K. et al.* Generation of sub-100 fs pulses tunable from 1700 to 2100 nm from a compact frequency-shifted Er-fiber laser // *Photonics Research*. — 2017. — Vol. 5, no. 3. — P. 151–155.

Список публикаций автора по теме диссертации

1. *Zhdanov I. S., Kharenko D. S., Podivilov E. V. et al.* Generation of highly-chirped dissipative solitons in Er-doped all-fiber oscillator // 2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS). — IEEE, 2017. — P. 1605–1609.
2. *Kharenko D. S., Zhdanov Innokentiy S., Bednyakova Anastasia E. et al.* All-fiber highly chirped dissipative soliton generation in the telecom range // *Optics Letters*. — 2017. — Vol. 42, no. 16. — P. 3221.
3. *Жданов И. С., Харенко Д. С., Бабин С. А.* Полностью волоконный эрбиевый лазер с синхронизацией мод с высокой энергией в импульсе // *Прикладная Фотоника*. — 2018. — Т. 3. — С. 173–179.
4. *Zhdanov I. S., Bednyakova A. E., Volosi V. M., Kharenko D. S.* Energy scaling of an erbium-doped mode-locked fiber laser oscillator // *OSA Continuum*. — 2021. — Vol. 4, no. 10. — P. 2663.
5. *Bednyakova A. E., Kharenko D. S., Zhdanov I. et al.* Raman dissipative solitons generator near 13 mkm: limiting factors and further perspectives // *Optics Express*. — 2020. — Vol. 28, no. 15. — P. 22179.
6. *Zhdanov I., Kharenko D. S., Bednyakova A. E. et al.* All-fiber pulsed laser source based on Raman dissipative soliton generation for biological tissue analysis // *Ultrafast Nonlinear Imaging and Spectroscopy VIII* / Ed. by Zhiwen Liu, Demetri Psaltis, Kebin Shi. — SPIE, 2020. — P. 41.