

На правах рукописи

Кохановский Алексей Юрьевич

**ГЕНЕРАЦИЯ КОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ В ВОЛОКОННЫХ
ЛАЗЕРНЫХ РЕЗОНАТОРАХ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНЫХ
ПЕТЛЕВЫХ ЗЕРКАЛ**

Специальность 01.04.21 –

“Лазерная физика”

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико – математических наук

Новосибирск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Новосибирский национальный исследовательский
государственный университет», г. Новосибирск
Смирнов Сергей Валерьевич

Официальные оппоненты: Рубцова Наталия Николаевна
доктор физико-математических наук
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт физики
полупроводников им. А.В. Ржанова
Сибирского отделения Российской академии
наук, г. Новосибирск,
заведующая лабораторией

Камынин Владимир Александрович
кандидат физико-математических наук
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Федеральный
исследовательский центр «Институт общей
физики им. А.М. Прохорова Российской
академии наук» (ИОФ РАН), г. Москва,
старший научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт автоматики и
электрометрии СО РАН, г. Новосибирск

Защита состоится «27» мая 2021 г. на заседании диссертационного совета при федеральном государственном учреждении науки Институте лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: пр. Академика Лаврентьева, 15 Б, Новосибирск, 630090

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института лазерной физики СО РАН (<http://www.laser.nsc.ru>)

Автореферат разослан “__” _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 003.024.01, д.ф.- м. н.

Прудников О.Н.

Общая характеристика работы

Актуальность

Изучение волоконных источников сверхкоротких импульсов является динамично развивающейся областью волоконной оптики, тесно связанной с прикладными задачами. Среди преимуществ волоконных лазерных систем можно выделить их относительно малые размеры, высокое качество выходного оптического пучка, эффективное охлаждение, высокую стабильность импульсной генерации, возможность генерации коротких и сверхкоротких импульсов пико- и фемтосекундного диапазона.

Первые импульсные волоконные лазеры появились вскоре после демонстрации непрерывных лазеров с использованием активных волокон, легированных неодимом [1]. Для генерации импульсного излучения использовались активные модуляторы [2], при этом длительность импульсов определялась временными характеристиками модуляторов и составляла несколько сотен пикосекунд. В первых волоконных лазерах параметры оптического волокна резонатора, такие как коэффициент хроматической дисперсии групповых скоростей и нелинейный коэффициент Керра, слабо влияли на параметры выходного импульсного излучения.

Большой прогресс в области волоконных лазеров с синхронизацией мод резонатора начался с появлением активных волокон, легированных ионами эрбия, которые позволили генерировать оптическое излучение в области 1.55 мкм, где кварцевое одномодовое волокно имеет наименьшие оптические потери и обладает аномальной хроматической дисперсией групповых скоростей. Использование в лазерном резонаторе длинного отрезка волокна, легированного эрбием, позволило добиться импульсной генерации с длительностью несколько пикосекунд с явными признаками солитонного формирования импульса [3,4], при котором достигался баланс между эффектами хроматической дисперсии и фазовой само-модуляции. В

дальнейшем генерацию солитонов демонстрировали в других спектральных областях: 1.06 мкм [5], 1.9 мкм [6], 2 мкм [7].

Условие баланса между эффектами хроматической дисперсии и Керровской нелинейности существенно ограничивает максимальную энергию солитонов в масштабах пикоджоулей. В процессе изучения принципов формирования импульсного излучения в волоконных резонаторах в режиме синхронизации мод были выявлены различные классы импульсов, которые обладают значительно большими энергиями: растянутые импульсы [8], симиляритоны [9], диссипативные солитоны [10].

Особый интерес представляют диссипативные солитоны (ДС), которые могут обладать энергиями вплоть до микроджоулей [11] и могут быть сжаты вне волоконного резонатора до десятков фемтосекунд [12]. В отличие от консервативных солитонов, ДС формируются в волоконном резонаторе при условии баланса между консервативными (хроматическая дисперсия, нелинейность Керра) и диссипативными эффектами, связанными с оптическими потерями (линейные потери, спектральная фильтрация). При этом существенные оптические потери в одной части волоконного резонатора компенсируются оптическим усилением в другой его части. В результате жесткое ограничение на максимальную энергию импульсов исчезает.

Следующим необходимым условием генерации ДС в волоконном лазерном резонаторе является наличие элемента (или группы элементов), дискриминирующего непрерывное излучение по отношению к импульсному – насыщающегося поглотителя. Генерация ДС была продемонстрирована в различных лазерных схемах с эффектом нелинейного вращения поляризации [13], с использованием слоя углеродных нанотрубок [14], с использованием полупроводникового насыщающегося поглотителя, с использованием волоконного петлевого зеркала [15].

Лазеры на основе волоконных петлевых зеркал являются наиболее перспективными с точки зрения создания полностью волоконных источников высокомоментных импульсов. Кварцевое волокно, на базе которого реализуется петлевое зеркало, поддерживает распространение оптического излучения мощностью более десятка Ватт. Благодаря этой особенности на базе волоконного петлевого зеркала был создан полностью волоконный источник импульсов с энергией 12 мкДж [16]. Принцип работы петлевого зеркала позволяет создавать резонаторы на базе элементов с сохранением поляризации, которые обеспечивают стабильность импульсной генерации по отношению к влиянию окружающей среды [17].

Однако классические схемы лазеров с нелинейным усиливающим петлевым зеркалом накладывают ограничения на управление параметрами ДС. При увеличении энергии ДС наблюдается увеличение длительности импульса, спровоцированное эффектом диссипативного солитонного резонанса (ДСР). Увеличение длительности ДС сопровождается сужением его оптического спектра и закреплением его пиковой мощности [18]. Эффект наблюдался во множестве работ, посвященных исследованию волоконных лазеров с нелинейным петлевым зеркалом [19–23].

ДС является когерентным импульсом – спектральные моды ДС связаны друг с другом по фазе. Помимо генерации полностью когерентных импульсов, в волоконных лазерных резонаторах возможна генерация частично когерентных импульсов, которые иначе называются двух-масштабными [24]. При частичной когерентности оптический импульс обладает двумя временными масштабами: длительностью огибающей оптического импульса и длительностью флуктуаций оптического поля внутри огибающей. Двух-масштабные импульсы обеспечивают более эффективную генерацию второй гармоники [25] и генерацию супер-континуума [26] по сравнению с полностью когерентными импульсами. Возможность вариации степени когерентности импульсного излучения в фиксированном лазерном резонаторе остается

малоизученной и несет в себе как фундаментальный, так и практический интерес.

Ключевой идеей для вариации параметров импульсного излучения является использование нескольких участков усиления оптического излучения в лазерном резонаторе с нелинейным петлевым зеркалом. При синхронизации мод резонатора роль этих участков заключается не только в усилении, но и в изменении нелинейного набега фазы оптического излучения и свойств насыщающегося поглощения петлевого зеркала. Распределенный контроль перечисленных эффектов в разных точках лазерного резонатора является мощным инструментом для непрерывной вариации параметров импульсного излучения.

Цель диссертационной работы

Целью данной работы являлась разработка схем волоконных лазерных резонаторов на основе волоконных зеркал, предоставляющих возможность независимой перестройки параметров импульсного излучения, таких как: пиковая мощность, ширина оптического спектра, временная длительность, степень когерентности.

В соответствии с поставленной целью необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать полностью волоконную лазерную систему на основе нелинейного петлевого зеркала и добиться ее стабильной работы в режиме импульсной генерации.
2. Разработать элемент на основе нелинейного петлевого зеркала для эффективного управления свойствами импульсного излучения.
3. Разработать комплексную систему для синхронного измерения параметров импульсного излучения в режиме синхронизации мод.
4. Исследовать режимы генерации коротких импульсов при различных параметрах и конфигурациях волоконного лазерного резонатора.

Научная новизна

1. Впервые исследованы свойства схемы волоконного нелинейного усиливающего петлевого зеркала с двумя отрезками активного волокна с независимо управляемыми модулями оптической накачки в качестве насыщающегося поглотителя. Продемонстрирована возможность управления мощностью насыщения нелинейного усиливающего зеркала независимо от его коэффициента усиления, которая недостижима в схеме с одним отрезком активного волокна.
2. Впервые продемонстрирована возможность варьировать пиковую мощность диссипативных солитонов при достижении диссипативного солитонного резонанса в волоконном лазерном резонаторе на основе нелинейного петлевого зеркала.
3. Впервые выявлена возможность непрерывного изменения высоты пика когерентности двухмасштабных импульсов в волоконном резонаторе на основе усиливающего петлевого зеркала.
4. Впервые проведено спектральное преобразование двух-масштабных оптических импульсов в двух-масштабные импульсы в спектральной области 1270 нм.

Практическая значимость

1. Разработаны и апробированы волоконные лазерные системы на основе нелинейного усиливающего зеркала. Разработанные системы могут быть использованы в качестве задающих генераторов в источниках суперконтинуума, системах усиления чирпированных импульсов. Данные источники в свою очередь широко применяются для задач микроскопии, метрологии, оптической томографии, прецизионной обработки материалов. Разработанный источник частично-когерентных импульсов с центральной длиной волны 1270 нм может быть использован для проведения процедуры фотодинамической терапии.

2. Разработан стохастический алгоритм управления распределенным усилением в волоконном лазерном резонаторе для автоматического управления параметрами импульсного излучения. Алгоритм может быть использован для создания самонастраивающихся лазерных систем, которые в автоматическом режиме оптимизируют параметры импульсного излучения и могут адаптироваться к влиянию окружающей среды.

Защищаемые положения:

1. Волоконное нелинейное усиливающее петлевое зеркало с двумя отрезками активного волокна с независимо управляемыми модулями оптической накачки обеспечивает возможность управления мощностью насыщения зеркала независимо от коэффициента усиления.
2. Управление коэффициентами усиления активных волокон лазерного резонатора на основе нелинейного петлевого зеркала позволяет воспроизводимо варьировать пиковую мощность, длительность, ширину оптического спектра диссипативных солитонов и высоту пика когерентности двухмасштабных импульсов более чем в 5 раз.
3. Двухмасштабные импульсы на длине волны 1080 нм могут быть преобразованы в фосфор-силикатном осцилляторе на основе эффекта вынужденного комбинационного рассеяния в двухмасштабные импульсы на длине волны в области 1270 нм с энергией 63 нДж

Апробация работы

Результаты работы докладывались на международных конференциях PIERS-2017 (Сингапур), ICLO-2018 (Санкт-Петербург, Россия), RFLO (Новосибирск, Россия), SPIE ASIA -2018 (Пекин, Китай), Photonics West-2017/2018 (Сан Франциско, США), Photonics West-2017/2019 (Сан Франциско, США), CLEO/EUROPE 2019 (Мюнхен, Германия).

Личный вклад автора

Основные экспериментальные и численные результаты получены автором лично. В ходе выполнения работ автор принимал активное участие в постановке задач, в обработке и обсуждении результатов, в подготовке статей для публикации.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 111 страницах, содержит 65 рисунка и 1 таблицу. Список литературы содержит 114 наименований.

Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 10 печатных изданиях, 7 из которых опубликованы в рецензируемых журналах определенных ВАК, 3 – тезисы докладов.

Содержание работы

Во **введении** проводится обзор литературных данных по теме диссертации, анализируются ключевые результаты в области тематики исследований данной работы. Обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы. Формулируется цель и задачи работы, излагается ее научная новизна и практическая значимость, представляются выносимые на защиту положения.

Первая глава посвящена исследованию волоконных петлевых зеркал и их влиянию на свойства оптических импульсов. Глава начинается с описания существующих схем нелинейных петлевых зеркал, анализируются основные ограничения, накладываемые свойствами нелинейных петлевых зеркал на параметры импульсного излучения в волоконных резонаторах. Далее предлагается новая схема нелинейного усиливающего петлевого зеркала с двумя усиливающими участками НУПЗ-2 (Рисунок 1).

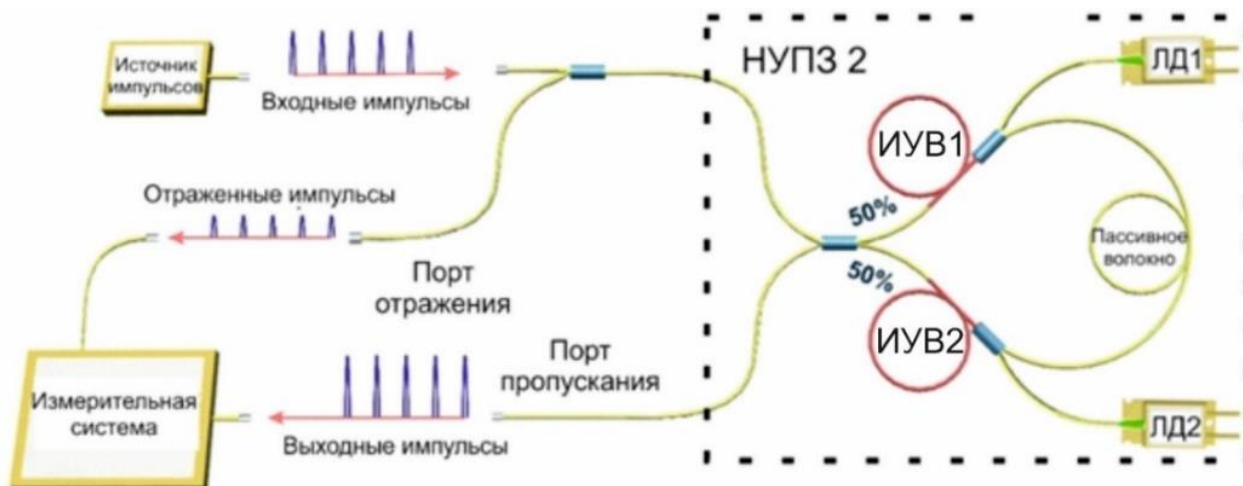


Рисунок 1 Экспериментальная схема измерения пропускных свойств НУПЗ-2. ИУВ 1 и ИУВ2 – иттербиевые усиливающие волокна, ЛД1 и ЛД2 – лазерные диоды оптической накачки усиливающих волокон ИУВ1 и ИУВ2 соответственно.

Ключевым отличием НУПЗ-2 от классического нелинейного усиливающего зеркала является возможность увеличения его мощности насыщения вместе с увеличением коэффициента его усиления. За мощность насыщения НУПЗ-2 принимается значение пиковой мощности входного импульса, при котором он испытывает максимальный коэффициент пропускания, нормированный на коэффициент усиления НУПЗ-2.

Для подтверждения данного факта был экспериментально измерен коэффициент пропускания НУПЗ-2 коротких импульсов длительностью 16 пс с варьируемой пиковой мощностью в диапазоне от 1 до 140 Вт. Управление мощностью оптической накачки двух усиливающих волокон обеспечивает как уменьшение, так и увеличение мощности насыщения НУПЗ-2 вне зависимости от общего усиления оптического излучения (Рисунок 2).

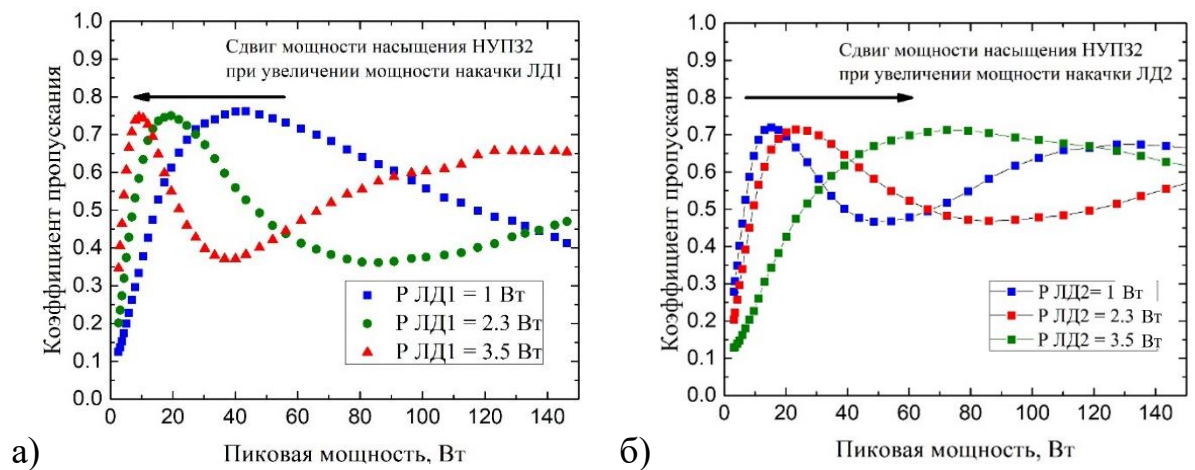


Рисунок 2 Экспериментальные кривые пропускания НУПЗ-2 в зависимости от пиковой мощности входных импульсов при разных значениях мощности оптической накачки лазерных диодов а) при фиксированном значении ЛД2 и разных значениях ЛД1 б) при фиксированном значении ЛД1 и разных значениях ЛД2. Коэффициент пропускания петли нормировался на коэффициент усиления петли при разных значениях мощности оптической накачки для удобства определения относительного расположения пиков.

Во **второй главе** проводится теоретическое и экспериментальное исследование генерации ДС в волоконном лазере на основе нелинейного усиливающего зеркала, в частности НУПЗ-2 (Рисунок 3).

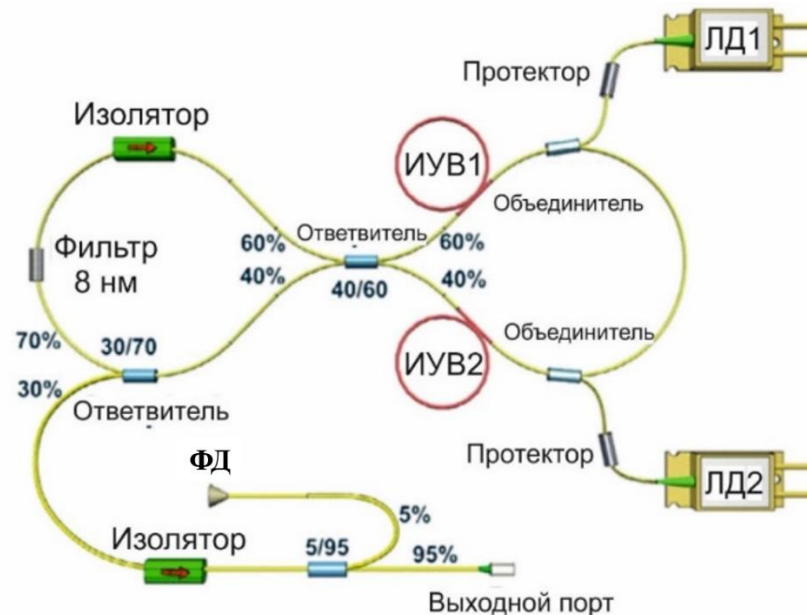


Рисунок 3 Схема волоконного лазерного резонатора на основе НУПЗ-2. ИУВ 1 и ИУВ2 – иттербиевые усиливающие волокна, ЛД1 и ЛД2 – лазерные диоды оптической накачки усиливающих волокно ИУВ1 и ИУВ2 соответственно, ФД – фотодетектор.

Управление коэффициентами усиления усиливающих волокон, легированных иттербием (ИУВ1 и ИУВ2), петлевого зеркала обеспечивало широкую перестройку длительности импульсов в диапазоне 55 – 160 пс и перестройку ширины оптического спектра в диапазоне 0.4 – 1 нм. Частота повторения импульсов составляла 21 МГц определялась измерением электрического сигнала фотодетектора (ФД) радио-частотным анализатором спектра Tektronix RSA308B. Возможность изменения условий диссипативного резонанса через изменение мощности насыщения НУПЗ-2 позволила управлять пиковой мощностью выходных импульсов в диапазоне 50 – 400 Вт. Далее определялись области значений мощностей оптических накачек активных волокон, соответствующих генерации полностью когерентных и частично когерентных импульсных режимов.

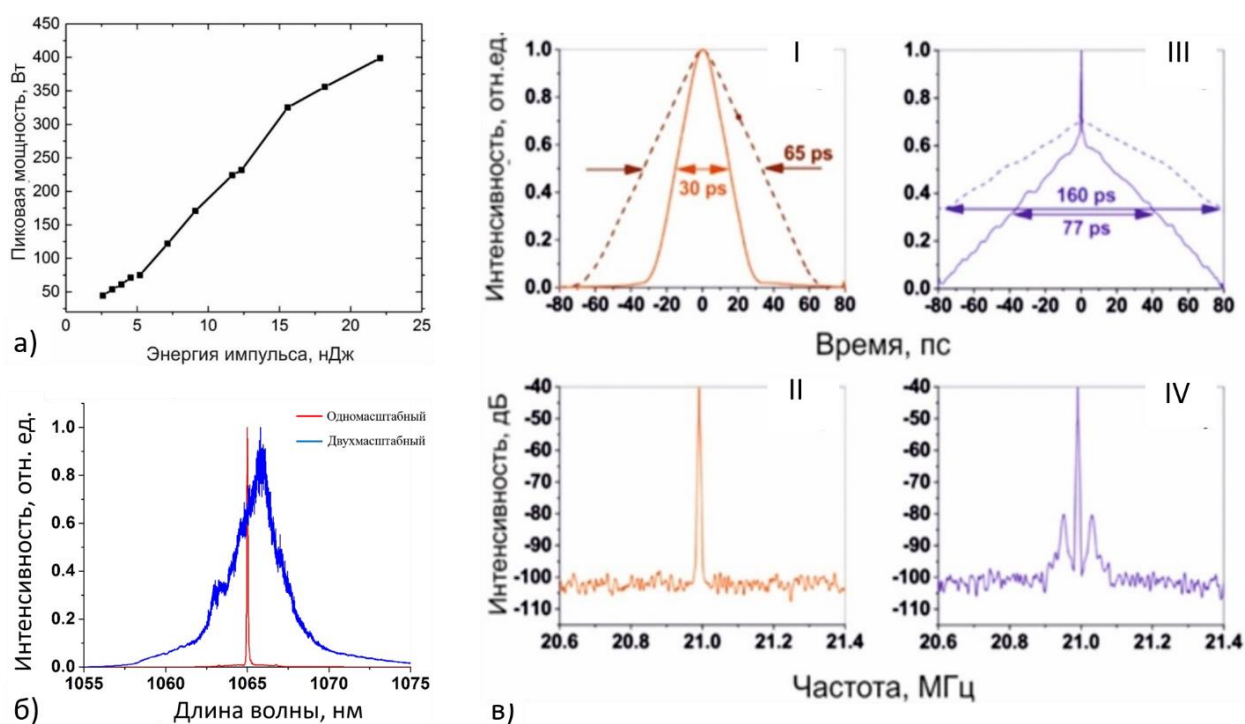


Рисунок 4 а) Зависимость пиковой мощности импульсов от их энергии. б) Типичные оптические спектры двухмасштабных и одномасштабных импульсов, сгенерированных в волоконном лазерном резонаторе с НУПЗ-2 в) Типичные параметры автокорреляционной функции и радиочастотного спектра импульсов, сгенерированных в волоконном лазерном резонаторе с НУПЗ-2. Сплошной линией обозначена автокорреляционная функция наименьшей длительности, пунктирной наибольшей.

При экспериментальном исследовании особенностей генерации импульсных режимов волоконного лазера на основе НУПЗ-2 было выявлено ограничение на наименьшую длительность генерируемых импульсов, накладываемое общей длиной НУПЗ-2. Вследствие необходимости добавления дополнительного активного волокна, НУПЗ-2 имеет относительно большую длину. Чтобы сохранить две степени свободы для управления параметрами импульсного режима было принято решение перенести одно усиливающее волокно во вторую петлю волоконного лазерного резонатора (Рисунок 5).

Управление мощностью оптической накачки лазерных диодов (ЛД1 и ЛД2) также обеспечило большую вариативность параметров импульсного излучения. Длительность импульсов изменялась в диапазоне 23 – 114 пс, ширина оптического спектра 2.75 – 20 нм, средняя мощность излучения 40 – 360 мВт, контраст пика когерентности 0.02 – 0.50.

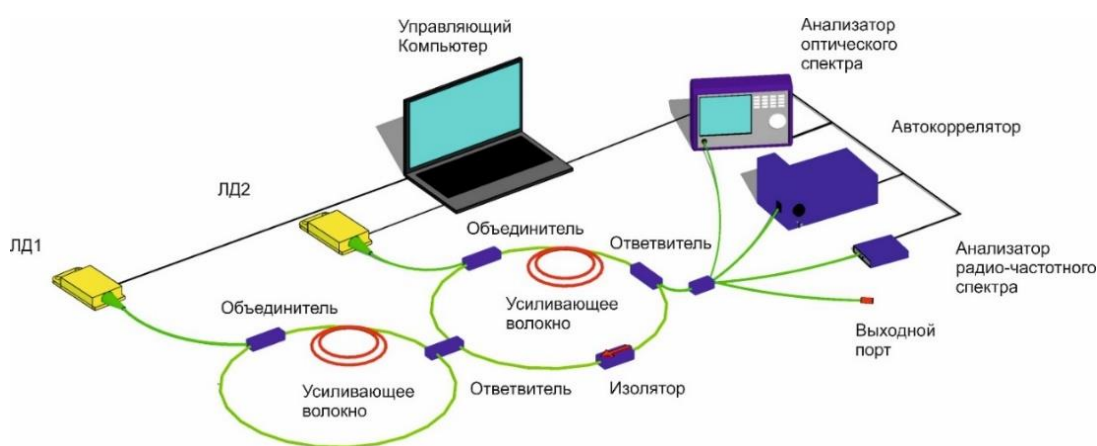


Рисунок 5 Экспериментальная схема волоконного лазера с двумя усиливающими волокнами в разных петлях резонатора, и измерительной системы. ЛД1 и ЛД2 – лазерные диоды оптической накачки усиливающих волокон.

Вариативность параметров ДС в зависимости от управляющих токов лазерных диодов оптической накачки демонстрируется на (Рисунок 6).

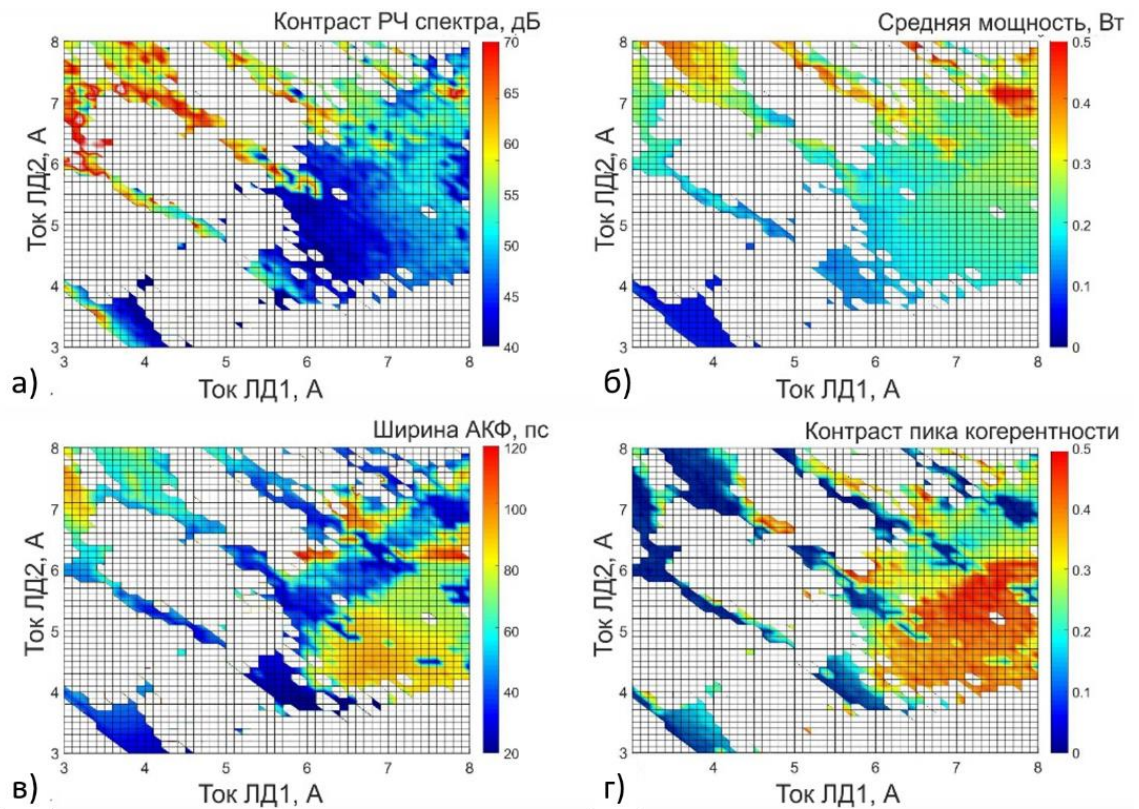


Рисунок 6 Карты а) контраста радиочастотного спектра, б) средней мощности, в) ширины на полувысоте автокорреляционной функции и г) контраста пика когерентности автокорреляционной функции импульсного излучения в зависимости от мощности оптической накачки активных волокон. Белым цветом отмечены области отсутствия стабильной генерации импульсного излучения.

Области импульсной генерации не связаны друг с другом и параметры импульсного излучения имеют нетривиальную зависимость от задающих токов лазерных диодов оптической накачки. Для эффективного управления параметрами импульсного излучения и их оптимизации использовался стохастический алгоритм оптимизации, также известный как генетический алгоритм [27]. Траектория поиска алгоритмом импульсного режима с наименьшей длительностью представлена на (Рисунок 7 а) Автокорреляционные функции найденных импульсных режимов при независимых стартах алгоритма представлены на (Рисунок 7 б) С помощью данного алгоритма были найдены импульсные режимы с наименьшей длительностью 23 пс и импульсные режимы с наибольшей энергией 22 нДж, реализуемые в фиксированной геометрии лазерного резонатора (Рисунок 7 в).

Продемонстрирована возможность задания параметров импульсной генерации на примере генерации импульсных режимов с разной высотой пика когерентности в диапазоне от 0.02 до 0.5 и одинаковой длительностью огибающей автокорреляционной функции 50 пс (Рисунок 7 г).

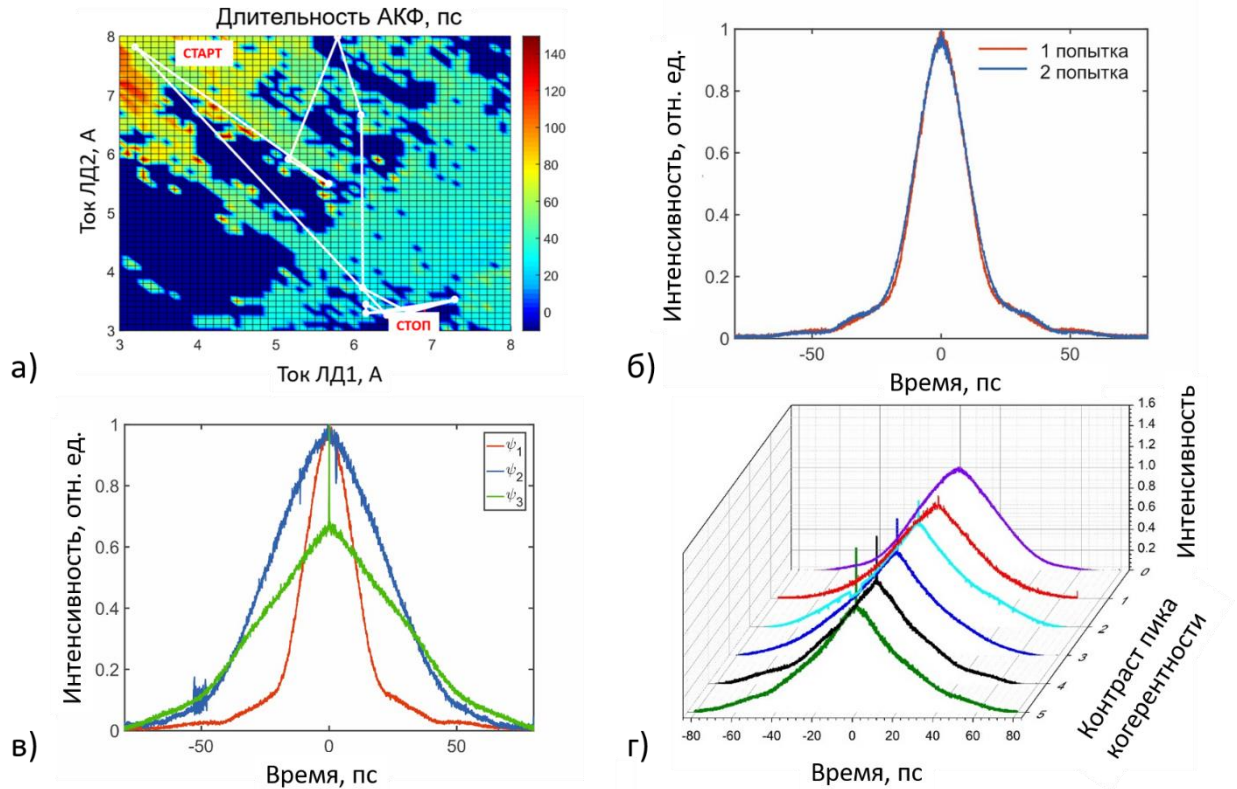


Рисунок 7 Траектория поиска алгоритмом импульсного режима с наименьшей длительностью. б) Автокорреляционные функции найденных импульсных режимов с наименьшей длительностью для двух независимых запусках алгоритма. в) Автокорреляционные функции импульсных режимов при оптимизации целевых функций ψ_1 – с минимальной длительностью, ψ_2 – с максимальной энергией, ψ_3 – с максимальной высотой пика когерентности. г) Автокорреляционные функции двухмасштабных импульсов с постоянной длительностью огибающей и разными значениями высоты пика когерентности.

Сравнение свойств импульсного излучения двух схем волоконных лазерных резонаторов на основе петлевых зеркал показало их качественное различие в спектральной области. Оптический спектр ДС, сгенерированного в схеме с НУПЗ-2, обладал узким высокоинтенсивным пиком и широким маломощным фоном (Рисунок 4 б)). Импульсы лазера с двумя усиливающими волокнами в разных петлях резонатора, напротив, характеризовались широким оптическим спектром с относительно резкими краями.

Далее было проведено исследование возможности перехода между генерациями двух качественно отличающихся импульсных режимов в рамках одной архитектуры волоконного лазерного резонатора с двумя усиливающими участками в обеих петлях лазерного резонатора. Численное моделирование показало, что линейное масштабирование мощности насыщения активных волокон и длин пассивных волокон в обеих петлях лазерного резонатора позволяет осуществить переход между двумя типами ДС (Рисунок 8).

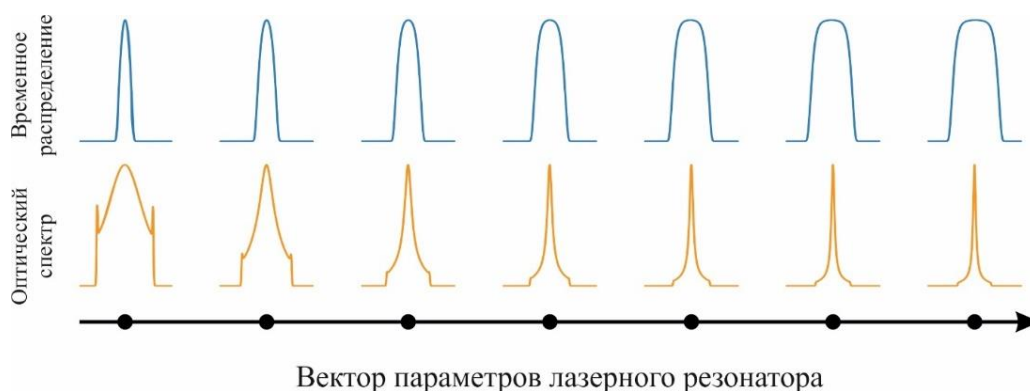


Рисунок 8 Изменение оптического спектра и временного распределения генерируемых ДС при линейном масштабировании параметров лазерного резонатора на основе нелинейного петлевого зеркала.

Модификация экспериментального волоконного лазера также показала возможность такого перехода. На (Рисунок 9 а) б)) представлены автокорреляционная функция и оптический спектр типичного импульса, сгенерированного в модифицированном лазерном резонаторе. Для лазера были определены границы масштабирования энергии и пиковой мощности генерируемых импульсов. В зависимости от мощности оптической накачки лазерных диодов, наблюдалось возникновение значительного вынужденного комбинационного рассеяния или срыв одноимпульсного режима в многоимпульсный (Рисунок 9 в)). При превышении энергии импульсов 19,6 нДж наблюдался переход одноимпульсного режима в двух-импульсный, при превышении пиковой мощности 150 Вт наблюдалось возникновение стоксовой волны, составляющей $>1\%$ общей мощности импульсного излучения.

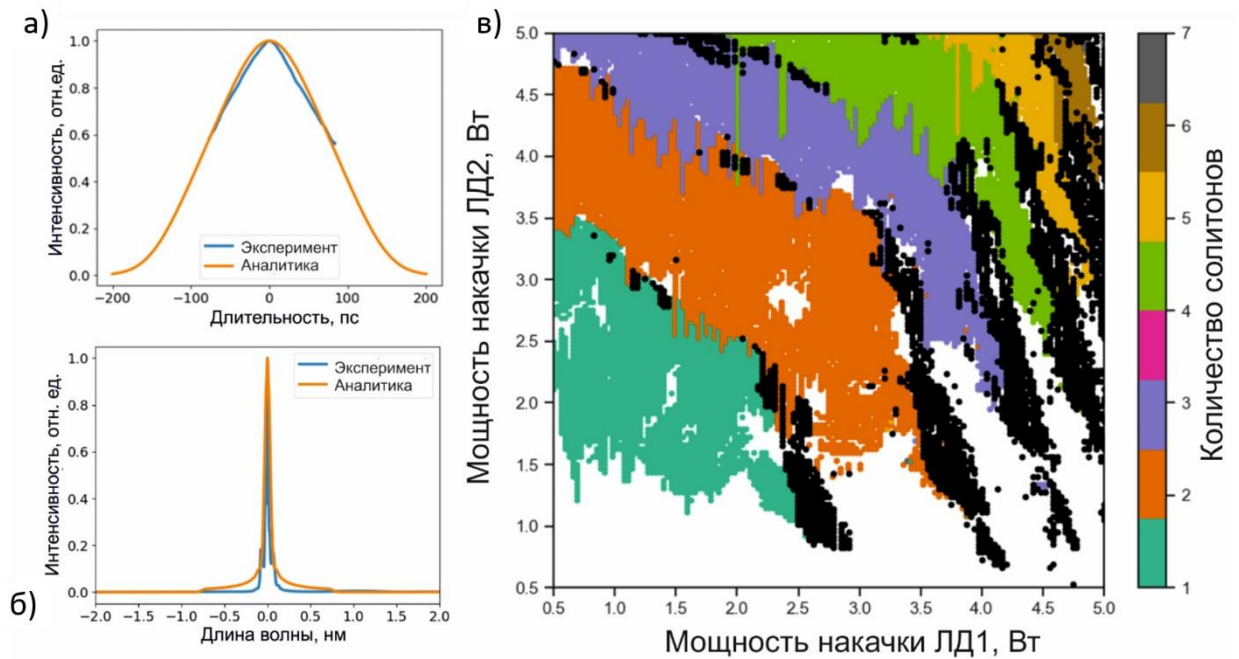


Рисунок 9 Параметры импульсных режимов волоконного лазерного резонатора с двумя усиливающими средами в обеих частях лазерного резонатора а) Типичная автокорреляционная функция, б) Типичный оптический спектр генерируемых ДС, в) Количество солитонов в цуге импульсов в зависимости от мощности оптической накачки лазерных диодов.

Третья глава посвящена спектральному преобразованию двух-масштабных импульсов, сгенерированных в волоконном лазере на основе нелинейного петлевого зеркала. Двух-масштабные импульсы направлялись в волоконный фосфор-силикатный спектральный конвертер на основе эффекта вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) (Рисунок 10). Частота повторения двух-масштабных импульсов согласовывалась с фундаментальной частотой ВКР – конвертера с помощью линии задержки внутри лазерного резонатора.

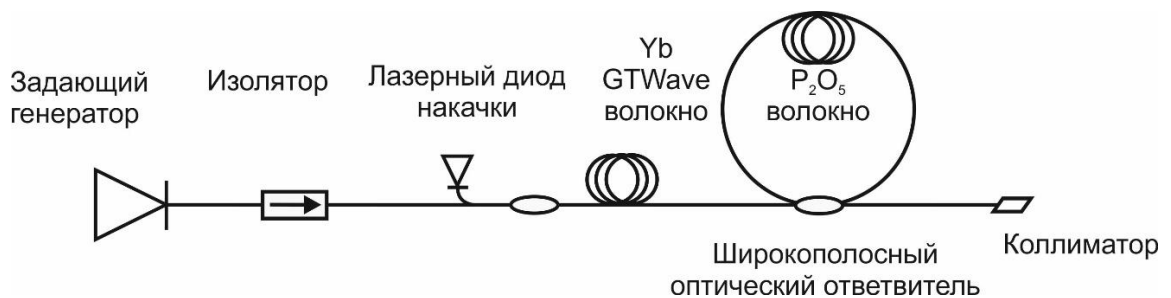


Рисунок 10 Схема волоконного осциллятора на основе вынужденного комбинационного рассеяния.

При обеспечении синхронной накачки ВКР - конвертера были получены рекордные значения энергии импульсов 62 нДж в области 1270 нм (Рисунок 11).

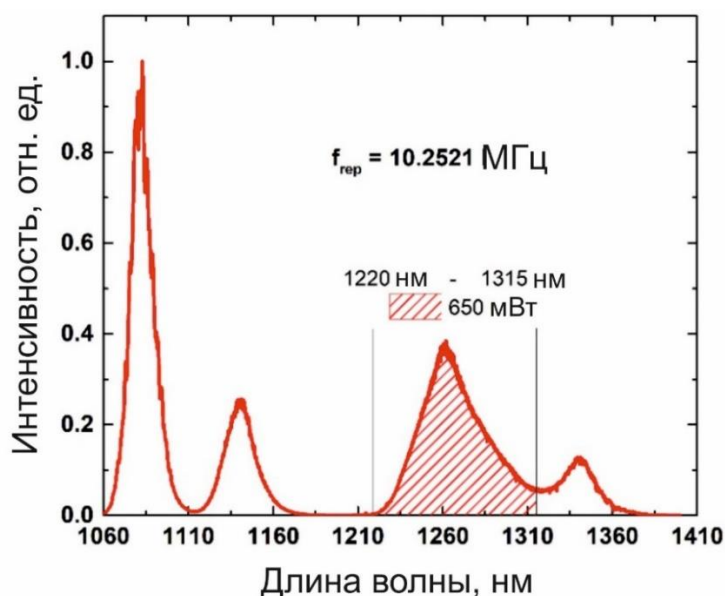


Рисунок 11 Оптический спектр выходного излучения волоконного осциллятора при максимуме генерации оптического излучения в области 1270 нм.

В **заклучении** сформулированы следующие основные результаты диссертации:

1. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили создать конфигурацию НУПЗ-2 для управления свойствами импульсного излучения в волоконном лазерном резонаторе. Продемонстрирована возможность управления мощностью насыщения НУПЗ-2 вне зависимости от его общего усиления, что принципиально отличает его от классического нелинейного петлевого зеркала.
2. Реализована экспериментальная схема волоконного лазерного резонатора с НУПЗ-2. Общая нормальная дисперсия волоконного лазерного резонатора обуславливала генерацию коротких ДС с длительностью в диапазоне 55 – 160 пс. Управление коэффициентами усиления НУПЗ-2 обеспечило перестройку пиковой мощности ДС в диапазоне 50 – 400 Вт. Избирательный переход между диссипативными

солитонными резонансами позволил управлять спектральными свойствами импульсов. Были выявлены области генерации полностью когерентных и частично когерентных импульсных режимов.

3. Реализована экспериментальная схема волоконного лазерного резонатора с двумя усилителями в обеих петлях лазерного резонатора. Параметры когерентных импульсов лежали в диапазонах: длительность 23 – 114 пс, ширина оптического спектра 2.75 – 20 нм, средняя мощность излучения 40 – 360 мВт
4. Разработан и применен на практике стохастический алгоритм оптимизации для поиска импульсных режимов с заданными параметрами. С помощью данного алгоритма были найдены импульсные режимы с наименьшей длительностью 23 пс и импульсные режимы с наибольшей энергией 22 нДж, реализуемые в фиксированной геометрии лазерного резонатора. Продемонстрирована возможность задания параметров импульсной генерации на примере генерации импульсных режимов с разной высотой пика когерентности в диапазоне 0.02 – 0.5 и одинаковой длительностью огибающей автокорреляционной функции 50 пс.
5. Впервые было продемонстрировано спектральное преобразование двух-масштабных импульсов на длине волны 1080 нм, сгенерированных в волоконном лазере с НУПЗ, в двух-масштабные импульсы на длине волны 1270 нм в фосфор-силикатном ВКР-осцилляторе с коэффициентом преобразования 47%. Максимальная энергия импульсов с центральной длиной волны 1270 нм составила 63 нДж при длительности огибающей 180 пс и времени когерентности 200 фс. Было продемонстрировано, что длительность огибающей преобразованных импульсов возможно уменьшить до 88 пс за счет уменьшения времени взаимодействия импульса накачки со стоксовым импульсом, что

одновременно ведет к уменьшению средней мощности выходных импульсов до 510 мВт.

Публикации автора по теме диссертации

1. Kokhanovskiy A., Kuprikov E., Kobtsev S. Single- and multi-soliton generation in figure-eight mode-locked fibre laser with two active media // Opt. Laser Technol. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 131, № April. P. 106422.
2. Kokhanovskiy, A., Kuprikov, E., Ivanenko, A., & Kobtsev, S. All-polarisation-maintaining modified figure-of-8 fibre laser as a source of soliton molecules // Laser Phys. Lett. 2020. Vol. 17, № 8. P. 085101.
3. Kokhanovskiy, A., Ivanenko, A., Kobtsev, S., Smirnov, S., & Turitsyn, S. Machine Learning Methods for Control of Fibre Lasers with Double Gain Nonlinear Loop Mirror // Sci. Rep. 2019. Vol. 9, № 1. P. 1–7.
4. Kokhanovskiy, A., Kobtsev, S., Ivanenko, A., & Smirnov, S. Properties of artificial saturable absorbers based on NALM with two pumped active fibres // Laser Phys. Lett. IOP Publishing, 2018. Vol. 15, № 12.
5. Kobtsev, S., Ivanenko, A., Kokhanovskiy, A., & Smirnov, S. Electronic control of different generation regimes in mode-locked all-fibre F8 laser // Laser Phys. Lett. IOP Publishing, 2018. Vol. 15, № 4. P. 045102.
6. Kobtsev S., Ivanenko A., Kokhanovskiy, Alexey Gervaziev M. Raman-converted high-energy double-scale pulses at 1270 nm in P2 O5-doped silica fiber // Opt. Express. 2018. Vol. 26, № 23. P. 29867--29872.
7. Smirnov, S., Kobtsev, S., Ivanenko, A., Kokhanovskiy, A., Kemmer, A., & Gervaziev, M. Layout of NALM fiber laser with adjustable peak power of generated pulses // Opt. Lett. 2017. Vol. 42, № 9. P. 1732–1735.
8. Kokhanovskiy, A. Y., Ivanenko, A. V., Kobtsev, S. K., & Turitsyn, S. K. Coherence automatic adjustment of the optical pulses inside mode-lock fiber laser cavity // Quantum and Nonlinear Optics V. 2018. Vol. 10825. P. 1082518.

9. Kokhanovskiy, A. Y., Ivanenko, A. V., Smirnov, S. V., & Kobtsev, S. M. Experimental study of phenomenological model of Yb fiber amplifier // 2018 Int. Conf. Laser Opt. IEEE, 2018. Vol. 42, № 9. P. 65.
10. Kokhanovskiy, A., Ivanenko, A., Kobtsev, S., & Turitsyn, S. Self-Adjusting Fibre Mode-Locked Laser with Controllable Nonlinear Phase Shift inside Laser Cavity// Nonlinear Photonics 2018 (pp. 14-15).

Список цитируемых работ

1. Geister G., Ulrich R. Neodymium-fiber laser with integrated-optic mode locker // Opt. Commun. 1988. Vol. 68, № 3. P. 187–189.
2. Ippen E.P. Principles of passive mode locking // Appl. Phys. B Laser Opt. 1994. Vol. 58, № 3. P. 159–170.
3. Kelly S.M.J. et al. Average soliton dynamics of a high-gain erbium fiber laser // Opt. Lett. 1991. Vol. 16, № 17. P. 1337.
4. Kafka J.D., Baer T. Mode-locked erbium-doped fiber laser with soliton pulse shaping // Opt. Lett. 1989. Vol. 14, № 22. P. 1269–1271.
5. Moenster M. et al. Microstructure fiber soliton laser // IEEE Photonics Technol. Lett. 2006. Vol. 18, № 23. P. 2502–2504.
6. Kivistö S. et al. Tunable Raman soliton source using mode-locked Tm-Ho fiber laser // IEEE Photonics Technol. Lett. 2007. Vol. 19, № 12. P. 934–936.
7. Wang Q. et al. Mode-locked Tm-Ho-codoped fiber laser at 2.06 μm // IEEE Photonics Technol. Lett. 2011. Vol. 23, № 11. P. 682–684.
8. Turitsyn S.K., Bale B.G., Fedoruk M.P. Dispersion-managed solitons in fibre systems and lasers // Phys. Rep. Elsevier B.V., 2012. Vol. 521, № 4. P. 135–203.
9. Anderson D. et al. Wave-breaking-free pulses in nonlinear-optical fibers // J. Opt. Soc. Am. B. 1993. Vol. 10, № 7. P. 1185–1190.

10. Chong A. et al. All-normal-dispersion femtosecond fiber laser // Opt. Express. 2006. Vol. 14, № 21. P. 10095.
11. Semaan G. et al. 10 μJ dissipative soliton resonance square pulse in a dual amplifier figure-of-eight double-clad Er:Yb mode-locked fiber laser // Opt. Lett. 2016. Vol. 41, № 20. P. 4767.
12. Chong A. et al. Pulse generation without gain-bandwidth limitation in a laser with self-similar evolution // Opt. Express. 2012. Vol. 20, № 13. P. 14213.
13. Kharenko D.S. et al. Generation and scaling of highly-chirped dissipative solitons in an Yb-doped fiber laser // Laser Phys. Lett. 2012. Vol. 9, № 9. P. 662–668.
14. Schmidt A. et al. Sub-100 fs single-walled carbon nanotube saturable absorber mode-locked Yb-laser operation near 1 μm // Opt. Express. 2009. Vol. 17, № 22. P. 20109.
15. Aguegaray C. et al. 120 fs, 4.2 nJ pulses from an all-normal-dispersion, polarization- maintaining, fiber laser // Appl. Phys. Lett. 2013. Vol. 103, № 12. P. 121111.
16. Ivanenko A. et al. Efficiency of non-linear frequency conversion of double-scale pico-femtosecond pulses of passively mode-locked fiber laser // Opt. Express. 2016. Vol. 24, № 6. P. 6650.
17. Erkintalo M. et al. Environmentally stable all-PM all-fiber giant chirp oscillator // Opt. Express. 2012. Vol. 20, № 20. P. 22669.
18. Li D. et al. Characterization and compression of dissipative - soliton - resonance pulses in fiber lasers // Nat. Publ. Gr. Nature Publishing Group, 2016. № January. P. 1–7.
19. Lin H. et al. Dissipative soliton resonance in an all-normal-dispersion Yb-doped figure-eight fibre laser with tunable output // Laser Phys. Lett. 2014.

- Vol. 11, № 8. P. 085102.
20. Wang S.-K. et al. Dissipative soliton resonance in a passively mode-locked fiber laser // Opt. Express. 2013. Vol. 21, № 2. P. 2402.
 21. Li D. et al. Mechanism of dissipative-soliton-resonance generation in passively mode-locked all-normal-dispersion fiber lasers // J. Light. Technol. 2015. Vol. 33, № 18. P. 3781–3787.
 22. Yang J.H. et al. Observation of dissipative soliton resonance in a net-normal dispersion figure-of-eight fiber laser // IEEE Photonics J. 2013. Vol. 5, № 3. P. 1500806--1500806.
 23. Avdokhin A., Popov S., Taylor J. Totally fiber integrated, figure-of-eight, femtosecond source at 1065 nm. // Optics express. 2003. Vol. 11, № 3. P. 265–269.
 24. Kobtsev S. et al. Generation of double-scale femto/pico-second optical lumps in mode-locked fiber lasers // Opt. Express. 2009. Vol. 17, № 23. P. 20707.
 25. Smirnov S. V., Kobtsev S.M., Kukarin S. V. Efficiency of non-linear frequency conversion of double-scale pico-femtosecond pulses of passively mode-locked fiber laser // Opt. Express. 2014. Vol. 22, № 1. P. 1058.
 26. Kobtsev S. et al. Cascaded SRS of single- and double-scale fiber laser pulses in long extra-cavity fiber // Opt. Express. 2014. Vol. 22, № 17. P. 20770.
 27. Harik G.R., Lobo F.G., Goldberg D.E. The Compact Genetic Algorithm // IEEE Trans. Evol. Comput. 1999. Vol. 3, № 4. P. 287–297.