

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФИАН, чл.-корр. РАН
Колачевский Николай Николаевич



« 12 » *Ветеринария* 2022 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

на диссертационную работу Андрианова Алексея Вячеславовича «Увеличение мощности и расширение диапазонов перестройки длины волны и частоты повторения ультракоротких импульсов в волоконных лазерных системах», оформленную в виде научного доклада и представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19– лазерная физика.

Диссертация Андрианова А.В. посвящена разработке новых принципов увеличения мощности и расширения диапазонов перестройки длины волны волоконных лазерных систем, а также методов повышения частоты повторения ультракоротких импульсов в волоконных лазерах.

Работа является **актуальной**, имеющей большое значение как для фундаментальных исследований, так и для многочисленных практических применений. Импульсные волоконные системы играют важную роль в большом числе актуальных задач и приложений, включая прецизионную обработку материалов, медицину, нелинейную микроскопию и спектроскопию, метрологию. Лазеры с синхронизацией мод и высокой частотой повторения необходимы в радиофотонике и задачах метрологии, в частности, оптических синтезаторах частоты и стандартах частоты и времени.

Одной из нерешенных проблем, сдерживающих развитие импульсных волоконных лазеров и их приложений, является сложность достижения высокой пиковой мощности. По существующим литературным данным можно сделать вывод о некотором насыщении прогресса в плане увеличения пиковой мощности в одноканальных волоконных системах. Поэтому особую важность приобретает развитие принципиально новых принципов, позволяющих многократно увеличить мощность, основанных на использовании многосердцевидных волоконных световодов и когерентном суммировании пучков излучения.

Другим актуальным аспектом проблематики волоконных лазерных систем, особенно волоконных лазеров с синхронизацией мод, является повышение частоты повторения импульсов. Продвижение частоты в мультитерагерцовый диапазон, а

также возможность широкой перестройки частоты, важны для задач радиофотоники, телекоммуникаций, синтеза частотных гребенок и разработки оптических стандартов частоты. Кроме того, увеличение частоты повторения является способом повышения средней мощности импульсных систем.

Широкие возможности по управлению параметрами лазерного излучения с помощью нелинейных эффектов являются хорошо известным атрибутом волоконных систем. Такие процессы, как генерация суперконтинуума, сжатие импульсов, широкополосная перестройка длины волны импульсов в инфракрасном диапазоне лежат в основе многих фундаментально важных приложений и высокотехнологичных устройств. Обогащение данной области лазерной физики с помощью вовлечения в исследования новых материалов, таких как германатные и теллуридные стекла, имеющих широкий диапазон прозрачности и высокую нелинейность, а также новых физических механизмов нелинейных преобразований в многосердцевинных световодах, несомненно, является очень перспективным и востребованным.

Диссертационная работа имеет **целью** разработку и исследование новых концепций повышения пиковой мощности в лазерных системах ультракоротких импульсов, исследование фундаментальных вопросов генерации связанных состояний диссипативных солитонов в лазерах с синхронизацией мод, а также развитие методов спектрально-временных преобразований ультракоротких импульсов с использованием новых типов волокон, включая многосердцевинные волокна и волокна из высоконелинейных стекол. Работа вносит значительный вклад в развитие физики волоконных лазеров ультракоротких импульсов и нелинейной волоконной оптики.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка используемой литературы и списка научных публикаций, в которых изложены основные научные результаты диссертации. Общий объем диссертационной работы составляет 102 страницы, включая 36 рисунков и список литературы из 120 наименований.

Во введении изложены актуальность, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, дан подробный анализ литературы, показывающий степень разработанности темы, сформулированы цели и задачи исследования, приведены положения, выносимые на защиту и сведения об апробации полученных результатов.

Первая глава посвящена развитию численных методов для моделирования распространения и усиления пучков непрерывного и импульсного излучения в неоднородной нелинейной среде, а также развитию методов восстановления формы ультракоротких импульсов. Предложен оригинальный метод моделирования усиления чирпированных импульсов, который позволяет значительно сократить требования к объему памяти повысить скорость моделирования, при этом сохраняя полноту описания на основе однонаправленного нелинейного волнового уравнения, что особенно важно при моделировании пространственно-временных искажений,

например, в многомодовых волоконных усилителях. Кроме того, предложен, численно и экспериментально протестирован новый метод для восстановления формы ультракоротких импульсов, основанный на модификации схемы оптического стробирования со спектральным разрешением. В отличие от известных реализаций данной схемы, новый метод имеет однозначный прямой алгоритм восстановления формы импульса по измеренным данным.

Вторая глава посвящена разработке лазерных систем с высокой пиковой мощностью в диапазоне вблизи 1 мкм на основе волоконных световодов, легированных ионами иттербия. В первую очередь представлена разработка специализированной волоконной фемтосекундной системы, предназначенной для работы в составе лазерного драйвера фотоинжектора электронов. Далее в главе представлены численные исследования возможности масштабирования мощности и энергии с помощью конусных волоконных световодов в диапазоне до нескольких миллиджоулей, а также продемонстрированы экспериментальные исследования, показавшие перспективность конусных волокон с точки зрения усиления чирпированных импульсов до суб-МВт уровня пиковой мощности с сохранением возможности сжатия до фемтосекундной длительности.

Третья глава посвящена развитию принципов построения мощных лазерных систем на основе многосердцевинных световодов. Впервые представлены численные расчеты и теоретические обоснования, показывающие возможность многократного увеличения пиковой мощности, которую можно передавать и усиливать в определенных структурах многосердцевинных волокон, используя свойства противофазной супермоды в данных волокнах. Впервые проведены экспериментальные исследования, показавшие возможность селективного возбуждения противофазной моды в волокне с кольцевой структурой сердцевин и с квадратной матрицей сердцевин. Разработаны различные структуры многосердцевинных волокон, в частности, активное шестисердцевинное иттербиевое волокно, в котором экспериментально продемонстрировано усиление чирпированных импульсов. В численном моделировании показаны перспективы достижения пиковой мощности на уровне 55 МВт непосредственно на выходе усилителя при совмещении концепции многосердцевинного и конусного волокон.

Четвёртая глава посвящена исследованию возможностей повышения мощности волоконных лазерных систем с помощью принципа когерентного суммирования пучков излучения. Предложено оригинальное решение, которое позволяет кардинально снизить потери при суммировании мозаично-заполненной апертуры с невысоким фактором заполнения. Решение основано на использовании свойств противофазного распределения источников, оно позволяет повысить эффективность до 98% и хорошо совместимо с использованием противофазной моды для повышения мощности волоконных систем, исследованной в предыдущей главе. В демонстрационном эксперименте с использованием массива волокон продемонстрирована работоспособность предложенного подхода. В численном моделировании показана устойчивость к возмущениям и возможность

масштабирования на большое число излучателей.

Пятая глава посвящена экспериментальному и численному исследованию нового режима генерации управляемых солитонных кристаллов в волоконном лазере с синхронизацией мод и использованию этого режима для повышения частоты повторения лазера. Впервые предложена и обоснована концепция генерации солитонного кристалла с перестраиваемым расстоянием между импульсами с помощью управления параметрами связи между импульсами. Экспериментальная демонстрация генерации управляемых солитонных кристаллов осуществлена с помощью эрбиевого волоконного лазера телекоммуникационного диапазона с внутрирезонаторным асимметричным интерферометром Маха-Цандера. Экспериментально достигнута перестройка эффективной частоты повторения импульсов в солитонном кристалле от 6 до 200 ГГц. Продемонстрирована возможность генерации перестраиваемых солитонных кристаллов, состоящих из неодинаковых по интенсивности импульсов, а также возможность полностью оптического управления импульсами в солитонном кристалле (добавления, уничтожения, переключения типа импульсов).

Шестая глава посвящена исследованию нелинейного управления импульсным излучением в волоконных системах, с целью расширения доступного диапазона длин волн, а также компрессии и улучшения контраста импульсов. В первую очередь представлены экспериментальные исследования генерации импульсного суперконтинуума, в котором можно управлять как эффективной частотой повторения импульсов, так и формой спектра индивидуальных импульсов. Далее представлено экспериментальное исследование рамановской перестройки солитонов, впервые показавшее возможность получения фемтосекундных солитонов на длинах волн вплоть до длины волны 2.65 мкм в полностью волоконной системе на основе кварцевых и совместимых с ними германатных волокон. Далее, концепция рамановской перестройки солитонов расширена на многосердцевинные волокна из теллуридных стекол, в которых численно показана возможность перестройки длины волны до 4.5 мкм. С помощью кварцевых многосердцевинных волокон экспериментально продемонстрировано управление свойствами мощных фемтосекундных импульсов - сжатие до 53 фс с увеличением пиковой мощности до 4 МВт и 100-кратным улучшением контраста.

В заключении перечислены основные результаты проведённого диссертационного исследования.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались автором и обсуждались на семинарах в ИПФ РАН, Института физики света общества Макса Планка (Германия), а также на множестве международных и российских конференций и симпозиумов (всего более 15 мероприятий).

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 33 статьи в рецензируемых научных изданиях первого и второго квартилей, индексируемых в базах Web of Science и Scopus.

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке и

экспериментальном и численном исследовании ряда новых подходов для улучшения таких важных характеристик волоконных лазерных систем, как пиковая мощность, диапазон перестройки центральной длины волны и частоты повторения импульсов. Новые важные результаты получены в области многосердцевидных волоконных систем. В частности, впервые предложены оригинальные конфигурации многосердцевидных волокон, поддерживающие режим распространения противофазной супермоды, который, как показано в работе, является устойчивым при суммарной мощности, многократно превышающей предел для одной сердцевинки. Предложена новая схема когерентного суммирования пучков на основе противофазного распределения, которая позволяет повысить эффективность сбора излучения от массива излучателей до 98%. В совокупности, предложенные подходы в перспективе могут вывести многосердцевидные волоконные системы на качественно новый уровень, сопоставимый или даже превосходящий по сочетанию средней и пиковой мощности с твердотельными системами.

Несомненно, важный и перспективный как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения результат получен в области генерации солитонных кристаллов. Новый интересный режим генерации волоконного лазера, при котором формируются солитонные кристаллы с управляемой частотой повторения импульсов, существенно обогащает представления о нелинейной динамике лазеров с синхронизацией мод, а также открывает заманчивые перспективы по разработке лазерных источников со сверхвысокой частотой повторения импульсов и схем полностью оптической обработки информации.

Несомненной научной новизной обладают результаты исследований по нелинейному управлению оптическими импульсами в волоконных системах с использованием многосердцевидных волокон и волокон из новых материалов. Впервые детально исследовано сжатие и улучшение контраста импульсов в многосердцевидных световодах, а также предсказаны возможности широкополосной рамановской перестройки в многосердцевидных теллуридных волокнах.

Практическая значимость результатов работы не вызывает сомнений. Некоторые результаты работы уже нашли непосредственное применение. Так, двухканальная волоконная система, спроектированная для работы в составе лазерного комплекса для фотоинжектора электронов в Немецком электрон-синхротронном центре DESY, использовалась в экспериментах по получению профилированных электронных сгустков. Численные коды, разработанные на основе методов, описанных в работе, уже применялись для достаточно широкого круга задач, включая моделирование сверхширокополосных параметрических усилителей. Разработанные подходы к повышению пиковой мощности и энергии импульсов с помощью многосердцевидных волокон и когерентного суммирования пучков могут лечь в основу мощных волоконных лазерных систем нового поколения. Полученные фундаментальные результаты в области генерации перестраиваемых солитонных кристаллов и построенный волоконный лазер создают

задел для создания уникальных источников оптических импульсов с перестраиваемой сверхвысокой частотой повторения, востребованных во многих прикладных задачах. Научная новизна и практическая востребованность результатов представленной работы доказываются также тем, что значительная часть исследований выполнена в совместных экспериментах и коллаборации с ведущими российскими и зарубежными институтами и организациями. Поставленные задачи, результаты расчетов и предложенные А.В. Андриановым решения сыграли объединяющую роль в создании таких коллабораций.

Достоверность представленных результатов обусловлена использованием обоснованных теоретических моделей, а также хорошо отработанных экспериментальных методик. Корректность работы численных кодов подтверждена сопоставлением результатов с теоретическими предсказаниями и существующими программами. В большом числе случаев проводится сопоставление результатов моделирования и эксперимента, показывающее хорошее согласие. При проведении основных экспериментальных исследований использовались дополняющие друг друга методы измерений, позволившие подтвердить корректность полученных данных. Полученные результаты согласуются с существующими представлениями об исследуемых явлениях.

Результаты работы могут быть использованы в целом ряде ведущих российских организаций: ИПФ РАН, ИОФ РАН, ИХВВ РАН, ФИАН, ИСАН, ИЛФ СО РАН, ИАиЭ СО РАН, ИЛФ СО РАН, ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ, МИРЭА, МИФИ, и других профильных научных и образовательных организациях. Материалы диссертации рекомендуются также для включения в учебные курсы вузов, осуществляющих подготовку специалистов по лазерной физике.

По содержанию диссертационной работы могут быть сделаны следующие замечания:

1. В Главе 5 предложен и экспериментально реализован режим солитонных кристаллов, позволяющий в десятки раз поднять частоту следования импульсов, что представляет значительный интерес для перспективных задач радиофотоники. К сожалению, в диссертации не приведены данные об устойчивости многосолитонного режима при изменении внешних факторов (температура, влажность воздуха, стабильность накачки и т.д.). Для практики было бы ценно сравнить предложенный метод повышения частоты повторения на основе внутреннего интерферометра Маха-Цендера с методом внешнего каскада интерферометров Маха-Цендера при односолитонном лазерном излучении на входе.

2. При цитировании работ [103] (2016), [74] (2017), [A21] (2021) возникает недопонимание утверждения на стр. 64 (Глава 5), что впервые идея метода была высказана в 2021 году.

Перечисленные замечания не влияют на общую высокую положительную оценку работы и никак не снижают ценность полученных результатов. Диссертационная работа Андрианова А.В. «Увеличение мощности и расширение диапазонов перестройки длины волны и частоты повторения ультракоротких

импульсов в волоконных лазерных системах» является целостным законченным исследованием, которое можно квалифицировать как научное достижение, значимое для развития лазерной физики, и отвечает требованиям установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г. (ред. от 11.09.2021 г.), а ее автор, Андрианов Алексей Вячеславович, заслуживает присуждения ему степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика.

Доклад А.В. Андрианова по материалам диссертации был заслушан и обсужден на расширенном научном семинаре Троицкого обособленного подразделения, включающего «Троицкий технопарк ФИАН», Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ТОП ФИАН).

Отзыв подготовлен главным научным сотрудником, доктором физико-математических наук Губиным М.А. и одобрен на заседании Ученого совета ТОП ФИАН 22 сентября 2022 года.

Высококвалифицированный главный научный сотрудник,
И.о. зав. отделом лазерных технологий ТОП ФИАН,
доктор физ.-мат. наук
Губин Михаил Александрович
тел.: 8(495)851-07-90
e-mail: gubinma@lebedev.ru

Председатель Ученого совета ТОП ФИАН,
руководитель ТОП ФИАН,
доктор физ.-мат. наук, профессор РАН,
член-корреспондент РАН
Наумов Андрей Витальевич
тел.: 8(495)851-06-00
e-mail: a_v_naumov@mail.ru

Подписи сотрудников ТОП ФИАН Губина М.А. и Наумова А.В. заверяю.

И.о. ученого секретаря ТОП ФИАН
кандидат физ.-мат. наук

Каримуллин К.Р.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)
Адрес: 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53
Контактный телефон: 8 (499) 132-65-54
Интернет-сайт: www.lebedev.ru, e-mail: office@lebedev.ru