

## Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу АНДРИАНОВА Алексея Вячеславовича  
«Увеличение мощности и расширение диапазонов перестройки длины волны и частоты повторения ультракоротких импульсов в волоконных лазерных системах»,  
представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19 – «Лазерная физика»

Диссертационная работа Андрианова А.В. посвящена развитию новых направлений физики фемтосекундных волоконных лазеров, связанных с преодолением принципиальных ограничений по масштабированию их мощности, разработкой задающих лазеров ультракоротких импульсов со специальными свойствами и исследованием методов нелинейного преобразования излучения в волоконных системах, включая освоение новых спектральных диапазонов.

Волоконные генераторы и усилители ультракоротких импульсов обладают уникальными характеристиками, особенно в части эффективности, стабильности и качества выходного пучка, что определяет большие перспективы их практического применения в различных областях. Поэтому тема диссертационной работы несомненно актуальна.

Диссертация Андрианова А.В. состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Во *введении* обоснована актуальность и рассмотрена степень разработанности темы исследований, сформулированы цель работы и задачи, которые решались при выполнении работы, обоснованы научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены методология и методы проводимых исследований, сформулированы положения, выносимые на защиту, а также обоснованы достоверность полученных результатов и личный вклад автора в их получение. Далее приведено содержание диссертации.

*Глава 1* посвящена разработке методов высокопроизводительного моделирования лазерных систем и диагностики ультракоротких импульсов. Основное внимание уделено алгоритмам расчета трехмерного распространения и усиления чирпированных импульсов, которые были реализованы в виде законченного программного продукта и использовались далее автором в исследованиях, описанных в следующих главах.

*Глава 2* посвящена разработке лазерных систем с высокой пиковой мощностью, созданных по традиционной технологии на основе одномодовых волокон с увеличенной площадью моды (LMA) и новых конусных волокон с описанием экспериментальных образцов, методов их изготовления и характеристики. Далее представлены эксперименты по усилению чирпированных импульсов в конусных волокнах в сравнении с результатами расчетов, которые продемонстрировали большой потенциал конусных волокон для повышения пиковой мощности импульсов до мегаваттного уровня в полностью волоконной конфигурации системы задающий осциллятор-предусилители-конусный усилитель.

*Глава 3* посвящена созданию и изучению лазерных систем на основе многосердцевинных волоконных световодов (МСВ), в которых сигнал распределен по многим сердцевинами и когерентно суммируется на выходе, что открывает возможности дальнейшего увеличения мощности импульсов. Автором впервые проведено численное и экспериментальное исследование распространения и усиления в МСВ с расположенными на кольце 6 оптически связанными сердцевинами супермоды, для которой излучение в соседних сердцевинах находится в противофазе и не испытывает дискретной самофокусировки, в отличие от синфазной супермоды. Также сделаны обобщения на более сложные структуры, включая квадратную матрицу сердцевин. Кроме того, численно исследованы возможности комбинированной



концепции конусного и многосердцевидного волокон, которая открывает возможность достижения мультимегаваттной мощности непосредственно на выходе волоконного усилителя.

*Глава 4* посвящена исследованию возможностей повышения мощности лазерных систем с помощью когерентного суммирования пучков. В первой части проведено моделирование когерентного суммирования миллиджоульных chirпированных импульсов в массиве конусных волоконных усилителей с большим выходным размером моды. Во второй части представлен метод повышения эффективности когерентного суммирования импульсов в схеме с мозаично заполненной апертурой с неограниченным числом каналов. При противофазном распределении в соседних каналах такая схема приводит к образованию двух (в одномерном случае) или четырех (в двумерном случае) пучков в дальней зоне, которые могут быть далее легко объединены обычными светоделителями с эффективностью суммирования, близкой к 100%.

*Глава 5* посвящена генерации управляемых солитонных кристаллов в волоконных лазерах. Автор предлагает новую концепцию формирования связанных состояний диссипативных солитонов. Для этого в резонатор лазера вносится дополнительный элемент – несимметричный интерферометр Маха-Цандера, в котором формируется задержанная копия импульса с меньшей амплитудой, служащая точкой притяжения для следующего солитона. Кроме того, автором исследована инжекция одиночных оптических импульсов в резонатор в контролируемые моменты времени. Это позволяет присоединять к последовательности новые импульсы с целью сборки и модификации формы солитонных кристаллов. В эксперименте также проверена возможность их растяжения и сжатия без разрушения структуры.

*Глава 6* посвящена спектрально-временному преобразованию ультракоротких импульсов в нелинейном волокне и генерации суперконтинуума, в основе которых лежат эффекты, связанные с формированием, распадом, частотным сдвигом и взаимодействием оптических солитонов. В частности, используя источник солитонных кристаллов с чередованием импульсов высокой и низкой амплитуды, формируется необычный суперконтинуум, в котором особенности спектрально-временного преобразования различны в соседних импульсах. Кроме того, при увеличении мощности в спектре формируется солитонная структура, которая смещается в область длинных волн за счет эффекта рамановского самосдвига: до ~1.8 мкм в германо-силикатном и ~2.6 мкм в германатном одномодовом волокне. Численный расчет показал увеличение рамановского самосдвига до ~4.5 мкм при использовании противофазной супермоды в многосердцевидном теллуридном волокне. Эксперимент с многосердцевидными световодами также продемонстрировал пространственно-временное профилирование, сжатие и улучшение контраста фемтосекундных субмикроджоульных импульсов с мегаваттным уровнем мощности.

В *заключении* диссертации сформулированы основные результаты работы, из которых следует выделить следующие:

- разработана задающая двухканальная волоконная лазерная система, которая генерирует импульсы на длине волны 1.03 мкм с энергией 0.5 мкДж и перестраиваемой длительностью 0.2-30 пс при частоте повторения 1 МГц, для фотоинжектора электронов;
- продемонстрирована возможность усиления chirпированных 18-пс импульсов в конусном усилителе пиковой мощностью до 0.6 МВт, которые могут быть сжаты до длительности около 370 фс;
- продемонстрировано селективное возбуждение и устойчивое распространение противофазных супермод в многосердцевидных волоконных световодах с 6 сердцевинами, расположенными на кольце, а также в МСВ с квадратной матрицей 5x5 сердцевин;



- предложен новый метод повышения эффективности когерентного суммирования квадратного массива оптических пучков в схеме с мозаично заполненной апертурой до 98%, основанный на использовании противофазного распределения источников и дополнительного простого каскада суммирования на основе делителей пучка;

- обнаружен новый тип связанных состояний диссипативных солитонов с перестраиваемым расстоянием между импульсами, реализованный с помощью инъекции задержанной копии импульса в резонатор. В эрбиевом волоконном лазере с синхронизацией мод на длине волны 1.56 мкм, содержащем внутррезонаторный перестраиваемый интерферометр Маха-Цандера, продемонстрирована генерация т.н. перестраиваемых солитонных кристаллов, которые могли быть сжаты и растянуты более чем в 30 раз;

- продемонстрирована генерация суперконтинуума в диапазоне 1.3-1.8 мкм, профилированного в спектральном и временном представлении, при распространении усиленных солитонных кристаллов в высоконелинейном волокне. Также показана возможность сжатия импульсов до длительности 60 фс в последовательности с регулируемой частотой повторения в субтерагерцовом диапазоне,

- в полностью волоконной системе на основе кварцевых волокон с германатной сердцевиной экспериментально продемонстрирована генерация оптических солитонов, перестраиваемых с помощью эффекта рамановского самосдвига частоты до 2.65 мкм,

- с помощью измерения пространственно-временной структуры мощных фемтосекундных импульсов, прошедших через многосердцевинный волоконный световод с гексагональной структурой сердцевин, показано, что наиболее интенсивная часть импульса, введенного в центральную сердцевину световода, захватывается в данной сердцевине за счет эффекта нелинейного подавления дискретной дифракции, тогда как низкоинтенсивное излучение pedestal импульса переходит в соседние сердцевинки. Достигнуто сжатие импульса на длине волны 1.56 мкм с 370 фс до 53 фс и увеличение пиковой мощности с 0.58 МВт до 2.1 МВт.

Полученные результаты являются оригинальными, имеют высокую научную и практическую ценность. Достоверность полученных результатов подтверждается применением разнообразных экспериментальных и расчетных методик, которые согласуются между собой.

По работе можно высказать одно замечание технического характера, которое не влияет на общую положительную оценку диссертации в целом:

1. Не описан метод нелинейного преобразования излучения фемтосекундного эрбиевого лазера, генерирующего на длине волны 1.56 мкм, в диапазон длин волн около 1.03 мкм, важный для понимания принципов работы и характеристик мощной иттербиевой системы на основе задающего эрбиевого источника (рис.4 на стр. 35).

Тема диссертации соответствует специальности 1.3.19 «Лазерная физика». Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 33 статьях в ведущих международных журналах первого (23 статьи) и второго (10 статей) квартилей по базе Scopus и/или Web of Science, и доложены на ведущих российских и международных конференциях в области лазерной физики.

Таким образом, диссертационная работа Андрианова А.В. полностью соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор, Андрианов Алексей Вячеславович, несомненно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.13.19 – Лазерная физика.

Официальный оппонент,

доктор физико-математических наук, член-корр. РАН  
директор, заведующий лабораторией волоконной оптики  
ИАиЭ СО РАН

/ С.А. Бабин /

«22» сентября 2022 г.

Подпись С.А. Бабина заверяю:  
Ученый секретарь ИАиЭ СО РАН,  
кандидат физико-математических наук,  
/ Е.И. Донцова /



«22» сентября 2022 г.



**ФИО:** Бабин Сергей Алексеевич

**Ученая степень:** доктор физико-математических наук,

**Специальность:** 01.04.05. Оптика

**Почтовый адрес:** 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, д.1

**Телефон:** 8(383) 330-79-69

**Адрес электронной почты:** [babin@iae.nsk.su](mailto:babin@iae.nsk.su)

**Наименование организации:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук

**Ученое звание:** член-корреспондент РАН

**Должность:** Заведующий лабораторией волоконной оптики, директор Института