

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук, профессора Косаревой Ольги Григорьевны 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.

Диссертационная работа Андрианова А.В. посвящена разработке новых методов увеличения мощности и расширения диапазонов перестройки длины волны волоконных лазерных систем и методов управления генерацией высокочастотных последовательностей ультракоротких оптических импульсов.

Актуальность работы обусловлена ее направленностью на решение важных проблем современной волоконной оптики. Проблема поиска новых методов повышения мощности импульсных волоконных лазеров отчетливо проявилась в последнее время, когда их пиковая мощность стала приближаться к фундаментальному пределу, обусловленному самофокусировкой и коллапсом пучка в волокнах с большой площадью моды. Переход к многоканальным и многосердцевинным волоконным системам, в принципе, позволяет рассчитывать на многократное повышение мощности. Однако на этом пути необходимо решить проблемы фазировки каналов, обеспечения устойчивости конфигураций поля в многосердцевинных волокнах, а также разработать методы высокоэффективного когерентного суммирования излучения на выходе системы. Не менее важные задачи современной лазерной оптики связаны с расширением диапазона длин волн волоконных систем за пределы полос усиления активных ионов, исследование генерации спектрального суперконтинуума и сжатия ультракоротких импульсов и увеличения их контраста. Актуальной проблемой является поиск новых режимов генерации лазеров с синхронизацией мод, позволяющих существенно расширить диапазон частот повторения импульсов, а также обеспечить управление генерируемыми последовательностями. Важным аспектом в исследованиях лазерных систем является разработка методов численного моделирования волоконных систем и методов диагностики ультракоротких импульсов.

Диссертация, оформленная в виде научного доклада, состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и списка научных публикаций, в которых изложены основные результаты (всего 33 статьи в журналах первого и второго квартилей по международным базам Scopus и/или Web of Science).

Во **введении** приведена информация об актуальности темы, степени ее разработанности, целях и задачах научного исследования, научной новизне, практической значимости работы, методологии и методах исследования, положениях, выносимых на защиту, степени достоверности и апробации результатов, личном вкладе автора. Дан обзор исследований по тематике диссертации, акцентируются существующие нерешенные проблемы, обосновывается выбор направлений исследований, их связь между собой.

В **первой главе** разработаны математические модели и численный код для описания распространения, усиления и нелинейного преобразования оптического

излучения в пространственно-неоднородных нелинейных и активных средах. На основе модифицированного преобразования Фурье разработана оригинальная модификация широко распространенного численного метода моделирования нелинейной динамики импульсов сплит-степ, позволяющая многократно сократить необходимое число точек разбиения временной шкалы для корректного описания сильно чирпированных импульсов. Кроме того, разработан новый однозначный метод восстановления формы ультракоротких импульсов на основе данных измерений в схеме оптического стробирования со спектральным разрешением, дополненных данными спектральной интерферометрии. Предложен прямой и итерационный алгоритмы восстановления формы импульсов, которые протестированы в численном моделировании и в эксперименте.

Вторая глава посвящена разработкам и численному моделированию фемтосекундных лазерных систем на длине волны 1 мкм на основе сплошных волокон с одной сердцевинной увеличенной площади. Показана разработка практически значимой двухканальной системы, генерирующей чирпированные и сжатые импульсы, которая использовалась в электрон-синхротронном центре DESY (Германия) в составе лазерного комплекса драйвера фотоинжектора электронов. Далее представлены численное и экспериментальное исследование возможностей повышения энергии и мощности чирпированных импульсов с помощью волоконных усилителей с увеличивающейся вдоль трассы эффективной площадью моды – конусных активных волокон. Впервые в численном моделировании детально исследовано влияние различных возмущений на пространственно-временную динамику чирпированных импульсов в конусных усилителях. Показана возможность достижения энергии на уровне нескольких миллиджоулей и пиковой мощности мегаваттного уровня в наносекундных чирпированных импульсах, которые могут быть сжаты до длительности 380 фс. Проведенное затем экспериментальное исследование усиления в конусных итербиевых волокнах продемонстрировало возможность достижения пиковой мощности до 0.6 МВт в импульсах, сжимаемых до 370 фс.

Третья глава сочетает теоретические и экспериментальные исследования возможности повышения пиковой мощности волоконных усилителей с помощью многосердцевинных световодов. Основная идея, развиваемая в данной главе, состоит в том, что высшая коллективная мода - противофазная, существующая в некоторых конфигурациях многосердцевинных волокон, не подвержена поперечной модуляционной неустойчивости и может быть усилена с сохранением когерентности между сердцевинами до высоких уровней мощности. Устойчивое распространение и усиление противофазной моды продемонстрировано в численном моделировании в волокнах с различным расположением сердцевин: с четным числом сердцевин на кольце, с несколькими кольцами связанных сердцевин, и с квадратной матрицей сердцевин. Впервые проведены экспериментальные исследования, подтвердившие возможность возбуждения и усиления противофазных мод в волокнах с кольцевой и квадратной структурой сердцевин. С помощью численного моделирования продемонстрирована возможность транспортировки и усиления излучения со структурой противофазной супермоды с суммарной мощностью, многократно превосходящей пороговую мощность самофокусировки в материале световода.

Четвертая глава дополняет предыдущую главу и посвящена разработке и

исследованию методов когерентного суммирования пучков излучения на выходе многоканальных или многосердцевинных волоконных систем. Предложен высокоэффективный метод суммирования в схеме с мозаично заполненной апертурой, уменьшающий потери при суммировании до единиц процентов за счет использования противофазного распределения излучателей и относительно несложной модификации финального каскада суммирования. Метод масштабируем на большое число каналов, устойчив к погрешностям в фазировке каналов, пригоден для работы с широкополосным и ультракоротким излучением.

Пятая глава посвящена исследованию генерации связанных состояний солитонов - солитонных кристаллов в волоконных лазерах с синхронизацией мод. Предложена новая концепция генерации перестраиваемых солитонных кристаллов, у которых можно осуществлять управление свойствами связи между импульсами, и тем самым управлять эффективной частотой повторения импульсов. Представлена экспериментальная демонстрация генерации перестраиваемых солитонных кристаллов в волоконном лазере с внутрирезонаторным интерферометром Маха-Цендера. Продемонстрирована возможность генерации кристаллов, состоящих из нескольких базовых структур (солитонов и пар солитона и слабого импульса), а также возможность управления импульсами в кристалле с помощью дополнительного фемтосекундного лазера.

В **шестой главе** исследуются различные способы управления параметрами ультракоротких импульсов, основанные на рамановской перестройке длины волны солитонов, генерации суперконтинуума и уширении спектра в нелинейных волокнах. С использованием лазера солитонных кристаллов продемонстрирована генерация фемтосекундного суперконтинуума, профилированного по спектру и по времени, в котором можно управлять частотой повторения импульсов и спектром соседних импульсов. Продемонстрирована рамановская перестройка солитонных импульсов до длины волны 2.65 мкм в полностью волоконной системе на основе световодов с кварцевой оболочкой и германатной сердцевинкой. В численном моделировании продемонстрирована возможность сверхширокополосной перестройки солитонов до длины волны 4.5 мкм в многосердцевинных световодах на основе теллуритных стекол, достигающаяся за счет наличия широкой области аномальной дисперсии противофазной моды. Проведены детальные экспериментальные исследования распространения мощных ультракоротких импульсов в семисердцевинном гексагональном световоде в режиме подавления дискретной дифракции, позволяющем улучшать контраст и сжимать мощные импульсы.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

Полученные результаты обладают несомненной **научной новизной** и вносят существенный вклад в развитие физики волоконных лазеров и нелинейной оптики ультракоротких импульсов. В работе впервые систематически исследованы возможности повышения пиковой мощности излучения, а также широкополосной перестройки ультракоротких импульсов с помощью многосердцевинных волокон со связанными сердцевинами, поддерживающих противофазную супермоду. Предложен новый высокоэффективный метод когерентного суммирования излучения. Предложена оригинальная концепция перестраиваемых солитонных кристаллов, особенностью которых является возможность управления характеристик связи импульсов в кристалле.

Результаты работы имеют большую **практическую значимость**. Предложенные

методы повышения мощности с помощью многосердцевидных волокон, когерентного суммирования пучков и технологий конусных волокон могут способствовать существенному расширению областей применения волоконных лазерных систем, где традиционно используются твердотельные лазеры. Предложенная концепция управляемых солитонных кристаллов может оказать заметное влияние на фундаментальные исследования нелинейной динамики в диссипативных системах, а также на практические приложения, связанные с необходимостью генерации высокочастотных оптических сигналов, например, в радиофотонике, а также в системах высокоскоростной полностью оптической обработки информации.

Достоверность результатов подтверждается хорошим соответствием теории, численного моделирования и эксперимента. Представленные в диссертации результаты органично вписываются в картину современных исследований в волоконной нелинейной оптике и лазерной физике. Достоверность подтверждается публикациями в авторитетных научных изданиях, а также их представлением на многочисленных научных конференциях. Личный вклад автора в представленные в диссертации результаты четко сформулирован. Нет сомнений, что автор диссертации внес решающий вклад во все выносимые на защиту положения и результаты.

Характеризуя в целом диссертационную работу надо отметить, что она представляет собой систематическое комплексное исследование, направленное на решение актуальных проблем современной лазерной физики и волоконной оптики. Диссертация гармонично сочетает как теоретические так и экспериментальные исследования.

К работе можно сделать несколько замечаний.

1) В разделе 1.2 главы 1 следовало бы обсудить области применимости метода моделирования сильно chirпированных импульсов с использованием модифицированных преобразований Фурье, а также рекомендации по выбору параметров численных сеток. Как влияет на применимость и эффективность метода наличие высших порядков в разложении фазы импульса в ряд Тейлора? Как поведет себя метод при попытке моделирования слабо chirпированных импульсов?

2) Предложенный в главе 4 метод повышения эффективности когерентного суммирования с противофазным распределением источников требует дополнительного (по сравнению с синфазным методом) выходного каскада для суммирования двух (или четырех) пучков. Каким образом осуществляется поддержание относительных фаз пучков перед выходным каскадом суммирования? Было бы также полезно обсудить возможность реализации управления положением (или направлением) выходного пучка. В традиционной схеме суммирования можно управлять выходным пучком с помощью добавления слабого градиента к распределению фаз исходных пучков.

3) В исследованиях лазера солитонных кристаллов в главе 5 рассматривается режим работы, при котором слабая реплика солитонного импульса реинжектируется в резонатор с помощью интерферометра Маха-Цендера с задержкой относительно солитона. Однако можно рассмотреть режим, при котором слабая реплика солитонного импульса опережает солитон, т.е., когда длина основного плеча интерферометра меньше, чем длина плеча с линией задержки. Возможна ли в этом случае генерация солитонного кристалла?


Все указанные замечания носят непринципиальный характер и не влияют на общую высокую оценку диссертации. Диссертационная работа Андрианова А.В. «Увеличение мощности и расширение диапазонов перестройки длины волны и частоты повторения ультракоротких импульсов в волоконных лазерных системах» является законченным крупным исследованием, которое можно квалифицировать как научное достижение, и полностью соответствует требованиям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г. (в 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.

Официальный оппонент
профессор физического факультета
МГУ имени М.В. Ломоносова,
доктор физико-математических наук,
доцент

Косарева Ольга Григорьевна

Я, Косарева Ольга Григорьевна, выражаю свое согласие на обработку моих персональных данных, связанных с защитой диссертации.

О. Г. Косарева

 Декан
Физического факультета МГУ
имени М.В. Ломоносова,
доктор физико-математических наук
профессор



Н. Н. Сысоев