

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента на диссертационную работу Худякова Дмитрия Владимировича «Волоконные иттербиевые лазеры ультракоротких импульсов, методы генерации и усиления импульсов», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 — лазерная физика**

По мере того, как лазерные технологии находят все более широкое применение в механической обработке, спектроскопии, микроскопии, хирургии и многих других областях, растет потребность в недорогих и надежных лазерных источниках, в том числе источниках ультракоротких импульсов. До недавнего времени нелинейные и дисперсионные эффекты в лазерных волоконных системах из-за особенностей геометрии оптических волокон ограничивали их характеристики. Однако благодаря достижениям в управлении нелинейностью и дисперсией с помощью дисперсионно-компенсирующих волокон и элементов, а также волокон с большим диаметром сердцевины, волоконные импульсные лазеры по своим характеристикам могут конкурировать с твердотельными аналогами. По мере появления конкретных приложений, которые могут выиграть от волоконной технологии, актуальность темы генерации и усиления ультракоротких импульсов (УКИ) в полностью волоконных лазерах становится крайне высокой.

В диссертации Худякова Д.В. рассмотрены и представлены результаты, которые являются новыми для как для фундаментальной физики лазеров и нелинейной оптики материалов с низкой размерностью, так и для прикладных задач создания эффективных волоконных лазеров ультракоротких импульсов. Ключевыми достижениями автора, представляющими собой научную новизну работы, являются следующие результаты:

- предложены схемы импульсных волоконных лазеров, а также найдены зоны устойчивых режимов их генерации с использованием насыщающихся поглотителей с низкой глубиной модуляции, которая обычно соответствует глубине модуляции композитных материалов с углеродными нанотрубками, а

также материалов с тонкими пленками графена и дихалькогенидов переходных металлов;

- выполнено сравнительное исследование нелинейных оптических свойств углеродных нанотрубок, графена и дисульфида молибдена. Предложены схемы оптических переходов, найдены скоростные соотношения, объясняющие экспериментальные данные;
- определена и разработана оптимальная геометрия волоконного резонатора для волоконных источников сверхкоротких импульсов, использующих нелинейное вращение эллипса поляризации как метод синхронизации лазерных мод;
- выполнено численное моделирование распространения ультракороткого импульса в волоконном лазере с нелинейным волоконным зеркалом, найдена зависимость длительности импульса от физических параметров нелинейного волоконного зеркала;
- определены зоны модификации показателя преломления в прозрачных материалах при фемтосекундной записи в тепловом режиме накопления импульсов.

Обоснованность и достоверность научных результатов и выводов диссертации обеспечивается воспроизводимостью выходных характеристик лазеров, параметров лазер-индуцируемых структур, а также соответствием экспериментальных данных теоретическим расчетам. Характеристики образцов получаемых материалов, параметры лазерных импульсов оценивались с помощью известных методик, в том числе, с применением сертифицированных приборов.

Говоря о рекомендациях по использованию результатов диссертации, хочется отметить значительное количество как потенциальных, так и уже реализованных применений, являющихся результатом исследований и новых разработок диссертанта. Результаты исследования зон стабильности для волоконных генераторов ультракоротких импульсов необходимы для создания эффективных и надежных источников лазерных импульсов фемтосекундной длительности. Разработанные методы фемтосекундной записи и экспериментальные диаграммы изменения показателя преломления в прозрачных

средах в режиме теплового накопления импульсов могут быть использованы для изготовления световодов и волноводов с большим диаметром сердцевины и применяться для создания гибридных лазерных усилителей с повышенной оптической эффективностью. Особо следует отметить, что результаты работы автора были использованы при создании коммерческого фемтосекундного лазера для офтальмологии.

Диссертация состоит из Введения, Главы 1 с обзором литературы, Глав 2-5 с экспериментальными и теоретическими результатами, Заключения, Списка сокращений, а также Списка цитируемой литературы из 321 наименования. Объем диссертации состоит из 300 страниц, 177 рисунка и 5 таблиц.

Во Введении формулируется цель и задачи работы, показана научная новизна и обоснована значимость полученных результатов, перечислены защищаемые положения и кратко рассмотрено содержание диссертационной работы по главам. Приведены положения, выносимые на защиту. Показана обоснованность и достоверность полученных результатов. Апробация работы проведена на многих Международных и Всероссийских научных конференциях.

В Главе 1 рассмотрено строение световода и сформулированы условия для прохождения оптического излучения в световоде. Рассмотрены оптические свойства активных волокон на основе кварцевого стекла, легированного ионами иттербия. Рассмотрены солитонные решения нелинейного уравнения Шредингера, определяющие режимы образования стационарной огибающей импульса для случаев фундаментального солитона, режима растянутого импульса и параболического импульса. Подробно рассмотрены методы синхронизации лазерных мод как способ получения лазерных УКИ и насыщающиеся поглотители на основе одномерных и двумерных наночастиц для пассивной синхронизации мод. Показано применение одностенных углеродных нанотрубок, графена и диалкогенидов переходных металлов в качестве широкополосных насыщающихся поглотителей в лазерах УКИ. Обсуждаются процессы, приводящие к перманентному изменению показателя преломления при прохождении фемтосекундных импульсов через прозрачные оптические материалы.

Во второй главе подробно описаны методы генерации сверхкоротких импульсов, основанные на принципах нерезонансной модуляции показателя преломления, к числу которых относятся волоконные лазерные источники на эффекте нелинейного вращения эллипса поляризации (НВП) и с нелинейным волоконным зеркалом (НВЗ). Для волоконных источников на НВП предложен оригинальный метод оптимального расположения волокна при намотке кругового волоконного резонатора на объемном держателе, при котором происходит компенсация наведенного дихроизма на участках изгиба волокна, что позволяет преодолеть поляризационную и температурную нестабильность для такого типа источников.

Выполнен детальный численный расчет и представлены зависимости режимов работы и длительности выходного импульса от ключевых параметров лазера с НВЗ. При этом показано, что длительность импульса можно контролировать длиной петли НВЗ. Для каждого случая стабильной генерации импульсов найдено оптимальное значение коэффициента деления ответвителя в волоконной петле НВЗ.

В Главе 3 представлены результаты изучения насыщающихся поглотителей на основе одномерных и двумерных наночастиц, таких как одностенные углеродные нанотрубки, графен и тонкие слои дисульфида молибдена. Основываясь на экспериментальных параметрах насыщающихся поглотителей, разработаны и изучены экспериментальные схемы волоконных иттербиевых лазеров УКИ. Особое внимание уделяется зонам стабильности импульсных волоконных генераторов в зависимости от глубины модуляции насыщающегося поглотителя и полной величины дисперсии резонатора. В результате теоретического моделирования распространения импульсного излучения в оптическом волокне построена диаграмма зон стабильности для импульсной генерации, которая важна для практического применения при конструировании волоконных генераторов УКИ. Также показана ключевая роль комбинированной синхронизации мод для стабилизации импульсной генерации в волоконных лазерах

на длине волны 1 мкм при использовании насыщающихся поглотителей с низкой глубиной модуляции.

В Главе 4 рассмотрены методы усиления фемтосекундных импульсов до энергий в единицы и десятки микроджоулей на длине волны 1 мкм в полностью волоконных схемах. Рассматриваются два метода усиления в режиме большой нелинейности и в режиме низкой нелинейности и причины применения каждого метода в зависимости от типа задающего генератора. Подробно разбирается вопрос дисперсионной согласованности элементов лазерной схемы (стретчера и компрессора), от которой зависит возможность получить усиленный импульс без искажения первоначальной формы. Предложено использование световода с W-профилем показателя преломления в качестве стретчера для последующего усиления и сжатия ультракоротких импульсов в полностью волоконном лазере на длине волны 1,03 мкм. Обращает на себя внимание, что экспериментальный макет лазера с усилителем, разбираемый в Главе 4, существует в виде коммерческого лазера в составе комплекса для хирургической коррекции зрения.

В Главе 5 рассмотрены методы оптической записи световодов в прозрачных материалах, определены характерные параметры световых импульсов и рабочих зон для перманентного изменения показателя преломления. Продемонстрирована фемтосекундная запись оптических волноводов с депрессированной оболочкой в плавленом кварце и в Nd:фосфатном стекле. Впервые продемонстрирована запись световодов с депрессированной оболочкой в кварцевом стекле на основе периферийных областей с пониженным показателем преломления. Представлены диаграммы зависимости величины индуцированного показателя преломления от энергии и частоты следования импульсов в таких распространенных материалах как кварцевое и Nd:фосфатное стекло, которые являются базовыми для дальнейшего проектирования лазер-индуцированных световодов. Предложен метод усиления лазерных импульсов используя лазер-индуцированный световод с большим диаметром сердцевины, при котором свободное распространение сигнального излучения внутри световода сочетается с распространением излучения накачки в волноводном режиме, что позволило увеличить коэффициент усиления

более чем в 2,5 раза по сравнению с традиционной схемой усиления с продольной накачкой.

Диссертационное исследование Худякова Дмитрия Владимировича содержит обоснованные и четкие выводы, закономерно обобщающие результаты теоретического и экспериментального исследований. Основные результаты исследования представлены в Заключение. Текст диссертации хорошо структурирован, снабжен иллюстративными материалами, отражающими основные экспериментальные и теоретические зависимости. Диссертантом выполнено довольно трудоемкое, большое по количеству решаемых задач исследование. Наиболее привлекательными сторонами данной работы являются высокая научная новизна её результатов в сочетании с сильной прикладной стороной разработок автора. Следует отметить также тщательный, доказательный и корректный анализ экспериментальных данных на основе использования современных средств математической обработки.

По материалам диссертации опубликовано 26 статей, большая часть которых – в высокорейтинговых рецензируемых международных изданиях, в том числе, входящих в первую четверть. Получено 5 патентов на изобретение.

К работе также имеются и замечания:

1. В обзоре литературы автор рассматривает различные способы создания стретчеров (устройств для расширения импульсов). Упоминаются специальные световоды, а также объемные стретчеры на дифракционных решетках. Однако автор в своей работе не рассматривает перспективные схемы построения стретчеров на основе чирпированных волоконных брэгговских решеток, которые уже находят практическое применение в схемах волоконных фемтосекундных лазеров.
2. В главе 2 рассматривается оригинальная схема намотки световода кольцевого резонатора для уменьшения нежелательных эффектов поляризационной нестабильности. Результат сравнивается с обычной кольцевой укладкой. Однако, в тексте диссертации не рассматриваются другие, применяемые при построении схем кольцевых резонаторов, методы компенсации изгибной анизотропии.

3. В диссертации приводится список публикаций автора, однако в тексте автор не ссылается на собственные работы, из-за чего трудно сопоставлять представляемые результаты с публикациями автора в периодических печатных изданиях и материалах конференций.

4. В тексте встречаются незначительные опечатки и неточности в использовании устоявшихся терминов. Так, например, автор, наряду с термином «показатель преломления», использует термин «коэффициент преломления». Непонятно, с чем связана такая подмена в отдельных частях текста.

Все указанные замечания носят непринципиальный, рекомендательный характер и не влияют на общую положительную оценку диссертации. Считаю, что содержание работы Худякова Дмитрия Владимировича и форма ее представления полностью соответствует требованиям пунктов 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК Минобрнауки России в редакции Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. за №842, предъявляемым к докторским диссертациям. Автор обладает высокой квалификацией и достоин присуждения искомой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.

Автореферат и опубликованные работы полностью и точно отражают содержание диссертации.

Официальный оппонент  
зам. директора по научной работе  
ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН  
доктор физ.-мат. наук



  
Бутов Олег Владиславович

Адрес: 125009 Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7,  
ФГБУН Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
e-mail: obutov@mail.ru,  
тел.: (495) 629-33-20

07 сентября 2021 г.