

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

Актуальность избранной темы

Диссертационная работа Худякова Дмитрия Владимировича посвящена исследованию способов генерации и усиления ультракоротких импульсов в полностью волоконных иттербиевых лазерах, а также механизмов модификации показателя преломления прозрачных сред при фемтосекундном лазерном облучении. Актуальность темы определяется необходимостью разработки эффективных и надежных лазерных источников излучения с фемтосекундной длительностью импульсов для применения в промышленности, в научных исследованиях и в медицине. Также актуальность выбранной темы определяется возможностью сверхточной микрообработки материалов при импульсном фемтосекундном воздействии, что особенно востребовано в современной индустрии производства элементов световодной фотоники и в микроэлектронике.

Степень обоснованности и достоверности научных положений и выводов

Обоснованность научных положений и выводов диссертации не вызывает сомнений и основывается на применении диссертантом простой и надежной техники продольного сканирования (*Z*-сканирования) для изучения нелинейных свойств композитных материалов. Кроме того, для подтверждения результатов *Z*-сканирования использовалась техника сканирования мощности. Обе техники давали одинаковые результаты, что подтверждает надежность экспериментальных выводов. Присутствие одностенных углеродных нанотрубок, графеновых слоев и слоев дисульфида молибдена, а также их концентрация в образцах регистрировались и контролировались с помощью оптической и Рамановской спектроскопии. При этом распределение наночастиц в образцах и размеры получаемых структур

измерялись с помощью точных методик – атомно-силовой микроскопии и сканирующей электронной микроскопии. Для измерения длительности импульсов исследуемых источников использовался надежный метод неколлинеарной генерации второй гармоники, который позволяет наиболее точно определять длительность чирпированных импульсов. Анализ профилей показателя преломления лазер-индуцированных световодов проводился с привлечением количественной фазовой микроскопии. Важным фактором, обеспечивающим обоснованность научных положений и выводов, является подробное теоретическое описание диссертантом наблюдаемых экспериментальных эффектов и выходных характеристик волоконных импульсных источников. В диссертации рассматривается динамика возбужденных состояний электронов для объяснения наблюдаемых нелинейных эффектов в слоях графена и дисульфида молибдена. Диссертантом использовалось теоретическое моделирование процессов распространения импульсов в оптическом волокне для описания выходных характеристик экспериментальных импульсных источников. Теоретическое моделирование также эффективно применялось для выбора однозначных и наиболее оптимальных моделей. Тщательный анализ и обсуждение диссертантом результатов собственных исследований в сопоставлении с литературными данными также обеспечило достоверность результатов.

Оценка новизны диссертационного исследования

Новизна работы заключается в том, что проведено сравнительное исследование нелинейных оптических свойств углеродных нанотрубок, графена и дисульфида молибдена с точки зрения использования этих наноматериалов в качестве широкополосных насыщающихся поглотителей в лазерах ультракоротких импульсов. Впервые определены зоны стабильной генерации импульсов в зависимости от глубины модуляции насыщающегося поглотителя и величины полной дисперсии волоконного резонатора, что дает заметный вклад в технологию разработки эффективных и надежных волоконных источников ультракоротких импульсов.

Впервые предложен метод объемной укладки волокна в кольцевом генераторе

импульсов, при котором компенсируется наведенный дихроизм волоконных сегментов, при этом параметры нелинейного вращения эллипса поляризации излучения в таком генераторе минимально зависят от внешних условий по сравнению с обычной плоской геометрией волоконного резонатора.

Проведено подробное экспериментальное и теоретическое исследование генерации импульсов в лазере с нелинейным волоконным зеркалом. Впервые найдены оптимальные условия формирования импульсов в иттербиевых лазерах ультракоротких импульсов на основе нелинейного волоконного зеркала, зависящие от длины петли волоконного зеркала и от коэффициента деления ответвителя. Определена длительность импульса в зависимости от коэффициента деления ответвителя и длины волоконной петли в круговом нелинейном зеркале.

Определены зоны модификации показателя преломления в прозрачных материалах при фемтосекундной записи в тепловом режиме накопления импульсов. Впервые предложена и исследована гибридная (волноводно-твердотельная) схема усиления лазерных импульсов, основанная на волноводах с депрессированной оболочкой с большим диаметром моды, полученных методом фемтосекундной модификации показателя преломления активной среды.

Значимость для науки и практики полученных автором результатов

Полученные в диссертационной работе результаты имеют большую фундаментальную значимость для нелинейной оптики новых композитных материалов на основе графена, углеродных нанотрубок и тонких пленок диалкогенидов переходных металлов. Автором диссертации был выполнен анализ динамики фотовозбужденных носителей заряда в таких соединениях, как графен и дисульфид молибдена, определены сечения оптических переходов и концентрации фотовозбужденных носителей заряда в однослойном графене и в слоях дисульфида молибдена. Для описания экспериментальной динамики фотопереходов в пленках дисульфида молибдена была предложена трехуровневая схема оптических переходов, были найдены такие важные для оптических применений параметры, как концентрация носителей заряда в

фотовозбужденном состоянии и сечения поглощений для фотоиндуцированных переходов электронов из валентной зоны в зону проводимости. Показано, что оптические нелинейные свойства многослойных листов дисульфида молибдена определяются в основном динамикой однофотонных межзонных переходов. Теоретический анализ насыщения оптических переходов в однослойном графене позволил оценить значения интенсивностей насыщения в зависимости от экспериментальных условий - длительности импульса накачки.

Сформулированы критерии применимости композитных материалов на основе графена и углеродных нанотрубок в качестве насыщающихся поглотителей для синхронизации мод импульсных лазеров. Определены условия стабильной импульсной генерации в зависимости от общей дисперсии волоконного резонатора и глубины модуляции насыщающегося поглотителя. Результаты исследования зон стабильности для волоконных генераторов ультракоротких импульсов необходимы для создания эффективных и надежных источников лазерных импульсов фемтосекундной длительности.

Разработаны и исследованы компактные полностью волоконные схемы лазерных генераторов и усилителей импульсов до энергий в несколько микроджоулей с длительностью импульсов на выходе до 250 фемтосекунд.

Разработаны методы и найдены оптимальные условия для лазер-индуцированной записи оптических волноводов в прозрачных средах в режиме теплового накопления импульсов, которые могут быть использованы для создания световодов с большим диаметром сердцевины и применяться для создания гибридных лазерных усилителей с повышенной оптической эффективностью.

Таким образом, результаты данной диссертации открывают новые подходы для решения фундаментальных проблем оптики волоконных лазеров ультракоротких импульсов и нелинейной оптики новых материалов в применении к импульсным волоконным лазерам. Также, экспериментальные диаграммы зависимости величины индуцированного показателя преломления от

энергии и частоты следования импульсов в кварцевом стекле и в активном фосфатном стекле являются ключевыми для создания и проектирования элементов световодной фотоники, используя перспективный метод прямой фемтосекундной записи.

Оценка содержания диссертации, ее завершенность, достоинства и недостатки

Диссертация состоит из Введения, пяти глав, из которых Глава 1 - обзор литературы, Главы 2-5 - экспериментальные и теоретические результаты, Заключение, Списка сокращений и условных обозначений, а также Списка цитированной литературы. Объем диссертации состоит из 300 страниц, 177 рисунка и 5 таблиц. Список цитированной литературы состоит из 321 наименования.

Во введении описаны актуальность, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, представлены научная новизна, значимость и практическая ценность. Также изложены методы исследования, приведены положения, выносимые на защиту, а также достоверность полученных результатов. Апробация работы проведена на многих Международных и Всероссийских научных конференциях

В Главе 1 рассматривается строение световода и сформулированы условия для прохождения оптического излучения в световоде в одномодовом и многомодовом режимах. Подробно рассмотрены характеристики спектрально-ограниченных и chirпированных импульсов, а также математические способы их описания. Дается широкий обзор примеров и методов получения ультракоротких импульсов в волоконных лазерах с использованием насыщающихся поглотителей на основе одномерных и двумерных наночастиц. Обсуждаются процессы, приводящие к перманентному изменению показателя преломления при воздействии фемтосекундных импульсов на прозрачные оптические материалы.

В Главе 2 описаны результаты исследований волоконных лазерных источников ультракоротких импульсов, использующих быстрый нерезонансный отклик в оптическом волокне (быстрое изменение показателя преломления среды от

интенсивности проходящего излучения) для пассивной синхронизации лазерных мод. Дается подробное описание работы импульсных источников на основе нелинейного волоконного зеркала, а также разбирается эффект нелинейного вращения эллипса поляризации для быстрой модуляции излучения в круговых волоконных резонаторах. Дается описание оригинального метода расположения волокна при намотке кругового волоконного резонатора на объемном держателе, при котором происходит компенсация наведенного дихроизма на участках изгиба волокна. Предложенный способ намотки можно с успехом применять в импульсных волоконных лазерах, где используется эффект нелинейного вращения поляризации, чувствительный к поляризационной нестабильности.

В Главе 3 изучены волоконные источники ультракоротких импульсов с насыщающимися поглотителями, использующих быстрые резонансные оптические переходы в химических соединениях. Представлено детальное исследование оптических свойств широкополосных 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 ультракоротких импульсов, а также определены зоны стабильности импульсных волоконных генераторов в зависимости от глубины модуляции насыщающегося поглотителя и полной величины дисперсии резонатора.

В Главе 4 рассмотрены методы усиления фемтосекундных импульсов до энергий в единицы и десятки мкДж на длине волны 1 мкм в компактных волоконных схемах. Подробно обсуждается возможность получить усиленный импульс без искажения первоначальной формы, что во многом зависит от дисперсионной совместимости расширителя и компрессора импульсов. Предложен вариант расширителя импульсов на основе световода с W-профилем показателя преломления. Рассматриваются методы компенсации дисперсий высших порядков со стороны расширителя импульсов перед усилением, а также на этапе компрессии

импульсов после усиления. Впервые получен график зависимости значений фазового сдвига, благодаря влиянию эффектов фазовой самомодуляции, необходимого для компенсации соответствующих значений дисперсии третьего порядка в режиме нелинейного усиления. Можно подчеркнуть, что Глава 4 представляет значительный интерес для исследователей и экспериментаторов в области усиления ультракоротких импульсов в оптических волокнах.

В Главе 5 рассмотрены методы прямой фемтосекундной записи световодов в прозрачном материале, 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 реализована и исследована волноводно-твердотельная схема усиления лазерных импульсов, основанная на световодах с диаметром сердцевины более 200 мкм, созданных с использованием фемтосекундной записи в активной среде. Предложенная схема сочетает в себе свободное распространение сигнального излучения с малой расходимостью и распространение излучения накачки в волноводном режиме. За счет увеличения длины взаимодействия между излучением накачки и сигнальным излучением удалось увеличить коэффициент усиления более чем в 2.5 раза по сравнению с традиционной схемой усиления с продольной накачкой.

В конце каждой главы приведено краткое Заключение. Такое построение в описании результатов следует признать удачным. В результате прочтения диссертации по ходу изложения материала для читателя даются ответы на вопросы, поставленные в рамках утвержденных целей и задач.

Диссертация написана хорошим языком с малым количеством опечаток и производит очень приятное впечатление. Несмотря на профессиональное и грамотное изложение материала следует отметить некоторые недостатки диссертационной работы:

1. Утверждения

на Стр. 129

«Как можно заметить из Табл. 3.1, в рядах одинаковых полимеров КМЦ (№3–2–1) и ПВС (№5–4) большая величина концентрации нанотрубок приводит к большей величине нелинейного коэффициента поглощения.»

и на Стр. 131

«В рядах одинаковых полимеров большая величина концентрации нанотрубок в пленке приводит к большей величине нелинейного коэффициента поглощения» представляются очевидными.

Речь идет о композитных материалах, в которых отдельные нанообъекты растворены в полимерной матрице. В таких случаях линейное и нелинейное поглощение характеризуется сечением поглощения, и соответственно, коэффициент линейного и нелинейного поглощения определяется как произведение сечения поглощения на концентрацию нанообъектов, в данном случае, нанотрубок. Если коэффициенты поглощения не пропорциональны концентрации, то этот вопрос требует обсуждения, например, причина может быть в плохой растворимости нанотрубок.

2. Стр. 149. Уравнение (3.9).

Написано, что N – общая концентрация фотовозбужденных носителей заряда; По всей видимости вообще всех носителей заряда изначально в валентной зоне.

Член с двухфотонным поглощением должен содержать сечение двухфотонного поглощения и концентрацию носителей в валентной зоне. Хотелось бы пояснения наличие в уравнении члена с временем релаксации τ_2 .

3. Скорее пожелание, чем замечание. Пункт 3.10. Очень интересный вопрос о модуляторе на участке сполитированного оптического световода. Хотелось бы теоретического рассмотрения эффективности постановки модулятора в области сполитированной оболочки. Нельзя ли для большей эффективности сделать модулятор круглым?

4. На стр. 245 следовало бы более подробно описать применение метода z-сканирования для определения величины наведенного фемтосекундным лазерным излучением коэффициента преломления и применимости формулы (5.4) для этого случая. Не хватает оптической схемы эксперимента.

Отмеченные недостатки не снижают качество исследования и не влияют на основные теоретические и практические результаты диссертации.

Таким образом, представленная диссертационная работа является законченным и цельным научным исследованием, в котором получены результаты, имеющие общенаучное значение для физики волоконных лазеров ультракоротких импульсов, а также множество конкретных результатов, которыми могут руководствоваться экспериментаторы в своей дальнейшей работе. Считаю, 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

Рук. лаборатории лазерной
наномодификации материалов

д.ф.-м..н., профессор

01.08.2021 51

Битюрин Никита Михайлович

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

Адрес Центра: 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

e-mail : bit@appl.sci-nnov.ru

тел: (831)4164889

Подпись Н.М. Битюрин

Ученый секретарь ИПФ РАН



И. В. Корюкин