

На правах рукописи



Худяков Дмитрий Владимирович

**Волоконные иттербиевые лазеры ультракоротких импульсов,
методы генерации и усиления импульсов**

01.04.21 - Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Центре физического приборостроения (филиал) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»

Официальные оппоненты: д.ф.-м.н., Бутов Олег Владиславович, руководитель лаборатории Волоконно-оптических технологий, заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники имени В.А.Котельникова Российской академии наук

д.ф.-м.н., профессор, Битюрин Никита Михайлович, руководитель лаборатории Лазерной наномодификации материалов Федерального исследовательского центра Института прикладной физики Российской академии наук

д.ф.-м.н., профессор, Косарева Ольга Григорьевна, доцент Физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

Ведущая организация: Научно-исследовательский центр световодной фотоники Национального исследовательского университета ИТМО

Защита состоится «_____» _____ 2021 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 002.063.01 в Институте общей физики им А.М. Прохорова РАН по адресу: 119991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38.

С авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ИОФ РАН

Автореферат разослан «_____» _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук

В. М. Кузькин

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования определяется необходимостью разработки эффективных и надежных источников излучения с фемтосекундной длительностью импульса с энергией в десятки микроджоулей с большой частотой повторения импульсов, связанной с широтой их применения в промышленности, в медицине, в научных исследованиях, а также с возможностью сверхточной микрообработки материалов при импульсном фемтосекундном воздействии.

В отличие от наносекундной микрообработки, при которой происходит частичное разрушение и плавление окружающего материала, при фемтосекундной абляции вынос материала происходит исключительно рядом с местом взаимодействия лазерного импульса. В полупроводниковой отрасли с помощью фемтосекундных импульсных лазеров осуществляют резку кремниевых пластин на индивидуальные чипы с высочайшим качеством, а также микроабляцию поверхностных слоев материала толщиной в несколько сотен нанометров без повреждения соседних слоев. При этом диапазон длин волн вблизи 1 мкм очень востребован для медицинских применений, где с помощью лазеров с фемтосекундной длительностью импульса производят операции по лазерной коррекции зрения, пересадке роговицы, удалению катаракты. Другое направление медицинских применений лежит в области высокоточной микрообработки для формирования биоимплантов, коронарных стентов, микрокатетеров. Лазеры с фемтосекундной длительностью импульса открыли новые возможности в микромодификации прозрачных материалов, одна из которых – возможность записи информации в объеме и создание 3D структур внутри объема прозрачного материала.

Актуальность проблемы разработки альтернативных насыщающихся поглотителей с субпикосекундным и фемтосекундным временем срабатывания обусловлена необходимостью в быстрых и надежных модуляторах оптического излучения для пассивной синхронизации мод в лазерах ультракоротких импульсов (УКИ). В отличие от доминирующей в настоящее время технологии полупроводниковых насыщающихся поглотителей, в которой используется вакуумное напыление тонких полупроводниковых слоев, технологии получения одномерных и двумерных наночастиц, а также тонких полимерных пленок с наночастицами, отличаются простотой и доступностью.

Прямая фемтосекундная запись является широко распространенной и развивающейся технологией формирования световодов внутри прозрачных материалов. Эта методика

обеспечивает надежное и одностадийное производство различных оптических интегральных устройств без дополнительного изготовления оптических масок, как в случае использования традиционных фотолитографических методов. При лазер-индуцированной записи происходит перманентное изменение показателя преломления прозрачного материала в зоне фокусировки ультракоротких лазерных импульсов. Используя световоды, сформированные методом фемтосекундной записи можно создавать такие интегральные оптические устройства, как делители мощности, направленные ответвители, круговые и линейные лазерные резонаторы, лазерные усилители, а также волоконные брэгговские решетки.

Цель диссертационной работы заключается в исследовании способов генерации и усиления ультракоротких импульсов в полностью волоконных иттербиевых лазерах на длине волны вблизи 1 мкм, а также в исследовании фундаментальных механизмов модификации показателя преломления при фемтосекундном облучении прозрачных сред для создания интегральных оптических устройств.

Задачи диссертационной работы:

1. Исследование нелинейных оптических свойств и порогов разрушения композитных материалов на основе одномерных и двумерных наночастиц для разработки методов использования их в качестве внутрирезонаторных модуляторов для синхронизации мод волоконных лазеров в ближнем ИК диапазоне.

2. Определение зон и условий стабильной генерации ультракоротких импульсов в волоконных лазерах с внутрирезонаторными модуляторами на основе одномерных и двумерных наночастиц.

3. Изучение и разработка генераторов ультракоротких импульсов со стабильными выходными характеристиками в полностью волоконных схемах.

4. Исследование режимов работы и разработка оптимальных схем волоконных усилителей ультракоротких импульсов до пиковых мощностей в десятки мегаватт.

5. Разработка методов компенсации высших порядков дисперсии в полностью волоконных схемах лазеров ультракоротких импульсов.

6. Исследование фундаментальных основ лазер-индуцированного изменения показателя преломления прозрачных сред при фемтосекундной записи.

7. Разработка методов фемтосекундной записи оптических волноводов в прозрачных средах.

Положения, выносимые на защиту:

1. При использовании объемной геометрии волоконного резонатора параметры нелинейного вращения эллипса поляризации в лазерах ультракоротких импульсов минимально

зависят от внешних условий по сравнению с обычной плоской геометрией волоконного резонатора.

2. Существуют 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. Длительность импульса уменьшается с ростом коэффициента деления ответвителя и увеличивается с увеличением длины петли в круговом нелинейном зеркале.

3. Существуют зоны стабильной генерации импульсов в волоконных лазерах в зависимости от глубины модуляции насыщающегося поглотителя и величины полной дисперсии волоконного резонатора.

4. Стабильная импульсная генерация в волоконных лазерах на длине волны 1 мкм с использованием наноматериалов с низкой глубиной модуляции (2–3%), как правило, достигается в условиях комбинированной синхронизации мод. При этом рабочая зона насыщающегося поглотителя может смещаться в область более низких интенсивностей, что также предохраняет модулятор с наночастицами от оптического разрушения.

5. Использование оптических волокон с W-профилем показателя преломления в стретчерах для усиления ультракоротких импульсов может приводить к дисперсионной согласованности системы стретчер-компрессор, а также к уменьшению влияния фазовой самомодуляции в волоконном усилителе.

6. Фемтосекундную запись можно применять для создания оптических волноводов с депрессированной оболочкой в кварцевом стекле, используя периферийные зоны треков с пониженным значением показателя преломления.

7. Используя фемтосекундную запись для формирования оптических волноводов в активной среде, можно создавать лазерные усилители с волноводным режимом распространения излучения накачки, обладающие большим коэффициентом усиления по сравнению с обычными усилителями с продольной накачкой.

Научная новизна работы заключается в том, что в ней:

- Выполнено 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. Определены зоны стабильной генерации импульсов в зависимости от глубины модуляции насыщающегося поглотителя и величины полной дисперсии резонатора.

- 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.

- Разработаны и исследованы схемы волоконных лазерных генераторов импульсов с широкополосными насыщающимися поглотителями на основе одномерных и двумерных наночастиц, где используется комбинированная синхронизация мод для получения сверхкоротких импульсов.

- Определены зоны модификации показателя преломления в прозрачных материалах при фемтосекундной записи в тепловом режиме накопления импульсов. 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.

Теоретическая и практическая значимость работы определяется тем, что в ней:

- Выполнен численный расчет и представлены зависимости режимов работы и длительности выходного импульса от ключевых параметров для лазера с нелинейным волоконным зеркалом, а также для лазера с комбинированной синхронизацией мод в присутствии эффекта нелинейного вращения эллипса поляризации.

- Сформулированы критерии применимости одномерных и двумерных наночастиц 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 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.

Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечивается их воспроизводимостью, соответствием экспериментальных и расчетных выходных

характеристик, а также успешным применением разработанных лазерных систем в технологических и в медицинских установках. Параметры исследуемых импульсных лазеров регистрировались с использованием коммерческих сертифицированных приборов с характеристиками, необходимыми для уверенной регистрации исследуемых эффектов. Методики приготовления пленочных модуляторов с наночастицами, использованные в работе, показали высокую повторяемость результатов. 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.

Апробация результатов. По материалам диссертации опубликовано 17 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК. Основные представленные в работе результаты докладывались и обсуждались на следующих международных и всероссийских конференциях:

1. 6th International Symposium on High-Power Fiber Lasers and their Applications, 15th International Conference Laser Optics-2012. 25–29 June, 2012. Saint Petersburg, Russia;
2. Научная сессия НИЯУ МИФИ-2014. 27 января – 2 февраля, 2014. Москва, Россия;
3. 57-я научная конференция МФТИ с международным участием, посвященная 120-летию со дня рождения П.Л. Капицы. 24–29 ноября, 2014. Долгопрудный, Россия;
4. IV Международная конференция по фотонике и информационной оптике. 28–30 января, 2015. Москва, Россия;
5. Научная сессия НИЯУ МИФИ-2015. 16–20 февраля, 2015. Москва, Россия;
6. 57-я научная конференция МФТИ «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в области физики». 24–29 ноября, 2014. Долгопрудный, Россия;
7. Научная сессия НИЯУ МИФИ. 18–19 февраля, 2015. Москва, Россия;
8. IV международная конференция по фотонике и информационной оптике, 28–30 января, 2015. Москва, Россия;
9. Конференция-конкурс молодых физиков ФИАН. 2 марта, 2015. Москва, Россия;
10. SPIE Optics+Optoelectronics-2015. 13–16 April, 2001. Prague, Czech Republic;
11. 3rd International Conference on Quantum Technologies. July 13–17, 2015. Moscow, Russia;
12. Шестая международная конференция «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов». 26–28 мая, 2015. Москва, Россия;
13. 58 научная конференция МФТИ. 23–28 ноября 2015. Долгопрудный, Россия;

14. V международная конференция по фотонике и информационной оптике. 3–5 февраля, 2016. Москва, Россия;
15. II международная конференция «Плазменные, лазерные исследования и технологии». 25–27 января, 2016. Москва, Россия);
16. SPIE Photonics Europe. April 4–7, 2016. Brussels, Belgium;
17. International symposium Fundamentals of Laser Assisted Micro- & Nanotechnologies FLAMN-2016. June 27 – July 1, 2016. Saint Petersburg, Russia;
18. 1st international symposium Advanced photonic materials-2016. 27 June – 01 July, 2016. Saint Petersburg, Russia;
19. 59-я научная конференция МФТИ «Проблемы современной физики». 21–26 ноября 2016. Долгопрудный, Россия;
20. VI международная конференция по фотонике и информационной оптике. 1–3 февраля 2017. Москва, Россия;
21. Всероссийская конференция по волоконной оптике-2017. 3–6 октября, 2017. Пермь, Россия.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 26 печатных работах, из которых 17 работ в журналах, из списка рекомендованных ВАК и в 5 патентах.

Личный вклад автора заключается в том, что все эксперименты, результаты которых представлены в работе, и обработка результатов были проведены либо полностью автором, либо при его непосредственном участии. Техническая реализация основных экспериментальных установок, а также волоконных и твердотельных лазерных схем была произведена всецело автором, реализация системы записи оптических световодов и диагностики была произведена при его непосредственном руководстве и участии.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографии из 321 наименований и перечня работ и патентов автора. Работа изложена на 300 страницах, содержит 177 рисунка и 5 таблиц.

Содержание диссертации

Во Введении формируется цель и задачи работы, показана научная новизна и обоснована значимость полученных результатов, перечислены защищаемые положения и кратко рассмотрено содержание диссертационной работы по главам.

В Главе 1 рассмотрено строение световода и сформулированы условия для прохождения оптического излучения в световоде в одномодовом и многомодовом режимах. Рассмотрены оптические свойства активных волокон на основе кварцевого стекла, легированного ионами иттербия. Показано, что вынужденное комбинационное рассеяние является основным

фактором, ограничивающим максимальную энергию импульса при усилении в активных волокнах.

Рассмотрены характеристики спектрально-ограниченных и чирпированных импульсов, а также математические способы их описания [1-5]. Как было показано, автокорреляционные методы измерения длительности импульса могут давать разные результаты для импульсов с разной частотной модуляцией. Импульсы на выходе волоконных лазеров, как правило, имеют частотную модуляцию, поэтому для измерения их длительности наиболее приемлемы методы, основанные на измерении автокорреляционной функции интенсивности, например, метод измерения длительности импульса, основанный на неколлинеарной генерации второй гармоники.

Установлено, что дисперсионные свойства оптических световодов и значительная величина нелинейного эффекта фазовой самомодуляции (ФСМ) определяют условия распространения импульсного излучения в оптических волокнах, а также способы генерации ультракоротких импульсов в волоконных резонаторах [6-8]. Рассмотрены солитонные решения нелинейного уравнения Шредингера, определяющие режимы образования стационарной огибающей импульса для случаев фундаментального солитона, режима растянутого импульса и параболического импульса. При этом показано, что энергия выходного импульса увеличивается по мере увеличения длительности и величины частотной модуляции (чирпа) импульса, достигая максимальной (десятки и сотни нДж) для сильно чирпированного импульса, полученного в режиме генерации диссипативного солитона.

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 успешное применение одностенных углеродных нанотрубок (ОУН), графена и дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) в качестве широкополосных насыщающихся поглотителей в лазерах УКИ [9-18]. Установлено, что глубина модуляции насыщающихся поглотителей на основе наночастиц невелика и, как правило, не превышает величины 10%. При наличии большого количества работ в области исследования нелинейных оптических свойств графена, результирующие выводы часто бывают противоречивы [19-23]. Показано, что экспериментальные значения интенсивности насыщения графеновых слоев иногда отличаются на несколько порядков, что требует дальнейшего изучения процессов нелинейного поглощения светового излучения в однослойном и многослойном графене.

Рассмотрен метод усиления чирпированных импульсов в волоконных системах, который предполагает использование расширителя импульсов (стретчера) перед волоконным

усилителем с последующей компрессией импульса до первоначальной длительности [24]. Показано, что для оптимального усиления сверхкоротких импульсов с сохранением первоначальной огибающей необходима дисперсионная согласованность стретчера и компрессора.

В качестве перспективного применения лазерных систем, генерирующих фемтосекундные импульсы с энергией в несколько мкДж с высокой частотой повторения, рассмотрен метод лазер-индуцированной записи оптических световодов [25-31]. Обсуждаются процессы, приводящие к перманентному изменению показателя преломления (п/п) при воздействии фемтосекундных импульсов на прозрачные оптические материалы, среди которых выделены: изменение плотности вещества при локальном плавлении, образование ударной волны и перестройка химических связей. Отмечено, что физическая и фотохимическая природа эффекта перманентного изменения показателя преломления под действием фемтосекундных лазерных импульсов еще находится в стадии исследования.

В Главе 2 изложены методы генерации сверхкоротких импульсов, основанные на принципах быстрой модуляции коэффициента преломления в результате нелинейного взаимодействия прозрачной среды световода и мощного импульсного излучения. Поскольку такой нелинейный оптический процесс является нерезонансным (в отличие от резонансных процессов, рассмотренных ниже в Главе 3), время его релаксации определяется быстрым электронным откликом в диапазоне времен 10^{-15} сек. Такие модуляторы рассматриваются как быстрые насыщающиеся поглотители и позволяют получать наиболее короткие световые импульсы.

В разделе 2.2 Главы 2 предложен оригинальный метод оптимального 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 эллипса поляризации (НВП), чувствительный к поляризационной нестабильности. На Рис. 1 показана схема намотки волокна на объемную катушку. Дихроизм волокна на участке полукруглого загиба 9 компенсируется аналогичным дихроизмом, но смещенным на 90 градусов на участке полукруглого загиба 10. Таким образом, за 1/2 полного обхода катушки дихроизм волокна, вызванный изгибами волокна, полностью компенсируется.

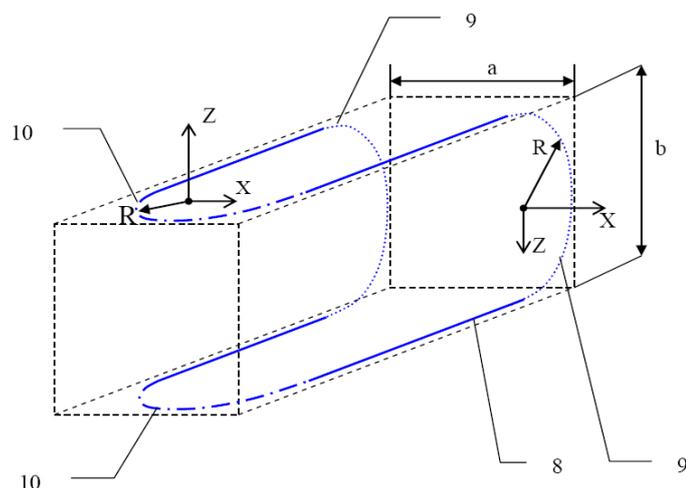


Рис. 1 – Схема намотки волокна на объемную катушку кольцевого резонатора лазера. Ось X и ось Z взаимно перпендикулярны; каждый виток волокна на объемной катушке содержит четыре прямых участка 8, изображенных сплошной линией, два полукруглых участка 9, изображенных пунктирной линией, и два полукруглых участка 10, изображенных штрихпунктирной линией

Графики угла поворота эллипса поляризации и эволюции коэффициента эллиптичности от количества проходов излучения для объемной катушки и для плоской катушки представлены на Рис. 2.

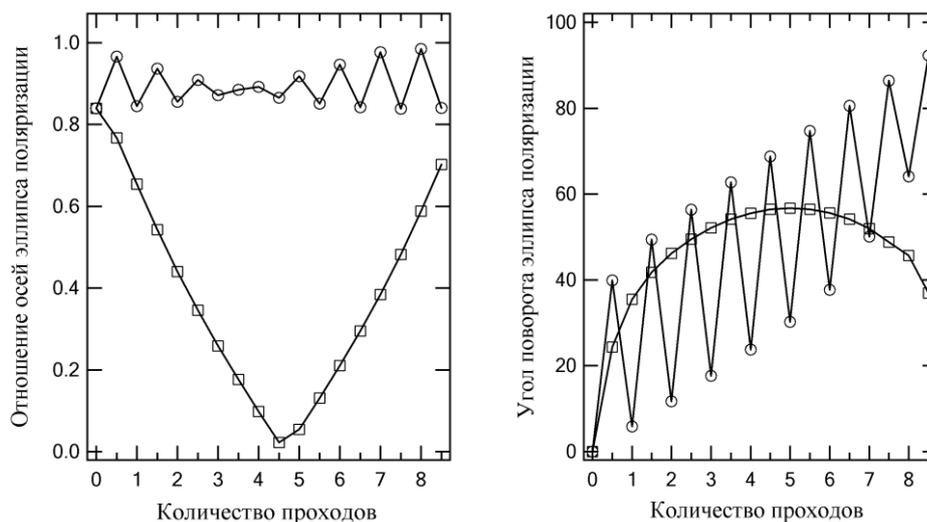


Рис. 2 – Изменение отношения главных осей эллипса поляризации и угол поворота эллипса поляризации от количества проходов в плоской катушке (квадраты) и в объемной катушке (круги). Для плоской катушки один проход соответствует полному обходу катушки. Для объемной катушки один проход соответствует 1/2 полного обхода катушки

Как следует из Рис. 2, отношение осей эллипса при прохождении излучения по виткам объемной катушки испытывает незначительные осцилляции около начального значения. Угол поворота эллипса поляризации также осциллирует, при этом среднее значение угла поворота монотонно возрастает с постоянной скоростью. Таким образом, для объемной катушки средний уровень отношения осей эллипса не меняется, а средний уровень угла поворота эллипса поляризации соответствует углу поворота эллипса для эффекта НВП на линейном участке волокна.

В разделе 3.3 Главы 2 дано подробное описание работы волоконного иттербиевого импульсного лазера с нелинейным волоконным зеркалом (НВЗ), полностью собранного на волокнах с поддержкой поляризации, схема которого показана на Рис. 3.

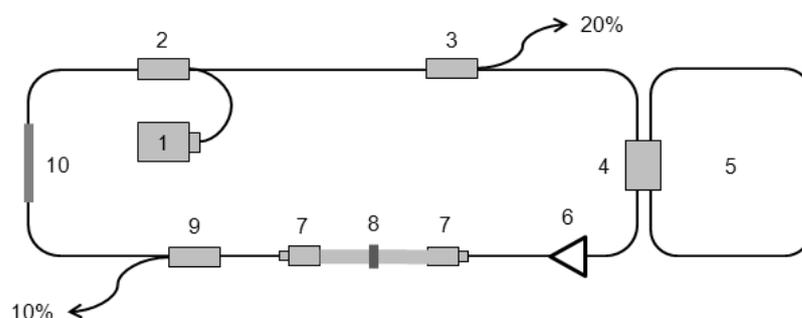


Рис. 3 – Схема волоконного пикосекундного лазера с НВЗ: 1 – одномодовый диод накачки на 976 нм; 2 – WDM мультиплексор 980/1030; 3 – выходной ответвитель 20/80; 4 – ответвитель 10/90 в петле НВЗ; 5 – волоконная петля НВЗ; 6 – изолятор-поляризатор; 7 – коллиматор; 8 – пленочный спектральный фильтр; 9 – диагностический ответвитель 10/90; 10 – активное иттербиевое волокно

Выполнен 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 в диапазоне от нескольких десятков пикосекунд (длина петли ~10 м) до нескольких сотен пикосекунд (длина петли ~30 м). Также для каждого случая найдено оптимальное значение коэффициента деления ответвителя в волоконной петле НВЗ. Такое подробное описание режимов работы волоконного лазера с НВЗ в зависимости от ключевых параметров задействованных элементов выполнено впервые.

В Главе 3 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 УКИ, а также определены зоны стабильности импульсных волоконных генераторов в зависимости от глубины модуляции насыщающегося поглотителя и полной величины дисперсии резонатора.

Для одностенных углеродных нанотрубок определены нелинейные коэффициенты поглощения для нанотрубок разных типов. Обнаружено, что в зависимости от метода синтеза нанотрубок, величина коэффициенты нелинейного поглощения возрастает в ряду: ОУН/Arc < ОУН/NipCO < ОУН/LA, что связано с различной чистотой получения нанотрубок при разных технологиях синтеза. Величина плотности энергии насыщения находится в диапазоне 10–50 мкДж/см², что сравнимо с аналогичной величиной для полупроводниковых насыщающихся поглотителей SESAM (Semiconductor Saturable Absorber Mirror). Глубина модуляции для устройств с ОУН, как правило, не превышает нескольких процентов. Используя композитный пленочный насыщающийся поглотитель ОУН-КМЦ, где КМЦ – полимер карбоксиметилцеллюлоза, впервые удалось получить пассивную синхронизацию мод в режиме непрерывной генерации в титан-сапфировом лазере на длине волны 810 нм, что подтверждает возможность применения устройств с ОУН в качестве широкополосных насыщающихся поглотителей для лазеров УКИ.

Изучены нелинейные оптические свойства однослойного графена, а также суспензий графеновых листов с небольшим количеством слоев (от одного до трех) при облучении фемтосекундными импульсами на длине волны 1030 нм. На Рис. 4 показаны зависимости нормированного коэффициента пропускания от пиковой интенсивности для однослойного графена, полученные из экспериментальных кривых Z-сканирования. Теоретическая аппроксимация экспериментальной зависимости позволила получить значения насыщаемой части поглощения для однослойного графена $\alpha_0 = 0.017$ (74% от поглощения одного листа графена) и интенсивности насыщения $I_S = (6.2 \pm 0.8) \text{ ГВт/см}^2$.

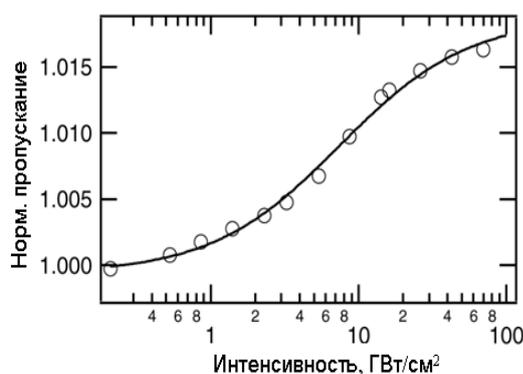


Рис. 4 – Нормализованный коэффициент пропускания в зависимости от пиковой интенсивности падающего импульса для однослойного графена (кружки) и наилучшее приближение (сплошная линия)

В разделе 3.3 Главы 3 изложен подход, объясняющий разные экспериментальные величины интенсивности насыщения однослойного графена в зависимости от длительности возбуждающего импульса, а также оценены температура квазиравновесного распределения носителей заряда сразу после импульсного возбуждения $T_e = 2100$ К и химический потенциал $\mu_e = 0.64$ эВ. В данной работе длительность импульса возбуждения $\tau_p = 300$ фс лежит в диапазоне $\tau_2 \ll \tau_p \ll \tau_1$, где τ_1, τ_2 – время межзонной и внутризонной релаксации фотовозбужденных носителей заряда соответственно. Поскольку длительность возбуждающего импульса короче времени межзонной релаксации, фотовозбужденные носители заряда термализуются с образованием горячего квазиравновесного распределения Ферми-Дирака при отсутствии диссипации энергии. Если $\hbar\omega$ – энергия фотона возбуждения для перехода из валентной зоны в зону проводимости, то, в процессе ультракороткого возбуждения, электроны заполняют коническое распределение состояний зоны проводимости ниже и вблизи энергии $\hbar\omega/2$ в соответствии с функцией распределения состояний $f(E)$ для найденной температуры квазиравновесного распределения и химического потенциала, как показано на Рис. 5а. Дальнейшее поглощение уменьшается из-за блокировки Паули, определяя эффект насыщения.

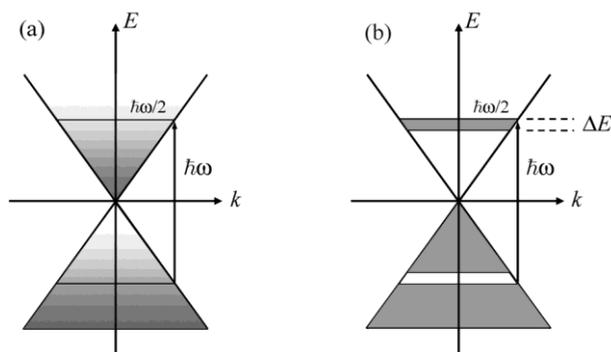


Рис. 5 – Структура энергетических зон для однослойного графена вблизи точки Дирака в пространстве $E-k$. Серые области – состояния, заполненные электронами; градиент серого схематично показывает энергетическую зависимость функции распределения $f(E)$;
 а) распределение электронов при импульсном возбуждении с характеристиками $\tau_2 \ll \tau_p \ll \tau_1$;
 б) распределение электронов при импульсном возбуждении с характеристиками $\tau_p \leq \tau_2$

Ситуация меняется, когда длительность импульса возбуждения лежит в диапазоне $\tau_p \leq \tau_2$, который меньше или близок к времени термализации горячих носителей в диапазоне 10–150 фс. В этом случае импульсное возбуждение формирует неравновесное распределение носителей в узком интервале энергий ΔE и, следовательно, генерирует меньшую плотность фотовозбужденных носителей, как показано на Рис. 5b. Сопоставляя значения электронной плотности для двух разных случаев (экспериментальное значение $3.8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ для длительности импульса 300 фс и теоретическое $1.2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ для длительности импульса 50 фс), сделан вывод, что вариация длительности возбуждающего импульса может быть причиной значительных изменений плотности фотовозбужденных носителей с соответствующим изменением интенсивности насыщения.

Были определены такие важные для оптических применений параметры, как отношение глубины модуляции к ненасыщаемой части поглощения для однослойного и многослойного графена и коэффициент двухфотонного поглощения (ДФП). Показано отсутствие заметного влияния ДФП в экспериментальных сигналах для однослойного графена и присутствие ДФП в экспериментальных сигналах суспензий многослойных графеновых листов, что объясняется большим количеством разрешенных переходов для процесса ДФП в многослойном графене.

В разделе 3.4 Главы 3 приведены результаты исследования нелинейного оптического поглощения водной суспензии 4–5-слойных листов MoS_2 при фемтосекундном импульсном возбуждении на длине волны 514 нм. В зависимости от интенсивности возбуждения были зарегистрированы две области нелинейных эффектов: с обратным насыщением при низкой интенсивности и с прямым насыщением при высокой интенсивности. С использованием методов Z- и R-сканирования были измерены сечения внутризонного и межзонного поглощения. Для описания экспериментальных данных была предложена трехуровневая модель для межзонных и внутризонных переходов. Наблюдаемые эффекты описывались скоростными уравнениями для динамики однофотонных переходов без заметного влияния двухфотонного поглощения на нелинейные процессы. Низкий коэффициент двухфотонного поглощения в листах MoS_2 объясняет высокую глубину модуляции, достигающую до ~20% вблизи интенсивности разрушения образца. Обнаруженные нелинейные оптические свойства MoS_2 могут быть использованы в модуляторах оптического излучения с пикосекундной скоростью срабатывания.

Одним из ключевых выводов раздела 3.7 Главы 3 является определение зон стабильности импульсной генерации в волоконных лазерах в зависимости от полной величины дисперсии резонатора и глубины модуляции насыщающегося поглотителя. На Рис. 6 показаны линии, соединяющие точки, полученные в результате расчета множества

проходов импульса по резонатору до достижения стабильной формы огибающей импульса. Линии представляют собой границы, разделяющие площадь графика на две области, справа, где возможна стабильная генерация импульсов после количества обходов резонатора, которое не превышает 1000, и слева, где стабильное решение не найдено. Положение границы зависит от энергии импульса, циркулирующего в волоконном резонаторе. При увеличении внутрирезонаторной энергии импульса граница устойчивой генерации смещается в сторону больших значений глубины модуляции. Расчет границ зон стабильности выполнен только для положительных значений общей дисперсии резонатора, поскольку в случае отрицательных значений дисперсии стабильное решение зависит от большего числа параметров: кроме общей дисперсии, необходимо учитывать длину резонатора и энергию импульса.

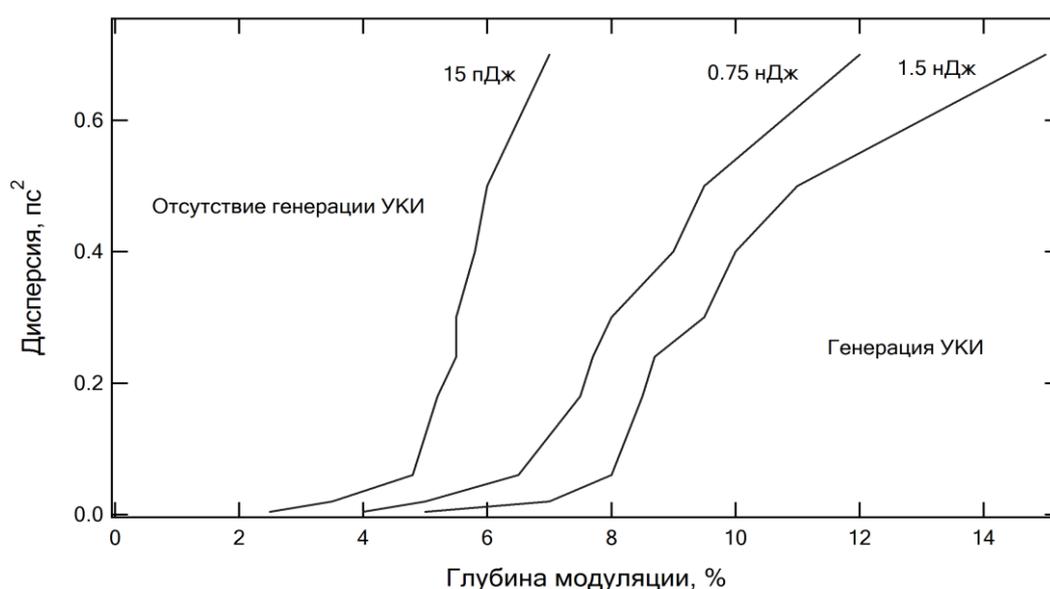


Рис. 6 – Границы зон устойчивой генерации в зависимости от общей дисперсии волоконного резонатора и глубины модуляции насыщающегося поглотителя; границы зон показаны для трех значений энергий импульса в резонаторе: 15 пДж, 0.75 нДж и 1.5 нДж

Принимая во внимание, что глубина модуляции поглощения с использованием наночастиц в условиях импульсного облучения, как правило, не превышает 2–3%, дисперсия резонатора для стабильной импульсной генерации, согласно графику на Рис. 6, должна быть близкой к нулю или отрицательной. Следовательно, имея положительную погонную дисперсию второго порядка $0.023 \text{ пс}^2/\text{м}$ для обычных волокон на длине волны 1 мкм и глубину модуляции не превышающую 2–3% в резонаторе, состоящем из нескольких метров оптического волокна, мы не можем достичь устойчивой генерации импульсов. Однако требуемое условие легко

выполняется для обычных оптических волокон на длине волны 1.5 мкм, где дисперсия аномальная, что часто используется для подтверждения импульсной генерации в присутствии новых материалов даже с незначительной глубиной модуляции в эрбиевых волоконных лазерах на длине волны 1.55 мкм. Стабильная импульсная генерация в волоконных лазерах на длине волны 1 мкм с использованием нано-материалов с низкой глубиной модуляции, как правило, достигается в условиях комбинированной синхронизации мод.

В разделе 3.9 Главы 3 представлено исследование комбинированной синхронизации мод в волоконном лазере с насыщающимся поглотителем на основе пленки ОУН-КМЦ в комбинации с эффектом нелинейного вращения поляризации в оптическом волокне. На Рис. 7 показаны зависимости нелинейного пропускания от пиковой интенсивности для пленки ОУН-КМЦ, для эффекта НВП и для функции комбинированного модулятора. Для расчета эффекта НВП были взяты параметры экспериментального волоконного лазера.

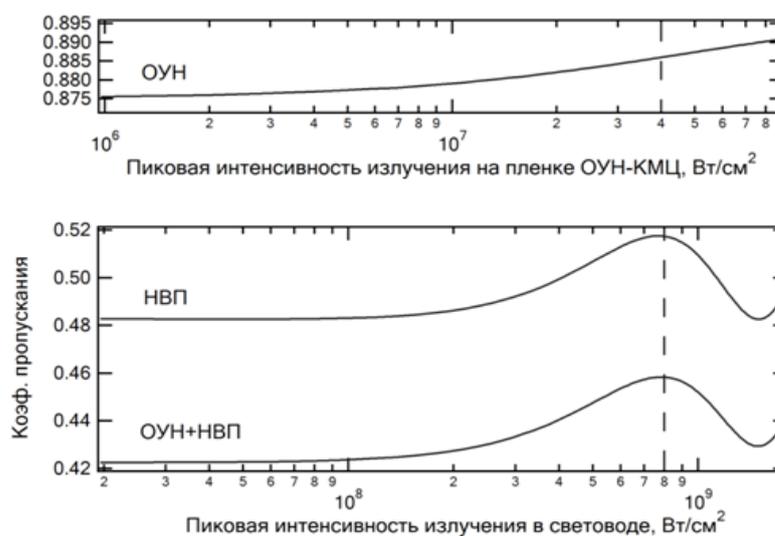


Рис. 7 – *Верхний график*: зависимость коэффициента пропускания пленки ОУН-КМЦ от пиковой интенсивности излучения, падающего на пленку. *Нижний график*: зависимости коэффициента пропускания модулятора на эффекте НВП и комбинированного модулятора ОУН+НВП от пиковой интенсивности излучения в сердцевине световода. Пунктирной линией отмечена пиковая интенсивность излучения в режиме импульсной генерации

Пиковая интенсивность стабильной импульсной генерации показана вертикальной пунктирной линией, которая проходит вблизи максимума зависимости пропускания комбинированного модулятора. При этом пиковая интенсивность излучения, падающая на пленку ОУН-КМЦ, соответствует значению ~ 40 МВт/см², что более чем на порядок ниже

порога пробоя пленочного модулятора и на порядок ниже интенсивности стабильной генерации при использовании только насыщающегося поглотителя с ОУН. Уменьшение пропускания при увеличении пиковой интенсивности справа от линии стабильной генерации не позволяет развиваться режиму неустойчивости в результате модуляции добротности. С другой стороны, вклад от двух процессов (в особенности от эффекта НВП) увеличивает общую глубину модуляции, необходимую для стабильной генерации импульсов в волоконных лазерах с нормальной дисперсией резонатора на длине волны 1 мкм, как было отмечено в разделе 3.7 Главы 3. Метод комбинированной синхронизации мод в волоконных лазерах на длине волны 1 мкм может быть также применим для других насыщающихся поглотителей с небольшой глубиной модуляции, таких как графен или дихалькогениды переходных металлов.

В разделе 3.10 Главы 3 предложена схема полностью волоконного лазера, генерирующего сверхкороткие импульсы с высокой энергией на выходе до 10 нДж. В схеме лазера, показанной на Рис. 8, использовались два оригинальных решения: 1) вставка одномодового волокна на участке А–В в общую схему с РМ волокнами для обеспечения эффекта НВП и комбинированной синхронизации мод, а также 2) использование полимерной пленки модулятора с ОУН, которая размещалась на участке сполированной поверхности оптического волокна в области частичного выхода излучения из волоконной сердцевины для защиты пленки модулятора от оптического разрушения.

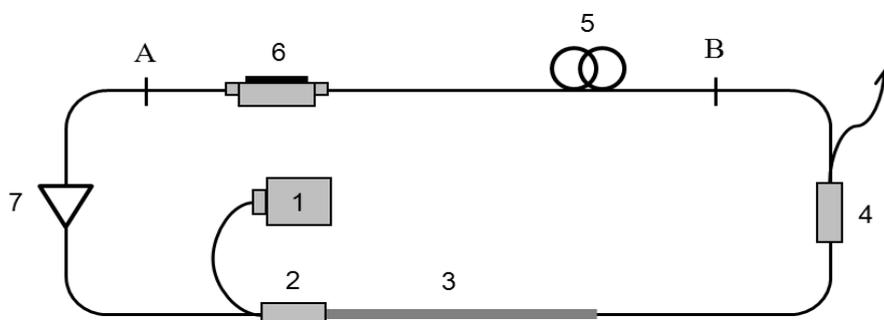


Рис. 8 – Схема волоконного иттербиевого лазера УКИ с интегрированным модулятором на участке сполированного оптического световода: 1 – лазерный многомодовый диод накачки на 960 нм; 2 – волоконный WDM каплер 980/1060; 3 – иттербиевое оптоволокно РМ YDF 6/125 DC; 4 – ответвитель 80/20; 5 – контроллер поляризации; 6 – насыщающийся поглотитель с ОУН на поверхности сполированного волокна; 7 – волоконный изолятор

Способ установки пленочного модулятора в волоконный резонатор имеет важное значение и определяет время безотказной работы модулятора до момента оптического

разрушения. Широко применяемая «торцевая» схема размещения пленки в зажиме между двух волоконных коннекторов имеет ряд недостатков. В такой схеме энергия импульса распределяется на площади круга с диаметром волоконной сердцевины, что приводит к значительной величине пиковой интенсивности, падающей на пленочный модулятор, которая вызывает разрушение пленки. Чтобы избежать оптического разрушения пленки модулятора, была реализована схема расположения на поверхности сполированного оптического волокна, как показано на Рис. 9.

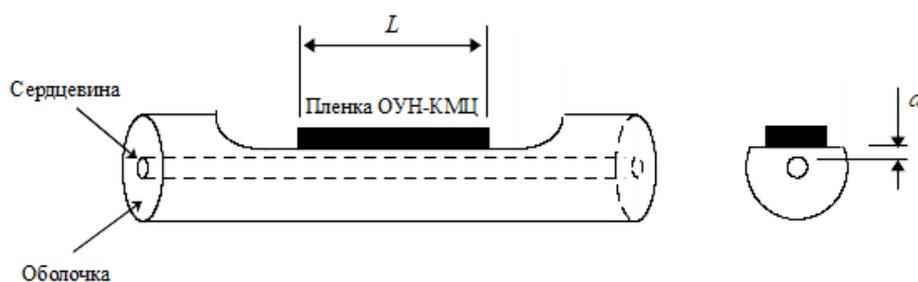


Рис. 9 – Схема расположения пленки с ОУН в интегрированном модуляторе на участке сточенного оптического световода. L – длина пленки с ОУН в продольном сечении световода, d – расстояние от сполированной поверхности до сердцевины

В данной схеме расстояние d от сполированной поверхности до сердцевины имеет принципиальное значение и определяет интенсивность выходящего из сердцевины излучения и степень взаимодействия излучения с пленкой модулятора. При использовании 20%-го волоконного ответвителя средняя выходная мощность излучения лазера в режиме синхронизации мод составляла 160 мВт. В результате работы такого лазера на длине волны 1067 нм были получены высокоэнергетичные импульсы длительностью 12 пикосекунд с энергией до 10 наноджоулей и частотой повторения импульсов 16.7 МГц. На выходе из резонатора производилась компрессия импульсов внешним устройством на паре дифракционных решеток с величиной дисперсии второго порядка -0.45 пс^2 до минимальной длительности в 140 фемтосекунд.

Одной из основных задач исследований, представленных в Главе 3, было нахождение порогов оптического разрушения наноматериалов и создание условий для работы изделий в качестве внутрирезонаторных лазерных модуляторов без разрушения в течение длительного времени. Был обнаружен порог оптического разрушения для пленочных модуляторов с наночастицами при пиковой интенсивности вблизи 1 ГВт/см^2 на частотах следования

импульсов более 1 МГц, а также пороги теплового разрушения при плотности средней мощности падающего излучения 18–30 кВт/см² в зависимости от величины линейного поглощения образца.

В Главе 4 рассмотрены методы усиления фемтосекундных импульсов до энергий в единицы и десятки мкДж на длине волны 1 мкм в компактных волоконных схемах. Необходимость высокой скорости обработки материалов требует от современных технологических лазеров высокой частоты повторения импульсов, что в свою очередь приводит к тому, что конфигурация финального усилителя должна обеспечивать высокую среднюю мощность выходного излучения в процессе работы. В данном случае волоконная технология и волоконные усилители идеально подходят для работы на высокой средней мощности, а также характеризуются высокой стабильностью выходных характеристик. Однако в случае усиления сверхкоротких импульсов, на большой длине волокна накапливаются нелинейные резонансные и нерезонансные эффекты, которые существенно ограничивают максимально достижимую энергию в импульсе, к числу которых можно отнести фазовую самомодуляцию, эффект вынужденного комбинационного рассеяния и дисперсионное уширение импульса. Указанные эффекты искажают спектр сигнала и временные характеристики импульса, а также ограничивают коэффициент усиления. Ключевым условием успешного применения фемтосекундных импульсных источников в технологиях тонкой обработки материалов является наличие высокого контраста импульса, то есть отношения энергий фемтосекундного импульса и уширенного пьедестала, образующегося в результате отсутствия дисперсионной согласованности элементов лазерной системы и влияния нелинейных эффектов. При низком контрасте импульсов растут пороги фотопреобразования и появляется нежелательный разогрев зоны облучения.

В зависимости от применяемого типа задающего генератора были рассмотрены два метода усиления импульсов в активных световодах. Усиление импульсов в режиме большой нелинейности предпочтительно для случая, когда в качестве задающего генератора используется лазер с узкой спектральной шириной излучения. Узкая спектральная ширина пикосекундных импульсов на выходе такого генератора не позволяет эффективно уширять импульс в известных типах стретчеров импульсов перед их усилением. Поэтому необходимо использовать сильную фазовую модуляцию на участке волокна определенной длины (фазовый модулятор) для увеличения спектральной ширины импульса. Импульс одновременно растягивается и приобретает чирп, после чего происходит усиление импульса.

Степень нелинейности при усилении импульсов на участке активного волокна длиной L характеризуется величиной куммулятивного интегралла B :

$$B = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^L n_2 I(z) dz \quad (1)$$

где n_2 – нелинейный показатель преломления, I – пиковая интенсивность. Когда $B \leq \pi$, усилитель работает в линейном режиме, если $B > \pi$, то в нелинейном. В нелинейном режиме усиления длительность импульса после осциллятора практически не меняется. В процессе прохождения импульса через волоконные элементы предусилителей, фазового модулятора и усилителя мощности значительно увеличивается только величина chirpa импульса. Появление значительной частотной модуляции, chirpa импульса, обеспечивает возможность дальнейшей компрессии импульса до фемтосекундной длительности.

На Рис. 10 показаны огибающие начального импульса перед усилением, усиленного импульса и выходного импульса после оптимальной компрессии, полученные с помощью численного решения нелинейного уравнения Шредингера. Как видно из Рис. 10, длительности импульсов до и после усиления почти не изменились, однако появление частотной модуляции при прохождении импульса через волоконные сегменты фазового модулятора и усилителя мощности позволяет на выходе сжать импульс в 75 раз.

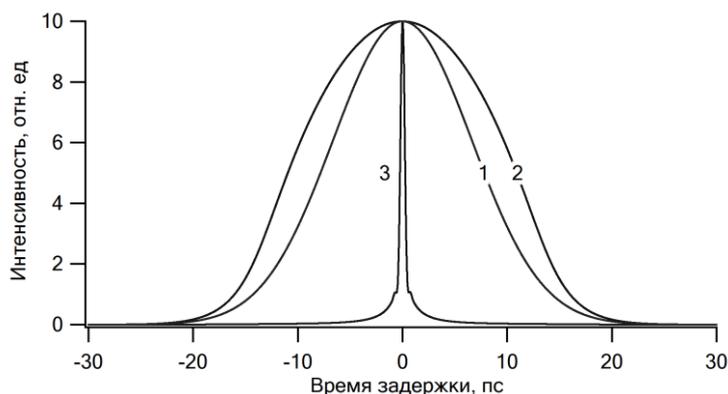


Рис. 10 – Огибающие начального импульса перед усилением (1), усиленного импульса (2) и выходного импульса после оптимальной компрессии (3), полученные с помощью численного решения нелинейного уравнения Шредингера

Метод усиления в режиме низкой нелинейности называется методом усиления chirпированных импульсов и в основном подходит для задающих генераторов, имеющих широкий спектр выходного излучения и короткий выходной импульс. Метод усиления

чирпированных импульсов предполагает использование удлинителя импульсов – стретчера перед волоконным усилителем мощности для снижения плотности мощности излучения, проходящего по усиливающему волокну, что уменьшает влияние ФСМ на форму и спектр усиленного импульса. После уширения и усиления импульсов на заключительной стадии происходит сжатие импульсов до первоначальной длительности в компрессоре.

Возможность получить усиленный импульс без искажения первоначальной формы во многом зависит от дисперсионной совместимости стретчера и компрессора. В волоконных системах на длине волны 1 мкм дисперсия как второго, так и третьего порядков обычно имеет положительный знак. В выходном компрессоре на дифракционных решетках дисперсия второго порядка отрицательная, а дисперсия третьего порядка положительная и, соответственно, остается не скомпенсированной. Таким образом, результирующая дисперсия третьего порядка для системы стретчер-компрессор только увеличивается, оставаясь некомпенсированной, давая вклад в пикосекундный пьедестал импульса. Для компенсации дисперсии используют стретчеры на волоконных брэгговских решетках, позволяющие в широких пределах регулировать величины и знаки дисперсий высших порядков с возможностью подстройки под конкретный компрессор и волоконную схему лазера. Сложность технологии записи таких решеток не позволяет говорить об их общедоступности. Другим, полностью волоконным решением является использование специальных волокон, в которых волновая и материальная дисперсии подобраны таким образом, что результирующая дисперсия соответствует выходному компрессору. Кроме того, значительная величина коэффициента дисперсии второго порядка такого волоконного стретчера позволяет эффективно удлинять импульс на незначительной длине, уменьшая влияние нелинейных эффектов ФСМ в волоконном усилителе. В данной работе показано использование высоколегированного германосиликатного световода с W-профилем показателя преломления (далее SM $d/125$, d -диаметр сердцевины в мкм) в качестве стретчера для последующего усиления и сжатия ультракоротких импульсов в полностью волоконном лазере на длине волны 1.03 мкм. Профиль показателя преломления измеренный в волокне SM 2/125 показан на Рис. 11.

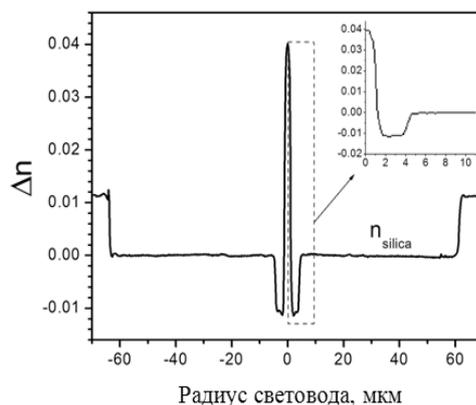


Рис. 11 – Профиль показателя преломления, измеренный в световоде SM 2/125

Исходя из экспериментальных данных и теоретических расчетов, длительность импульса более чем на порядок увеличивается при использовании дисперсионного волокна SM 1.3/125 по сравнению с обычным волокном PM-980XP на одной и той же длине волоконного стретчера. Увеличение длительности импульса перед усилителем мощности приводит к уменьшению влияния эффектов ФСМ в усилительном волокне. Кроме заметного уменьшения влияния ФСМ при использовании дисперсионного волокна в стретчере, происходит частичная компенсация третьего порядка дисперсии комплекса стретчер-компрессор. Коэффициент дисперсии третьего порядка для волокна PM 6/125 на длине волны 1030 нм положительный и в комбинации с компрессором общая величина коэффициента β_3 только увеличивается. Коэффициент дисперсии третьего порядка для дисперсионных волокон SM $d/125$ ($d < 2$ мкм) на длине волны 1030 нм имеет отрицательный знак и компенсирует третий порядок дисперсии компрессора.

Волоконный фемтосекундный лазер, использующий отрезок дисперсионно-компенсирующего волокна в качестве стретчера, показан на Рис. 12, где усилитель мощности длиной 1.5 м с переменным профилем волоконной сердцевины был собран из двух сваренных сегментов активного волокна с двойной оболочкой и сердцевинами 15 мкм (Nufern PLMA-YDF-15/130-VIII) и 20 мкм (Nufern PLMA-YDF-20/130-VIII). При усилении излучения в волокне с переменным диаметром сердцевины с ростом мощности сигнала растет диаметр моды. При этом пиковая интенсивность излучения в световоде сохраняется на приблизительно одинаковом уровне, не допуская искажения огибающей импульса вследствие нелинейных эффектов.

Для накачки активного волокна использовался многомодовый диод с выходной мощностью до 20 Вт на длине волны 976 нм. Для компенсации наведенного дихроизма и зависимости от внешних условий в конфигурации стретчера применяли двухпроходную схему с Фарадеевским зеркалом (FM). В этом случае при отражении от Фарадеевского зеркала угол

поляризации излучения менялся на 90° , в результате чего фазовый сдвиг ортогональных компонент поля при прямом проходе компенсировался аналогичным фазовым сдвигом для соответствующих компонент поля при обратном проходе.

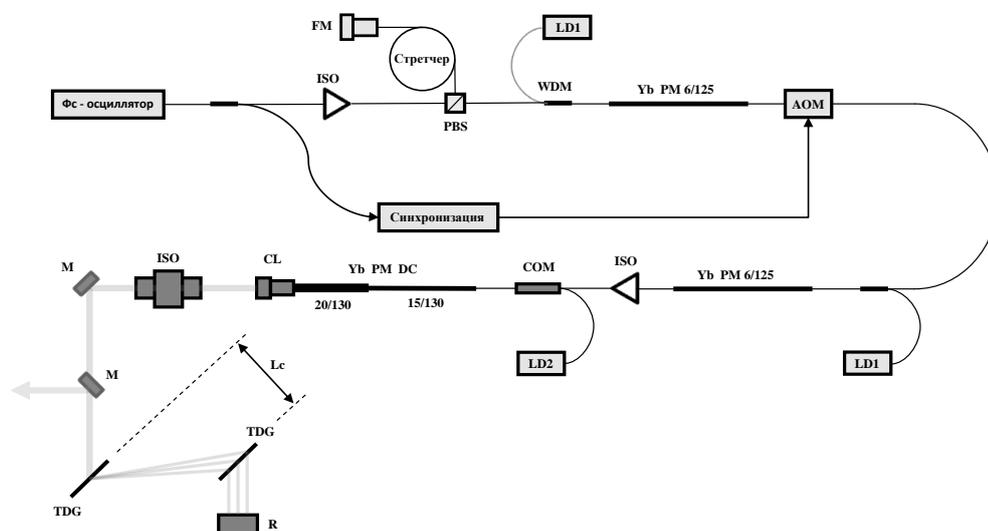


Рис. 12 – Схема волоконного лазера: *ISO* – изолятор, *PBS* – поляризационный делитель, *FM* – Фарадеевское зеркало, *AOM* – акустооптический модулятор, *CL* – коллиматор, *COM* – комбайнер, *TDG* – прозрачная дифракционная решетка, *Lc* – расстояние между решетками в компрессоре, *LD1*, *LD2* – лазерные диоды накачки на 976 нм; *R* – призма ретроотражателя; *M* – полностью отражающее зеркало

Выходное усиленное излучение с торца активного волокна коллимировалось и направлялось в компрессор, собранный на паре прозрачных дифракционных решеток с плотностью штрихов 1600 шт/мм. Эффективность дифракции каждой решетки составляла 95%, что позволяло достичь величины пропускания компрессора более 80%. В результате усиления сразу после коллиматора получали 4 Вт средней мощности, что соответствует энергии фемтосекундного импульса в 3 мкДж на выходе лазера. Длительности импульсов для оптимального расстояния между решетками $L_c = 12$ см ($D_2 = -6.5$ пс²) составляли 270 фс и 350 фс для двух стретчеров на волокнах SM 1.3/125 и SM 2/125 соответственно. Автокорреляционные функции выходного импульса показаны на Рис. 13 для двух типов волоконных стретчеров. На графике автокорреляции заметно уменьшение боковых «крыльев» и пикосекундного пьедестала при переходе к стретчеру на дисперсионном волокне SM 1.3/125.

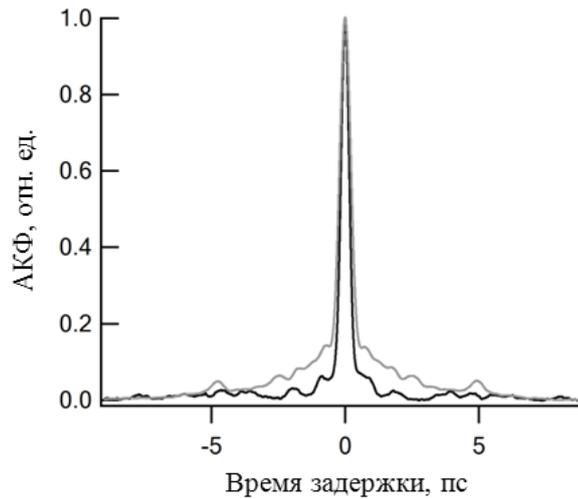


Рис. 13 – Автокорреляционная функция выходного импульса после компрессии: серая линия – с использованием 100 м волокна SM 2/125 в стретчере; черная линия – с использованием 50 м волокна SM1.3/125 в стретчере

Ниже приводятся результаты расчетов, основанных на решении нелинейного уравнения Шредингера, с начальными условиями для входящего импульса (длительность 5 пс, энергия 0.5 нДж) и с характеристиками оптического волокна SM 1.3/125 для стретчера ($\beta_2^{str} = 0.126$ пс²/м, длина стретчера 50 м). Коэффициент усиления предусилителей составлял 13 дБ, усилителя мощности 24 дБ на длине 1.5 м активного волокна в сегменте УМ. Графики огибающих начального импульса перед усилением, усиленного импульса и выходного импульса после оптимальной компрессии показаны на Рис. 14.

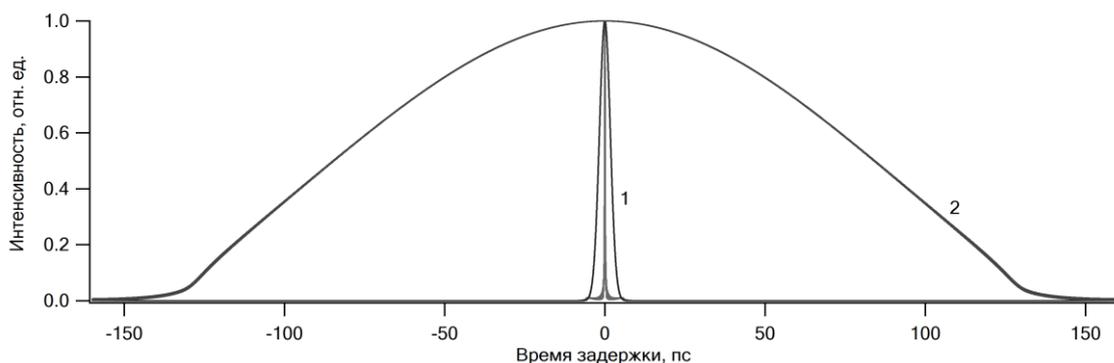


Рис. 14 – Огибающие начального импульса (1), усиленного импульса (2), а также выходного импульса после компрессии (в центре начального импульса), полученные с помощью численного решения нелинейного уравнения Шредингера

Как видно на Рис. 14, огибающая импульса после усиления заметно отличается от гауссовой в сторону более резких фронтов, что отчасти связано со спектральной фильтрацией, вследствие ограничения полосы усиления активной среды (40 нм для иттербия). В то же время, появление линейной частотной модуляции от переднего к заднему фронту импульса позволяет сжать импульс на выходе с коэффициентом ~ 900 .

Особое внимание в Главе 4 было уделено вопросу дисперсионной согласованности стретчера и компрессора, поскольку эта характеристика определяет качество импульса на выходе усилительной системы. Рассмотрены два метода согласования: первый, когда дисперсионные характеристики стретчера подстраиваются под обычный компрессор на дифракционных решетках, и второй, когда дисперсионные характеристики компрессора подстраиваются под стретчер на отрезке обычного волокна для данной длины волны.

В первом случае в качестве стретчера используют специальные компенсирующие дисперсию волокна. При этом отрицательная дисперсия третьего порядка в специальном волокне стретчера приводит к компенсации положительной дисперсии третьего порядка компрессора на дифракционных решетках. Во втором случае изменяют дисперсионные свойства компрессора, подстраиваясь под дисперсионные характеристики стретчера. Для этого в схеме компрессора используют комбинацию из двух призм и двух дифракционных решеток (комбинированный компрессор). При этом для компрессора достигается отрицательная величина дисперсии третьего порядка, которая компенсирует аналогичную положительную величину дисперсии стретчера. Было показано, что в мощных усилительных схемах предпочтительнее использовать первый вариант дисперсионного согласования. По причине больших габаритов оптической схемы, сложности реализации и юстировки сделан вывод, что комбинированный компрессор не является подходящим устройством для компенсации дисперсий высших порядков в мощных усилительных системах, в которых требуется значительное уширение импульса в стретчере.

В особых случаях, когда величина кумулятивного интеграла B значительно превышает число π , при усилении импульсов в оптическом световоде создаются условия частичной компенсации дисперсии третьего порядка благодаря влиянию эффектов ФСМ. В данной работе впервые получен график зависимости значений фазового сдвига, необходимого для компенсации соответствующих значений дисперсии третьего порядка в нелинейном волоконном усилителе. График зависимости получен в широком диапазоне значений дисперсий и фазового сдвига в результате численного решения нелинейного уравнения Шредингера.

На Рис.15 показан вид коммерческого волоконного фемтосекундного лазера FL-300, собранного на основе схемы, предложенной на Рис. 12.



Рис. 15 – Волоконный фемтосекундный лазер FL-300 с характеристиками: длина волны излучения 1035 нм, длительность импульса 250 фс, энергия импульса 3 мкДж, частота повторения импульсов от 100 Гц до 1 МГц, поляризация линейная, вертикальная

Разработанный волоконный фемтосекундный лазер, представленный на Рис. 15, прошел успешные испытания в составе хирургического комплекса «ФемтоВизум» (ООО «Оптосистемы»), где с помощью фемтосекундных лазерных импульсов формировался равномерный и тонкий роговичный лоскут, при этом полностью контролировался диаметр и толщина роговичного лоскута при минимальном нарушении структуры глазной роговицы.

В Главе 5 рассмотрены методы оптической записи световодов в прозрачном материале, определены характерные параметры световых импульсов и рабочих зон для перманентного изменения показателя преломления. Под воздействием сфокусированных фемтосекундных лазерных импульсов показатель преломления оптически прозрачных кристаллов может изменяться в области фокусировки. Это явление носит перманентный характер и связано с рядом необратимых фотохимических и тепловых эффектов. Если при этом плавно перемещать кристаллический образец по заданной трехмерной траектории относительно фокуса оптической системы, то в нем можно записывать световедущие структуры (оптические волноводы и интегральные схемы на их основе). Оптического пробоя вещества при этом не допускается. Для анализа профиля п/п индуцированных структур были выбраны эффективные методики экспериментального исследования, такие как количественная фазовая микроскопия и Z-сканирование, которые позволили с большой точностью определить изменение п/п при фотоиндуцированных процессах.

В ходе измерения профиля индуцированного п/п было выявлено, что показатель преломления кварцевого стекла в центре фокальной области увеличивается, а на периферии происходит незначительное уменьшение показателя преломления, вызванное уменьшением

плотности вещества. Характерный пространственный профиль индуцированного п/п представлен на Рис. 16. В фосфатном стекле, наоборот, наблюдалось понижение показателя преломления в центре фокальной области.

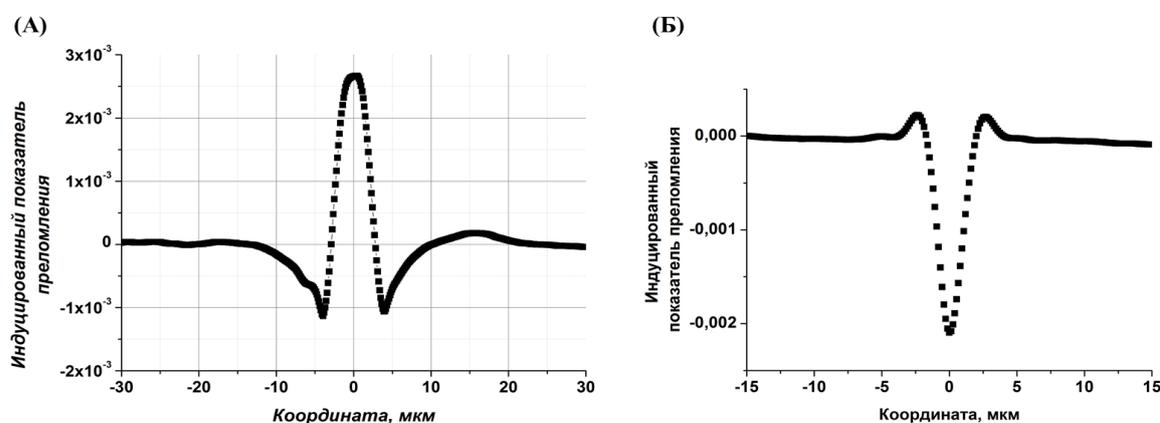


Рис. 16 – Пространственный профиль индуцированного показателя преломления при частоте следования импульсов 2 МГц, скорости передвижения образца 10 мкм/с и энергии в импульсе 80 нДж в плавленом кварце (А) и Nd:фосфатном стекле (Б)

Продемонстрирована фемтосекундная запись оптических волноводов с депрессированной оболочкой в плавленом кварце и в Nd:фосфатном стекле. Кварцевое стекло относится к классу материалов, в которых п/п в центре фокальной области повышается при фемтосекундной записи, вследствие этого световоды в нем обычно создаются посредством записи сердцевин с повышенным п/п. Однако, как было показано в разделе 5.2 Главы 5, на периферии области фокусировки появляются области с пониженным п/п. Было предложено создавать световоды с депрессированной оболочкой в кварцевом стекле на основе периферических областей с пониженным показателем преломления, как схематически представлено на Рис. 17В.

Для экспериментального подтверждения данной гипотезы были созданы световоды с геометрией, показанной на Рис. 17В. Удержание излучения в световоде за счет полного внутреннего отражения обеспечивалось боковыми областями с пониженным п/п (до $-1.5 \cdot 10^{-3}$). Параллельные треки были расположены таким образом, чтобы периферические области касались друг друга, образуя непрерывную оболочку с пониженным п/п. Аспектное отношение треков находилось на уровне 1.4 благодаря фемтосекундной записи в тепловом режиме.

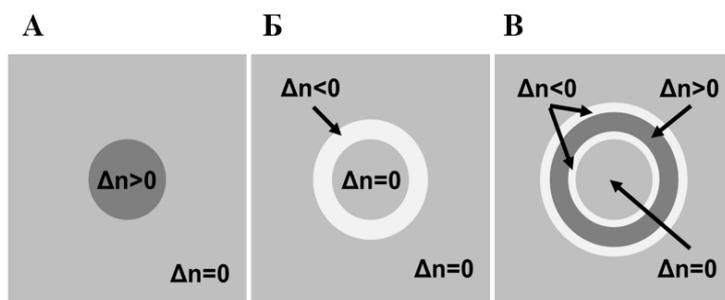


Рис. 17 – Различные геометрии световодов при лазер-индуцированной записи: (А) – сердцевина световода с повышенным п/п в центре; (Б) – оболочка световода с пониженным п/п; (В) – оболочка световода с помощью треков с пониженным п/п на периферических областях

Световод диаметром 8 мкм поддерживал распространение лишь основной моды с двумя ортогональными поляризациями, как показано на Рис. 18 А,Б. Измеренные потери при распространении были на уровне 0.5 дБ/см и 0.6 дБ/см для горизонтальной и вертикальной поляризации, соответственно. Числовая апертура световодов находилась на уровне 0.08, что сопоставимо со значениями, типичными для оптических телекоммуникационных волокон.

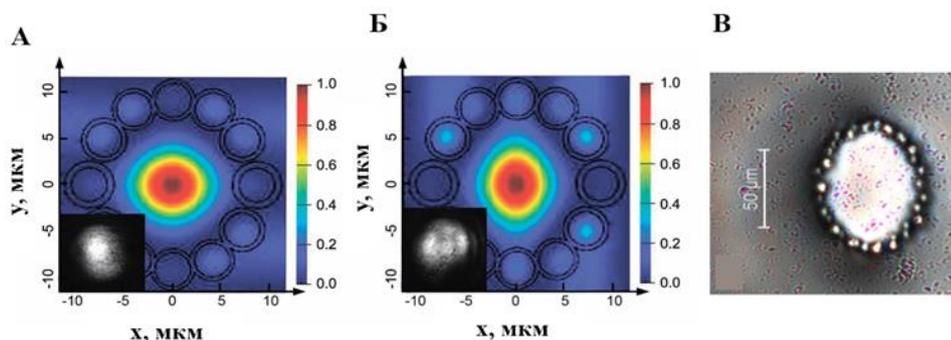


Рис. 18 – Модовое распределение на длине волны 1040 нм для горизонтальной (А) и вертикальной (Б) поляризаций (врезки на иллюстрациях показывают соответствующие экспериментальные микрофотографии); (В) – микрофотография торца записанного многомодового световода с диаметром сердцевины 60 мкм

Возможность создания световодов с депрессированной оболочкой в плавленном кварце дает возможность конструирования световодов с большим диаметром поля моды, поскольку геометрия световода в нашем случае определяется лишь траекторией движения образца. Световоды с депрессированной оболочкой в материалах с повышением п/п в центре фокальной области при фемтосекундной записи были описаны впервые.

На основе экспериментальных зависимостей установлено, что переход в тепловой режим модификации п/п сопровождается резким снижением порога оптического пробоя вещества и соответствующим сдвигом верхней границы рабочего диапазона эффекта по энергии в импульсе. Представленные диаграммы зависимости величины индуцированного п/п от энергии и частоты следования импульсов в широком диапазоне, включающем тепловой режим, в таких распространенных материалах как кварцевое и Nd:фосфатное стекло получены впервые, и являются базовыми для дальнейшего проектирования лазер-индуцированных волноводов. Данные экспериментальные результаты хорошо согласуются с разработанной численной моделью теплового распределения в фокальной области. Диаграмма температуры в фокальном пятне с границами рабочего диапазона по коэффициенту поглощения показана на Рис. 19.

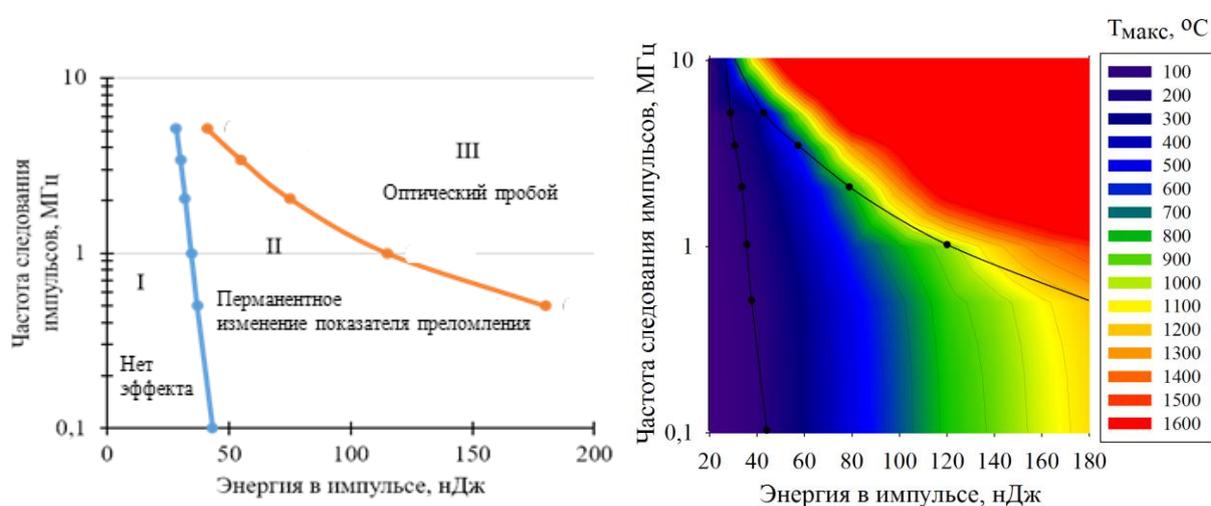


Рис. 19 – Слева – положения верхней и нижней границ рабочего диапазона, полученные по методике измерения коэффициента поглощения: зона I – нет эффекта, зона II – индуцированный п/п, зона III – оптический пробой. Справа – полученная при численном моделировании диаграмма температуры в центре фокального пятна с наложенными на нее границами рабочего диапазона (черные линии)

Из диаграммы следует, что нижней границе рабочего диапазона, при появлении первых признаков индуцированного п/п, соответствует температура внутри фокального пятна на уровне 200–250°C. Положение и сдвиг верхней границы с увеличением частоты следования импульсов определяется достижением характерной температуры 1600°C, соответствующей плавлению кварцевого стекла. Таким образом, в кварцевом стекле на высоких частотах следования импульсов (> 2 МГц) можно выделить три области: 1) где нет видимого эффекта модификации п/п; 2) где появляется индуцируемый показатель преломления; 3) где в

фокальной области происходит нагрев материала выше температуры плавления 1600°C, что приводит к локальному разрушению вещества и появлению вокруг широкой области оплавленного материала.

Используя связь между Δl и температурой внутри фокального пятна в диапазоне от 350 К до 500 К и аппроксимируя эту зависимость от температуры уравнением Аррениуса, была определена величина энергии активации 0.3 эВ. Найденная энергия активации хорошо согласуется с энергией образования дефектных трехкратных и четырехкратных плоских колец в кварцевом стекле со значениями 0.40 ± 0.03 эВ и 0.14 ± 0.02 эВ соответственно [32].

В Главе 5 был предложен и экспериментально реализован новый метод фемтосекундной записи структур с индуцированным п/п в существенно расширенном диапазоне глубин под поверхностью образца (± 300 мкм относительно оптимальной глубины компенсации сферических aberrаций). Метод состоит в снижении влияния плазменной дефокусировки за счет фемтосекундной записи в тепловом режиме, а также в изменении энергии импульса при изменении глубины модификации п/п. На основе предложенной методики была экспериментально продемонстрирована фемтосекундная запись волновода с большим диаметром сердцевины (200 мкм) в Nd:фосфатном стекле. Микрофотография поперечного среза пластины Nd:фосфатного стекла с оптическим световодом показана на Рис. 20.

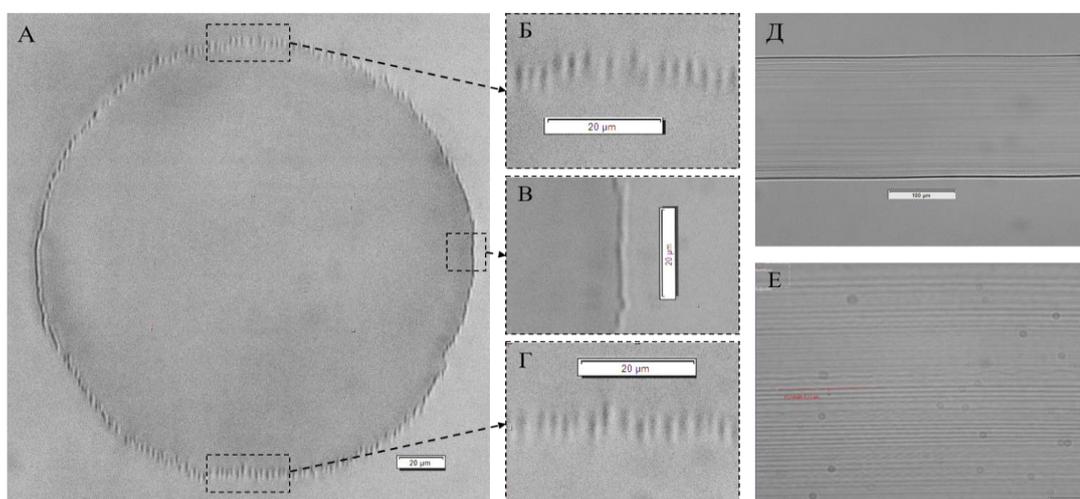


Рис. 20 – Микрофотографии лазер-индуцированного световода большого диаметра (200 мкм): (А) – поперечное сечение; (Б, В, Г) – увеличенное изображение треков, формирующих оболочку световода; (Д, Е) – вид на световод сверху (со стороны записывающего лазерного луча).

Размеры прямоугольных отрезков показывают характерный масштаб изображения:

20 мкм для (А, Б, В, Г, Е) и 100 мкм для (Д)

На основе методики записи световодов с большим диаметром сердцевины в активной среде была впервые предложена новая схема усиления лазерных импульсов, которая сочетает в себе свободное распространение сигнального излучения с малой расходимостью внутри индуцированного волновода и распространение излучения накачки в волноводном режиме. Это позволило увеличить коэффициент усиления на фиксированной длине кристалла более чем в 2.5 раза по сравнению с традиционной схемой усиления с продольной накачкой.

В Заключение представлены **основные результаты** диссертационной работы:

1. Предложена и реализована оптимальная геометрия кругового волоконного резонатора для лазера ультракоротких импульсов, при которой достигается компенсация волоконной дихроичности за один обход резонатора, что в результате уменьшает зависимость выходных характеристик волоконного лазера от внешних условий.

2. Разработаны высокостабильные генераторы ультракоротких лазерных импульсов с изменяемой длительностью импульса на основе нелинейного волоконного зеркала. Впервые выполнено детальное численное моделирование нелинейных и дисперсионных процессов в таких типах волоконных лазерных источников и даны рекомендации для получения желаемых выходных характеристик. Предложены, описаны и реализованы основные конфигурации лазеров такого типа с оптимальными условиями формирования импульсов с изменяемой длительностью.

3. Экспериментально исследованы нелинейные оптические свойства одностенных углеродных нанотрубок. С использованием измеренных нелинейных коэффициентов поглощения, интенсивности насыщения и глубины модуляции для нанотрубок, синтезированными разными методами, разработаны рекомендации для оптимальных вариантов применения их в качестве насыщающихся поглотителей в лазерах УКИ. С использованием модуляторов на основе одностенных нанотрубок получена импульсная генерация в волоконных лазерах на длинах волн 1030 нм и 1067 нм, в которых использовалась комбинированная синхронизация мод.

4. Впервые с помощью модулятора на основе одностенных углеродных нанотрубок получена импульсная генерация в Ti:S лазере на коротковолновой границе ИК диапазона (длина волны 810 нм), что подтверждает широкополосный характер модуляторов на основе углеродных нанотрубок.

5. Проведено экспериментальное исследование нелинейных оптических свойств суспензий графеновых листов с небольшим количеством слоев (от одного до трех), а также тонкой пленки однослойного графена, которое показало наличие большой глубины модуляции и меньшей интенсивности насыщения таких суспензий по сравнению с нелинейным

поглощением однослойного графена при возбуждении фемтосекундными импульсами на длине волны 1030 нм. Анализ динамики фотовозбужденных носителей в рамках двухуровневой схемы переходов позволил провести оценку сечений поглощения и концентрации фотовозбужденных носителей заряда в однослойном графене. Анализ зависимости интенсивности насыщения от длительности импульса накачки позволил оценить значения интенсивностей насыщения в разных временных масштабах длительности импульса. Показано отсутствие заметного влияния двухфотонного поглощения в экспериментальных сигналах для однослойного графена и присутствие значительного двухфотонного поглощения в экспериментальных сигналах суспензий многослойных графеновых листов.

6. Экспериментально изучены нелинейные свойства, а также релаксация оптического поглощения суспензии многослойных листов MoS_2 в пикосекундном временном диапазоне при возбуждении фемтосекундными импульсами на длине волны 514 нм. Экспериментальные данные были описаны динамикой переходов в приближении трехуровневой схемы, что позволило получить оценку концентрации носителей заряда в фотовозбужденном состоянии и сечений поглощения для фотоиндуцированных переходов электронов из валентной зоны в зону проводимости. Показано, что оптические нелинейные свойства многослойных листов MoS_2 определяются в основном динамикой однофотонных межзонных переходов.

7. Выполнен расчет условий для комбинированной синхронизации мод в присутствии насыщающего поглотителя и эффекта НВП. Определены оптимальные параметры лазерной схемы для генерации сверхкоротких импульсов в волоконном резонаторе с комбинированной синхронизацией мод. Показано, что стабильная импульсная генерация в волоконных лазерах на длине волны 1 мкм с использованием наноматериалов с низкой глубиной модуляции (2–3%) достигается, как правило, в условиях комбинированной синхронизации мод, при этом рабочая зона модулятора смещается в область более низких интенсивностей, что также предохраняет модулятор с наночастицами от оптического разрушения.

8. Экспериментально реализовано применение дисперсионно-компенсирующего волокна с профилем показателя преломления W-типа в стретчере сверхкоротких лазерных импульсов для цели их последующего усиления. В результате применения такого волокна получен импульс с энергией 3 мкДж и длительностью 250 фс с высоким контрастом импульса вследствие дисперсионной согласованности волоконного стретчера и выходного компрессора на дифракционных решетках. Проведен сравнительный анализ нескольких типов волокон для использования в стретчерах усилителей chirпированных импульсов с точки зрения их совместимости с компрессором, который показал, что использование оптических волокон с W-профилем показателя преломления в стретчерах ультракоротких импульсов приводит к

дисперсионной согласованности системы стретчер-компрессор, а также к уменьшению влияния ФСМ в усилительном волокне за счет значительного удлинения импульса в таком стретчере. В результате сохраняется форма первоначальной огибающей импульса после усиления и компрессии, а также уменьшается количество осцилляций в выходном спектре.

9. Выполнен численный расчет компенсации дисперсии третьего порядка с помощью эффекта фазовой самомодуляции в нелинейных волоконных усилителях. Построена зависимость компенсирующего эффекта фазовой самомодуляции для величин дисперсии третьего порядка от 10^{-2} до $6 \cdot 10^{-2}$ пс³.

10. Разработана численная модель динамики изменения и распределения температуры в области фокусировки фемтосекундного излучения в кварцевом стекле с целью описания процессов, приводящих к перманентному изменению показателя преломления при импульсном воздействии. На основе сравнительного анализа показано, что верхняя граница рабочего диапазона определяется достижением температуры плавления 1600°C , в то время как положение нижней границы рабочего диапазона определяется существенным нагревом фокальной области до температуры порядка $200\text{--}250^{\circ}\text{C}$, способствующей более быстрому и эффективному протеканию процессов, приводящих к изменению показателя преломления.

11. Впервые разработан метод создания оптических волноводов с депрессированной оболочкой в кварцевом стекле. Экспериментально продемонстрировано, что в процессе фемтосекундной записи, несмотря на увеличение показателя преломления в центре фокальной области, на ее периферии образуется зона с пониженным значением показателя преломления, которую можно использовать для формирования оболочки оптического волновода, состоящей из параллельных индуцированных треков, расположенных вплотную друг к другу.

12. Впервые реализована и исследована гибридная (волноводно-твердотельная) схема усиления лазерных импульсов, основанная на световодах с большим 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.

Список публикаций автора по теме диссертации

- A1. Худяков Д.В., Лобач А.С., Алдошин С.М., Надточенко В.А. Генерация ультракоротких импульсов в режиме пассивной синхронизации мод в лазере на неодимовом стекле с насыщающимся поглотителем в виде пленки нанокompозита на основе полимера карбоксиметил-целлюлозы и одностенных углеродных нанотрубок // Российские Нанотехнологии. – 2008. – Т. 3. – N 7–8. – С. 129–132.
- A2. Khudyakov D.V., Lobach A.S., Nadtochenko V.A. Nonlinear optical absorption of single-wall carbon nanotubes in carboxymethylcellulose thin polymerfilm and its application as a saturable absorber for mode-locking in pulsed Nd:glass laser // Appl. Opt. – 2009. – V.48. – P. 1624–1627.
- A3. Худяков Д.В., Лобач А.С., Образцова Е.Д., Надточенко В.А. Нелинейно-оптическое поглощение пленок нанокompозитов из полимеров и одностенных углеродных нанотрубок: влияние типа нанотрубок и полимерной матрицы // Химия высоких энергий. – 2009. Т. 43. – N 4. – С. 364–370.
- A4. Д. В. Худяков, А. С. Лобач, В. А. Надточенко, Использование пленочного модулятора с одностенными углеродными нанотрубками для синхронизации мод титан-сапфирового импульсного лазера на длине волны 810 нм // Химия высоких энергий. – 2010. – Т. 44. – N 6. – С. 566–569.
- A5. Khudyakov D.V., Lobach A.S., Nadtochenko V.A. Passive mode locking in a Ti:sapphire laser using a single-walled carbon nanotube saturable absorber at a wavelength of 810 nm // Opt. Lett. – 2010. – Vol. 35. – P. 2675–2677.
- A6. Вартапетов С.К., Худяков Д.В., Лапшин К.Э., Обидин А.З., Щербаков И.А. Фемтосекундные лазеры для микрохирургии роговицы // Квантовая электроника. – 2012. – Т. 42. – N 3. – С. 262–268.
- A7. Бородкин А. А., Худяков Д. В., Вартапетов С. К. Генерация пикосекундных импульсов в волоконном иттербиевом лазере с нелинейным волоконным зеркалом (эксперимент и математическое моделирование) // Квантовая электроника. – 2015. – Т. 45. –N 2. – С. 98–101.
- A8. Khudyakov D.V., Borodkin A.A., Lobach A.S., Ryzhkov A.V., Vartapetov S.K. Saturable absorption of film composites with single-walled carbon nanotubes and graphene // Appl. Opt. – 2013. – Vol.52. – N 2. – P.150–154.

- A9. Bukharin M.A., Khudyakov D.V., Vartapetov S.K. Heat accumulation regime of femtosecond laser writing in fused silica and Nd:phosphate glass // *Appl. Phys. A.* – 2015. – Vol. 119. – P. 397–403.
- A10. Худяков Д. В., Бородкин А. А., Лобач А. С., Вартапетов С. К., Импульсный волоконный иттербиевый лазер с комбинированным модулятором на основе одностенных углеродных нанотрубок // *Квантовая электроника.* – 2015. – Т. 45. – N 9. – С. 813–818.
- A11. Mou C., Arif R., Lobach A.S., Khudyakov D.V., Spitsina N.G., Kazakov V.A., Turitsyn S., Rozhin A. Poor fluorinated graphene sheets carboxymethylcellulose polymer composite mode locker for erbium doped fiber laser // *Appl. Phys. Lett.* – 2015. – Vol.106. – P. 061106.
- A12. Khudyakov D.V, Borodkin A.A., Lobach A.S., Vartapetov S.K., Hybrid modelocking in pulsed ytterbium fiber laser with carbon nanotube saturable absorber // *Applied Physics B.* – 2015. – Vol. 121. – P. 19–24.
- A13. Худяков Д.В., Бородкин А.А., Мазин Д.Д., Лобач А.С., Вартапетов С.К., Оптические нелинейные свойства и динамика межзонных переходов многослойных структур MoS₂ при фемтосекундном возбуждении на длине волны 514 нм // *Квантовая электроника.* – 2018. – Т. 48. – N 2. – С.124–128.
- A14. Khudyakov D.V, Borodkin A.A., Lobach A.S., Mazin D.D., Vartapetov S.K. Optical nonlinear absorption of a few-layer MoS₂ under green femtosecond excitation // *Applied Physics B.* – 2019. – Vol. 125. – P. 05.
- A15. Худяков Д.В., Ганин Д.В., Ляшедько А.Д., Бородкин А.А., Лихачев М.Е., Салганский М.Ю., Вартапетов С.К. Использование высоколегированных германосиликатных световодов с малым диаметром сердцевины в стретчерах сверхкоротких лазерных импульсов на длине волны 1.03 мкм // *Квантовая электроника.* – 2019. – Т. 49. – N 8. – С.768–772.
- A16. Khudyakov D.V., Ganin D.V., Lyashedko A.D., Likhachev M.E., Senatorov A.K., Salgansky M.Y., Vartapetov S.K. Application of dispersion-compensating fiber with W-type refractive index profile in stretcher of ultrashort laser pulses at a wavelength of 1.03μm // *Journal of the Optical Society of America B.* – 2019. – Vol. 36. – P.3066–3069.
- A17. Khudyakov D.V., Lobach A.S., Spitsina N.G., Kazakov V.A., Comparative analysis of nonlinear optical properties of single-layer graphene and few-layer graphene nanosheets // *Applied Physics B.* – 2019. – Vol. 125. – P.224.
- A18. Bukharin M.A., Khudyakov D.V., Vartapetov S.K. Investigation of Refractive Index Profile Induced with Femtosecond Pulses into Neodymium Doped Phosphate Glass for the Purposes of Hybrid Waveguiding Structures Formation // *Physics Procedia.* – 2015. – Vol.71. – P. 272–276.

- A19. Borodkin A.A., Khudyakov D.V., Lobach A.S., Vartapetov S.K., Investigation of saturable absorbance characteristics of film composites with SWNT and graphene for fiber laser pulse generation // *Physics Procedia*. – 2015. – Vol. 71. – P.277–281.
- A20. Bukharin M.A., Khudyakov D.V., Vartapetov S.K. Femtosecond writing of depressed cladding waveguides in strongly cumulative regime // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. – 2015. – Vol. 9516. – P. 95161A-1.
- A21. Bukharin M.A., Skryabin N.N., Khudyakov D.V., Vartapetov S.K, Femtosecond writing of near-surface waveguides in lithium niobate for low-loss electro-optical modulators of broadband emission // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. – 2016. – Vol. 9891. – P. 989102-1.
- A22. Bukharin M.A., Lyashedko A.D., Skryabin N.N., Khudyakov D.V., Vartapetov S.K, Improved optical efficiency of bulk laser amplifiers with femtosecond written waveguides, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. – 2016. – Vol. 9893. – P. 98930G-1.
- A23. Borodkin A.A., Khudyakov D.V. Vartapetov S.K. Investigation of hybrid modulator based on nonlinear optical loop mirror and single-walled carbone nanotubes for modelocking in Yb-doped ultrafast fiber laser // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 941. – P. 012001.
- A24. Bukharin M.A., Skryabin N.N., Khudyakov D.V., Vartapetov S.K. Writing of 3D optical integrated circuits with ultrashort laser pulses in the presence of strong spherical aberration // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2016. – Vol. 747. – P. 012054.
- A25. Borodkin A.A., Khudyakov D.V. Vartapetov S.K. Subnanosecond and picosecond generation regimes of all-PM Yb-doped fiber laser mode-locked by NOLM // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2016. – Vol. 747. – P. 012053
- A26. Bukharin M.A., Skryabin N.N., Khudyakov D.V., Vartapetov S.K, Dependence of femtosecond writing parameters in waveguide formation process within significantly broad depths range // *Optical and Quantum Electronics*. – 2017. – Vol. 49. – P.43.

По материалам диссертационной работы поданы заявки на 5 патентов, по которым утверждено право на изобретение:

- Б1. Полностью волоконный лазер со сверхкороткой длительностью импульса: пат 2486647 Рос. Федерация: МПК51 H01S 3/067(2006.01), G02F 1/01(2006.01), B82B 1/00(2006.01) / Худяков Д.В., Вартапетов С.К.– заявл. 29.12.2011; опубл. 27.06.2013.
- Б2. Волоконный лазер со сверхкороткой длительностью импульса: пат. 2540064 Рос. Федерация: МПК51 H01S 3/067(2006.01), H01S 3/117(2006.01) / Худяков Д.В., Вартапетов С.К., Бородин А.А. – заявл. 20.03.2013; опубл. 27.01.2015.

- Б3. Волоконный лазер со сверхкороткой длительностью импульса: пат. 2540484 Рос. Федерация: МПК51 H01S 3/067(2006.01) / Худяков Д.В., Вартапетов С.К., Бородкин А.А. – заявл. 08.07.2013; опубл. 20.01.2015.
- Б4. Модуль насыщающегося поглотителя на основе полимерного композита с одностенными углеродными нанотрубками: пат. 2485562 Рос. Федерация: МПК51 G02F 1/01(2006.01), H01S 3/067(2006.01), B82B 1/00(2006.01) / Худяков Д.В., Вартапетов С.К., Бородкин А.А. – заявл. 29.12.2011; опубл. 20.06.2013.
- Б5. Способ формирования оболочки волноводной структуры в прозрачном объемном материале и оболочка волноводной структуры : пат. 2578747 Рос. Федерация: МПК51 G02B 6/10(2006.01) / Бухарин М.А., Худяков Д.В. – заявл. 24.12.2014; опубл. 27.03.2016.

Список литературы

1. Rulliere C. Femtosecond Laser Pulses: Principles and Experiments. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. – 1998. – 310 p.
2. Shapiro S.L. Ultrashort Light Pulses: Picosecond Techniques and Applications. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. – 1977. – 392 p.
3. Kaiser W. Ultrashort Laser Pulses and Applications. Topics in Applied Physics. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. – 1988. – 424 p.
4. Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин А.С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. М.: Наука. – 1988. – 312 с.
5. Kaertner F.X. Ultrafast Optics. Hamburg: Springer Term. – 2005. – 385 p.
6. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. М.: Мир. – 1996. – 323 с.
7. Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics. Burlington, MA: Academic press. – 2007. – 648 p.
8. Шен И.Р. Принципы нелинейной оптики. М.: Наука. – 1989. – 560 с.
9. Haus H.A. Mode-Locking of Lasers // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electronics. –2000. – Vol. 6. – P. 1173–1185.
10. Ippen E.P. Principles of passive mode locking // Appl. Phys. B. – 1994. – Vol. 58. – P. 159–170.
11. Honninger C., Paschotta R., Morier-Genoud F., Moser M., Keller U. Q-switching stability limits of continuous-wave passive mode locking // J. Opt. Soc. Am. B. – 1999. – Vol. 16. – P. 46–56.
12. Fong K.H., Kikuchi K., Goh C.S., Set S.Y., Grange R., Haiml M., Schlatter A., Keller U. Solid-state Er:Yb:glass laser mode-locked by using single-wall carbon nanotube thin film // Opt. Lett. – 2007. – Vol. 32. – P. 38–40.

13. Chen Y.C., Raravikar N.R., Schadler L.S., Ajayan P. M., Zhao Y.-P., Lu T.-M., Wang G.-C., Zhang X.-C. Ultrafast optical switching properties of single-wall carbon nanotube polymer composites at 1.55 μm // *Appl. Phys. Lett.* – 2002. – Vol. 81. – P. 975–977.
14. Yamashita S., Inoue Y., Maruyama S., Murakami Y., Yaguchi H., Jablonski M., Set S.Y. Saturable absorbers incorporating carbon nanotubes directly synthesized onto substrates and fibers and their application to mode-locked fiber lasers // *Opt. Lett.* – 2004. – Vol. 29. – P. 1581–1583.
15. Schmidt A., Rivier S., Steinmeyer G., Yim J.H., Cho W.B., Lee S., Rotermund F., Pujol M.C., Mateos X., Aguiló M., Diaz F., Petrov V., Griebner U. Passive mode locking of Yb:KLuW using a single-walled carbon nanotube saturable absorber // *Opt. Lett.* – 2008. – Vol. 33. – P. 729–731.
16. Rozhin A.G., Sakakibara Y., Namiki S. Tokumoto M., Kataura H. Sub-200-fs pulsed erbium-doped fiber laser using a carbon nanotube-polyvinylalcohol mode locker // *Appl. Phys. Lett.* – 2006. – Vol.88. – P.051118.
17. Ильичев Н.Н., Образцова Е.Д., Пашинин П.П., Конов В.И., Гарнов С.В. Самосинхронизация мод с помощью пассивного затвора на основе одностенных углеродных нанотрубок в лазере на кристалле $\text{LiF} : F_2^-$ // *Квантовая электроника.* – 2004. – Т.34. – С. 785–786.
18. Chernysheva M.A., Krylov A.A., Kryukov P.G., Arutyunyan N.R., Pozharov A.S., Obraztsova E.D., Dianov E.M. Thulium-doped mode-locked all-fiber laser based on NALM and carbon nanotube saturable absorber // *Opt. Express.* – 2012. – Vol. 20. – P. B124–B130.
19. Xing G., Guo H., Zhang X., Sum T. C., Huan C.H.A. The Physics of ultrafast saturable absorption in graphene // *Opt. Express.* – 2010. – Vol. 18. – P. 4564–4573.
20. Marini A., Cox J.D., Garcia de Abajo F.J. Theory of graphene saturable absorption // *Phys. Rev. B.* – 2017. – Vol. 95. – P. 125408.
21. Dawlaty J.M., Shivaraman S., Chandrashekhara M., Rana F., Spencer M.G. Measurement of ultrafast carrier dynamics in epitaxial graphene // *Appl. Phys. Lett.* – 2008. – Vol. 92. – P. 042116.
22. Sun Z., Hasan T., Torrisi F., Popa D., Privitera G., Wang F., Bonaccorso F., Basko D.M., Ferrari A.C. Graphene Mode-Locked Ultrafast Laser // *American Chemical Society.* – 2010. – Vol. 4. – P. 803–810.
23. Bao Q., Zhang H., Wang Y., Ni Z., Yan Y., Shen Z.X., Loh K.P., Tang D.Y. Atomic-Layer Graphene as a Saturable Absorber for Ultrafast Pulsed Lasers // *Adv. Funct. Mater.* – 2009. – Vol. 19. P. 3077–3083.
24. Shah L., Fermann M. High-Power Ultrashort-Pulse Fiber Amplifiers // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics.* – 2007. – Vol. 22. – P. 552–558.
25. Davis K.M., Miura K., Sugimoto N., Hirao K. Writing waveguides in glass with a femtosecond laser // *Opt. Lett.* – 1996. – Vol. 21. – N 21. – P. 1729–1731.

26. Choudhury D., Macdonald J.R., Kar A.K. Ultrafast laser inscription: perspectives on future integrated applications // *Laser Photon. Rev.* – 2014. – Vol. 8. – N 6. – P. 827–846.
27. Ehrt D., Kittel T., Will M., Nolte S., Tünnermann A. Femtosecond-laser-writing in various glasses // *J. Non. Cryst. Solids.* – 2004. – Vol. 345–346. – P. 332–337.
28. Okhrimchuk A.G. Shestakov A.V., Khrushchev I., Mitchell J. Depressed cladding, buried waveguide laser formed in a YAG:Nd³⁺ crystal by femtosecond laser writing. // *Opt. Lett.* – 2005. – Vol. 30. – N 17. – P. 2248–2250.
29. Chan J.W. Huser T., Risbud S., Krol D.M. Structural changes in fused silica after exposure to focused femtosecond laser pulses. // *Opt. Lett.* – 2001. – Vol. 26. – N 21. – P. 1726–1728.
30. Ashkenasi D., Müller G., Rosenfeld A., Stoian R., Hertel I.V., Bulgakova N.M., Campbell E.E.B. Fundamentals and advantages of ultrafast micro-structuring of transparent materials: article // *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.* – 2003. – Vol. 77. – N 2. – P. 223–228.
31. Hnatovsky C., Taylor R.S., Rajeev P.P., Simova E., Bhardwaj V.R., Rayner D.M., Corkum P.B. Pulse duration dependence of femtosecond-laser-fabricated nanogratings in fused silica // *Appl. Phys. Lett.* – 2005. – Vol. 87. – N 1. – P. 2005–2007.
32. Geissberger A.E., Galeener F.L. Raman studies of vitreous SiO₂ versus fictive temperature // *Phys. Rev. B.* – 1983. – Vol. 28. – N 6. – P. 3266–3271.