

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

ПУШКИН АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ГЕНЕРАЦИЯ И УСИЛЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В СРЕДНЕМ ИК
ДИАПАЗОНЕ В ЭРБИЕВЫХ КРИСТАЛЛАХ И ХАЛЬКОГЕНИДАХ, ЛЕГИРОВАННЫХ
ИОНАМИ ЖЕЛЕЗА**

1.3.19 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2022

Работа выполнена на кафедре общей физики и волновых процессов физического факультета
МГУ имени М.В.Ломоносова

- Научный руководитель** - **Потёмкин Фёдор Викторович** -
кандидат физико-математических наук, доцент
- Официальные оппоненты** - **Цветков Владимир Борисович** -
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Федеральный
исследовательский центр «Институт общей
физики им. А.М. Прохорова Российской академии
наук», заместитель директора по научно-
организационной работе
- Анашкина Елена Александровна** - доктор
физико-математических наук, Федеральное
государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр Институт
прикладной физики Российской академии наук»,
старший научный сотрудник
- Иванов Анатолий Александрович** - кандидат
физико-математических наук, Федеральное
государственное учреждение "Федеральный
научно-исследовательский центр
"Кристаллография и фотоника" Российской
академии наук", старший научный сотрудник

Защита диссертации состоится «29» декабря 2022 г. в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.013.4 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 62, корпус нелинейной оптики, аудитория им. С.А. Ахманова.

E-mail: diss.sov.31@physics.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»:

<https://istina.msu.ru/dissertations/511624537/>

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета МГУ.013.4

кандидат физико-математических наук

А.А. Коновко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Лазеры сверхкоротких импульсов являются уникальными диагностическими инструментами для многочисленных переходных процессов на фемтосекундном масштабе по времени и представляют интерес для приложений нелинейной оптики, генерации аттосекундных импульсов и изучения экстремального состояния вещества. По сравнению с параметрическими и квантово-каскадными лазерными источниками, твердотельные лазеры могут обеспечить более простой способ накачки и масштабирования выходной энергии [1]. Излучение среднего ИК диапазона в области 3-5 мкм попадает в окна прозрачности атмосферы, однако в этой области лежит множество спектральных линий поглощения различных газов и молекул, что актуализирует такие источники для спектроскопии и зондирования атмосферы.

Полупроводниковые кристаллы A_2B_6 , легированные ионами переходных металлов, представленные в конце 90-ых годов [2], открыли доступ к широкополосной лазерной генерации в диапазоне длин волн 1,9-6,8 мкм и демонстрируют уникальные спектроскопические свойства, включая ультраширокую полосу усиления ($\Delta\lambda/\lambda_0 \sim 0,2-0,4$), высокие сечения поглощения и люминесценции ($\sigma \sim 10^{-18} \text{ см}^2$), высокую квантовую эффективность [1]. Получение широкополосных лазерных импульсов в более длинноволновой области спектра ($>3\text{ мкм}$) интересно для увеличения частоты отсечки при генерации высоких гармоник, получения лазерного эффекта в воздухе в режиме филаментации, эффективной генерации суперконтинуума в интересах широкополосной спектроскопии, а также изучения процессов фемтохимии и фемтофизики молекул.

Интерес к разработке наносекундных 3-мкм лазерных источников связан с возможностью их использования для накачки лазерных усилителей и генераторов в среднем ИК диапазоне на основе халькогенидов, легированных ионами железа, а также параметрических лазерных источников, и исследования свойств сильно поглощающих сред, в частности воды и биообъектов. Так как вода демонстрирует сильнейшее резонансное поглощение в области длины волны 3 мкм [3], такие когерентные источники становятся критически важным инструментом для исследования фундаментальных процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом.

Объектом исследования являлись физические механизмы генерации и усиления в эрбиевых и халькогенидных лазерных средах. **Предмет исследования** – разработка методов получения мощных лазерных импульсов в средней ИК области.

Степень разработанности темы

Твердотельные эрбиевые среды, генерирующие вблизи 3 мкм, обладают не самыми благоприятными генерационными свойствами, что осложняет разработку источников на их основе. Круг проблем включает высокую тепловую нагрузку на активный элемент с высоким уровнем легирования, большой квантовый дефект, самоограниченный переход, не самые лучшие тепловые свойства матриц, и как следствие сильную тепловую линзу и деполяризацию в кристалле [4], что ограничивает выбор подходящих электро- и акустооптических материалов для модуляции добротности, обладающих, как правило, невысокой лучевой прочностью [5]. В общем, разработка подходов к созданию мощного наносекундного лазера накачки технологического уровня остаётся актуальной задачей. Несмотря на активное изучение 3-мкм лазерных сред с 70-ых годов прошлого века [6,7], наносекундные генераторы не вышли на достаточно высокий уровень разработки, и до сих пор ведутся исследования по поиску более эффективных конденсированных лазерных сред [8], включая керамики, надёжных модуляторов добротности, методов компенсации термонаведённых искажений [9].

Из халькогенидов, легированными ионами переходных металлов, на сегодняшний день наиболее разработанными являются активные элементы, основанные на матрицах ZnSe и ZnS, легированные ионами Cr^{2+} и Fe^{2+} с областями генерации в диапазонах 2-3 мкм и 4-5 мкм соответственно. Лазерные свойства активных элементов, легированных ионами железа, исследованы в непрерывном режиме [10], импульсном с различной длительностью импульсов [11,12], продемонстрирована широкая перестройка по длине волны [13]. Ведутся разработки новых активных сред в более длинноволновых спектральных диапазонах средней ИК области [14–16].

Цель и задачи

Решались следующие основные задачи:

- Разработка схем генерации 3-мкм наносекундных лазерных импульсов в эрбиевых кристаллах с высокой пиковой (МВт) и средней (~Вт) мощностью.
- Исследование особенностей генерации ультракоротких лазерных импульсов в Fe:ZnSe лазере в режимах непрерывной генерации и пассивной синхронизации мод на основе насыщающегося поглощения.
- Исследование широкополосного усиления лазерных импульсов среднего ИК диапазона в кристалле Fe:CdSe, при импульсной оптической накачке.

Научная новизна

1. Впервые получен режим модуляции добротности в лазере Er:YLF с боковой диодной накачкой в среднем ИК диапазоне с высокой пиковой мощностью (\sim МВт);
2. Впервые продемонстрирована непрерывная генерация в кристалле Fe:ZnSe с выходной мощностью 2,1 Вт на длине волны 4,2 мкм с прямой оптической накачкой волоконным лазером Er:ZBLAN (2,8 мкм);
3. Впервые исследованы свойства усиления широкополосных лазерных импульсов в среде Fe:CdSe . Показано, что на основе данной активной среды могут быть созданы системы усиления чирпированных лазерных импульсов среднего ИК диапазона с длиной волны дальше 5 мкм;
4. Впервые получена пассивная синхронизация мод в лазерном генераторе на основе Fe:ZnSe на основе насыщающегося поглощения в графене.

Научная и практическая значимость

Диссертационная работа посвящена исследованию режимов генерации и усиления лазерных импульсов среднего ИК диапазона (4-6 мкм) в халькогенидах, легированных ионами железа, с оптической накачкой 3-мкм лазерным излучением. Исследование подходов к созданию 3-мкм лазеров с активной модуляцией добротности позволяет создавать источники накачки с управляемыми энергетическими и временными параметрами для исследования режимов усиления в халькогенидах, а также самостоятельных приложений и исследований воздействия на вещество (в частности, воду и биообъекты) в режиме резонансного поглощения, таких как лазерное жидкостное микроstructuring прозрачных материалов и биопечать, также представленные в работе.

Генерационные свойства кристалла Fe:ZnSe в режимах непрерывной генерации и синхронизации мод позволяют на его основе создавать широкополосные и узкополосные широко перестраиваемые когерентные источники затравочного излучения в мощных лазерных системах, а также спектроскопии молекул, исследования воздействия лазерного излучения на прозрачные в среднем ИК материалы, например, полупроводники. Исследование работы новых оптических компонентов в среднем ИК диапазоне, в частности акустооптических модуляторов и насыщающихся поглотителей на основе низкоразмерных углеродных структур, обогащают инструментальные возможности для разработки лазерных источников в перспективной спектральной области. Исследованные усилительные свойства среды Fe:CdSe является основой для создания мощных фемтосекундных лазерных источников в среднем ИК диапазоне (4-6 мкм), представляющих большой интерес для

передовых научных задач в области нелинейной оптики, физики предельно коротких импульсов и взаимодействия излучения с веществом.

Методология диссертационного исследования

Экспериментальный метод заключался во всестороннем анализе энергетических, спектральных и временных характеристик исследуемого излучения при помощи стандартных инструментов и методик, используемых для диагностики импульсного лазерного излучения, в том числе ультракороткой длительности, например, техника измерения длительности FROG и X-FROG. Моделирование на основе скоростных уравнений позволило качественно описать наблюдаемые эффекты в части, посвящённой 3-мкм лазерам. Для моделирования схемы компенсации тепловой линзы использовался формализм ABCD матриц. Согласование полученных экспериментальных зависимостей с теорией Франца-Нодвика по усилению в кристалле Fe:CdSe дало возможность определить плотность энергии насыщения данной лазерной среды в условиях широкополосного усиления.

Защищаемые положения

1. Насыщение усиления на переходах в штарковском ансамбле подуровней верхнего и нижнего лазерных уровней ионов эрбия ($^4I_{11/2}$ и $^4I_{13/2}$) в кристалле иттрий-литиевого фторида, легированного эрбием, приводит к последовательной (во времени в течение длительности импульса накачки) смене длины волны лазерных импульсов свободной генерации (2,67 мкм→2,71 мкм→2,81 мкм→2,85 мкм), при этом конечная длина волны генерации в этой последовательности тем больше, чем выше коэффициент отражения выходного зеркала резонатора.
2. Генерация лазерного излучения с мультимегаваттной пиковой и ваттной средней мощностью в 3-мкм диапазоне длин волн возможна в иттрий-литиевом фториде, легированном эрбием, с электрооптической модуляцией добротности на основе титанилфосфата калия.
3. Формирование высокоэнергетичных (~100 мДж) одиночных лазерных импульсов наносекундной (~100 нс) длительности в среднем ИК диапазоне (~3 мкм) является результатом оптико-механической модуляции добротности резонатора в генераторе на основе эрбиевой среды с низким коэффициентом усиления.
4. Насыщающееся поглощение в графене и широкий спектр усиления в кристалле селениде цинка, легированном ионами железа, обеспечивает генерацию цуга

субпикосекундных лазерных импульсов в режиме пассивной синхронизации мод в среднем ИК диапазоне.

5. Многопроходное широкополосное усиление в селениде кадмия, легированного ионами железа и охлаждённого до криогенных температур, происходит в условиях поддержания высокого коэффициента усиления и открывает доступ к гигаваттному уровню пиковой мощности лазерных импульсов в области 5 мкм.

Достоверность результатов подтверждается повторяемостью экспериментальных данных. Все представленные результаты прошли рецензирование при публикации в высокорейтинговых журналах, были неоднократно доложены на российских и зарубежных конференциях.

Апробация работы и публикации

Результаты исследований, вошедших в работу, опубликованы в 12 печатных работах, в том числе 8 статьях, опубликованных в журналах Scopus, WoS, RSCI, а также в Перечне изданий МГУ, а также докладывались на следующих научных конференциях: международная конференция SPIE Optics+Optoelectronics (Прага, Чехия, 2019), OSA Laser Congress – Advanced Solid-State Lasers (Вена, Австрия, 2019), 19-я международная конференция «Оптика лазеров-2020» (Санкт-Петербург, Россия, 2020), международная конференция по сверхбыстрым оптическим процессам «UltrafastLight-2021» (Москва, Россия, 2021).

Личный вклад автора

Все изложенные в работе оригинальные результаты получены автором лично, либо при его непосредственном участии. Автором осуществлялось создание и настройка экспериментальных схем, проведение экспериментов, обработка, анализ и интерпретация экспериментальных результатов, разработка и написание моделей.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, благодарностей и списка литературы. Работа изложена на 114 страницах, включает 56 рисунков, 5 таблиц и список литературы с общим числом ссылок 142.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении работы обоснована актуальность, обозначена проблематика исследования, сформулированы цель и задачи. Актуальность работы диктуется растущим интересом к когерентным источникам фемтосекундных лазерных импульсов в среднем инфракрасном диапазоне и многочисленными задачами

нелинейной оптики и фотоники в этой спектральной области, а также к 3-мкм наносекундным лазерным источникам для их накачки.

Первая глава посвящена разработке подходов генерации мощных наносекундных лазерных импульсов на длине волны около 3-мкм в твердотельных эрбиевых лазерах. В работе исследовались различные активные элементы, методы модуляции добротности и режимы генерации.

В *параграфе 1.1* даётся подробный обзор спектроскопических свойств эрбиевых сред и эффектов, ограничивающих возможность получения наносекундных лазерных импульсов с высокой энергией в лазерах на их основе. Важнейшими из них является самоограниченность лазерного перехода, наличие резонансов в энергетической структуре и соответствующая высокая вероятность апконверсионных и кросс-релаксационных процессов, высокая тепловая нагрузка на активный элемент и связанные с этим сильная тепловая линза и деполяризация излучения, которые уменьшают эффективность работы акусто- и электрооптических модуляторов, требовательных к состоянию поляризации излучения, и создают риск их повреждения.

В *параграфе 1.2* представлено исследование усилительных свойств эрбиевых сред (Er:YAG, Er:YSGG и Cr:Er:YSGG) с ламповой и диодной накачкой. Выходная энергия гигантского импульса главным образом определяется инверсией населённостей между уровнями лазерного перехода, величина которой может быть охарактеризована с помощью измерения однопроходного усиления наносекундного импульса в активных элементах. В работе было измерено усиление в лазерных кристаллах в зависимости от энергии накачки, а также исследована динамика изменения коэффициента усиления в течение импульса накачки. Наибольшее усиление, $G=2,1$ на проход, продемонстрировал кристалл Cr:Er:YSGG благодаря большему поглощению излучения накачки ионами хрома. Также показано, что большее время жизни в кристалле Er:YSGG позволяет сформировать большую запасённую энергию в активном элементе, чем в Er:YAG (1,3 мс против 0,1 мс), что выражается в большем усилении (1,8 и 1,5 соответственно). Из этих измерений сделана оценка на создаваемую инверсию в активном элементе и, соответственно, максимальную энергию, которая может быть получена в режиме модуляции добротности. При коэффициенте усиления $G=1,5$ в Er:YAG ΔN оценивается в $2,1 \times 10^{18}$ см⁻³, а при $G=2,1$ в Cr:Er:YSGG – $3,8 \times 10^{18}$ см⁻³. В этих случаях, в предположении однородно распределённой инверсии, в кристалле диаметром 4 мм длиной 90 мм запасено от 130 до 240 мДж. Сравнение усиления с ламповой и с диодной накачкой показали, что накачка высоколежащих уровней, реализуемая с помощью ламповой

накачки, играет определяющую роль в формировании инверсии в кристалле Er:YAG.

Параграф 1.3 посвящён работе новых акустооптических модуляторов на основе кристаллов KYW и KGW в среднем ИК диапазоне, обладающих высокой лучевой прочностью и высоким акустооптическим качеством на длине волны 3 мкм. Измеренная дифракционная эффективность модулятора KYW достигала 70% на длине волны 2,8 мкм при подводимой акустической мощности 30 Вт. Акустооптическая модуляция добротности на исследуемых модуляторах была реализована в генераторах на основе активных элементов Er:YAG, Cr:Er:YSGG и Cr:Yb:Ho:YSGG. В лазере Er:YAG была получена энергия импульсов 10,8 мДж с модулятором KYW, ограниченная повреждением просветляющих покрытий модулятора, и 12 мДж с модулятором на KGW с брюстеровскими гранями. Для получения большей выходной энергии использовались кристаллы Cr:Er:YSGG и Cr:Yb:Ho:YSGG с большим временем жизни. В генераторе на основе Cr:Yb:Ho:YSGG максимальная выходная энергия составила 17,5 мДж, а при большей накачке наблюдался многоимпульсный режим генерации. Наибольшая выходная энергия была достигнута с кристаллом Cr:Er:YSGG. Были получены лазерные импульсы с энергией до 29,6 мДж и длительностью 75 нс на частоте повторения 5 Гц. Для увеличения выходной энергии была создана система генератор-двухкаскадный усилитель с выходной энергией 87 мДж. Исследования показали, что режим работы модулятора добротности кардинально зависит от усиливающих свойств лазерной среды, времени жизни верхнего лазерного уровня и дифракционной эффективности модулятора. В лазере на основе среды с низким коэффициентом усиления (Er:YAG) и модулятором с высокой дифракционной эффективностью появления предимпульсов не наблюдалось. В то же время в лазерах с высоким коэффициентом усиления (Cr:Yb:Ho:YSGG и Cr:Er:YSGG) эти свойства были ограничивающим фактором. Таким образом, показано, что для эффективной работы в режиме модуляции добротности выгодно использовать активные элементы с большим временем жизни.

В *параграфе 1.4* содержится описание работы, посвящённой компенсации тепловой линзы в эрбиевых кристаллах при ламповой накачке, нацеленной на увеличения выходной пиковой и средней мощности. При ламповой накачке на частоте 10 Гц со средней мощностью до 1,5 кВт фокусное расстояние в исследуемых активных элементах достигает 10-20 см. Наиболее сильная и астигматичная линза формируется в кристалле Cr:Er:YSGG благодаря большему поглощению излучения накачки и неоднородности прокачки активного элемента, установленного в одноламповый осветитель. На основе проведённых измерений предложена схема компенсации

тепловой линзы, смоделированная с помощью формализма ABCD-матриц, на основе установки в резонатор дополнительных элементов, а именно рассеивающих линз и выпуклых зеркал. Схема с рассеивающими линзами была реализована в лазере Cr:Er:YSGG с акустооптической модуляцией добротности, что позволило более чем вдвое увеличить выходную энергию на частоте 10 Гц. При использовании линз с радиусом закругления -240 см была получена энергия 23 мДж в гауссоподобной моде на частоте 10 Гц. Однако было установлено, что создание эффективного усилителя на основе кристалла Cr:Er:YSGG на частоте 10 Гц затруднительно в связи с возникающими повреждениями кристаллов при мощной ламповой накачке. Схема компенсации тепловой линзы на основе выпуклых зеркал была реализована в генераторе на основе Er:YAG с электрооптической модуляцией добротности, благодаря чему был получен режим генерации импульсов с энергией 20 мДж на частоте 10 Гц, энергия которых была увеличена в двух однопроходных усилителях до 63 мДж с сохранением высокого качества пучка.

Параграф 1.5 посвящён исследованию генерационных свойств кристалла Er:YLF с боковой диодной накачкой. Эта среда обладает благоприятными для режима электрооптической модуляции добротности свойствами: большим временем жизни, малым отрицательным термооптическим коэффициентом показателя преломления, и естественной анизотропией, что позволяет ей эффективно запасать энергию и быть менее подверженной влиянию тепловой линзы и деполяризации. В режиме свободной генерации исследован спектральный состав генерируемого излучения в зависимости от коэффициента отражения выходного зеркала. Показано, что в течение длительности импульса накачки происходит последовательное переключение длины волны излучения от коротких длин волн к длинноволновым. Этот эффект связан с насыщением переходов между штарковски расщеплёнными подуровнями ионами эрбия. Наблюдаемый эффект качественно иллюстрируется численным моделированием, основанном на скоростных уравнениях (рисунок 1).

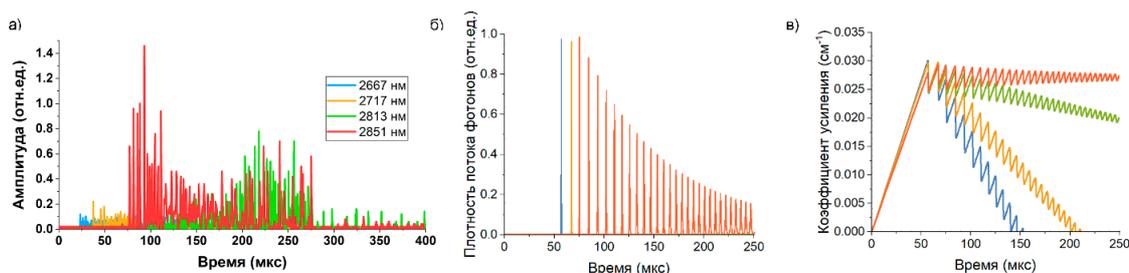


Рисунок 1. Спектральный состав импульса лазера Er:YLF в режиме свободной генерации с выходным зеркалом $R=95\%$ во времени (а), и сигнал генерации (б) и

коэффициент усиления (ν), полученные на основе скоростных уравнений

В режиме модуляции добротности на основе кристалла КТР измерена зависимость выходной энергии лазерных импульсов от частоты их следования. На частоте 20 Гц получена энергия до 82 мДж в импульсе длительностью 13 нс. В схемах с селективным резонатором на основе дифракционной решётки и треугольной призмы получена перестройка на длинах волн 2.67 мкм, 2.71 мкм, 2.81 мкм и 2.85 мкм с сохранением пиковой мощности мегаваттного уровня (рисунок 2).

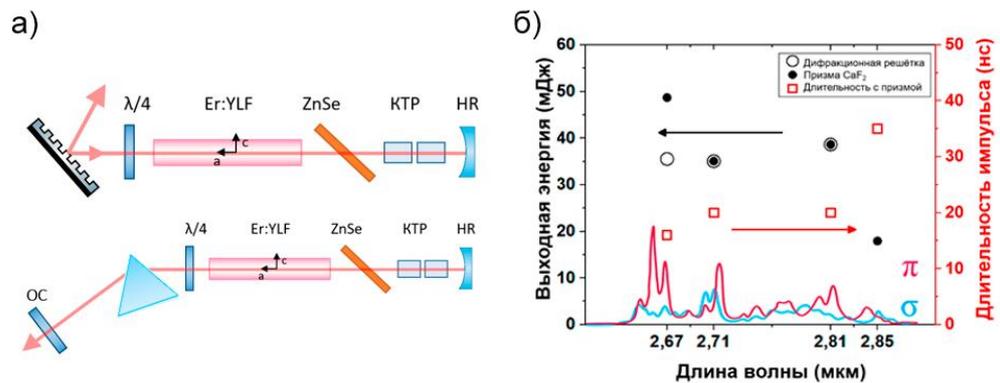


Рисунок 2. Схемы перестраиваемого наносекундного лазера Er:YLF с дифракционной решёткой и призмой CaF₂ в качестве дисперсионного элемента (а) и полученные перестроечные кривые (б). Также на графике представлены спектры сечения усиления в кристалле Er:YLF.

В параграфе 1.6 рассматривается оптико-механическая модуляция добротности на основе вращающегося зеркала в кристаллах Er:YAG и Cr:Er:YSGG. Такой метод модуляции добротности свободен от проблем, связанных с лучевой прочностью оптических материалов и не требователен к состоянию поляризации излучения. Глухое зеркало резонатора было установлено на мотор, вращающийся со скоростью до 600 Гц. В генераторе на основе кристалла Cr:Er:YSGG, была получена энергия лазерных импульсов 135 мДж, однако не в единичном наносекундном импульсе. Причиной этому является высокое усиление в активном элементе и малое время развития генерации, в результате чего такой метод модуляции реализует медленное переключение добротности резонатора. В генераторе на основе кристалла Er:YAG в идентичном резонаторе был получен режим генерации одиночных лазерных импульсов с высокой энергией. В работе приводятся зависимости выходной энергии и временной формы импульсов в зависимости от частоты вращения зеркала и энергии накачки. Показано, что большее время развития генерации лазерной среды Er:YAG по сравнению с Cr:Er:YSGG даёт возможность получать одиночный лазерный импульс с высокой выходной энергией (75 мДж), в то время как в Cr:Er:YSGG энергия одиночного импульса ограничена энергией порядка 20 мДж при частоте вращения до

~600 Гц. Формирование многоимпульсного режима иллюстрируется численной моделью на основе скоростных уравнений.

Параграф 1.7 посвящён применениям 3-мкм наносекундных лазерных импульсов в задачах лазерно-индуцированных процессов жидкостного травления прозрачных материалов и прямого переноса для задач биопечати. Оба этих процесса полагаются на интенсивные механические постэффекты, возникающие при воздействии коротких лазерных импульсов на сильно поглощающую среду, в данном случае 3-мкм наносекундных импульсов на воду и растворы на её основе. В работе исследовано распределение передачи энергии по различным каналам: генерацию ударных и акустических волн, кавитацию, – при воздействии на жёсткую границу воды. Существенная особенность по сравнению с большинством исследований в этой области заключается в том, что источником указанных эффектов является тонкий диск вблизи жёсткой границы, что выражается в несферичности фронта ударной волны и кавитационных пузырей, в соответствии с чем была адаптирована методика расчёта уравнения движения ударного фронта и времени жизни кавитационного пузыря. Измерена зависимость коэффициентов конверсии этой энергии в зависимости от плотности энергии падающей энергии до $2,0 \text{ Дж/см}^2$. При измерениях использовались оптические методы (теневая фотография) и акустические (использование оптоакустического детектора). Давление, действующее на жёсткую границу, рассчитывалось исходя из измерения динамики распространения фронта ударной волны, и составило $0,9 \text{ ГПа}$ при максимальной плотности энергии. Исследования динамики кавитации позволили измерить коэффициент пролонгации (увеличения времени жизни кавитационного пузыря при его генерации вблизи жёсткой границы) от форм-фактора генерируемого кавитационного пузыря.

Также представлены результаты работы по микроструктурированию сапфира методом лазерно-индуцированного жидкостного травления (ЛИЖТ) в воде и щелочном растворе при воздействии микросекундных и наносекундных 3-мкм лазерных импульсов. Под воздействием микросекундных импульсов свободной генерации с энергией 10 мДж наблюдалось образование кратеров диаметром до 39 мкм при травлении в щелочном растворе, в то время как в воде травления не происходило. При воздействии наносекундных лазерных импульсов с энергией до 1 мДж травление происходило и в воде, и в щелочном растворе, однако со значительно меньшей скоростью. Увеличение энергии сопровождалось образованием сколов и трещин в канале, обусловленных интенсивными механическими постэффектами при воздействии коротких лазерных импульсов на воду.

Продемонстрировано применение 3-мкм наносекундных лазерных импульсов в процессе лазерно-индуцированного прямого переноса клеток в интересах биопечати. Потенциально метод позволяет формировать трёхмерные объекты, состоящие из живых клеток, в том числе биологические ткани. Благодаря высокому поглощению излучения в биочернилах отсутствует необходимость использования дополнительных поглощающих покрытий. С помощью наносекундных импульсов на длине волны 2,94 мкм был осуществлён перенос капель биочернил, содержащих микроорганизмы, с прозрачной донорной подложки на акцепторную в управляемом режиме.

Продемонстрированные применения 3-мкм лазерных импульсов показывают практическую значимость разработанных источников в научных и технологических приложениях.

Во второй главе описано исследование свойств непрерывной генерации и синхронизации мод в лазере на основе монокристалла Fe:ZnSe.

В *параграфе 2.1* на основе литературных данных рассматриваются спектроскопические и кинетические свойства среды Fe:ZnSe, важнейшими из которых являются спектры поглощения и усиления и зависимость времени жизни верхнего лазерного уровня от температуры.

Параграф 2.2 описывает непрерывный волоконный лазер на основе Er:ZBLAN, использовавшийся для накачки кристалла Fe:ZnSe и генерирующий излучения на длине волны 2,8 мкм с выходной мощностью до 10 Вт. Рассмотрены две конфигурации схемы лазера, приведены характеристики выходного излучения.

Параграф 2.3 описывает свойства непрерывной генерации в монокристаллических активных элементах Fe:ZnSe при криогенном охлаждении с непрерывной накачкой. Представлена зависимость выходной мощности от поглощённой мощности накачки для нескольких кристаллов с различным уровнем легирования и нескольких выходных зеркал. Получена непрерывная генерация с выходной мощностью 2,1 Вт на длине волны 4,1 мкм с дифференциальным к.п.д. 59% по поглощённой мощности, что близко к квантовому дефекту. Обнаружено, что спектр генерации смещается в длинноволновую область при увеличении выходной мощности, что связано с локальным нагревом кристалла в области накачки. Исследованы температурные зависимости выходной мощности, поглощения излучения накачки активным элементом, пороговой мощности накачки, и центральной длины волны генерации в неселективном резонаторе. Получены перестроечные кривые при различной температуре активного элемента в резонаторе с

дифракционной решёткой в качестве дисперсионного элемента в Литтроу конфигурации. Получено излучение в диапазоне от 3,8 мкм до 5,1 мкм, и показано, что с ростом температуры центр спектра смещается в красную область. При температуре 92 К ширина спектра по полувысоте составляет 720 нм, а при температуре 181 К полуширина равна 813 нм. Увеличение ширины происходит за счёт активации фононных переходов в кристалле Fe:ZnSe.

Параграф 2.4 посвящён режиму синхронизации мод в лазере Fe:ZnSe на основе насыщающегося поглощения в графене. Был получен цуг импульсов на частоте 100 МГц с выходной средней мощностью до 415 мВт. Наиболее стабильный режим генерации наблюдался при температуре кристалла на уровне 175 К с центром приблизительно на длине волны 4410 нм. Измерение длительности с помощью схемы FROG на основе генерации второй гармоники в кристалле GaSe показало длительность около 640 фс (рисунок 3) с шириной спектра 46 нм (FWHM). Также описана проведённая оптимизация дисперсии резонатора с помощью установки в резонатор пластинок из CaF₂, обладающих отрицательной дисперсией в среднем ИК диапазоне. Кроме этого, в эксперименте наблюдался режим, близкий к режиму синхронизации мод на керровской нелинейности, когда генерация представляла собой непрерывную генерацию с модуляцией амплитуды с периодом 10 нс, соответствующим длине резонатора.

Таким образом, исследованные режимы непрерывной генерации в лазере Fe:ZnSe позволили получить в нём режим синхронизации мод с фемтосекундной длительностью импульсов и могут стать основой для разработки таких источников в перспективном спектральном диапазоне.

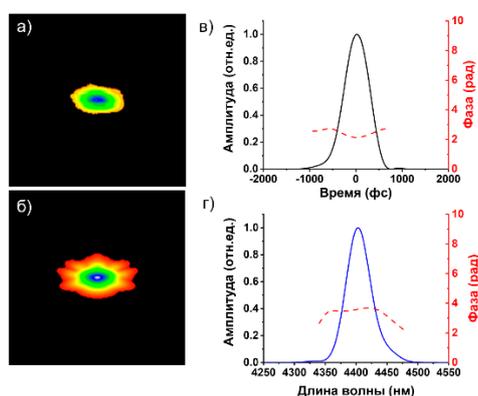


Рисунок 3. Спектрограммы лазерных импульсов лазера Fe:ZnSe с пассивной синхронизацией мод на графене, измеренная (а) и восстановленная (б) в схеме FROG. (в) и (г) - восстановленные огибающая и спектр импульса, соответственно. Длительность импульса составила 640 фс, а ширина спектра 46 нм.

В третьей главе представлены результаты по исследованию свойств усиления

широкополосных лазерных импульсов в активной среде Fe: CdSe.

Параграф 3.1 рассматривает общие вопросы, связанные с усилением широкополосных лазерных в активных средах. Обсуждается теория Франца-Нодвика и условия её применимости для сред с высоким коэффициентом усиления, эффекты обужения и смещения спектра, связанные с зависимостью сечения усиления от длины волны, различные схемы многопроходного усиления.

В *параграфе 3.2* содержатся результаты исследования однопроходного усиления широкополосных импульсов в кристалле Fe: CdSe. Активный элемент охлаждался жидким азотом для увеличения времени жизни и накачивался наносекундным лазером Er: YAG (2940 нм, 40 мДж, 100 нс). Источником инжекции служил параметрический усилитель на основе кристаллов LGS с накачкой хром-форстеритовым лазером, перестраиваемый в диапазоне 3,7-6,5 мкм. Экспериментально установленная оптимальная плотность энергии накачки составила около 0,7-1,0 Дж/см². Чтобы выявить спектральные ограничения широкополосного усиления в криогенно охлаждённом кристалле Fe: CdSe, было измерено интегральное усиление и преобразование широкополосного импульса во всей полосе усиления Fe: CdSe (рисунок 4). Максимальное усиление с коэффициентом $g_0=3.1 \text{ см}^{-1}$ достигается вблизи длины волны 4,8 мкм и значительно уменьшается на длинах волн около 5,5-6,0 мкм.

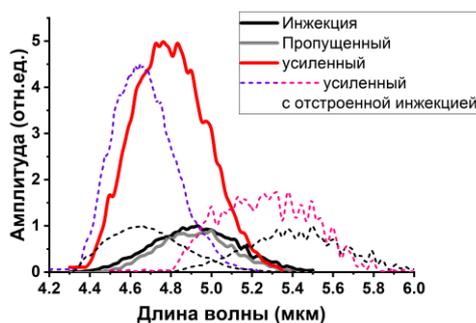


Рисунок 4. Преобразование спектра во время усиления во всей спектральной полосе усиления Fe: CdSe.

В *параграфе 3.3* описаны результаты исследования многопроходного усиления в кристалле Fe: CdSe широкополосных чирпированных лазерных импульсов. В схеме многопроходного усиления в трёхзеркальной схеме была получена энергия до 1,1 мДж на пяти проходах через усилитель. Импульс инжекции с центральной длиной волны 5,0 мкм был чирпирован в твердотельном стретчере до субпикосекундной длительности во избежание нелинейных эффектов при усилении. Показано, что спектр выходного излучения обужается до 320 нм за счёт слабого усиления на длинах

волн более 5,2 мкм, и его центр смещается с 5,0 мкм к 4,8 мкм. Также показано, что усиление инъекции на центральной длине волны 5.5 мкм ведёт к сильному смещению спектра в коротковолновую область и обужению до 221 нм.

Измерение энергии импульса на каждом проходе и согласование с моделью Франца-Нодвика позволило определить плотность энергии насыщения кристалла Fe:CdSe, которая составила 13 мДж/см² (рисунок 5). Компрессия импульса после многопроходного усиления была реализована с использованием призмного компрессора. Измерение в схеме XFROG на основе генерации суммарной частоты с импульсом хром-форстеритового лазера показало длительность импульса 134 фс.

Таким образом, исследованные свойства широкополосного усиления в кристалле Fe:CdSe с оптической накачкой 3-мкм лазером позволяют создавать на его основе системы усиления чирпированных импульсов с гигаваттным уровнем пиковой мощности на выходе для получения сверхкоротких лазерных импульсов в 5-мкм диапазоне длин волн.

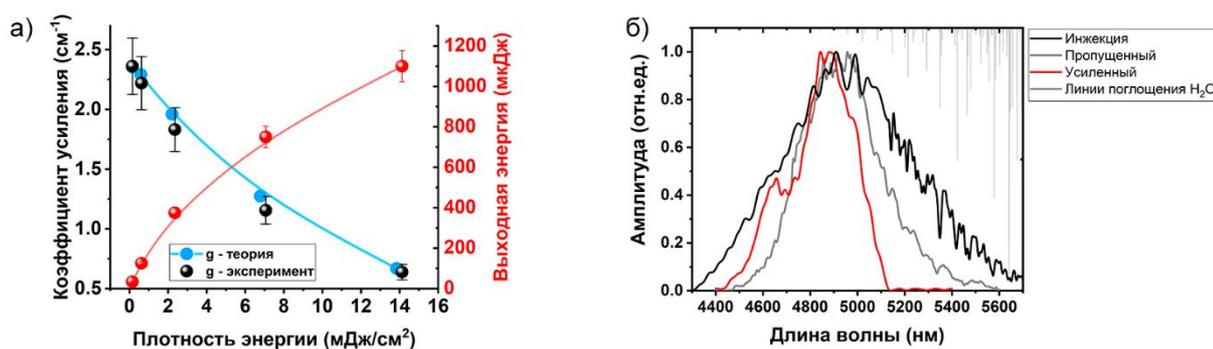


Рисунок 5. (а) Экспериментально измеренный (черные точки), численно рассчитанный (синие точки) коэффициент усиления, и энергия лазерного импульса на каждом проходе усилителя в зависимости от плотности энергии инъекции; (б) спектры импульса инъекции на выходе из ОПУ, после прохождения через кристалл Fe:CdSe, и после усиления, измеренные с помощью сканирующего монохроматора. Спектр обужается до 320 нм по полувысоте и смещается в коротковолновую область из-за рассогласования максимумов сечения усиления активного элемента и центральной длиной волны спектра импульса инъекции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в рамках настоящей диссертационной работы, можно сформулировать следующим образом:

1. Впервые продемонстрировано использование акустооптических модуляторов на основе кристаллов KYW и KGW в 3-мкм твердотельных лазерах. В лазере Cr:Er:YSGG получена генерация импульсов с выходной энергией 29 мДж на частоте 5 Гц и длительностью 75 нс. На основе него создана система генератор-двухкаскадный

усилитель с выходной энергией 87 мДж. Таким образом исследованные АО модуляторы могут эффективно использоваться в наносекундных 3-мкм лазерах.

2. Показано, что в лазере Er:YLF с мощной боковой диодной накачкой в режиме свободной генерации с накачкой до 3 Дж в импульсе длительностью 250 мкс происходит последовательная смена длин волны генерации. Также установлено, что использование выходного зеркала с большим коэффициентом отражения позволяет продлить спектр генерации в длинноволновую область (до 2,85 мкм)
3. Впервые реализован режим электрооптической модуляции добротности в кристалле Er:YLF с мегаваттным уровнем пиковой мощности. Получена генерация импульсов с энергией 82 мДж на длине волны 2,67 мкм и длительностью 13 нс с помощью модулятора добротности на кристалле КТР.
4. Показано, что доступ к высокой энергии 3-мкм наносекундных лазерных импульсов может быть обеспечен с помощью метода модуляции добротности на основе вращающегося зеркала, свободного от требования на состояние поляризации излучения внутри резонатора, при достаточно быстром переключении добротности.
5. Впервые продемонстрирована непрерывная генерация в кристалле Fe:ZnSe с прямой оптической накачкой с помощью волоконного лазера Er:ZBLAN. Выходная мощность разработанного источника на основе монокристаллического активного элемента Fe:ZnSe составила 2,1 Вт с дифференциальным КПД 59% по поглощённой мощности при криогенном охлаждении до температуры жидкого азота. Исследованы зависимости основных характеристик лазера от температуры активного элемента.
6. Впервые продемонстрирована синхронизация мод в лазере Fe:ZnSe. Пассивная синхронизация мод была основана на насыщающемся поглощении в графене. В результате был получен цуг импульсов на частоте 100 МГц длительностью 640 фс со средней мощностью 415 мВт.
7. Впервые исследованы свойства усиления широкополосных лазерных импульсов среднего ИК диапазона (4-6 мкм) в монокристалле Fe:CdSe. По измерениям однопроходного усиления ($g_{0max}=3,1 \text{ см}^{-1}$ при $F_{pump}=1 \text{ Дж/см}^2$) при криогенном охлаждении активного элемента ($T=77 \text{ К}$) определены пределы эффективного усиления (с 4,3 мкм до 5,3 мкм). В многопроходной схеме усиления получена энергия стретчированного импульса инжекции 1,1 мДж с шириной спектра 320 нм. Энергия насыщения, определённая из приближения Франца-Нодвика, составила 13 мДж/см^2 . Усиление инжекции на центральной длине волны 5,5 мкм ведёт к сильному смещению спектра в коротковолновую область и обужению до 221 нм.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертационной работы отражены в следующих работах. Научные статьи, опубликованные в журналах Scopus, WoS, RSCI, а также в Перечне изданий МГУ:

1. **Pushkin, A. V.**, Mazur, M. M., Sirotkin, A. A., Firsov, V. V., & Potemkin, F. V. Powerful 3- μm lasers acousto-optically Q-switched with KYW and KGW crystals //Optics Letters. – 2019. – Т. 44. – №. 19. – С. 4837-4840, IF=3.46, вклад соискателя 0,4.
2. **Pushkin, A. V.**, Bychkov, A. S., Karabutov, A. A., & Potemkin, F. V. Cavitation and shock waves emission on the rigid boundary of water under mid-IR nanosecond laser pulse excitation //Laser Physics Letters. – 2018. – Т. 15. – №. 6. – С. 065401, IF=1.704, вклад соискателя 0,4.
3. **Пушкин А. В.**, Словинский И. А., Потемкин Ф. В. Мегаваттный импульсно-периодический эрбиевый 3-мкм лазер с компенсацией сильной тепловой линзы //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2020. – Т. 112. – №. 8. – С. 508-515, IF=1.4, вклад соискателя 0,4.
4. **Pushkin, A. V.**, Slovinsky, I. A., Shakirov, A. A., Shavelev, A. A., & Potemkin, F. V. Diode-side-pumped watt-level high-energy Q-switched mid-IR Er:YLF laser //Optics Letters. – 2021. – Т. 46. – №. 21. – С. 5465-5468, IF=3.46, вклад соискателя 0,4.
5. **Пушкин А.В.**, Потёмкин Ф.В. Особенности получения мощных (до 1 МВт, 100 мДж) 3-мкм наносекундных лазерных импульсов в эрбиевых кристаллах в частотном режиме //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2022. – Т. 116. – №. 8. – С. 508, IF=1.4, вклад соискателя 0,4.
6. **A.V. Pushkin**, E. A. Migal, H. Uehara, K. Goya, S. Tokita, M. P. Frolov, Yu V. Korostelin, V. I. Kozlovsky, Ya. K. Skasyrsky, and F. V. Potemkin. Compact, highly efficient, 2.1-W continuous-wave mid-infrared Fe: ZnSe coherent source, pumped by an Er: ZBLAN fiber laser //Optics Letters. – 2018. – Т. 43. – №. 24. – С. 5941-5944, IF=3.46, вклад соискателя 0,4.
7. **A.V. Pushkin**, E. A. Migal, S. Tokita, Yu. V. Korostelin, and F. V. Potemkin. Femtosecond graphene mode-locked Fe: ZnSe laser at 4.4 μm //Optics letters. – 2020. – Т. 45. – №. 3. – С. 738-741, IF=3.46, вклад соискателя 0,4.
8. **A. Pushkin**, and F. Potemkin High-gain broadband laser amplification of mid-IR pulses in Fe: CdSe crystal at 5 mm with mJ output energy// Optics Letters. -2022. – Т. 47. - № 22. – С. 5762-5765, IF=3.46, вклад соискателя 0,4.

Иные научные труды соискателя:

1. **Pushkin, A. V.**, Migal, E. A., Uehara, H., Goya, K., Tokita, S., Frolov, M. P., ... &

- Potemkin, F. V. Compact CW mid-IR Fe: ZnSe coherent source pumped by Er: ZBLAN fiber laser //High-Power, High-Energy, and High-Intensity Laser Technology IV. – SPIE, 2019. – Т. 11033. – С. 46-53.
2. **Pushkin, A. V.**, Migal, E. A., Uehara, H., Goya, K., Tokita, S., Frolov, M. P., ... & Potemkin, F. V. Directly fiber-pumped mid-IR Fe: ZnSe CW laser tunable from 3.8 up to 5.1 μm //Advanced Solid State Lasers. – Optica Publishing Group, 2019. – С. ATu4A. 6.
 3. **Pushkin, A.**, Mazur, M., Sirotkin, A., Gordienko, V., & Potemkin, F.. Novel acousto-optical KYW and KGW Q-switches for powerful 3- μm lasers //Advanced Solid State Lasers. – Optical Society of America, 2019. – С. AM3A. 6.
 4. **Pushkin, A. V.**, Migal, E. A., Tokita, S., Korostelin, Y. V., & Potemkin, F. V. Ultrafast mid-IR Fe: ZnSe laser //2020 International Conference Laser Optics (ICLO). – IEEE, 2020. – С. 1-1

Основная цитируемая литература:

1. Mirov S. et al. Frontiers of mid-IR lasers based on transition metal doped chalcogenides // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2018. P. 1–1.
2. Adams J.J. et al. 4.0-4.5- μm lasing of Fe:ZnSe below 180 K, a new mid-infrared laser material. // Opt. Lett. 1999. Vol. 24, № 23. P. 1720–1722.
3. Vodopyanov K.L. et al. Laser-induced generation of subnanosecond sound pulses in liquids // Sov. Phys. JETP. 1986. Vol. 64, № July 1986. P. 67–70.
4. Rines D.M., Rines G.A., Moulton P.F. CdSe OPO Pumped by a 2.79 μm Cr,Er:YSGG Laser // Advanced Solid State Lasers, B. Chai and S. Payne, eds., Vol. 24 of OSA Proceedings Series (Optical Society of America). 1995. P. paper PO7.
5. Багдасаров Х.С. и др. Стойкость кристаллов YAG и LiNbO₃ к излучению YAG:Er³⁺-лазера ($\lambda=2,94$ мкм) в режиме гигантских импульсов // Квантовая электроника. 1980. Т. 7, № 6. С. 1351–1353.
6. Багдасаров Х.С. и др. Гигантские импульсы лазерного излучения кристаллов иттрий-эрбий- алюминиевого граната // Квант. электрон. 1980. Т. 7, № 9. С. 1959–1965.
7. Жариков Е.В. и др. Индуцированное излучение ионов Er³⁺ в кристаллах иттрий-алюминиевого граната на длине волны 2,94 мкм // Квантовая электроника. 1974. Т. 1, № 8. С. 1867–1869.
8. Pollnau M., Jackson S.D. Erbium 3 μm fiber lasers // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2001. Vol. 7, № 1. P. 30–40.
9. Skorczakowski M. et al. Mid-infrared Q-switched Er:YAG laser for medical

- applications // *Laser Phys. Lett.* 2010. Vol. 7, № 7. P. 498–504.
10. Martyshkin D. V. et al. High Power (9.2 W) CW 4.15 μm Fe:ZnSe laser // *Conf. Lasers Electro-Optics*. 2017. P. STh1L.6.
 11. Frolov M.P. et al. High-energy thermoelectrically cooled Fe:ZnSe laser tunable over 3.75–4.82 μm // *Opt. Lett.* / ed. Hoffman H.J., Shori R.K., Hodgson N. 2018. Vol. 43, № 3. P. 623.
 12. Migal E. et al. 3.5-mJ 150-fs Fe:ZnSe hybrid mid-IR femtosecond laser at 4.4 μm for driving extreme nonlinear optics // *Opt. Lett.* 2019. Vol. 44, № 10. P. 2550.
 13. Акимов В.А. и др. Эффективный ИК лазер на кристалле ZnSe: Fe с плавной перестройкой в спектральном диапазоне 3.77 - 4.40 мкм // *Квантовая электроника*. 2004. Т. 34, № 10. С. 912–914.
 14. Frolov M.P. et al. Fe²⁺-doped CdSe single crystal: growth, spectroscopic and laser properties, potential use as a 6 μm broadband amplifier // *Laser Phys. Lett.* 2017. Vol. 14, № 2. P. 025001.
 15. Korostelin Y.V., Kozlovsky V.I. Vapour growth of II–VI solid solution single crystals by contact-free technique // *J. Alloys Compd.* 2004. Vol. 371, № 1–2. P. 25–30.
 16. Frolov M.P. et al. Tunable in the range of 4.5-6.8 μm room temperature single-crystal Fe:CdTe laser pumped by Fe:ZnSe laser // *Opt. Express*. 2020. Vol. 28, № 12. P. 17449.