

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Юшков Константин Борисович

**ДИСПЕРСИОННОЕ АКУСТООПТИЧЕСКОЕ
УПРАВЛЕНИЕ ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ
ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ**

1.3.4. Радиоп физика

1.3.6. Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Москва, 2025

Работа выполнена в научно-технологическом и учебном центре акустооптики Национального исследовательского технологического университета «МИСИС».

Официальные оппоненты: **Масалов Анатолий Викторович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
высококвалифицированный главный научный сотрудник
лаборатории комбинационного рассеяния света
оптического отдела имени Г.С. Ландсберга Физического
института имени П.Н. Лебедева Российской академии
наук (ФИАН)

Потёмкин Фёдор Викторович,
доктор физико-математических наук, доцент,
профессор кафедры общей физики и волновых процессов
физического факультета Московского государственного
университета имени М.В. Ломоносова

Шандаров Станислав Михайлович,
доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник научно-образовательного
центра «Нелинейная оптика, нанофотоника и лазерные
технологии» Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники

Защита диссертации состоится «10» июня 2025 года в 15 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета МГУ.013.6 на физическом факультете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, аудитория 4-28.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций Научной библиотеки Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (119192, г. Москва, Ломоносовский пр-т, д. 27) и в сети Интернет: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3336>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2025 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета МГУ.013.6
доктор физико-математических наук, доцент
kosareva@physics.msu.ru

О.Г. Косарева

Общая характеристика работы

Область исследования

Данная диссертационная работа относится к области прикладной оптики и лазерной физики. В настоящей работе рассмотрены вопросы акустооптического (АО) взаимодействия ультракоротких лазерных импульсов.

Оптика ультракоротких импульсов (УКИ) и физика сверхбыстрых процессов, вызванных ими, являются одним из наиболее динамично развивающихся направлений фотоники [1]. Принцип формирования сверхмощных УКИ удостоен Нобелевской премии по физике (2018 г.) Д. Стрикленд и Ж. Муру «за метод генерации высокоинтенсивных ультракоротких оптических импульсов». Применения УКИ в различных областях науки были отмечены тремя Нобелевскими премиями: А. Зевейла по химии (1999 г.) «за исследование переходных состояний, возникающих во время химических реакций, с использованием фемтосекундной техники», Дж. Холла и Т. Хенша по физике (2005 г.) «за вклад в развитие лазерной точной спектроскопии, включая технику прецизионного расчёта светового сдвига в оптических стандартах частоты (оптических гребёнок)», П. Агостини, Ф. Крауса и А. Л'Юилье по физике (2023 г.) «за экспериментальные методы, генерирующие аттосекундные импульсы света для изучения динамики электронов в веществе».

Феномен АО-взаимодействия, то есть дифракция света на ультразвуковых волнах находит широкое применение в различных устройствах управления лазерным излучением, в том числе фемтосекундными УКИ [2]. Традиционными АО-устройствами на основе объёмных акустических волн (ОАВ) являются модуляторы, дефлекторы, перестраиваемые фильтры, на основе которых создаются такие приборы, как АО-процессоры, интегральные и видео-спектрометры, прецизионные сканирующие системы [2–4]. В последнее десятилетие получил широкое распространение новый тип АО-устройств — акустооптические дисперсионные линии задержки (АОДЛЗ), предназначенные для управления спектральными и фазовыми характеристиками УКИ [5–7]. В англоязычной литературе распространён синонимичный термин «АО программируемый дисперсионный фильтр» (*англ.* acousto-optic programmable dispersive filter, AOPDF) [6, 8].

Актуальность темы исследования

УКИ генерируются лазерами с синхронизацией мод — фемтосекундными задающими генераторами (ФЗГ), — излучение которых является импульсно-периодическим. Современные ФЗГ способны генерировать импульсы когерентного излучения длительностью несколько фемтосекунд — единицы периодов колебаний электромагнитной волны. Сверхмощные лазерные системы позволяют достичь в импульсе пиковой мощности несколько петаватт в одном пучке. Можно отметить такие приложения фемтосекундных лазерных систем, как исследования химических процессов и структуры молекул и наночастиц; сверхточные оптические гребенки для калибровки спектрометров в прецизионной астро-

физике; многофотонная микроскопия; фундаментальные исследования физических процессов в сверхсильных электромагнитных полях; генерация терагерцового излучения и аттосекундных рентгеновских импульсов; в ускорительной технике: драйверы фотоинжекторов и лазерные ускорители электронов. Необходимо также отметить широкое практическое применение фемтосекундных лазеров в обработке материалов (лазерная абляция) и в медицине в задачах офтальмологии и хирургии.

Одним из особых классов импульсных лазеров являются многоканальные системы сверхвысокой энергии для инерциального лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) [9]. В настоящее время в мире существует и строится несколько многоканальных мощных установок мегаджоульного уровня энергии, которые имеют порядка 200 параллельных каналов с усилителями наносекундных лазерных импульсов на Nd-стекле. Альтернативная концепция ЛТС на основе быстрого зажигания мишени субпикосекундными импульсами с суммарной мощностью несколько петаватт реализуется на установке Laser for Fast Ignition Experiments (LFEX) в Институте лазерной инженерии (Осака, Япония). В комплексах ЛТС также используются субпикосекундные каналы петаваттного уровня пиковой мощности для диагностики динамики процессов в термоядерной мишени, являясь источником короткоимпульсного рентгеновского излучения. При реализации ЛТС помимо диагностики динамики обжатия мишени стоит также задача временного профилирования силовых импульсов [10]. Разработанный для установок ЛТС National Ignition Facility (Ливермор, США) и Laser MegaJoule (Бордо, Франция) принцип прямой электрооптической модуляции позволяет достичь частот порядка 10 ГГц. Более высокочастотная модуляция возможна на основе применения чирпированных, то есть линейно частотно-модулированных (ЛЧМ) широкополосных импульсов и модуляции в спектральной области [11].

Для усиления сверхмощных ультракоротких лазерных импульсов используются две основные схемы: квантовое усиление чирпированных импульсов (*англ.* chirped pulse amplification, CPA) [12] и параметрическое усиление чирпированных импульсов (*англ.* optical parametric chirped pulse amplification, OPCPA) [13]. В обеих схемах находят применение адаптивные устройства управления фазой и спектром импульсов, поскольку при усилении широкополосных импульсов существенную роль играет как спектральная неоднородность усиления, так и фазовый набег в оптических элементах усилителя [14]. По этой причине архитектуру современной фемтосекундной лазерной системы практически нельзя представить без электронных устройств управления параметрами импульсов. Изложение общих принципов управления формой УКИ можно найти в обзорах [15, 16]. Наиболее распространены АО и жидкокристаллические (ЖК) системы. АОДЛЗ непосредственно осуществляют воздействие на УКИ, изменяя его спектр и, соответственно, временную форму. АО и ЖК пространственные модуляторы требуют применения Фурье-преобразующей системы с дифракционными решетками. Электронно-управляемые дисперсионные линии задержки позволяют решать весь круг задач управления формой УКИ: осуществлять компенсацию дисперсий, модифицировать спектр излучения, создавать реплики импульсов, то есть преобразовывать одиночный УКИ в последовательность импульсов с заданными параметра-

ми, формировать импульсы специальной формы. Первая АОДЛЗ в России была разработана и создана в НИТУ МИСИС для петаваттной ОРСРА-системы Petawatt parametric Laser (PEARL) в Институте прикладной физики имени А.В. Гапонова-Грехова РАН (Нижний Новгород) для решения задачи согласования дисперсионных характеристик стретчера и компрессора УКИ, работающих на различных длинах волн [7].

Рекордные длительности лазерных импульсов, полученные в лазерных системах с синхронизацией мод ближнего инфракрасного (ИК) диапазона, составляют величину порядка $4 \dots 5$ фс (менее 2 периодов колебаний электромагнитной волны). Дальнейшее сокращение длительности импульсов возможно переходом к более высокочастотным гармоникам [17]. Одним из перспективных направлений развития лазеров УКИ, требующих адаптивного управления фазой электромагнитного излучения, является когерентный синтез световых полей. Задачами когерентного синтеза являются как повышение пиковой интенсивности излучения за счёт пространственного сложения электромагнитных полей, так и формирование временной формы УКИ. Другим актуальным направлением исследований является увеличение длины волны излучения посредством оптического параметрического взаимодействия или прямой генерации УКИ в среднем ИК-диапазоне. Фемтосекундное лазерное излучение среднего ИК-диапазона широко используется в молекулярной спектроскопии, и АО-методы управления фактически являются единственными в данном спектральном диапазоне [18, 19].

Широкий круг упомянутых выше практических применений фемтосекундных лазеров в науке и технике и потребность в эффективных методах управления УКИ, среди которых АО-метод — один из основных, определяют **актуальность работы**.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является создание универсального подхода к АО-управлению широкополосным когерентным оптическим излучением — ультракороткими лазерными импульсами фемтосекундного и пикосекундного диапазона длительностей. При этом были решены следующие задачи:

- 1) теоретически и экспериментально исследовать фундаментальные эффекты при АО-дифракции ультракоротких лазерных импульсов;
- 2) разработать универсальный алгоритм и основанное на нём программное обеспечение (ПО) для вычисления формы ультразвуковых волновых пакетов, обеспечивающий произвольную амплитудную и фазовую спектральную модуляцию широкополосного оптического излучения;
- 3) создать специализированные критерии и методы калибровки и измерения спектрального разрешения и эффективности АО-дифракции фемтосекундного лазерного излучения в широкополосных АО-устройствах;
- 4) экспериментально исследовать методы синтеза ультракоротких лазерных импульсов специальной формы, в том числе программируемых импульсных последовательностей,

основанных на АО-управлении параметрами излучения в спектральной области;

5) развить и обобщить методы АО-управления фемтосекундным лазерным излучением на системы спектральной обработки некогерентного излучения, гиперспектрального анализа изображений и пространственной фильтрации лазерных пучков.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются АО-устройства для управления широкополосным и в том числе лазерным фемтосекундным излучением. Предметом исследования являются методы формирования произвольных функций пропускания АО-устройств в частотном и угловом спектре излучения электромагнитных волн.

Методология и методы исследования

Выполненные в настоящей диссертации исследования основаны на экспериментальных и теоретических методах классической физической оптики.

Теоретические исследования АО-дифракции УКИ основаны на решении волновых уравнений в периодически-неоднородной среде в приближении медленно меняющихся амплитуд (ММА). Для численного моделирования были использованы классические методы дискретной математики, такие как метод конечных разностей и дискретное преобразование Фурье (ДПФ), реализованные на высокоуровневом языке программирования MATLAB. При разработке оригинальных алгоритмов управления АОДЛЗ также использованы методы дискретной математики, в частности ДПФ, а также фундаментальные теоремы теории информации. В задачах численной оптимизации использованы стохастические методы: генетический алгоритм дифференциальной эволюции и метод Монте-Карло. При анализе двухмерных передаточных функций АО-фильтров использованы методы дифференциальной геометрии и тензорной алгебры и методы Фурье-оптики в приближении дифракции Френеля. Прикладное ПО разработано на языке MATLAB и в среде графического программирования LabVIEW.

В экспериментальных исследованиях использованы оригинальные АО-устройства, разработанные и изготовленные в НИТУ МИСИС; АО-материалом, использованном в данных устройствах, является монокристаллический парателлуриит (TeO_2). Исследованные режимы АО-дифракции относятся к типу анизотропной дифракции и соответствуют приближению дифракции Брэгга. В частности, исследованы особые типы анизотропной дифракции: квазиколлинеарная и широкоапертурная дифракция. В экспериментальной части диссертации разработаны методики калибровки для АОДЛЗ, работающих в режиме широкополосной дифракции УКИ: определение оптимальной мощности ультразвука, частотная калибровка, измерение спектрального разрешения методом ЧКХ. Также были исследованы следующие физические эффекты: интерференция двух пучков УКИ при АО-взаимодействии, спектральная модуляция лазерного излучения в регенеративных оптиче-

ских усилителях, формирование реплик УКИ методом фазово-амплитудной модуляции в спектральной области, адаптивная спектральная коррекция и фильтрация некогерентного оптического излучения, пространственная фильтрация лазерных пучков.

Научная новизна работы

Все выполненные работы и полученные результаты находятся на современном мировом уровне и являются новыми и оригинальными на момент их публикации.

1) Впервые проанализированы условия существования квазиколлинеарной геометрии анизотропного АО-взаимодействия в двухосных кристаллах; продемонстрировано существование двух различных геометрий широкоапертурной квазиколлинеарной дифракции в плоскости симметрии моноклинных кристаллов.

2) Продемонстрирован новый эффект — управляемая интерференция при неколлинеарном АО-взаимодействии двух фемтосекундных лазерных пучков: при фазовом синхронизме на частоте ультразвука, совпадающей с частотой следования лазерных импульсов, и амплитуде ультразвука, соответствующей эффективности дифракции 50 %, наблюдается интерференция 0-го и 1-го порядков дифракции, причём амплитуда УКИ в каждом из двух выходных лазерных пучков постоянна и зависит от фазы акустического сигнала.

3) Аналитически выведены нестационарные уравнения связанных волн, описывающие АО-взаимодействие электромагнитных импульсов в прозрачной среде с дисперсией. Получены численные решения уравнений, описывающие явления снижения эффективности дифракции, искажения огибающей УКИ и изменения групповой скорости взаимодействующих волн, обусловленные наличием групповой расстройки при анизотропной АО-дифракции.

4) Впервые показано, что при вычислении формы высокочастотных (ВЧ) ультразвуковых волновых пакетов на основе преобразования Френеля оптимальная эффективная длительность ультразвукового волнового пакета в АО-фильтре, позволяющая прецизионно управлять спектром дифрагировавшего излучения, равняется $1/2$ полной временной апертуры фильтра. Применение волновых пакетов оптимальной длительности позволяет устранить искажения и уменьшение контраста, возникающие при произвольной спектральной модуляции широкополосного излучения АО-фильтром.

5) Впервые предложен новый метод рандомизированных спектрально-независимых гребёнок для программируемого формирования реплик фемтосекундных лазерных импульсов, использующий модуляцию спектральной фазы излучения АО-фильтром и позволяющий существенно понизить амплитуду возникающих при этом паразитных максимумов на огибающей импульса. Экспериментально продемонстрировано восьмикратное снижение интенсивности паразитных пиков при генерации реплик фемтосекундного лазерного импульса в диапазоне задержек ± 3.6 пс.

6) Экспериментально продемонстрирована программируемая модуляция chirпированных лазерных импульсов с временем нарастания и спада фронтов менее 5 пс (полоса

70 ГГц) и формирование произвольных бинарных импульсных последовательностей. АО-модуляция позволяет сохранять форму импульса с произвольной амплитудной модуляцией при последующем усилении лазерного излучения в режиме насыщения в регенеративном усилителе (РУ).

7) Впервые экспериментально продемонстрирована адаптивная спектральная коррекция широкополосного некогерентного оптического излучения квазиколлинеарным АО-фильтром в полосе длин волн 550 . . . 700 нм. Получение излучения с постоянной спектральной интенсивностью в заданном спектральном диапазоне осуществляется АО-фильтром за одну итерацию алгоритма.

8) Впервые показано, что применение конфокальной оптической системы с неколлинеарным акустооптическим перестраиваемым фильтром (АОПФ) для гиперспектрального анализа изображений позволяет управлять шириной аппаратной функции АОПФ, используя дисперсионный алгоритм синтеза ВЧ-сигналов, и реализовать калибровку гиперспектральных данных по интенсивности на этапе их первичной регистрации.

9) Экспериментально реализован новый метод динамически управляемого формирования кольцевых лазерных полей и аксиально симметричных распределений интенсивности на основе неколлинеарного АОПФ с широкополосным управлением, используемого в качестве синтезируемого фильтра пространственных частот лазерного пучка.

Практическая значимость

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что разработанные подходы к управлению фемтосекундным лазерным и широкополосным некогерентным оптическим излучением позволяют создавать новые экспериментальные методы в фотонике и приборы на их основе. В работе предложен и детально проработан универсальный системный подход к прецизионному АО-управлению спектральным составом широкополосного оптического излучения, а также разработан ряд приложений данного подхода к прикладным задачам оптики, фотоники и радиофизики. В частности, можно отметить следующие перспективные применения дисперсионного метода АО-управления широкополосным излучением:

1) АО-метод произвольной амплитудно-фазовой спектральной модуляции фемтосекундного лазерного излучения позволяет создавать перестраиваемые по частоте источника терагерцового излучения на основе эффекта оптического выпрямления. Применение АО-приборов для репликации УКИ является более стабильным и универсальным методом по сравнению с интерферометрами и более гибким и эффективным по сравнению с ЖК и микрзеркальными пространственными модуляторами.

2) Использование программируемых АО-фильтров в лазерных системах тераваттного уровня мощности позволяет формировать лазерные импульсы специальной формы, в том числе программируемые бинарные импульсные последовательности. Широкополосные импульсы сложной формы востребованы в различных применениях лазерных техно-

логий, включая лазерную обработку материалов, ускорители заряженных частиц и инерциальный термоядерный синтез.

3) Применение неколлинеарных АОПФ в качестве фильтров пространственных частот лазерного излучения позволяет создавать быстроперестраиваемые оптические ловушки с кольцевым полем. Перестройка лазерного поля в такой ловушке может осуществляться с частотой до 100 кГц, что позволяет делать такие ловушки динамическими. Оптические ловушки с управлением лазерным пучком при помощи АОПФ имеют перспективы применения в биофотонике и биоинженерии, а также для захвата и удержания холодных атомов.

4) Адаптивные методы спектрального управления фемтосекундным лазерным излучением нашли применение в такой традиционной области применения АО-фильтров, как гиперспектральный анализ и пространственная фильтрация изображений. Созданный в работе дисперсионный метод синтеза произвольных функций пропускания АОПФ является обобщением известных методов управления аппаратной функцией фильтра на основе амплитудной или фазовой модуляции управляющих ВЧ-сигналов. Таким образом, на основе АОПФ возможно создание адаптивных широкополосных систем спектральной обработки сигналов и изображений. Перспективным применением таких систем является спектрально-согласованная фильтрация световых полей и изображений.

5) Разработанные методы измерения параметров АО-дифракции фемтосекундного лазерного излучения (метод спектральных частотно-контрастных характеристик (ЧКХ), метод спектрально-разрешённого измерения эффективности дифракции) позволяют осуществлять калибровку и точную настройку рабочих параметров АОДЛЗ для прецизионного управления ультракороткими лазерными импульсами.

Высокая практическая значимость работы отмечена Премией Правительства Российской Федерации в области науки и техники для молодых ученых за 2016 г. «за создание комплекса акустооптического дисперсионного управления субпикосекундными импульсами для мощной лазерной установки инерциального термоядерного синтеза нового поколения», полученной совместным авторским коллективом НИТУ МИСИС (К.Б. Юшков, А.И. Чижиков) и РФЯЦ – ВНИИЭФ (В.В. Романов).

Основные положения, выносимые на защиту

1) Акустооптическая дифракция ультракоротких лазерных импульсов в линейной среде в приближении медленно меняющихся амплитуд описывается нестационарными уравнениями связанных мод, сводящимися к обыкновенным дифференциальным уравнениям связанных мод для спектральных компонент, в которых эффективные коэффициенты связи и фазовой расстройки зависят от оптической частоты, групповой расстройки между взаимодействующими волнами и коэффициентов дисперсии высших порядков.

2) Акустооптическое брэгговское взаимодействие при частоте ультразвука, равной частоте повторения фемтосекундных лазерных импульсов, позволяет осуществлять ста-

ционную интерференцию двух когерентных фемтосекундных лазерных пучков и управлять распределением интенсивности между дифракционными порядками посредством фазовой подстройки ультразвука.

3) Использование преобразования Френеля для вычисления радиосигналов заданной длительности обеспечивает заданную комплекснозначную функцию пропускания акустооптических программируемых фильтров и дисперсионных линий задержки.

4) Произведение контраста на число разрешаемых элементов спектральной модуляции в акустооптических дисперсионных линиях задержки максимально тогда и только тогда, когда эффективная длительность радиосигнала, прямо пропорциональная квадратичному фазовому множителю преобразования Френеля и обратно пропорциональная ширине спектра, составляет $1/2$ полной длительности радиосигнала, равной временной апертуре линии задержки.

5) Акустооптическая спектральная модуляция фазово-модулированных лазерных импульсов позволяет формировать произвольные импульсные последовательности с пикосекундными фронтами, причём максимальная ширина полосы модуляции лазерного излучения пропорциональна ширине обрабатываемого спектра и обратно пропорциональна ширине аппаратной функции акустооптической дисперсионной линии задержки.

6) Акустооптическая дифракция фемтосекундных лазерных импульсов на брэгговской решётке с аperiodической кусочно-линейной фазовой модуляцией спектра позволяет получать реплики лазерного импульса с программируемой величиной задержки.

7) Синтез многочастотных радиосигналов с помощью преобразования Френеля позволяет использовать акустооптические фильтры для адаптивной спектральной фильтрации некогерентного излучения, включая оптические изображения, и управления пространственным спектром лазерных пучков.

Степень достоверности полученных результатов

Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечивается использованием современной экспериментальной базы радиофизики, оптики и лазерной физики. Оригинальные экспериментальные методы были разработаны на собственной научно-технологической инфраструктуре НИТУ МИСИС и применены в ведущих российских центрах лазерно-физических исследований, что отражено в совместных публикациях в ведущих рецензируемых научных журналах и докладами на профильных научных конференциях. Высокий уровень воспроизводимости и повторяемости экспериментальных результатов достигнут на фемтосекундных лазерных установках различных классов: широкополосных Ti-сапфировых (НИТУ МИСИС, ООО «Авеста-проект») и Cr-форстеритовых системах (Объединённый институт высоких температур РАН), субпикосекундных лазерах на Nd-стёклах (РФЯЦ – ВНИИЭФ), петаваттной ОРСПА-системе PEARL (ИПФ РАН). Разработанные теоретические модели подтверждены более поздними по отношению к работам автора независимыми публикациями различных авторов.

Апробация работы

Материалы диссертации доложены автором на 63 научных конференциях:

11th International Young Scientists Conference «Optics and High Technology Material Science SPO 2010» (Киев, Украина, 2010); International Congress on Ultrasonics (Гданьск, Польша, 2011; Мец, Франция, 2015; Голулу, США, 2017; Брюгге, Бельгия, 2019; Пекин, Китай, 2023); 8th, 9th, 10th, 11th, 12th, 13th International Conference on Ultrafast Optics (Монтерей, США, 2011; Давос, Швейцария, 2013; Пекин, Китай, 2015; Джексон, США, 2017; Бол, Хорватия, 2019; Барилоче, Аргентина, 2023); 1-я, 3-я Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике (Москва, 2012, 2014); 41st, 44th Winter School on Wave and Quantum Acoustics (Щирк, Польша, 2012, 2015); 5th Pulse shaping Workshop (Ист-Лэнсинг, США, 2012); 15th, 18th International Conference for Young Researchers «Wave Electronics and its Applications in Information and Telecommunication Systems» (Санкт-Петербург, 2012, 2015); 12-я Международная конференция «Оптика и Фотоника – 2013» (Самарканд, Узбекистан, 2013); SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation (Монреаль, Канада, 2014; Эдинбург, Великобритания, 2016; Остин, США, 2018); 12th, 13th, 14th School on Acousto-Optics and Applications (Друскининкай, Литва, 2014; Москва, 2017; Торунь, Польша, 2019); 7-я Международная конференция Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации (Суздаль, 2014); Научно-практическая конференция «Фотоника в научных исследованиях» (Москва, 2015, 2019); Optics and Photonics International Congress OPIC'16, OPIC'21 (Йокогама, Япония, 2016; онлайн-конференция, 2021); 5-я, 7-я, 8-я, 9-я, 10-я Международная конференция по фотонике и информационной оптике (Москва, 2016, 2018, 2019, 2020; онлайн-конференция, 2021); 2016 IEEE International Ultrasonics Symposium (Тур, Франция, 2016); SPIE Medical Imaging 2017 (Орландо, США, 2017); XVI Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн» имени А.П. Сухорукова (Красновидово, 2017); Международная конференция «XX Харитоновские тематические научные чтения. Применение лазерных технологий для решения задач по физике высоких плотностей энергии» (Саров, 2018); SPIE Optics + Photonics (Сан-Диего, США, 2018; онлайн-конференция, 2020); 26th Annual International Conference on Advanced Laser Technologies ALT'18 (Таррагона, Испания, 2018); 21-я Международная молодёжная научная конференция «Волновая электроника и её применения в информационных и телекоммуникационных системах» (Санкт-Петербург, 2018); SPIE Photonics West 2019 (Сан-Франциско, США, 2019); 22-я, 24-я, 25-я Международная научная конференция «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы» (Санкт-Петербург, 2019, 2021, 2022); III, IV, V International Conference on Ultrafast Optical Science «UltrafastLight-2019», «UltrafastLight-2020», «UltrafastLight-2021» (Москва, 2019, 2020, 2021); 8th, 10th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology «PHOTOPTICS 2020», «PHOTOPTICS 2022» (Валетта, Мальта, 2020; онлайн-конференция, 2022); 19th, 20th, 21th International Conference on Laser Optics (онлайн-конференция, 2020; Санкт-Петербург, 2022, 2024); SPIE Future Sensing Technologies 2020 Digital Forum

(онлайн-конференция, 2020); XXXII Всероссийская школа-семинар «Волновые явления: физика и применения» имени А.П. Сухорукова (онлайн-конференция, 2021); European Conferences on Biomedical Optics 2021: Advances in Microscopic Imaging III (онлайн-конференция, 2021); SPIE/COS Photonics Asia 2022 Digital Forum (онлайн-конференция, 2022); Всероссийская научная конференция с международным участием «Невская фотоника» (Санкт-Петербург, 2023); Международная конференция «XXV Харитоновские тематические научные чтения «Современные лазерные технологии» (Саров, 2024); 2024 IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Joint Symposium (Тайбей, Тайвань, 2024).

Также результаты работы были представлены автором на научных семинарах Научного совета Отделения нанотехнологий и информационных технологий РАН, Института спектроскопии РАН, НТИЦ Уникального приборостроения РАН, Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга, кафедр физики колебаний, квантовой электроники, общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, Института электроники, микроэлектроники и нанотехнологии в Политехническом университете О-де-Франс (Валансьен, Франция) и Института экспериментальной физики Гданьского Университета (Гданьск, Польша).

Публикации по теме диссертации

Результаты диссертации полностью отражены в 77 работах, в том числе в 49 статьях в рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих Положению о присуждении учёных степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова [A1–A49], 1 препринте [A50], 16 патентах РФ [A51–A66], 11 программах для ЭВМ [A67–A77]. Список публикаций автора по теме диссертационной работы приведён в конце автореферата перед списком литературы. Общее число публикаций автора, проиндексированных в библиографической базе *Scopus*, составляет 113 работ.

Личный вклад автора

Все работы выполнены автором лично, с его определяющим участием или под его руководством. В частности, личный вклад в опубликованных печатных работах следующий:

- предложены новые концепции [A1, A8, A28, A30, A33, A48];
- разработаны аналитические модели [A3, A4, A6, A9, A26, A35, A37–A39, A41–A43, A49];
- написаны расчётные программы и выполнено численное моделирование [A3, A4, A14, A19, A31, A32, A34, A35, A37, A42, A45, A49];
- разработаны методики экспериментов [A17, A25, A29, A36, A44, A46];
- разработано прикладное ПО [A15, A21, A22, A26, A33, A40, A46];
- созданы экспериментальные установки [A8, A9, A18, A20, A24, A30, A33, A41, A48];

- выполнены эксперименты и проведена обработка результатов [A1, A2, A6–A11, A15, A16, A18–A21, A24, A26, A30, A33, A40, A41, A47, A48].

Личный вклад автора в патентах на изобретения и полезные модели [A51–A66] заключается в анализе уровня техники, обосновании и разработке технических решений.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Объём диссертации составляет 331 страницу, включая 140 иллюстраций, 10 таблиц. Список литературы содержит 382 наименования.

Содержание диссертационной работы

Введение содержит краткий обзор области исследования, обоснование актуальности темы работы, приводятся цели и задачи, поставленные перед диссертантом, перечисляется краткое содержание работы, отмечается новизна и практическая значимость работы, а также формулируются основные положения, выносимые на защиту. Кроме того, во введении содержатся данные об апробации работы, публикациях и личном вкладе автора.

Первая глава диссертации посвящена обзору применений АО-взаимодействия в оптике ультракоротких лазерных импульсов. Основными типами АО-приборов на основе неколлинеарной геометрии АО-дифракции, применяемыми в оптике УКИ, являются модуляторы (селекторы импульсов), частотосдвигатели, дефлекторы. С помощью этих устройств в фемтосекундных лазерных системах решаются задачи уменьшения частоты импульсов, фазовой стабилизации, быстродействующего пространственного сканирования и фокусировки пучков.

Также в первой главе изложен ряд оригинальных результатов автора.

На основе тангенциальной геометрии анизотропной дифракции в кристалле TeO_2 был экспериментально продемонстрирован новый эффект: интерференция двух когерентных УКИ при неколлинеарном АО-взаимодействии [A48]. Для достижения стационарной интерференционной картины дифракция реализуется на частоте ультразвука, равной межмодовому интервалу f_T спектра УКИ. Каждый из двух падающих на АО-ячейку пучков настраивается на угол Брэгга так, что выходные пучки представляют собой пространственно-совмещённые 0-ой порядок одного пучка и 1-ый порядок другого. Это позволяет осуществить фазовую подстройку пучков, непосредственно управляя фазой Φ ультразвуковой волны в АО-кристалле. Схема эксперимента и результат измерения показаны на рис. 1: за период измерения, составлявший 512 мкс, фаза ОАВ менялась от 0 до 2π с шагом $\pi/16$. Единичный уровень на осциллограмме соответствует интенсивности одного падающего пучка. Таким образом, была достигнута эффективность сложения пучков 60 % излучения Ti-сапфирового ФЗГ при управляющей мощности ВЧ-сигнала 0.8 Вт.

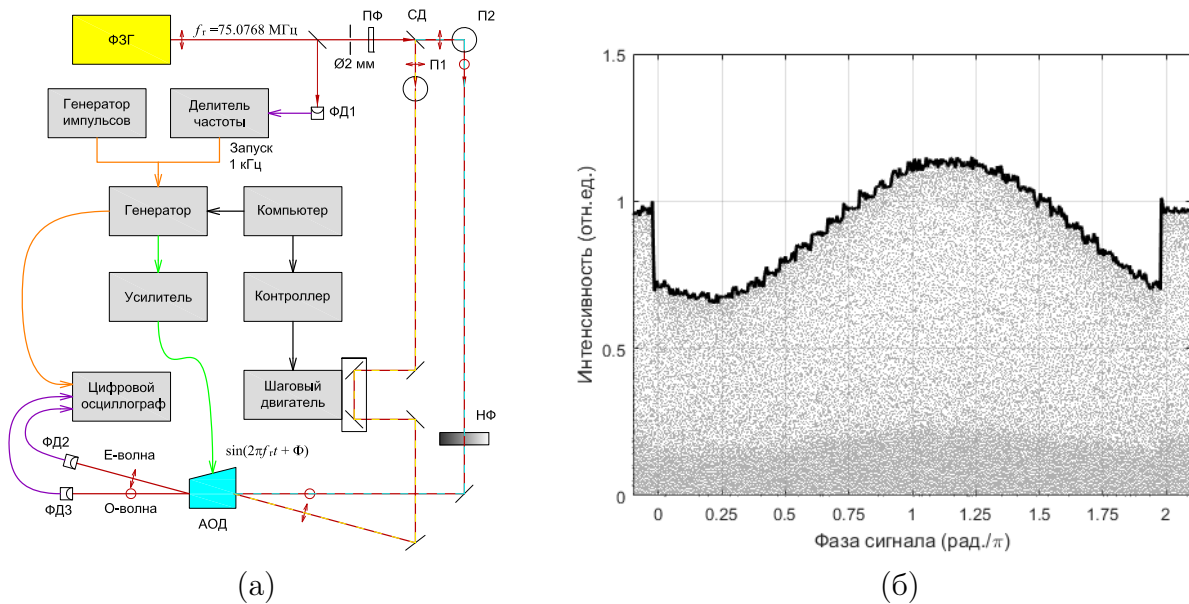


Рис. 1. Когерентное сложение двух фемтосекундных лазерных пучков: (а) схема эксперимента; АОД — АО-дефлектор; НФ — нейтральный фильтр; П — перископ; ПФ — полосовой фильтр; СД — светоделитель; ФД — фотодиод; (б) интенсивность E -волны при изменении фазы ОАВ.

Другим важным типом АО-приборов для управления УКИ являются АОДЛЗ, основанные на квазиколлинеарной геометрии АО-дифракции, при которой свет в двулучепреломляющем кристалле распространяется вдоль вектора групповой скорости ультразвука. Такая геометрия позволяет получить длину АО-взаимодействия в кристалле TeO_2 более 80 мм, что позволяет получить высокую эффективность дифракции и спектральное разрешение, необходимые для обработки широкополосных УКИ [A16, A40]. Фазовая решётка, создаваемая в АОДЛЗ ультразвуковой волной, является принципиально неоднородной: благодаря амплитудной и частотной модуляции ультразвука это позволяет формировать произвольные функции пропускания, осуществляя как спектральную, так и фазовую модуляцию фемтосекундного лазерного излучения.

Для квазиколлинеарной геометрии анизотропной дифракции выполнен подробный анализ АО-эффекта, то есть зависимостей эффективности и разрешения от направления взаимодействия в кристаллах различных групп симметрии, включая перспективные двухосные кристаллы орторомбической и моноклинной систем [A42]. Показано, что спектральное разрешение АОДЛЗ прямо пропорционально параметру $\varkappa = \lambda f$ и обратно пропорционально её быстродействию $1/T_a$, определяемому длиной кристалла, где T_a — временной интервал, необходимый для пересечения волновым фронтом ОАВ области АО-взаимодействия, называемый временной апертурой. Таким образом, параметр \varkappa позволяет количественно сравнивать различные геометрии квазиколлинеарной дифракции и различные АО-кристаллы. Особый практический интерес представляют собой геометрии анизотропной АО-дифракции в кристаллах, являющиеся квазиколлинеарными и широ-

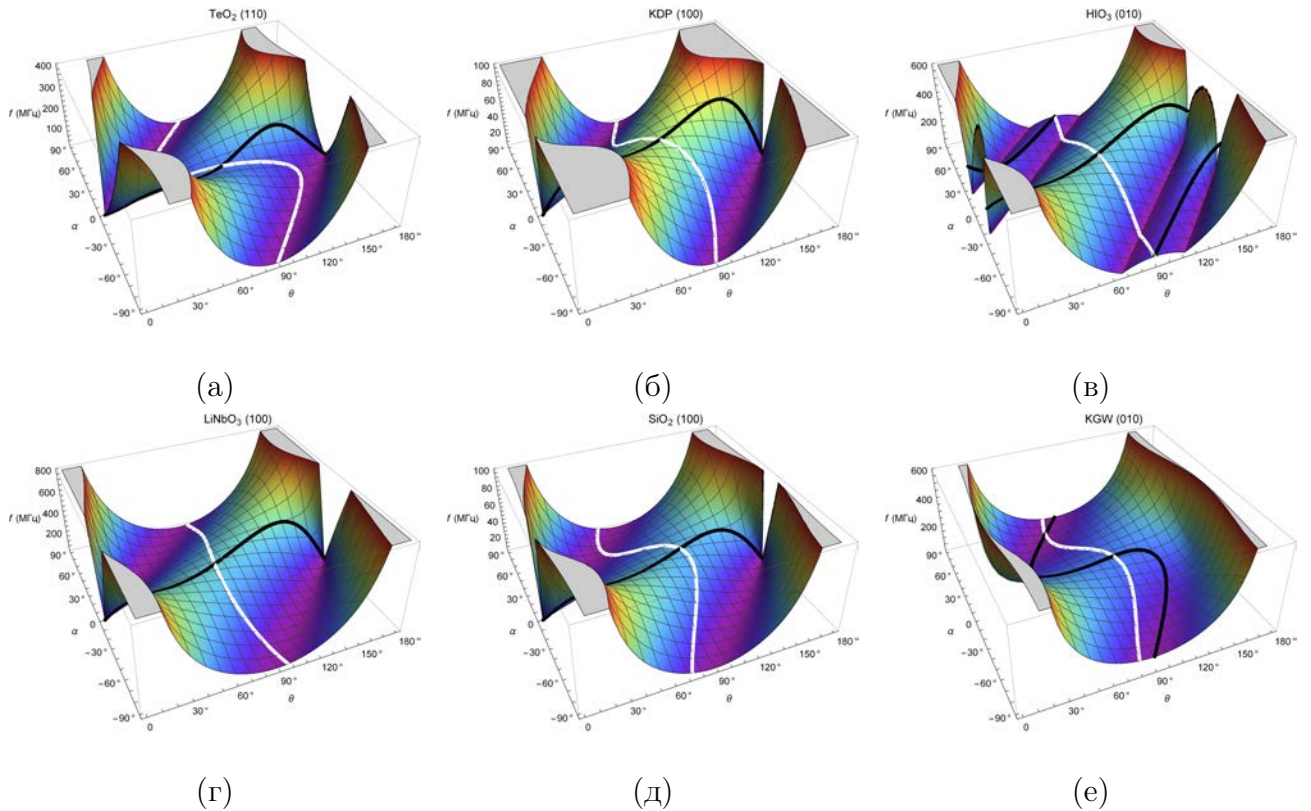
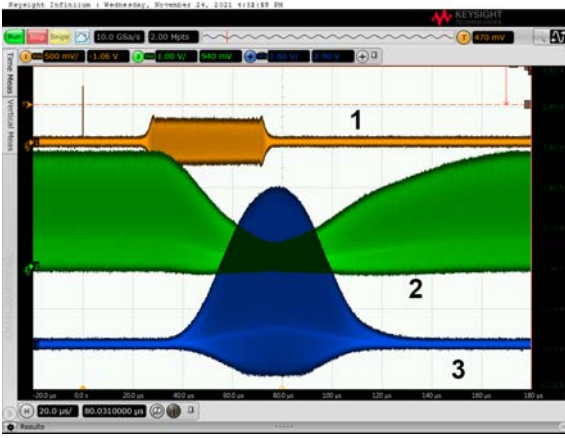


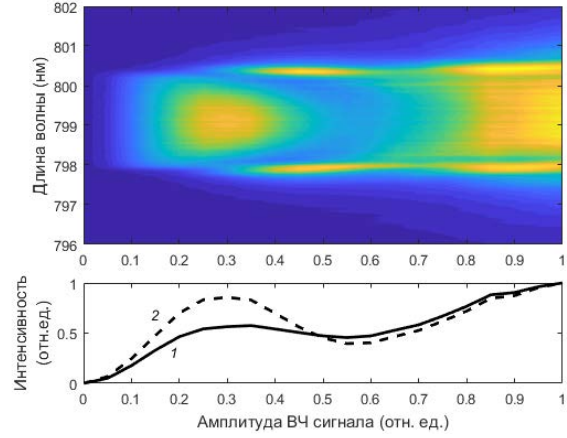
Рис. 2. Частота фазового синхронизма при анизотропной АО-дифракции в кристаллах различных классов на длине волны $\lambda = 1.064$ мкм: верхний ряд — тетрагональные кристаллы (а) TeO_2 , (б) KH_2PO_4 (KDP) и орторомбический (в) $\alpha\text{-HIO}_3$; нижний ряд — тригональные кристаллы (г) LiNbO_3 , (д) SiO_2 и моноклинный (е) $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ (KGW); чёрная кривая — широкоапертурная геометрия, белая кривая — квазиколлинеарная геометрия.

коапертурными: в таком случае одновременно выполняются условия углового некритичного фазового синхронизма (НФС) и большой длины взаимодействия, обеспечивающей высокую эффективность и спектральное разрешение. На рис. 2 показаны зависимости частоты фазового синхронизма f от угла Брэгга θ и направляющего угла ОАВ α для одноосных и двухосных кристаллов различных систем. На поверхностях показаны особые точки широкоапертурной дифракции (чёрные линии) и квазиколлинеарной дифракции (белые линии). Показано, что, в отличие от одноосных кристаллов, в главных плоскостях двухосных кристаллов широкоапертурная геометрия существует при любых направлениях распространения ОАВ. Кроме того, в плоскости симметрии моноклинных кристаллов существуют две различные точки пересечения геометрических мест точек широкоапертурной и квазиколлинеарной дифракции. На примере кристалла $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ найдены углы распространения ОАВ $\alpha = 2.8^\circ$ и 69.2° относительно диэлектрической оси x_2 , соответствующие этим особым точкам.

Важной особенностью АОДЛЗ является импульсный режим работы: управляющие ВЧ-сигналы являются нестационарными волновыми пакетами, и заданная широкополос-



(a)



(б)

Рис. 3. Измерение эффективности дифракции в АОДЛЗ: (а) осциллограмма интенсивности пучков при амплитуде ВЧ-сигнала 0.6 отн. ед.; 1 — ВЧ-сигнал, 2 — 0-ой порядок, 3 — 1-ый порядок; (б) спектральная диаграмма при ширине окна пропускания $\Delta\lambda = 2.4$ нм; 1 — интегральная интенсивность по окну пропускания, 2 — интенсивность на центральной длине волны $\lambda_0 = 799$ нм.

ная функция пропускания АОДЛЗ реализуется только в те моменты времени, когда ультразвуковой волновой пакет полностью находится в области АО-взаимодействия в кристалле. По этой причине используется импульсный режим измерения эффективности дифракции, показанный на рис. 3 (а). В настоящей работе было обнаружено, что импульсный режим измерения эффективности дифракции не позволяет определить оптимальную мощность управляющего сигнала, и был предложен режим измерения дифракции со спектральным разрешением, проиллюстрированный на рис. 3 (б). В предложенном методе АОДЛЗ формирует спектральную функцию пропускания в виде меандра, и измеряется спектр дифрагировавшего пучка при различных значениях амплитуды ультразвука. Оптимальной является такая амплитуда ВЧ-сигнала, при которой достигается первый максимум интенсивности на центральной длине волны окна пропускания. В рассмотренном примере оптимальная амплитуда составляет 0.3 отн. ед.

Вторая глава диссертации посвящена теоретическому анализу АО-дифракции ультракоротких лазерных импульсов. Рассмотрена одномерная модель АО-дифракции в однородном акустическом поле в приближении медленно меняющихся амплитуд (ММА). В случае дифракции Брэгга для огибающих 0-го и 1-го порядков A_0 и A_1 получена система уравнений в частных производных [А3, А4]

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{u_0} \frac{\partial}{\partial t} \right) A_0 - i\gamma_0 \frac{\partial^2 A_0}{\partial t^2} = \frac{q_0}{2} \exp(-i\Delta kz) \exp(i\Phi) A_1; \\ \left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{u_1} \frac{\partial}{\partial t} \right) A_1 - i\gamma_1 \frac{\partial^2 A_1}{\partial t^2} = -\frac{q_1}{2} \exp(i\Delta kz) \exp(-i\Phi) A_0, \end{cases} \quad (1)$$

где u_p — групповые скорости волн, γ_0 — коэффициенты дисперсии групповой скорости, q_p — коэффициенты связи, Δk — фазовая расстройка на центральной длине волны, Φ — начальная фаза акустической волны, $p = 0, 1$ — номер дифракционного порядка. Система уравнений (1) может быть преобразована в независимые уравнения для спектральных компонент огибающих $\tilde{A}_p(\omega, z) = \int_{-\infty}^{+\infty} A_p(\eta_p, z) \exp(-i\omega\eta_p) d\eta_p$, где $\eta_p = t - z/u_p$. Данные уравнения имеют вид обыкновенных дифференциальных уравнений связанных мод:

$$\frac{\partial^2 \tilde{A}_p}{\partial z^2} + (-1)^p i \Delta \bar{k}_p(\omega) \frac{\partial \tilde{A}_p}{\partial z} + \frac{\bar{q}_p^2(\omega)}{4} \tilde{A}_p = 0, \quad (2)$$

где введены эффективные коэффициенты связи

$$\bar{q}_p^2(\omega) = q^2 - 4(-1)^p \gamma_p \omega^2 (\Delta k + \omega \Delta v) - 4\gamma_0 \gamma_1 \omega^4. \quad (3)$$

и фазовой расстройки

$$\Delta \bar{k}_p(\omega) = \Delta k + \omega \Delta v + (-1)^p (\gamma_0 + \gamma_1) \omega^2, \quad (4)$$

где $\Delta v = (u_1 - u_0)/(u_0 u_1)$ — параметр групповой расстройки. Таким образом, показано, что эффективные коэффициенты связи (3) и расстройки (4) зависят не только от частоты ω , но и от коэффициентов дисперсии u_p и γ_p . Отметим, что независимо от рассмотренного в настоящей главе анализа АО-взаимодействия УКИ [А3, А4] различными авторами в более поздних работах были получены аналогичные волновые модели взаимодействия УКИ с фоторефрактивными брэгговскими решетками [20–22].

На рис. 4 показаны результаты численного моделирования анизотропной дифракции, полученные как решение уравнений (1) в первом приближении теории дисперсии, то есть при $\Delta v \neq 0$ и $\gamma_0 = \gamma_1 = 0$, при отсутствии фазовой расстройки ($\Delta k = 0$). Графики построены в нормированных координатах $\zeta = qz/\pi$ и $\tau_p = (t - z/u_p)q/(\pi|\Delta v|)$. Не снижая общности, считается, что падающая волна является быстрой модой, а дифрагировавшая — медленной. В результате взаимодействия двух импульсов, распространяющихся в различными групповыми скоростями, быстрая мода замедляется, а медленная ускоряется. Как видно из рис. 4, происходит изменение формы огибающей как в 0-ом, так и в 1-ом дифракционном порядке.

Другой особенностью АО-дифракции широкополосных УКИ является явная зависимость коэффициентов связи от частоты:

$$q_p(\omega) = \frac{\omega}{2c_0 n_p(\omega)} (\mathbf{e}_p \Delta \hat{\epsilon}_s \mathbf{e}_{1-p}), \quad (5)$$

где c_0 — скорость света в вакууме, n_p — показатели преломления, \mathbf{e}_p — орты поляризации, $\Delta \hat{\epsilon}_s$ — возмущение диэлектрической проницаемости среды, пропорциональное амплитуде ультразвука. С учётом того, что решение уравнений (2) имеет осциллирующий характер

$$\tilde{A}_p(\omega, z) = \tilde{C}_p^{(1)}(\omega) \cos \frac{\sqrt{\bar{q}_p^2(\omega) + \Delta \bar{k}_p(\omega)}}{2} z + \tilde{C}_p^{(2)}(\omega) \sin \frac{\sqrt{\bar{q}_p^2(\omega) + \Delta \bar{k}_p(\omega)}}{2} z, \quad (6)$$

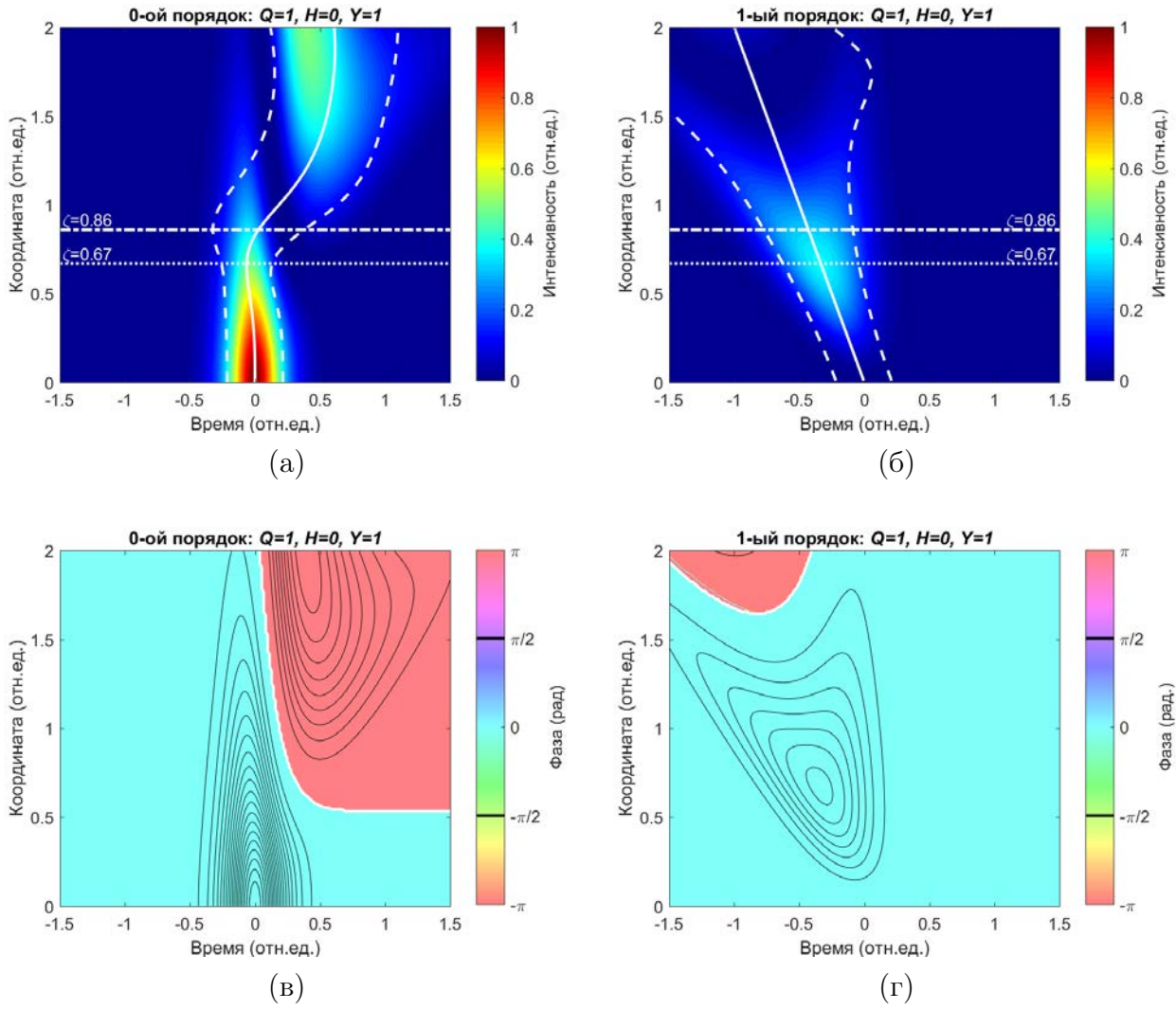


Рис. 4. Дифракция волнового пакета при наличии групповой расстройки: (а, б) эволюция интенсивности и фазы 0-го порядка в системе отсчёта (τ_0, ζ) ; (в, г) эволюция интенсивности и фазы 1-го порядка в системе отсчёта (τ_1, ζ) .

где величины $\tilde{C}_p^{(1,2)}(\omega)$ определяются начальными условиями, зависимость $q_p(\omega)$, определяемая выражением (5), приводит к следующему эффекту. В том случае, если период осцилляции величин \tilde{A}_p достаточно мал, то есть

$$\omega_{\text{per}} = \frac{2\pi\omega_c}{q_c z} < \Delta\omega, \quad (7)$$

где ω_c и $\Delta\omega$ — центральная частота и ширина спектра УКИ, $q_c = \sqrt{q_0(\omega_c)q_1(\omega_c)}$, наблюдается модуляция спектра как 0-го, так и 1-го порядка дифракции, соответствующая формированию двух реплик УКИ с задержкой

$$\tau = \frac{q_c z}{2\omega_c}. \quad (8)$$

Результаты численного моделирования данного эффекта для случая изотропной дифракции при $B = \Delta\omega/\omega_c = 0.2$ приведены на рис. 5. Расщепление импульса на 2 реплики

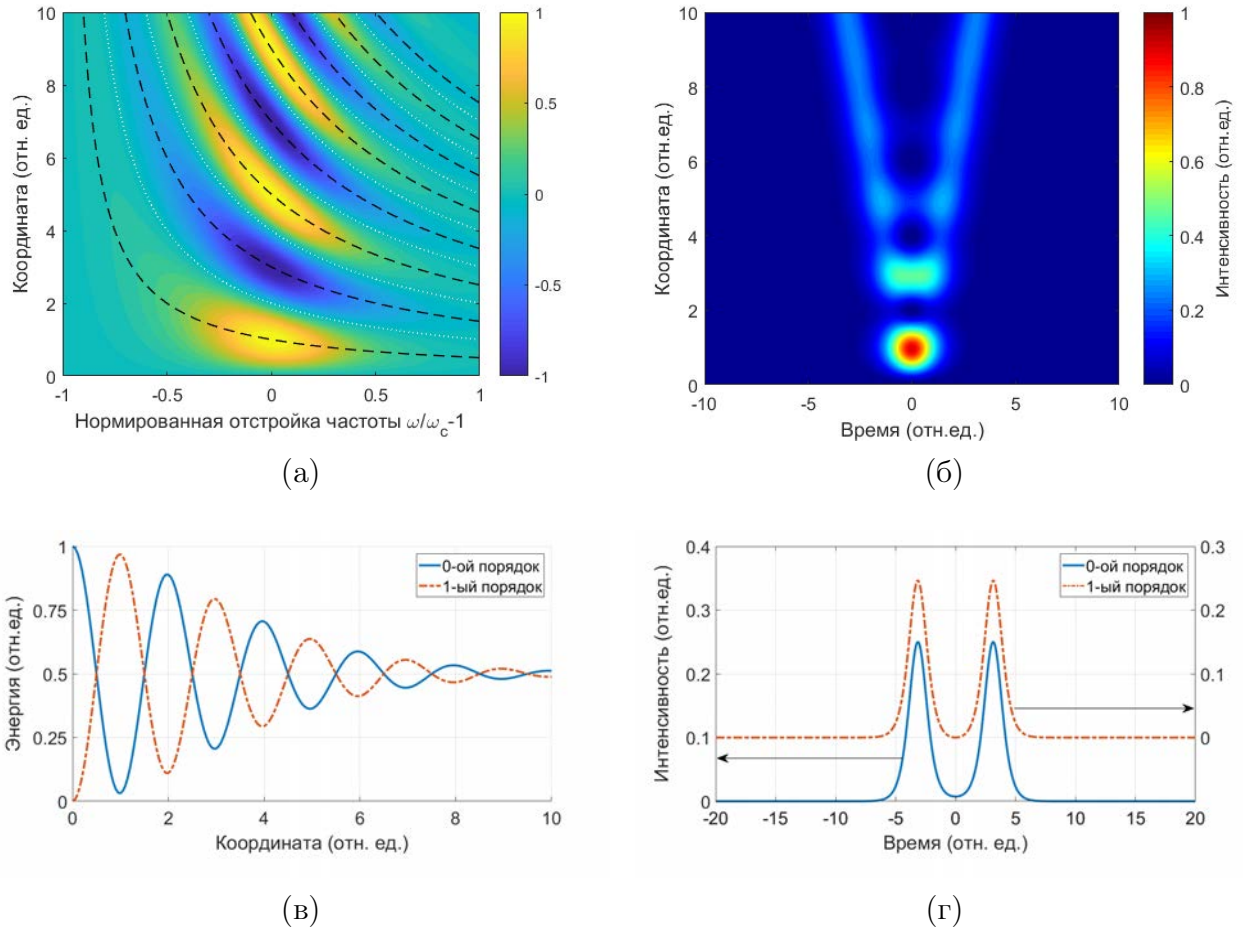


Рис. 5. Моделирование АО-дифракции широкополосного УКИ при сильной перемодуляции: (а) модуляция спектра 1-го порядка; (б) временная диаграмма импульса 1-го порядка; (в) полная энергия импульсов; (г) временные профили при $\zeta = 10$.

наблюдается при значении нормированной координаты $\zeta = q_c z / \pi > 1/B$ и сопровождается затуханием периодической перекачки энергии между дифракционными порядками, которая практически полностью исчезает при $\zeta > 2/B$, и в каждом из дифракционных порядков сосредоточено приблизительно 50 % полной энергии исходного УКИ. Как следует из рис. 5 (г), огибающие импульсов в 0-ом и 1-ом порядке дифракции практически идентичны и представляют собой две реплики исходного импульса.

Третья глава диссертации посвящена дисперсионному методу формирования произвольных комплекснозначных функций пропускания АОДЛЗ. Поскольку алгоритмы формирования управляющих ВЧ-сигналов являются основным отличием АОДЛЗ от узкополосных перестраиваемых АО-фильтров, данному вопросу уделено ключевое внимание в диссертационной работе.

ВЧ-сигналы, формирующие в АО-кристалле неоднородную ОАВ, являющуюся фазовой дифракционной решёткой для УКИ, должны удовлетворять ряду требований. Во-первых, сигналы имеют ограниченную длительность, не превышающую временной апер-

туры АО-ячейки T_a . Во-вторых, сигналы являются широкополосными для обеспечения условия фазового синхронизма в определённой полосе длин волн лазерного излучения $\Delta\lambda$. В-третьих, сигналы должны обеспечивать произвольную заданную комплекснозначную функцию пропускания АОДЛЗ в этом диапазоне частот, представимую как произведение амплитудного и фазового множителей $\tilde{H}(\lambda) = H_{\text{arb}}(\lambda) \exp[i\Psi(\lambda)]$. В-четвёртых, генерация ВЧ-сигналов осуществляется цифровыми синтезаторами радиосигналов, следовательно, волновой пакет должен быть представлен в виде оцифрованного дискретного массива с частотой выборки, соответствующей тактовой частоте синтезатора.

С учётом данных требований был разработан алгоритм дисперсионного Фурье-синтеза (ДФС), который можно кратко свести к следующим этапам [A34, A40, A50]:

1) используя условие фазового синхронизма, определить равномерную сетку ультразвуковых частот $f_g[n]$ и соответствующую ей неравномерную сетку длин волн $\lambda_g[n]$, где $n \in [1, N_s]$, N_s — число точек сетки, выбранное в соответствии с теоремой Котельникова для заданной длительности ВЧ-сигнала и полосы частот;

2) методом интерполяции определить сеточные функции $H_{\text{arb}}[n]$ и $\Psi[n]$, определяющие спектры ВЧ-сигнала $\tilde{S}[n] = H_{\text{arb}}[n] \exp(i\Psi[n])$;

3) методом БПФ осуществить передискретизацию и вычислить дискретный сигнал в комплексном виде $S_{\text{comp}}[m] = U[m] \exp(i\Phi[m])$, где $m \in [1, N_0]$, N_0 — число точек сетки, определяемое тактовой частотой ВЧ-генератора;

4) откалибровать сигнал по амплитуде и представить его в действительном виде.

Данный алгоритм был реализован в качестве прикладных программ для управления АОДЛЗ на высокоуровневом языке MATLAB [A67, A73, A77] и в среде графического программирования LabVIEW [A70].

Для того, чтобы обеспечить однородность амплитуды ВЧ-сигнала, фазовый множитель в спектре ВЧ-сигнала содержит дополнительное квадратичное слагаемое

$$\Psi[n] = \Psi_{\text{arb}}[n] + 4\pi^2 f_g[n]^2 B_2, \quad (9)$$

где $\Psi_{\text{arb}}[n]$ — произвольная фазовая модуляция. Квадратичный коэффициент B_2 должен удовлетворять следующему неравенству [A9]:

$$|B_2| \leq \frac{T_a}{4\pi\Delta f}, \quad (10)$$

где Δf — ширина полосы частот, соответствующая ширине обрабатываемой полосы длин волн $\Delta\lambda$. Благодаря наличию квадратичного слагаемого в выражении (9), вычисление ВЧ-сигнала осуществляется преобразованием Френеля от заданной комплекснозначной функции пропускания. При отсутствии дополнительной модуляции спектра, то есть в случае $\Psi_{\text{arb}}[n] = 0$, формируемые волновые пакеты фактически являются ЛЧМ-сигналами при большой величине $\Delta f T_a \gg 1$ и амплитудно-модулированными одночастотными сигналами при $\Delta f T_a \lesssim 1$ [A9].

Одной из основных целей применения АОДЛЗ является произвольная амплитудно-фазовая модуляция УКИ, позволяющая получать импульсы специальной формы. Поскольку произвольная модуляция дополнительно расширяет спектр сигнала, это накладывает дополнительное ограничение на параметры ВЧ-сигналов, используемые в алгоритме ДФС. Было найдено оптимальное значение квадратичного коэффициента фазовой модуляции B_2 , которое составляет $1/2$ от максимальной величины, определяемой соотношением (10): при выполнении условия

$$|B_2| = \frac{T_a}{8\pi\Delta f} \quad (11)$$

произведение контраста спектральной модуляции на разрешение оказывается максимальным. В этом случае более 90 % энергии ВЧ-сигнала сосредоточено в интервале длительностью $T_a/2$, но амплитудная и фазовая модуляция ВЧ-сигнала в остальной части волнового пакета оказывает решающее влияние на контраст модуляции [А34]. Данный эффект был продемонстрирован экспериментально для широкополосного излучения Ti-сапфирового ФЗГ [А41]: было показано, что при выполнении условия (11) глубина модуляции возрастает более, чем на 5 дБ по сравнению со случаем, соответствующим условию (10).

На рис. 6 продемонстрирована бинарная модуляция спектра УКИ, полученная методом ДФС. В качестве модулирующей функции использован меандр, в котором амплитуды отдельных сегментов выбраны в соответствии с псевдослучайной бинарной последовательностью длиной 124 бита (рис. 6 (а)). Полная ширина окна обработки спектра излучения Ti-сапфирового лазера составила $\Delta\lambda = 120$ нм на центральной длине волны 800 нм. Из амплитудного и частотного профилей ВЧ-сигнала, показанных на рис. 6 (б), также следует, что ВЧ-сигналы, вычисляемые методом ДФС, существенно отличаются от сигналов с гладкими профилями, получаемыми из геометрической модели фазового синхронизма [8], благодаря чему спектр дифрагировавшего излучения (рис. 6 (в)) не содержит осцилляций

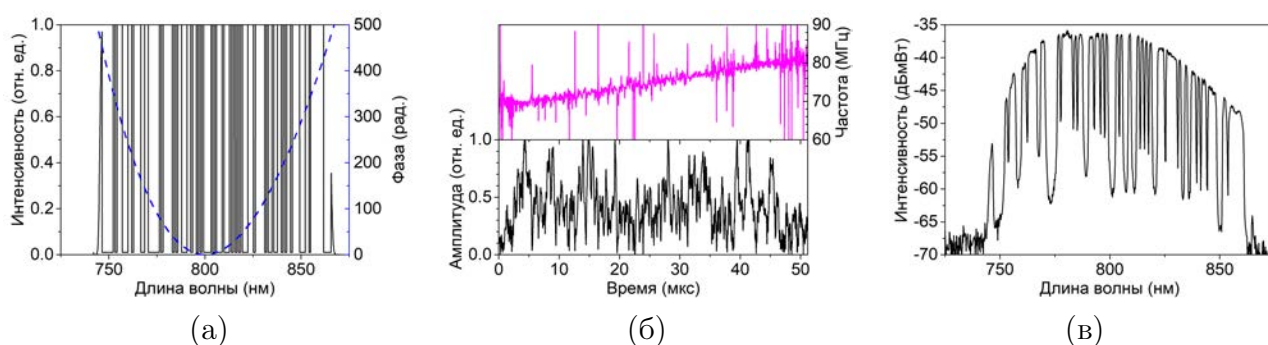


Рис. 6. Бинарное спектральное кодирование спектра УКИ псевдослучайной последовательностью длиной 124 бита: (а) заданная пользователем спектральная амплитуда (—) и расчётная спектральная фаза (---); (б) вычисленные амплитудный и частотный профили ультразвука; (в) измеренный спектр 1-го порядка дифракции.

Гиббса, и становится возможной прецизионная модуляция с высоким контрастом, превышающим 20 дБ [A9, A10].

Возможности произвольной спектральной модуляции спектра УКИ были использованы для создания методик измерения спектрального разрешения АОДЛЗ в широкополосном режиме и её частотной калибровки. Для измерения спектрального разрешения предложена процедура спектральных ЧКХ, которая заключается в формировании бинарной модуляции и измерении контраста модуляции как функции периода меандра [A8]. Было показано, что измеренное спектральное разрешение в режиме произвольной спектральной модуляции для исследованной широкополосной конфигурации АОДЛЗ на кристалле TeO_2 примерно в 2 раза хуже, чем оценка по критерию Рэлея на основе измерения аппаратной функции в одночастотном режиме. Частотная калибровка АОДЛЗ необходима для точного установления соотношения между длинами волн лазерного излучения λ и частотами ультразвука f , удовлетворяющими условию фазового синхронизма, то есть для нахождения коэффициента $\varkappa = \lambda f$, зависящего от угла падения света на брэгговскую решётку. Для этой цели в спектре пропускания АОДЛЗ методом ДФС формируется узкая режекционная полоса, положение которой измеряется спектрометром и сравнивается с заданным положением [A40]. При несоответствии заданного и измеренного значения величина \varkappa , входящая в алгоритм ДФС как параметр, корректируется. Данная процедура калибровки позволила обеспечить точность не хуже 0.2 нм в рабочем диапазоне длин волн Ti-сапфировых лазеров 720...880 нм.

Четвёртая глава диссертации посвящена ряду применений АОДЛЗ в фемтосекундной лазерной технике. Описанные в данной главе результаты основываются на формировании произвольных функций пропускания АОДЛЗ по методу ДФС, описанному в третьей главе диссертации.

Первой из решённых задач является коррекция регенеративного сужения спектра в оптических усилителях. В основе АО-коррекции спектра УКИ лежит двухкаскадная архитектура АОДЛЗ, в которой для управления фазовыми задержками и спектром излучения используются две отдельные АО-ячейки [A2, A51]. Внутррезонаторная коррекция спектра в регенеративном оптическом усилителе на Nd-стекле на основе такой архитектуры АОДЛЗ позволила предотвратить сужение спектра лазерного излучения и получить квазипрямоугольные чирпированные импульсы с шириной спектра, не зависящей от числа проходов в РУ. Для этой цели была использована АОДЛЗ на кристалле TeO_2 с рекордно высоким спектральным разрешением $\lambda/\delta\lambda \approx 8000$, разработанная и изготовленная в НИТУ МИСИС специально для этой задачи [A7]. Для данной АОДЛЗ были разработаны такие оригинальные технические решения для повышения разрешения, как минимизация температурных градиентов в кристалле TeO_2 [A17, A29, A47] и оптимизация размеров пьезоэлектрического преобразователя [A38]. Схема эксперимента и результаты измерения длительности чирпированных импульсов в кольцевом резонаторе РУ показаны на рис. 7. Временная диаграмма интенсивности на рис. 7 (б) показывает с первого по седь-

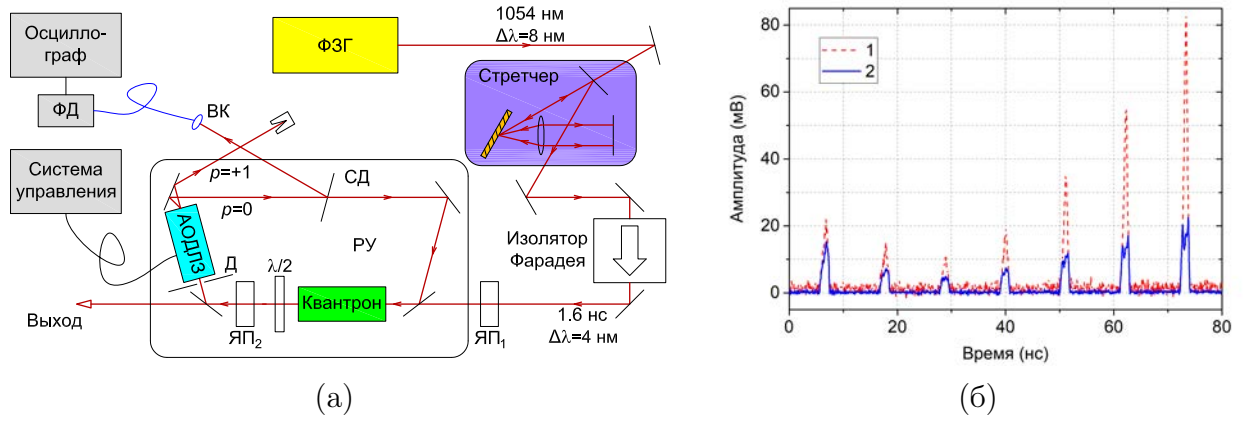


Рис. 7. Регенеративная коррекция сужения спектра УКИ: (а) схема эксперимента; ВК — волоконный коллиматор, Д — диафрагма, СД — светоделитель, ФД — фотодиод, ЯП — ячейка Погккельса; (б) временная диаграмма интенсивности импульсов в РУ; 1 — без АО-коррекции, 2 — с коррекцией.

мой проходит через резонатор. Без коррекции длительность импульса уменьшается почти в 2 раза, в то время как при использовании АО-коррекции спектра длительность chirпированного импульса 1.5 нс остается практически постоянной и соответствует ширине спектра $\Delta\lambda = 3.7$ нм.

На основании разработок АОДЛЗ высокого разрешения и двухкаскадной архитектуры управления спектральными фазами и амплитудами УКИ [А2] был создан аппаратно-программный комплекс АО дисперсионного управления субпикосекундными импульсами для мощной лазерной установки инерциального термоядерного синтеза нового поколения [А70].

Второй задачей, рассмотренной в четвертой главе диссертации, является генерация реплик УКИ, то есть формирование из исходного импульса двух или более идентичных импульсов с управляемой задержкой между ними. В работе были рассмотрены два основных метода формирования реплик: прямая фазово-амплитудная модуляция и метод частотно-независимых гребёнок (*англ.* multiple independent comb shaping, MICS) [А26]. Первый метод основан на возможности АОДЛЗ формировать произвольные комплекснозначные функции пропускания: двум репликам исходного импульса с интервалом $\Delta\tau$ соответствует функция пропускания $\tilde{H}(\omega) = [1 + \exp(i\omega\Delta\tau)]/2$. Данный метод был использован для генерации перестраиваемого по частоте терагерцового излучения методом оптического выпрямления [А21]. Диапазон полученных задержек на Cr-форстеритовой фемтосекундной лазерной системе центральной длиной волны $\lambda_0 = 1230$ нм составил $\Delta\tau = 0.5 \dots 1.5$ пс, что позволило перестраивать частоту терагерцового излучения в диапазоне $0.6 \dots 1.8$ ТГц.

Метод MICS отличается тем, что для получения реплик УКИ используется только фазовая модуляция спектра. Всё спектральное окно разбивается на несколько непересека-

ющихся подмножеств (гребёнок), на каждом из которых задан свой закон фазовой модуляции [23]. Недостатком метода MICS является появление спутников, то есть паразитных реплик, обусловленное периодичностью разбиения всего спектрального окна на интервалы, формирующие гребёнки, и внутриимпульсной интерференцией. Спутники существенно ухудшают контраст модуляции и ограничивают допустимый диапазон задержек реплик импульса, как видно из рис. 8 (а), (в) и (г).

Для устранения данного недостатка был предложен метод рандомизированных частотно-независимых гребёнок (RandoMICS). Он заключается в том, что после разбиения спектрального окна на большое число отрезков одинаковой ширины происходит псевдослучайная группировка соседних отрезков, в результате чего гребёнки сформированы аперiodически [А33]. Фактически спектр, промодулированный псевдослучайной бинарной последовательностью на рис. 6 (в), представляет собой одну из таких гребёнок. Оптимизация псевдослучайного разбиения была выполнена при помощи генетического алгоритма дифференциальной эволюции и показала, что для минимизации спутников необходимо использовать неравномерное распределение ширин сегментов гребёнки. Для оптимизации случайной перестановки, формирующей рандомизированную гребёнку в методе RandoMICS, был использован метод Монте-Карло. Метод RandoMICS был экспериментально реализован на основании алгоритма ДФС, в котором была использована

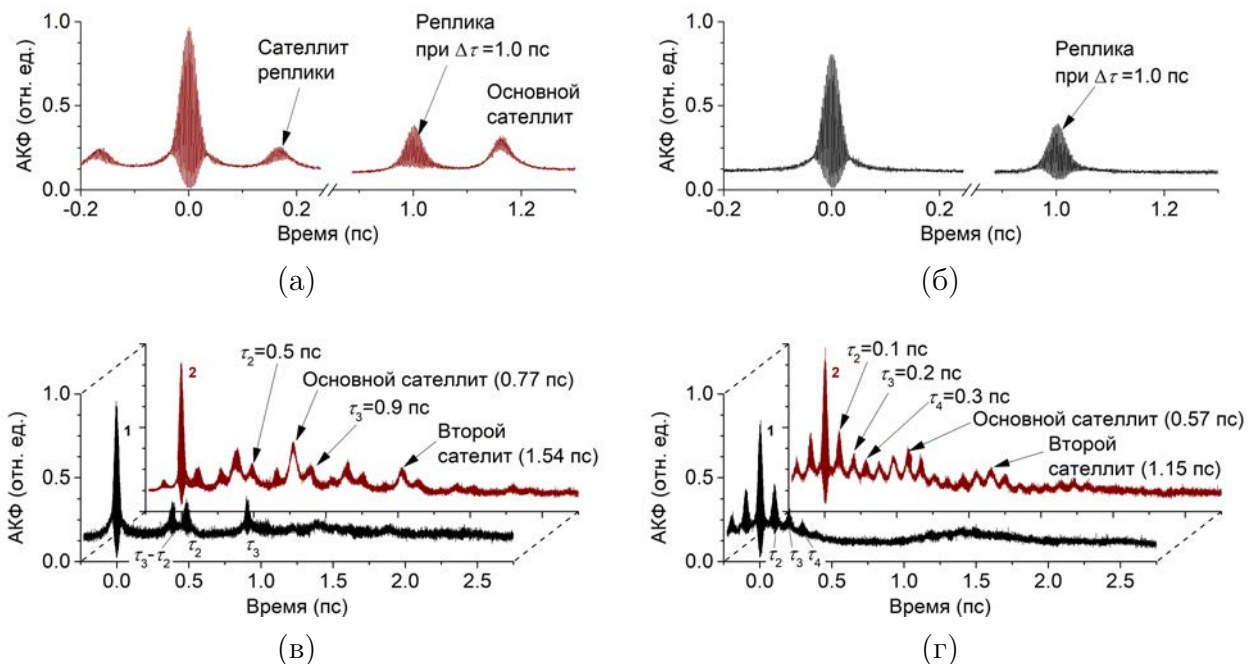


Рис. 8. Формирование реплик УКИ методами MICS и RandoMICS с помощью АОДЛЗ высокого разрешения: (а) формирование двух реплик с $\Delta\tau = 1.0$ пс периодической гребёнки MICS; (б) формирование двух реплик с $\Delta\tau = 1.0$ пс рандомизированной гребёнки RandoMICS; (в) формирование трёх реплик с задержками 0.5 и 0.9 пс; (г) формирование четырёх реплик с интервалами 0.1 пс; 1 — RandoMICS, 2 — MICS.

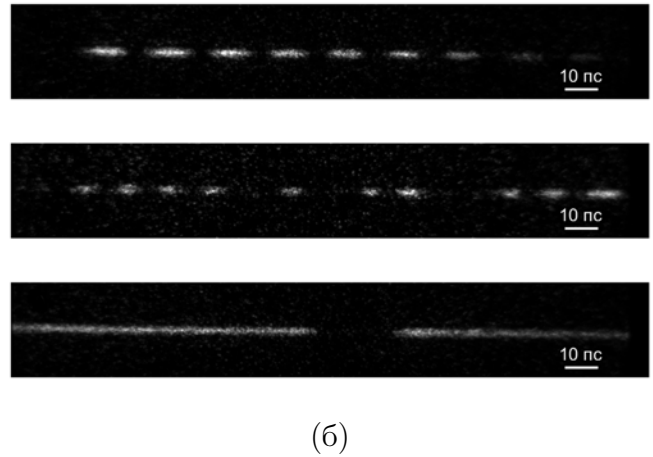
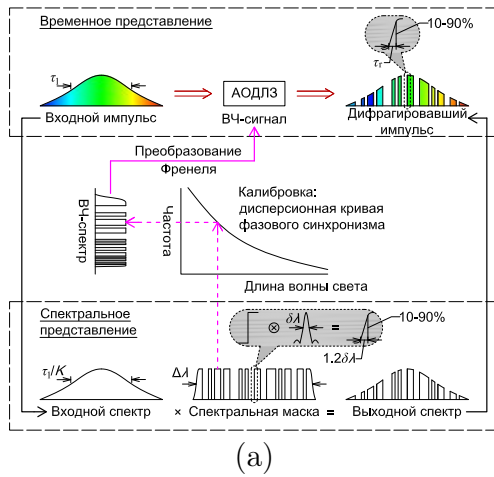


Рис. 9. Формирование произвольных импульсных последовательностей методом спектральной модуляции чирпированных импульсов: (а) схема формирования модуляции; (б) временные диаграммы импульсных последовательностей.

только фазовая модуляция спектра $\Psi(\omega)$ при постоянном коэффициенте пропускания $|\tilde{H}(\omega)| = 1$ [A74]. Результаты эксперимента показаны на рис. 8. Из представленных результатов очевидно, что амплитуда первого сателлита при использовании периодических решёток (метод MICS) сравнима с амплитудой формируемых реплик УКИ или превосходит их, в то время как для метода RandoMICS сателлиты отсутствуют, а наблюдается лишь пьедестал в автокорреляционной функции (АКФ), амплитуда которого примерно в 8 раз ниже амплитуды первого сателлита в методе MICS. В результате отдельные реплики УКИ разрешаются на АКФ, в то время как метод MICS с периодической гребёнкой оказывается фактически не применим.

Третьей задачей является формирование произвольных импульсных последовательностей на основе чирпированных УКИ. Бинарная спектральная модуляция, продемонстрированная на рис. 6, позволяет получать импульсные последовательности с пикосекундными фронтами модуляции, если обрабатываемый УКИ чирпирован, то есть является ЛЧМ-импульсом с длительностью, во много раз превышающей спектрально-ограниченную. Как показано на рис. 9 (а), спектральные компоненты такого импульса упорядочены во времени, следовательно, модуляция в спектральной области приводит к временной модуляции. Время нарастания фронтов пропорционально ширине аппаратной функции АОДЛЗ $\delta\lambda$ и коэффициенту линейного чирпа УКИ [A20, A57]. Для излучения Тi-сапфирового лазера на длине волны 800 нм и импульса с коэффициентом чирпа $K = 6.25$ пс/нм были получены фронты модуляции 5.0 ± 0.6 пс (соответствующая ширина полосы модуляции 70 ГГц), как показано на рис. 9 (б). Три представленных случая соответствуют периодическому меандру, произвольной бинарной последовательности с минимальной длительностью импульса и прямоугольной полосе режекции. Измерения проводились пикосекундной стрик-камерой с собственной шириной импульсного отклика 1.2 пс. Благодаря переносу

модуляции с радиочастот в оптический диапазон ширина полосы модуляции более чем на 3 порядка превосходит несущую частоту управляющего ВЧ-сигнала. Принцип модуляции chirпированных УКИ был также применён для измерения переходных характеристик широкополосных оптических усилителей [А56]. В экспериментах АОДЛЗ была расположена перед стретчером Ti-сапфировой СРА-системы, а измерения временных профилей проводились после резонатора РУ без компрессии импульсов. Было экспериментально показано, что фронты модуляции сохраняются при работе РУ в насыщенном режиме и составляют от 3.6 ± 1.0 до 6.7 ± 2.0 пс в зависимости от условий эксперимента [А40].

Пятая глава диссертации посвящена задачам адаптивной спектральной обработки некогерентных широкополосных световых полей и пространственной фильтрации лазерных пучков. В данной главе выполнено развитие и обобщение метода ДФС на неколлинеарные АОПФ, используемые в гиперспектральном анализе изображений и управлении угловым спектром оптического излучения.

Благодаря возможности формировать произвольные спектральные функции пропускания АО-фильтров, алгоритм ДФС может быть использован для реализации новых способов спектральной обработки широкополосного некогерентного оптического излучения. Можно выделить несколько основных отличий от применения метода ДФС в задачах управления когерентными УКИ. Во-первых, фаза функции пропускания АОПФ не существенна, следовательно, в выражении (9) достаточно оставить только квадратичное слагаемое, положив $\Psi_{arb} = 0$. Во-вторых, для обеспечения стационарной функции пропускания АОПФ период ВЧ-сигнала должен равняться его временной апертуре T_a . В-третьих, неколлинеарные АОПФ имеют длину взаимодействия L в несколько раз меньшую, чем квазилинейные, из-за чего потребляемая ими мощность ВЧ-сигнала возрастает пропорционально $1/L^2$ при прочих равных условиях. Последние две особенности определяют значение квадратичного дисперсионного коэффициента ВЧ-сигнала B_2 , как максимально возможное, удовлетворяющее неравенству (10), то есть $B_2 = T_a/(4\pi\Delta f)$. На рис. 10 приведены результаты коррекции спектра излучения широкополосного источника (Xe-дуговой лампы), полученные двумя различными способами с учётом указанных особенностей обработки некогерентного излучения.

В случае, приведённом на рис. 10 (а), был использован квазилинейный АОПФ, конструктивно аналогичный АОДЛЗ, со следующими параметрами алгоритма ДФС: $T_a = 51.2$ мкс, $\Delta\lambda = 150$ нм, $\Delta f = 37$ МГц [А15]. Спектр излучения источника I_0 был зарегистрирован при постоянном коэффициенте пропускания АОПФ в заданном спектральном окне 550...700 нм. Корректирующая функция пропускания была задана как $H_{arb}(\lambda) = H_0/\sqrt{I_0(\lambda)}$, в результате чего был зарегистрирован спектр I_1 . Среднеквадратичное отклонение (СКО) интенсивности I_1 от среднего значения составляет 1 %.

На рис. 10 (б) представлены результаты спектральной коррекции, полученные в режиме гиперспектрального анализа изображений. В экспериментах был использован неколлинеарный АОПФ на кристалле TeO_2 с временной апертурой $T_a = 4.5$ мкс и шириной

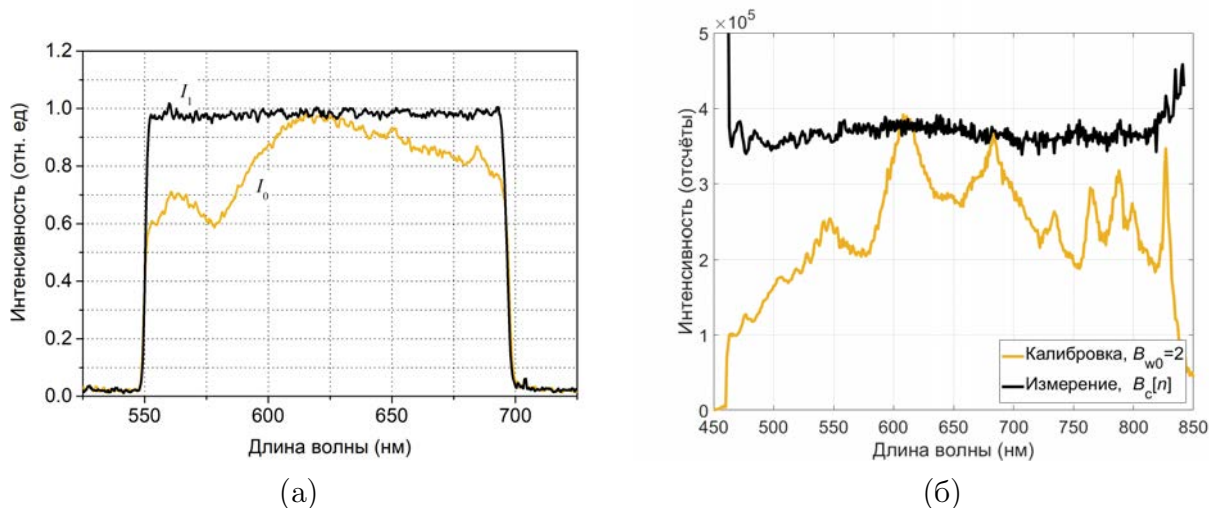


Рис. 10. Адаптивная спектральная коррекция белого света: (а) формирование неоднородного широкополосного окна осуществляется квазилинейарным АОПФ: I_0 — спектр до коррекции, I_1 — спектр после коррекции; (б) формирование прямоугольных окон пропускания различной ширины осуществляется неколлинеарным АОПФ в режиме сканирования центральной длины волны окна пропускания.

аппаратной функции $\delta\lambda = 1.0$ нм. Поскольку принцип АО гиперспектрального анализа изображений основан на сканировании длины волны пропускания АОПФ, для коррекции спектра источника излучения была разработана следующая процедура [А30]. Центральная длина волны λ окна пропускания рассматривалась как параметр задачи, а относительная ширина окна пропускания $B_w = \Delta\lambda/\delta\lambda$ выбиралась обратно пропорциональной интенсивности $I_0(\lambda)$. Калибровочное измерение спектра источника выполнялось при постоянной величине $B_{w0} = 2$. Скорректированный спектр был получен по результатам калибровки при $B_c(\lambda) = B_{w0} \max I_0/I_0(\lambda)$. СКО по интенсивности составляет 3 % в диапазоне длин волн 465...820 нм.

Вопрос влияния ширины окна пропускания на качество изображений, обрабатываемых неколлинеарным АОПФ в режиме гиперспектрального анализа, был исследован теоретически и экспериментально. Основной причиной ухудшения качества изображений при АО-фильтрации некогерентного излучения является угловая дисперсия дифракции. На основании разработанной аналитической модели было показано существование двух типов угловой дисперсии при АО-дифракции [А19]. Дисперсия I типа заключается в сканировании изображения при изменении частоты ультразвука в АОПФ и соответствующем изменении пропускаемой длины волны излучения. Угловая дисперсия II типа заключается в зависимости угла дифракции от длины волны при постоянной частоте ультразвука. Данный тип угловой дисперсии наиболее сильно проявляется в АО-спектрометрах, построенных на коллимирующей оптической схеме. В отличие от дисперсии I типа, угловая дисперсия II типа не может быть скомпенсирована углом наклона выходной грани АО-

кристалла, однако её можно целенаправленно использовать для устранения паразитных засветок в некоторых задачах гиперспектрального анализа, например, в астрономии при исследовании объектов с линейчатыми спектрами излучения [A11].

Экспериментальное исследование заключалось в измерении точечного отклика конфокальной гиперспектральной АО-системы при различных значениях параметра B_w . Результаты приведены на рис. 11. При увеличении параметра B_w происходит изменение формы ВЧ-сигнала, вычисляемого согласно алгоритму ДФС: от квази-одночастотного сигнала со слабой амплитудной модуляцией при $B_w \leq 2.5$ к частотно- и амплитудно-модулированному сигналу при $B_w \geq 2.5$. При этом мощность ВЧ-сигнала возрастает пропорционально B_w , а его максимальная амплитуда, соответственно, приблизительно пропорционально $\sqrt{B_w}$. Изменения ВЧ-сигнала показаны на рис. 11 (а). При увеличении ширины окна пропускания АОПФ $\Delta\lambda$ пропорционально увеличивается полная интенсивность изображения, как показано на рис. 11 (б). Максимальная величина $B_w = 25$ была ограничена выходной мощностью ВЧ-усилителя, составлявшей 25 Вт. Во избежание нагрева АОПФ измерения проходили при низкой скважности, определяемой скоростью считывания данных с цифровой камеры, а АОПФ работал в режиме электронного затвора, позволяя регулировать экспозицию кадра. Одновременно с увеличением полной интенсивности сигнала происходит уширение точечного отклика, приведённого на рис. 11 (в). При максимальной ширине окна пропускания $B_w = 25$ точечный отклик в плоскости дифракции (вертикальное направление на изображениях) примерно в 1.6 раз шире, чем при минимальной ширине аппаратной функции АОПФ. Поскольку в данном случае АО-дифракция происходит на широкополосном ВЧ-сигнале, уширение точечного отклика обусловлено угловой дисперсией I типа.

Применение АОПФ для пространственной фильтрации лазерных пучков основано на зависимости величины фазовой расстройке и, соответственно, эффективности АО-дифракции от направления распространения [24]. При этом АОПФ можно рассматривать как пространственно-инвариантную оптическую систему, которую возможно охарактеризовать двухмерной передаточной функцией. Благодаря этому в АОПФ напрямую осуществляется модуляция углового спектра излучения без применения Фурье-оптического преобразования. Кроме того, пространственная фильтрация оптического пучка является управляемой, что позволяет осуществлять визуализацию фазовых объектов при помощи АОПФ [A18]. В случае, если визуализация фазового объекта осуществляется с некогерентным излучением, в оптической системе применяется дополнительный пространственный фильтр, согласованный с угловой апертурой АОПФ [A24, A36].

Двухмерная передаточная функция АОПФ зависит только от геометрии поверхности рефракции АО-кристалла и выбора направления АО-взаимодействия. Анализ и численное моделирование топологии передаточных функций было выполнено на основании метода тензора дифракции волновых пучков [A43]. Данный метод был изначально разработан в области акустики кристаллов для количественной оценки пространственной анизотропии акустических свойств [25, A14, A37]. В случае некритичного фазового синхронизма (НФС)

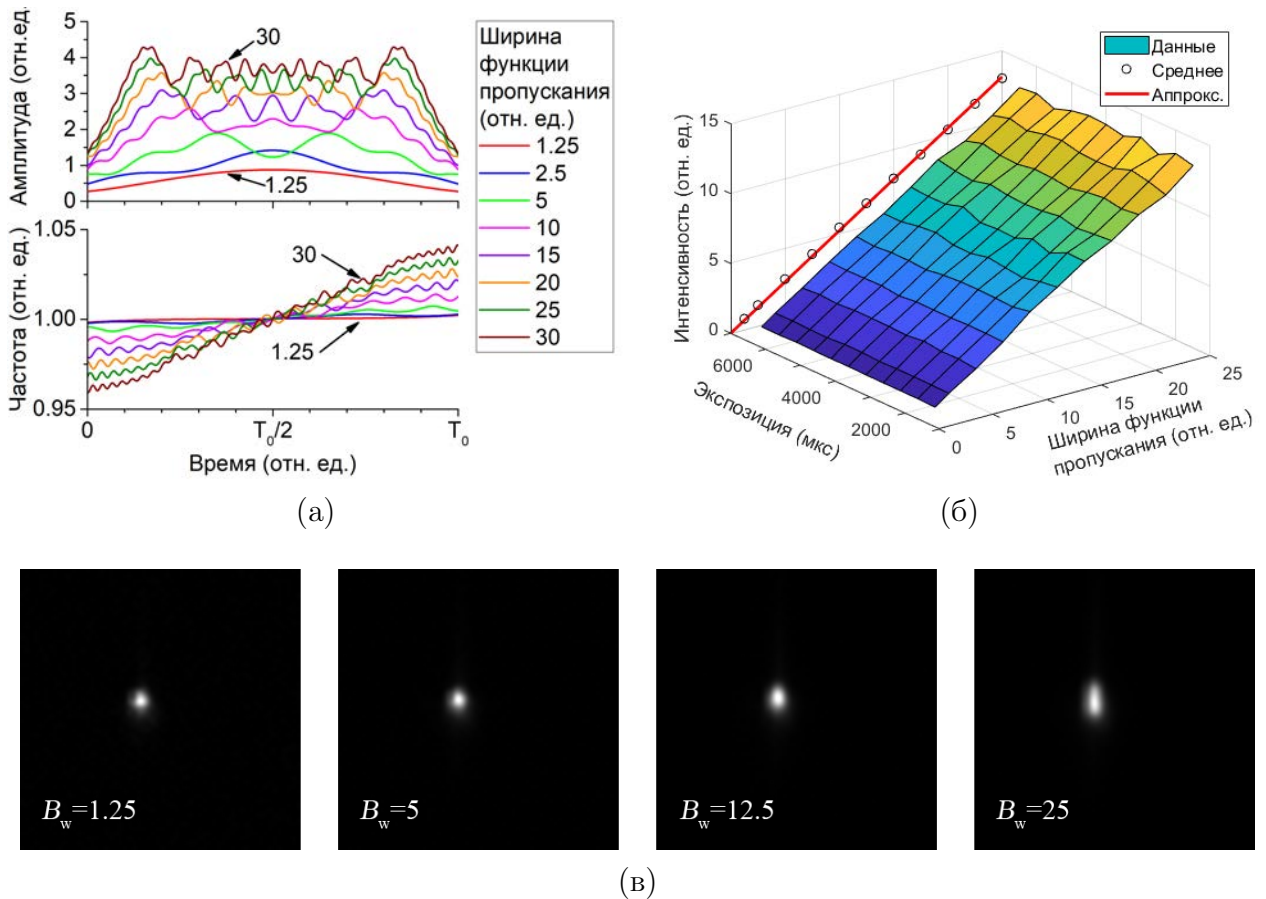


Рис. 11. Применение метода ДФС к неколлинеарному АОПФ: (а) амплитудный и частотный профили ВЧ-сигнала с прямоугольным спектром; (б) интенсивность дифрагировавшего излучения, нормированная на интенсивность при одночастотном управлении АОПФ; (в) точечный отклик конфокальной гиперспектральной системы при различных значениях B_w .

при АО-взаимодействии, имеющего место в неколлинеарных АОПФ, именно тензор дифракции, характеризующий кривизну поверхностей рефракции, определяет топологию двумерной передаточной функции [А43]. Для выбранной геометрии АО-взаимодействия вычисляется разница тензоров дифракции быстрой и медленной волн. При одинаковых знаках собственных значений результирующего тензора имеет место кольцевая топология передаточной функции; при противоположных знаках собственных значений имеет место крестообразная топология передаточной функции; при нулевом собственном значении имеет место промежуточная топология, соответствующая сверхширокоапертурной геометрии НФС.

Для пространственной фильтрации осесимметричных лазерных пучков используется кольцевая топология передаточной функции неколлинеарного АОПФ. Численное моделирование двумерной передаточной функции было выполнено для различных углов среза кристалла TeO_2 с учётом влияния акустической анизотропии на фазовую расстройку.

В результате было показано, что можно выделить два оптимальных диапазона углов среза кристалла TeO_2 для пространственной фильтрации лазерных пучков [А35]. Для формирования кольцевых лазерных пучков в одночастотном режиме управления предпочтительно выбирать относительно небольшой угол среза кристалла $\alpha = 4.4^\circ \dots 7.2^\circ$, благодаря чему двухмерная передаточная функция близка к симметричной кольцевой. При увеличении угла среза кристалла двухмерная передаточная функция становится эллиптической и её центр смещается при изменении частоты ультразвука [26]. Тем не менее благодаря увеличению разрешения АОПФ с ростом угла среза α для управления двухмерной передаточной функцией в многочастотном режиме управления предпочтителен диапазон $\alpha = 11.0^\circ \dots 13.8^\circ$.

На рис. 12 показаны распределения интенсивности дифрагировавшего пучка в дальней зоне, представляющие собой произведения углового спектра падающего гауссова пучка на двухмерную передаточную функцию АОПФ, полученные при различных режимах управления с монохроматическим лазерным излучением. Распределения интенсивности регистрировались на матрице, расположенной в фокальной плоскости микрообъектива, следовательно, пространственное распределение интенсивности соответствует угловому спектру пучка на выходе АОПФ. При частоте $f = 132.4$ МГц, соответствующей условию НФС (рис. 12 (а)), реализуется режим работы пространственного фильтра низких частот. При увеличении частоты АОПФ работает как полосовой фильтр пространственных частот: кольцевая передаточная функция на рис. 12 (б) получена при $f = 133.2$ МГц. Многочастотный режим управления на основе алгоритма ДФС продемонстрирован на рис. 12 (в) и (г). В первом случае реализован широкополосный фильтр низких частот с коррекцией, то есть гауссово распределение входного пучка преобразовано в однородное распределение выходного пучка. Во втором случае приведён пример управляемого полосового фильтра. На основе пространственной фильтрации монохроматического пучка была создана динамическая кольцевая оптическая ловушка [27].

Формирование кольцевых функций пропускания АОПФ, продемонстрированное на рис. 12 для монохроматического лазерного пучка, может быть обобщено на случай полихроматического излучения [А63]. В этом случае используется многочастотный управляющий ВЧ-сигнал, различные компоненты которого соответствуют различным длинам волн лазерного пучка. При условии, что частотные диапазоны, в которых реализуется фазовый синхронизм для различных длин волн, не перекрываются, управление угловым спектром для них является независимым [26]. Данный режим был продемонстрирован экспериментально для излучения Ti-сапфирового фемтосекундного лазера [28]. Из широкого спектра излучения при помощи АОДЛЗ, работавшей в режиме многооконного узкополосного фильтра, были выделены две длины волны 790 и 800 нм, на каждой из которых можно было независимо управлять пространственным спектром пучка посредством неколлинеарного АОПФ. Полученные распределения интенсивности представляют собой концентрические кольцевые пучки, в которых разным компонентам углового спектра соответствуют разные длины волн излучения.

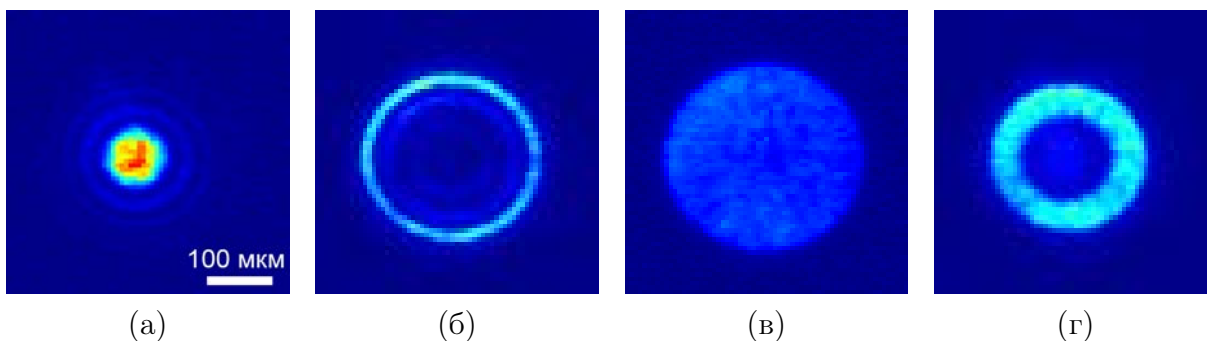


Рис. 12. Пространственная фильтрация монохроматического гауссова лазерного пучка при помощи неколлинеарного АОПФ: (а) широкоапертурная дифракция при условии НФС; (б) полосовой фильтр при одночастотном управлении; (в) фильтр низких частот с коррекцией при многочастотном управлении; (г) полосовой фильтр при многочастотном управлении.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1) На основании разработанной аналитической модели показано, что групповая расстройка при анизотропной дифракции УКИ приводит к снижению эффективности АО-взаимодействия и увеличению длительности импульсов как 0-го, так и 1-го порядков при дифракции, а также к изменению их эффективных групповых скоростей в АО-кристалле. При увеличении параметра связи $Q_c > 2/B$, где $B = \Delta\omega/\omega_c$ — относительная ширина спектра излучения, перекачка энергии между 0-ым и 1-ым порядком дифракции исчезает, и происходит временное расщепление импульсов на две идентичные реплики, задержка между которыми пропорциональна амплитуде ультразвуковой волны: $\tau = \pi Q_c / 2\omega_c$.

2) Экспериментально продемонстрирован новый эффект: интерференция двух когерентных УКИ при неколлинеарном АО-взаимодействии, при которой компенсация фазовой задержки между интерферирующими пучками осуществляется подстройкой фазы ультразвуковой волны. Для тангенциальной геометрии анизотропной дифракции в кристалле TeO_2 достигнута эффективность сложения пучков 60 % излучения Тi-сапфирового фемтосекундного лазера при управляющей ВЧ-мощности 0.8 Вт.

3) Создан универсальный алгоритм синтеза произвольных комплексно-значных функций пропускания программируемых АО-фильтров и прикладное ПО для управления АОДЛЗ на его основе. Разработана экспериментальная процедура калибровки АОДЛЗ по длинам волн, позволяющая обеспечивать точность не хуже 0.2 нм в рабочем диапазоне длин волн Тi-сапфировых лазеров 720 . . . 880 нм, а также оригинальные методы измерения эффективности дифракции и спектрального разрешения АОДЛЗ в режиме широкополосного синтеза произвольных спектральных модулирующих функций.

4) Аналитически показано существование оптимального значения квадратичного коэффициента дисперсии ВЧ-сигнала $B_2 = T_a / (8\pi\Delta f)$, где T_a — акустическая апертура АОДЛЗ, Δf — ширина полосы частот, обеспечивающее максимальный контраст и разре-

шение АОДЛЗ; данная величина равняется $1/2$ от максимальной величины B_2 , соответствующей ЛЧМ-сигналу с диапазоном частот Δf и длительностью T_a . Экспериментально показано увеличение спектрального контраста модуляции на 5 дБ при оптимальном значении B_2 .

5) Продемонстрировано прецизионное формирование произвольных функций пропускания АОДЛЗ, с контрастом модуляции в спектральной области более 20 дБ; методом спектральной модуляции chirпированных импульсов получена бинарная модуляция интенсивности во временной области с длительностью фронтов 5 пс и продемонстрирована генерация псевдослучайных последовательностей с полосой модуляции 70 ГГц.

6) Экспериментально продемонстрированы амплитудно-фазовые методы программируемого формирования реплик УКИ: получена генерация реплик УКИ с задержкой 0.4...6.2 пс в Cr-форстеритовой тераваттной лазерной системе, использованная для генерации методом оптического выпрямления перестраиваемого терагерцового излучения в диапазоне частот 0.6...1.8 ТГц; предложен и оптимизирован метод рандомизированных частотно-независимых гребёнок RandoMICS, позволивший получить программируемое формирование реплик импульсов Ti-сапфирового лазера в диапазоне задержек 0.05...3.6 пс с подавлением паразитных сателлитов более чем в 8 раз по сравнению с методом регулярных частотно-независимых гребёнок MICS.

7) Продемонстрирована адаптивная спектральная коррекция некогерентного оптического излучения методом ДФС. При помощи квазиколлинеарного АОПФ получен однородный прямоугольный спектр в диапазоне длин волн 550...700 нм с СКО по интенсивности 1 %. В неколлинеарном АОПФ получено увеличение интенсивности излучения белого света в 13 раз за счёт уширения полосы пропускания фильтра, что позволило осуществить коррекцию неоднородного спектра источника (Xe-дуговой лампы) в диапазоне длин волн 465...820 нм с СКО по интенсивности 3 %.

8) Применение метода ДФС позволило осуществить пространственную фильтрацию монохроматического лазерного пучка неколлинеарным АОПФ и обеспечить преобразование гауссова пространственного профиля в однородный и кольцевой профили с управляемым пространственным распределением.

Таким образом, в настоящей диссертационной работе были систематизированы и обобщены методы управления АО-фильтрами, позволяющие реализовать произвольные комплекснозначные функции пропускания. Разработанные оригинальные экспериментальные методы опираются на современную элементную базу радиоэлектроники и сочетают использование компьютерных вычислительных методов синтеза ВЧ-радиосигналов и цифровых программируемых генераторов для их формирования. Основные применения данных методов лежат в области управления лазерными УКИ. Несмотря на широкое применение АО дисперсионных фильтров в фемтосекундными лазерными системами, данные вопросы были рассмотрены в литературе лишь фрагментарно. Разработанные автором алгоритмы позволили прецизионно осуществлять спектральную и фазовую модуляцию широкополосного когерентного лазерного излучения, благодаря чему был решен ряд практических задач:

адаптивная коррекция регенеративного сужения спектра в неодимовых лазерных усилителях, программируемая генерация реплик УКИ, формирование произвольных бинарных импульсных последовательностей с пикосекундными фронтами.

Кроме того, в работе было продемонстрировано применение дисперсионных методов формирования широкополосных управляющих сигналов для смежных областей оптики и лазерной физики, таких как гиперспектральный анализ изображений и пространственная фильтрация лазерных пучков. Была проанализирована угловая дисперсия неколлинеарных АОПФ, а также реализована быстродействующая динамическая пространственная фильтрация лазерных пучков, которая может быть использована для создания кольцевых оптических ловушек.

В заключение можно сформулировать некоторые перспективные задачи и направления дальнейших исследований, задел по которым был создан в настоящей работе:

- 1) экспериментальная реализация высокоэффективного когерентного сложения УКИ при многолучевой АО-дифракции;
- 2) защищенная оптическая связь в свободном пространстве на основе фазового кодирования;
- 3) поиск новых эффективных геометрий квазиколлинеарного АО-взаимодействия и сред для их реализации, включая низкосимметричные двухосные кристаллы;
- 4) анализ нестационарных и невзаимных режимов АО-взаимодействия в условиях высокой эффективности дифракции в частотно- и фазово-модулированных ультразвуковых полях;
- 5) развитие нестационарной волновой теории дифракции с учётом более полных моделей АО-взаимодействия и её прямая экспериментальная проверка;
- 6) согласованная фильтрация широкополосных радиосигналов с использованием фемтосекундной лазерной техники;
- 7) трёхмерное профилирование УКИ на основе неколлинеарной широкоапертурной АО-дифракции;
- 8) динамические оптические ловушки для холодных атомов на основе кольцевых пучков, управляемых неколлинеарными АОПФ;
- 9) экспериментальная реализация адаптивной спектрально-согласованной оптической фильтрации, в том числе в задачах гиперспектрального анализа изображений.

Работа выполнена при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований (10-07-00623, 12-07-00640, 12-07-00641, 12-07-00642, 12-07-33049, 15-07-03714, 15-07-03719, 15-07-04512, 18-07-00672, 18-07-00674, 18-29-20019), Российского научного фонда (20-12-00348, 21-12-00247), Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание 3.197.2014/К, проект 5-100).

Список публикаций по теме диссертационной работы

Статьи в рецензируемых журналах, удовлетворяющих Положению о присуждении учёных степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова:

- A1. **К.В. Yushkov**, S. Dupont, J.-C. Kastelik, V.B. Voloshinov. Polarization independent imaging with acousto-optic tandem system // Optics Letters. — 2010. — Vol. 35, no. 9. — P. 1416–1418. — **JIF = 3.1 (WoS)**. Общий объём статьи 0.2 п.л., личный вклад 0.1 п.л.
- A2. В.Я. Молчанов, С.И. Чижиков, **К.В. Юшков**. Двухкаскадная акустооптическая дисперсионная линия задержки для сверхкоротких лазерных импульсов // Квантовая электроника. — 2011. — Т. 41, № 8. — С. 675–676. — **IF = 0.906 (РИНЦ)**. Общий объём статьи 0.2 п.л., личный вклад 0.1 п.л.
Переводная версия: V.Ya. Molchanov, S.I. Chizhikov, **К.В. Yushkov**. Two-cascade acoustooptical dispersive delay line for ultrafast laser pulses // Quantum Electronics — 2011. — Vol. 41, no. 8. — P. 675–676. — **JIF = 1.194 (WoS)**. Общий объём статьи 0.2 п.л., личный вклад 0.1 п.л.
- A3. **К.В. Юшков**, В.Я. Молчанов. Влияние групповой расстройки на акустооптическое взаимодействие ультракоротких лазерных импульсов // Квантовая электроника. — 2011. — Т. 41, № 12. — С. 1119–1120. — **IF = 0.906 (РИНЦ)**. Общий объём статьи 0.2 п.л., личный вклад 0.1 п.л.
Переводная версия: **К.В. Yushkov**, V.Ya. Molchanov. Effect of group velocity mismatch on acousto-optic interaction of ultrashort laser pulses // Quantum Electronics — 2011. — Vol. 41, no. 12. — P. 1119–1120. — **JIF = 1.194 (WoS)**. Общий объём статьи 0.2 п.л., личный вклад 0.1 п.л.
- A4. **К.В. Yushkov**, V.Ya. Molchanov. Theory of acousto-optical Bragg diffraction of ultrashort laser pulses in dispersive crystals // Electronics Letters. — 2012. — Vol. 48, no. 3. — P. 174–175. — **JIF = 0.7 (WoS)**. Общий объём статьи 0.2 п.л., личный вклад 0.1 п.л.
- A5. В.Б. Волошинов, **К.В. Юшков**, Т.В. Юхневич. Компенсация хроматических aberrаций в акустооптических системах спектрального анализа изображений // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. — 2012. — Т. 67, № 5. — С. 25–30. — **IF = 0.514 (РИНЦ)**. Общий объём статьи 0.6 п.л., личный вклад 0.2 п.л.

- Переводная версия: V.B. Voloshinov, **К.В. Yushkov**, T.V. Yukhnevich. Compensation for chromatic aberrations in acousto-optic systems used in spectral analysis of images // Moscow University Physics Bulletin — 2012. — Vol. 67 no. 5. — P. 437–442. — **JIF = 0.4 (WoS)**. Общий объём статьи 0.6 п.л., личный вклад 0.2 п.л.
- A6. J.-C. Kastelik, S. Dupont, **К.В. Yushkov**, J. Gazelet. Frequency and angular bandwidth of acousto-optic deflectors with ultrasonic walk-off // Ultrasonics. — 2013. — Vol. 53, no. 1. — P. 219–224. — **JIF = 3.8 (WoS)**. Общий объём статьи 0.4 п.л., личный вклад 0.2 п.л.
- A7. S.I. Chizhikov, S.G. Garanin, L.V. Goryachev, V.Ya. Molchanov, V.V. Romanov, N.N. Rukavishnikov, S.V. Sokolovskii, I.N. Voronich, **К.В. Yushkov**. Acousto-optical adaptive correction of chirped laser pulse spectral profile in Nd-phosphate glass regenerative amplifier // Laser Physics Letters. — 2013. — Vol. 10, no. 1. — P. 015301. — **JIF = 1.4 (WoS)**. Общий объём статьи 0.5 п.л., личный вклад 0.2 п.л.
- A8. **К.В. Yushkov**, V.Ya. Molchanov. MTF formalism for measurement of spectral resolution of acousto-optical devices with synthesized transmission function // Optics Letters. — 2013. — Vol. 38, no. 18. — P. 3578–3580. — **JIF = 3.1 (WoS)**. Общий объём статьи 0.2 п.л., личный вклад 0.1 п.л.
- A9. V.Ya. Molchanov, **К.В. Yushkov**. Advanced spectral processing of broadband light using acousto-optic devices with arbitrary transmission functions // Optics Express. — 2014. — Vol. 22, no. 13. — P. 15668–15678. — **JIF = 3.2 (WoS)**. Общий объём статьи 0.8 п.л., личный вклад 0.6 п.л.
- A10. V.Ya. Molchanov, **К.В. Yushkov**. Dispersive controlling of femtosecond laser radiation: new opportunities and developments // Acta Physica Polonica A. — 2015. — Vol. 127, no. 1. — P. 20–24. — **JIF = 0.5 (WoS)**. Общий объём статьи 0.3 п.л., личный вклад 0.2 п.л.
- A11. **К.В. Yushkov**, S.P. Anikin, S.I. Chizhikov, V.F. Esipov, A.I. Kolesnikov, O.Yu. Makarov, V.Ya. Molchanov, S.A. Potanin, A.M. Tatarnikov. Recent advances in acousto-optic instrumentation for astronomy // Acta Physica Polonica A. — 2015. — Vol. 127, no. 1. — P. 81–83. — **JIF = 0.5 (WoS)**. Общий объём статьи 0.2 п.л., личный вклад 0.1 п.л.
- A12. S.A. Tretiakov, R.M. Grechishkin, A.I. Kolesnikov, I.A. Kaplunov, **К.В. Yushkov**, V.Ya. Molchanov, B.B.J. Linde. Characterization of temperature field distribution

in large-size paratellurite crystals applied in acousto-optic devices // Acta Physica Polonica A. — 2015. — Vol. 127, no. 1. — P. 72–74. — **JIF = 0.5 (WoS)**. Общий объём статьи 0.2 п.л., личный вклад 0.1 п.л.

A13. S.N. Mantsevich, V.I. Balakshy, V.Ya. Molchanov, **К.В. Yushkov**. Influence of acoustic anisotropy in paratellurite on quasicollinear acousto-optic interaction // Ultrasonics. — 2015. — Vol. 63. — P. 39–46. — **JIF = 3.8 (WoS)**. Общий объём статьи 0.5 п.л., личный вклад 0.1 п.л.

A14. N.F. Naumenko, V.Ya. Molchanov, S.I. Chizhikov, **К.В. Yushkov**. Anisotropic diffraction of bulk acoustic wave beams in lithium niobate // Ultrasonics. — 2015. — Vol. 63. — P. 126–129. — **JIF = 3.8 (WoS)**. Общий объём статьи 0.3 п.л., личный вклад 0.1 п.л.

A15. **К.В. Yushkov**, V.Ya. Molchanov. Acousto-optic filters with arbitrary spectral transmission // Optics Communications. — 2015. — Vol. 355. — P. 177–180. — **JIF = 2.2 (WoS)**. Общий объём статьи 0.3 п.л., личный вклад 0.2 п.л.

A16. Н.В. Диденко, А.В. Конященко, П.В. Кострюков, Л.Л. Лосев, В.С. Пазюк, С.Ю. Теняков, В.Я. Молчанов, С.И. Чижиков, **К.В. Юшков**. Водородный комбинационный лазер с длительностью импульса генерации 40 фс // Квантовая электроника. — 2015. — Т. 45, № 12. — С. 1101–1104. — **IF = 0.906 (РИНЦ)**. Общий объём статьи 0.3 п.л., личный вклад 0.1 п.л.

Переводная версия: N.V. Didenko, A.V. Konyashchenko, P.V. Kostryukov, L.L. Losev, V.S. Pazyuk, S.Yu. Tenyakov, V.Ya. Molchanov, S.I. Chizhikov, **К.В. Yushkov**. 40-fs hydrogen Raman laser // Quantum Electronics — 2015. — Vol. 45, no. 12. — P. 1101–1104. — **JIF = 1.194 (WoS)**. Общий объём статьи 0.5 п.л., личный вклад 0.4 п.л.

A17. S.A. Tretiakov, A.I. Kolesnikov, I.A. Kaplunov, R.M. Grechishkin, **К.В. Yushkov**, E.V. Shmeleva. Thermal imaging and conoscopic studies of working acoustooptical devices on the base of paratellurite // International Journal of Thermophysics. — 2016. — Vol. 37, no. 1. — P. 6. — **JIF = 2.5 (WoS)**. Общий объём статьи 0.6 п.л., личный вклад 0.3 п.л.

A18. **К.В. Yushkov**, V.Ya. Molchanov, P.V. Belousov, A.Yu. Abrosimov. Contrast enhancement in microscopy of human thyroid tumors by means of acousto-optic adaptive spatial filtering // Journal of Biomedical Optics. — 2016. — Vol. 21, no. 1. —

- P. 016003. — **JIF = 3.0 (WoS)**. Общий объём статьи 0.5 п.л., личный вклад 0.4 п.л.
- A19.* С.П. Аникин, В.Ф. Есипов, В.Я. Молчанов, А.М. Татарников, **К.Б. Юшков** Акустооптический спектрометр изображений для астрофизических измерений // Оптика и спектроскопия. — 2016. — Т. 121, № 1. — С. 124–132. — **IF = 0.475 (РИНЦ)**. Общий объём статьи 0.6 п.л., личный вклад 0.4 п.л.
Переводная версия: S.P. Anikin, V.F. Esipov, V.Ya. Molchanov, A.M. Tatarnikov, **К.Б. Yushkov**. An acousto-optical imaging spectrometer for astrophysical measurements // Optics and Spectroscopy — 2016. — Vol. 121, no. 1. — P. 115–122. — **JIF = 0.8 (WoS)**. Общий объём статьи 0.6 п.л., личный вклад 0.4 п.л.
- A20.* **К.Б. Yushkov**, V.V. Romanov, G.S. Rogozhnikov, V.Ya. Molchanov. 70 GHz arbitrary modulation of chirped laser pulses by means of acousto-optics // Optics Letters. — 2016. — Vol. 41, no. 23. — P. 5442–5445. — **JIF = 3.1 (WoS)**. Общий объём статьи 0.3 п.л., личный вклад 0.2 п.л.
- A21.* А.В. Овчинников, О.В. Чефонов, В.Я. Молчанов, **К.Б. Юшков**, К. Викарио, К. Хаури. Генерация перестраиваемого по частоте импульсного терагерцевого излучения хром-форстеритовой лазерной системой с акустооптическим управлением временным профилем импульсов // Квантовая электроника. — 2016. — Т. 46, № 12. — С. 1149–1153. — **IF = 0.906 (РИНЦ)**. Общий объём статьи 0.3 п.л., личный вклад 0.2 п.л.
Переводная версия: A.V. Ovchinnikov, O.V. Chefonov, V.Ya. Molchanov, **К.Б. Yushkov**, C. Vicario, C. Hauri. Generation of frequency-tunable pulsed terahertz radiation from a Cr:forsterite laser with an acousto-optic control of the temporal pulse profile // Quantum Electronics — 2016. — Vol. 46, no. 12. — P. 1149–1153. — **JIF = 1.194 (WoS)**. Общий объём статьи 0.3 п.л., личный вклад 0.2 п.л.
- A22.* E.I. Gacheva, A.K. Poteomkin, S.Yu. Mironov, V.V. Zelenogorskii, E.A. Khazanov, **К.Б. Yushkov**, A.I. Chizhikov, V.Ya. Molchanov. A fiber laser with random-access pulse train profiling for a photoinjector driver // Photonics Research. — 2017. — Vol. 5, no. 4. — P. 293–298. — **JIF = 6.6 (WoS)**. Общий объём статьи 0.4 п.л., личный вклад 0.2 п.л.
- A23.* J.-C. Kastelik, S. Dupont, **К.Б. Yushkov**, V.Ya. Molchanov Double acousto-optic deflector system for increased scanning range of laser beams // Ultrasonics. —

2017. — Vol. 80. — P. 62–65. — **JIF = 3.8 (WoS)**. Общий объём статьи 0.3 п.л., личный вклад 0.1 п.л.
- A24. **К.В. Yushkov**, V.Ya. Molchanov. Hyperspectral imaging acousto-optic system with spatial filtering for optical phase visualization // Journal of Biomedical Optics. — 2017. — Vol. 22, no. 6. — P. 066017. — **JIF = 3.0 (WoS)**. Общий объём статьи 0.5 п.л., личный вклад 0.4 п.л.
- A25. D.A. Belyaev, **К.В. Yushkov**, S.P. Anikin, Yu.S. Dobrolenskiy, A. Laskin, S.N. Mantsevich, V.Ya. Molchanov, S.A. Potanin, O.I. Korablev. Compact acousto-optic imaging spectropolarimeter for mineralogical investigations in the near infrared // Optics Express. — 2017. — Vol. 25, no. 21. — P. 25890–25991. — **JIF = 3.2 (WoS)**. Общий объём статьи 0.8 п.л., личный вклад 0.2 п.л.
- A26. **К.В. Yushkov**, V.Ya. Molchanov, A.V. Ovchinnikov, O.V. Chefonov. Acousto-optic replication of ultrashort laser pulses // Physical Review A. — 2017. — Vol. 96, no. 4. — P. 043866. — **JIF = 2.6 (WoS)**. Общий объём статьи 0.5 п.л., личный вклад 0.2 п.л.
- A27. J.-C. Kastelik, J. Champagne, S. Dupont, **К.В. Yushkov**. Wavelength characterization of an acousto-optic notch filter for unpolarized near-infrared light // Applied Optics. — 2018. — Vol. 57, no. 10. — P. C36–C41. — **JIF = 1.7 (WoS)**. Общий объём статьи 0.4 п.л., личный вклад 0.1 п.л.
- A28. G.S. Rogozhnikov, V.V. Romanov, N.N. Rukavishnikov, V.Ya. Molchanov, **К.В. Yushkov**. Interference of phase-shifted chirped laser pulses for secure free-space optical communications // Applied Optics. — 2018. — Vol. 57, no. 10. — P. C98–C102. — **JIF = 1.7 (WoS)**. Общий объём статьи 0.4 п.л., личный вклад 0.2 п.л.
- A29. V.P. Zarubin, **К.В. Yushkov**, A.I. Chizhikov, O.Yu. Makarov, V.Ya. Molchanov, S.A. Tretiakov, A.I. Kolesnikov, E.B. Cherepetskaya, A.A. Karabutov. Laser-ultrasonic temperature mapping of an acousto-optic dispersive delay line // NDT & E International. — 2018. — Vol. 98. — P. 171–176. — **JIF = 4.1 (WoS)**. Общий объём статьи 0.4 п.л., личный вклад 0.2 п.л.
- A30. **К.В. Yushkov**, O.Yu. Makarov, V.Ya. Molchanov. Novel protocol of hyperspectral data acquisition by means of an acousto-optical tunable filter with synthesized transmission function // Optics Letters. — 2019. — Vol. 44, no. 6. — P. 1500–1503. — **JIF = 3.1 (WoS)**. Общий объём статьи 0.3 п.л., личный вклад 0.2 п.л.

- A31. S.N. Mantsevich, A.S. Voloshin, **К.В. Yushkov**. Optical frequency comb generation with collinear acousto-optic diffraction: Theory and simulations // Physical Review A. — 2019. — Vol. 100, no. 01. — P. 013829. — **JIF = 2.6 (WoS)**. Общий объём статьи 1.0 п.л., личный вклад 0.3 п.л.
- A32. **К.В. Yushkov**, A.I. Chizhikov, O.Yu. Makarov, V.Ya. Molchanov. Linear phase design of piezoelectric transducers for acousto-optic dispersion delay lines using differential evolution for matching circuit optimization // IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control. — 2020. — Vol. 67, no. 5. — P. 1040–1047. — **JIF = 3.0 (WoS)**. Общий объём статьи 0.5 п.л., личный вклад 0.3 п.л.
- A33. **К.В. Yushkov**, V.Ya. Molchanov. Randomly spaced phase-only transmission combs for femtosecond pulse shaping // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. — 2020. — Vol. 26, no. 5. — P. 8700108. — **JIF = 4.3 (WoS)**. Общий объём статьи 0.6 п.л., личный вклад 0.5 п.л.
- A34. **К.В. Юшков**. Цифровой алгоритм управления программируемыми акустооптическими фильтрами: численное моделирование контраста и быстродействия // Известия вузов. Радиофизика. — 2019. — Т. 62, №. 11. — С. 875–889. — **IF = (РИНЦ)**. Общий объём статьи 1.0 п.л.
Переводная версия: **К.В. Yushkov**. A digital algorithm for controlling programmable acousto-optic filters: Numerical simulation of contrast and computation speed // Radiophysics and Quantum Electronics — 2020. — Vol. 62, no. 11. — P. 778–791. — **JIF = 0.8 (WoS)**. Общий объём статьи 1.0 п.л.
- A35. **К.В. Yushkov**, A.I. Chizhikov, O.Yu. Makarov, V.Ya. Molchanov. Optimization of noncollinear AOTF design for laser beam shaping // Applied Optics. — 2020. — Vol. 59, no. 28. — P. 8575–8581. — **JIF = 1.7 (WoS)**. Общий объём статьи 0.5 п.л., личный вклад 0.4 п.л.
- A36. **К.В. Yushkov**, J. Champagne, J.-C. Kastelik, O.Yu. Makarov, V.Ya. Molchanov. AOTF-based hyperspectral imaging phase microscopy // Biomedical Optics Express. — 2020. — Vol. 11, no. 12. — P. 7053–7061. — **JIF = 2.9 (WoS)**. Общий объём статьи 0.6 п.л., личный вклад 0.3 п.л.
- A37. N.F. Naumenko, **К.В. Yushkov**, V.Ya. Molchanov. Extreme acoustic anisotropy in crystals visualized by diffraction tensor // The European Physical Journal Plus. — 2021. — Vol. 136, no. 1. — P. 95. — **JIF = 2.7 (WoS)**. Общий объём статьи 1.0 п.л., личный вклад 0.6 п.л.

- A38. S.N. Mantsevich, **К.В. Yushkov**. Optimization of piezotransducer dimensions for quasicollinear paratellurite AOTF // Ultrasonics. — 2021. — Vol. 112. — P. 106335. — **JIF = 3.8 (WoS)**. Общий объём статьи 0.5 п.л., личный вклад 0.2 п.л.
- A39. А.И. Чижиков, Н.Ф. Науменко, **К.В. Юшков**, В.Я. Молчанов, А.А. Павлюк. Акустооптическая модуляция поляризации в моноклинных кристаллах // Квантовая электроника. — 2021. — Т. 51, № 4. — С. 343–347. — **IF = 0.906 (РИНЦ)**. Общий объём статьи 0.3 п.л., личный вклад 0.2 п.л.
Переводная версия: А.И. Chizhikov, N.F. Naumenko, **К.В. Yushkov**, V.Ya. Molchanov, A.A. Pavlyuk. Acousto-optic modulation of polarization in monoclinic crystals // Quantum Electronics — 2021. — Vol. 51, no. 4. — P. 343–347. — **JIF = 1.194 (WoS)**. Общий объём статьи 0.3 п.л., личный вклад 0.2 п.л.
- A40. V.Ya. Molchanov, **К.В. Yushkov**, P.V. Kostyukov, P.B. Gornostaev, and N.S. Vorobiev. Measurement of amplified binary-modulated chirped laser pulses generated by different acousto-optic pulse shaping algorithms // Optics & Laser Technology. — 2021. — Vol. 142. — P. 107220. — **JIF = 4.6 (WoS)**. Общий объём статьи 0.6 п.л., личный вклад 0.4 п.л.
- A41. **К.В. Юшков**, В.Я. Молчанов, Е.А. Хазанов. Соотношение неопределённости для модулированных широкополосных лазерных импульсов // Успехи физических наук. — 2021. — Т. 191, № 8. — С. 874–881. — **IF = 2.877 (РИНЦ)**. Общий объём статьи 0.5 п.л., личный вклад 0.3 п.л.
Переводная версия: **К.В. Yushkov**, V.Ya. Molchanov, E.A. Khazanov. Uncertainty relation in broadband laser pulse shaping // Physics–Uspekhi — 2021. — Vol. 64, no. 4. — P. 828–835. — **JIF = 2.943 (WoS)**. Общий объём статьи 0.5 п.л., личный вклад 0.3 п.л.
- A42. **К.В. Yushkov**. Noncritical acousto-optic Bragg phase matching: Analysis of orthorhombic and monoclinic crystal systems // Applied Optics. — 2021. — Vol. 60, no. 27. — P. 7113–7121. — **JIF = 1.7 (WoS)**. Общий объём статьи 0.6 п.л.
- A43. **К.В. Yushkov**, N.F. Naumenko. Optical beam diffraction tensor in birefringent crystals // Journal of Optics. — 2021. — Vol. 23, no. 9. — P. 095602. — **JIF = 2.0 (WoS)**. Общий объём статьи 0.7 п.л., личный вклад 0.5 п.л.
- A44. А.И. Чижиков, А.В. Mukhin, N.A. Egorov, V.V. Gurov, V.Ya. Molchanov, N.F. Naumenko, K.V. Vorontsov, **К.В. Yushkov**, N.G. Zakharov. High-efficient KYW

- acousto-optic Q-switch for a Ho:YAG laser // Optics Letters. — 2022. — Vol. 47, no. 5. — P. 1085–1088. — **JIF = 3.1 (WoS)**. Общий объём статьи 0.3 п.л., личный вклад 0.1 п.л.
- A45.* **К.В. Yushkov**, N.F. Naumenko, V.Ya. Molchanov. Analysis of acousto-optic figure of merit in KGW and KYW crystals // Materials. — 2022. — Vol. 15, no. 22. — P. 8183. — **JIF = 3.1 (WoS)**. Общий объём статьи 0.8 п.л., личный вклад 0.5 п.л.
- A46.* **К.В. Yushkov**, G.D. Slinkov, V.V. Gurov, V.Ya. Molchanov. Characterization and alignment of acousto-optic devices using digital tailored RF waveforms // Applied Optics. — 2022. — Vol. 61, no. 17. — P. 5144–5151. — **JIF = 1.7 (WoS)**. Общий объём статьи 0.5 п.л., личный вклад 0.2 п.л.
- A47.* S.N. Mantsevich, V.I. Balakshy, **К.В. Yushkov**, V.Ya. Molchanov, S.A. Tretiakov. Quasi-collinear AOTF spectral transmission under temperature gradients aroused by ultrasound power absorption // IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control. — 2022. — Vol. 69, no. 12. — P. 3411–3421. — **JIF = 3.0 (WoS)**. Общий объём статьи 0.7 п.л., личный вклад 0.2 п.л.
- A48.* **К.В. Юшков**, А.И. Чижиков, В.Я. Молчанов. Об интерференции фемтосекундных лазерных импульсов при неколлинеарном акустооптическом взаимодействии // Квантовая электроника. — 2023. — Т. 53, № 7. — С. 527–532. — **IF = 0.906 (РИНЦ)**. Общий объём статьи 0.4 п.л., личный вклад 0.3 п.л.
- Переводная версия: **К.В. Yushkov**, А.И. Chizhikov, V.Ya. Molchanov. On interference of femtosecond laser pulses during noncollinear acousto-optic interaction // Bulletin of the Lebedev Physical Institute — 2023. — Vol. 50, suppl. 11. — P. S1191–S1199. — **JIF = 0.6 (WoS)**. Общий объём статьи 0.4 п.л., личный вклад 0.3 п.л.
- A49.* **К.В. Yushkov**, А.И. Chizhikov, V.Ya. Molchanov. Acousto-optic transfer function control by a phased-array piezoelectric transducer // Photonics. — 2023. — Vol. 10, no. 10. — P. 1167. — **JIF = 2.1 (WoS)**. Общий объём статьи 0.8 п.л., личный вклад 0.6 п.л.

Препринты:

- A50.* **К.В. Yushkov**, А.И. Chizhikov, V.S. Shcherbakova, V.Ya. Molchanov, V.N. Ginzburg, S.E. Stukachev, I.V. Yakovlev, А.А. Shaykin, Е.А. Khazanov. Dispersive Fourier Synthesis: Universal method and MATLAB tool for acousto-optic arbitrary femtosecond laser pulse shaping // Optica Open. — 2024. — Preprint 115346.

Патенты:

- A51.* В.Я. Молчанов, С.И. Чижиков, **К.Б. Юшков**, Ю.И. Китаев, Н.П. Солодовников. Двухкаскадная адаптивная дисперсионная линия задержки (варианты). — Патент на полезную модель RU 107868 U1 от 27.08.2011.
- A52.* В.Я. Молчанов, С.И. Чижиков, **К.Б. Юшков** Акустооптический коммутатор лазерных телекоммуникационных каналов из массива N магистральных каналов в массив M магистральных каналов. — Патент на полезную модель RU 149705 U1 от 20.01.2015.
- A53.* С.П. Аникин, В.Ф. Есипов, А.В. Ласкин, О.Ю. Макаров, В.Я. Молчанов, С.А. Потанин, А.М. Татарников, А.И. Чижиков, С.И. Чижиков, **К.Б. Юшков**. Акустооптический спектрополяриметр изображений с повышенным качеством спектральных срезов изображений и увеличенной светосилой. — Патент на изобретение RU 2569907 C1 от 10.12.2015.
- A54.* **К.Б. Юшков**, В.Я. Молчанов, С.И. Чижиков. Акустооптический преобразователь поляризации лазерного излучения (варианты). — Патент на изобретение RU 2613943 C1 от от 22.03.2017.
- A55.* В.Я. Молчанов, С.И. Чижиков, **К.Б. Юшков**. Акустооптическая электронно-управляемая мягкая лазерная диафрагма (варианты). — Патент на изобретение RU 2622243 C1 от 13.06.2017.
- A56.* В.Я. Молчанов, С.И. Чижиков, **К.Б. Юшков**. Устройство для измерения переходных характеристик оптических усилителей. — Патент на изобретение RU 2650854 C1 от 17.04.2018.
- A57.* В.Я. Молчанов, С.И. Чижиков, **К.Б. Юшков**. Устройство для адаптивного временного профилирования ультракоротких лазерных импульсов. — Патент на изобретение RU 2687513 C1 от 14.05.2019.
- A58.* В.Я. Молчанов, **К.Б. Юшков**, Н.Ф. Науменко, А.И. Чижиков, В.В. Гуров, Н.Г. Захаров, А.А. Павлюк. Способ модуляции лазерного излучения и устройство для его осуществления. — Патент на изобретение RU 2699947 C1 от 11.09.2019.
- A59.* В.Я. Молчанов, **К.Б. Юшков**, А.Н. Даринский, Н.Ф. Науменко, А.И. Чижиков, В.В. Гуров. Акустооптический лазерный затвор с выводом тепловой энергии из резонатора лазера. — Патент на изобретение RU 2751445 C1 от 13.07.2021.

- A60.* В.Я. Молчанов, **К.Б. Юшков**, П.В. Кострюков. Способ компенсации сужения спектра излучения в лазерном регенеративном усилителе и устройство для его осуществления. — Патент на изобретение RU 2751446 С1 от 13.07.2021.
- A61.* В.Я. Молчанов, В.В. Гуров, Н.Ф. Науменко, А.И. Чижиков, **К.Б. Юшков**. Акустооптическое устройство 2D отклонения и сканирования неполяризованного лазерного излучения на одном кристалле. — Патент на изобретение RU 2755255 С1 от 14.09.2021.
- A62.* В.Я. Молчанов, Н.Ф. Науменко, А.И. Чижиков, **К.Б. Юшков**, Н.Г. Захаров. Лазерный источник с управляемой поляризацией излучения. — Патент на изобретение RU 2778035 С1 от 12.08.2022.
- A63.* В.Я. Молчанов, Д.В. Обыденнов, **К.Б. Юшков**. Способ формирования двухцветного кольцевого лазерного поля и устройство для его осуществления (варианты). — Патент на изобретение RU 2785799 С1 от 13.12.2022.
- A64.* В.Я. Молчанов, Д.В. Обыденнов, **К.Б. Юшков**. Оптическая ловушка. — Патент на изобретение RU 2795383 С1 от 03.05.2023.
- A65.* **К.Б. Юшков**, А.И. Чижиков, В.Я. Молчанов, Е.А. Хазанов. Бихроматический акустооптический дефлектор. — Патент на изобретение RU 2825813 С1 от 30.08.2024.
- A66.* В.Я. Молчанов, **К.Б. Юшков**, А.И. Чижиков. Акустооптическое устройство частотно-фазового формирования конических двойных кольцевых полей для темных оптических ловушек. — Патент на изобретение RU 2829442 С1 от 30.10.2024.

Программы для ЭВМ:

- A67.* **К.Б. Юшков**. Шейпер. — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011614614 от 10.06.2011, РФ, 2011.
- A68.* **К.Б. Юшков**. Программа синтеза произвольных функций пропускания акустооптического фильтра. — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614750 от 28.04.2015, РФ, 2015.
- A69.* **К.Б. Юшков**. Программа управления акустооптическими модуляторами в режиме селектора фемтосекундных импульсов. — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015619786 от 15.09.2015, РФ, 2015.
- A70.* В.В. Романов, **К.Б. Юшков**, О.Ю. Макаров. Управление двухкаскадной акустооптической дисперсионной линией задержки (ТАХИОН 1.0). — Свидетельство

о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015662727 от 30.11.2015, РФ, 2015.

A 71. **К.Б. Юшков.** ФемтоРеплика. — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016615291 от 19.05.2016, РФ, 2016.

A 72. **К.Б. Юшков, О.Ю. Макаров.** Программа расчета согласующей цепи акусто-оптической дисперсионной линии задержки. — Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016662612 от 16.11.2016, РФ, 2016.

A 73. **К. Yushkov.** Acousto-Optic Dispersive Delay Line programmer via Dispersive Fourier Synthesis (AODDL_DFS). — Mendeley Data, Version 1, published 09.03.2021. — <http://dx.doi.org/10.17632/zpr89hvp6g.1>.

A 74. **К. Yushkov, V. Molchanov.** Randomized Muptiple Independent Comb Shaping (RandoMICS). — Code Ocean, Version 1.0, published 10.03.2021. — <http://dx.doi.org/10.24433/CO.9244214.v1>.

A 75. **К. Yushkov.** Optical beam diffraction tensor. — Code Ocean, Version 1.0, published 15.06.2021. — <http://dx.doi.org/10.24433/CO.4800178.v1>.

A 76. **К. Yushkov, G. Slinkov.** MATLAB tool for characterization and alignment of acousto-optic devices using digital tailored RF waveforms. — Code Ocean, Version 1.0, published 15.04.2022. — <http://dx.doi.org/10.24433/CO.0803469.v1>.

A 77. **К. Yushkov.** Dispersive Fourier Synthesis: Universal method and MATLAB tool for acousto-optic arbitrary femtosecond laser pulse shaping. — Code Ocean, Version 1.1, published 03.09.2024. — <http://dx.doi.org/10.24433/CO.2975414.v1>.

Список литературы

1. D.T. Reid, C.M. Heyl, R.R. Thomson et al. Roadmap on ultrafast optics // J. Opt. — 2016. — Vol. 18, no. 9. — P. 093006.
2. В.Я. Молчанов, А.И. Колесников, Ю.И. Китаев и др. Теория и практика современной акустооптики. — М. : МИСИС, 2015. — С. 459. — ISBN: 978-5-87623-483-4.
3. В.И. Балакший, В.Н. Парыгин, Л.Е. Чирков. Физические основы акустооптики. — М. : Радио и связь, 1985. — С. 289.
4. Design and Fabrication of Acousto-Optic Devices / Ed. by A. Goutzoulis, D. Pape. — New York : Marcel Dekker, 1994. — P. 497. — ISBN: 0-8247-8930-X.

5. В.Э. Пожар, В.И. Пустовойт. О сжатии ультракоротких импульсов света // Квант. электрон. — 1987. — Т. 14, № 4. — С. 811–813.
6. P. Tournois. Acousto-optic programmable dispersive filter for adaptive compensation of group delay time dispersion in laser systems // Opt. Commun. — 1997. — Vol. 140, no. 4–6. — P. 245–249.
7. V.Ya. Molchanov, S.I. Chizhikov, O.Yu. Makarov et al. Adaptive acousto-optic technique for femtosecond laser pulse shaping // Appl. Opt. — 2009. — Vol. 48, no. 7. — P. C118–C124.
8. F. Verluise, V. Laude, J.-P. Huignard et al. Arbitrary dispersion control of ultrashort optical pulses with acoustic waves // J. Opt. Soc. Am. B. — 2000. — Vol. 17, no. 1. — P. 138–145.
9. Р.И. Илькаев, С.Г. Гаранин. Исследование проблем термоядерного синтеза на мощных лазерных установках // Вестник РАН. — 2006. — Т. 76, № 6. — С. 503–515.
10. С.Ю. Гуськов. Быстрое зажигание мишеней инерциального синтеза // Физика плазмы. — 2013. — Т. 39, № 1. — С. 3–59.
11. K.D. Chesnut, C.P.J. Barty. Ideal spatio-temporal pulse distribution for exawatt-scale lasers based on simultaneous chirped beam and chirped pulse amplification // Opt. Express. — 2023. — Vol. 31, no. 4. — P. 5687–5698.
12. D. Strickland, G. Mourou. Compression of amplified chirped optical pulses // Opt. Commun. — 1985. — Vol. 56, no. 3. — P. 219–221.
13. А. Пискарскас, А. Стабинис, А. Янкаускас. Фазовые явления в параметрических усилителях и генераторах сверхкоротких импульсов света // УФН. — 1986. — Т. 150, № 1. — С. 127–143.
14. S. Backus, C.G. Durfee, M.M. Murnane, H.C. Kapteyn. High power ultrafast lasers // Rev. Sci. Instrum. — 1998. — Vol. 69, no. 3. — P. 1207–1223.
15. A. Monmayrant, S. Weber, B. Chatel. A newcomer's guide to ultrashort pulse shaping and characterization // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. — 2010. — Vol. 43, no. 10. — P. 103001.
16. A.M. Weiner. Ultrafast optical pulse shaping: A tutorial overview // Opt. Commun. — 2011. — Vol. 284, no. 15. — P. 3669–3692.
17. P. Agostini, L.F. DiMauro. The physics of attosecond light pulses // Rep. Prog. Phys. — 2004. — Vol. 67, no. 6. — P. 813–855.

18. S.-H. Shim, D.B. Strasfeld, M.T. Zanni. Generation and characterization of phase and amplitude shaped femtosecond mid-ir pulses // *Opt. Express.* — 2006. — Vol. 14, no. 26. — P. 13120–13130.
19. R. Maksimenka, P. Nuernberger, K.F. Lee et al. Direct mid-infrared femtosecond pulse shaping with a calomel acousto-optic programmable dispersive filter // *Opt. Lett.* — 2010. — Vol. 35, no. 21. — P. 3565–3567.
20. S. Kaim, S. Mokhov, B.Y. Zeldovich, L.B. Glebov. Stretching and compressing of short laser pulses by chirped volume Bragg gratings: analytic and numerical modeling // *Opt. Eng.* — 2014. — Vol. 53, no. 5. — P. 051509.
21. B. Dana, L. Lobachinsky, A. Bahabad. Spatiotemporal coupled-mode theory in dispersive media under a dynamic modulation // *Opt. Commun.* — 2014. — Vol. 324. — P. 165–167.
22. Y. Sivan, S. Rozenberg, A. Halstuch. Coupled-mode theory for electromagnetic pulse propagation in dispersive media undergoing a spatiotemporal perturbation: Exact derivation, numerical validation, and peculiar wave mixing // *Phys. Rev. B.* — 2016. — Vol. 93, no. 14. — P. 144303.
23. D. Pestov, V.V. Lozovoy, M. Dantus. Multiple Independent Comb Shaping (MICS): Phase-only generation of optical pulse sequences // *Opt. Express.* — 2009. — Vol. 17, no. 16. — P. 14351–14361.
24. В.И. Балакший. Акустооптическая ячейка как фильтр пространственных частот // *Радиотехн. электрон.* — 1984. — Т. 29, № 8. — С. 1610–1616.
25. А.Г. Хаткевич. Дифракция и распространение пучков ультразвукового излучения в монокристаллах // *Акуст. журн.* — 1978. — Т. 24, № 1. — С. 108–115.
26. К.В. Yushkov, М.И. Kupreychik, D.V. Obydenov, V.Ya. Molchanov. Acousto-optic k -space filtering for multifrequency laser beam shaping // *J. Opt.* — 2023. — Vol. 25, no. 1. — P. 014002.
27. D.V. Obydenov, К.В. Yushkov, V.Ya. Molchanov. Ring-shaped optical trap based on acousto-optic tunable spatial filter // *Opt. Lett.* — 2021. — Vol. 46, no. 18. — P. 4494–4497.
28. D.V. Obydenov, К.В. Yushkov, V.Ya. Molchanov. Independent multicolored bottle beam generation using acousto-optic spatial shaping of a femtosecond laser beam // *Opt. Lett.* — 2023. — Vol. 48, no. 20. — P. 5320–5323.