

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

д.ф.-м.н., доцента Потёмкина Фёдора Викторовича на диссертационную работу Юшкова Константина Борисовича «Дисперсионное акустооптическое управление фемтосекундными лазерными импульсами», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальностям 1.3.4. Радиофизика, 1.3.6. Оптика.

Основным направлением диссертационной работы являются акустооптические (АО) методы управления пространственными и спектрально-временными характеристиками лазерного излучения сверхкороткой длительности. **Актуальность** темы исследования обусловлена следующим. АО программируемые дисперсионные фильтры (АОПДФ) известны с начала 2000-х годов и широко применяются в фемтосекундной лазерной технике для адаптивной коррекции дисперсий контроля спектральных и временных параметров ультракоротких импульсов. Тем не менее, важные теоретические и практические аспекты применения АОПДФ, позволяющие в полной мере реализовать их потенциал по управлению фемтосекундным лазерным излучением, оставались недостаточно исследованными. Существовавшие алгоритмы управления АОПДФ были разработаны на основе упрощенной физической модели и служили только для управления дисперсиями, что не позволяло использовать АОПДФ как полноценные широкополосные спектральные фильтры с программируемой амплитудно-фазовой функцией пропускания. Кроме того, в работе рассмотрены применения АО-фильтров с программируемой функцией пропускания для задач спектрального анализа, дистанционного зондирования и биофотоники, также являющихся актуальными направлениями прикладной оптики.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Введение содержит подробное описание области исследования, актуальности, цели и задач исследования, методов, научной новизны и практической значимости, апробации работы и личного вклада автора.

Первая глава диссертации посвящена обзору применений акустооптических приборов в оптике ультракоротких лазерных импульсов. В главе рассматриваются основные типы акустооптических приборов, применяемые в оптике ультракоротких импульсов. К оригинальным результатам главы относятся: разработка системы управления импульсными последовательностями на основе АО-модуляторов для лазерного драйвера фотоинжекторов; новый принцип когерентного сложения ультракоротких импульсов при одновременной АО-дифракции двух лазерных пучков; анализ особенностей квазиколлинеарной геометрии АО-дифракции в различных кристаллических системах, включая двухосные кристаллы. Также в первой главе рассмотрена задача нахождения оптимальных параметров квазиколлинеарной дифракции для применения в АОПДФ.

Вторая глава посвящена теоретическому исследованию акустооптической дифракции ультракоротких лазерных импульсов. Основное внимание уделяется волновой теории АО-дифракции. Проводится анализ дифракции в однородном акустическом поле, включая вывод укороченных уравнений методом медленно меняющихся амплитуд, исследование аналитических решений, численное моделирование дифракции для различных наборов параметров в первом приближении теории дисперсии. Отдельно рассматривается случай дифракции при сильной перемодуляции, когда предсказывается эффект расщепления ультракороткого импульса и проводится его численное моделирование. Данная глава представляет собой фундаментальное исследование теоретических аспектов взаимодействия ультракоротких лазерных импульсов с акустическими волнами в различных условиях.

Третья глава посвящена разработке универсального метода формирования произвольных комплекснозначных функций пропускания акустооптических фильтров. Оригинальный метод дисперсионного Фурье-синтеза (ДФС) выводится на основании аналитических решений для непрерывных линейно частотно модулированных (ЛЧМ) сигналов и фундаментальных ограничений теории информации для дискретных сигналов. Показано, что для ЛЧМ-сигналов с произвольной модуляцией спектральной амплитуды выполняются соотношения неопределенности между спектральным разрешением и контрастом модуляции. На основании результатов теоретического анализа разработан численный алгоритм ДФС, реализованный в виде управляющих программ на языках MATLAB и LabVIEW. Предложены оригинальные методы калибровки и измерения спектрального разрешения АОПДФ.

Четвертая глава посвящена практическим применениям АОПДФ и алгоритма ДФС в фемтосекундной лазерной технике. Рассмотрены четыре основных применения: внутривибраторная коррекция коэффициента усиления регенеративного усилителя на неодимовом стекле; разработка и создание комплекса АО дисперсионного управления для петаваттной лазерной установки; методы программируемого синтеза последовательностей ультракоротких импульсов, формирование произвольных временных огибающих на основе спектральной модуляции chirпированных импульсов.

В пятой главе диссертации представлено отдельное направление исследований, посвященное адаптивной спектральной обработке некогерентных световых полей. Автор успешно обобщает метод ДФС на случай некогерентного оптического излучения, что существенно расширяет область применения разработанных ранее подходов и выводит их за пределы оптики ультракоротких импульсов. Оригинальным вкладом является разработка методов адаптивной пространственной фильтрации лазерных пучков с использованием широкоапертурных АО-фильтров, что открывает новые перспективы применений в области оптических ловушек и биофотоники.

Автор выполнил большой объём исследований. Все исследования, представленные в диссертационной работе, проводились на основе оригинальных экспериментальных схем. Основные положения диссертации прошли апробацию в научной периодической печати и на крупных российских и международных конференциях. Результаты исследований, вошедших в работу, опубликованы в 77 работах, в том числе в 49 статьях в рецензируемых журналах, 1 препринте, 16 патентах РФ и 11 программах для ЭВМ. Положения, выносимые на защиту, и выводы диссертации обоснованы высоким научно-техническим уровнем экспериментов, проведенных автором, и глубокими знаниями диссертанта в области современной акустооптики. Таким образом, **представленные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации надежно обоснованы.**

К наиболее **важным и значимым результатам, определяющим научную новизну работы**, на мой взгляд, можно отнести следующие результаты:

1. Впервые продемонстрирована управляемая интерференция при неколлинеарном акустооптическом взаимодействии двух фемтосекундных лазерных пучков.
2. Впервые продемонстрирован метод генерации случайных спектрально-независимых гребёнок лазерных импульсов на основе акустооптического фильтра с возможностью значительного снижения амплитуды паразитных максимумов на огибающей импульса.
3. Впервые экспериментально показано, что использование неколлинеарного акустооптического перестраиваемого фильтра в качестве синтезатора про-

пространственных частот лазерного пучка позволяет реализовать динамически управляемое формирование кольцевых лазерных полей и аксиально симметричных распределений интенсивности.

Научная и практическая значимость полученных результатов обусловлена возможностью создания на основе разработанного метода акустооптической амплитудно-фазовой спектральной модуляции фемтосекундного лазерного излучения перестраиваемого источника терагерцевого излучения. Предложенные автором методы программируемого акустооптического управления отдельными импульсами, формирования и корректировка формы цугов импульсов могут найти своё применение в области микрообработки материалов, а также могут быть полезны для разработки новых методов спектроскопии, в том числе спектроскопии комбинационного рассеяния с возможностью подавления нерезонансного фона при использовании жёстко детерминированной по времени последовательности ультракоротких лазерных импульсов. Разработанные адаптивные методы спектрального управления фемтосекундным лазерным излучением могут стать основой современных подходов в гиперспектральном анализе и пространственной фильтрации изображений.

Результаты экспериментальных исследований получены с опорой на современную элементную базу радиоэлектроники с использованием современных лазерных систем и оборудования в сочетании с компьютеризированными вычислительными методами синтеза ВЧ-радиосигналов и цифровых программируемых генераторов для их формирования, а также находятся в согласии с расчётами. При выполнении экспериментальной части диссертационной работы отдельное внимание уделено повторяемости регистрируемых эффектов, что **обеспечило необходимый уровень достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

Автореферат соответствует тексту и содержанию диссертационной работы.

По диссертационной работе К.В. Юшкова имеются следующие замечания:

1. Во введении ограничение применимости рассматриваемых акустооптических методов созданием мощных лазерных систем ультракоротких импульсов неполно определяет актуальность выбранной тематики.
2. По тексту диссертации не всегда можно понять место полученных результатов в мировой науке. Стиль изложения очень лаконичен, но правильные акценты отсутствуют. Исследования по главам выглядят достаточно разрозненно, а связкой служат рассматриваемые акустооптические явления.
3. В рассматриваемых моделях для описания АО-дифракции широкополосного лазерного излучения применяется метод медленноменяющихся амплитуд, имеющий ограниченную применимость для сверхкоротких лазерных импульсов. Существенным недостатком видится отсутствие каких-либо ограничений на количество циклов поля под огибающей лазерного импульса при АО дифракции.
4. Существование дефлекторов лазерных пучков на акустооптических решётках известно очень давно. Возникает резонный вопрос об оригинальности предлагаемых автором подходов. Значимых сравнений в диссертации не приводится, что, конечно, выглядит, как недостаток работы. За рамками обсуждаемых вопросов остаётся выбор материала АО-модулятора – вся диссертация сосредоточена на экспериментальном применении парателлурита (несмотря на то, что теоретические расчёты выполнены и для других АО кристаллов, но не для всего круга явлений, обсуждаемых в диссертации).

ции, а лишь для части). Расширение развиваемых в диссертации методов на материалы с увеличенной в ИК областью прозрачности могло бы свидетельствовать об универсальности разработанных подходов с потенциалом их применения в широком спектральном диапазоне от видимого до среднего ИК.

5. Из работы неясен масштаб полученных результатов. Известны результаты академика С.Н. Багаева и Ж. Муру по когерентному сложению лазерных пучков – ключевой задачи в области генерации сверхсильного светового поля и их фундаментальных приложений. Автор диссертации не формулирует ограничения, существующие при когерентном сложении пучков, что не позволяет широко оценить достигнутые результаты. Автор сразу же приступает к обсуждению реализации идеи АО когерентного сложения лазерных пучков, но при этом не ясны начальные условия. Какие параметры лазерного излучения – частота повторения, длительность, интенсивности и плотности энергии, сосредоточенные в одном лазерном пучке, предполагается использовать для многопучковой геометрии? Также не обсуждаются вопросы нелинейных свойств рассматриваемых материалов и возможных нелинейных эффектов и методов борьбы с ними, что может быть «узким местом» в попытке реализовать такой подход на практике. При этом рассматривается влияние тепловых градиентов на искажение аппаратной функции АОДЛЗ, что в этой задаче может стать менее выраженным эффектом значительно по сравнению с нелинейными искажениями фазы. Отсюда остаётся непонятен вектор развития этого направления и работы в целом.
6. В главе 5.1.2, посвященной описанию экспериментального исследования применения разработанных подходов по синтезу функций пропускания АО-фильтров для управления спектральными характеристиками некогерентного широкополосного источника, никак не характеризуются поляризационные свойства выходного излучения. Для целого ряда применений важность сохранения естественной поляризации источника принципиально, а применение АО-фильтров может создавать частичную поляризацию выходного излучения.
7. Вывод №3 в главе 4 (стр. 232) сформулирован безосновательно. Соответствующая информация в тексте диссертации отсутствует.
8. К значимым недостаткам работы также можно отнести то, что защищаемые положения не фиксируют границ их применимости.
9. Текст диссертационной работы не свободен от жаргонизмов, сокращений (не всегда уместных), что значительно усложняет её прочтение, а местами и вообще не позволяет понять физики рассматриваемых явлений и процессов. Например, «АО-дифракции УКИ» – дифракции могут быть подвержены волны, лазерные пучки, но никак не импульсы; «В задачах численной оптимизации использованы стохастические методы» – не понятно, что оптимизировалось и по каким параметрам; «частотосдвигатели», «эквализация спектра», «перестраиваемой цилиндрической линзы», «в пигтейлированном исполнении», «физического коэффициента усиления»; в подписях к Рис. 4.4 «реф».

Приведенные выше замечания не умаляют научной значимости диссертации.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне и представляет собой систематическое научное исследование акустооптических эффектов, обеспечивающих необходимое управление за пространственными и спектрально-временными характеристиками широкополосного излучения. Совокупность результатов и положений, содержащихся в диссертации, позволяют квалифицировать ее как значительное достижение в акустооптике и оптоэлектронике.

Считаю, что представленная диссертация «Дисперсионное акустооптическое управление фемтосекундными лазерными импульсами» соответствует специальностям 1.3.4. Радиофизика (по физико-математическим наукам) и 1.3.6. Оптика (по физико-

математическим наукам), а также критериям, определённым пп. 2.1–2.5 «Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», предъявляемым к докторским диссертациям, и оформлена согласно приложениям № 8 и 9 к «Положения о совете по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова», а её автор — Юшков Константин Борисович — заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальностям 1.3.4. Радиофизика и 1.3.6. Оптика.

Официальный оппонент:

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

Потёмкин Фёдор Викторович

«19» мая 2025 года

Контактные данные:

Телефон: +7 (495) 939-30-89

E-mail: potemkin@physics.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена докторская диссертация:

1.3.19. Лазерная физика

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Адрес места работы:

119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Телефон: +7 (495) 939-31-60; e-mail: info.ff@org.msu.ru

Подпись Потёмкина Фёдора Викторовича УДОСТОВЕРЯЮ:

Учёный секретарь учёного совета

физического факультета

МГУ имени М.В. Ломоносова

д.ф.-м.н., доцент

С.Ю. Стремоухов