

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

**д.ф.-м.н., профессора Шандарова Станислава Михайловича  
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**

Темой диссертационной работы К.Б. Юшкова является акустооптическое управление фемтосекундным лазерным излучением. В отличие от других типов когерентного оптического излучения, фемтосекундные импульсы являются принципиально широкополосными, в то время как брэгговское акустооптическое взаимодействие, основанное на выполнении условий фазового синхронизма, в большинстве практических случаев является узкополосным. Это требует особых методов управления акустооптическими приборами, основанных на применении частотно-модулированных радиосигналов, и в свое время привело к созданию нового типа приборов – акустооптических дисперсионных линий задержки. Несмотря на достаточно широкое распространение данного типа приборов в лазерной технике, существовало лишь несколько публикаций, посвященных теории их работы и радиофизическим методам управления, используемым в них. Наличие существенного разрыва между практическим применением и теорией, а также фактическое отсутствие исследований, посвященных фундаментальным ограничениям, возникающим в новом типе приборов, определяет **актуальность** выбранной темы диссертации.

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

**Первая глава** диссертации носит вводный характер. В ней рассмотрены основные типы акустооптических приборов – модуляторы, дефлекторы и фильтры – и обсуждаются особенности их применения в фемтосекундных лазерных системах. Большая часть главы посвящена анализу квазиколлинеарной геометрии акустооптических фильтров, используемой в основе акустооптических дисперсионных линий задержки. Кроме того, экспериментально продемонстрировано существование эффекта управляемой интерференции при акустооптическом взаимодействии двух фемтосекундных лазерных пучков, при которой распределение энергии между интерференционными максимумами контролируется фазой ультразвуковой волны.

**Вторая глава** диссертации имеет теоретический характер. В главе подробно описан вывод нестационарных уравнений связанных мод методом медленно меняющихся амплитуд и приведены примеры решения данной системы уравнений. Показано, что линейность данной системы уравнений позволяет рассматривать их как обыкновенные уравнения связанных мод для спектральных компонент света с модифицированными коэффициентами связи и фазовой расстройки. Подробно рассмотрены два частных случая: дифракция ультракоротких импульсов в однородном акустическом поле в первом приближении теории дисперсии и дифракция в сильном поле при параметре Рамана-Ната, кратно превышающем оптимальное значение для узкополосного излучения. Результатом моделирования является теоретическое предсказание

эффекта расщепления одиночного фемтосекундного импульса на два с задержкой между ними, пропорциональной параметру Рамана-Ната.

В **третьей главе** диссертации излагается основополагающий экспериментальный метод, созданный в работе – метод дисперсионного Фурье-синтеза управляющих радиосигналов. Обосновывается необходимость применения преобразования Френеля для вычисления волновых радиочастотных волновых пакетов, обеспечивающих заданную функцию пропускания в акустооптических дисперсионных линиях задержки, что выносится на защиту в качестве отдельного положения. Ключевыми особенностями метода являются комплексность функции пропускания, то есть учитываться должна одновременно амплитудная и фазовая модуляция спектра дифрагированного излучения, ограниченная временная апертура фильтра и заданное спектральное окно пропускания, с применением методов дискретной математики для соответствия параметров синтезируемых радиосигналов характеристикам современных цифровых генераторов сигналов произвольной формы. В результате сформулировано «соотношение неопределенности для ЛЧМ-сигналов»: возможность максимизации произведения разрешения на контраст модуляции, которая достигается в случае двухкратного превышения ширины полосы фильтра диапазона изменения несущей частоты. Теоретический анализ в третьей главе дополнен экспериментальными результатами, касающимися вопросов калибровки и измерения характеристик акустооптических дисперсионных линий задержки.

В **четвертой главе** описаны различные применения акустооптических дисперсионных линий задержки в фемтосекундных лазерных системах. Во всех экспериментах использованы оригинальные акустооптические дисперсионные линии задержки, разработанные и созданные в НИТУ МИСИС. Основная часть главы посвящена различным методам синтеза сложных управляемых последовательностей фемтосекундных импульсов различными методами. В частности, подробно описан метод рандомизированных частотно-независимых гребенок (RandoMICS), основанный на применении псевдослучайной фазовой модуляции, и позволивший избавиться от паразитных интерференционных максимумов, характерных для других фазовых методов. Также в четвертой главе показано, что перенос спектральной модуляции из радиочастотного диапазона в оптический посредством акустооптической дифракции позволил на 3 порядка повысить полосу модулирующих частот.

В **пятой главе** метод дисперсионного Фурье-синтеза применен для задач обработки некогерентных широкополосных световых полей, в частности для спектрального анализа изображений и пространственной фильтрации пучков. Проанализированы такие особенности неколлинеарных акустооптических фильтров как топология двумерной передаточной функции и угловая дисперсия, что позволило оптимизировать параметры фильтров для работы с расширенным окном пропускания. Разработан формализм тензора дифракции оптических пучков в двулучепреломляющих кристаллах и показана взаимосвязь собственных значений этого тензора с топологией двумерной передаточной функции акустооптических фильтров. Важные прикладные результаты главы включают в себя описание усовершенствованного метода гиперспектрального анализа, основанного на адаптивном изменении ширины окна пропускания фильтра, и визуализацию фазовых объектов посредством одновременной спектральной и пространственной фильтрации пучка акустооптическим фильтром.

**Научная новизна** работы заключается в том, что разработанные экспериментальные методы впервые позволили рассматривать акустооптические фильтры не как полосовые электронно-перестраиваемые фильтры, а как оптические устройства с программируемой комплексной широкополосной функцией пропускания, в результате чего стала возможна прецизионная спектральная обработка как фемтосекундных лазерных импульсов, так и некогерентного оптического излучения.

Как экспериментально показано в четвертой и пятой главах диссертации, разработанный метод дисперсионного Фурье-синтеза применим к широкому кругу задач как в фемтосекундной лазерной физике, так и в оптике некогерентного излучения. К первым относятся такие применения как управление режимом работы регенеративных оптических усилителей, генерация терагерцового излучения, формирование сложных импульсных последовательностей. Ко вторым относятся методы адаптивной спектральной обработки широкополосного некогерентного излучения, включая гиперспектральный анализ и визуализацию фазовых объектов. Таким образом, полученные экспериментальные результаты подтверждают **достоверность** разработанных методов управления акустооптическими фильтрами и **практическую значимость** работы. Высокий уровень практической значимости также подтверждается 2-мя патентами на полезные модели и 14 патентами на изобретения по теме диссертации, полученными автором.

Автореферат соответствует тексту и содержанию диссертационной работы.

По сущности работы можно сделать следующие замечания:

1. Монокристаллы парателлурита, широко и плодотворно используемые К.Б. Юшковым в акустооптических устройствах, обладают естественной оптической активностью. В диссертации не обсуждаются вопросы, связанные с ее влиянием, или с отсутствием такого влияния, на характеристики используемых режимов акустооптического взаимодействия и на параметры соответствующих устройств.
2. Светозвукопроводы для применяемых в экспериментальных исследованиях акустооптических ячеек с уникальными характеристиками, разработанных в НИТУ МИСИС, как правило, имеют сложную конфигурацию, а направления акустооптического взаимодействия к оси  $[110]$  кристалла  $\text{TeO}_2$  (см., например, таблицу 1.3 на стр. 77) задаются в виде углов с неопределенной точностью ( $1.8^\circ$ ,  $3.8^\circ$ ,  $5^\circ$ ). Какова воспроизводимость параметров таких ячеек, и какую точность ориентации различных граней требовалось обеспечить?
3. Полагаю, что при представлении экспериментальных результатов К.Б. Юшков уделил недостаточное внимание описанию используемых методов их статистической обработки.

Несмотря на указанные замечания, диссертация К.Б. Юшкова заслуживает высокой оценки и выполнена на современном мировом уровне. В работе гармонично объединены радиофизические методы синтеза функций пропускания акустооптических фильтров и приложения данных методов в различных оптических задачах, что объясняет выбор двух смежных специальностей «Радиофизика» и «Оптика».

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, профессор,  
главный научный сотрудник научно-образовательного центра  
«Нелинейная оптика, нанофотоника и лазерные технологии»  
Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники

Шандаров Станислав Михайлович

«22» мая 2025 года

Контактные данные:

Телефон: +7 (3822) 41-38-87

E-mail: stanislav.m.shandarov@tusur.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена докторская диссертация:

01.04.03 — Радиофизика

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
Высшего образования «Томский государственный университет систем  
управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Адрес места работы:

634050, г. Томск, проспект Ленина, д. 40

Телефон: +7 (3822) 51-05-30; e-mail: office@tusur.ru

Подпись Шандарова Станислава Михайловича УДОСТОВЕРЯЮ:

Нач. общего отдела

С.В. Мощанская