

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу

Львова Кирилла Вячеславовича

«Динамика носителей заряда и генерация когерентного излучения фемтосекундными лазерными полями в газовых и конденсированных средах», представленную на соискание ученой степени кандидата

физико-математических наук

по специальности 1.3.19. Лазерная физика

Диссертационная работа К. В. Львова посвящена активно развивающейся области исследований нелинейно-оптических механизмов управления динамикой носителей зарядов и преобразования частот излучений в газовых и конденсированных средах при действии высокоинтенсивных фемтосекундных лазерных импульсов. В работе решаются весьма **актуальные** на сегодняшний день фундаментальные проблемы анализа механизмов динамики связанных и свободных носителей зарядов в полупроводниках и диэлектриках, а также способы управления параметрами суперконтинуума и генерацией гармоник при взаимодействии интенсивных лазерных импульсов ближнего и среднего ИК диапазона с веществом. Результаты работы могут найти целый ряд применений в **практических** задачах создания перестраиваемых источников когерентного излучения в различных спектральных областях, а также микромодификации материалов одиночными лазерными импульсами.

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы.

Во **Введении** обоснована актуальность работы, изложены цель и задачи исследования, приведены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена описанию современного состояния исследований по тематике диссертационной работы, что дает возможность сопоставить оригинальные результаты К. В. Львова с международным и российским уровнями.

**Во второй главе** детально описана теоретическая модель распространения интенсивных фемтосекундных лазерных импульсов в газах и конденсированных средах, использованная в работе. Скалярное нелинейное волновое уравнение в рамках данного подхода записывается в спектральной форме в приближении однонаправленного распространения и учитывает дисперсию среды, дифракцию, керровскую и плазменную нелинейности, фотоионизацию, нелинейное поглощение и связанную с ними динамику носителей заряда. Весьма детально описана схема численного решения уравнений модели.

**В третьей главе** более детально рассматривается динамика свободных носителей заряда в конденсированных средах при действии фемтосекундных лазерных импульсов. Здесь автором предложено обобщение известной многоскоростной модели, что связано с необходимостью более точного описания динамики населенности зоны проводимости. Введение дополнительного усредненного уровня энергии в зоне проводимости позволило учесть возможность дополнительного нагрева свободных носителей лазерным полем до энергий выше критической, необходимой для начала ударной ионизации. В уравнениях для ряда феноменологических параметров получены явные аналитические выражения, а также включены дисперсионные слагаемые, что позволило в итоге повысить точность расчетов до сравнимой со статистическими моделями.

**Четвертая глава** посвящена исследованию способов управления свойствами генерируемого суперконтинуума и гармоник низкого порядка путем вариации различных параметров: степени фокусировки импульса, интенсивности лазерного излучения и давления (в газах). Автором получено аналитическое выражение, которое определяет положение антистоксова

крыла суперконтинуума с учетом фазовой самомодуляции и плазменной модуляции излучения. В целях оптимизации эффективности генерации гармоник выявлены законы масштабирования фазовой модуляции и поглощения в зависимости от различных управляющих параметров. Кроме того, проведенный аналитический расчет нелинейных восприимчивостей газовых сред позволил проанализировать вклад различных компонент восприимчивости и каналов генерации гармоник.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы и выводы.

Автореферат правильно отражает содержание диссертационной работы.

Работа апробирована на международных и российских конференциях, а ее результаты опубликованы в престижных научных журналах, входящих в мировые и отечественные базы цитирования.

Среди основных достижений автора, обуславливающих **научную новизну** и **значимость** работы, необходимо выделить развитие оригинальных аналитических подходов для детального описания спектральных преобразований фемтосекундных лазерных импульсов в условиях фотоионизации среды, а также более точного и быстрого расчета динамики носителей зарядов. Примечательно, что при этом автору удалось выполнить непосредственный теоретический расчет ряда параметров, в особенности, нелинейных восприимчивостей произвольного порядка, которые обычно определяются феноменологически. В работе получен целый ряд нетривиальных результатов, например, показано, что в режиме лавинной ионизации формируется распределение свободных носителей заряда по энергии, форма которого не зависит от флюенса лазерного излучения и ширины запрещенной зоны среды, и определено универсальное асимптотическое значение кинетической энергии носителей после прохождения импульса.

Работа выполнена на высоком профессиональном уровне. К. В. Львов продемонстрировал широту научных взглядов, владение как математическим

аппаратом, так и разработкой схем численного моделирования. Полученные теоретические результаты находятся в согласии с известными экспериментами. Результаты и защищаемые научные положения обоснованы, достоверны и имеют соответствующее уровню кандидатской диссертации научное значение.

К сожалению, как и любой научный труд, работа не свободна от недостатков. Среди них отметим следующие:

1. Известно, что в области аномальной дисперсии групповой скорости, которая во многих нелинейно-оптических материалах находится в среднем ИК диапазоне, в условиях самофокусировки и формирования плазмы можно ожидать формирования оптических пульс, временная длительность которых может составлять до нескольких колебаний в импульсе. В связи с этим возникает вопрос, насколько данный эффект может повлиять на параметры суперконтинуума, а также на полученные в п.4.1 соотношения.

2. К сожалению, в работе не указаны технические условия, при которых достигается 20-ти кратное ускорение расчетов динамики зарядов согласно улучшенной многоскоростной модели по сравнению со статистическими подходами на основе уравнения Фоккера-Планка. Не очевидно, является ли этот показатель универсальным или зависит от языка программирования и конфигурации оборудования.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования и носят скорее характер рекомендаций.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М. В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.19. Лазерная физика (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова. Работа оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук,

на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

На основании вышеуказанного считаю, что соискатель Львов Кирилл Вячеславович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,  
директор Лаборатории радиационной биологии  
Международной межправительственной организации  
Объединенный институт ядерных исследований  
Бугай Александр Николаевич

Контактные данные: +7 (49621) 6-37-16, bugay@jinr.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация: 01.04.03 – радиофизика

Адрес места работы:

141980, Россия, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6

Подпись доктора физико-математических наук, директора Лаборатории радиационной биологии Международной межправительственной организации Объединенный институт ядерных исследований Бугая Александра Николаевича удостоверяю.

2 сентября 2024 г