

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук Румянцева Бориса Вадимовича
на тему: «Когерентное управление спектром генерации гармоник
высокого порядка при воздействии парой широкополосных импульсов
ближнего ИК, среднего ИК и терагерцевого диапазонов на газовую
среду» по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Диссертация Румянцева Бориса Вадимовича посвящена экспериментальному исследованию процесса генерации гармоник высокого порядка в двухцветной схеме генерации при воздействии на инертный газ высокоинтенсивного (100 ТВт/см^2) фемтосекундного лазерного излучения ближнего ИК диапазона (1.24 мкм), интенсивного (1 ТВт/см^2) излучения среднего ИК диапазона (4.5 мкм) и сильного (до 7.5 МВ/см) терагерцевого поля ($1\text{-}5 \text{ ТГц}$). **Актуальность** темы диссертационного исследования обусловлена её принадлежностью к активно развивающейся области физики сильного светового поля, характеризуемой воздействием на среду излучения с напряжённостью поля сравнимой с характерной внутриатомной напряжённостью. С момента своего открытия эффект генерации гармоник определил новый вектор развития современной физики, предоставив недостижимые ранее возможности для проведения фундаментальных и прикладных исследований по регистрации аттосекундной электронной динамики в веществе. Так, процесс генерации гармоник высокого порядка лежит в основе лазерных источников аттосекундного излучения, представляющих собой компактную альтернативу синхротронам и лазерам на свободных электронах, что открывает возможности для лабораторных исследований по время-разрешённой спектроскопии в мягком рентгеновском диапазоне. Подходы к управлению шириной и непрерывностью спектра гармоник, представленные в диссертационной работе, потенциально могут иметь **практическое значение** в рамках таких спектроскопических исследований, а также имеют **фундаментальную значимость** для

исследований по управлению аттосекундной динамикой электрона в лазерном поле.

Относительно структуры работы следует отметить следующее. Текст диссертации состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка работ автора и списка литературы. Объём работы составляет 128 страниц, имеется 41 рисунок и 2 таблицы. Список литературы содержит 195 ссылок.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, приведены цель и задачи исследования, сформулирована теоретическая и практическая значимость, приводится методология диссертационного исследования. Автор формулирует научную новизну и защищаемые положения, обосновывает достоверность результатов, приводит сведения об апробации исследования. Указаны личный вклад автора, приведены данные об объёме и структуре диссертации, а также список статей автора по теме диссертации.

В первой главе приведён обзор современного состояния исследования в области генерации гармоник высокого порядка, приведено описание используемых в работе теоретических методов и созданной экспериментальной установки.

Во второй главе описаны оригинальные экспериментальные результаты по оптимизации спектрально-энергетических характеристик гармоник при воздействии одноцветного лазерного излучения ИК диапазона на газовую струю аргона. Описаны экспериментально реализованные оптимизация эффективности генерации и расширение спектра гармоник высокого порядка на основе управления концентрацией атомов среды генерации, фазовой модуляции генерирующего излучения, сокращения его длительности, а также использования в качестве среды генерации гелия с высоким потенциалом ионизации. Наиболее ярким результатом данной главы является генерация излучения гармоник с энергиями фотонов вплоть до 170 эВ при воздействии излучения на длине волны 1.24 мкм на газовую струю гелия.

Третья глава посвящена описанию оригинальных экспериментальных результатов по генерации гармоник высокого и низкого порядков фемтосекундным лазерным излучением на длине волны 1.24 мкм в присутствии сильного (до 7.5 МВ/см) терагерцевого (1-5 ТГц) поля. Приведены экспериментально измеренные спектры гармоник, а также зависимости интенсивности гармоник от временной задержки между генерирующими импульсами. Приведено объяснение наблюдаемых эффектов на основе интерференционной модели формирования спектра гармоник. На основе численного моделирования рассмотрены возможности уширения спектра при добавлении терагерцевого поля, а также приведено краткое описание механизма расширения.

Четвёртая глава посвящена генерации гармоник высокого порядка двухцветным лазерным полем, состоящим из фемтосекундных лазерных импульсов ближнего (1.24 мкм) и среднего (4.5 мкм) ИК диапазонов. Рассмотрены случаи добавления сильного (относительная напряжённость $a = 0.1$) и слабого ($a \ll 1$) длинноволнового поля среднего ИК диапазона. Экспериментально показано, что добавление параллельно поляризованного слабого добавочного поля приводит к формированию комбинационных гармоник 1-го порядка. Показано, что управление углом между линейными поляризациями воздействующих полей позволяет пронаблюдать формирование комбинационных гармоник 2-го порядка. Наблюдаемые в эксперименте эффекты объяснены на основе оригинальной интерференционной модели и поддержаны моделированием на основе численного решения нестационарного уравнения Шрёдингера. Также экспериментально показано, что расширение спектра гармоник достигается при добавлении сильного ($a = 0.1$) поля среднего ИК диапазона с линейной поляризацией, параллельной поляризации излучения ближнего ИК диапазона. Приведено объяснение механизма наблюдаемого расширения спектра на основе трёхступенчатой модели с учётом квантовых эффектов.

В заключении указаны основные результаты диссертационной работы.

Научная новизна и уникальность диссертационной работы определяются тем, что в ней впервые в рамках экспериментов по генерации гармоник высокого порядка задействован чрезвычайно широкий спектральный диапазон сверхкороткого излучения фемтосекундного уровня длительности – начиная от терагерцевых частот и заканчивая мягким рентгеновским диапазоном. Положительной отличительной чертой работы является тот факт, что при общей экспериментальной направленности исследования автор также приводит теоретическое объяснение механизмов наблюдаемых эффектов.

Научная значимость работы определяется фундаментальными научными результатами, полученными впервые. Так, в работе показано, что нарушение симметрии электронных траекторий под действием добавочного сильного (до 7.5 МВ/см) терагерцевого ($1\text{--}5 \text{ ТГц}$) поля при генерации гармоник высокого порядка интенсивным (100 ТВт/см^2) лазерным излучением ближнего ИК диапазона (1.24 мкм) в аргоне приводит к появлению чётных и уменьшению интенсивности нечётных гармоник в спектре генерируемого излучения. Также автор показал, что при двухцветной генерации гармоник высокого порядка с использованием интенсивного излучения ближнего (1.24 мкм , 100 ТВт/см^2) и среднего (4.5 мкм , 1 ТВт/см^2) ИК диапазонов управление шириной спектра гармоник и формированием комбинационных частот может быть осуществлено путём изменения интенсивности излучения среднего ИК диапазона, а также за счёт изменения угла между линейными поляризациями воздействующих полей. Установлено, что наблюдаемый в эксперименте эффект формирования комбинационных частот объясняется изменением моментов рекомбинации генерирующего электрона. На основе численного моделирования показано, что расширение спектра гармоник при добавлении поля среднего ИК диапазона объясняется изменением динамики ионизации, рекомбинации и движения генерирующего электрона.

В дополнение к научной значимости работа обладает и очевидной **практической значимостью**, которая заключается в создании первого в Российской Федерации источника широкополосного когерентного излучения вплоть до мягкого рентгеновского диапазона (200 эВ, 6.2 нм) на основе эффекта генерации гармоник высокого порядка.

Результаты диссертации опубликованы в научных изданиях «Physical Review A» и «Письма В ЖЭТФ», а также были доложены на ряде международных конференций. Защищаемые положения и выводы диссертационной работы **обладают научной новизной**, что обусловлено продемонстрированной экспериментальной регистрацией новых эффектов в области физики генерации гармоник высокого порядка. Защищаемые положения и выводы диссертации являются **обоснованными**, поскольку они напрямую следуют из описанных в диссертации экспериментальных результатов, согласующихся с результатами численного моделирования. **Достоверность защищаемых положений и выводов** диссертации подтверждается воспроизводимостью экспериментальных данных, использованием надёжных экспериментальных и теоретических подходов, а также непротиворечием имеющимся научным данным.

Имеются следующие замечания:

1. В работе не приводятся объяснения ряда интересных экспериментальных результатов. Так, во второй главе:

а) измерена зависимость доли ионизованных атомов среды от давления газа (рис.9). Обычно в экспериментах по ГТВП предполагается, что такая зависимость отсутствует.

б) для протяженной мишени (7.1 мм) наблюдается супер-квадратичная зависимость эффективности генерации гармоник от давления (табл. 2).

Оба результата могут свидетельствовать о самовоздействии генерирующего импульса. Отметим, что наблюдение супер-квадратичного роста сигнала гармоник в [J. Seres и др., Nat. Phys. 6, 455 (2010)] вызвало оживленное обсуждение [S. Kazamias и др., Nat. Phys. 6, 927 (2010); S.

Kazamias, и др., Phys. Rev. A 83, 063405 (2011); J. Seres, и др., Nat. Phys. 6, 928 (2010)], свидетельствующее о перспективности таких исследований.

2. При рассмотрении эффектов фазового синхронизма не учитывается зависимость фазы гармоник от интенсивности генерирующего излучения. В случае генерирующего излучения в среднем ИК-диапазоне, рассматриваемом в работе, такая зависимость сильнее, чем для ранее исследовавшего случая генерирующего поля в ближнем ИК: коэффициент пропорциональности между фазой и интенсивностью растет приблизительно как куб длины волны генерирующего поля. Поэтому исследование роли зависимости фазы гармоник от интенсивности генерирующего поля было бы весьма уместным в работе.

3. В третьей и четвертой главе развивается модель ГТВП в немонохроматическом поле, основанная на модификации классических электронных траекторий на последовательных полупериодах поля. Возможно, наблюдаемые экспериментальные закономерности могли бы быть объяснены проще в рамках многочисленных предложенных ранее квантовомеханических теорий ГТВП в немонохроматическом поле [H. Eichmann, et al., Phys. Rev. A 51, R3414(R) (1995); T. Zuo, et al., Phys. Rev. A 51, 3991 (1995); M. B. Gaarde, et al., Phys. Rev. A 54, 4236 (1996); S. Odžak and D. B. Milošević, Phys. Rev. A 72, 033407 (2005); Yang Xiang, et al. Phys. Rev. A 79, 053419 (2009); V. A. Birulia, et al., Phys. Rev. A 106, 023514 (2022)]. В любом случае, разработка новой теории, предлагаемой в диссертационной работе, должна быть исчерпывающе мотивирована.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует 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. Диссертационное исследование оформлено 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. Можно заключить, что соискатель Румянцев Борис Вадимович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
высококвалифицированный ведущий научный сотрудник отделения
квантовой радиофизики им. Н.Г.Басова федерального государственного
бюджетного учреждения науки Физический институт им. П.Н. Лебедева
Российской академии наук

Стрелков Василий Вячеславович

Подпись:

Дата: 28.11.2025

Контактные данные:

тел.: +7(499) 132-64-46, e-mail: v.strelkov@lebedev.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.21 – «Лазерная физика»

Адрес места работы:

119991, ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53, стр. 1,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический
институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, отделение квантовой
радиофизики им. Н.Г.Басова

Тел.: +7(499) 132-64-46; e-mail: v.strelkov@lebedev.ru

Подпись сотрудника Физического института им. П.Н. Лебедева Российской
академии наук Василия Вячеславовича Стрелкова удостоверяю:

Ученый секретарь Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, кандидат
физико-математических наук

Андрей Владимирович Колобов

Дата: 28.11.2025