

**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.**

Актуальность темы исследования

Управление спектром генерации гармоник высокого порядка является актуальной темой исследований, имеющей важное значение как для фундаментальных приложений в области исследования сверхбыстрой электронной динамики, так и для приложений в области разработки аттосекундных источников когерентного излучения. Интерес к компактным аттосекундным источникам, работающим на основе эффекта генерации гармоник высокого порядка, обусловлен возможностью проведения когерентной рентгеновской визуализации с пространственным разрешением на уровне десятков нм, а также возможностью проведения спектроскопии в мягком рентгеновском диапазоне с фемто- и аттосекундным временным разрешением. Ключевое значение для данных приложений имеет спектр используемого излучения. В связи с этим, диссертационная работа Б.В. Румянцева посвящена исследованию возможностей управления спектром генерации гармоник высокого порядка при воздействии на газовую среду интенсивного (~ 100 ТВт/см²) фемтосекундного лазерного излучения, представляющего собой двухцветную комбинацию излучения ближнего ИК (1.24 мкм), среднего ИК (4.5 мкм) и терагерцевого (1-5 ТГц) диапазонов, что является актуальной темой исследований.

Общая характеристика и содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка работ автора, благодарностей и списка литературы. Общий объем работы составляет 128 страниц, включая 41 рисунок и 2 таблицы. Список литературы содержит 195 источников.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, приведены цель и задачи исследования, формулируется научная и практическая значимость, приводятся сведения о методологии диссертационного исследования, формулируются научная новизна и защищаемые положения, обосновывается достоверность результатов, приводятся сведения об апробации исследования, указывается личный вклад автора, приводятся данные об объеме и структуре диссертации. Приведён список статей автора по теме диссертации.

В первой главе диссертации приведён обзор современного состояния исследований в области генерации гармоник фемтосекундным лазерным излучением, рассмотрены теоретические методы описания процесса генерации гармоник, а также приведено описание используемых в работе экспериментальных установок.

Вторая глава посвящена оптимизации спектрально-энергетических характеристик излучения гармоник высокого и низкого порядков при генерации с использованием интенсивного фемтосекундного лазерного излучения ИК диапазона. В данной главе экспериментально продемонстрированы возможности оптимизации эффективности генерации гармоник, а также расширения плато в сторону больших энергий фотонов путём изменения свойств среды генерации и характеристик генерирующего фемтосекундного излучения.

В третьей главе приведены оригинальные результаты по генерации гармоник фемтосекундным лазерным излучением ближнего ИК диапазона с длиной волны 1.24 мкм в присутствии сильного ($\sim 1-10$ МВ/см) терагерцевого (1-5 ТГц) поля. Рассмотрена как генерация гармоник низкого (2-5 эВ), так и высокого (до ~ 80 эВ) порядков. В результате анализа полученных экспериментальных данных выявлен механизм формирования чётных гармоник при добавлении терагерцевого поля.

Четвёртая глава диссертации посвящена описанию оригинальных результатов по генерации гармоник двухцветным лазерным полем,

состоящим из фемтосекундных импульсов ближнего (1.24 мкм) и среднего (4.5 мкм) ИК диапазонов. Рассмотрены эффекты влияния как слабого (относительная напряжённость <0.1), так и сильного (относительная напряжённость ~ 0.1) поля среднего ИК диапазона на спектр излучения гармоник. На основе анализа полученных экспериментальных данных с использованием численного моделирования объясняются эффекты изменения формы спектра гармоник, наблюдаемые при добавлении излучения среднего ИК диапазона.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе. Следует отметить следующие результаты:

1. Создана экспериментальная установка для генерации и регистрации гармоник высокого порядка, представляющая собой автоматизированный вакуумный оптический тракт камеры генерации и спектрометра.
2. Впервые экспериментально установлено, что добавление терагерцевого (1-5 ТГц) поля с напряжённостью $\sim 1-10$ МВ/см приводит к появлению гармоник чётных и ослаблению гармоник нечётных порядков в спектре излучения высших гармоник, генерируемых фемтосекундным лазерным излучением ближнего ИК диапазона (1.24 мкм, ~ 100 ТВт/см²), что объясняется нарушением симметрии траекторий генерирующего электрона
3. Впервые экспериментально показано, что управление спектром генерации гармоник высокого порядка может быть осуществлено в двухцветной схеме генерации путём добавления интенсивного излучения среднего ИК (4.5 мкм, ~ 1 ГВт/см² - 1 ТВт/см²) диапазона к основному излучению ближнего ИК диапазона (1.24 мкм, ~ 100 ТВт/см²). В частности, показано, что в такой двухцветной схеме генерации изменение динамики ионизации и рекомбинации позволяет получить уширенный квазинепрерывный спектр

излучения гармоник с энергиями фотонов вплоть до 200 эВ при использовании гелия в качестве среды генерации.

Высокая степень обоснованности защищаемых положений и выводов диссертации обусловлена полученными в работе экспериментальными результатами, их согласием с результатами численного моделирования и оценок, а также непротиворечием полученных результатов имеющимся научным данным.

Достоверность защищаемых положений и выводов диссертации подтверждается использованием надёжных экспериментальных методик, воспроизводимостью экспериментальных данных, применением современного специализированного оборудования. Основные результаты диссертации опубликованы в ведущих научных журналах, докладывались на тематических конференциях.

Новизна защищаемых положений и выводов диссертации обусловлена проведённой в рамках диссертационной работы регистрацией и анализом новых эффектов и подтверждается публикацией основных результатов работы в ведущих рецензируемых научных изданиях и представлением на тематических конференциях.

Таким образом, защищаемые положения и выводы, сформулированные в работе Б.В. Румянцева, **обладают новизной и являются обоснованными и достоверными.**

Диссертация не свободна от некоторых недостатков

1. В защищаемом положении 1 утверждается о "подавлении нечётных компонент в спектре гармоник высокого порядка". Термин "подавление" здесь представляется неудачным, т.к. речь идет о небольшом уменьшении интенсивности, лишь слегка превосходящем ошибку эксперимента.
2. Выводы по результатам главы 1: 1, 2 и 4, а также вывод 2 к главе 3 сделаны несколько преждевременно, т.к. сами результаты описаны лишь в последующих главах.

3. Не объяснен физический смысл аппроксимации измеренных зависимостей энергий 5-й и 7-й гармоник от давления, подаваемого на газовую струю на рис. 18Б.
4. Неясно, каким образом длина газовой среды генерации была увеличена со значения 1 мм до значения ~ 7 мм (диаметр иглы в описании установки - 1 мм).
5. Не объяснен физический смысл множителей $K_{\text{меж}}(q)$ и $K_{\text{суб}}(q)$ в (24).
6. Не видно формирования двух плато на Рис.33Б

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.

Таким образом, 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, профессор, г.н.с., и.о. зав. лабораторией спектроскопии ультрабыстрых процессов, отдел лазерной спектроскопии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН)

Чекалин Сергей Васильевич

Подпись:

Дата: 19.11.2025

Контактные данные:

тел.: +7(495) 851-02-37, e-mail: chekalin@isan.troitsk.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.05 – «Оптика»

Адрес места работы:

108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, 5,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
спектроскопии Российской академии наук (ИСАН), отдел лазерной
спектроскопии

Тел.: +7(495) 851-02-37; e-mail: chekalin@isan.troitsk.ru

Подпись сотрудника Института спектроскопии Российской академии наук,
д.ф.-м.н., профессора Сергея Васильевича Чекалина удостоверяю:
Ученый секретарь Института спектроскопии Российской академии наук,
кандидат физико-математических наук

Римма Рифовна Кильдиярова

21.11.2025