

## ОТЗЫВ

научного руководителя д.ф.-м.н., доцента Потёмкина Фёдора Викторовича на диссертационную работу Румянцева Бориса Вадимовича «Когерентное управление спектром генерации гармоник высокого порядка при воздействии парой широкополосных импульсов ближнего ИК, среднего ИК и терагерцевого диапазонов на газовую среду», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика

Б.В. Румянцев в 2021 г. окончил с отличием магистратуру физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. В период с 2021 по 2025 гг. он являлся аспирантом физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. За время обучения в аспирантуре Б.В. Румянцев успешно выполнил учебный план и сдал экзамены кандидатского минимума.

В диссертационной работе представлены результаты экспериментальных исследований, направленных на решение задачи когерентного управления спектром генерации высоких гармоник. В качестве инструмента управления используется синтезированное лазерное поле, создаваемое парой широкополосных импульсов, охватывающих ближний ИК, средний ИК и терагерцевый диапазоны. Основной фокус исследования, изложенного в четырёх взаимосвязанных разделах, сосредоточен на методах управления шириной спектра и его заполненностью. Разработка таких методов представляет значительный интерес для создания новых источников когерентного излучения аттосекундной длительности в экстремальном УФ и мягком рентгеновском диапазонах, что открывает возможности для проведения фундаментальных и прикладных исследований, включая время-разрешённую спектроскопию и аттохимию.

Первая глава содержит обзор современного состояния исследований в области генерации высоких гармоник при взаимодействии интенсивного фемтосекундного лазерного излучения с газовой средой. В ней приведено описание собранной экспериментальной установки, реализованных методов генерации мощного терагерцевого излучения и компрессии длительности фемтосекундных лазерных импульсов. Также рассматриваются теоретические подходы к описанию процесса генерации гармоник.

Вторая глава описывает экспериментально реализованные методы управления и оптимизации спектрально-энергетических характеристик высоких гармоник, генерируемых интенсивным фемтосекундным излучением ближнего ИК-диапазона. На предварительном этапе выполнено повышение эффективности генерации путём оптимизации концентрации атомов газовой среды, а также исследовано влияние квадратичной фазовой модуляции генерирующего импульса на спектральную яркость и ширину спектра гармоник. С целью расширения спектра генерируемого излучения была осуществлена генерация высших гармоник с использованием фемтосекундного излучения сверхкороткой длительности ( $\sim 9$  циклов поля) и гелия в качестве активной среды. В результате проведённой оптимизации достигнута эффективная генерация широкополосного излучения гармоник в диапазоне до  $\sim 170$  эВ.

Третья глава посвящена исследованию генерации высоких гармоник излучением ближнего ИК-диапазона в присутствии интенсивного ( $\sim 7.5$  МВ/см) терагерцевого поля. Показано, что введение терагерцевого поля приводит к появлению в спектре чётных порядков гармоник и подавлению нечётных, что объясняется модификацией моментов рекомбинации генерирующего электрона. Численное моделирование установило, что для эффективного уширения спектра требуется использование терагерцевого поля с напряжённостью 10-100 МВ/см. На основе анализа результатов сделан вывод о возможности замены терагерцевого излучения излучением среднего ИК-диапазона для экспериментальной реализации уширения спектра.

Четвёртая глава охватывает исследование процесса генерации высоких гармоник синтезированным лазерным полем, состоящим из фемтосекундных импульсов ближнего и среднего

ИК-диапазонов. Установлено, что добавление поля среднего ИК-диапазона (длина волны 4.5 мкм, интенсивность  $\sim 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>) к полю ближнего ИК-диапазона (длина волны 1.24 мкм, интенсивность  $\sim 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>) при совпадении направлений поляризации линейно-поляризованных взаимодействующих полей вызывает появление в спектре комбинационных гармоник 1-го порядка вследствие изменения моментов рекомбинации электрона. Показано, что увеличение пиковой интенсивности излучения среднего ИК-диапазона до  $\sim 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup> позволяет получить уширенный квазинепрерывный спектр вплоть до 200 эВ при использовании гелия в качестве среды генерации, что обусловлено формированием комбинационных гармоник высших порядков. Установленный механизм наблюдаемого уширения связан с увеличением кинетической энергии электрона на удлинённой траектории в условиях, когда компенсация распылывания волнового пакета электрона обеспечивается повышенной вероятностью ионизации.

За время работы над диссертацией Б.В. Румянцев активно участвовал в научной жизни лаборатории, собрал установку для проведения диссертационных исследований, проводил эксперименты, анализировал результаты, реализовывал численные расчёты, готовил публикации. Результаты диссертации неоднократно докладывались на международных конференциях, опубликованы в 9 научных статьях. За время работы над диссертацией соискатель применял самостоятельно разработанные методики проведения экспериментов, предлагал оригинальные, творческие пути решения возникающих экспериментальных задач. Кроме того, Б.В. Румянцев активно помогает организовывать научную работу студентов.

Оценивая в целом диссертационную работу «Когерентное управление спектром генерации гармоник высокого порядка при воздействии парой широкополосных импульсов ближнего ИК, среднего ИК и терагерцевого диапазонов на газовую среду», считаю, что её результаты достоверны, она представляет собой законченный труд и удовлетворяет требованиям Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Рекомендую диссертационную работу «Когерентное управление спектром генерации гармоник высокого порядка при воздействии парой широкополосных импульсов ближнего ИК, среднего ИК и терагерцевого диапазонов на газовую среду» Румянцева Бориса Вадимовича к защите на соискание учёной степени кандидата наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Научный руководитель:  
профессор кафедры общей физики и волновых процессов  
физического факультета ФГБОУ ВО  
«Московский государственный  
университет имени М.В. Ломоносова»,  
доктор физико-математических наук, доцент

Ф.В. Потёмкин

Дата составления отзыва: 11 сентября 2025 года.  
119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 62  
Телефон: +7 495 9395318  
E-mail: [potemkin@physics.msu.ru](mailto:potemkin@physics.msu.ru), [potemkinfv@my.msu.ru](mailto:potemkinfv@my.msu.ru)

Подпись Потёмкина Фёдора Викторовича УДОСТОВЕРЯЮЩЕ

Учёный секретарь Учёного Совета  
Физического факультета МГУ,  
доцент

С.А. Стремоухов