

**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 терагерцового диапазонов на газовую среду» по специальности  
1.3.19. Лазерная физика**

В диссертации Румянцева Бориса Вадимовича представлены результаты экспериментального исследования процесса генерации гармоник высокого порядка при воздействии на газовую среду двухцветного фемтосекундного лазерного излучения, представляющего собой в разных случаях различные комбинации высокоинтенсивного ( $100 \text{ ТВт/см}^2$ ) излучения ближнего ИК диапазона (1.24 мкм), интенсивного ( $1 \text{ ТВт/см}^2$ ) излучения среднего ИК диапазона (4.5 мкм), а также сильного (1-10 МВ/см) терагерцового (1-5 ТГц) поля. В рамках диссертационной работы продемонстрирована возможность управления шириной и формой спектра гармоник в двухцветной схеме генерации и приведён анализ соответствующих физических механизмов. Представленное в диссертации развитие методов управления спектром гармоник высокого порядка с использованием синтезированных лазерных полей является актуальной темой исследований, что обусловлено фундаментальной и прикладной значимостью эффекта генерации гармоник высокого порядка, который является, в частности, основой для создания аттосекундных источников когерентного излучения мягкого рентгеновского диапазона. Научная новизна работы заключается в том, что в ней впервые экспериментально исследован процесс генерации гармоник высокого порядка при воздействии на газовую среду двухцветного лазерного поля, состоящего из импульсов ближнего ИК, среднего ИК и терагерцового диапазонов. Это позволило, кроме прочего, впервые зарегистрировать и объяснить такие эффекты, как:

- Появление чётных и снижение интенсивности нечётных гармоник за счёт добавления терагерцового поля с напряжённостью 7.5 МВ/см при генерации гармоник высокого порядка фемтосекундным лазерным излучением на длине волны 1.24 мкм с интенсивностью около  $10^{14} \text{ Вт/см}^2$ .

- Формирование расширенного квазинепрерывного спектра гармоник высокого порядка вплоть до 200 эВ при двухцветном воздействии интенсивного лазерного излучения ближнего (1.24 мкм) и среднего (4.5 мкм) ИК диапазонов на газовую струю гелия.

Текст диссертационной работы состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка работ автора и списка цитируемой литературы. Объём текста работы составляет 128 страниц. В работе представлены 41 рисунок и 2 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 195 источников.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, приведена оценка степени её разработанности. Указаны объект и предмет исследования, цель и задачи. Сформулированы научная новизна работы, а также её теоретическая и практическая значимость. Указаны сведения о методологии диссертационного исследования, сформулированы защищаемые положения, обоснована достоверность описанных результатов. Далее приведены сведения об апробации исследования, отмечен личный вклад автора, указаны данные об объёме и структуре диссертации. В конце введения приведён список публикаций автора по результатам исследований, выполненных в диссертационной работе.

Первая глава носит методический характер и посвящена обзору современного состояния исследования в области генерации гармоник, а также описанию используемых в работе теоретических методов и созданной экспериментальной установки, с помощью которой получены экспериментальные данные. Приведённый обзор современного состояния исследований адекватен рассматриваемой в работе тематике, описание схемы экспериментальной установки отличается высокой степенью подробности. Отдельное внимание уделено описанию схемы сокращения длительности импульса ближнего ИК диапазона, а также генерации и измерению характеристик терагерцового излучения.

Во второй главе приведено описание экспериментальных результатов по оптимизации процесса генерации гармоник одноцветным излучением ИК диапазона. Продемонстрировано увеличение эффективности преобразования за счёт повышения концентрации атомов и изменения длины среды генерации.

Экспериментально показана возможность управления шириной спектра гармоник, а также их спектральной яркостью за счёт chirпирования генерирующего лазерного импульса. Экспериментально продемонстрирована возможность расширения спектра гармоник за счёт уменьшения влияния лазерно-индуцированной плазмы, что было достигнуто двумя способами: путём сокращения длительности генерирующего импульса и путём перехода к атомам с более высоким потенциалом ионизации. В результате в рамках данной главы осуществлена генерация излучения гармоник с энергиями фотонов до 170 эВ при воздействии на гелий излучения лазерной системы на кристалле хром-форстерита с длиной волны 1.24 мкм.

В третьей главе диссертационной работы приведены результаты исследования процесса генерации гармоник высокого и низкого порядков излучением ближнего ИК диапазона с длиной волны 1.24 мкм в присутствии терагерцового поля. Показано, что, в отличие от гармоник низкого порядка, добавление ТГц поля при генерации гармоник высокого порядка приводит одновременно к появлению чётных гармоник и подавлению интенсивности нечётных гармоник. Автор приводит объяснения данного эффекта на основе интерференционной модели, показывая путём численного моделирования, что действие ТГц поля приводит к изменению моментов рекомбинации генерирующего электрона. В конце главы на основе численного моделирования обсуждается вопрос о возможности расширения спектра гармоник при добавлении терагерцового поля. На основе данного рассмотрения делается вывод о возможности расширения спектра гармоник за счёт использования излучения среднего ИК диапазона вместо терагерцового поля.

Наконец, в четвёртой главе представлены результаты исследования ГГВП двухцветным синтезированным лазерным полем, полученным совмещением во времени и пространстве фемтосекундных лазерных импульсов ближнего (1.24 мкм) и среднего (4.5 мкм) ИК диапазонов. В первой части данной главы описаны результаты исследования эффекта формирования квазинепрерывного спектра гармоник высокого порядка. Автор показывает, что появление в эксперименте комбинационных гармоник первого порядка при добавлении слабого поля среднего ИК диапазона является следствием изменения моментов рекомбинации

генерирующего электрона, что описывается оригинальной интерференционной моделью. В свою очередь, увеличение интенсивности излучения среднего ИК диапазона позволяет получить квазинепрерывный уширенный спектр гармоник за счёт изменения динамики ионизации и рекомбинации. В этом же разделе обсуждается вопрос влияния угла между линейными поляризациями воздействующих полей. Так, автор показывает, что переход к ортогональным поляризациям приводит к формированию комбинационных гармоник второго порядка в отсутствие изменения состояния поляризации излучения гармоник. Полученные результаты подкреплены моделированием спектра гармоник путём численного интегрирования нестационарного уравнения Шрёдингера.

Во второй части подробно рассмотрен эффект расширения спектра гармоник высокого порядка. Экспериментально показано, что дополнительное расширение спектра в рассматриваемой двухцветной схеме генерации может быть осуществлено путём сокращения длительности импульса ближнего ИК диапазона, а также за счёт использования инертных газов с большим потенциалом ионизации. В частности, использование гелия позволило получить квазинепрерывный спектр гармоник с энергиями фотонов вплоть до 200 эВ. В завершение главы на основе численного моделирования автор показывает, что расширение спектра гармоник при добавлении излучения среднего ИК диапазона объясняется увеличением кинетической энергии генерирующего электрона на траектории второго возврата.

В заключении подводятся итоги проведённого исследования и указаны основные результаты диссертационной работы.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации. Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне и является систематическим научным исследованием влияния добавочного длинноволнового поля на процесс генерации гармоник высокого порядка. Отдельного внимания заслуживает созданная в результате работы экспериментальная установка, представляющая собой источник когерентного излучения мягкого рентгеновского диапазона, который обладает перспективой множества практических применений. Уникальность этой установке в значительной мере придаёт совмещение в ней сразу

нескольких источников, в том числе оригинальных, а также использование ряда современных технологий лазерной физики и нелинейной оптики для манипулирования этими источниками. Отмечу также, что, в то время как в мировой литературе в задачах использования синтеза волновых форм для управления ГГВП в подавляющем большинстве случаев рассматривается лишь простейший случай двухцветных полей – комбинация излучения на фундаментальной частоте и её второй (реже – третьей) гармонике, в данной работе использовались источники с некратными друг другу частотами, да ещё и значительно разнесённые по частоте. Это позволяет получать новые интересные результаты, что и продемонстрировано успешно в данной диссертации. Защищаемые положения и выводы диссертационной работы отличаются научной новизной, являются обоснованными и достоверными. Результаты работы опубликованы в 9 научных статьях в изданиях из списка ВАК России, а также докладывались на международных конференциях.

**На фоне общего положительного впечатления от работы следует отметить следующие замечания:**

1. В то время как в представленных экспериментах в качестве среды генерации в большинстве случаев использовался аргон, обращает на себя внимание тот факт, что на рисунках, где представлены спектры гармоник с энергиями фотонов менее 71 эВ (измеренные с использованием Al-фильтров), не наблюдается отчётливых признаков так называемого куперовского минимума – особенности, имеющей квантовую интерференционную природу и связанной с наличием ярко выраженного минимума в энергетической зависимости сечения фотоионизации/фоторекомбинации для атомов с валентной p-орбиталью (для атома аргона этот эффект проявляется в наличии весьма глубокого минимума в спектре ГГВП вблизи 53 эВ, как было показано в ряде экспериментов, напр., в [J. Higuët et al., PRA 83, 053401 (2011)]). Поскольку вид наблюдаемых спектров зависит от многих деталей эксперимента, было бы интересно разобраться, какие особенности эксперимента в защищаемой работе не позволили наблюдать куперовский минимум. К сожалению, в диссертации этот вопрос не ставится и не обсуждается.

2. В разделе 2.2.3 при обсуждении наблюдаемого изменения частот генерируемых гармоник при изменении величины chirpa лазерного импульса автор, ссылаясь на работу [S. Petrakis et al., Sci. Rep. 11, 23882 (2021)], где наблюдается похожее явление, предполагает, что такой частотный сдвиг можно объяснить тем же «эффектом изменения временного окна, в котором происходит эффективная генерация гармоник». Такое объяснение, однако, в данном случае представляется сомнительным. Дело в том, что в цитируемой работе интенсивность лазерного излучения составляла  $2 \cdot 10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup>, что приводило к быстрой однократной ионизации атомов, и ГГВП происходила в узком временном окне на фронте импульса; chirpирование лазерного импульса приводило к сдвигу этого временного окна и, как следствие, к изменению энергий фотонов гармоник. В защищаемой работе интенсивность была примерно в 20 раз меньше, ионизация составляла всего порядка 0.2%, и поэтому ГГВП должна была происходить не на фронте импульса, а в широком временном окне вблизи его максимума. Chirpирование лазерного импульса вряд ли могло вызвать существенное изменение длительности этого окна таким образом, чтобы это привело к значительному сдвигу частот гармоник.

3. Хотя автор составил обширный список используемой литературы и в большинстве случаев процитировал действительно основополагающие работы, в некоторых случаях такие работы не были в достаточной степени упомянуты. Так, в контексте представленного на рис. 25 результата по уширению спектра гармоник с уменьшением длительности генерирующего импульса не мешало бы провести сравнение с рис. 3 пионерской работы [I.P. Christov et al., PRL 77, 1743 (1996)]. Другой пример: результат, демонстрирующий перспективность использования атомов с большими потенциалами ионизации для уменьшения влияния лазерно-индуцированной плазмы, следовало бы соотнести с похожими выводами, представленными в работах Маргарет Мюрнейн и Хенри Каптейна (см., напр., рис. 2А в работе [T. Pomintchev et al., Science 336, 1287 (2012)]). Недостаточно, на мой взгляд, представлена в диссертации и литература по управлению процессом генерации высоких гармоник при использовании chirpированных лазерных импульсов.

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. Соискатель Румянцев Борис Вадимович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник отдела сверхбыстрых процессов сектора моделирования сверхбыстрых оптических процессов Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН)

Рябикин Михаил Юрьевич

Подпись:

Дата: 02.12.2025

Контактные данные:

тел.: +7(831)4164953, e-mail: [mikhail.ryabikin@ipfran.ru](mailto:mikhail.ryabikin@ipfran.ru)

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.04.03 - Радиофизика

Адрес места работы: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46,  
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН), отдел сверхбыстрых процессов, сектор моделирования сверхбыстрых оптических процессов.

Тел.: +7(831)4164953; e-mail: [mikhail.ryabikin@ipfran.ru](mailto:mikhail.ryabikin@ipfran.ru)

Подпись сотрудника Института прикладной физики им. А.В. Гапо  
Российской академии наук к.ф.-м.н. Рябикина Михаила Юрьевича  
Ученый секретарь Института прикладной физики им. А.В. Гапоно  
Российской академии наук, кандидат физико-математических наук

Корюкин Игорь Валерьевич

Подпись:

Дата: 02.12.2025