

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Румянцев Борис Вадимович

**Когерентное управление спектром генерации гармоник высокого порядка при
воздействии парой широкополосных импульсов ближнего ИК, среднего ИК и
терагерцевого диапазонов на газовую среду**

Специальность 1.3.19. Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2025

Работа выполнена на кафедре общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

- Научный руководитель** - **Потёмкин Фёдор Викторович** - доктор физико-математических наук, доцент
- Официальные оппоненты** - **Чекалин Сергей Васильевич**, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт спектроскопии Российской академии наук, отдел лазерной спектроскопии, главный научный сотрудник, и.о. зав. лабораторией спектроскопии ультрабыстрых процессов.
Стрелков Василий Вячеславович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, отделение квантовой радиофизики им. Н.Г.Басова, высококвалифицированный ведущий научный сотрудник.
Рябкин Михаил Юрьевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», сектор моделирования сверхбыстрых оптических процессов (334), отдел сверхбыстрых процессов (330), ведущий научный сотрудник.

Защита диссертации состоится «10» декабря 2025 г. в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.013.4 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 62, корпус нелинейной оптики, аудитория им. С.А. Ахманова.

E-mail: diss.sov.31@physics.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3663>

Автореферат разослан « __ » ноября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.013.4
кандидат физико-математических наук

А.А. Коновко

Общая характеристика работы

Диссертационная работа посвящена исследованию процесса генерации гармоник высокого порядка при воздействии на газовую среду интенсивного ($\sim 100 \text{ ТВт/см}^2$) фемтосекундного лазерного излучения, представляющего собой комбинацию излучения ближнего ИК, среднего ИК и терагерцевого диапазонов длин волн. В работе экспериментально реализована генерация гармоник высокого ($\sim 20\text{--}200 \text{ эВ}$) и низкого ($\sim 1\text{--}5 \text{ эВ}$) порядков с использованием данного излучения, а также проведён анализ наблюдаемых эффектов на основе аналитических расчётов и численного моделирования. Полученные результаты расширяют круг известных эффектов в области генерации гармоник, а также демонстрируют новые подходы к управлению спектрально-энергетическими характеристиками генерируемого излучения, что имеет важное значение с точки зрения приложений в области время-разрешённой спектроскопии и получения когерентного электромагнитного излучения аттосекундного масштаба длительности.

Актуальность темы исследования обусловлена фундаментальным и прикладным интересом отечественного и мирового научного сообщества в области динамично развивающейся физики сверхсильного светового поля, в рамках которой изучается взаимодействие высокоинтенсивного (более 100 ТВт/см^2) лазерного излучения с веществом. Фундаментальная значимость данной области физики заключается в возможности наблюдения сверхбыстрых (на масштабах атто- и фемтосекунд) процессов электронной динамики в веществе, обусловленной сильно нелинейным режимом взаимодействия электромагнитного излучения с веществом, в котором традиционные модели нелинейной оптики, основанные на использовании теории возмущения и феноменологических подходов [1,2], неприменимы. Такой режим взаимодействия позволяет исследовать и проверять фундаментальные законы квантовой механики, физики плазмы и квантовой электродинамики в ранее недоступных условиях. Кроме того, чрезвычайно широка и практическая значимость данного направления, включающая в себя создание компактных источников рентгеновского излучения [3–6] для визуализации с нанометровым пространственным разрешением и время-разрешённой спектроскопии, а также управление химическими реакциями и создание материалов с новыми свойствами [7–9].

Существенный вклад в становление и развитие физики сверхсильного светового поля внесли и продолжают вносить выдающиеся отечественные учёные. Так, основоположниками отечественной школы физики сверхсильного светового поля являются сотрудники кафедры общей физики и волновых процессов МГУ имени М.В.Ломоносова

[10–14], созданной под руководством С.А.Ахманова и Р.В.Хохлова. Развитие их идей нашло отражение в работах отечественных учёных из ФИАН имени П.Н. Лебедева [15,16], ИПФ РАН [17–19] и ИСАН [20,21].

К числу ключевых эффектов, возникающих в сверхсильных световых полях, относятся надбарьерная ионизация [22,23], некаскадная двойная ионизация [24], инициация ядерных процессов [25,26], а также генерация гармоник высокого порядка [15]. Экспериментальное исследование надбарьерной ионизации и некаскадной двойной ионизации сводится к регистрации спектров фотоэлектронов, формируемых при ионизирующем воздействии лазерного излучения на вещество. Так, эффект надбарьерной ионизации заключается в сильной деформации кулоновского потенциала атома под действием лазерного поля, позволяющей электрону напрямую переходить в свободное состояние минуя процесс туннелирования. В свою очередь, эффект некаскадной двойной ионизации характеризуется одновременным переходом двух электронов в свободное состояние за счёт их коррелированного взаимодействия с полем.

Особое место среди указанных эффектов сверхсильного светового поля занимает процесс генерации гармоник высокого порядка, заключающийся в формировании когерентного широкополосного излучения вплоть до мягкого рентгеновского диапазона при воздействии высокоинтенсивного ($\sim 100 \text{ ТВт/см}^2$) лазерного излучения на вещество. Значимость данного явления обусловлена тем, что на сегодняшний день эффект генерации гармоник высокого порядка является единственным физическим процессом, позволяющим в лабораторных условиях получать когерентное излучение в области экстремального УФ и мягкого рентгеновского диапазонов с длительностью на уровне десятков и сотен аттосекунд [15,17,27] (Нобелевская премия 2023 года [28]), что открывает возможности для проведения время-разрешенной спектроскопии в данных спектральных диапазонах, исследования сверхбыстрой электронной динамики и когерентной рентгеновской визуализации.

Исследования по генерации гармоник высокого порядка берут своё начало в 1990-х годах с развитием эры фемтосекундных лазерных систем с высокой пиковой мощностью [29], работающих по схеме усиления чирпированных импульсов (Нобелевская премия 2018 года [30]). Первые эксперименты, в которых наблюдался данный эффект, были сфокусированы на воздействии лазерного излучения на газовые среды, для которых механизм формирования излучения гармоник качественно описывается полуклассической трёхступенчатой моделью [31]. Впоследствии была реализована генерация с использованием твердотельных сред [32,33], для которых генерация гармоник обусловлена нелинейными токами в зонной структуре, а также при использовании плазменных струй

[34,35], образующихся при абляции поверхности твердотельных мишеней. Тем не менее, наиболее широкополосное излучение в процессе генерации гармоник на настоящий момент получают при использовании газовых сред [36].

Параллельно с экспериментальными исследованиями развивалось и теоретическое понимание механизмов генерации гармоник высокого порядка. Разработанные подходы для описания данного процесса на основе полуклассического рассмотрения воздействия лазерного поля на электрон [31,37,38], решения нестационарного уравнения Шрёдингера с использованием численных методов [39–41] и аналитического приближения сильного поля [42,43] обеспечили фундамент для понимания процесса генерации гармоник высокого порядка.

Значительная часть современных исследований в области генерации гармоник высокого порядка направлена на повышение энергии генерируемого излучения и расширение его спектра в сторону больших энергий фотонов. Широкую распространённость для генерации гармоник высокого порядка приобрели лазерные системы на кристалле Ti:Sapphire (длина волны 800 нм), а также твердотельные лазерные системы на основе сред, легированных ионами иттербия Yb (длина волны ~ 1 мкм), что обусловлено доступностью и стабильностью работы данных систем. Вместе с тем, более длинноволновые лазерные источники являются многообещающими кандидатами для генерации коротковолнового излучения гармоник в мягком рентгеновском диапазоне благодаря масштабированию кинетической энергии электрона как $\propto \lambda^2$ [36], где λ – длина волны генерирующего излучения. Однако при этом эффективность фотоэмиссии одиночного атома изменяется как $\propto \lambda^{-x}$, где $x = 5-6$ [44,45], что указывает на быстрое снижение эффективности генерации при увеличении длины волны. В принципе, это неблагоприятное масштабирование интенсивности излучения одиночного атома может быть уравновешено соответствующим фазовым согласованием излучения большого числа атомов [16,34,46,47]. Однако в плотных газовых средах [48] средняя длина свободного пробега атомов может стать сопоставимой с длиной пробега электронов в длинноволновом поле, что приводит к потере когерентности генерируемого излучения.

Альтернативным подходом является использование для генерации двухцветной комбинации лазерных полей [38,49,50]. Так, было показано, что использование пары лазерных импульсов на различных длинах волн при воздействии на газовую среду позволяет не только повысить эффективность генерации [51], но и расширить спектр плато гармоник [52–55]. Дополнительно было обнаружено, что такие лазерные поля позволяют получить аттосекундные импульсы с контролируемой фазой [56,57], а также одиночные аттосекундные импульсы длительностью вплоть до ~ 50 ас [58,59]. На сегодняшний день

наиболее экспериментально проработанный подход к генерации гармоник с использованием двухцветных лазерных полей основан на применении комбинации излучения видимого и ближнего ИК-диапазонов, в то время как применение более длинноволновых полей затруднено вследствие дефицита соответствующих лазерных источников, что ограничивает доступные энергии фотонов генерируемого излучения на уровне ~ 200 эВ даже при использовании сверхкоротких импульсов длительностью в несколько циклов поля [54]. В то же время добавление длинноволнового поля и, в частности, терагерцевого (ТГц) излучения [60–62], к основному генерирующему импульсу ближнего ИК-диапазона должно приводить к существенно более эффективному расширению спектра гармоник за счёт увеличения кинетической энергии электрона в длинноволновом поле.

Таким образом, несмотря на немалую степень разработанности темы генерации гармоник высокого порядка в коротковолновых полях, генерация в длинноволновых синтезированных полях до сих пор остаётся экспериментально слабо изученной областью. Именно поэтому настоящая диссертационная работа направлена на восполнение данного пробела путём экспериментального исследования процесса генерации гармоник высокого и низкого порядков на основе двухцветных лазерных полей с использованием излучения ближнего ИК (1.24 мкм), среднего ИК (4.5 мкм) и терагерцевого (1-5 ТГц) диапазонов.

Цель работы состоит в экспериментальном исследовании процесса генерации гармоник высокого порядка при воздействии на газовую среду одноцветного и двухцветного фемтосекундного лазерного излучения, представляющего собой комбинацию высокоинтенсивного (~ 100 ТВт/см²) излучения ближнего ИК диапазона (1.24 мкм), интенсивного (~ 1 ТВт/см²) излучения среднего ИК диапазона (4.5 мкм) и сильного (1-10 МВ/см) поля терагерцевого диапазона (1-5 ТГц). Поставлены и решены следующие задачи:

1. Создание экспериментальной установки для генерации и регистрации гармоник высокого и низкого порядков с использованием фемтосекундного лазерного излучения ближнего ИК диапазона с длиной волны 1.24 мкм и с интенсивностью ~ 100 ТВт/см², сильного ($\sim 1-10$ МВ/см) ТГц-поля (1-5 ТГц), а также интенсивного (~ 1 ТВт/см²) излучения среднего ИК-диапазона с длиной волны 4.5 мкм.
2. Оптимизация свойств среды и параметров генерирующего лазерного излучения для увеличения энергии и расширения спектра генерируемого излучения гармоник.
3. Выявление физических механизмов генерации гармоник при совместном воздействии на среду интенсивного излучения ближнего ИК диапазона, сильного ТГц-поля и излучения среднего ИК диапазона с заданными параметрами.

Объектом исследования в работе является процесс генерации гармоник при воздействии высокоинтенсивного ($\sim 100 \text{ ТВт/см}^2$) фемтосекундного лазерного излучения ближнего ИК диапазона (1.24 мкм) на газовую среду в присутствии интенсивного ($\sim 1 \text{ ТВт/см}^2$) поля среднего ИК (4.5 мкм) диапазона и сильного ($\sim 1\text{-}10 \text{ МВ/см}$) поля терагерцового диапазона (1-5 ТГц). **Предметом исследования** являются эффекты влияния интенсивного ($\sim 1 \text{ ТВт/см}^2$) излучения среднего ИК диапазона (4.5 мкм) и сильного ($\sim 1\text{-}10 \text{ МВ/см}$) поля терагерцового диапазона (1-5 ТГц) на процесс генерации гармоник при воздействии высокоинтенсивного ($\sim 100 \text{ ТВт/см}^2$) фемтосекундного лазерного излучения ближнего ИК диапазона (1.24 мкм) на газовую среду, а также физические механизмы, обуславливающие данные эффекты.

Научная новизна данной работы состоит в том, что:

1. Впервые экспериментально зарегистрировано появление чётных и уменьшение интенсивности нечётных гармоник при добавлении терагерцового поля с пиковой напряжённостью $\sim 1\text{-}10 \text{ МВ/см}$ в рамках генерации гармоник высокого порядка фемтосекундным излучением ближнего ИК диапазона с длиной волны 1.24 мкм и интенсивностью $\sim 100 \text{ ТВт/см}^2$.
2. Впервые экспериментально обнаружено появление комбинационных гармоник при добавлении фемтосекундного лазерного излучения среднего ИК диапазона с длиной волны 4.5 мкм и интенсивностью $\sim 1 \text{ ГВт/см}^2$ при генерации гармоник высокого порядка при воздействии фемтосекундного лазерного излучения с длиной волны 1.24 мкм и интенсивностью $\sim 100 \text{ ТВт/см}^2$ на газовую среду. Показано, что повышение интенсивности излучения с длиной волны 4.5 мкм до $\sim 1 \text{ ТВт/см}^2$ приводит к формированию квазинепрерывного спектра.
3. Впервые экспериментально продемонстрировано расширение спектра гармоник высокого порядка при добавлении фемтосекундного лазерного излучения среднего ИК-диапазона с длиной волны 4.5 мкм и интенсивностью $\sim 1 \text{ ТВт/см}^2$ при генерации гармоник высокого порядка при воздействии фемтосекундного лазерного излучения с длиной волны 1.24 мкм и интенсивностью $\sim 100 \text{ ТВт/см}^2$ на газовую среду. Показано, что при использовании гелия в качестве среды генерации такая комбинация лазерных полей позволяет получить квазинепрерывный спектр с энергиями фотонов до 200 эВ при использовании импульсов с длительностью на уровне 100 фс.

Теоретическая и практическая значимость данной работы заключается в представленных научных результатах, которые демонстрируют новый подход к

управлению спектром гармоник высокого порядка за счёт добавления длинноволнового поля среднего ИК и терагерцевого диапазонов. Выявленные в работе физические механизмы влияния длинноволнового поля на динамику электрона являются новым шагом на пути к экспериментальному исследованию непертурбативных нелинейно-оптических эффектов в длинноволновых лазерных полях.

Методология и методы исследования. Основная часть работы посвящена экспериментальным исследованиям, которые были подкреплены аналитическими расчётами и численным моделированием. В качестве основного источника фемтосекундного лазерного излучения использовалась система ближнего ИК диапазона на кристалле Cr:Forsterite (длина волны 1.24 мкм, энергия в импульсе до 16 мДж, длительность импульса 100 фс по FWHM интенсивности, частота следования импульсов 10 Гц). Для генерации малопериодного импульсного высокоэнергетичного (до 80 мкДж) ТГц-излучения в диапазоне 1-5 ТГц использовался органический кристалл DAST толщиной 500 мкм, накачиваемый излучением системы на кристалле Cr:Forsterite. Для характеристики спектрально-временной формы ТГц-поля использовался интерферометр Майкельсона и схема электрооптического детектирования на основе кристалла GaP, для характеристики пространственного распределения его интенсивности – пирозлектрическая камера. В качестве источника мощного фемтосекундного лазерного излучения среднего ИК-диапазона использовалась система на кристалле Fe:ZnSe (длина волны 4.5 мкм, энергия в импульсе до 5 мДж, длительность импульса 200 фс по полувысоте интенсивности, частота следования импульсов 10 Гц). Генерация гармоник осуществлялась в процессе воздействия лазерного излучения на газовую струю, расширяющуюся в вакуум. Для регистрации гармоник низкого порядка использовалась система коллимации генерируемого излучения гармоник в совокупности со спектрометром ближнего ИК, видимого и УФ-диапазона (1000-200 нм), а также фотоэлектронный умножитель на видимый, ближний ИК и УФ-диапазоны (185-870 нм). Для регистрации гармоник высокого порядка был собран автоматизированный вакуумный оптический тракт, в котором использовались тонкоплёночные Al- и Ti-фильтры, вогнутая дифракционная решетка плоского поля с переменным числом штрихов на диапазон ~5-25 нм, шевронная сборка из двух микроканальных пластин (МКП) с люминесцентным экраном в совокупности с ПЗС-камерой видимого диапазона с электронным умножением, а также рентгеновская КМОП-камера. Для анализа результатов экспериментов использовались аналитические и численные модели.

Положения, выносимые на защиту:

1. Нарушение внутрицикловой симметрии траекторий электрона под действием сильного ($\sim 1\text{--}10$ МВ/см) терагерцевого поля приводит к подавлению нечётных и появлению чётных компонент в спектре гармоник высокого порядка, генерируемых при воздействии высокоинтенсивного (~ 100 ТВт/см²) фемтосекундного лазерного излучения ближнего ИК диапазона (1.24 мкм) на газовую струю аргона при параллельных линейных поляризациях воздействующих полей.
2. Изменение динамики ионизации и рекомбинации в процессе генерации гармоник высокого порядка двухцветной парой линейно поляризованных интенсивных фемтосекундных лазерных импульсов ближнего (1.24 мкм, ~ 100 ТВт/см²) и среднего (4.5 мкм, ~ 1 ТВт/см²) ИК диапазонов в газовой струе аргона возможно за счёт управления параметрами длинноволнового поля, что проявляется в управляемом преобразовании структуры спектра гармоник от отдельно стоящих комбинационных частот до квазинепрерывного спектра. Такое управление структурой спектра возможно как при изменении интенсивности длинноволнового излучения от 1 ГВт/см² до 1 ТВт/см², так и при изменении угла между поляризациями воздействующих полей.
3. Управление набором энергии электрона на траектории второго возврата при двухцветном воздействии линейно поляризованных интенсивных фемтосекундных лазерных импульсов ближнего (1.24 мкм, ~ 100 ТВт/см²) и среднего (4.5 мкм, ~ 1 ТВт/см²) ИК диапазонов на струю инертного газа (криптон, аргон, неон, гелий) позволяет осуществить управляемое расширение спектра гармоник высокого порядка при сохранении высокой эффективности генерации за счёт увеличения скорости ионизации. Такой режим воздействия пары лазерных импульсов с длительностью ~ 100 фс на гелий обеспечивает генерацию излучения с квазинепрерывным спектром с энергиями фотонов до ~ 200 эВ при параллельных поляризациях воздействующих полей.

Достоверность результатов подтверждается воспроизводимостью экспериментальных результатов, а также их непротиворечием существующим литературным данным. Все представленные результаты прошли рецензирование при публикации в научных журналах, были неоднократно доложены на российских и международных конференциях.

Апробация работы. Результаты исследований, вошедшие в работу, опубликованы в 9 печатных работах, в том числе в 9 научных статьях из списка ВАК России, а также докладывались на следующих научных конференциях: International Conference Laser Optics (Санкт-Петербург, Россия, 2022, 2024), International Conference on Ultrafast Optical Science (Москва, Россия, 2022-2025), XIV Международная конференция по фотонике и информационной оптике (Москва, Россия, 2025), Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных "Ломоносов" (Москва, Россия, 2022-2025).

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в 9 печатных работах, в том числе в 9 статьях в рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих «Положению о присуждении учёных степеней в МГУ имени М.В.Ломоносова».

Личный вклад. Все изложенные в работе результаты получены автором лично, либо при его непосредственном участии. Автором осуществлялось создание и настройка экспериментальных схем, проведение экспериментов, обработка и анализ экспериментальных результатов, разработка и программная реализация аналитических и численных моделей, подготовка публикаций.

Структура и объём работы. Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка работ автора, благодарностей и списка литературы. Работа изложена на 128 страницах, включает 41 рисунок, 2 таблицы и список литературы с общим числом ссылок 195.

Основное содержание работы

Во **введении** диссертационной работы обоснована актуальность, новизна, теоретическая и практическая значимость исследуемой проблемы, сформулирована цель, основные задачи и положения, выносимые на защиту, описаны степень достоверности, апробация результатов работы, а также её краткое содержание.

В первой главе приведён обзор современного состояния исследований в области генерации гармоник фемтосекундным лазерным излучением, рассмотрены теоретические методы описания процесса генерации гармоник, а также приведено описание созданной экспериментальной установки, используемой в работе для получения экспериментальных результатов.

В параграфе 1.1 приведён обзор современного состояния исследований в области генерации гармоник фемтосекундным лазерным излучением. Рассматриваются в том числе работы, посвящённые генерации гармоник с использованием синтезированного лазерного поля. Особое внимание уделено экспериментальным работам, посвящённым измерению спектральных и энергетических характеристик генерируемого излучения гармоник.

В параграфе 1.2 рассмотрены теоретические методы описания процесса генерации гармоник, задействованные в данной диссертационной работе для интерпретации экспериментальных результатов. Рассмотрены как механизмы генерации гармоник одиночным атомом, так и ансамблем атомов.

В параграфе 1.3 приведено описание созданной экспериментальной установки, используемой в работе для получения экспериментальных результатов. Детально рассмотрена экспериментальная схема для генерации и регистрации гармоник, а также методы сокращения длительности генерирующего излучения и получения интенсивного терагерцевого поля. Наличие мощных фемтосекундных лазерных источников ближнего ИК, среднего ИК и терагерцевого диапазонов обеспечило возможность проведения экспериментальных исследований с использованием интенсивного когерентного излучения в беспрецедентно широком спектральном диапазоне – от терагерцевого до мягкого рентгеновского диапазонов (Рис.1). Использование теоретических подходов к расчёту спектра гармоник высокого порядка на основе численного решения двумерного нестационарного уравнения Шрёдингера, а также приближения сильного поля [43] обеспечило возможность интерпретации полученных экспериментальных данных. Следующие главы диссертационной работы посвящены описанию полученных экспериментальных результатов и их анализу.

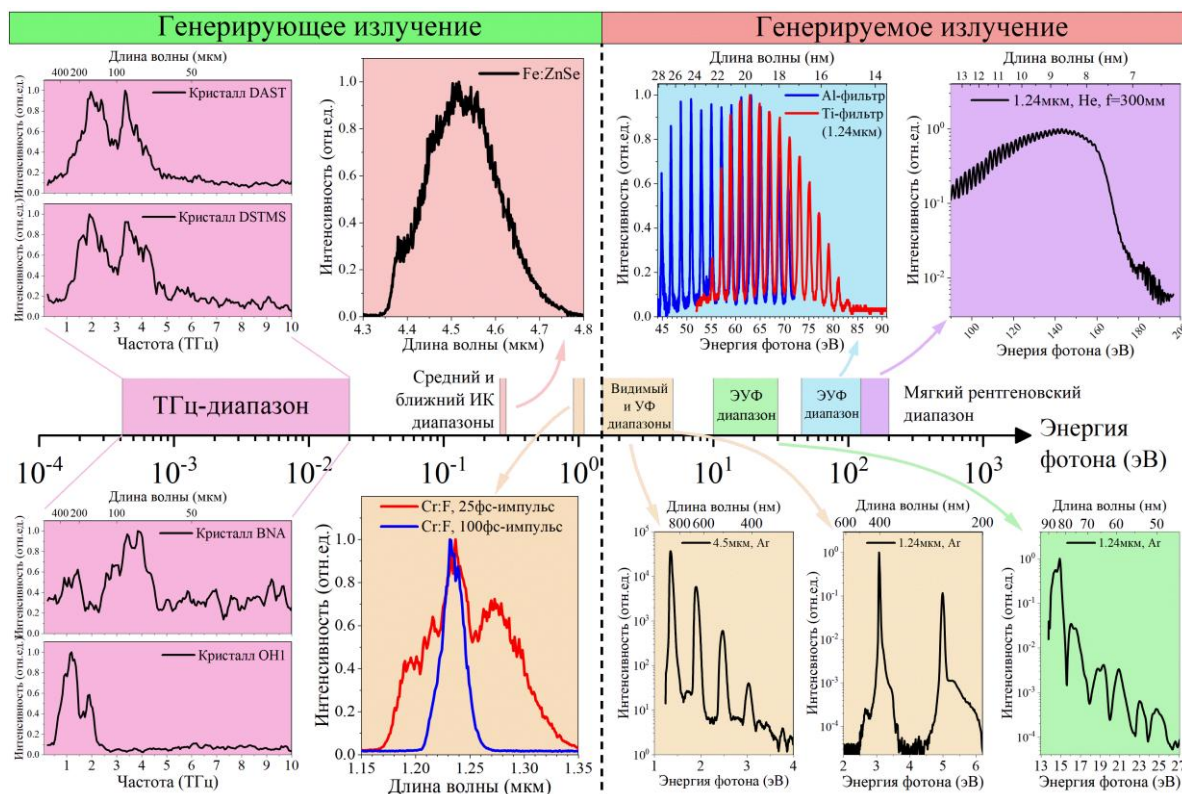


Рис.1. Измеренные спектры излучения терагерцевого, среднего и ближнего ИК диапазонов (столбец «генерирующее излучение»), используемого для генерации

излучения гармоник в видимом, УФ, экстремальном ультрафиолетовом и мягком рентгеновском диапазонах (столбец «генерируемое излучение»).

Вторая глава посвящена оптимизации спектрально-энергетических характеристик излучения гармоник низкого и высокого порядков при генерации с использованием интенсивного фемтосекундного лазерного излучения ИК диапазона.

В параграфе 2.1 описаны оригинальные результаты по оптимизации эффективности генерации гармоник низкого порядка путём управления количеством атомов среды, участвующих в генерации. Показано, что увеличение концентрации атомов и длины среды генерации позволяет увеличить эффективность генерации гармоник низкого порядка в условиях отсутствия поглощения генерируемого излучения. В частности, увеличение длины среды до длины перетяжки генерирующего излучения позволило на порядок повысить эффективность генерации (Рис.2), что привело к регистрации излучения вплоть до 11-й гармоники (409 нм) при воздействии излучения системы на кристалле Fe:ZnSe с длиной волны 4.5 мкм на газовую струю аргона.

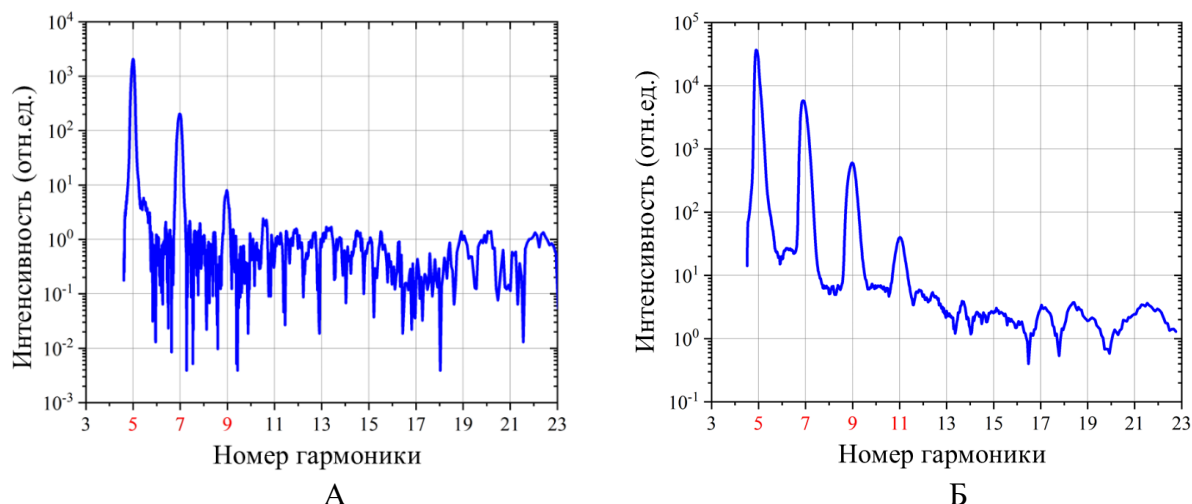


Рис.2. Спектры излучения гармоник, генерируемого излучением системы на кристалле Fe:ZnSe в аргоне при длине среды $L = 1$ мм (А) и $L = 7.1$ мм (Б).

Во параграфе 2.2 приведены оригинальные результаты по управлению и оптимизации спектрально-энергетических характеристик излучения гармоник высокого порядка, генерируемых излучением ближнего ИК диапазона с длиной волны 1.24 мкм. Изменение концентрации атомов среды позволило оптимизировать эффективность генерации гармоник высокого порядка, что обеспечило получение излучения в диапазоне энергий фотонов 45–83 эВ (27.6–14.9 нм) с суммарным генерируемым потоком фотонов $\sim 1.1 \cdot 10^9$ фотонов/с, что соответствует суммарной энергии гармоник ~ 1 нДж в импульсе.

Продemonстрировано, что квадратичная фазовая модуляция в диапазоне от -10^4 фс² до 10^4 фс² генерирующего импульса с длиной волны 1.24 мкм, интенсивностью на уровне ~ 100 ТВт/см² и шириной спектра, соответствующей спектрально-ограниченной длительности 100 фс, позволяет повысить эффективность генерации излучения гармоник в ~ 2 раза по сравнению со случаем спектрально-ограниченного импульса в широком диапазоне частот – от низкочастотного, до высокочастотного края плато гармоник (Рис.3), а также осуществить тонкое (на масштабах ~ 15 эВ) управление шириной спектра гармоник за счёт изменения интенсивности в области мишени (Рис.4).

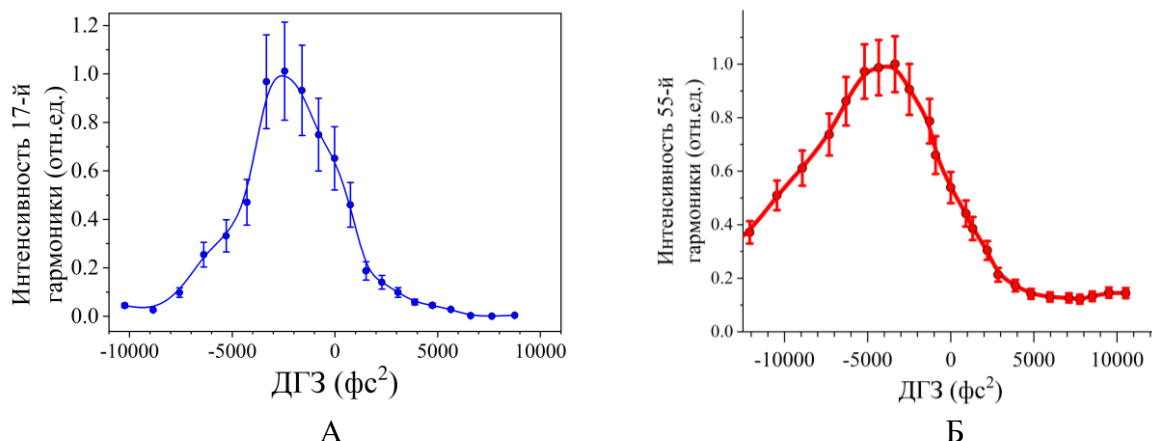


Рис.3. (А) Зависимость интенсивности 17-й гармоники от величины дисперсии групповых задержек (ДГЗ). (Б) Зависимость интенсивности 55-й гармоники от величины ДГЗ.

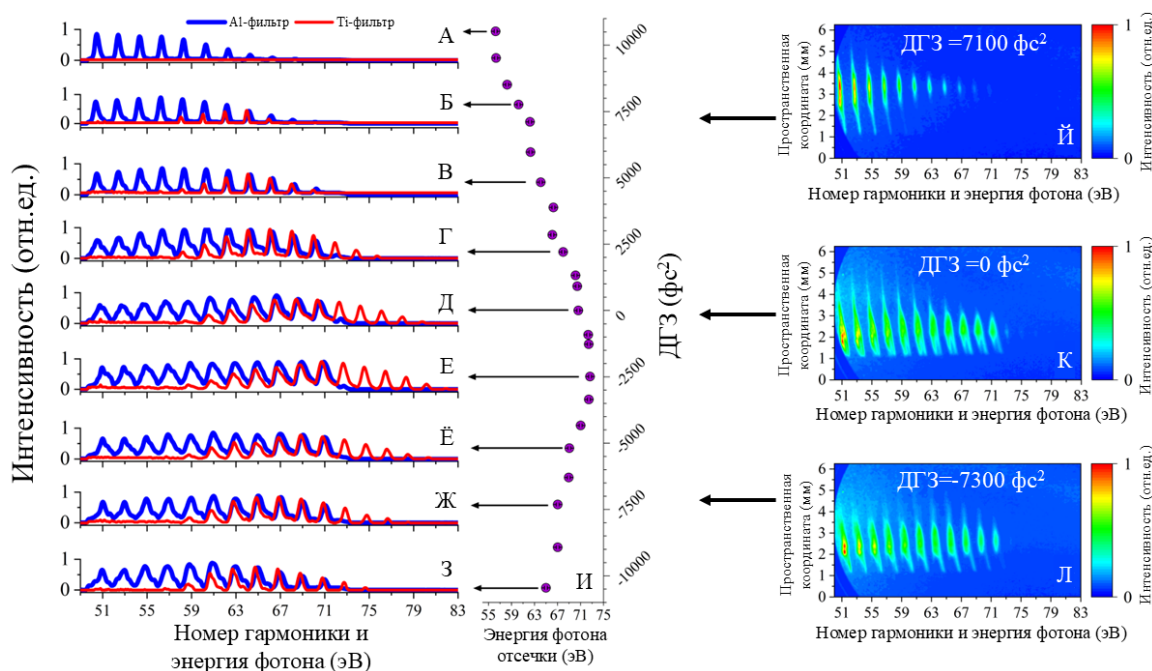


Рис.4. (А–З) – Зависимость спектра гармоник высокого порядка от величины ДГЗ. Синей линией обозначен спектр, измеренный с Al-фильтром, красной линией – спектр,

измеренный с Ti-фильтром. (И) – Зависимость энергии фотона гармоники, расположенной на крае плато, от величины ДГЗ. (Й-Л) Спектры, измеренные с Al-фильтром с использованием МКП, при ДГЗ = 7100 фс², 0 фс², –7300 фс². Стрелками обозначено соответствие между величинами ДГЗ и спектрами (А–З), (Й–Л).

Показано, что расширение спектра гармоник высокого порядка на ~10 эВ и уширение отдельных спектральных линий может быть осуществлено путём сокращения длительности генерирующего импульса с длиной волны 1.24 мкм и интенсивностью ~100 ТВт/см² со 100 фс до 35 фс даже в условиях четырёхкратного (с 3 мДж до 0.8 мДж) снижения энергии импульса, что является следствием увеличения интенсивности, достигаемой в области мишени, за счёт уменьшения влияния лазерно-индуцированной плазмы (Рис.5А).

Наконец, продемонстрировано, что существенное расширение плато гармоник на ~100 эВ без значительного уменьшения эффективности преобразования при использовании для генерации излучения с длиной волны 1.24 мкм, длительностью 100 фс и интенсивностью ~100 ТВт/см² может быть осуществлено путём замены газа Ar с низким потенциалом ионизации (15.75 эВ) на He с высоким потенциалом ионизации (24.6 эВ), что является следствием увеличения достигаемой интенсивности за счёт уменьшения скорости плазмообразования (Рис.5Б).

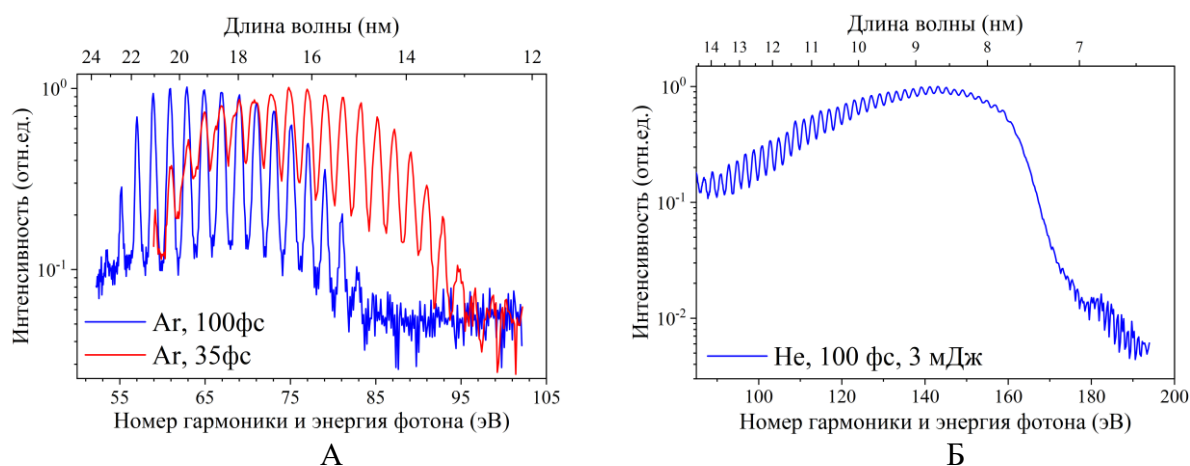


Рис.5. (А) Измеренные спектры, генерируемые излучением на длине волны 1.24 мкм с длительностью импульса 100 фс и энергией 3 мДж (синяя линия) и с длительностью импульса 35 фс и энергией 0.8 мДж (красная линия). (Б) Измеренный спектр, генерируемый излучением с длиной волны 1.24 мкм, длительностью импульса 100 фс, энергией 3 мДж в гелии.

Таким образом, использование лазерного источника на кристалле Cr:Forsterite с длиной волны 1.24 мкм с изменяемыми спектрально-временными параметрами обеспечило возможность генерации широкополосного излучения гармоник низкого и высокого порядка с управляемыми спектрально-энергетическими свойствами в области от оптического до мягкого рентгеновского диапазона (Рис.6).

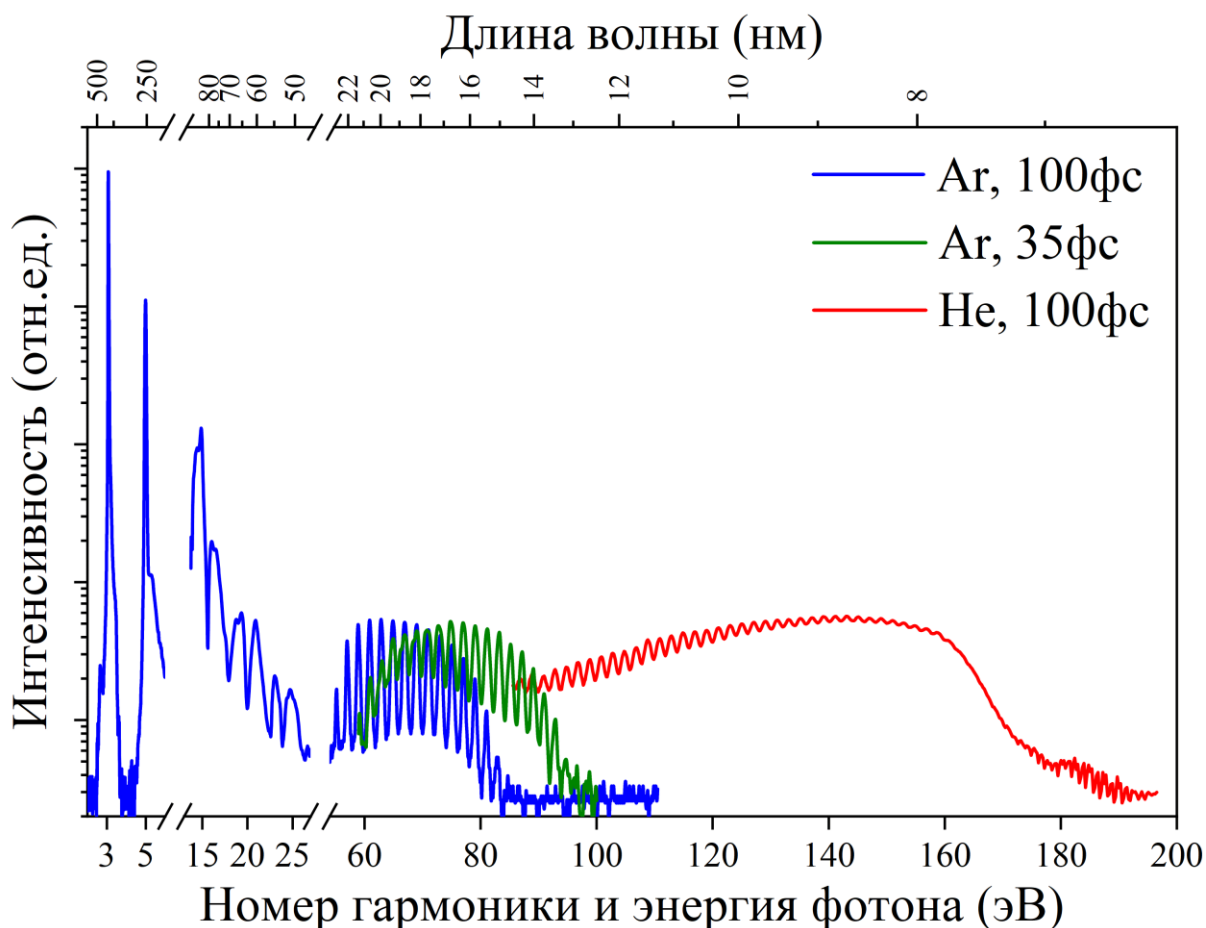


Рис.6. Измеренные спектры генерируемого излучения гармоник при воздействии излучения с длиной волны 1.24 мкм на аргон (Ar) при фокусировке линзой с фокусным расстоянием $f=300$ мм и длительности импульса 100 фс (синяя линия) и 35 фс (зелёная линия), а также при воздействии излучения с длиной волны 1.24 мкм на гелий (He) при длительности импульса 100 фс.

Третья глава посвящена генерации гармоник при воздействии фемтосекундного лазерного излучения ближнего ИК диапазона на газовую среду в присутствии сильного ($\sim 1\text{--}10$ МВ/см) терагерцевого поля. В качестве основных параметров, определяющих влияние добавочного длинноволнового поля на процесс генерации гармоник в двухцветном поле, следует выделить отношение длин волн генерирующих полей, определяемое как $\Lambda = \lambda_{\text{длин}}/\lambda_{\text{коротк}}$, где $\lambda_{\text{длин}}$ и $\lambda_{\text{коротк}}$ – длина волны длинноволнового и коротковолнового полей, соответственно, а также отношение пиковых напряжённостей данных полей,

определяемое как $a = E_{\text{длин}}^{\text{пик}} / E_{\text{коротк}}^{\text{пик}}$, где $E_{\text{длин}}^{\text{пик}}$ и $E_{\text{коротк}}^{\text{пик}}$ – пиковые напряжённости длинноволнового и коротковолнового полей, соответственно. На основе данных параметров можно провести классификацию характерных типов длинноволнового поля. Так, отношение длин волн $\Lambda \gtrsim 1$ определяет умеренно длинноволновое добавочное поле, $\Lambda \gg 1$ – сильно длинноволновое добавочное поле, отношение напряжённостей полей $a \ll 1$ определяет слабо возмущающее относительно основного излучения добавочное длинноволновое поле, $a \lesssim 1$ – сильно возмущающее относительно основного излучения добавочное длинноволновое поле. Данная глава, в которой приведены результаты для случая сильно длинноволнового добавочного поля ($\Lambda \gg 1$) состоит из двух параграфов.

В параграфе 3.1 приведены оригинальные результаты по влиянию интенсивного (~ 7.5 МВ/см) терагерцевого поля на процесс генерации гармоник низкого порядка при воздействии интенсивного (~ 100 ТВт/см²) фемтосекундного лазерного излучения ближнего ИК диапазона с длиной волны 1.24 мкм на газовую среду Ar. Экспериментально показано, что добавление такого слабо возмущающего терагерцевого поля при генерации гармоник низкого порядка приводит к появлению в спектре гармоник чётных порядков, что является следствием нарушения симметрии генерирующего поля (Рис.7).

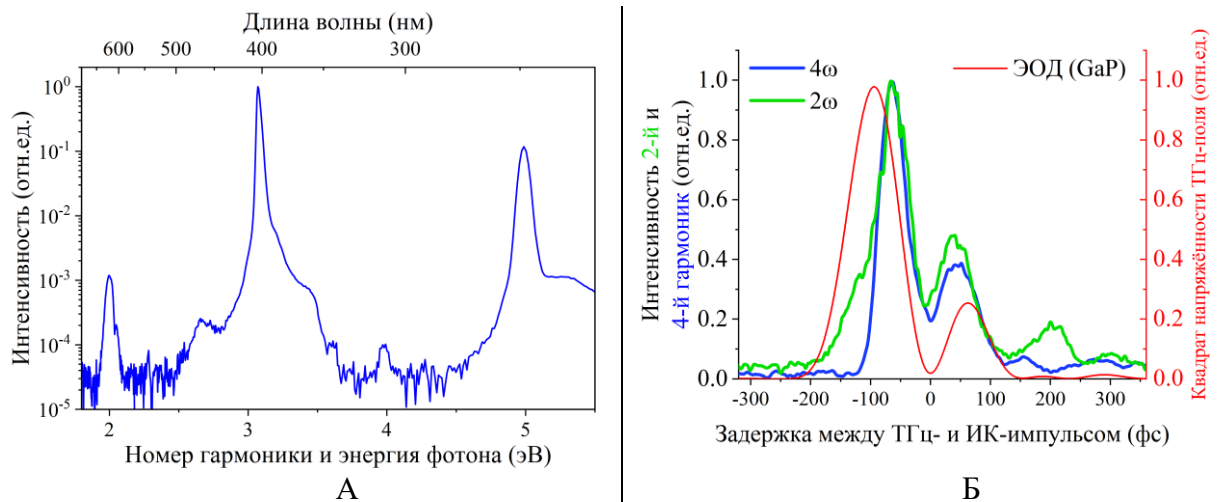


Рис.7. А) Измеренный спектр гармоник низкого порядка (2-5) при воздействии фемтосекундного лазерного излучения с длиной волны 1.24 мкм на газовую мишень аргона в присутствии ТГц-поля с пиковой напряжённостью 7.5 МВ/см. Б) Зависимость энергии 2-й и 4-й гармоник от временной задержки между ИК- и ТГц-импульсами, а также временная форма квадрата ТГц-поля, измеренная на основе метода электрооптического детектирования [63].

В параграфе 3.2 экспериментально показано, что добавление слабо возмущающего ($a \ll 1$, пиковая напряжённость ~ 7.5 МВ/см) сильно длинноволнового ($\Lambda \gg 1$, длина волны

100 мкм) поля терагерцевого диапазона при генерации гармоник высокого порядка фемтосекундным лазерным излучением ближнего ИК-диапазона с длиной волны 1.24 мкм и интенсивностью $\sim 100 \text{ ТВт/см}^2$ приводит к появлению в спектре гармоник чётных порядков и подавлению гармоник нечётных порядков (Рис.8), что является следствием изменения моментов рекомбинации электрона (Рис.9А) и соответствующего изменения условий интерференции для генерируемого излучения гармоник (Рис.9Б).

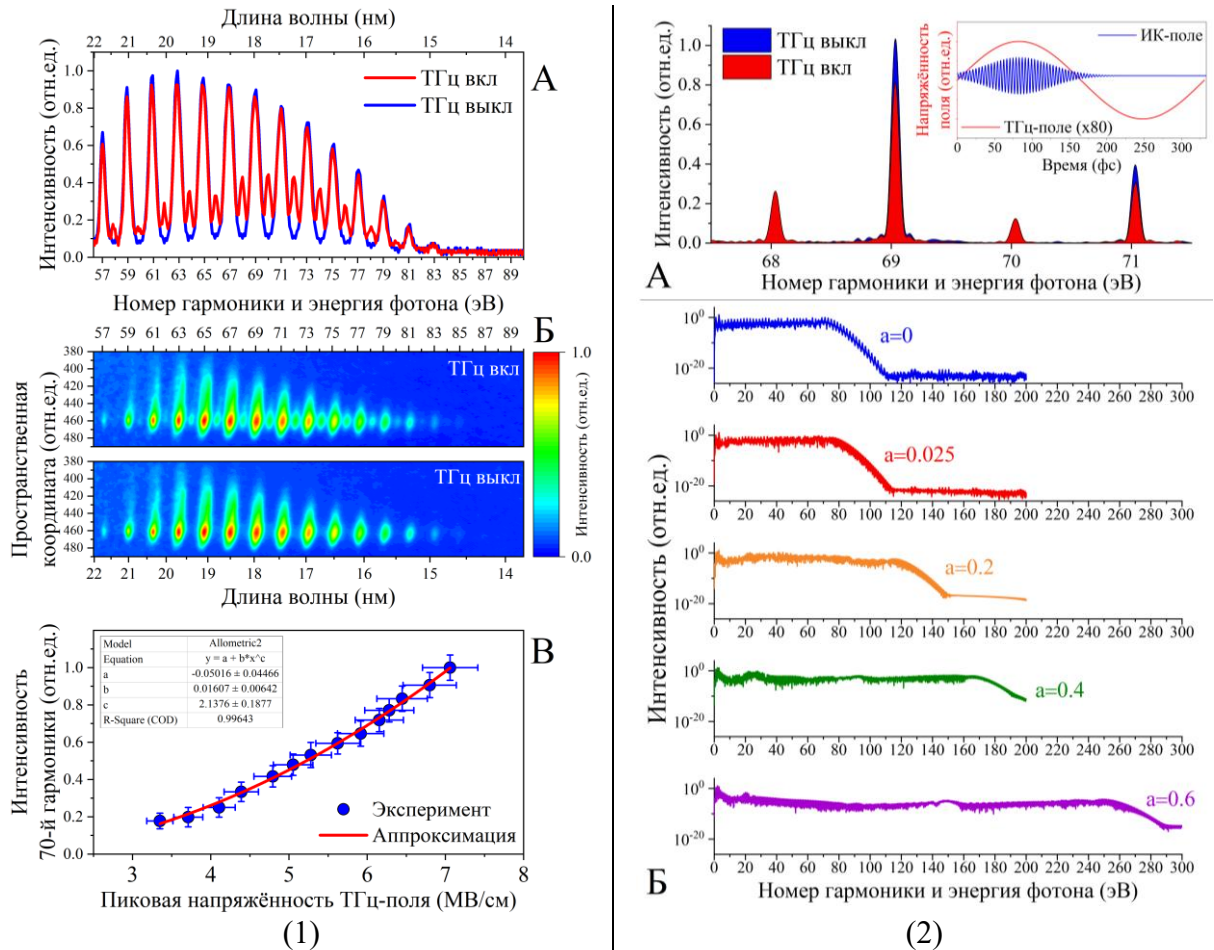


Рис.8. (1) (А) Спектры гармоник высокого порядка в присутствии (“ТГц вкл”) и в отсутствие (“ТГц выкл”) ТГц-поля с пиковой напряжённостью $\sim 7.5 \text{ МВ/см}$. Длина волны основного генерирующего импульса 1.24 мкм соответствует энергии фотона 1 эВ. (Б) Спектры гармоник, регистрируемые на МКП, в присутствии (“ТГц выкл”) и в отсутствие (“ТГц вкл”) ТГц-излучения. (В) Зависимость интенсивности 70-й гармоники от пиковой напряженности ТГц-поля. (2) (А) Рассчитанный в приближении сильного поля ГГВП-спектр в присутствии (“ТГц вкл”) и в отсутствие (“ТГц выкл”) ТГц-поля с учётом экспериментальных параметров ($a = 0.025$). Вставка демонстрирует временные формы ИК- и ТГц-полей, реализуемые в эксперименте. (Б) Рассчитанный в приближении

сильного поля ГВВП-спектр в зависимости от относительной напряжённости ТГц-поля a . Напряжённость ИК-поля в расчётах составляла 300 МВ/см.

На основе численного моделирования рассмотрена возможность расширения спектра гармоник высокого порядка путём добавления терагерцевого поля с относительной напряжённостью до $a = 0.6$ (Рис.8), что соответствует пиковой напряжённости ~ 100 МВ/см. Установлено, что эффективное уширение спектра в этом случае происходит вследствие нарушения симметрии генерирующего поля на масштабах длительности траектории электрона.

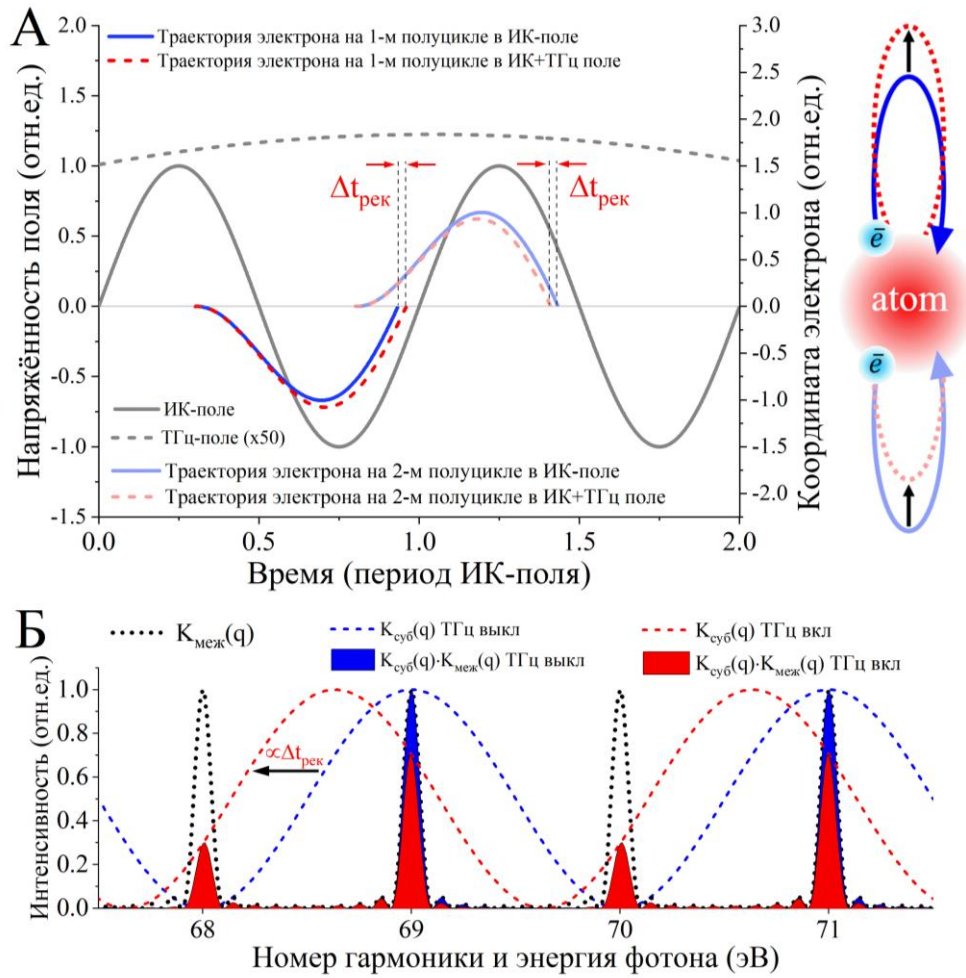


Рис.9. (А) Демонстрация влияния ТГц-поля на траектории движения электрона. ИК-поле обозначено сплошной серой линией, ТГц-поле обозначено пунктирной серой линией. Траектории электрона на первом и втором полупериодах поля ближнего ИК диапазона обозначены сплошной синей линией в отсутствие ТГц-поля и сплошной красной линией в присутствии ТГц-поля. Добавление ТГц-поля приводит к запаздыванию и опережению момента рекомбинации соответственно для траекторий электрона на первом и втором полупериодах поля на величину $\Delta t_{рек}$. (Б) Влияние субпериодной и межпериодной

интерференции на спектр излучения гармоник. Пунктирной чёрной линией обозначен коэффициент межпериодной интерференции $K_{\text{меж}}(q)$. Пунктирными синей и красной линиями обозначены коэффициент субпериодной интерференции $K_{\text{суб}}(q)$ в отсутствие и в присутствии ТГц-поля, соответственно. Добавление ТГц-поля приводит к смещению вдоль оси q кривой $K_{\text{суб}}(q)$, величина смещения пропорциональна $\Delta t_{\text{рек}}$. Заполненными синей и красной кривыми обозначены результирующий спектр гармоник, определяемый как $I_q(q) = K_{\text{меж}}(q) \cdot K_{\text{суб}}(q)$, в отсутствие и в присутствии ТГц-поля, соответственно.

Четвёртая глава посвящена генерации гармоник при двухцветном воздействии интенсивного лазерного излучения ближнего и среднего ИК диапазонов на газовую среду.

В параграфе 4.1 приведены оригинальные результаты по генерации гармоник интенсивным (~ 100 ТВт/см²) синтезированным лазерным полем, состоящим из импульсов ближнего ИК диапазона с длиной волны 1.24 мкм и среднего ИК диапазона с длиной волны 4.5 мкм. Экспериментально показано, что добавление слабо возмущающего ($a \ll 1$, интенсивность ~ 1 ГВт/см²) умеренно длинноволнового ($\Lambda \gtrsim 1$, длина волны 4.5 мкм) поля среднего ИК-диапазона при генерации гармоник высокого порядка фемтосекундным лазерным излучением ближнего ИК-диапазона с длиной волны 1.24 мкм и интенсивностью ~ 100 ТВт/см² в условиях параллельных поляризаций воздействующих полей приводит к появлению в спектре комбинационных гармоник 1-го порядка вследствие изменения моментов рекомбинации электрона (Рис.10А-Г). Переход к сильно возмущающему ($a \lesssim 1$, интенсивность ~ 1 ТВт/см²) полю среднего ИК диапазона, модифицирующему динамику ионизации и рекомбинации, приводит к генерации уширенного квазинепрерывного спектра вследствие формирования комбинационных гармоник высших порядков (Рис.10Д,Е). Изменение угла θ между направлениями линейных поляризаций воздействующих полей позволяет изменять динамику электрона, что позволяет управлять шириной спектра и его структурой, осуществляя переход между формированием отдельных комбинационных частот и квазинепрерывным спектром (Рис.10Ё-К).

В параграфе 4.2 экспериментально показано, что добавление сильно возмущающего ($a \lesssim 1$, интенсивность ~ 1 ТВт/см²) умеренно длинноволнового ($\Lambda \gtrsim 1$, длина волны 4.5 мкм) поля среднего ИК-диапазона при генерации гармоник высокого порядка фемтосекундным лазерным излучением ближнего ИК-диапазона с длиной волны 1.24 мкм и интенсивностью ~ 100 ТВт/см² при параллельных линейных поляризациях воздействующих полей приводит к расширению генерируемого спектра гармоник, причём при использовании гелия (He) в качестве среды генерации удаётся получить расширенный квазинепрерывный спектр с энергиями фотонов до 200 эВ (Рис.11).

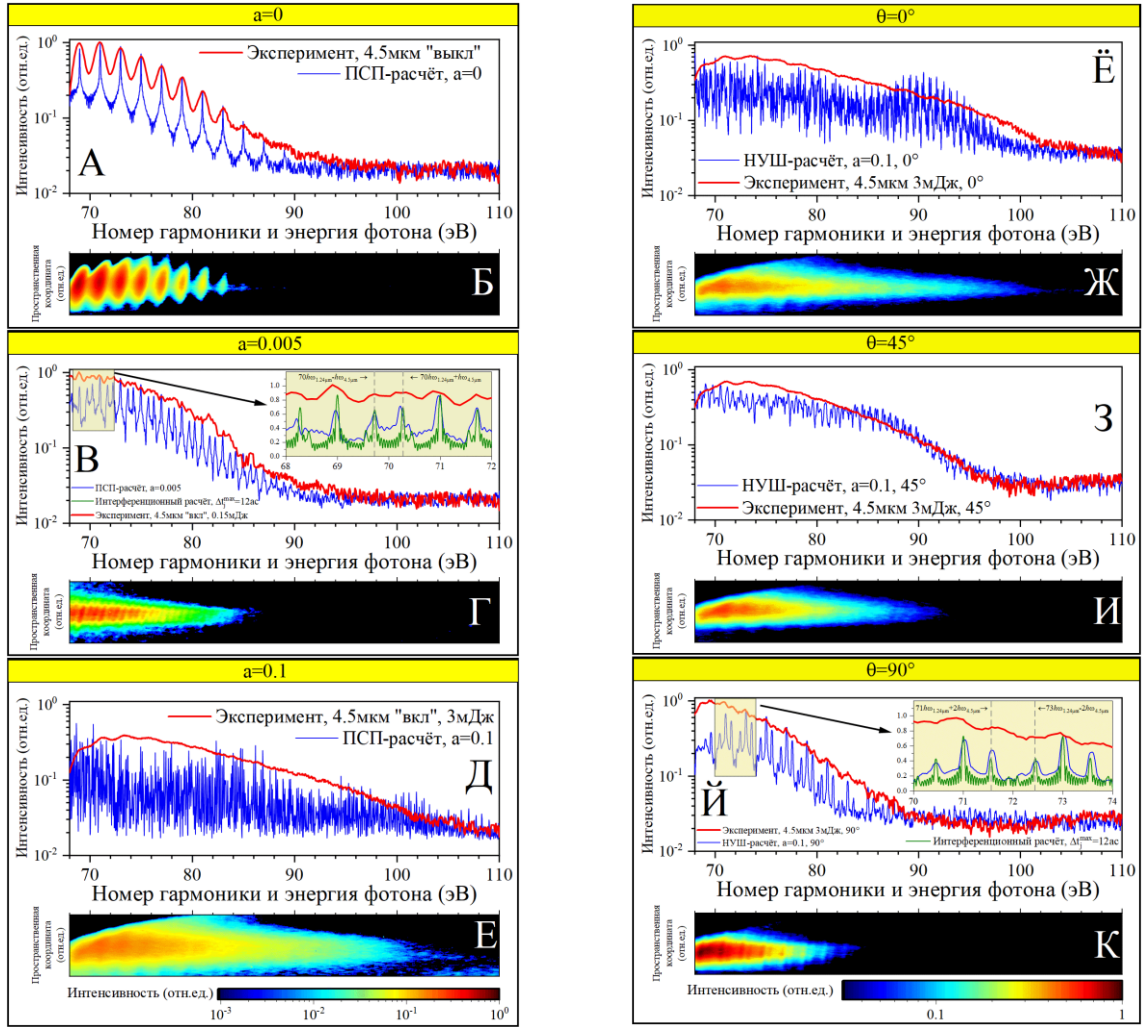


Рис.10. Левый столбец графиков демонстрирует зависимость спектра гармоник высокого порядка от относительной напряжённости a поля среднего ИК диапазона. Измеренный и рассчитанный на основе ПСП спектр в отсутствие (А) и в присутствии слабо (В) и сильно возмущающего (Д) поля среднего ИК диапазона. Соответствующие спектры, регистрируемые на МКП, представлены на (Б), (Г), (Е). На вставке в (В) демонстрируются в увеличенном масштабе измеренный спектр, а также спектры, рассчитанные по ПСП и на основе интерференционной модели. Используемый газ – Ar. Правый столбец графиков демонстрирует зависимость спектра гармоник высокого порядка от угла θ между направлениями поляризации поля среднего ИК диапазона и поля ближнего ИК диапазона. Измеренный и рассчитанный на основе численного решения НУШ спектр при параллельных (Ё), скрещенных под углом $\theta = 45^\circ$ (З) и ортогональных (Й) поляризациях полей ближнего и среднего ИК диапазонов ($a = 0.1$). Соответствующие спектры, регистрируемые на МКП, представлены на (Ж), (И), (К). Вставка в (Й) демонстрирует в увеличенном масштабе измеренный и рассчитанные на основе НУШ и

интерференционной модели спектры гармоник высокого порядка. Используемый газ – Ar.

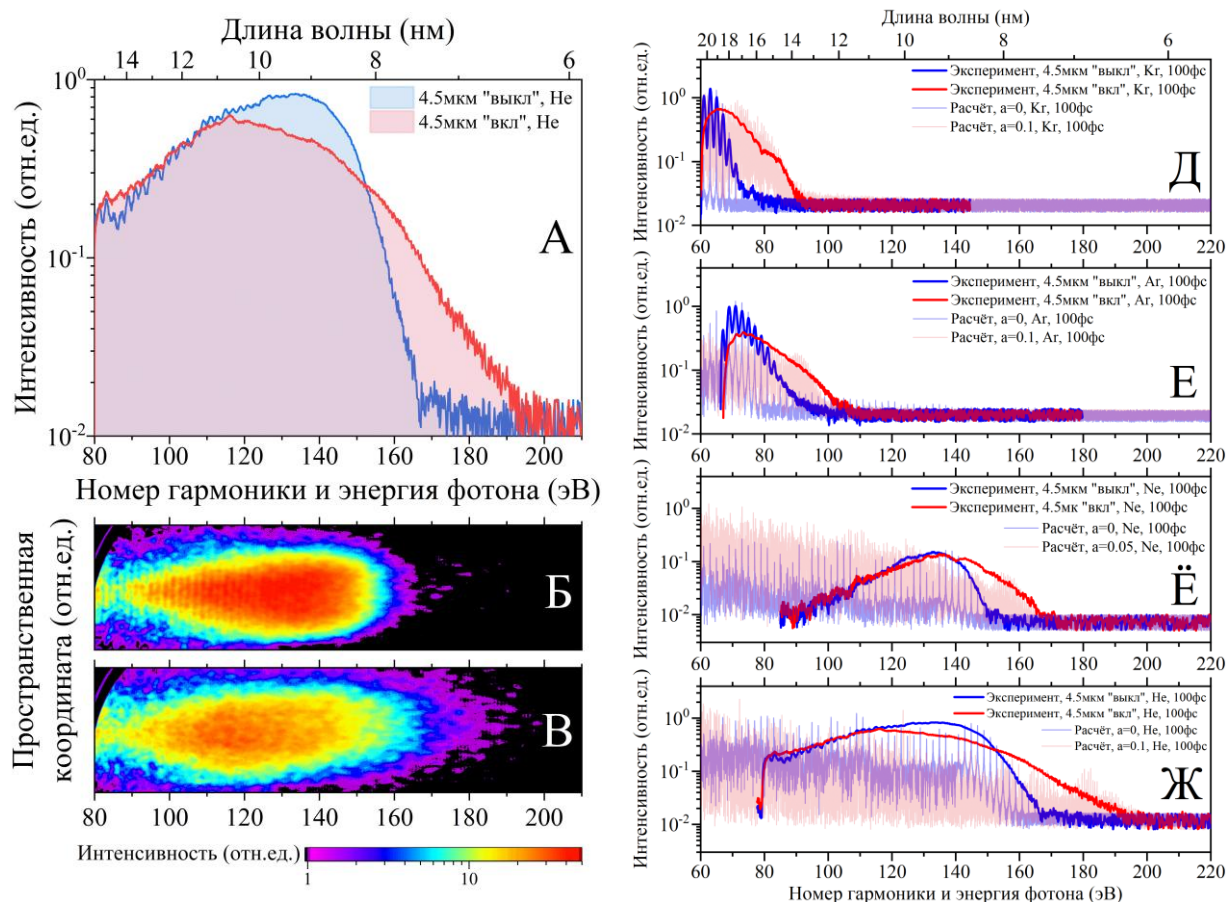


Рис.11. (А) Измеренные спектры в отсутствие (синяя линия) и в присутствии (красная линия) сильно возмущающего излучения среднего ИК диапазона с энергией импульса 3 мДж при использовании He в качестве среды генерации. Соответствующие спектры, регистрируемые на МКП, в отсутствие (Б) и в присутствии (В). Измеренные (насыщенные линии) и рассчитанные с использованием НУШ (блёклые линии) спектры в отсутствие (синие линии) и в присутствии (красные линии) 4.5мкм-поля при использовании Kr (Д), Ar (Е), Ne (Ё), He (Ж).

Путём численного моделирования на основе трёхступенчатой модели, совмещённой с квантовым описанием процессов ионизации и рекомбинации, показано, что расширение спектра гармоник происходит вследствие увеличения энергии электрона на траектории второго возврата в условиях компенсации распылывания его волной функции повышением вероятности ионизации (Рис.12).

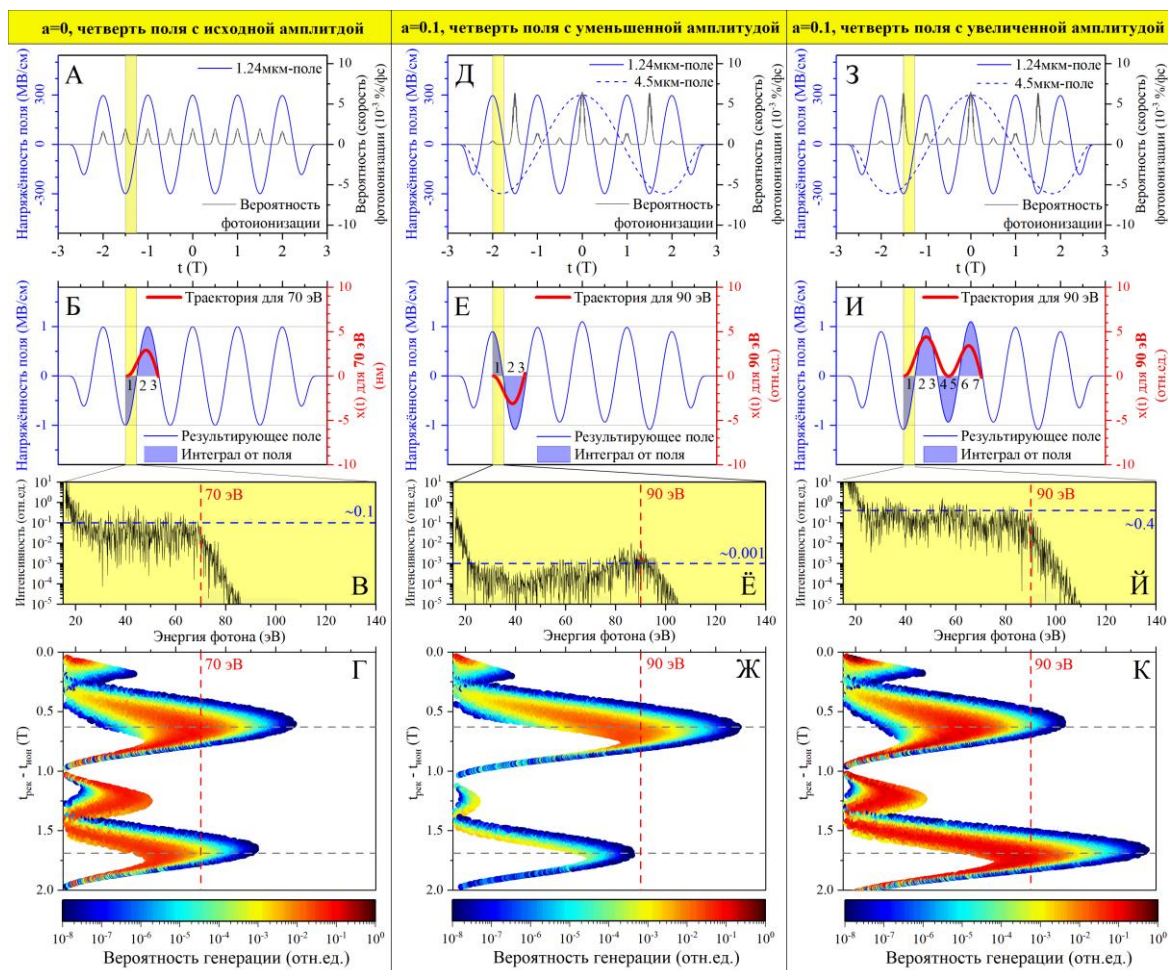


Рис.12. Рассчитанные спектры и траектории электронов, формируемые за счёт ионизации на трёх основных типах четвертей поля. В левой колонке представлены результаты для четверти поля с исходной амплитудой, формируемой в отсутствие излучения среднего ИК диапазона. В средней колонке представлены результаты для четверти поля с уменьшенной амплитудой, формируемой в присутствии поля среднего ИК диапазона. В правой колонке представлены результаты для четверти поля с увеличенной амплитудой, формируемой в присутствии поля среднего ИК диапазона. В каждой колонке представлены следующие графики. (А, Д, З) Рассчитанные временные формы поля ближнего ИК диапазона (непрерывная синяя линия) и поля среднего ИК диапазона (пунктирная синяя линия), а также рассчитанная вероятность фотоионизации (чёрная линия). (Б, Е, И) Рассчитанные временная форма синтезированного 1.24мкм+4.5мкм поля (синяя линия), траектория электрона с максимальной кинетической энергией (красная линия), а также интеграл от напряжённости поля на масштабах длительности данной траектории (заливка синим цветом). Вертикальные жёлтые рамки показывают диапазоны моментов рекомбинации, учтённые при расчёте спектров, показанных на (В, Ё, Й). (Г, Ж, К) Рассчитанные зависимости вероятности генерации фотона от его энергии и длительности траектории. Моделирование проведено для аргона.

Заключение

В данной диссертационной работе исследована роль добавочного длинноволнового поля при генерации гармоник двухцветным интенсивным лазерным полем с использованием излучения ближнего ИК (1.24 мкм), среднего ИК (4.5 мкм) и терагерцевого (1-5 ТГц) диапазонов, а также приведены оригинальные результаты по управлению спектрально-энергетическими характеристиками излучения гармоник. Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Создана экспериментальная установка, представляющая собой вакуумный (остаточное давление $5 \cdot 10^{-7}$ Торр) оптический тракт камеры генерации и спектрометра, которая позволила осуществить генерацию и регистрацию излучения гармоник низкого и высокого порядков в широком спектральном диапазоне от ближнего ИК и УФ диапазонов (1000-200 нм, 1.24-6.2 эВ) до экстремального УФ и мягкого рентгеновского диапазонов (~ 25 -6 нм, ~ 50 -200 эВ) со спектральным разрешением $\lambda/\delta\lambda \approx 530$ в окрестности длины волны 25 нм и $\lambda/\delta\lambda \approx 110$ в окрестности длины волны 6 нм.
2. Впервые экспериментально продемонстрировано, что формирование широкополосного излучения гармоник от видимого до мягкого рентгеновского диапазона (~ 400 -6 нм, ~ 3 -150 эВ) с управляемыми спектрально-энергетическими свойствами может быть осуществлено посредством генерации гармоник высокого и низкого порядков при воздействии высокоинтенсивного (~ 100 ТВт/см²) излучения с длиной волны 1.24 мкм с управляемыми спектрально-временными свойствами.
3. Впервые экспериментально показано, что когерентное управление процессом 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) и терагерцевого (1-5 ТГц, 1-10 МВ/см) диапазонов к основному излучению ближнего ИК диапазона (1.24 мкм, ~ 100 ТВт/см²). Так, экспериментально установлено, что добавление терагерцевого поля приводит к появлению в спектре гармоник чётных и подавлению гармоник нечётных порядков вследствие изменения моментов рекомбинации электрона. Показано, что добавление поля среднего ИК диапазона позволяет получить уширенный квазинепрерывный спектр излучения гармоник с энергиями фотонов вплоть до 200 эВ при использовании гелия в качестве среды генерации. Установлено, что переход от спектра, содержащего отдельные комбинационные частоты, к квазинепрерывному спектру обусловлен переходом к сильно возмущающему

воздействию длинноволнового поля. Установлено, что механизм расширения спектра гармоник при добавлении поля среднего ИК диапазона заключается в обеспечении эффективного ускорения электрона на траектории второго возврата при сохранении высокой эффективности преобразования, которая достигается за счёт компенсации расплывания волновой функции электрона путём повышения вероятности ионизации.

Статьи по теме диссертации, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе ядра РИНЦ "eLibrary Science Index" и в изданиях из перечня, рекомендованного Минобрнауки России:

1. **B.V. Rumiantsev**, E.A Migal, A.V. Pushkin, F.V. Potemkin. Observation of terahertz-field-induced coherent control of high-order harmonic generation in a noble gas // *Physical Review A* – 2025. – Vol. 111, №17. – p. 023117. Импакт-фактор 2.9 (JIF)/ 0.5 п.л./ вклад соискателя: 40%, EDN: HGXFEEV
2. **Румянцев Б.В.**, Пушкин А.В., Шулындин П.А., Мигаль Е.А. Потёмкин Ф.В. Широкополосное преобразование рентгеновского спектра гармоник высокого порядка в синтезированном лазерном поле интенсивных фемтосекундных лазерных импульсов ближнего и среднего ИК диапазонов в газе // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики* – 2025. – Т. 122, №9. – С. 563-571, Импакт-фактор 0.517 (РИНЦ) / 0.5 п.л./ вклад соискателя: 40%, DOI: 10.31857/S0370274X25110078
3. **Б. В. Румянцев**, Е. А. Мигаль, Е. А. Лобушкин, А. В. Пушкин, Ф. В. Потёмкин. Генерация яркого рентгеновского излучения в диапазоне длин волн 27-15 нм при воздействии высокоинтенсивных фазово-модулированных фемтосекундных лазерных импульсов ближнего ИК диапазона на газовую струю // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики* – 2025. – Т. 121, №5. – С. 358–364. Импакт-фактор 0.517 (РИНЦ)/ 0.4375 п.л./ вклад соискателя: 50%, EDN: ZZJSIG

Переводная версия:

B.V. Rumiantsev, E.A. Migal, E.A. Lobushkin, A.V. Pushkin, F.V. Potemkin. Generation of Bright X-Ray Radiation in the Wavelength Range of 15–27 nm under Excitation of a Gas Jet by Intense Phase-Modulated Near-Infrared Femtosecond Laser Pulses // *JETP*

Letters – 2025. – Vol. 121, №5. – p. 338–344. Импакт-фактор 1.3 (JIF)/ 0.4375 п.л./ вклад соискателя: 50%, EDN: YTGQKZ

4. Шулындин П.А., **Румянцев Б.В.**, Мигаль Е.А., Пушкин А.В., Потёмкин Ф.В. Влияние терагерцевого поля на процессы генерации гармоник низкого и высокого порядков фемтосекундным лазерным излучением в газовой среде // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики – 2025. – Т. 121, №10. – С. 884 – 891, Импакт-фактор 0.517 (РИНЦ)/ 0.5 п.л./ вклад соискателя: 30%, EDN: WUSTST

Переводная версия:

Shulyndin, P.A., **Rumiantsev, B.V.**, Migal, E.A., Pushkin, A.V., Potemkin, F.V. Influence of the Terahertz Field on the Processes of Low- and High-Order Harmonic Generation by Femtosecond Laser Pulses in a Gaseous Medium // JETP Letters – 2025. – Vol. 121, №11. – p. 846-852, Импакт-фактор 1.3 (JIF)/ 0.4375 п.л./ вклад соискателя: 30%, EDN: UPVLDC

5. **Б.В. Румянцев**, А.В. Пушкин, Ф.В. Потёмкин. Генерация гармоник высокого порядка вблизи низкочастотного края плато при нелинейном распространении фемтосекундного лазерного излучения ближнего ИК диапазона с длиной волны 1.24 мкм в плотной струе аргона // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики – 2023. – Т. 118, №4. – С. 270–279, Импакт-фактор 0.517 (РИНЦ)/ 0.625 п.л./ вклад соискателя: 60%, EDN: IVAOSK

Переводная версия:

Rumiantsev B.V., Pushkin A.V., Potemkin F.V. High Harmonic Generation near the Low-Frequency Edge of a Plateau under Nonlinear Propagation of 1.24- μ m Near-Infrared Femtosecond Laser Radiation in a Dense Argon Jet // JETP Letters – 2023. – Vol. 118, №4. – p. 273–281, Импакт-фактор 1.3 (JIF)/ 0.5625 п.л./ вклад соискателя: 60%, EDN: ABFLOG

6. **Б.В. Румянцев**, А.В. Пушкин, Д.З. Сулейманова, Н.А. Жидовцев, Ф.В. Потёмкин. Генерация перестраиваемого мощного малопериодного терагерцевого излучения в органических кристаллах при накачке мультитигаваттными чирпированными лазерными импульсами ближнего ИК диапазона на длине волны 1.24 мкм // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики – 2023. – Т. 117, №8. – С. 571–579, Импакт-фактор 0.517 (РИНЦ)/ 0.5625 п.л./ вклад соискателя: 30%, EDN: VOPYYE

Переводная версия:

Rumiantsev B.V., Pushkin A.V., Suleimanova D.Z., Zhidovtsev N.A., Potemkin F.V. Generation of Intense Few-Cycle Terahertz Radiation in Organic Crystals Pumped by 1.24-

μm Multigigawatt Chirped Laser Pulses // JETP Letters – 2023. – Vol. 117, №8. – p. 566–573, Импакт-фактор 1.3 (JIF)/ 0.5 п.л./ вклад соискателя: 30%, EDN: MLXWIP

7. **Б.В. Румянцев**, Н.А. Жидовцев, А.В. Пушкин, Е.А. Лобушкин, П.А. Шулындин, Д.З. Сулейманова, А.Б. Савельев-Трофимов, Ф.В. Потёмкин. Высоочастотный сдвиг и расширение спектра генерации ТГц излучения до 10 ТГц в процессе оптического выпрямления мощного фемтосекундного малопериодного излучения накачки ближнего ИК диапазона в кристалле ВНА // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики – 2023. – Т. 118, №11. – С. 802 – 809, Импакт-фактор 0.517 (РИНЦ)/ 0.5 п.л./ вклад соискателя: 40%, EDN: MUMLNH

Переводная версия:

Rumiantsev B.V., Zhidovtsev N.A., Pushkin A.V., Lobushkin E.A., Shulyndin P.A., Suleimanova D.Z., Savel'ev-Trofimov A.B., Potemkin, F. V. High-Frequency Shift and Extension of the Terahertz Radiation Spectrum up to 10 THz During Optical Rectification of High-Power Few-Cycle Near-Infrared Femtosecond Pump Radiation in a BNA Crystal // JETP Letters – 2023. – Vol. 118, №11. – p. 800–806, Импакт-фактор 1.3 (JIF)/ 0.4375 п.л./ вклад соискателя: 40%, EDN: ZLUYXC

8. **Б.В. Румянцев**, А.В. Пушкин, К.Е. Михеев, Ф.В. Потёмкин. Влияние длины и давления газовой струи на процесс генерации оптических гармоник фемтосекундным излучением лазерной системы на кристалле Fe:ZnSe с длиной волны 4.5 мкм // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики – 2022. – Т. 116, №10. – С. 659–666, Импакт-фактор 0.517 (РИНЦ)/ 0.5 п.л./ вклад соискателя: 60%, EDN: LYFGGN

Переводная версия:

Rumiantsev B.V., Pushkin A.V., Mikheev K.E., Potemkin F.V. Effect of the Length and Pressure of a Gas Jet on Optical Harmonics Generation by 4.5- μm Femtosecond Laser Radiation of a Fe:ZnSe Laser System // JETP Letters – 2022. – Vol. 116, №10. – p. 683–690, Импакт-фактор 1.3 (JIF)/ 0.5 п.л./ вклад соискателя: 60%, EDN: GWGWEB

9. **Б.В. Румянцев**, К.Е. Михеев, А.В. Пушкин, Е.А. Мигаль, С.Ю. Стремоухов, Ф.В. Потёмкин. Генерация оптических гармоник при взаимодействии высокоинтенсивного (до 10^{14} Вт/см²) фемтосекундного лазерного излучения среднего ИК диапазона лазерной системы на кристалле Fe:ZnSe с плотной ламинарной газовой струей // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики – 2022. – Т. 115, №7. – С. 431–436, Импакт-фактор 0.517 (РИНЦ)/ 0.375 п.л./ вклад соискателя: 50%, EDN: FLDMKT

Переводная версия:

Rumiantsev B.V., Mikheev K.E., Pushkin A.V., Migal E.A., Stremoukhov S.Yu., Potemkin F.V. Optical Harmonics Generation under the Interaction of Intense (up to 10^{14} W/cm²) Mid-Infrared Femtosecond Laser Radiation of a Fe:ZnSe Laser System with a Dense Laminar Gas Jet // JETP Letters – 2022. – Vol. 115, №7. – p. 390–395, Импа́кт-фактор 1.3 (JIF)/ 0.375 п.л./ вклад соискателя: 50%, EDN: KMXGYG

Список литературы

1. Ахманов С., Хохлов Р. Проблемы нелинейной оптики // М ВINITI. 1964. Т. 285. С. 2.
2. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика. Москва, 2004.
3. Ахманов С.А. и др. Генерация пикосекундных рентгеновских импульсов в плотной плазме, создаваемой мощными фемтосекундными лазерными импульсами с длиной волны 308 нм // Квантовая Электроника. Физический институт им. ПН Лебедева Российской академии наук, 1991. Т. 18, № 3. С. 278–279.
4. Гордиенко В.М. и др. О возможности генерации пико-и субпикосекундных рентгеновских импульсов в тонких пленках // Квантовая Электроника. Физический институт им. ПН Лебедева Российской академии наук, 1995. Т. 22, № 2. С. 157–160.
5. Волков Р.В. и др. Генерация жесткого рентгеновского излучения при облучении пористого кремния сверхинтенсивными фемтосекундными лазерными импульсами // Квантовая Электроника. Физический институт им. ПН Лебедева Российской академии наук, 1998. Т. 25, № 1. С. 3–4.
6. Щеглов П.А. и др. Эффективная генерация рентгеновского излучения при взаимодействии релятивистских лазерных импульсов с кластерной струей Kr // Квантовая Электроника. Физический институт им. ПН Лебедева Российской академии наук, 2024. Т. 54, № 4. С. 236–241.
7. Гордиенко В.М., Панченко В.Я. Колебательно-поступательная релаксация в SF 6 при больших уровнях возбуждения // Квантовая Электроника. Физический институт им. ПН Лебедева Российской академии наук, 1978. Т. 5, № 8. С. 1789–1790.
8. Гордиенко В.М. и др. Колебательная релаксация и диссоциация сильновозбужденных молекул озона // Квантовая Электроника. Физический институт им. ПН Лебедева Российской академии наук, 1982. Т. 9, № 11. С. 2204–2211.
9. Чекалин С.В. Уникальный фемтосекундный спектрометрический комплекс как инструмент для ультрабыстрой спектроскопии, фемтохимии и нанооптики // Успехи Физических Наук. 2006. Т. 176, № 6. С. 657–664.
10. Гордиенко В.М., Коротеев Н.И., Платоненко В.Т. Генерация сверхсильных оптических полей на основе мощных фемтосекундных лазерных систем с эксимерным усилением и эксперименты по генерации сверхкоротких рентгеновских импульсов // Успехи Физических Наук. 1993. Т. 163, № 12. С. 85–88.
11. Ахманов С.А. и др. Генерация пикосекундных рентгеновских импульсов в плотной плазме, создаваемой мощными фемтосекундными лазерными импульсами с длиной волны 308 нм // Квантовая Электроника. Физический институт им. ПН Лебедева Российской академии наук, 1991. Т. 18, № 3. С. 278–279.
12. Волков Р.В. и др. Генерация жесткого рентгеновского излучения при облучении пористого кремния сверхинтенсивными фемтосекундными лазерными импульсами //

- Квантовая Электроника. Физический институт им. ПН Лебедева Российской академии наук, 1998. Т. 25, № 1. С. 3–4.
13. Таранухин В.Д. Генерация гармоник высокого порядка в узком спектральном интервале // Квантовая Электроника. Физический институт им. ПН Лебедева Российской академии наук, 2001. Т. 31, № 6. С. 555–556.
 14. Таранухин В.Д. Влияние плотности среды на генерацию гармоник высокого порядка атомами в сильных лазерных полях // Квантовая Электроника. Физический институт им. ПН Лебедева Российской академии наук, 1998. Т. 25, № 9. С. 804–808.
 15. Стрелков В.В. и др. Аттосекундные электромагнитные импульсы: генерация, измерение и применение. Генерация высоких гармоник интенсивного лазерного излучения для получения аттосекундных импульсов // Усп Физ Наук. Успехи физических наук, 2016. Т. 186, № 5. С. 449–470.
 16. Strelkov V., Khokhlova M. Propagation effects in resonant high-order harmonic generation and high-order frequency mixing in a laser plasma // Phys. Rev. A. APS, 2024. Т. 110, № 1. С. L011101.
 17. Рябикин М.Ю., Емелин М.Ю., Стрелков В.В. Аттосекундные электромагнитные импульсы: генерация, измерение и применение. Аттосекундная метрология и спектроскопия // Успехи Физических Наук. 2023. Т. 193, № 4. С. 382–405.
 18. Коржиманов А.В. и др. Об ускорении протонов и легких ионов до энергий ГэВ при взаимодействии сверхсильного лазерного излучения со структурированной плазменной мишенью // Письма В Журнал Экспериментальной И Теоретической Физики. Российская академия наук, Отделение физических наук, 2007. Т. 86, № 9. С. 662–669.
 19. Ким А.В., Рябикин М.Ю., Сергеев А.М. От фемтосекундных к аттосекундным импульсам // Успехи Физических Наук. 1999. Т. 169, № 1. С. 58–66.
 20. Чекалин С.В., Кандидов В.П. От самофокусировки световых пучков—к филаментации лазерных импульсов // Успехи Физических Наук. 2013. Т. 183, № 2. С. 133–152.
 21. Компанец В.О. и др. Коническая эмиссия фемтосекундного лазерного импульса при фокусировке аксиконом в стекло К 108 // Квантовая Электроника. Физический институт им. ПН Лебедева Российской академии наук, 2006. Т. 36, № 9. С. 821–824.
 22. Agostini P. и др. Free-free transitions following six-photon ionization of xenon atoms // Phys. Rev. Lett. APS, 1979. Т. 42, № 17. С. 1127.
 23. Mitrofanov A.V. и др. Terahertz-field-modified electron dynamics in above-threshold ionization // Opt. Lett. 2025. Т. 50, № 21. С. 6626.
 24. l’Huillier A. и др. Multiply charged ions induced by multiphoton absorption in rare gases at 0.53 μm // Phys. Rev. A. APS, 1983. Т. 27, № 5. С. 2503.
 25. Андреев А.В., Гордиенко В.М., Савельев-Трофимов А.Б. Ядерные процессы в высокотемпературной плазме, индуцируемой сверхкоротким лазерным импульсом // Квантовая Электроника. Физический институт им. ПН Лебедева Российской академии наук, 2001. Т. 31, № 11. С. 941–956.
 26. Шуляпов С.А. и др. Измерение энергетического спектра короткоимпульсных источников нейтронов на основе фотоядерных реакций // Письма В Журнал Экспериментальной И Теоретической Физики. Российская академия наук, Отделение физических наук, 2025. Т. 121, № 11. С. 865–870.
 27. Emelin M.Y. и др. Attosecond burst and high-harmonic generation in molecular ionization by ultrashort laser pulses // J. Exp. Theor. Phys. Lett. Springer, 2003. Т. 77, № 5. С. 212–216.

28. The Nobel Prize in Physics 2023 [Электронный ресурс] // NobelPrize.org. URL: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2023/press-release/> (дата обращения: 18.01.2024).
29. Ахманов С.А. и др. Генерация и усиление сверхкоротких импульсов света с помощью эксимерных лазеров // Квантовая Электроника. Физический институт им. ПН Лебедева Российской академии наук, 1986. Т. 13, № 10. С. 1992–1998.
30. Nobel Prize in Physics 2018 [Электронный ресурс] // NobelPrize.org. URL: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2018/summary/> (дата обращения: 25.03.2025).
31. Corkum P.B. Plasma perspective on strong field multiphoton ionization // Phys. Rev. Lett. 1993. Т. 71, № 13. С. 1994–1997.
32. Митрофанов А.В., Рожко М.В., Назаров М.М., Серебрянников Е.Е., Федотов А.Б., Сидоров-Бирюков Д.А. Генерация высоких оптических гармоник при взаимодействии фемтосекундных лазерных импульсов среднего ИК-диапазона с поверхностью твердотельных мишеней // J. Exp. Theor. Phys. 2022. Т. 136, № 4.
33. Митрофанов А.В. и др. Релятивистские нелинейно-оптические явления в поле субтераваттных лазерных импульсов // Письма в Журнал Экспериментальной И Теоретической Физики. 2020. Т. 112, № 1-2(7). С. 22–29.
34. Strelkov V., Bondarenko S. Macroscopic Aspects of Resonant Generation of High-Order Harmonics in Indium Laser Plasma // Phys. Wave Phenom. Springer, 2025. Т. 33, № 1. С. 65–71.
35. Ganeev R.A. и др. High-order harmonic generation during different overlaps of two-colored pulses in laser-produced plasmas and gases // Eur. Phys. J. D. 2020. Т. 74, № 10. С. 199.
36. Popmintchev T. и др. Bright Coherent Ultrahigh Harmonics in the keV X-ray Regime from Mid-Infrared Femtosecond Lasers // Science. American Association for the Advancement of Science, 2012. Т. 336, № 6086. С. 1287–1291.
37. Платоненко В.Т., Стержантов А.Ф. Полуклассическая теория генерации аттосекундных импульсов // Квантовая Электроника. Физический институт им. ПН Лебедева Российской академии наук, 2006. Т. 36, № 11. С. 1074–1079.
38. Platonenko V.T. Interference of electron trajectories and generation of high-order optical harmonics in a Coulomb system // Quantum Electron. IOP Publishing, 2001. Т. 31, № 1. С. 55.
39. Platonenko V.T., Strelkov V.V. Generation of high-order harmonics in a high-intensity laser radiation field // Quantum Electron. IOP Publishing, 1998. Т. 28, № 7. С. 564.
40. Stremoukhov S.Yu., Andreev A.V., Shoutova O.A. High-order harmonic generation: A quantum-mechanical description and the effects of propagation // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2016. Т. 80, № 4. С. 455–458.
41. Stremoukhov S.Y., Andreev A.V. Quantum-mechanical elaboration for the description of low- and high-order harmonics generated by extended gas media: prospects to the efficiency enhancement in spatially modulated media // Laser Phys. 2018.
42. Frolov M.V. и др. Analytic theory of high-order-harmonic generation by an intense few-cycle laser pulse // Phys. Rev. A. 2012. Т. 85, № 3. С. 033416.
43. Lewenstein M. и др. Theory of high-harmonic generation by low-frequency laser fields // Phys. Rev. A. 1994. Т. 49, № 3. С. 2117–2132.
44. Tate J. и др. Scaling of Wave-Packet Dynamics in an Intense Midinfrared Field // Phys. Rev. Lett. 2007. Т. 98, № 1. С. 013901.

45. Schiessl K. и др. Quantum Path Interference in the Wavelength Dependence of High-Harmonic Generation // *Phys. Rev. Lett.* 2007. Т. 99, № 25. С. 253903.
46. Weissenbilder R. и др. How to optimize high-order harmonic generation in gases: 11 // *Nat. Rev. Phys.* Nature Publishing Group, 2022. Т. 4, № 11. С. 713–722.
47. Popmintchev T. и др. Phase matching of high harmonic generation in the soft and hard X-ray regions of the spectrum. 2009.
48. Geints Y.E. и др. Peculiarities of supercontinuum generation in high-pressure He, N₂, Ar, and CO₂ gases // *Opt. Laser Technol.* Elsevier, 2025. Т. 191. С. 113370.
49. Andreev A.V., Stremoukhov S.Y., Shoutova O.A. Spectrum of high harmonics generated by two-color circularly polarized laser field in atomic media // *Laser Phys.* 2020. Т. 30, № 10. С. 105402.
50. Stremoukhov S.Y., Yakovlev A.A., Andreev A.V. High harmonic generation in two-color elliptical laser fields of different helicity // *Laser Phys Lett.* 2020.
51. Meshkov O. и др. Enhancing high harmonic generation in a short-pulse two-color laser field by controlling the atomic-electron subcycle detachment and acceleration dynamics // *Phys. Wave Phenom.* Springer, 2021. Т. 29, № 1. С. 50–59.
52. Kroh T. и др. Enhanced high-harmonic generation up to the soft X-ray region driven by mid-infrared pulses mixed with their third harmonic // *Opt. Express.* 2018. Т. 26, № 13. С. 16955.
53. Jin C. и др. Waveforms for optimal sub-keV high-order harmonics with synthesized two- or three-colour laser fields // *Nat. Commun.* 2014. Т. 5, № 1. С. 4003.
54. Calegari F. и др. Efficient continuum generation exceeding 200 eV by intense ultrashort two-color driver // *Opt. Lett.* 2009. Т. 34, № 20. С. 3125.
55. Xue B. и др. Fully stabilized multi-TW optical waveform synthesizer: Toward gigawatt isolated attosecond pulses // *Sci. Adv.* 2020. Т. 6, № 16. С. eaay2802.
56. Birulia V., Khokhlova M., Strelkov V. Generation of attosecond pulses with a controllable carrier-envelope phase via high-order frequency mixing // *Phys. Rev. A.* APS, 2022. Т. 106, № 2. С. 023514.
57. Birulia V., Khokhlova M., Strelkov V. Macroscopic effects in generation of attosecond XUV pulses via high-order frequency mixing in gases and plasma // *New J. Phys.* IOP Publishing, 2024. Т. 26, № 2. С. 023005.
58. Lan P. и др. Isolated sub- 100 - as pulse generation via controlling electron dynamics // *Phys. Rev. A.* 2007. Т. 76, № 1. С. 011402.
59. Du J.-X. и др. Generation of a quasi-chirp-free short isolated attosecond pulse from high-order harmonics by optimized multicolor laser fields // *Phys. Rev. A.* 2023. Т. 108, № 2. С. 023101.
60. Hong W. и др. Control of quantum paths of high-order harmonics and attosecond pulse generation in the presence of a static electric field // *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys.* 2007. Т. 40, № 12. С. 2321–2331.
61. Stepanov A.G. и др. Generation of 30 μ J single-cycle terahertz pulses at 100 Hz repetition rate by optical rectification // *Opt. Lett.* Optical Society of America, 2008. Т. 33, № 21. С. 2497–2499.
62. Степанов А.Г. и др. Модификация спектра фемтосекундного лазерного импульса при высокоэффективной генерации терагерцового излучения методом оптического выпрямления. 2007.
63. Wu Q., Zhang X.-C. 7 terahertz broadband GaP electro-optic sensor // *Appl. Phys. Lett.* 1997. Т. 70, № 14. С. 1784–1786.