

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Рожко Михаил Викторович

**Широкополосное нелинейно-оптическое преобразование
мощных сверхкоротких лазерных импульсов
среднего инфракрасного диапазона**

1.3.19. Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2023

Диссертация подготовлена на кафедре общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

- Научный руководитель – **Желтиков Алексей Михайлович**,
доктор физико-математических наук, профессор
- Официальные оппоненты – **Моисеев Сергей Андреевич**,
доктор физико-математических наук, профессор
Казанский национальный исследовательский
технический университет им. А.Н. Туполева –
КАИ
директор Казанского квантового центра
- Головань Леонид Анатольевич**,
доктор физико-математических наук, доцент
Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова
профессор кафедры общей физики и
молекулярной электроники
- Селезнев Леонид Владимирович**,
доктор физико-математических наук, доцент
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
и.о. заведующего лабораторией фемтосекундной
нелинейной оптики, ведущий научный сотрудник

Защита диссертации состоится «19» октября 2023 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.013.4 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, МГУ им. М.В. Ломоносова, 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/013.4/2565/>.

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

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

А.А. Коновко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Исторически возможность эффективного широкополосного преобразования мощного излучения лазерных источников на центральной длине волны, лежащей далеко за пределами ближнего инфракрасного (ИК) диапазона, была продемонстрирована еще в конце 1970-х годов [1]. Плотная горячая плазма, создаваемая на поверхности алюминиевой мишени наносекундными импульсами CO₂-лазера на центральной длине волны 10.6 мкм, становилась источником оптических гармоник вплоть до 11-го порядка. Спустя четыре года, также с использованием CO₂-лазера, на поверхности карбоновых стержней была достигнута интенсивность излучения более 10¹⁵ Вт/см², что позволило получить генерацию высоких гармоник до 46-го порядка (230 нм) [2]. Выполненные впоследствии исследования при помощи пико- и субпикосекундных эксимерных [3, 4], а затем и неодимовых лазерных систем [5] продемонстрировали генерацию высоких гармоник в благородных газах. Развитие к началу 1990-х годов фемтосекундных лазерных источников [6], в частности, широко используемых в настоящее время титан-сапфировых лазеров [7], ознаменовало начало интенсивного исследования процессов взаимодействия мощных световых полей ближнего ИК диапазона с веществом при длительности лазерных импульсов порядка нескольких периодов поля, в результате чего была реализована генерация гармоник вплоть до рентгеновского диапазона [8, 9].

Современная тенденция развития мощных фемтосекундных лазерных источников среднего ИК диапазона [10, 11] актуализирует проблему масштабирования известных нелинейно-оптических эффектов по длине волне управляющего поля и обуславливает потребность расширения и обобщения физической картины динамики плазмы при взаимодействии излучения таких источников с веществом [12, 13]. Усиленное влияние пондеромоторного потенциала и большой период колебания поля для

длинноволнового лазерного излучения напрямую влияет на кинетические параметры и динамику свободных электронов в создаваемой в газах или на поверхности твердотельных мишеней плазме, заметно снижая порог интенсивности накачки, необходимой для наблюдения эффектов релятивистской электронной динамики [14, 15]. Квадратичная зависимость критической мощности самофокусировки от длины волны лазерного источника в сочетании со свойствами аномальной дисперсии атмосферного воздуха в среднем инфракрасном диапазоне обеспечивает высокую степень пространственно-временной локализации излучения без существенных потерь энергии на ионизацию [16, 17]. Продемонстрированы сценарии рекордно широкополосного нелинейно-оптического преобразования лазерных импульсов среднего ИК диапазона в газах, твердых телах, фотонно-кристаллических волноводах [18-20].

Эффективным и уникальным инструментом генерации как интенсивного высокочастотного, так и низкочастотного излучения является лазерная филаментация [21, 22]. При этом вторичное излучение лазерно-плазменных источников, индуцируемых импульсами среднего ИК диапазона, может характеризоваться повышенной эффективностью и отличными от условий ближнего ИК управляющего поля свойствами, определяясь динамикой фотоэлектронных токов [23, 24]. Схожие физические процессы, приводящие к генерации и высокочастотного излучения гармоник, и низкочастотного излучения терагерцового (ТГц) и СВЧ диапазонов [25, 26], мотивируют проводить исследования по развитию универсальных лазерно-плазменных методик генерации сверхширокополосного вторичного излучения в поле лазерных импульсов среднего ИК диапазона. Данные методики представляют несомненный интерес с точки зрения исследований сверхбыстрой электронной динамики [27], широкополосной спектхронографии [28], дистанционного зондирования [29] и удаленной высокоплотной передачи информации [30].

Степень разработанности темы исследования

Создание мощных фемтосекундных лазерных систем среднего ИК диапазона на основе оптического параметрического усиления chirпированных импульсов [10] дало толчок к развитию экспериментальных методов исследования лазерно-плазменных нелинейностей, являющихся источником чрезвычайно широкополосного – мультиоктавного и мультидекадного – вторичного когерентного излучения как в высокочастотном, так и низкочастотном спектральном диапазоне. В важнейшей работе группы М. Марнейн и Г. Каптейна, посвященной высоким гармоникам в рентгеновском диапазоне при взаимодействии мощных сверхкоротких лазерных импульсов на центральной длине волны 3.9 мкм с газовыми струями, реализована генерация суперконтинуума в области 0.3-1.6 кэВ [18]. Генерация мультиоктавного широкополосного излучения в спектральном диапазоне 250-6500 нм при филаментации сверхкоротких лазерных импульсов среднего ИК диапазона в атмосферном воздухе была продемонстрирована группой профессора А.М. Желтикова [31]. Исследования по созданию лазерными импульсами среднего ИК диапазона плазменных источников вторичного широкополосного излучения в ТГц (до 20 ТГц) и ГГц (2-70 ГГц) диапазонах были представлены научными группами А. Балтушки и М. Мильчберга соответственно [32, 33]. В то же время активно развиваются физические модели фотоиндуцированных плазменных токов, способные корректно описывать генерацию высоких гармоник и низкочастотного (дальнего ИК, ТГц, СВЧ) излучения совместно как результат общей сверхбыстрой электронной динамики [33, 34].

Таким образом, активное развитие за последнее десятилетие методов широкополосного преобразования мощных лазерных импульсов среднего ИК диапазона и интерес к ним со стороны научных групп мирового уровня обуславливает высокую степень актуальности темы настоящей диссертационной работы.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью исследований по теме работы является развитие новых методик широкополосного нелинейно-оптического преобразования мощных субтераваттных сверхкоротких лазерных импульсов среднего ИК диапазона и их применение в области нелинейной спектроскопии, исследования сверхбыстрой динамики плазмы и дистанционного зондирования. Для реализации данных методик решается круг экспериментальных задач, связанных с генерацией высоких гармоник в области вакуумного ультрафиолетового (УФ) диапазона в газовых средах и от поверхности твердотельных мишеней, а также созданием лазерно-плазменных источников вторичного широкополосного когерентного низкочастотного излучения со спектром, простирающимся от ТГц до СВЧ диапазона.

Научная новизна

Продемонстрирована генерация суперконтинуума при взаимодействии сверхкоротких лазерных импульсов с длительностью порядка 80 фс на центральной длине волны 3.9 мкм с молекулярным азотом. Показано, что спектральная структура сгенерированного излучения состоит из гармоник высокого порядка в диапазоне 125-850 нм. Установлена немонотонная зависимость интенсивности высоких гармоник дальнего УФ диапазона от давления азота. Исследован эффект вынужденного комбинационного рассеяния в поле гармоник высокого порядка при взаимодействии лазерного излучения среднего ИК диапазона с двухатомной колебательной системой молекулярного азота. В частности, показано, что в высокочастотном крыле 11-й гармоники на длине волны 350 нм ясно видны черты вынужденного комбинационного усиления и вынужденного комбинационного поглощения вблизи частоты колебательного перехода второй положительной системы азота на соответствующей длине волны 337.1 нм. Также показано проявление некогерентного излучения плазмы вблизи колебательных переходов азота 317 нм и монооксида азота 237 нм и 215 нм.

Показано, что когерентное кильватерное излучение плазмы, индуцированное высокоинтенсивными (до 10^{17} Вт/см²) сверхкороткими лазерными импульсами среднего ИК диапазона при фокусировке на поверхность твердотельной мишени, порождает мультиоктавное излучение гармоник высокого порядка. Зарегистрированы гармоники 2-51 порядка от лазерного излучения на центральной длине волны 3.9 мкм. Обнаружено, что спектр гармоник крайне чувствителен к чирпу импульсов накачки среднего ИК спектрального диапазона ввиду излучения гармоник цугами аттосекундных импульсов с переменным временным интервалом между отдельными импульсами внутри цуга. Положительное чирпирование лазерных импульсов способно частично компенсировать варьирование этого интервала, реализуя генерацию гармоник высших порядков в спектре излучения плазмы вплоть до экстремального УФ диапазона. Показано, что наиболее высокие порядки гармоник наблюдаются при взаимодействии лазерного излучения с поверхностью мишени из полистирола.

Экспериментально продемонстрировано, что плазменные токи, возбуждаемые мощным лазерным излучением среднего ИК диапазона на центральной длине волны 3.9 мкм, становятся источником вторичного широкополосного ТГц и СВЧ излучения в диапазоне от 0.1 ТГц до 17 ТГц. Для характеристики генерируемого низкочастотного суперконтинуума применен комплексный подход с использованием взаимодополняющих измерительных методик, включающих в себя инструменты сверхбыстрой оптики, ТГц фотоники и СВЧ электроники. Экспериментально обосновано, что спектральные, пространственные и поляризационные свойства полученного широкополосного излучения описываются моделями импульсной антенны и черенковского излучения. Такие лазерно-индуцированные антенны способны генерировать СВЧ импульсы с энергией порядка десятков мкДж, а их сверхширокая диаграмма направленности простирается до углов $\theta > 125^\circ$ далеко за пределами поперечной плоскости генерации относительно направления распространения лазерного пучка.

Научная и практическая значимость работы

Разработана методика генерации мультиоктавного излучения гармоник в области 75-2000 нм при взаимодействии мощных сверхкоротких лазерных импульсов на центральной длине волны 3.9 мкм с поверхностью твердотельной диэлектрической мишени. Данный эффект обеспечивает возможность реализации перспективного источника аттосекундных импульсов и зондирующего излучения для исследования сверхбыстрой субрелятивистской динамики плазмы. Реализована генерация мультидиапазонного низкочастотного импульсного когерентного излучения в области от 0.1 ГГц до 17 ТГц при взаимодействии мощных сверхкоротких лазерных импульсов на центральной длине волны 3.9 мкм с газовыми средами. На примере азотсодержащих газовых систем продемонстрирована возможность химически селективной, однопучковой и одноимпульсной широкополосной спектроскопии газов и плазмы в поле высоких гармоник в спектральной области от ближнего ИК до дальнего УФ диапазона.

Методология и методы исследования

Экспериментальные методы исследования включали в себя разработку оптических схем генерации вторичного широкополосного излучения при воздействии лазерных импульсов среднего ИК диапазона на газовые и твердотельные мишени; построение оптических, электронных и радиоэлектронных систем регистрации; исследование зависимостей регистрируемого нелинейного сигнала от различных физических параметров, таких как энергия, chirp и поляризация лазерных импульсов, давление газа, материал мишени.

К теоретическим и вычислительным методам исследования относилась разработка программного обеспечения для обработки и анализа полученных экспериментальных данных; применение численного моделирования для их интерпретации и сравнения с результатами, предсказываемыми известными

физическими моделями; аналитические выкладки, расширяющие физическую картину лазерно-плазменной динамики на случай мощных полей сверхкоротких лазерных импульсов среднего ИК диапазона.

Защищаемые положения

1. При фокусировке мощных фемтосекундных лазерных импульсов на центральной длине волны 3.9 мкм в газовую среду молекулярного азота происходит широкополосная генерация высоких гармоник в спектральной области 125-850 нм. Взаимодействие поля высоких гармоник с колебательными переходами второй положительной системы азота и монооксида азота приводит к вынужденному комбинационному рассеянию, обеспечивая реализацию химически селективной однопучковой и одноимпульсной спектроскопии возбужденных газов и плазмы.
2. Когерентное кильватерное излучение плазмы, генерируемое р-поляризованными фемтосекундными лазерными импульсами среднего инфракрасного диапазона на центральной длине волны 3.9 мкм при фокусировке на поверхность толстой твердотельной полистироловой мишени до субрелятивистской интенсивности 10^{17} Вт/см², становится источником высоких гармоник вплоть до 51 порядка в диапазоне 75-2000 нм в геометрии на отражение.
3. Плазменные токи, возбуждаемые мощными фемтосекундными лазерными импульсами с энергией до 10 мДж на центральной длине волны 3.9 мкм в атмосферном воздухе, являются источником когерентного терагерцового и СВЧ излучения в диапазоне от 0.1 ГГц до 17 ТГц. В случае одноцветной накачки продемонстрирована генерация широконаправленного низкочастотного излучения продольными плазменными токами. В случае двухцветной накачки вторичное низкочастотное излучение генерируется преимущественно поперечными плазменными токами и имеет узкую угловую диаграмму по направлению распространения лазерных

импульсов. Наблюдаемые пространственно-спектральные особенности СВЧ излучения согласуются с моделями черенковского излучения и импульсной антенны.

Апробация результатов исследования

Основные результаты диссертационной работы были представлены в соавторстве с Рожко М.В. либо им лично на российских и международных научных конференциях. Материалы диссертационных исследований были опубликованы в 11 печатных работах в международных рецензируемых научных изданиях, входящих в базы данных Web of Science, Scopus и РИНЦ, таких как Optica, ACS Photonics, Journal of Lightwave Technology, Optics Letters, Physical Review A, Journal of Raman Spectroscopy, ЖЭТФ.

Личный вклад автора

Все представленные экспериментальные результаты получены лично автором или при его непосредственном участии в лаборатории передовой фотоники Российского квантового центра. Подготовка полученных результатов к публикации и докладу на конференциях осуществлялась совместно с соавторами. Часть теоретического анализа и численного моделирования, использованного для сравнения с экспериментальными результатами, была выполнена совместно с сотрудниками лаборатории фотоники и нелинейной спектроскопии кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Структура диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения со списком используемых в тексте аббревиатур и сокращений, а также со списком использованной литературы. Объем работы составляет 125 страниц, включая 39 рисунков. Список цитируемой литературы содержит 178 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава представляет собой обзор литературы по теме исследований, выполненных при подготовке диссертационной работы. В ней обсуждаются современные методики генерации мощных лазерных импульсов среднего ИК диапазона и указана роль среди них систем на основе оптического параметрического усиления чирпированных импульсов. Далее рассмотрены такие важнейшие примеры широкополосного нелинейно-оптического преобразования излучения, как генерация низкочастотного излучения при филаментации лазерных импульсов и генерация гармоник высокого порядка (ГВП) в газах и на поверхности твердотельных мишеней. Продемонстрировано единообразие зависимости физических механизмов данных эффектов от повышения длины волны лазерного источника. Таким образом, объяснена перспективность исследований в области широкополосного нелинейно-оптического преобразования сверхкоротких лазерных импульсов среднего ИК диапазона.

Вторая глава посвящена описанию источника мощных сверхкоротких лазерных импульсов среднего ИК диапазона, использованного в работе, а также оригинальной экспериментальной реализации широкополосной генерации высоких гармоник при фокусировке фемтосекундного лазерного излучения на центральной длине волны $\lambda_0 \approx 3.9$ мкм, с длительностью $\tau_0 \approx 80$ фс и энергией $E_0 \approx 17$ мДж в азотсодержащие газы (чистый азот или атмосферный воздух). На рис. 1 представлены характерные спектры ГВП в диапазоне 125-850 нм, полученные при взаимодействии сфокусированного лазерного излучения среднего ИК диапазона с азотом в широком диапазоне давлений. Обнаружено, что, в то время как зависимость интенсивности 5-15 гармоник демонстрирует монотонный рост с повышением давления азота (рис. 1а, 1б), сигнал ГВП 17-31 порядков зависит от давления немонотонным образом с максимальным контрастом сигнала относительно континуума при давлении $p_{N_2} = 2.4$ мбар (рис. 1в, 1г). Такое поведение гармоник в

вакуумном УФ диапазоне является следствием конкурентного действия поглощения и нелинейности, растущих с повышением давления газа.

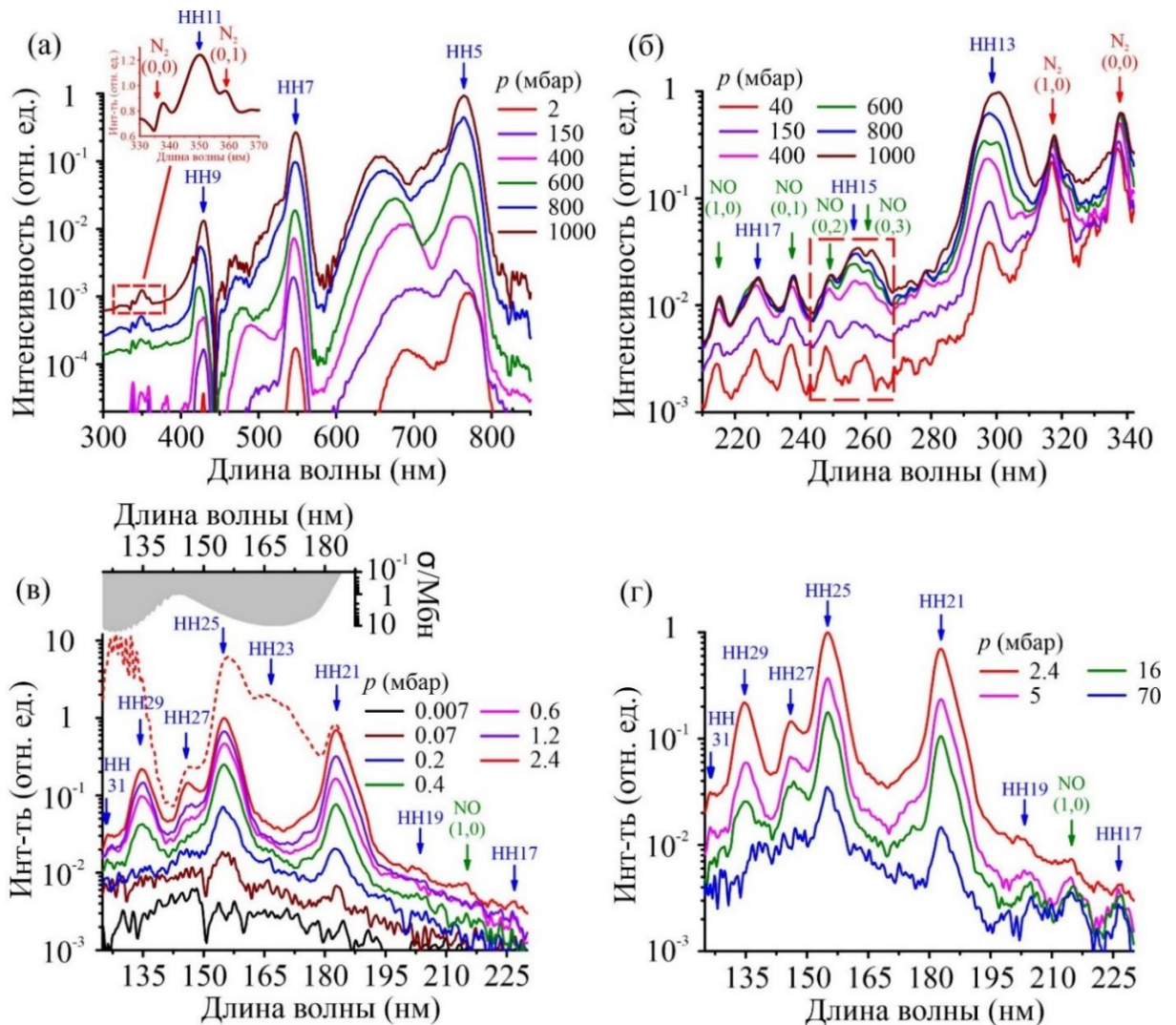


Рисунок 1 — Спектры излучения ГВП, генерируемого при фокусировке сверхкоротких лазерных импульсов среднего ИК диапазона в азот при различных давлениях и в разных спектральных диапазонах: (а) в ближнем ИК и видимом диапазонах, (б) в ближнем и среднем УФ диапазонах, (в), (г) в дальнем УФ диапазоне. Вставка на (а) масштабируется на 11-й гармонике, в высокочастотном крыле которой проявляются особенности ВКР усиления и поглощения вблизи длины волны колебательного перехода $N_2(0,0) \nu' = 0 \rightarrow \nu'' = 0$ второй положительной системы азота $\lambda_p \approx 337.1$ нм.

Генерация столь широкополосного излучения высоких гармоник одновременно увеличивает количество каналов резонансного связывания поля гармоник с частотами колебательных переходов молекул. Как видно из спектра азота в ближнем УФ диапазоне (рис. 1а, вставка), в коротковолновом

крыле 11-й гармоники содержится ярко выраженный низкочастотный пик $\lambda_G \approx 337.4$ нм и высокочастотный провал $\lambda_L \approx 336.5$ нм вблизи длины волны колебательного перехода $N_2(0,0) v' = 0 \rightarrow v'' = 0$ второй положительной системы азота $B^3\Pi_g \rightarrow C^3\Pi_u$ $\lambda_p \approx 337.1$ нм. Такое спектральное распределение поглощения и усиления хорошо согласуется с физической картиной механизма вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) широкополосного излучения накачки на центральной частоте $\omega_p = 11\omega_0 + \delta$ в коротковолновом крыле ($\delta > 0$). В этом процессе излучение накачки испытывает комбинационное усиление своей низкочастотной части и комбинационное поглощение высокочастотной, т.е. реализуется обратное комбинационное рассеяние.

Молекулярные колебательные моды, не попадающие напрямую в область спектральной ширины гармоник, не могут участвовать в процессе ВКР, однако также способны выявляться спектроскопическими методами за счет лазерно-индуцированного возбуждения плазмы с последующей излучательной релаксацией, сопровождаемой некогерентным излучением плазмы (НИП). На рис. 1б-1г спектральные черты НИП отражены колебательными переходами второй положительной системы $B^3\Pi_g \rightarrow C^3\Pi_u$ молекулярного азота $N_2(1,0) v' = 1 \rightarrow v'' = 0$ (317 нм), $NO(0,1) v' = 0 \rightarrow v'' = 1$ (237 нм), $NO(1,0) v' = 1 \rightarrow v'' = 0$ (215 нм) и исчезают лишь при очень низких давлениях азотсодержащего газа.

Таким образом, получена генерация широкополосного излучения высоких гармоник в спектральном диапазоне 125-850 нм при взаимодействии мощных субтераваттных фемтосекундных лазерных импульсов на центральной длине волны 3.9 мкм с молекулярным азотом. Исследован эффект ВКР при взаимодействии поля высоких гармоник с колебательными переходами второй положительной системы азота и монооксида азота. Показана возможность реализации химически селективной однопучковой и одноимпульсной спектроскопии возбужденных газов и плазмы.

Третья глава описывает экспериментальную схему генерации высоких гармоник от поверхности твердотельной мишени в поле субтераваттных фемтосекундных лазерных импульсов среднего ИК диапазона на центральной длине волны 3.9 мкм (рис. 2).

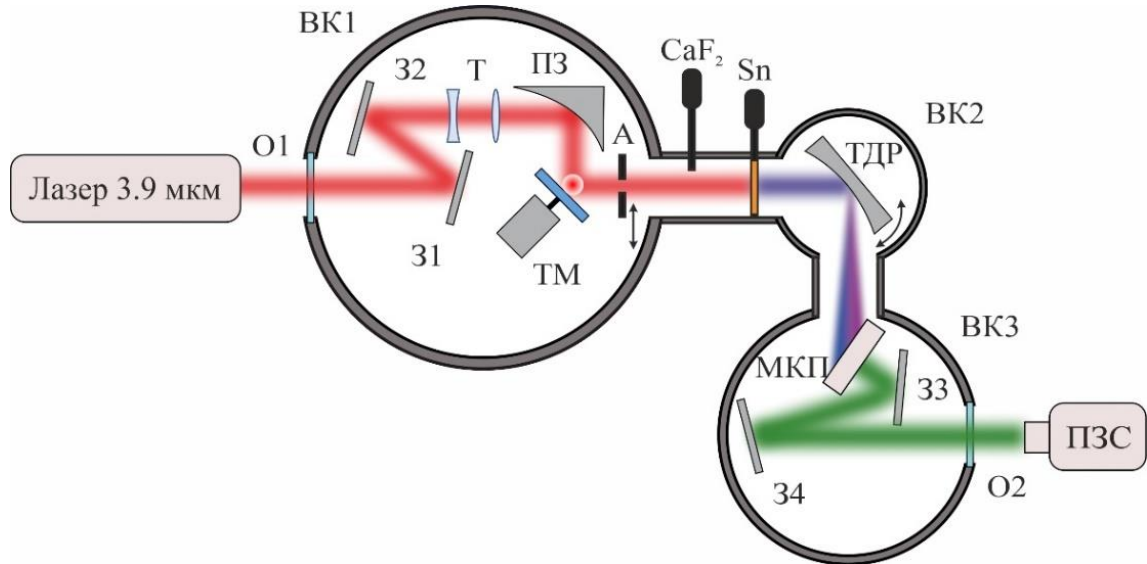


Рисунок 2 – Экспериментальная схема генерации экстремального УФ излучения ГВП при взаимодействии мощных сверхкоротких лазерных импульсов среднего ИК диапазона с твердотельной мишенью. BK1-BK3 – разделенные вакуумные камеры; O1, O2 – оптические окна; 31-34 – плоские зеркала; T – телескоп; ПЗ – параболическое зеркало; ТМ – твердотельная мишень; A – апертура; CaF₂ – CaF₂ фильтр; Sn – оловянная фольга-фильтр; ТДР – тороидальная дифракционная решетка; МКП – шевронная сборка микроканальных пластин с фосфорным экраном; ПЗС – камера, регистрирующая изображение на фосфорном экране.

Для осуществления генерации и регистрации ГВП в экстремальном УФ диапазоне р-поляризованное лазерное излучение на центральной длине волны $\lambda_0 \approx 3.9$ мкм, с длительностью импульсов $\tau_0 \approx 80$ фс и энергией до $E_0 \approx 15$ мДж заводилось в вакуумную камеру BK1 при остаточном давлении порядка 5×10^{-6} мбар и фокусировалось параболическим зеркалом ПЗ с фокусным расстоянием 5 см на поверхность твердотельной мишени ТМ. Интенсивность лазерного излучения на мишени оценивалась как $I_L \approx 1.3 \times 10^{17}$ Вт/см², что соответствует значению нормированного векторного потенциала $a_0 \approx 1$. В качестве мишеней использовались круглые пластинки

из полистирола, CaF_2 , ВК7 и алюминия толщиной 1 мм (рис. 3). Регистрация спектра ГВП производилась в направлении зеркального отражения специально сконструированным спектрометром на основе золотой тороидальной дифракционной решетки ТДР с плотностью штрихов 1200 штр/мм и детектора на основе шевронной сборки двух микроканальных пластин (МКП) с рабочим диаметром 40 мм и фосфорным экраном.

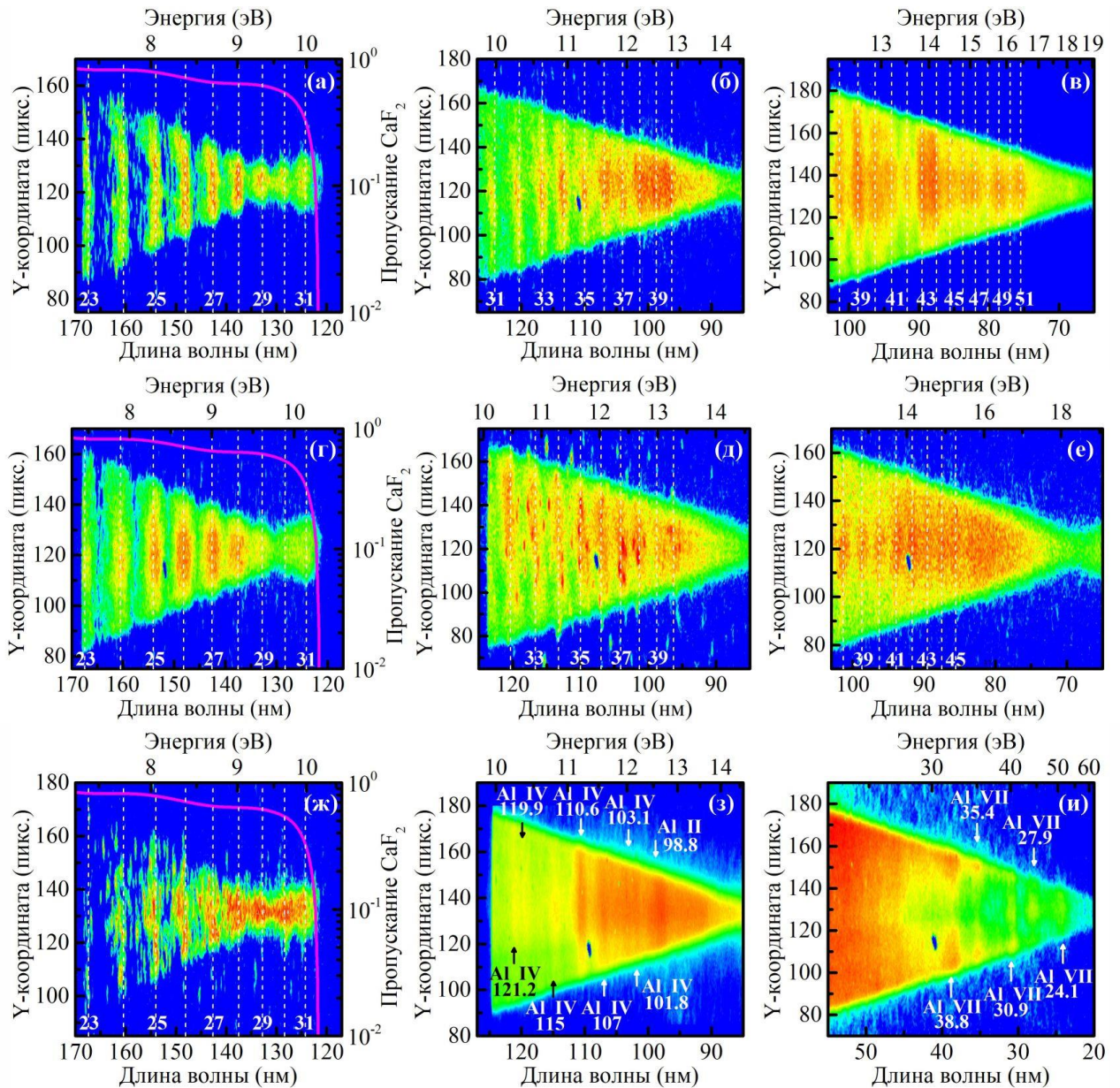


Рисунок 3 – Спектральные карты ГВП, полученные при взаимодействии р-поляризованных лазерных импульсов среднего ИК диапазона с мишенями из полистирола (а-в), CaF_2 (г-е) и алюминия (ж-и) при интенсивности накачки порядка 10^{17} Вт/см². Вертикальными линиями отмечены расчетные позиции порядков гармоник излучения на центральной длине волны $\lambda_0 \approx 3.9$ мкм.

Выполненные эксперименты демонстрируют генерацию гармоник в спектральном диапазоне 75-2000 нм в соответствии с механизмом когерентного кильватерного излучения плазмы при субрелятивистском уровне интенсивности лазерной накачки порядка 10^{17} Вт/см². Изучено влияние материала твердотельной мишени на спектры высоких гармоник. Показано, что когерентное кильватерное излучение плазмы, возбуждаемое р-поляризованными фемтосекундными лазерными импульсами среднего ИК диапазона на центральной длине волны 3.9 мкм при фокусировке на поверхность толстой твердотельной полистироловой мишени до субрелятивистской интенсивности, позволяет генерировать мультиоктавный спектр гармоник вплоть до 51 порядка (рис. 3в). Обнаружена крайняя чувствительность спектра гармоник, генерируемых в режиме когерентного кильватерного излучения, к чирпу лазерного поля накачки среднего ИК спектрального диапазона ввиду излучения гармоник цугами аттосекундных импульсов с переменным временным интервалом между отдельными импульсами внутри цуга. Положительное чирпирование лазерных импульсов способно частично компенсировать варьирование этого интервала, реализуя генерацию ГВП в спектре излучения плазмы вплоть до экстремального УФ диапазона.

Четвертая глава включает в себя подробное описание экспериментов по генерации широкополосного низкочастотного излучения при лазерно-плазменном взаимодействии среднего ИК излучения с газовыми средами в режимах одноцветной и двухцветной лазерной накачки. Проведена обширная характеристика спектральных, пространственных и поляризационных свойств генерируемого низкочастотного излучения с использованием комплекса экспериментальных методик, сочетающих в себе инструменты сверхбыстрой оптики, ТГц фотоники и СВЧ электроники.

При помощи совместных измерений методиками электрооптического семплирования и автокорреляционного анализа, а также с использованием коаксиально-волновых переходов (КВП) и широкополосных рупорных

антенн при фокусировке сверхкоротких лазерных импульсов на центральной длине волны 3.9 мкм в атмосферный воздух была проведена спектральная характеристика вторичного излучения ТГц и СВЧ диапазонов в области от 0.1 ГГц до 17 ТГц. Была исследована зависимость СВЧ спектров, зарегистрированных при помощи набора КВП в диапазоне 3-50 ГГц, от давления газа, при этом максимум СВЧ сигнала наблюдался при значениях давления газа $p \approx 2 - 20$ мбар (рис. 4).

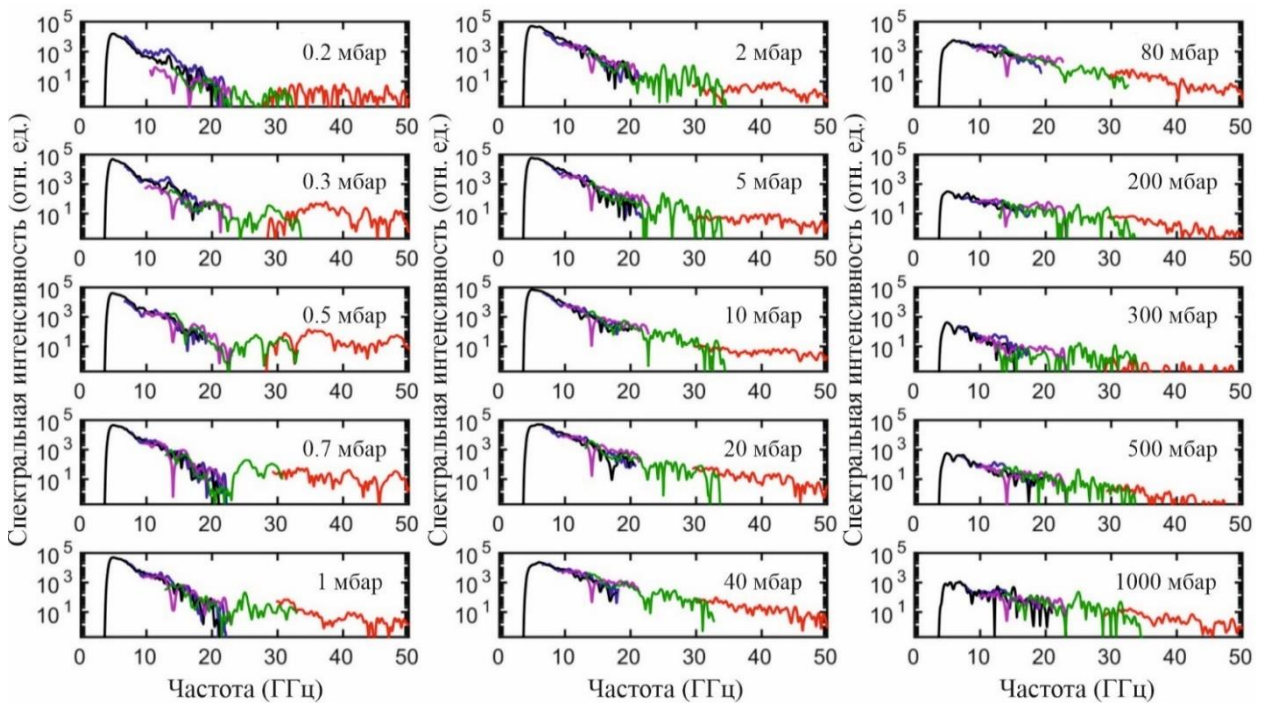


Рисунок 4 – Зависимость сигнала СВЧ излучения от давления атмосферного воздуха, зарегистрированная при помощи различных КВП в условиях одноцветного лазерного поля при $\lambda_0 = 3.9$ мкм, $W_0 = 15$ мДж.

Для выполнения поляризационных измерений КВП ориентировался таким образом, чтобы выделить одну из двух ортогональных компонент низкочастотного поля: радиальную компоненту E_r и азимутальную компоненту E_ϕ . Установлено, что при взаимодействии одноцветной лазерной накачки среднего ИК диапазона с атмосферным воздухом генерируемое СВЧ излучение обладает радиальной поляризацией, при этом компонента поля E_r значительно превышает компоненту E_ϕ во всем исследуемом диапазоне давлений (рис. 5а, 5в, 5д), что свидетельствует о преобладающей роли

продольных плазменных токов в генерации вторичного низкочастотного излучения. В случае двухцветной накачки в результате эффективного возбуждения поперечных плазменных токов наблюдалось существенное усиление компоненты СВЧ поля E_φ , обладающего линейной поляризацией (рис. 5б, 5г, 5е). Взаимное влияние продольных и поперечных фототоков в двухцветных экспериментах меняется в зависимости от давления газа p , что объясняется влиянием давления на характерное время столкновения фотоэлектронов.

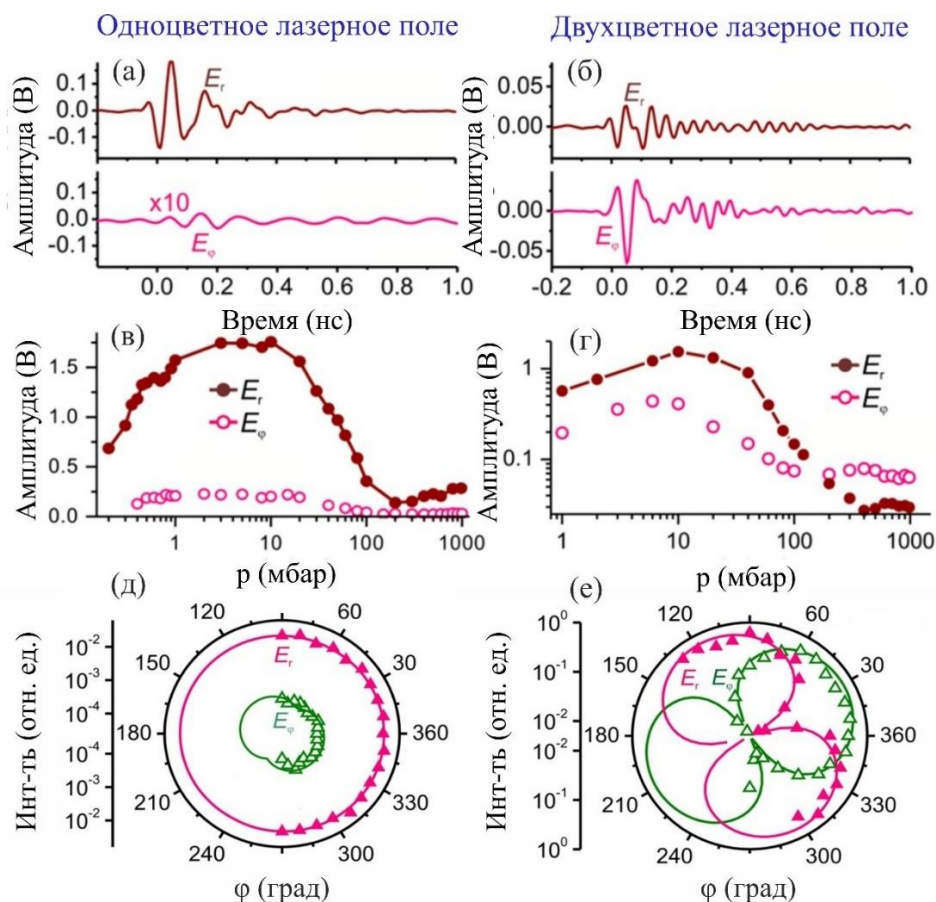


Рисунок 5 – (а), (б) Временные формы и (в), (г) зависимости от давления компоненты E_r (коричневые кривые) и E_φ (розовые кривые) СВЧ поля, измеренные КВП в экспериментах с (а), (в) одноцветным лазерным полем с $\lambda_0 \approx 3.9$ мкм, $\tau_0 \approx 80$ фс и $E_0 \approx 10$ мДж и (б), (г) двухцветным лазерным полем. (д) Поляризация СВЧ излучения при генерации одноцветным лазерным полем среднего ИК диапазона. Сплошные кривые соответствуют аппроксимации $\Phi(\varphi) \propto \text{const}$. (е) Поляризация СВЧ излучения при генерации двухцветным лазерным полем среднего ИК диапазона. Сплошные кривые соответствуют аппроксимации $\Phi_i(\varphi) = \cos^2(\varphi + \varphi_i)$.

Роль продольных и поперечных плазменных токов проявляется и в измеренных диаграммах направленности СВЧ излучения как в одноцветных (рис. ба-бд), так и двухцветных экспериментах (рис. бе-бк). Для этого были исследованы спектры низкочастотного сигнала в зависимости от угла θ между линией, связывающей лазерно-плазменный источник и регистрирующий КВП, и направлением распространения лазерного излучения z . Стоит отметить, что для одноцветного случая в области менее 10 ГГц практически не наблюдается изменений вплоть до углов $\theta > 105^\circ$, т.е. существенно за пределами поперечной плоскости $\theta = 90^\circ$.

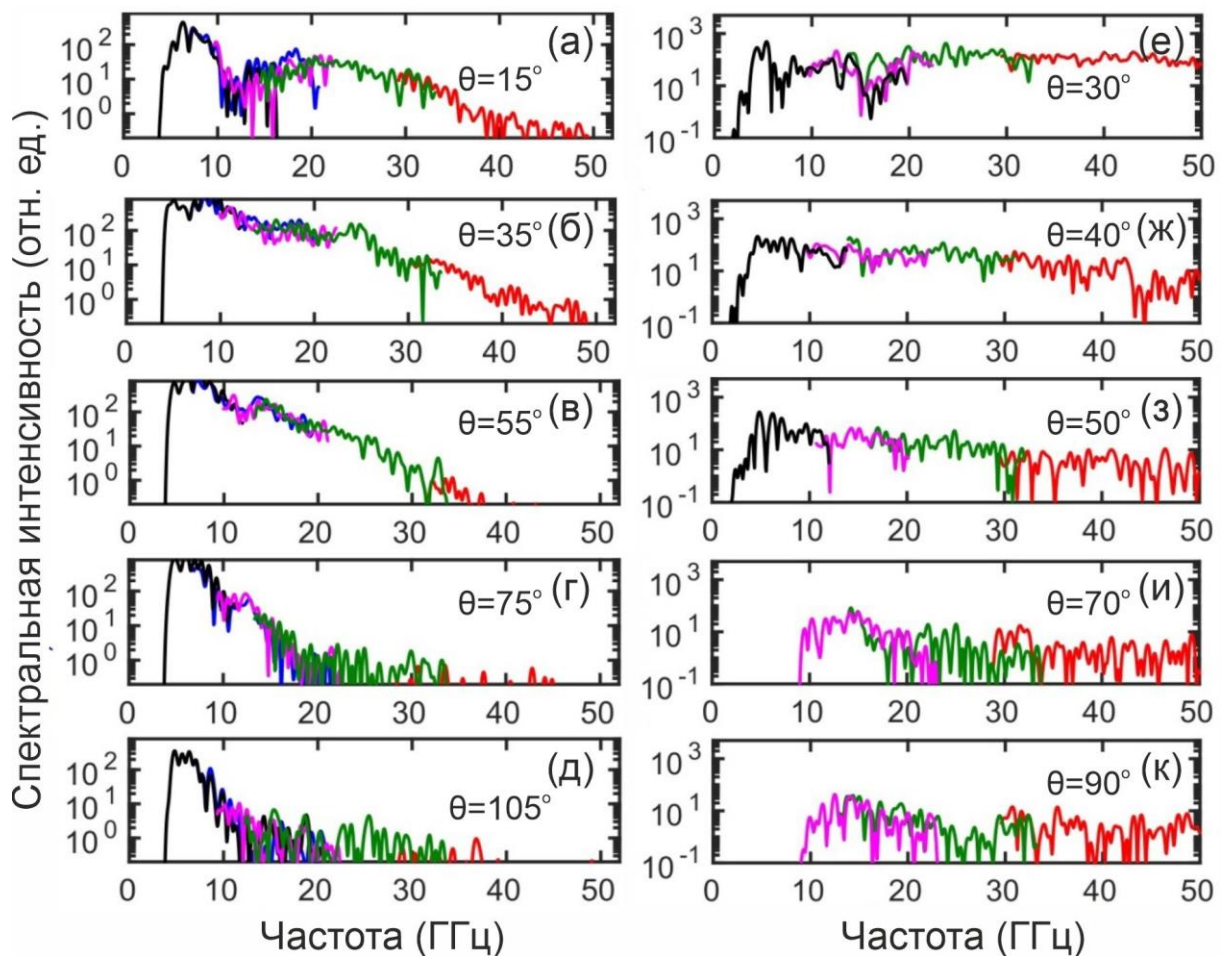


Рисунок 6 – Зависимость сигнала СВЧ излучения от угла θ при регистрации КВП в условиях: (а-д) одноцветного лазерного поля среднего ИК диапазона при давлении воздуха $p \approx 50$ мбар и (е-к) двухцветного лазерного поля среднего ИК диапазона при давлении воздуха $p \approx 1000$ мбар.

Зависимости от угла θ интегральных значений каждого КВП по соответствующему паспортному диапазону регистрации для одноцветного и

двухцветного режимов взаимодействия лазерного излучения с газом (рис. 7а, 7в) сравнивались с аналитическими выражениями для диаграмм направленности вторичного излучения плазменного источника конечной длины L , генерируемого за счет ускорения и торможения электронов на концах такой лазерно-плазменной антенны при прохождении через газовую среду быстрой ступеньки ионизации, движущейся на заднем фронте лазерного импульса со скоростью v , близкой к скорости распространения в среде самого импульса:

$$S_l(\omega, \theta, L) \propto \frac{e^2 \beta^2}{4\pi^2 c R_0^2} [Q(\omega, \theta, L)]^2 \sin^2 \theta, \quad (1)$$

$$S_t(\omega, \theta, L) \propto \frac{e^2 \beta^2}{4\pi^2 c R_0^2} [Q(\omega, \theta, L)]^2 \cos^2 \theta, \quad (2)$$

$$Q(\omega, \theta, L) = \frac{\sin\left[\frac{\omega L}{2v}(1 - \beta n \cos \theta)\right]}{1 - \beta n \cos \theta}, \quad (3)$$

где $\beta = v/c$, $n = n(\omega)$ – показатель преломления на частоте излучения ω , R_0 – расстояние между лазерно-плазменным источником и регистрирующим устройством. Данные выражения представляют собой расширение описания И. Франка и И. Тамма вторичного когерентного излучения движущегося электрона на случай лазерно-плазменных источников конечной длины [35]. Также отдельно в полярных координатах были построены аналогичные аппроксимации для зависимостей от угла интегральных значений сигнала в регистрируемом диапазоне КВП для одноцветного и двухцветного случаев (рис. 7б, 7г). Хорошо видно, что аналитические выражения (1) и (2) для диаграммы направленности СВЧ излучения $S(\theta)$ в случае одноцветного и двухцветного лазерного поля достаточно точно описывают полученные экспериментальные зависимости. Рис. 7а, 7б характеризуются провалами в направлении распространения лазерного пучка и широкими боковыми максимумами, в то время как на рис. 7в, 7г отчетливо проявляется направленность излучения вперед, что полностью согласуется с картиной излучения продольных и поперечных плазменных токов соответственно.

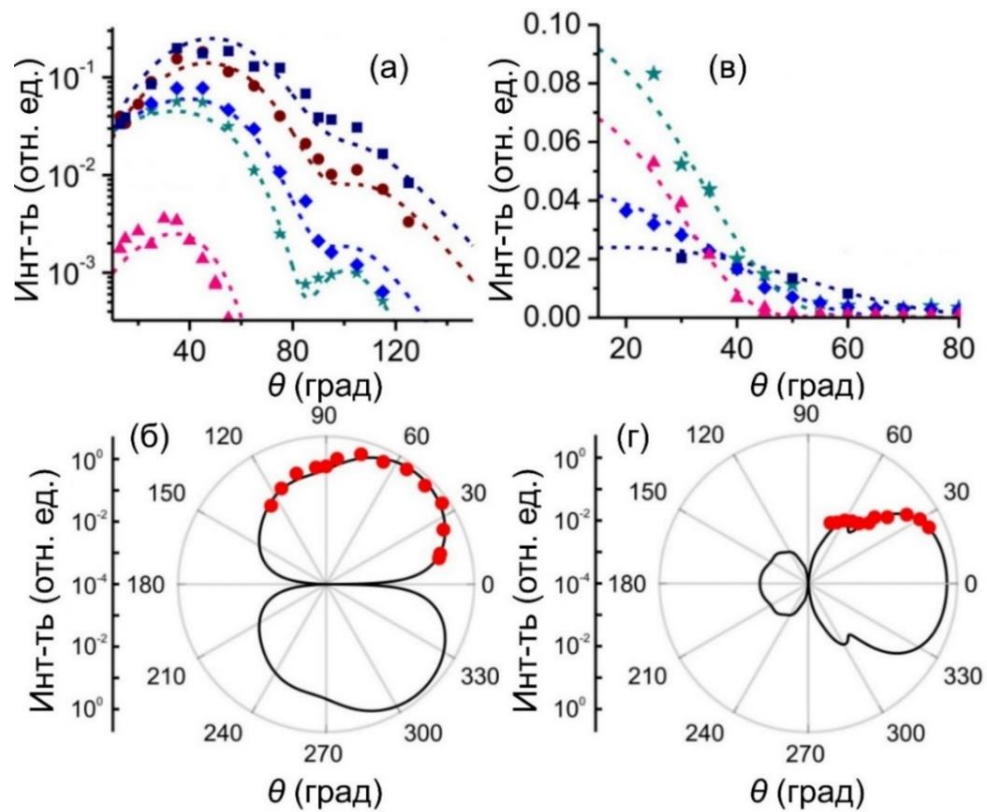


Рисунок 7 – Экспериментальные зависимости сигнала СВЧ излучения от угла θ (точки) и их модельные аппроксимации (пунктирные и сплошные кривые) при интегрировании по спектральному диапазону регистрации различных КВП в условиях генерации (а), (б) одноцветным лазерным полем среднего ИК диапазона при давлении воздуха $p \approx 50$ мбар и (в), (г) двухцветным лазерным полем среднего ИК диапазона при давлении воздуха $p \approx 1000$ мбар.

Также в сериях экспериментов по взаимодействию одноцветного и двухцветного лазерного поля среднего ИК диапазона с атмосферным воздухом была исследована зависимость регистрируемой мощности СВЧ излучения от расстояния R_0 между лазерно-плазменным источником и КВП. Данная зависимость точно аппроксимировалась функцией $1/R_0^2$ (где R_0 – расстояние до источника лазерной плазмы) во всем диапазоне давлений газа и для всех КВП, используемых для анализа как в одноцветных, так и в двухцветных экспериментах. Такой закон масштабирования СВЧ сигнала с расстоянием полностью согласуется с выражениями (1), (2) и также описывается физической картиной генерации низкочастотного излучения импульсной лазерно-плазменной антенной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены экспериментальные исследования широкополосного нелинейно-оптического преобразования субтераваттных фемтосекундных лазерных импульсов среднего ИК диапазона: генерации высоких гармоник в газовых средах и от поверхности твердотельной мишени, а также генерации ТГц и СВЧ излучения лазерно-плазменными газовыми источниками.

В частности, показано, что при фокусировке мощных фемтосекундных лазерных импульсов на центральной длине волны 3.9 мкм в газовую среду молекулярного азота происходит широкополосная генерация высоких гармоник в спектральной области 125-850 нм. Взаимодействие поля высоких гармоник с колебательными переходами второй положительной системы азота и монооксида азота приводит к вынужденному комбинационному рассеянию, обеспечивая реализацию химически селективной однопучковой и одноимпульсной спектроскопии возбужденных газов и плазмы.

Когерентное кильватерное излучение плазмы, генерируемое р-поляризованными фемтосекундными лазерными импульсами на центральной длине волны 3.9 мкм при фокусировке на поверхность толстой твердотельной полистироловой мишени до субрелятивистской интенсивности 10^{17} Вт/см², становится источником высоких гармоник вплоть до 51 порядка в диапазоне 75-2000 нм в геометрии на отражение.

Плазменные токи, возбуждаемые мощными фемтосекундными лазерными импульсами с энергией до 10 мДж на центральной длине волны 3.9 мкм в атмосферном воздухе, являются источником когерентного ТГц и СВЧ излучения в диапазоне от 0.1 ГГц до 17 ТГц. В случае одноцветной накачки продемонстрирована генерация широконаправленного низкочастотного излучения продольными плазменными токами. В случае двухцветной накачки вторичное низкочастотное излучение генерируется преимущественно поперечными плазменными токами и имеет узкую угловую диаграмму по направлению распространения лазерных импульсов.

Наблюдаемые пространственно-спектральные особенности СВЧ излучения согласуются с моделями черенковского излучения и импульсной антенны.

Список публикаций по теме диссертации, входящих в базы данных Web of Science, Scopus, РИНЦ:

[1] 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,” ЖЭТФ **163**, 488-495 (2023); JIF WoS: 1.111; вклад соискателя 16.7%.

[2] Mitrofanov A.V., Sidorov-Biryukov D.A., Rozhko M.V., Erukhimova N.V., Voronin A.A., Nazarov M.M., Fedotov A.B., Zheltikov A.M., “Broadband ultrawide-angle laser-plasma microwave antennas,” Physical Review A **105**, 053503 (2022); JIF WoS: 2.971; вклад соискателя 12.5%.

[3] Mitrofanov A.V., Voronin A.A., Rozhko M.V., Sidorov-Biryukov D.A., Nazarov M.M., Fedotov A.B., Zheltikov A.M., “Polarization and Spatial Mode Structure of Mid-Infrared-Driven Terahertz-to-Microwave Radiation,” ACS Photonics **8**, 1988-1996 (2021); JIF WoS: 7.077; вклад соискателя 14.3%.

[4] Mitrofanov A.V., Sidorov-Biryukov D.A., Rozhko M.V., Voronin A.A., Glek P.B., Nazarov M.M., Fedotov A.B., Zheltikov A.M., “Ultrabroadband Characterization of Microwave-to-Terahertz Supercontinua Driven by Ultrashort Pulses in the Mid-Infrared,” Journal of Lightwave Technology **39**, 7862-7868 (2021); JIF WoS: 4.439; вклад соискателя 12.5%.

[5] Mitrofanov A.V., Rozhko M.V., Voronin A.A., Sidorov-Biryukov D.A., Fedotov A.B., Zheltikov A.M., “High-harmonic-driven inverse Raman scattering,” Optics Letters **46**, 3219-3222 (2021); импакт-фактор JIF WoS: 3.56; вклад соискателя 16.7%.

[6] Mitrofanov A.V., Sidorov-Biryukov D.A., Nazarov M.M., Voronin A.A., Rozhko M.V., Fedotov A.B., Zheltikov A.M., “Coherently enhanced microwave

pulses from midinfrared-driven laser plasmas,” *Optics Letters* **46**, 1081-1084 (2021); JIF WoS: 3.56; вклад соискателя 14.3%.

[7] Mitrofanov A.V., Rozhko M.V., Sidorov-Biryukov D.A., Voronin A.A., Fedotov A.B., Zheltikov A.M., “Near-infrared-to-vacuum-ultraviolet high-harmonic Raman and plasma emission spectroscopy with ultrashort mid-infrared laser pulses,” *Journal of Raman Spectroscopy* **52**, 2089-2099 (2021); JIF WoS: 2.727; вклад соискателя 16.7%.

[8] Митрофанов А.В., Сидоров-Бирюков Д.А., Воронин А.А., Рожко М.В., Глек П.Б., Назаров М.М., Серебрянников Е.Е., Федотов А.Б., Желтиков А.М., “Усиление плазменных нелинейностей и генерация СВЧ-ТГц-суперконтинуума в поле субтераваттных импульсов среднего инфракрасного диапазона,” *Письма в ЖЭТФ* **113**, 304-310 (2021); JIF WoS: 1.4; вклад соискателя 11.1%.

[9] Mitrofanov A.V., Sidorov-Biryukov D.A., Nazarov M.M., Voronin A.A., Rozhko M.V., Shutov A.D., Ryabchuk S.V., Serebryannikov E.E., Fedotov A.B., Zheltikov A.M., “Ultraviolet-to-millimeter-band supercontinua driven by ultrashort mid-infrared laser pulses,” *Optica* **7**, 15-19 (2020); JIF WoS: 10.644; вклад соискателя 10%.

[10] Mitrofanov A.V., Sidorov-Biryukov D.A., Glek P.B., Rozhko M.V., Stepanov E.A., Shutov A.D., Ryabchuk S.V., Voronin A.A., Fedotov A.B., Zheltikov A.M., “Chirp-controlled high harmonic and attosecond-pulse generation via coherent-wake plasma emission driven by mid-infrared laser pulses,” *Optics Letters* **45**, 750-753 (2020); JIF WoS: 3.56; вклад соискателя 10%.

[11] Митрофанов А.В., Сидоров-Бирюков Д.А., Рожко М.В., Воронин А.А., Глек П.Б., Рябчук С.В., Серебрянников Е.Е., Федотов А.Б., Желтиков А.М., “Релятивистские нелинейно-оптические явления в поле субтераваттных лазерных импульсов,” *Письма в ЖЭТФ* **112**, 22-29 (2020); JIF WoS: 1.4; вклад соискателя 11.1%.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. N.H. Burnett et al. Harmonic generation in CO₂ laser target interaction // *Appl. Phys. Lett.* – 1977. – Vol. 31, № 172. – P. 172-174.
2. R.L. Carman, C.K. Rhodes, R.F. Benjamin. Observation of harmonics in the visible and ultraviolet created in CO₂-laser-produced plasmas // *Phys. Rev. A.* – 1981. – Vol. 24, № 5. – P. 2649-2663.
3. J. Bokor, P.H. Bucksbaum, R.R. Freeman. Generation of 35.5-nm coherent radiation // *Opt. Lett.* – 1983. – Vol. 8, № 4. – P. 217-219.
4. A. McPherson et al. Studies of multiphoton production of vacuum-ultraviolet radiation in the rare gases // *J. Opt. Soc. Am. B.* – 1987. – Vol. 4, № 4. – P. 595-601.
5. M. Ferray et al. Multiple-harmonic conversion of 1064 nm radiation in rare gases // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* – 1988. – Vol. 21, № 3. – P. L31-L35.
6. Итоги науки и техники. Сер. Современные проблемы лазерной физики. Т. 4 / Ред. С.А. Ахманов. – М.: ВИНТИ, 1991. – ISSN 0236-3186.
7. D.E. Spence, P.N. Kean, W. Sibbett. 60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser // *Opt. Lett.* – 1991. – Vol. 16, № 1. – P. 42-44.
8. Z. Chang et al. Generation of Coherent Soft X Rays at 2.7 nm Using High Harmonics // *Phys. Rev. Lett.* – 1997. – Vol. 79, № 16. – P. 2967-2970.
9. Ch. Spielmann et al. Generation of Coherent X-rays in the Water Window Using 5-Femtosecond Laser Pulses // *Science.* – 1997. – Vol. 278, № 5338. – P. 661-664.
10. G. Andriukaitis et al. 90 GW peak power few-cycle mid-infrared pulses from an optical parametric amplifier // *Opt. Lett.* – 2011. – Vol. 36, № 15. – P. 2755-2757.
11. I. Pupeza et al. High-power sub-two-cycle mid-infrared pulses at 100 MHz repetition rate // *Nat. Photon.* – 2015. – Vol. 9. – P. 721-724.
12. A.D. DiChiara et al. Strong-Field and Attosecond Physics with Mid-infrared Lasers // *Attosecond Physics. Springer Series in Optical Sciences.* – Eds. L.

- Plaja, R. Torres, A. Zair. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. – Vol. 177. – P. 81-98.
13. B. Wolter et al. Strong-Field Physics with Mid-IR Fields // *Phys. Rev. X.* – 2015. – Vol. 5, № 2. – P. 021034.
 14. D. Woodbury et al. Laser wakefield acceleration with mid-IR laser pulses // *Opt. Lett.* – 2018. – Vol. 43, № 5. – P. 1131-1134.
 15. A.V. Mitrofanov et al. High-order harmonic generation from a solid-surface plasma by relativistic-intensity sub-100-fs mid-infrared pulses // *Opt. Lett.* – 2018. – Vol. 43, № 22. – P. 5571-5574.
 16. P. Panagiotopoulos et al. Super high power mid-infrared femtosecond light bullet // *Nat. Photonics.* – 2015. – Vol. 9. – P. 543-548.
 17. V. Shumakova et al. Chirp-controlled filamentation and formation of light bullets in the mid-IR // *Opt. Lett.* – 2019. – Vol. 44, № 9. – P. 2173-2176.
 18. T. Popmintchev et al. Bright Coherent Ultrahigh Harmonics in the keV X-Ray Regime from Mid-Infrared Femtosecond Lasers // *Science.* – 2012. – Vol. 336, № 6086. – P. 1287-1291.
 19. B. Zhou, M. Bachea. Invited Article: Multiple-octave spanning high-energy mid-IR supercontinuum generation in bulk quadratic nonlinear crystals // *APL Photonics.* – 2016. – Vol. 1, № 5. – P. 050802.
 20. E.A. Stepanov et al. Multioctave supercontinua from shock-coupled soliton self-compression // *Phys. Rev. A.* – 2019. – Vol. 99, № 3. – P. 033855.
 21. K.K. Magesh Kumar et al. Terahertz radiation from plasma filament generated by two-color laser gas–plasma interaction // *Laser and Particle Beams.* – 2015. – Vol. 33, № 3. – P. 473-479.
 22. O. Kosareva et al. Postfilament supercontinuum on 100 m path in air // *Opt. Lett.* – 2021. – Vol. 46, № 5. – P. 1125-1128.
 23. J.A. Fülöp, S. Tzortzakis, T. Kampfrath. Laser-driven strong-field terahertz sources // *Adv. Opt. Mater.* – 2020. – Vol. 8, № 3. – P. 1900681.
 24. A.M. Zheltikov. Laser-induced filaments in the mid-infrared // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* – 2017. – Vol. 50, № 9. – P. 092001.

25. D. Jang et al. Efficient terahertz and Brunel harmonic generation from air plasma via mid-infrared coherent control // *Optica*. – 2019. – Vol. 6, № 10. – P. 1338-1341.
26. A.A. Voronin, A.M. Zheltikov. Laser-driven tunneling photocurrent as a source of midinfrared to microwave multidecade supercontinua yoked to high-order harmonics // *Phys. Rev. A*. – 2020. – Vol. 101, № 4. – P. 043813.
27. M.-C. Chen et al. Generation of bright isolated attosecond soft X-ray pulses driven by multicycle midinfrared lasers // *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* – 2014. – Vol. 111, № 23. – P. E2361-E2367.
28. A.A. Voronin et al. Ultrafast mid-infrared spectrochronography of dispersion near molecular absorption bands // *Opt. Lett.* – 2018. – Vol. 43, № 6. – P. 1327-1330.
29. L.M. Narlagiri et al. Recent trends in laser-based standoff detection of hazardous molecules // *TrAC, Trends Anal. Chem.* – 2022. – Vol. 153. – P. 116645.
30. S. Koenig et al. Wireless sub-THz communication system with high data rate // *Nat. Photonics*. – 2013. – Vol. 7. – P. 977-981.
31. A.V. Mitrofanov et al. Angle-resolved multioctave supercontinua from mid-infrared laser filaments // *Opt. Lett.* – 2016. – Vol. 41, № 15. – P. 3479-3482.
32. A.D. Koulouklidis et al. Observation of extremely efficient terahertz generation from mid-infrared two-color laser filaments // *Nat. Commun.* – 2020. – Vol. 11, № 292.
33. A. Englesbe et al. Ultrabroadband microwave radiation from near- and mid-infrared laser-produced plasmas in air // *Phys. Rev. A*. – 2021. – Vol. 104, № 1. – P. 013107.
34. P.B. Glek, A.M. Zheltikov. Subcycle terahertz field waveforms clocked by attosecond high-harmonic pulses from relativistic laser plasmas // *J. Appl. Phys.* – 2022. – Vol. 131, № 10. – P. 103104.
35. A.M. Zheltikov. Bremsstrahlung, transition, and Cherenkov radiation by laser filaments // *Phys. Rev. A*. – 2021. – Vol. 104, № 4. – P. 043509.