

На правах рукописи



АЛЕКСАНДРОВ Леонид Николаевич

**МЕХАНИЗМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ КВАЗИПОСТОЯННЫХ ТОКОВ,
ИНИЦИИРУЮЩИХ ГЕНЕРАЦИЮ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ГАЗЫ
ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ**

1.3.19 – лазерная физика

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (г. Нижний Новгород).

Научный руководитель:

Рябкин Михаил Юрьевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН)

Официальные оппоненты:

Попруженко Сергей Васильевич. доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН);

Балакин Алексей Вячеславович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник физического факультета, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ).

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского.

Защита состоится «6» декабря 2021 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.1.238.01 в Институте прикладной физики РАН (603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ipfran.ru Института прикладной физики РАН.

Автореферат разослан «13» октября 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Э. Б. Абубакиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Предмет исследования и актуальность темы

Интерес к терагерцовому излучению (ТИ, 10^{11} - 10^{13} Гц) обусловлен возможностью его применения для идентификации веществ, биомедицинской диагностики, томографии, безопасности [1, 2] и других прикладных задач. В настоящее время активно применяются оптические способы генерации ТИ с использованием фемтосекундных лазерных импульсов. Генерируемое в таких схемах ТИ представляет собой импульс субпикосекундной длительности с временной зависимостью напряженности электрического поля, содержащей всего одну-две осцилляции, и обладает очень широким спектром. При соответствующих длительности лазерных импульсов и способе генерации полезный спектр ТИ может перекрывать диапазон частот от 100 ГГц до 100 ТГц [3].

Среди оптических способов генерации ТИ большой интерес представляют преобразователи на основе газа, ионизированного при помощи сфокусированных фемтосекундных лазерных импульсов. Интерес к ним обусловлен отсутствием в плазме фоновых линий поглощения, что позволяет получать ТИ с непрерывным спектром во всем терагерцовом диапазоне, и возможностью создания удаленных источника и детектора ТИ в атмосфере, что позволяет проводить дистанционные исследования различных объектов и атмосферы [4]. Как продемонстрировано в экспериментах, наилучшие результаты по генерации ТИ импульсов наблюдаются при использовании двухцветных оптических импульсов, содержащих излучение на основной (ω) и удвоенной (2ω) частотах [5]. Активные исследования двухцветной схемы генерации ведутся с 2000 г., когда были продемонстрированы высокая эффективность данной схемы генерации и наличие оптимального фазового сдвига между излучением на частотах ω и 2ω [6]. К настоящему времени продемонстрирована высокая эффективность преобразования при использовании линейно поляризованных компонент лазерного импульса на частотах ω и 2ω с совпадающими плоскостями поляризации [7]. Кроме того, показано, что эффективность ($\omega+2\omega$) схемы может быть увеличена за счет использования импульсов с эллиптической поляризацией.

Одно из первых детальных теоретико-экспериментальных исследований генерации ТИ в плазме, создаваемой сфокусированными двухчастотными оптическими импульсами, проведено в работе [8]. В [8, 9] была предложена модель генерации ТИ, основанная на рассмотрении возбуждения макроскопического остаточного электронного тока с использованием полуклассической модели ионизации. Эффективность генерации терагерцового излучения во многом определяется эффективностью возбуждения макроскопического остаточного тока.

В рамках данной диссертации детально изучаются физические механизмы, ответственные за возникновение квазистационарных макроскопических токов при оптическом пробое газов. Рассматриваются возможные альтернативные способы создания подобных фототоков и способы достижения высокой эффективности их генерации.

Исследование данных физических механизмов также затрагивает такие актуальные вопросы современной атомной, молекулярной и лазерной физики, как влияние кулоновских сил на процессы ионизации частиц в лазерных полях и особенности процессов лазерной ионизации частиц различного типа.

Также в рамках диссертации рассматривается возможное применение полученных результатов в актуальных задачах зондирования лазерно-индуцированных процессов в молекулярных газах.

Цель диссертационной работы

Целью диссертации является детальное теоретическое исследование физических механизмов, ответственных за процесс генерации терагерцового излучения при оптическом пробое газов фемтосекундными лазерными импульсами, и применение полученных результатов для решения актуальных проблем высокоэффективной генерации и использования терагерцового излучения.

В соответствии с обозначенной целью диссертации решались следующие задачи:

1. Теоретическое исследование, на примере модельных одночастичных задач, механизмов, ответственных за генерацию остаточных токов в среде при ионизации частиц среды лазерным импульсом, и выяснение основных закономерностей исследуемых процессов при различных условиях взаимодействия оптического излучения с газами. Разработка возможных экспериментальных схем для проверки полученных закономерностей.
2. Теоретическое исследование влияния свойств частиц газа на генерацию остаточных токов в газовой среде при оптическом пробое лазерным импульсом. Рассмотрение частиц с различной пространственной (модельные молекулярные системы) и энергетической структурой.

Научная новизна диссертационной работы

1. Впервые на основе квантовомеханического и полуклассического рассмотрения показано, что оптимальный (с точки зрения эффективности оптико-терагерцовой конверсии) фазовый сдвиг между полем на основной и удвоенной частоте при пробое газа двухцветным лазерным импульсом существенно зависит от интенсивности лазерного излучения. Предложена и осуществлена экспериментальная проверка полученной зависимости. Экспериментальные данные с очень высокой степенью точности

согласуются с теорией в области применимости развитого в работе теоретического подхода.

2. На основе развитого аналитического подхода полученная зависимость оптимального сдвига между компонентами двухцветного поля от их интенсивности объяснена как результат конкуренции двух различных механизмов генерации остаточного тока, один из которых обусловлен действием лазерного поля на оторванный электрон, а второй – действием кулоновского потенциала родительского иона. Полученные результаты наглядно демонстрируют существенную роль кулоновского взаимодействия в процессе возбуждения направленного тока при оптическом пробое газа в широком интервале интенсивностей лазерного излучения.
3. Впервые теоретически продемонстрирована возможность генерации остаточного тока в длинном квазимонохроматическом лазерном импульсе за счет асимметрии потенциала ионизируемой частицы. В рамках выбранной модели найдены оптимальные условия, при которых преобразование оптического излучения в плазменные колебания происходит с высокой эффективностью.
4. Предложен новый полностью оптический метод измерения степени упорядоченности и вращательной динамики молекулярного ансамбля. В основе метода лежит измерение энергии терагерцового излучения, генерируемого в ходе ионизации интенсивным фемтосекундным импульсом ансамбля молекул, предварительно подвергнутых воздействию ориентирующего лазерного импульса.
5. Впервые теоретически обнаружено, что эффективность возбуждения направленного тока при оптическом пробое в газах является сложной функцией частоты лазерного излучения. Наблюдаемые максимумы и минимумы в зависимости величины генерируемого направленного тока от частоты лазерного излучения могут быть интерпретированы как проявление многофотонных резонансных внутриатомных переходов, инициируемых лазерным полем и резко изменяющих условия ионизации атома.

Практическая значимость диссертационной работы

Полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы для увеличения эффективности существующих и создания новых методов генерации электромагнитного излучения в терагерцовом диапазоне при оптическом пробое газов, а также для создания новых полностью оптических методов диагностики газов по терагерцовому отклику при нелинейной конверсии лазерного излучения в газе.

Помимо этого, полученные в работе результаты демонстрируют недостаточность приближения сильного поля, широко используемого при рассмотрении движения волновых пакетов электронов, отрывааемых лазерным полем от атомов и молекул, для полного описания наблюдаемых в эксперименте зако-

номерностей генерации терагерцового излучения при оптическом пробое газов. В то же время в рамках работы показано, что учет влияния кулоновских взаимодействий на движение электронов при лазерной ионизации газов позволяет существенно улучшить согласие с наблюдаемыми в экспериментальных работах зависимостями, а также предсказать принципиально новые физические эффекты, связанные с нарушением приближения сильного поля.

Основные положения, выносимые на защиту

1. При оптическом пробое газа двухцветным лазерным импульсом оптимальная с точки зрения эффективности генерации остаточных токов фазовая задержка между излучением на основной и удвоенной частоте монотонно зависит от интенсивности лазерного импульса. Эта зависимость, полученная на основе теоретического квантовомеханического и полуклассического рассмотрения, согласуется с экспериментальными данными в области применимости одночастичного теоретического рассмотрения.
2. Зависимость оптимального сдвига между компонентами двухцветного поля от их интенсивности является результатом конкуренции двух различных механизмов, один из которых обусловлен действием лазерного поля на оторванный электрон, а второй – действием кулоновского потенциала родительского иона. В области высоких интенсивностей лазерного излучения доминирует первый механизм, а в области низких интенсивностей – второй.
3. Взаимодействие отрываемого электрона с кулоновским потенциалом родительского иона при ионизации газа линейно-поляризованным квазимонохроматическим лазерным импульсом для частиц, обладающих асимметрией потенциала в направлении поляризации лазерного импульса, приводит к изменению динамики электронного волнового пакета и повышению эффективности генерации остаточного тока по сравнению со случаем симметричных частиц для любой длительности лазерного импульса.
4. Для частиц, обладающих ненулевым статическим дипольным моментом, эффективность генерации остаточных токов при взаимодействии с линейно поляризованным лазерным импульсом зависит от угла между дипольным моментом и направлением поляризации лазерного излучения. Данная зависимость позволяет реализовать новый, полностью оптический, метод измерения степени упорядоченности и вращательной динамики молекулярного ансамбля.

Апробация работы

Основные результаты диссертации получены в ИПФ РАН и докладывались на научных семинарах института, а также на 19 научных конференциях, в том числе: Пятой Всероссийской школе для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям (Саров, 2011), международных конференциях «Research in Optical Sciences (NILAS/ICUSD/QIM)» (Берлин, Германия, 2012, 2014), научных школах «Нелинейные волны» (Нижний Новгород, 2012, 2016), международных симпозиумах «International Laser Physics Workshop» (LPHYS) (Прага, Чехия, 2013; София, Болгария, 2014; Казань, Россия, 2017), международных конференциях «International Conference on Multiphoton Processes» (ICOMP) (Шанхай, Китай, 2014; Будапешт, Венгрия, 2017), научных конференциях по радиофизике (ННГУ, Нижний Новгород, 2013, 2014, 2015, 2016), Нижегородских сессиях молодых ученых (Нижний Новгород, 2013, 2015), 5-й международной школе «Atoms and Plasmas in Super-Intense Laser Fields» (Эриче, Италия, 2013), 11-й международной конференции «Super-Intense Laser-Atom Physics» (SILAP) (Бордо, Франция, 2015), 7-м международном симпозиуме и школе для молодых ученых «Modern Problems of Laser Physics (MPLP-2016)» (Новосибирск, 2016).

Материалы диссертации опубликованы в 23 работах, среди которых 4 статьи в рецензируемых журналах, 10 статей в сборниках трудов конференций и 9 тезисов докладов.

Личный вклад

Основные результаты диссертации получены лично автором, либо при его непосредственном участии. Постановка задач, обсуждение полученных результатов и подготовка к публикации проводилась совместно с научным руководителем и другими соавторами. Построение физических моделей, разработка и реализация численных алгоритмов, расчеты по ним выполнены автором.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, приложений и списка литературы. Объем диссертации составляет 147 страницы, включая 46 рисунков. Количество цитированных источников - 160, включая публикации диссертанта.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении формулируются актуальность и цели исследований, научная новизна, научная и практическая значимость, выносимые на защиту положения, сведения об апробации и достоверности полученных результатов и излагается краткое содержание диссертации.

В первой главе диссертации рассмотрено взаимодействие лазерных импульсов, содержащих излучение на основной и кратных частотах, с газовыми средами, процессы ионизации частиц в которых изотропны (атомы, невыстроенные молекулы). Исследуется влияние параметров лазерного излучения на процесс генерации остаточных токов и проводится сравнение с экспериментальными результатами.

В разделе 1.1 приводится краткий обзор методов генерации ультракоротких терагерцовых импульсов фемтосекундными лазерными импульсами.

В разделах 1.2–1.4 рассматривается процесс генерации остаточного тока лазерным импульсом, содержащим излучение на основной и удвоенной частоте. На основе численных квантовомеханических расчетов продемонстрировано, что оптимальная (с точки зрения эффективности оптико-терагерцовой конверсии) разность фаз между полем на основной и удвоенной частоте сильно зависит от интенсивности лазерного излучения. Предложено объяснение данного эффекта как следствия кулоновского взаимодействия отрываемого электрона с родительским ионом (раздел 1.3). Проведены расчеты в рамках полуклассической модели, подтверждающие важную роль кулоновского взаимодействия в процессе генерации направленных токов при лазерном пробое газа (раздел 1.4) (рис. 1, а). Проведенные исследования позволили объяснить наблюдавшиеся ранее в экспериментах разногласия и определить границы применимости широко распространенной модели формирования остаточного тока, основанной на приближении сильного поля (раздел 1.2). В разделе 1.5 представлен результат совместного с И.Е. Иляковым и Б.Н. Шишкиным (ИПФ РАН) эксперимента по генерации терагерцового излучения при оптическом пробое воздуха двухцветным лазерным излучением. На основе полученных в эксперименте данных построена зависимость оптимальной фазовой задержки между компонентами двухцветного импульса от интенсивности лазерного излучения. Показано, что результаты эксперимента с высокой степенью точности согласуются с теоретическими предсказаниями в области применимости использованного теоретического подхода (рис. 1, б).

В разделе 1.6 рассматриваются зависимости эффективности генерации остаточных токов от частоты и поляризации лазерного излучения. Продемонстрирована сильная зависимость от частоты лазерного излучения, связанная с энергетической структурой спектра частиц среды. Представлены расчеты с эллиптической поляризацией лазерного излучения, демонстрирующие отсутствие сильного влияния эффектов перерассеяния электронов на родительских ионах на процесс генерации остаточных токов.

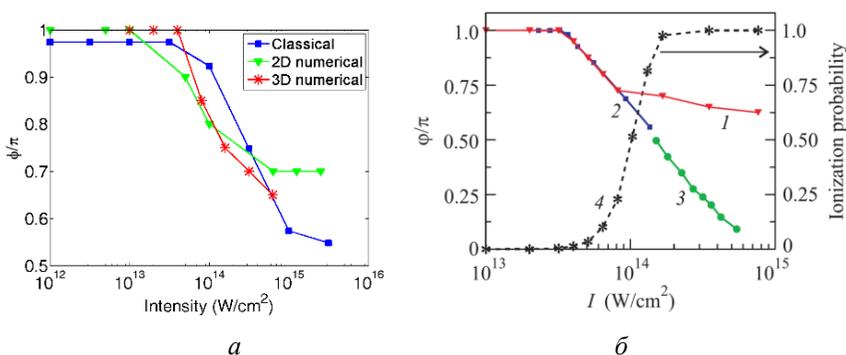


Рис. 1. Зависимость оптимальной фазы второй гармоники от интенсивности лазерного излучения, полученная в квантовомеханических (двумерном и трехмерном) и классическом расчетах (а) и зависимости оптимальной фазы второй гармоники и вероятности ионизации от интенсивности лазерного излучения из трехмерных квантовомеханических расчетов (кривые 1 и 4) и экспериментальные зависимости оптимальной фазы второй гармоники (кривые 2 и 3) (б)

Основные результаты первой главы опубликованы в [A2, A3, A7, A8].

Во второй главе исследовано взаимодействие одночастотного лазерного импульса с частицами газовой среды, обладающими асимметричным потенциалом вдоль выделенного направления.

В разделе 2.1 дается краткий обзор методов, позволяющих выстраивать и ориентировать молекулы в образце газовой среды. Такое угловое упорядочение молекул позволяет создать макроскопический ансамбль частиц, обладающий анизотропными свойствами, в частности, по отношению к процессу ионизации.

В разделе 2.2 проводится исследование возможности модификации процесса ионизации в длинном лазерном импульсе за счет асимметрии потенциала ионизируемой частицы. Исследовано влияние длительности, интенсивности и фазы заполнения импульса на величину возбуждаемого остаточного тока. Продемонстрировано, что использование молекул с асимметричным потенциалом позволяет повысить эффективность генерации остаточного тока при любой длительности лазерного импульса по сравнению со случаем симметричных частиц, а значение тока не стремится к нулю даже в пределе монохроматического лазерного излучения (см. рис. 2). На основе полуклассических модельных расчетов показано, что ключевую роль в возникновении макроскопического направленного тока в ансамбле ориентированных асимметричных молекул играет кулоновское взаимодействие отрывающегося электрона с родительским молекулярным ионом.

Основные результаты второй главы опубликованы в [A1, A5, A6].

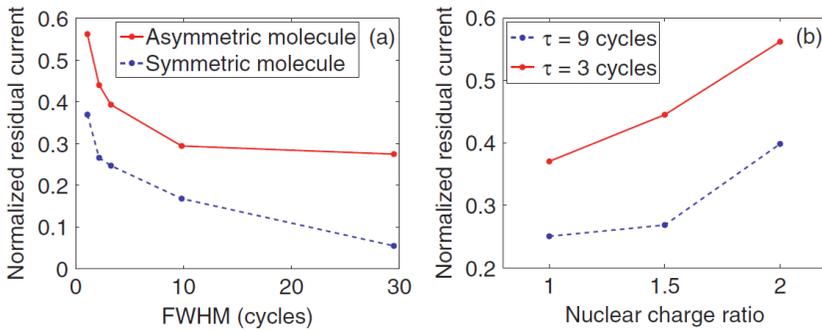


Рис. 2. Зависимости максимального нормированного остаточного тока от длительности лазерного импульса и соотношения зарядов ядер

В третьей главе рассматривается возможность применения генерации низкочастотного излучения при взаимодействии лазерного излучения с полярными и неполярными молекулами для зондирования вращательной динамики молекулярного ансамбля.

В разделе 3.1 третьей главы дается обзор существующих методов измерений упорядоченности молекулярного ансамбля.

В разделе 3.2 исследуется возможность применения процесса генерации терагерцового излучения, детально рассмотренного в разделе 2.2, для зондирования степени ориентированности ансамбля асимметричных молекул и его вращательной динамики методом «накачка-зондирование». Теоретическое рассмотрение основано на независимом анализе вращательной динамики ансамбля на примере квантовомеханической модели, описывающей эволюцию жесткого ротатора после воздействия ультракороткого импульса накачки, и процесса генерации остаточных токов при взаимодействии полярных молекул с импульсом зондирования на основе квантовомеханической модели, использующей одноэлектронное приближение. В результате теоретических расчетов продемонстрирована сильная зависимость остаточного тока, возбуждаемого при ионизации полярной молекулы, от угла θ между вектором электрического поля зондирующего импульса и постоянным дипольным моментом молекулы, что приводит к высокой чувствительности эффективности ионизационно-индуцированной генерации терагерцового излучения к молекулярному угловому распределению. Это позволяет ожидать корреляции между динамикой коллапсов и возрождений молекулярного вращательного волнового пакета и временной зависимостью величины терагерцового сигнала, генерируемого при воздействии фемтосекундными зондирующими импульсами на ансамбль молекул, находящихся в таком нестационарном вращательном состоянии. На основе модельных квантовомеханических расчетов для молекулы CO подтверждено, что генерируемый в молекулярном ансамбле средний остаточный ток как функция от времени задержки между возбуждающим и пробным им-

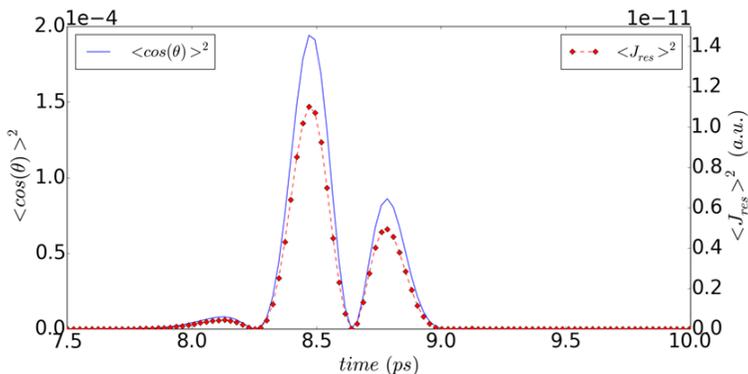


Рис. 3. Зависимость квадрата ожидаемого остаточного тока (точки) от временной задержки между импульсами накачки и зондирования для молекулы CO при интенсивности импульса накачки $I = 6 \cdot 10^{13}$ Вт/см² и температуре ансамбля $T = 290$ К. Сплошная кривая соответствует зависимости квадрата ожидаемого косинуса угла от времени при тех же условиях

пульсами, сильно коррелирует с величиной $\langle \cos\theta \rangle$, обычно используемой в качестве меры ориентированности молекул (рис. 3).

Помимо того, рассмотрена возможность расширения подхода, предложенного для полярных молекул, на случай неполярных молекул. В последнем случае, вследствие повышенной симметрии относительно случая полярных молекул, пропадают механизмы генерации остаточных токов, связанные с асимметричностью полярных молекул. Симметрию ионизационного процесса в случае неполярных молекул можно, однако, нарушить путём использования двухчастотного оптического импульса, аналогично тому, как это делается в случае атомарных газов. В соответствии с этим проведены теоретические расчёты угловых зависимостей остаточных токов, генерируемых при ионизации выстроенных симметричных молекул в двухцветном поле. Расчёты проведены на примере модели, соответствующей молекуле N₂; в качестве зондирующего импульса использовалось высокоинтенсивное двухцветное лазерное поле, содержащее компоненты на фундаментальной частоте (соответствующей излучению титан-сапфирового лазера с длиной волны 800 нм) и её второй гармонике. Расчёты проводились для различных значений разности фаз между компонентами двухцветного зондирующего поля и разных отношений их амплитуд. Результаты расчетов демонстрируют сильную зависимость остаточного тока от угла θ , как и для рассмотренного ранее случая полярных молекул. Важно отметить, что результаты для усреднённого по относительной фазе остаточного тока качественно близки к результатам для случая фиксированной относительной фазы, что свидетельствует о работоспособности данного метода в отсутствие стабилизации фазы, что значительно облегчает его реализацию.

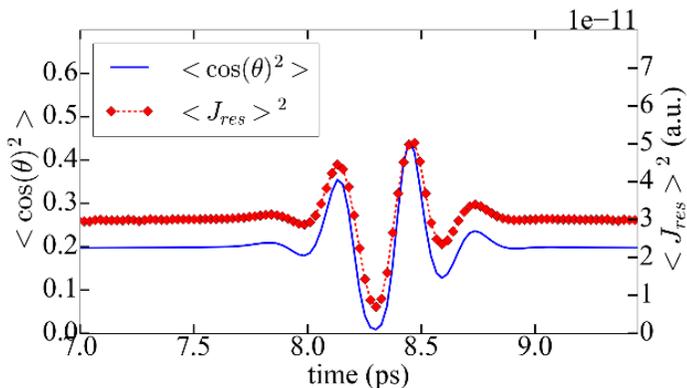


Рис. 4. Зависимость квадрата ожидаемого остаточного тока (точки), усредненного по относительной фазе, от временной задержки между импульсами накачки и зондирования для молекулы N_2 при интенсивности импульса накачки $I = 1.5 \cdot 10^{14}$ Вт/см² и температуре ансамбля $T = 50$ К. Отношение амплитуд компонент двухцветного поля равно 0.1. Сплошная кривая соответствует зависимости ожидаемого квадрата косинуса угла от времени при тех же условиях

Расчеты показывают, что угловая зависимость остаточного тока не определяется всецело лишь соответствующей зависимостью скорости ионизации молекулы, так как величина остаточного тока, отнесённая к скорости ионизации, по-прежнему зависит, хоть и в меньшей степени, от угла между вектором напряженности электрического поля лазерного импульса и осью молекулы. Это позволяет сделать вывод о том, что воздействие кулоновского потенциала молекулярного остова на отрываемый электрон играет значительную роль в исследуемом процессе генерации направленных токов при ионизации в двухцветном лазерном поле. Анизотропия двухцветного кулоновского потенциала молекулярного остова даёт вклад в соответствующую анизотропию генерируемого остаточного тока.

Аналогично случаю полярных молекул, проведено сравнение зависимости остаточного тока от времени задержки между возбуждающим и пробным импульсами с соответствующей зависимостью величины $\langle \cos^2 \theta \rangle$, характеризующей в данном случае степень упорядоченности (выстроенность) молекулярного ансамбля; продемонстрирована сильная корреляция между этими зависимостями (рис. 4).

Основные результаты третьей главы опубликованы в [A4, A9].

В заключении сформулированы основные результаты работы.

В приложениях дается детальное описание использованных и разработанных диссертантом численных схем и алгоритмов.

Основные результаты, полученные в диссертации

1. На основе полного квантовомеханического и полуклассического рассмотрения исследовано явление возбуждения остаточных макроскопических токов при пробое газа двухцветным лазерным импульсом, содержащим излучение на основной и удвоенной частоте. Показано, что оптимальная с точки зрения эффективности генерации остаточного тока относительная фазовая задержка между излучением на основной и удвоенной частоте монотонно зависит от интенсивности лазерного импульса.
2. На основе сопоставления результатов квантовомеханического и полуклассического рассмотрения зависимость оптимальной фазовой задержки между излучением на основной и удвоенной частоте от интенсивности лазерного импульса объяснена как результат конкуренции двух различных механизмов генерации остаточного тока, один из которых обусловлен действием лазерного поля на оторванный электрон, а второй – действием кулоновского потенциала родительского иона. Показано, что в области высоких интенсивностей лазерного излучения доминирует первый механизм, а в области низких интенсивностей – второй.
3. На основе численного интегрирования одномерного уравнения Шредингера исследована возможность модификации процесса ионизации в длинном лазерном импульсе за счет асимметрии потенциала ионизируемой частицы, а также рассмотрено влияние длительности, интенсивности и фазы заполнения импульса на величину возбуждаемого остаточного тока. Показано, что взаимодействие отрываемого электрона с родительским ионом является основной причиной возникновения больших остаточных токов при ионизации асимметричных систем. Продемонстрировано, что эффективность генерации остаточного тока при ионизации асимметричных систем значительно выше по сравнению со случаем симметричных систем при любой длительности лазерного импульса.
4. Предложен новый полностью оптический метод измерения степени угловой упорядоченности и вращательной динамики молекулярного ансамбля. В основе метода лежит измерение энергии терагерцового излучения, генерируемого в ходе ионизации интенсивным фемтосекундным импульсом ансамбля молекул, подвергнутых воздействию ориентирующего ультракороткого лазерного импульса. В проведенных численных экспериментах, моделирующих зондирование вращательной динамики газа из молекул CO по схеме «накачка-зондирование», продемонстрирована высокая чувствительность предложенного метода зондирования и его применимость для широкого набора молекул.

Цитированная литература

1. *Davies A. G., Burnett A. D., Fan W., Linfield E. H., Cunningham J. E.* Terahertz spectroscopy of explosives and drugs // *Mater. Today*. 2008. V. 11, № 3. P. 18-26.
2. *Siegel P. H.* Terahertz technology in biology and medicine // *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 2004. V. 52, № 10. P. 2438-2447.
3. *Kübler C., Huber R., Leitenstorfer A.* Ultrabroadband terahertz pulses: generation and field-resolved detection // *Semicond. Sci. Technol.* 2005. V. 20, № 7. P. S128-S133.
4. *Liu J., Dai J., Chin S. L., Zhang X.-C.* Broadband terahertz wave remote sensing using coherent manipulation of fluorescence from asymmetrically ionized gases // *Nature Photon.* 2010. V. 4, № 9. P. 627-632.
5. *Ахмеджанов Р. А., Иляков И. Е., Миронов В. А., Суворов Е. В., Фадеев Д. А., Шишкин Б. В.* Плазменные механизмы генерации импульсного терагерцового излучения // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2009. Т. 52, № 7. С. 536-549.
6. *Cook D. J., Hochstrasser R.M.* Intense terahertz pulses by four-wave rectification in air // *Opt. Lett.* 2000. V. 25, № 16. P. 1210-1212.
7. *Xie X., Dai J., Zhang X.-C.* Coherent control of THz wave generation in ambient air // *Phys. Rev. Lett.* 2006. V. 96, № 7. Art. no. 075005.
8. *Kim K. Y., Glowina J. H., Taylor A. J., Rodriguez G.* Terahertz emission from ultrafast ionizing air in symmetry-broken laser fields // *Opt. Express*. 2007. V. 15, № 8. P. 4577-4584.
9. *Kim K. Y., Taylor A. J., Glowina J. H., Rodriguez G.* Coherent control of terahertz supercontinuum generation in ultrafast laser-gas interactions // *Nature Photon.* 2008. V. 2, № 10. P. 605-609.

Список основных публикаций по теме диссертации

- A1. *Alexandrov L. N., Emelin M. Yu., Ryabikin M. Yu.* Unidirectional current excitation in tunneling ionization of asymmetric molecules // *Phys. Rev. A*. 2013. V. 87, № 1. Art. no. 013414.
- A2. *Alexandrov L. N., Emelin M. Yu., Ryabikin M. Yu.* Coulomb effects in directional current excitation in the ionization of gas by a two-color laser field // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 2014. V. 47, № 20. Art. no. 204028.
- A3. *Иляков И. Е., Шишкин Б. В., Александров Л. Н., Емелин М. Ю., Рябикин М. Ю.* Генерация терагерцового излучения при оптическом пробое воздуха: зависимость оптимального фазового сдвига между компонента-

- ми двухцветного лазерного импульса от их интенсивности // Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 101, вып. 2. С. 78-83.
- A4. *Alexandrov L. N., Emelin M. Yu., Ryabikin M. Yu.* Probing the field-free orientation dynamics of polar molecules using laser-induced THz wave generation // *Mol. Phys.* 2017. V. 115, № 15-16. P. 1797-1802.
- A5. *Александров Л. Н., Емелин М. Ю., Рябикин М. Ю.* Генерация терагерцового излучения при ионизации асимметричных молекул фемтосекундными лазерными импульсами // Сборник докладов Пятой Всероссийской школы для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям (под ред. С.Г. Гаранина). Саратов: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011. С. 4-8.
- A6. *Alexandrov L., Emelin M., Ryabikin M.* Excitation of residual current by femtosecond laser pulses in gas of asymmetric molecules // *Research in Optical Sciences, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2012)*. Paper JT2A.56.
- A7. *Emelin M., Alexandrov L., Ryabikin M.* Directional photocurrent from gases ionized by two-color laser radiation: optimal phase shift revisited // *Research in Optical Sciences, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2014)*. Paper JW2A.28.
- A8. *Alexandrov L. N., Emelin M. Yu., Ilyakov I. E., Shishkin B. V., Ryabikin M. Yu.* THz generation at optical breakdown of gases by two-color laser fields: one more demonstration of the SFA insufficiency // 11th Conference on Super-Intense Laser-Atom Physics (SILAP), Abstracts. Bordeaux, France, September 7-10, 2015. P. 47.
- A9. *Alexandrov L. N., Emelin M. Yu., Ryabikin M. Yu.* Probing the orientation of molecules in a gas using laser-induced THz wave generation // 11th Conference on Super-Intense Laser-Atom Physics (SILAP), Abstracts. Bordeaux, France, September 7-10, 2015. P. 115.

АЛЕКСАНДРОВ Леонид Николаевич

**МЕХАНИЗМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ КВАЗИПОСТОЯННЫХ ТОКОВ,
ИНИЦИИРУЮЩИХ ГЕНЕРАЦИЮ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ГАЗЫ
ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ**

Автореферат

Подписано к печати 4.10.2021.
Формат $60 \times 90 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ № 47(2021).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН,
603950, г. Н. Новгород, ул. Ульянова, 46