

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*

**Стремоухов Сергей Юрьевич**

**МЕХАНИЗМЫ ГЕНЕРАЦИИ ПРОИЗВОЛЬНО  
ПОЛЯРИЗОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ИНТЕНСИВНЫХ ЛАЗЕРНЫХ  
ПОЛЯХ**

01.04.21 – лазерная физика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

МОСКВА – 2022

Работа выполнена на кафедре оптики, спектроскопии и физики наносистем физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Научный консультант: **Андреев Анатолий Васильевич**,  
доктор физико-математических наук, профессор.  
Официальные оппоненты: **Колачевский Николай Николаевич**,  
доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, директор;  
**Бугай Александр Николаевич**,  
доктор физико-математических наук,  
Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований, директор Лаборатории радиационной биологии;  
**Маймистов Андрей Иванович**,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», профессор.

Защита состоится "16" июня 2022 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.01.13 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119992, Москва, ул. Академика Хохлова, дом 1, Корпус нелинейной оптики, аудитория им. С.А. Ахманова.

E-mail: [diss.sov.31@physics.msu.ru](mailto: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 сайте ИАС «ИСТИНА»:

<https://istina.msu.ru/dissertations/445646279/>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук

А.А. Коновко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы диссертационной работы

С развитием методов генерации ультракоротких (вплоть до одного цикла поля) интенсивных лазерных импульсов [1], ученые получили возможность экспериментального изучения взаимодействия такого излучения с веществом. В результате было обнаружено множество явлений, которые не смогли получить своего теоретического объяснения в рамках существующих в то время подходов, основанных, в основном, на теории возмущений, феноменологических принципах и методе медленно меняющихся амплитуд и фаз электромагнитного поля. При таких (в первую очередь, фемтосекундных) длительностях импульсов пиковая напряженность лазерного поля перестает быть малой величиной по сравнению с внутриатомной ( $E_{at} = 5 \cdot 10^9$  В/см), и отклик среды становится существенно нелинейным [2-4], что открывает возможности генерации интенсивного импульсного терагерцового (ТГц) излучения [5] и генерации гармоник высокого порядка [6-8]. В этом случае, применение квантово-механических подходов, основанных на теории возмущений, в которой в качестве малого параметра используется отношение величины напряженности электромагнитной волны к внутриатомной напряженности, оказывается проблематичным. В связи с этим возникла необходимость развития принципиально новых, так называемых непертурбативных подходов, учитывающих энергетическую структуру атомов и молекул и свободных от использования отношения величины напряженности лазерного поля к внутриатомной напряженности в качестве малого параметра. К таковым относится предложенная в [9] и развитая в рамках настоящей диссертационной работы непертурбативная теория. Она основана на решении квантово-механической задачи взаимодействия одиночного атома с интенсивными лазерными полями. Последовательный учет симметрии взаимодействия, а также нелинейностей задачи взаимодействия одиночного атома с лазерным полем позволяет применять развиваемую теорию к описанию явлений генерации гармоник высокого (и

низкого) порядков и генерации ТГц излучения – одних из самых интересных нелинейно-оптических явлений, происходящих в результате взаимодействия интенсивных ультракоротких лазерных импульсов с веществом. Интерес к исследованию этих явлений обусловлен не только их фундаментальностью, но и возможностью создания компактных и более доступных (по сравнению с такими установками класса «мегасайенс», как современные источники синхротронного излучения, лазеры на свободных электронах) источников когерентного излучения в ТГц, ультрафиолетовой и рентгеновской областях спектра. Такие источники, обладая несомненно меньшей мощностью, могут использоваться как для проведения предварительных исследований, так и для отработки методик исследования вещества для их последующего масштабирования на станциях установок класса «мегасайенс». Кроме того, использование генерируемого лазерными методами когерентного излучения в качестве затравочного позволяет улучшать как энергетические, так и когерентные свойства излучения, генерируемого лазерами на свободных электронах [10].

Возможность генерации излучения ТГц, ультрафиолетового и рентгеновского диапазонов с контролируемым состоянием поляризации (от линейной до циркулярной) открывает дополнительную «степень свободы» при его применении. Так, с использованием циркулярно поляризованного излучения можно изучать хиральные свойства молекул и наночастиц, магнитные свойства вещества и др. Вместе с тем, генерация эллиптически поляризованного излучения крайне чувствительна к характеристикам лазерного поля и составу вещества, поэтому развитие современных теоретических подходов к описанию указанного явления носит принципиальный характер.

Важно подчеркнуть, что для разработки удобных для применения методов управления характеристиками генерируемого излучения, а также для интерпретации результатов современных экспериментов необходимо не только с большой точностью уметь рассчитывать отклик одиночного атома на

микроскопическом (квантово-механическом) уровне, но и на основе параметров поля отклика одиночного атома уметь рассчитывать макроскопический отклик среды без использования феноменологических предположений о величине нелинейности среды.

Таким образом, понимание физики процессов генерации когерентного излучения при взаимодействии интенсивного лазерного излучения с веществом и развитие современных методов управления параметрами такого излучения как на микроскопическом, так и на макроскопическом уровне представляет собой **актуальную научную задачу**. Дополнительным индикатором актуальности темы диссертационной работы является то, что ежегодно публикуется более тысячи работ, связанных как с исследованиями непосредственно методов генерации гармоник и ТГц излучения, так и с развитием методов применения генерируемого излучения для исследования структуры вещества.

#### **Уровень разработанности исследуемых проблем**

Считается, что природа генерации гармоник высокого порядка и природа генерации ТГц излучения находятся на разных пространственных масштабах описания нелинейно-оптического отклика среды на воздействие интенсивного лазерного поля. Так, явление генерации гармоник высокого порядка является результатом нелинейно-оптического отклика одиночного атома, а макроскопические факторы среды оказывают влияние на условия фазового синхронизма [11]. При обсуждении механизмов генерации ТГц излучения в газовых средах, взаимодействующих с двухчастотными лазерными полями, в основном, выделяют вклады фототока, создаваемого движением в лазерном поле ионизованных электронов, и нейтральной среды за счет учета ее тензоров нелинейной восприимчивости [12], компоненты которого, как правило, описаны феноменологически. Вместе с тем, экспериментальные исследования демонстрируют общие черты у этих двух явлений [13], что позволяет предположить их единую природу.

Кроме того, единого теоретического подхода к описанию указанных явлений, который учитывал бы динамику изменения населенностей уровней дискретного и непрерывного спектров атомов, распределенных в среде, при их взаимодействии с интенсивными лазерными полями, параметры которых зависят от положения атомов в среде за счет эффектов распространения лазерного излучения, пока не разработано. Решение указанной задачи определило основные направления исследований в данной работе.

### **Цель и задачи работы**

Основной целью диссертационной работы является развитие согласованного теоретического подхода к описанию нелинейно-оптического отклика протяженных газовых сред на воздействие интенсивного произвольно поляризованного многокомпонентного лазерного поля и его применение к исследованию физики процессов генерации когерентного излучения в результате такого взаимодействия. Для достижения основной цели были поставлены *следующие задачи*:

1. Развить непертурбативный теоретический подход к описанию отклика одиночного атома на воздействие интенсивного произвольно поляризованного многокомпонентного лазерного поля.
2. Предложить и разработать интерференционную модель отклика протяженной газовой среды, учитывающую отклики одиночных атомов, рассчитанных квантово-механически в рамках развиваемого непертурбативного теоретического подхода.
3. Разработать комплект компьютерных программ, позволяющий моделировать отклик одиночного атома и протяженной газовой среды в рамках непертурбативного теоретического подхода и интерференционной модели газовой среды.
4. Провести исследования особенностей генерации гармоник и ТГц излучения одиночными атомами и газовыми средами, взаимодействующими с интенсивными произвольно поляризованными многокомпонентными лазерными полями.

Соответственно, **объектом исследования** является нелинейно-оптический отклик одиночного атома и газовых сред на воздействие интенсивного произвольно поляризованного многокомпонентного лазерного поля, а **предметом исследования** – свойства когерентного излучения различных спектральных диапазонов, генерируемого в результате такого взаимодействия.

**Методология диссертационного исследования** заключается в проведении аналитических и численных расчетов, разработке математических моделей, их верификации на известных теоретических предсказаниях и/или экспериментальных исследованиях, получении и интерпретации результатов. Численные расчеты проводились с помощью разработанного комплекта компьютерных программ.

### **Научная новизна**

В диссертационной работе впервые получены следующие научные результаты:

1. Предложен новый метод генерации ТГц излучения при взаимодействии одиночного атома с последовательностью лазерных импульсов в доионизационном режиме (при котором вкладом ионизации атома лазерным полем можно пренебречь).
2. На атомарном уровне доказано, что в двухчастотных линейно-поляризованных полях для любого угла между направлениями поляризации компонент поля низкочастотная часть ТГц спектра обладает линейной поляризацией; также показано, что в высокочастотной части ТГц спектра существуют области вариации угла между направлениями поляризаций компонент поля, при которых генерируемое одиночным атомом ТГц излучение обладает высокой эллиптичностью.
3. Показано, что угол между направлениями поляризаций компонент поля является эффективным управляющим параметром, позволяющим без изменения энергии лазерных полей управлять эффективностью генерации ТГц излучения и его поляризационными свойствами.

4. Предложены и теоретически обоснованы способы оптимизации параметров ТГц излучения (эллиптичности, напряженности), генерируемого при взаимодействии газовой среды с двухчастотными лазерными полями. Показано, что использование диафрагмы позволяет повысить эллиптичность генерируемого ТГц излучения.
5. Показано, что при доионизационном режиме взаимодействия одиночного атома с лазерными полями спектр генерируемых гармоник не ограничен подбарьерными и околобарьерными гармониками.
6. Определен механизм генерации эллиптических гармоник высокого порядка в двухчастотных ортогонально поляризованных фемтосекундных лазерных полях.
7. Показано, что угол между направлениями поляризаций компонент поля является эффективным управляющим параметром, позволяющим без изменения энергии лазерных полей управлять эффективностью генерации гармоник высокого порядка.
8. Предложена интерпретация наблюдаемому в эксперименте по изучению отклика плазменных сред на воздействие лазерного поля явлению, которое заключается в том, что в интенсивных лазерных полях ширина спектра генерируемых гармоник перестает зависеть от интенсивности лазерного поля.
9. Предсказана генерация продольной компоненты электрического поля (в дальней зоне) при взаимодействии одиночного атома с лазерными полями, когда направление углового момента атома и направление поляризации лазерного поля не совпадают.
10. Теоретически обоснован новый эффект нелинейного лазерного возбуждения изомерного состояния ядра атома тория.
11. На основании теоретических расчетов предложены простые соотношения между макропараметрами газовой среды и энергиями фотонов генерируемого излучения, определяющие условия как фазового,



так и квази-фазового согласования для увеличения эффективности генерации выделенных гармоник.

12. Предложен новый метод управления эффективностью генерации групп гармоник высокого порядка за счет эффектов квази-фазового согласования, позволяющий частично компенсировать низкую эффективность генерации гармоник высокого порядка в лазерных полях среднего инфракрасного диапазона.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Представленные в диссертационной работе результаты имеют как теоретическую, так и практическую значимость. С фундаментальной точки зрения разработанный согласованный теоретический подход к описанию отклика одиночного атома и среды может быть использован как для объяснения результатов современных экспериментов, так и для постановки новых экспериментальных исследований.

Практическую ценность имеют, в первую очередь, предложенные способы управления параметрами генерируемого излучения. В частности, в диссертационной работе были определены способы частичной компенсации падения эффективности генерации гармоник высокого порядка в полях лазерных источников среднего инфракрасного диапазона за счет управления эффектами квази-фазового согласования, возникающими в неоднородных газовых средах. Эти способы, в частности, могут быть полезны при развитии методов создания затравочного излучения в лазерах на свободных электронах с целью повышения эффективности генерации и улучшения когерентных свойств генерируемого этими установками класса «мегасайенс» излучения.

Работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ (гранты 19-29-12030- ИССИ, № 18-02-40014-мега, 18-02-00743-а, 16-32-00723-мол\_а, в которых соискатель выполнял роль руководителя; гранты № 18-02-00528-а, 18-52-41007-узб\_а, 15-02-04352-а, 16-52-10012 КО\_а, 12-02-31843-мол\_а, 12-02-00969-а, 08-02-00448-а, 05-02-16764-а, в которых соискатель выполнял роль исполнителя), Минобрнауки РФ (соглашения №14.616.21.0006,

14.616.21.0005, № 8018 от 16 июля 2012 года, № 075-15-2021-1353). Также исследования были поддержаны Советом по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых и по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации (стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики СП-4085.2018.1 и СП-3565.2015.1).

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Генерация гармоник высокого порядка, генерация подбарьерных и околобарьерных гармоник, а также генерация ТГц излучения являются результатом единого процесса движения электрона в суперпозиционном поле многокомпонентного многочастотного произвольно поляризованного лазерного излучения и кулоновского потенциала атома.
2. ТГц излучение в доионизационном режиме генерируется за счет внутриатомных нелинейностей одиночного атома при взаимодействии с последовательностью лазерных импульсов.
3. Фотоэмиссионный спектр отклика атома, взаимодействующего с лазерным полем, в дальней зоне обладает ненулевой продольной компонентой при наличии ненулевого угла между направлением углового момента атома и плоскостью поляризации лазерного излучения, величина продольной компоненты зависит от их взаимной ориентации.
4. Угол между компонентами двухчастотного лазерного поля является эффективным управляющим параметром оптимизации как эффективности генерации гармоник и ТГц излучения, так и их поляризационных свойств.
5. Динамика населенностей подуровней уровней атома, отвечающих различным значениям проекции орбитального квантового числа,

является причиной генерации эллиптически поляризованных гармоник в ортогонально поляризованных двухчастотных лазерных полях.

6. За счет эффекта квази-фазового согласования в газовых средах, представляющих собой набор газовых струй, эффективность генерации выделенных гармоник растет пропорционально квадрату длины волны лазерного излучения по отношению к отклику одиночного атома.
7. Напряженность электрической компоненты когерентного электромагнитного поля, создаваемого за счет нелинейно-оптического взаимодействия электронов атома и лазерного излучения, на родительском ядре атома может достигать величин, существенно больших, чем от других источников; это электромагнитное поле, специально подобранное по частоте, может возбудить ядро за счет механизма нелинейного лазерного возбуждения.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Представленные в диссертационной работе результаты получены с использованием современных методов компьютерного моделирования и теоретической физики. Вместе с тем, о степени достоверности полученных результатов можно судить по успешному сравнению с экспериментальными данными. Большая часть результатов, представленных в диссертационной работе, находится в количественном или хорошем качественном согласии с экспериментальными данными, опубликованными в ведущих мировых научных журналах. Часть полученных результатов находится в хорошем согласии с теоретическими и численными расчетами других научных групп, их достоверность также не вызывает сомнения. В диссертационной работе предсказан ряд новых эффектов, не наблюдавшихся до сих пор экспериментально и не обсуждавшихся в статьях других авторов. Эти результаты также можно считать с большой вероятностью достоверными, поскольку они получены в рамках тех же методов и тех же приближений, что и экспериментально подтвержденные результаты. Кроме того, некоторое

количество предсказаний было экспериментально подтверждено после опубликования результатов теоретических исследований.

Достоверность представленных в диссертационной работе результатов подтверждается также публикациями в ведущих научных журналах и выступлениями на профильных научных конференциях. Основные результаты диссертационной работы были представлены автором лично на следующих международных конференциях:

- *в рамках приглашенных докладов*: Фундаментальные проблемы оптики-2012 (Санкт-Петербург, Россия), Первый Российский кристаллографический конгресс (Москва, Россия, 2016), LPHYS'17, LPHYS'21 (Казань, Россия, 2017; Москва, Россия, 2021, онлайн), IWQO–2019 (Владимир, Россия), ALT'19, ALT'21 (Прага, Чехия; Москва, Россия, онлайн), UltrafastLight-2020 (Москва, Россия), Quantum Optics and Photonics 2021 (Рига, Латвия, онлайн), NP2020 (Курашики, Япония, 2021, онлайн)

- *в рамках устных и постерных докладов*: Ломоносов – 2006, Ломоносов – 2007, Ломоносов – 2008 (Москва, Россия), Фундаментальные проблемы оптики – 2006, Фундаментальные проблемы оптики – 2008 (Санкт-Петербург, Россия), V семинар памяти Д.Н. Клышко, VII семинар памяти Д.Н. Клышко, VIII семинар памяти Д.Н. Клышко, IX семинар памяти Д.Н. Клышко (Москва, Россия, 2007, 2011, 2013, 2015), XLIII всероссийская конференция по проблемам математики, информатики, физики и химии (Москва, Россия, 2007), RFGLS-2009 (Нижний Новгород, Россия), XII всероссийская школа-семинар “Физика и применение микроволн” (Звенигород, Россия, 2009), Light at Extreme Intensities (Брашов, Румыния, 2009), шестая международная конференция молодых ученых и специалистов “Оптика-2009” (Санкт-Петербург, Россия), IX международный симпозиум по фотонному эхо и когерентной спектроскопии (Казань, Россия, 2009), LPHYS'10 (Фоз ду Игуасу, Бразилия, 2010), EOSAM 2010 (Париж, Франция), IONS-11 (Париж, Франция, 2012), 31<sup>st</sup> PIERS (Куала Лумпур, Малайзия, 2012), International Symposium on High Power Laser Ablation (Санта Фе, США, 2012), CLEO (Сан Хосе, США,

2012), ICXRL 2012, ICXRL 2016, ICXRL 2018, ICXRL 2020 (Париж, Франция; Нара, Япония; Прага, Чехия; Швейцария, онлайн), TERA 2012, TERA 2018 (Москва, Россия; Нижний Новгород, Россия), X Курчатовская молодежная научная школа (Москва, Россия, 2012), ICONO 2013 (Москва, Россия), High-Intensity Lasers and High-Field Phenomena (Берлин, Германия, 2014), ILLA 2014 (Шатура, Россия), 3rd International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology (Берлин, Германия, 2015) АТТО 2015 (Сен-Совёр, Канада), IWQO-2015 (Москва-Троицк, Россия), RACIRI Summer School 2015 (Селлин, Германия), ХОРТ 2016 (Иокогама, Япония), Ломоносовские чтения – 2017 (Москва, Россия), Global Summit on Scientific Federation Laser Optics & Photonics (Валенсия, Испания, 2017), International Conference Terahertz Science at European XFEL (Гамбург, Германия, 2017), CLEO Europe & EQEC (Мюнхен, Германия, 2017), UltrafastLight-2018 (Москва, Россия), HHG&MAC Workshop: Science with Coherent XUV Sources at ELI Beamlines (Прага, Чехия, 2019), NP2020 (Курашики, Япония, 2021, онлайн), ФЭКС-2021 (Казань, Россия).

Также результаты диссертационной работы были представлены соавторами на следующих международных конференциях: LPHYS'06 (Лозанна, Швейцария, 2006), научная сессия МИФИ-2007 (Москва, Россия), ICONO 2007, ICONO 2016 (Минск, Белоруссия), Современные нанотехнологии и нанофотоника для науки и производства (Владимир, Россия, 2008), IRMMW-THz 2010 (Рим, Италия), FLAMN-10 (Санкт-Петербург, Россия, 2010), ICONO 2010 (Казань, Россия), Light at Extreme Intensities (Сегед, Венгрия, 2011), Laser Optics 2012, Laser Optics 2016 (Санкт-Петербург, Россия), Europhysics Conference (Лозанна, Швейцария, 2012), International Workshop on Optical Terahertz Science and Technology 2013 (Киото, Япония), CLEO (Сан-Хосе, США, 2013), АТТО 2013 (Париж, Франция), FEL 2013 (Нью-Йорк, США), национальная молодежная научная школа “Синхротронные и нейтронные исследования” (Москва, Россия, 2015), ОПТИКА – 2015 (Санкт-Петербург, Россия), XIII Курчатовская молодежная научная школа, XIV Курчатовская молодежная научная школа, Юбилейная XV Курчатовская

междисциплинарная молодежная научная школа (Москва, Россия, 2015, 2016, 2017), Ломоносов – 2016, Ломоносов – 2017, Ломоносов – 2018 (Москва, Россия), XXV съезда по спектроскопии (Троицк-Москва, Россия), X семинар памяти Д.Н. Клышко (Завидово, Россия, 2017), PIERS 2017 (Санкт-Петербург, Россия), ЛаПлаз 2018 (Москва, Россия), XIII International Conference on Hole Burning, Single Molecule, And Related Spectroscopies: Science and Applications (Суздаль, Россия, 2018), 7th International Conference on Attosecond Science and Technology (Сегед, Венгрия, 2019), IWQO–2019 (Владимир, Россия), UltrafastLight-2020 (Москва, Россия), ICLO 2020 (Санкт-Петербург, Россия).

### **Публикации**

По теме диссертационной работы опубликовано 49 работ, из них 31 научная статья опубликована в журналах Scopus, WoS, RSCI, а также из Перечня изданий МГУ, 1 монография, 1 учебно-методическое пособие, 16 иных научных трудов.

Общее количество индексируемых публикаций по данным Web of Science Core Collection – 46. Это позволяет считать, что результаты диссертационной работы соответствуют современному мировому уровню исследований в области лазерной физики, являются обоснованными и достоверными.

### **Личный вклад автора**

Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены лично автором или при его непосредственном участии. Вклад автора в исследования, на результатах которых подготовлена диссертационная работа, является определяющим, это касается как постановки решаемых задач, так и основных идей, расчетов и выводов.

### **Структура и содержание работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 354 страницах, включает в себя 124 рисунка и 5 таблиц. Общее число ссылок на литературные источники составляет 335, а также 49 публикаций по теме диссертационной работы.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, поставлена цель и сформулированы задачи работы, определен объект и предмет исследования, описана методология диссертационного исследования, указана его научная новизна, теоретическая и практическая значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту, оценена степень достоверности результатов и личный вклад автора.

**Первая глава** посвящена обзору литературы по теме диссертационной работы. Рассмотрены основные теоретические подходы к описанию отклика одиночного атома и газовой среды на воздействие интенсивного лазерного поля, а также теоретические подходы к описанию явления генерации гармоник высокого порядка, эффектов фазового и квази-фазового согласования в газовых средах. Также проанализированы современные экспериментальные результаты по генерации гармоник высокого порядка, полученные как в газовых так и в плазменных средах, взаимодействующих с одно- и двухчастотными лазерными полями. Рассмотрены основные теоретические и экспериментальные подходы к генерации эллиптически поляризованных гармоник высокого порядка. Кратко изложены основные методы генерации ТГц излучения, основные способы описания генерации ТГц излучения в газах, взаимодействующих с двухчастотными лазерными полями, и основные результаты экспериментальных исследований. Обсуждена концепция генерации продольной компоненты электромагнитного излучения, описаны современные способы формирования излучения со сложным, трехмерным, распределением поляризации. Изложены основные методы возбуждения низкоэнергетических изомерных ядерных состояний.

В **Главе 2** «Основные положения теоретического подхода к описанию взаимодействия произвольно поляризованного излучения с одиночными атомами и протяженными газовыми средами» описывается развитый непerturbативный теоретический подход к описанию отклика одиночного атома на воздействие интенсивного произвольно поляризованного

многокомпонентного лазерного поля. Подробно анализируются матричные элементы оператора  $\hat{V}$ , связывающего волновые функции – точные решения краевой задачи свободного атома и краевой задачи «об атоме в поле», продемонстрирован их аналитический вид, нелинейная зависимость от амплитуды лазерного поля и величины волнового вектора фотоэлектрона (для матричных элементов, вычисленных для переходов между уровнями дискретного и непрерывного спектров). Обсуждаются методы ограничения количества уровней атома для проведения численных исследований. Представлены модельные структуры уровней атома, которые используются для получения результатов.

Также приведен анализ составных матричных элементов  $\langle n_1 l_1 m_1 | M | n_2 l_2 m_2 \rangle = \sum_{n_3 l_3 m_3} \langle n_1 l_1 m_1 | V^{-1} | n_3 l_3 m_3 \rangle E_{n_3 l_3} \langle n_3 l_3 m_3 | V | n_2 l_2 m_2 \rangle$  (где  $E_{n_3 l_3}$  – значение энергии уровня атома, соответствующего набору квантовых чисел:  $n_3$  – главное квантовое число,  $l_3$  – орбитальное квантовое число,  $m_3$  – проекция орбитального квантового числа,  $\langle n_3 l_3 m_3 | V | n_2 l_2 m_2 \rangle$  – матричный элемент оператора  $\hat{V}$ ), которые являются коэффициентами в системе уравнений для амплитуд населенностей уровней атома, с точки зрения их зависимости от угла между компонентами двухчастотного лазерного поля, образованного линейно поляризованными первой и второй гармониками лазерного источника. Важность указанного параметра заключается в том, что, с одной стороны, его вариация не приводит к изменению энергетических параметров лазерного поля, а с другой стороны, как покажут представленные в главах диссертационной работы расчеты, этот параметр является управляющим как для энергетических, так и поляризационных характеристик генерируемых гармоник и ТГц излучения.

В главе 2 также анализируются парциальные матричные элементы тока



$$\begin{aligned} \langle n_1 l_1 m_1 | \vec{J} | n_2 l_2 m_2 \rangle = & i \sum_{n_3 l_3 m_3} \sum_{n_4 l_4 m_4} \frac{(E_{n_3 l_3} - E_{n_4 l_4})}{\hbar} \times \\ & \times \langle n_1 l_1 m_1 | V^{-1} | n_3 l_3 m_3 \rangle \langle n_3 l_3 m_3 | \vec{d} | n_4 l_4 m_4 \rangle \langle n_4 l_4 m_4 | V | n_2 l_2 m_2 \rangle, \end{aligned}$$

которые являются коэффициентами при расчете тока атомного отклика  $\vec{J}(t) = i \sum_{n_1, l_1, m_1, n_2, l_2, m_2} a_{n_1 l_1 m_1}^*(t) a_{n_2 l_2 m_2}(t) \langle n_1 l_1 m_1 | \vec{J} | n_2 l_2 m_2 \rangle$ ,  $\vec{d}$  - оператор дипольного момента,  $a_{n_2 l_2 m_2}(t)$  - амплитуда населенности уровня атома. Представлен явный аналитический вид парциального матричного элемента, вычисленного для произвольно поляризованного многокомпонентного лазерного поля. Показано, что в дальней зоне спектр тока атомного отклика  $J(\omega)$  совпадает со спектром генерируемого электромагнитного излучения, кроме того, приведены формулы для расчета как амплитуды напряженности электрического, так и амплитуды напряженности магнитного полей в ближней зоне. Определен явный вид векторного потенциала двухчастотного фемтосекундного лазерного поля, который используется в численных исследованиях, и управляющего параметра задачи  $\mu_0$ , пропорционального амплитуде векторного потенциала лазерного поля, оценены границы применимости непертурбативного подхода в целом и с точки зрения вариации параметра  $\mu_0$  в частности.

В качестве примера применения описанного непертурбативного подхода к расчету отклика одиночного атома при конкретных параметрах поля, представлены результаты анализа динамики населенностей уровней модельного атома аргона, расчета спектра тока его отклика на воздействие двухчастотного лазерного поля, образованного линейно поляризованными первой и второй гармониками Ti:Sa лазера. Спектр генерируемого излучения представлен на рис. 1. Видно, что спектр состоит из последовательности четных и нечетных гармоник поля, причем амплитуды каждой из гармоник обладают ненулевыми проекциями на ортогональные оси. Важно отметить, что спектр не ограничивается подбарьерными и околобарьерными

гармониками (гармониками, энергия фотона которых меньше или равна энергии ионизации атома), несмотря на то, что модельная структура уровней атома не учитывает динамику населенностей квазиуровней непрерывного спектра атома (рис. 1а). Действительно, энергия ионизации атома аргона составляет величину 15,76 эВ, для излучения Ti:Sa лазера соответствует ~10-ой гармонике поля, вместе с тем, фотоэмиссионный спектр существенно шире. Кроме того, в спектре излучения присутствует ненулевой сигнал на «нулевой» частоте, который в случае воздействия лазерных импульсов фемтосекундной длительности, соответствует ТГц диапазону (рис. 1б). Отклик в ТГц части также имеет ненулевые проекции на перпендикулярные оси.

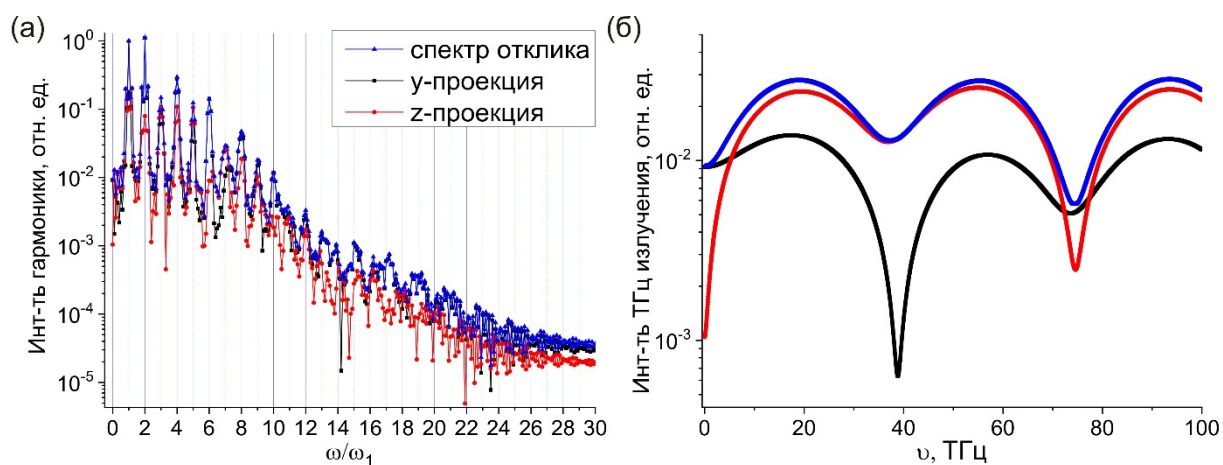


Рис. 1. Фотоэмиссионный спектр отклика атома (синяя кривая с треугольниками), и его проекции на перпендикулярные оси (черная кривая с квадратами и красная кривая с кружками) (а) и его длинноволновая часть (б), рассчитанный для атома аргона, взаимодействующего с двухчастотным лазерным полем, образованным линейно поляризованными первой и второй гармониками Ti:Sa лазера; параметры поля, используемые в расчетах, имеют вид  $\mu_{01} = 0.1$  (амплитуда компоненты двухчастотного поля на основной частоте лазера),  $\mu_{02} = 0.1$  (амплитуда компоненты двухчастотного поля на частоте второй гармоники лазера),  $\tau_1 = \tau_2 = 26.6$  фс (длительности импульсов),  $\theta = \frac{21\pi}{48}$  - угол между направлениями поляризаций компонент двухчастотного поля,  $t_{02} - t_{01} = 0$  - временная задержка между импульсами.

Приведено описание предложенной интерференционной модели, которая позволяет описывать отклик газовой (плазменной) среды, учитывая, как некоторые особенности распространения излучения в среде (в первую очередь, связанные с дисперсией среды), так и рассчитанные с помощью разработанной непертурбативной теории отклики одиночных атомов,

расположенных в среде и взаимодействующих, в общем случае, с лазерными полями, параметры которых зависят от координат атомов.

Описанные в Главе 2 непertурбативная теория и интерференционная модель составляют основу для проведенных в рамках подготовки диссертационной работы численных исследований. На их основе написан комплекс программ в среде Wolfram Mathematica, который позволяет рассчитывать отклик одиночного атома и протяженных газовых сред. Разработанный комплекс программ может быть использован для проведения численных, в том числе экспериментально ориентированных, исследований эффектов, связанных с генерацией когерентного излучения при воздействии интенсивного лазерного излучения на атомарные среды. Проведенные экспериментально ориентированные теоретические расчеты продемонстрировали хорошее качественное, а в некоторых случаях, и количественное согласование с соответствующими экспериментальными результатами по исследованию особенностей генерации гармоник в газах (Ar, Ne, Xe, Xe+CO<sub>2</sub>) [A7, A18, A20], в плазме (Ag, In) [A4, A10, A24, A33, A34], в газо-кластерных смесях (Ar) [A32], а также по генерации ТГц излучения (CO<sub>2</sub>) [A8].

**Глава 3** «Генерация гармоник одиночными атомами и протяженными газовыми средами» посвящена обсуждению результатов полуаналитических и численных исследований генерации гармоник высокого и низкого порядков одиночными атомами и протяженными газовыми средами, взаимодействующими с произвольно поляризованным многокомпонентным лазерным полем. Для понимания физики генерации гармоник высокого порядка изложен упрощенный классический подход к описанию явления. Он основан на решении классического уравнения для движения электрона в полях внешней электромагнитной волны и внутриатомного потенциала. Показано, что движение электрона вдоль направления поляризации лазерного излучения представляет собой периодическую функцию, а его скорость, и, следовательно ток атомного отклика, можно представить набором гармонических функций с

частотами, соответствующими нечетным гармоникам воздействующего лазерного поля (в случае взаимодействия с одночастотным лазерным полем). Такая визуализация явления генерации гармоник высокого порядка позволяет понять основные его особенности, однако не может быть использована для описания генерации гармоник высокого порядка в интенсивных лазерных полях.

С использованием разработанного непертурбативного теоретического подхода исследованы особенности отклика одиночного атома на воздействие интенсивного одночастотного лазерного поля. Объектом исследования являлась ширина генерируемого спектра – области, занимаемой спектром гармоник до границы плато – частоты отсечки. Исследования зависимости частоты отсечки от интенсивности лазерного излучения показывают, что в околоатомных лазерных полях эта зависимость, вычисленная для атома серебра, взаимодействующего с излучением Ti:Sa лазера ( $\lambda = 800 \text{ нм}$ ) длительности 27 фс (см. рис. 2 а, на котором представлен номер гармоники ( $H_{\text{cut-off}}$ ), соответствующий частоте отсечки), насыщается за счет полной однократной ионизации атома. Учет отклика ансамблей атомов приводит к уменьшению значения  $H_{\text{cut-off}}$ , приближая зависимость к наблюдаемой в эксперименте (рис. 2 б).

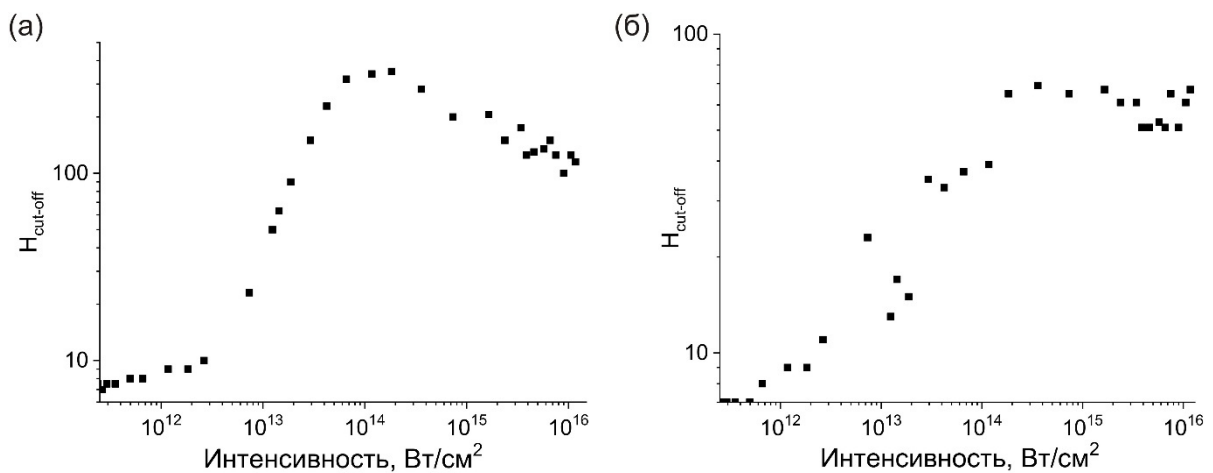


Рис. 2. Зависимость  $H_{\text{cut-off}}$  от интенсивности лазерного поля, вычисленная для одиночного атома серебра (а) и для ансамбля атомов серебра (б), взаимодействующих с излучением Ti:Sa лазера ( $\lambda = 800 \text{ нм}$ ) длительности 27 фс.

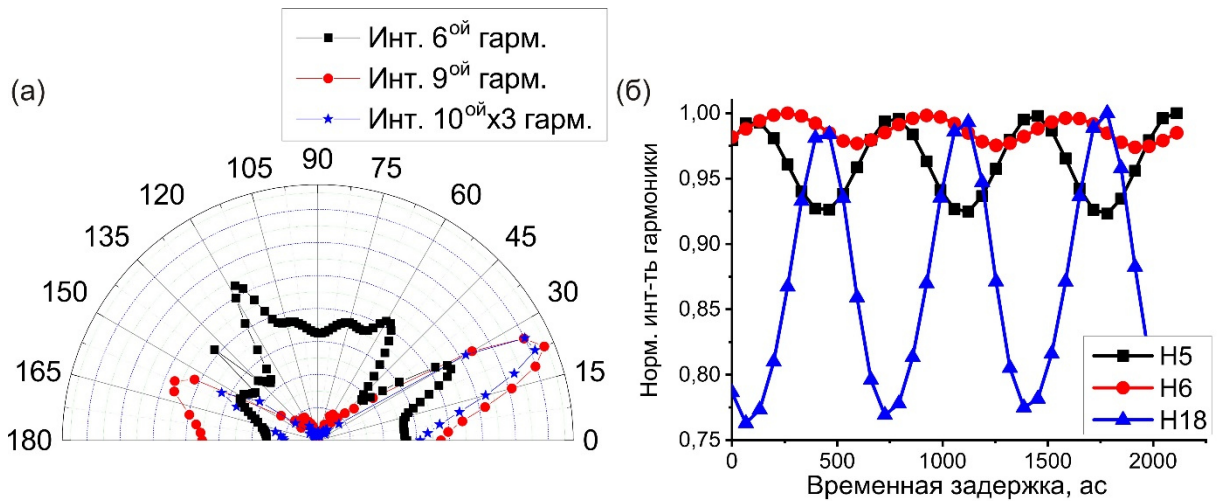


Рис. 3 (а) Эффективность генерации шестой (кривая с квадратами), девятой (кривая с кружками) и десятой гармоник (кривая со звездочками) гармоник в зависимости от угла между векторами поляризации компонент двухчастотного лазерного поля. Расчет проводился для следующих значения параметров поля:  $\mu_{01} = \mu_{02} = 0.1$ ,  $\tau_1 = \tau_2 = 26.6 \text{ фс}$ ,  $t_{01} - t_{02} = 0$ . Эффективность генерации 10-ой гармоники умножена на коэффициент 3 для более удобного сравнения. (б) Зависимости нормированных интенсивностей 5-ой (черная кривая с квадратами), 6-ой (красная кривая с кружками) и 18-ой (синяя кривая с треугольниками) гармоник от величины временной задержки между импульсами, рассчитанные для следующих параметров двухчастотного поля, образованного линейно поляризованными первой и второй гармониками Ti:Sa лазера:  $\mu_{01} = 0.1$ ,  $\mu_{02} = 0.0147$ ,  $\tau_1 = \tau_2 = 26.6 \text{ фс}$ ,  $\theta = 0$ . Расчеты проведены для атома аргона.

Проведены исследования влияния параметров двухчастотного лазерного поля, образованного линейно поляризованными первой и второй гармониками лазерного источника, на эффективность генерации гармоник. Показано, что наиболее интересными с точки зрения оптимизации эффективности генерации гармоник параметрами поля, которые с одной стороны не меняют, но перераспределяют энергию лазерного поля, а с другой стороны позволяют увеличить эффективность генерации гармоник, являются угол между поляризациями компонент поля (результаты численных расчетов эффективности генерации гармоник при вариации этого параметра представлены на рис. 3 а) и временная задержка между импульсами (результаты численных расчетов эффективности генерации гармоник при вариации этого параметра представлены на рис. 3 б). Первый параметр перераспределяет энергию лазерного поля в плоскости поляризации, а второй - во времени.

Расчеты, представленные на рис. 3, проводились для модельной структуры уровней атома аргона, не учитывающей динамику населенности квазиуровней непрерывного спектра атома. Вместе с тем, спектр отклика атома аргона содержит гармоники с энергией фотона, превышающей энергию ионизации атома. Для объяснения механизма генерации гармоник проведен расчет тока атомного отклика в рамках двухуровневой модели, показано, что генерация гармоник происходит за счет внутриатомных нелинейностей различных порядков, которые учитываются в матричных элементах оператора  $\hat{V}$  в виду его экспоненциальной зависимости от амплитуды векторного потенциала лазерного поля. Экспоненциальная зависимость матричного элемента позволяет учитывать все возможные переходы между виртуальными уровнями, соответствующими  $k$ -фотонным переходам, таким образом, развиваемый подход позволяет учесть все возможные нелинейности отклика одиночного атома. Вместе с тем, учет всех возможных  $k$ -фотонных переходов при использовании волновых функций – точных решений краевой задачи «об атоме в поле» позволяет даже в случае доионизационного режима взаимодействия (когда не учитывается вклад динамики населенностей квазиуровней непрерывного спектра атома) учитывать вклад переходов с виртуальных уровней, энергия которых  $k\hbar\omega_0$  (где  $\hbar\omega_0$  - энергия фотона лазерного поля), не накладывая никаких ограничений на значение  $k$ . Следовательно, процессы перехода на виртуальный уровень, находящийся выше порога ионизации атома, не являются запрещенными.

Исследованы поляризационные характеристики гармоник высокого порядка, генерируемые как в одночастотных эллиптически поляризованных, так и двухчастотных лазерных полях, образованных первой и второй гармониками Ti:Sa лазера при различных поляризациях компонент поля: в линейно поляризованных полях, направления поляризации которых составляют ненулевой угол, в эллиптически поляризованных полях при сонаправленном вращении векторов поляризации компонент поля, а также при противоположнонаправленном вращении векторов компонент поля. Расчеты

поляризаационных характеристик поля проводились также для случая скрещенных полей, когда направления распространения линейно-поляризованных компонент полей составляют ненулевой угол. Показано, что во всех описанных выше случаях эллиптичность гармоник высокого порядка, генерируемых в интенсивных лазерных полях, отлична от нуля. Так, например, расчеты характеристик генерируемых атомом неона гармоник (интенсивность, эллиптичность, угол наклона эллипса к оси, совпадающей с направлением поляризации компоненты поля на основной частоте) в двухчастотных ортогонально поляризованных полях демонстрируют высокую эффективность и высокую степень эллиптичности генерируемого излучения (рис. 4). Представленные результаты численных расчетов (отмечены звездочками) хорошо согласуются с экспериментально измеренными зависимостями (представлены сплошными линиями, [A18]), демонстрируя не только качественное, но и количественное совпадение. Развитый непертурбативный подход позволил изучить механизм генерации эллиптически поляризованного излучения в двухчастотных ортогонально поляризованных полях. Он заключается в каскадных переходах между уровнями, начальное и конечное состояние которых отличается по проекции орбитального квантового числа на величину  $\Delta m = \pm 2$ . Эти же переходы являются причиной генерации слабых гармоник, генерируемых в двухчастотных полях, образованных циркулярно поляризованными первой и второй гармониками Ti:Sa лазера, и запрещенных по закону сохранения углового момента, но наблюдаемых в эксперименте [14].

Исследован вклад динамики населенностей уровней дискретного спектра атома в поляризаационные характеристики генерируемых гармоник, показано, что динамика населенности возбужденных уровней атома оказывает существенное влияние на величину эллиптичности и эффективность генерации гармоник высокого порядка.

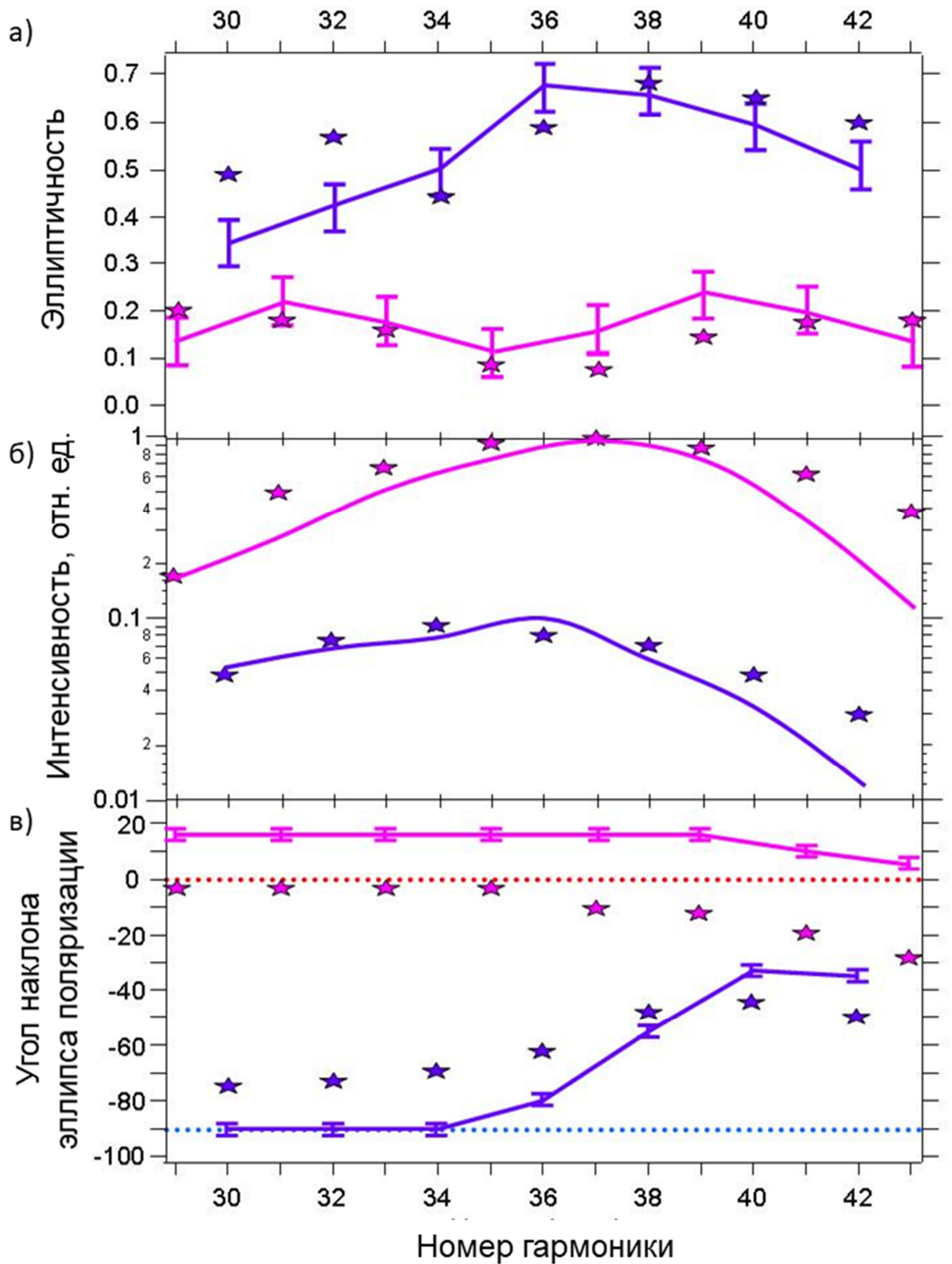


Рис. 4. Измеренные (сплошные линии [A18]) и рассчитанные (звездочки) значения эллиптичности (а), интенсивности (б) и угла наклона эллипса поляризации (в) в зависимости от порядков гармоник: нечетного (розовый) и четного (фиолетовый), пунктирными линиями обозначены оси поляризации  $\omega$  (красный) и  $2\omega$  (синий). Расчеты проводились для атома неона и следующих параметров поля  $I_\omega = 1,5 \cdot 10^{14} \text{ Вт см}^{-2}$ ,  $I_{2\omega} = 1,3 \cdot 10^{13} \text{ Вт см}^{-2}$ ,  $\Delta t = 14 \text{ фс}$  и  $\Delta\varphi = \pi/2$ .



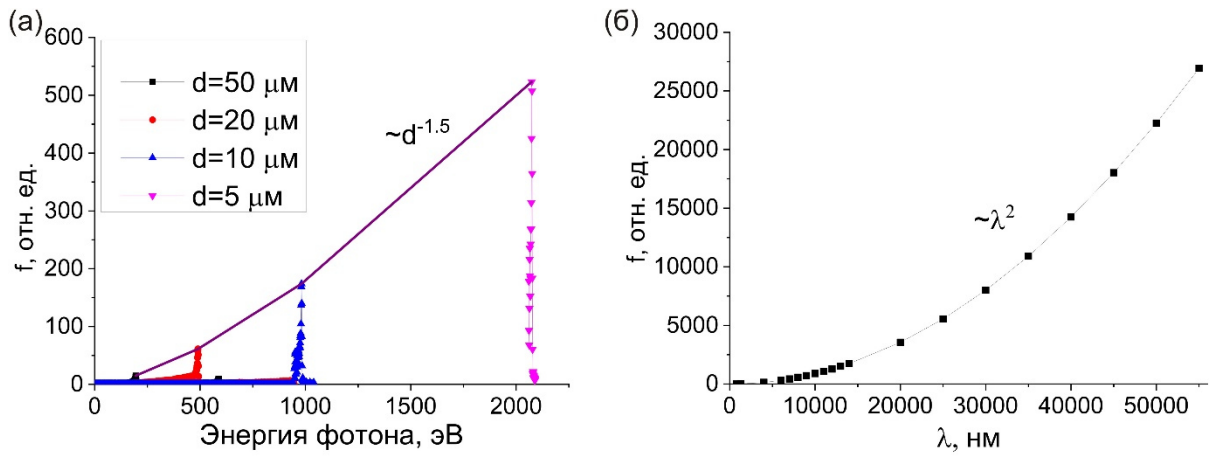


Рис. 5 (а) Распределение эффективности усиления гармоник по спектру, вычисленное для нескольких значений ширины аргоновых газовых струй  $50 \mu\text{м}$  (черная кривая с квадратами),  $20 \mu\text{м}$  (красная кривая с кружками),  $10 \mu\text{м}$  (синяя кривая с треугольниками) и  $5 \mu\text{м}$  (розовая кривая с перевернутыми треугольниками). Расчеты проводились для двухчастотного лазерного поля, образованного первой ( $I_{\omega} \sim 10^{14} \text{ Вт см}^{-2}$ ) и второй ( $I_{2\omega} \sim 10^{13} \text{ Вт см}^{-2}$ ) гармониками Ti:Sa лазера длительности  $30 \text{ фс}$  и для давления  $p=230 \text{ мбар}$ . (б) Зависимость эффективности усиления гармоники с энергией фотона  $\sim 196 \text{ эВ}$  от длины волны. Расчеты проводились для двухчастотного лазерного поля, образованного первой ( $I_{\omega} \sim 10^{14} \text{ Вт см}^{-2}$ ) и второй ( $I_{2\omega} \sim 10^{13} \text{ Вт см}^{-2}$ ) гармониками лазера, длительности импульсов соответствовали 12 осцилляциям поля на основной частоте лазера, при фиксированном значении ширины аргоновых газовых струй  $d=50 \mu\text{м}$  и давления в них  $p=230 \text{ мбар}$ .

С использованием интерференционной модели исследованы эффекты фазового и квази-фазового согласования [15] гармоник высокого порядка, генерируемых в газовых (плазменных) средах, представляющих собой как кювету с газом, так и набор газовых струй, расположенных друг за другом вдоль оси распространения лазерного поля, взаимодействующих с двухчастотными лазерными полями. На основании численных расчетов предложены простые соотношения, связывающие макропараметры среды и номера гармоник, которые генерируются наиболее эффективно:

- в протяженных газовых средах:  $l \cdot H \cdot p_{opt} = Const$ , где  $l$  - длина среды,  $H$  - номер гармоники,  $p_{opt}$  - значение давления, при котором эффективность генерации гармоники  $H$  максимальна;

- в газовых средах, представляющих собой набор газовых струй ширины  $d$ , разделенных вакуумными промежутками такой же длины:  $H \cdot d = Const$ ,  $H \cdot p_{optQPM} / \lambda = Const$ ,  $d \cdot p_{optQPM} = Const$ , где  $p_{optQPM}$  - значение давления, при котором эффективность генерации гармоники  $H$  максимальна.

Также исследована эффективность квази-фазового усиления гармоник высокого порядка при вариации параметров взаимодействия, в первую очередь ширины аргоновых газовых струй (рис. 5 а) и длины волны лазерного источника (рис. 5 б). Видно, что уменьшение ширины газовых струй не только приводит к смещению области усиленных гармоник в сторону более коротковолнового излучения, но и к возрастанию эффективности усиления излучения (относительно отклика одиночного атома) в таких средах ( $f$ ). Кроме того, увеличение длины волны лазерного источника приводит к квадратичному росту эффективности усиления излучения (рис. 5б). Эффекты квази-фазового согласования исследовались в плазменных, а также в многокомпонентных средах, состоящих из смеси газов и газо-кластерных смесей. Результаты численных исследований, проведенных для параметров, достигаемых в конкретных экспериментах, демонстрируют хорошее согласие между численными расчетами и экспериментальными измерениями.

**Глава 4** «Генерация терагерцового излучения одиночными атомами и протяженными средами, взаимодействующими с последовательностью лазерных импульсов» посвящена обсуждению особенностей откликов одиночных атомов и газовых сред в ТГц диапазоне частот. Обсуждается механизм генерации ТГц излучения в случае, когда динамика населенности квазиуровней непрерывного спектра атома не учитывалась в расчетах отклика (при доионизационном режиме взаимодействия). Показано, что матричные элементы оператора  $\hat{V}$ , вычисленные для переходов между уровнями дискретного спектра атома, в случае взаимодействия с двухчастотными лазерными полями, образованными первой и второй гармониками, содержат отклик на «нулевой» частоте. Следовательно, природой генерации ТГц излучения являются внутриатомные нелинейности. Обобщение анализа матричных элементов оператора  $\hat{V}$  на случай произвольных частот компонент двухчастотного поля позволяет определить, при каких соотношениях частот компонент двухчастотного поля в фотоэмиссионном спектре отклика атома будет наблюдаться ТГц сигнал. Показано, что ТГц сигнал присутствует при

воздействии двухчастотного поля, образованного нечетной и четной гармониками лазерного поля ( $\omega_1 = 2q\omega_0$ ,  $\omega_2 = (2p+1)\omega_0$ ,  $q, p \in N$ ) или только четными гармониками поля ( $\omega_1 = 2q\omega_0$ ,  $\omega_2 = 2p\omega_0$ ,  $q, p \in N$ ). Вместе с тем, использование только нечетных гармоник поля ( $\omega_1 = (2q+1)\omega_0$ ,  $\omega_2 = (2p+1)\omega_0$ ,  $q, p \in N$ ), а также одночастотная накачка, не приводят к генерации ТГц части фотоэмиссионного спектра отклика одиночного атома.

Предложен эффективный управляющий параметр задачи, который позволяет оптимизировать не только эффективность генерации ТГц излучения и форму его спектра, но и величину эллиптичности генерируемого излучения. Таким управляющим параметром является угол между направлениями поляризации линейно поляризованных компонент двухчастотного лазерного поля, образованного первой и второй гармониками лазера ( $\theta$ ). Как уже отмечалось, этот управляющий параметр задачи не меняет энергию лазерного поля, но перераспределяет ее в плоскости поляризации. На рис. 6 а представлены ТГц части фотоэмиссионных спектров отклика атома аргона, вычисленные при различных значениях  $\theta$ . Хорошо видно, что спектры имеют пиковую структуру (с пиками около 10 ТГц), они более или менее симметричны относительно  $\theta = \pi/2$ , а напряженность поля максимальна, когда угол  $\theta$  близок к  $0$  или  $\pi$  (при данных параметрах поля).

На рис. 6 б представлена зависимость эллиптичности для различных спектральных компонент от  $\theta$ . Хорошо видно, что низкочастотная часть спектров (<20 ТГц) линейно поляризована при всех возможных значениях  $\theta$ . Ранее это было продемонстрировано экспериментально [16], настоящие же результаты являются первой квантово-механической их верификацией. Рис. 6 также демонстрирует, что в области спектров >20 ТГц присутствуют участки повышенной эллиптичности (вплоть до циркулярной), максимальное значение эллиптичности и области участков уменьшаются по мере увеличения ТГц частоты. Показано, что природа генерации эллиптически поляризованного высокочастотного ТГц излучения в линейно поляризованных двухчастотных

лазерных полях, направления поляризации компонент которых составляют угол  $\theta$ , так же как и генерации эллиптически поляризованных гармоник высокого порядка, связана с вкладами каскадных переходов между уровнями с  $\Delta m = \pm 2$ .

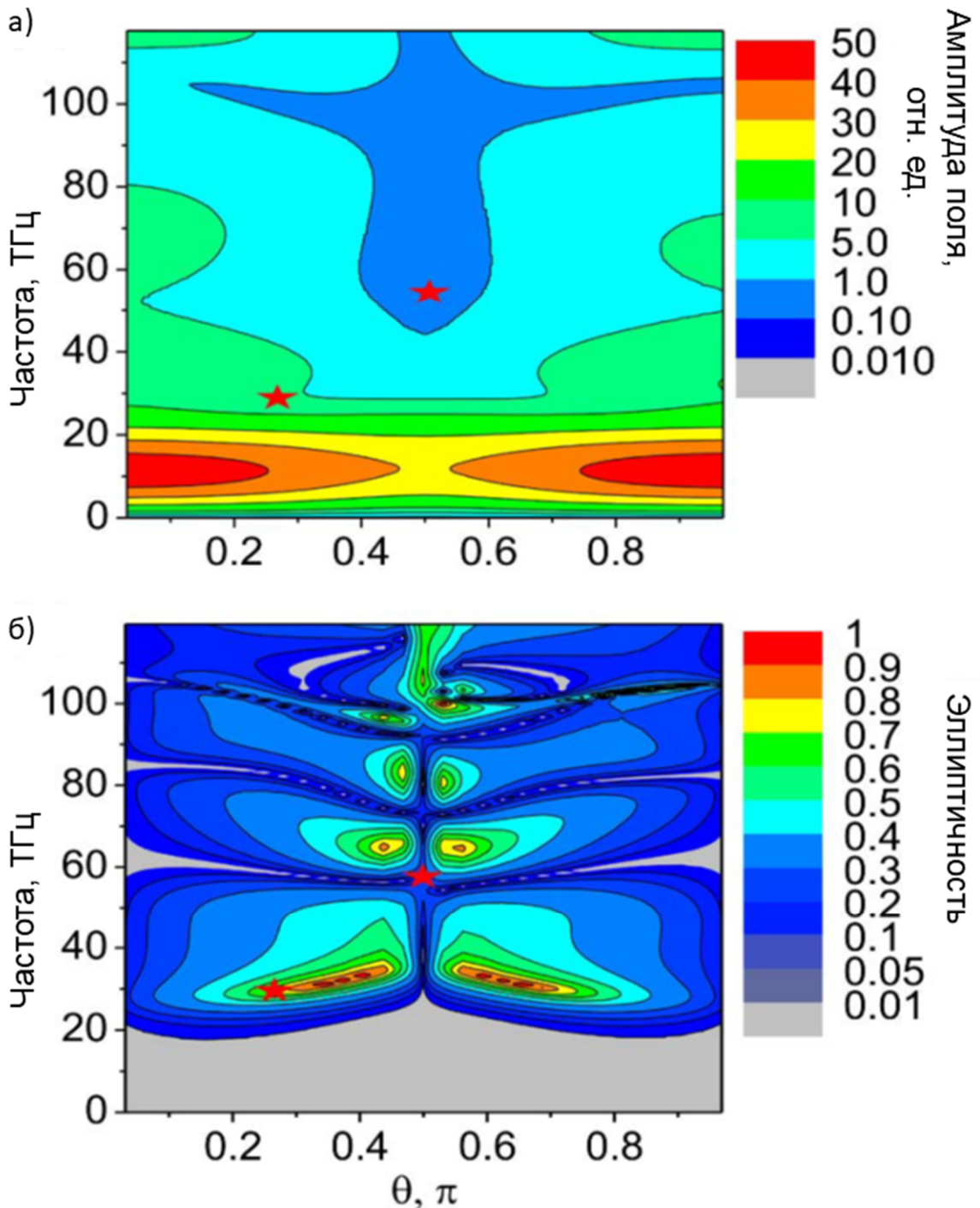


Рис. 6 Карты напряженности (а) и эллиптичности (б) ТГц поля, генерируемого одиночным атомом аргона, полученные при различных значениях  $\theta$ . Параметры лазерного поля, которые использовались в расчетах, имеют следующий вид:  $\mu_{01} = 0.1, \mu_{02} = 0.0147, \tau_1 = \tau_2 = 30$  фс,  $t_{02} - t_{01} = 0, \varphi_2 - \varphi_1 = \pi/2$  (разность фаз компонент поля). Расчет проводился для излучения Ti:Sa лазера.

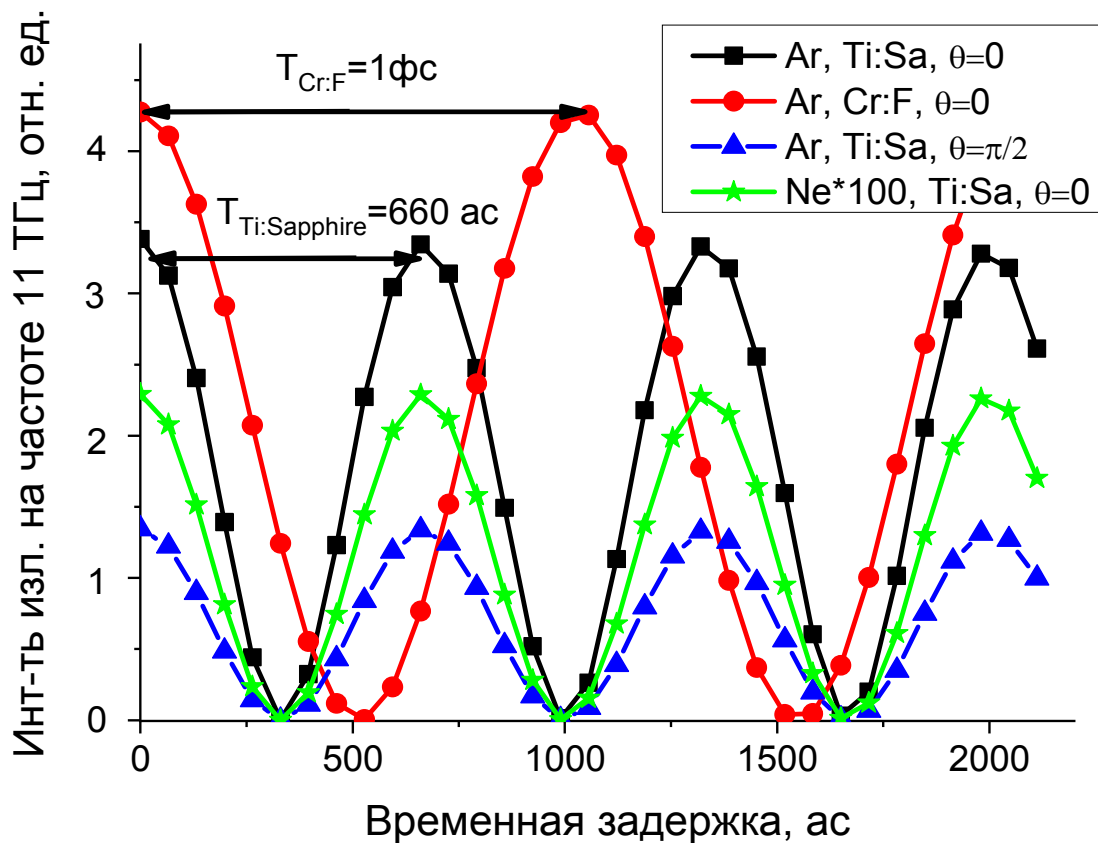


Рис. 7 Интенсивность излучения на частоте 11 ТГц в зависимости от времени задержки между импульсами, рассчитанная для: атома аргона, взаимодействующего с двухчастотным лазерным полем, образованным линейно поляризованными первой и второй гармониками Ti: Sa лазера, в случае коллинеарной (черная кривая с квадратами) и ортогональной (синяя кривая с треугольниками) поляризации полей; атома неона, взаимодействующего с двухчастотным лазерным полем, образованным линейно поляризованными первой и второй гармониками Ti: Sa лазера в случае коллинеарной поляризации полей (зеленая кривая со звездами); атома аргона, взаимодействующего с двухчастотным лазерным полем, образованным линейно поляризованными первой и второй гармониками Cr:F лазера в случае коллинеарной поляризации полей (красная кривая с кружками). Остальные параметры двухчастотного поля определены следующим образом:  $\mu_{01} = 0.1, \mu_{02} = 0.0147, \tau_1 = \tau_2 = 30 \text{ фс}, \varphi_2 - \varphi_1 = \pi/2$ .

Исследовано влияние вариации временной задержки между импульсами, еще одного параметра двухчастотного поля, изменение которого не изменяет энергию лазерного поля, но перераспределяет ее во времени, на параметры ТГц излучения. Результаты, представленные на рис. 7, показывают, что эффективность генерации ТГц излучения зависит от временной задержки между импульсами по гармоническому закону (при небольших изменениях величины временной задержки между импульсами). Показано, что период этой зависимости не зависит ни от угла между поляризациями компонент двухчастотного поля, ни от энергетической структуры атома (исследования

проводились для атома аргона и неона), но зависит от длины волны лазерного источника, период осцилляций равен половине периода осцилляций излучения на удвоенной частоте – временному интервалу, при котором временная зависимость двухчастотного поля повторяется. Полученный в расчетах гармонический закон наблюдается в экспериментах [17].

С использованием интерференционной модели газовой среды рассчитан ее отклик на воздействие двухчастотного лазерного поля, образованного линейно поляризованными первой и второй гармониками Ti:Sa лазера. Показано, что частотно-угловой спектр генерируемого ТГц излучения представляет собой набор вложенных конусов, причем как в направлении распространения лазерного излучения, так и в обратном направлении. Распределение эллиптичности генерируемого излучения имеет более сложную структуру, тем не менее, расчет степени поляризации и степени эллиптичности доказал, что генерируемое излучение обладает как когерентными свойствами, так и эллиптической поляризацией. Предложено три способа управления поляризационными характеристиками генерируемого излучения: за счет использования диафрагмы которая пропускает центральную часть пучка, и маски, которая пропускает периферийные части пучка, за счет управления начальной фазой между компонентами двухчастотного поля, за счет изменения длины среды и ширины лазерного пучка. Указанные способы демонстрируют условия, при которых можно добиться генерации циркулярно поляризованного ТГц излучения.

**Глава 5** «Генерация когерентного излучения, обладающего трехмерным распределением поляризации в пространстве» посвящена исследованию генерации когерентного излучения в случае, когда направление углового момента атома не соответствует плоскости поляризации лазерного поля. Наличие ненулевых углов, связывающих конфигурационное пространство, ассоциированное с плоскостью поляризации и направлением распространения лазерного поля, и конфигурационное пространство, ассоциированное с направлением углового момента атома (углов Эйлера), приводит к генерации

продольной компоненты поля, которая проявляется и в ближней, и в дальней зонах. Обоснована причина появления продольной компоненты поля. Пространственное распределение электронной плотности  $\rho(\vec{r}, t) = e|\psi(\vec{r}, t)|^2$  и плотность атомного тока  $\vec{j}(\vec{r}, t)$  связаны уравнением непрерывности  $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \vec{j} = 0$ . В отсутствие поля лазерной волны распределение электронной плотности в атоме является цилиндрически симметричным относительно оси  $z$  конфигурационного пространства атома, совпадающей с направлением квантово-механического среднего углового момента  $\langle \vec{l} \rangle$ . При воздействии лазерного поля пространственное распределение электронной плотности изменяется. С ростом напряженности лазерного поля все более выделенным становится направление поляризации лазерной волны. Например, сферически симметричное распределение электронной плотности в случае  $s$  состояний при воздействии внешнего поля становится эллипсоидальным, большая ось которого совпадает с направлением вектора поляризации внешнего поля. В свою очередь радиус пространственного распределения в перпендикулярной плоскости уменьшается. Это и является механизмом появления продольных компонент атомного тока, и, следовательно, поля излучения в дальней зоне.

Показано, что углы Эйлера являются дополнительными управляющими параметрами, позволяющими оптимизировать, в частности, величину продольной компоненты поля (проекция  $j_3$  на рис. 8). На рис. 8 представлены зависимости продольных  $j_3$  и поперечных компонент полей  $j_1$ ,  $j_2$ , вычисленных при вариации углов Эйлера (рис. 8 а-е). Видно, что продольная проекция атомного тока достигает максимума в следующей области углов:  $\theta_0$  вблизи  $\pi/4$  и  $3\pi/4$ ,  $\psi_e$  вблизи  $\pi/2$  (рис.5.3в). В указанной области углов Эйлера поперечные компоненты атомного тока  $j_1$  и  $j_2$  достигают минимума. Также видно, что продольная компонента тока может быть соразмерной с одной из поперечных компонент (рис. 8 ж), а спектр продольной компоненты поля содержит как четные, так и нечетные гармоники, а также ТГц компоненту.



Проведенные исследования позволяют предложить методы генерации когерентного излучения со сложным, трехмерным, распределением поляризации.

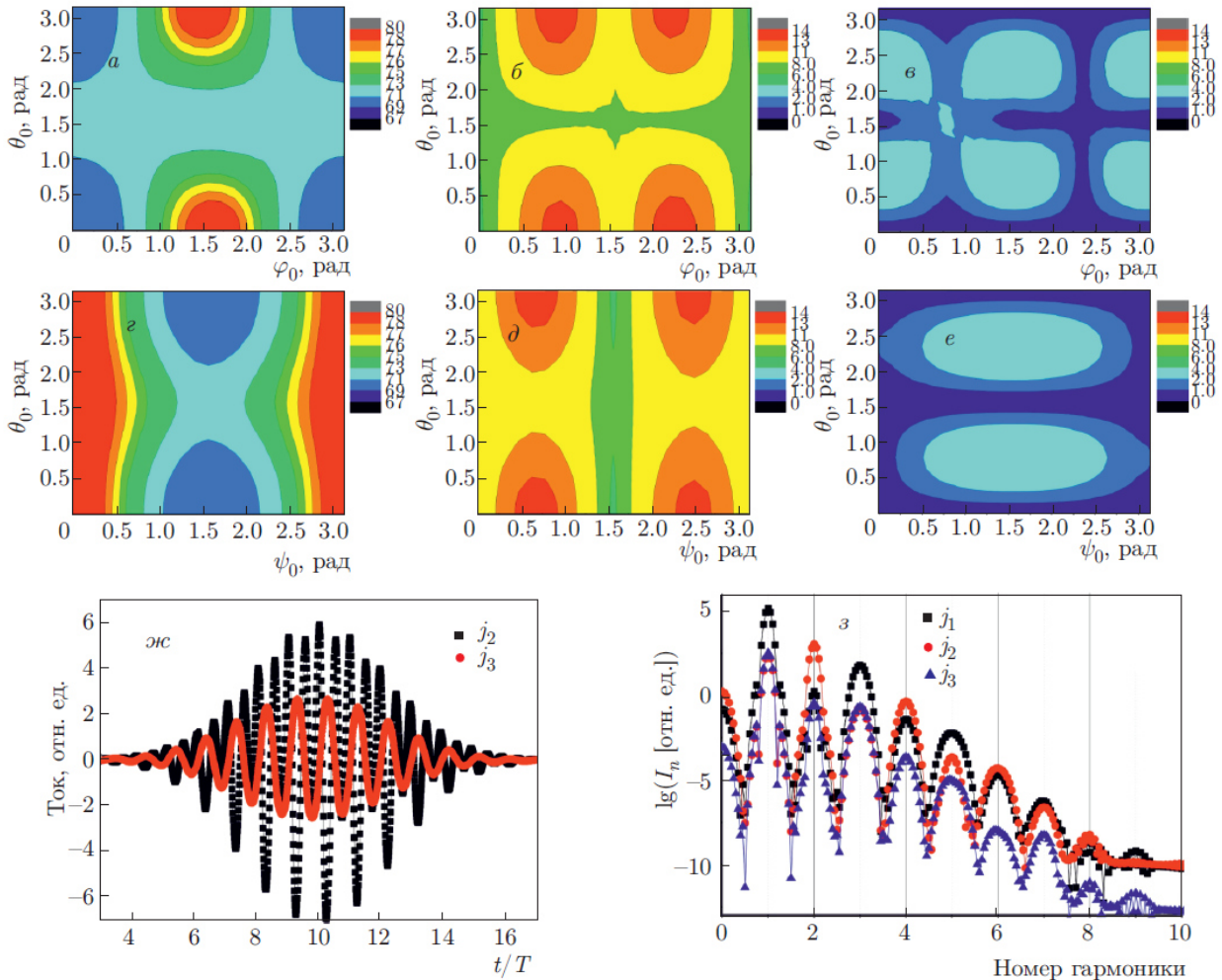


Рис.8. Проекция атомного тока  $j_1$  (а),  $j_2$  (б),  $j_3$  (в) как функции  $\theta_e$ ,  $\varphi_e$  для значения  $\psi_e = \pi/2$ ,  $j_1$  (г),  $j_2$  (д),  $j_3$  (е) как функции  $\theta_0$ ,  $\psi_0$  для значения  $\varphi_0 = 0$ , динамика токов  $j_2$  и  $j_3$  (ж); спектр проекций атомного тока, рассчитанных для Ne и  $\psi_0 = 0.6\pi$ ,  $\theta_0 = 0.3\pi$ ,  $\varphi_0 = 0$  (з). Параметры двухчастотного поля заданы следующим образом  $\mu_{01} = 0.1$ ,  $\mu_{02} = 0.01$ ,  $\Delta t = 0.62 \text{ фс}$ .

Теоретически обоснован новый метод нелинейного лазерного возбуждения ядер. Он заключается в генерации резонансного к внутриядерному переходу излучения валентными электронами, взаимодействующими с интенсивными лазерными полями. В этом случае поле, наводимое электронами в точке нахождения родительского ядра, может достигать околоатомных значений, в первую очередь, за счет небольшого



(порядка боровского радиуса) расстояния между валентными электронами и ядром. На примере уникального низкоэнергетического изомерного состояния в ядре атома тория, энергия перехода из основного состояния которого близка к 5-ой гармонике Ti:Sa лазера ( $E_{is} = 8.28 \pm 0.17$  эВ [18]) были приведены оценки величины напряженности 5-ой гармоники Ti:Sa лазера, генерируемой валентными электронами атома тория, в точке нахождения ядра. Показано, что поле, генерируемое электронами, на 4-5 порядков больше поля, создаваемого электронами соседнего атома. Указанные рассуждения доказывают, что амплитуда поля, генерируемого валентными электронами, существенно больше, чем амплитуды полей, создаваемых внешними источниками в среде, содержащей атомы тория.

В **Заключении** сформулированы следующие основные результаты, полученные в диссертационной работе:

1. Разработан уникальный непертурбативный подход к описанию отклика одиночного атома на воздействие многокомпонентного произвольно поляризованного интенсивного лазерного поля. Подход позволяет описывать отклик одиночного атома в дорелятивистском приближении. Он учитывает все нелинейности, возникающие при таком взаимодействии, и позволяет рассчитывать отклик атома без привлечения дополнительной информации о характере взаимодействия.
2. Разработанный непертурбативный подход применен для исследования особенностей отклика одиночных атомов в многокомпонентных лазерных полях. Продемонстрировано насыщение частоты отсечки в околоатомных лазерных полях. Исследован вклад ансамбля атомов при расчете положения частоты отсечки. Показано, что спектр гармоник высокого порядка, рассчитанный для одиночного атома, оказывается шире спектра, рассчитанного для ансамбля атомов (при тех же значениях интенсивности лазерного поля). Вместе с тем, расчеты, проведенные для ансамбля атомов, находятся в количественном согласии с экспериментальными данными.

3. Предложен эффективный управляющий параметр двухчастотного лазерного поля, который не меняет его энергию, а перераспределяет ее в плоскости поляризации. Им является угол между направлениями поляризации линейно поляризованных компонент двухчастотного лазерного поля. Этот параметр поля является управляющим параметром как эффективности генерации гармоник высокого порядка и их поляризационных свойств, так и эффективности генерации, формы спектра и поляризационных свойств ТГц излучения. Показано, что вариация данного параметра позволяет оптимизировать характеристики генерируемого излучения с точки зрения повышения эффективности генерации и степени эллиптичности генерируемого излучения. Предсказанное теоретически существенное влияние указанного параметра на характеристики спектра гармоник высокого порядка было подтверждено экспериментально.
4. Теоретически обоснована генерация эллиптически поляризованных гармоник высокого порядка в двухчастотных ортогонально поляризованных лазерных полях, состоящих из линейно поляризованных первой и второй гармоник Ti:Sa лазера. Проведенные численные расчеты демонстрируют *количественное* согласие с экспериментом. Предложен и изучен механизм генерации такого излучения. Исследован вклад динамики населенностей уровней дискретного спектра атома в поляризационные характеристики генерируемых гармоник, показано, что динамика населенности возбужденных уровней атома оказывает существенное влияние на величину эллиптичности и эффективность генерации гармоник высокого порядка.
5. С использованием квантово-механических расчетов отклика одиночного атома доказано, что при взаимодействии с двухчастотными линейно поляризованными первой и второй гармониками Ti:Sa лазера, при любом значении угла между направлениями поляризации компонент

поля, низкочастотная часть генерируемого ТГц излучения линейно поляризована. Показано также, что в высокочастотных частях спектра присутствуют области с ненулевыми значениями эллиптичности генерируемого излучения.

6. Продемонстрирована генерация продольной компоненты излучения в дальней зоне как в ТГц спектральном диапазоне, так и в ультрафиолетовой области спектра гармоник, в случае, когда направление углового момента атома и направление поляризации лазерного поля составляют ненулевой угол. Показано, что спектр продольной компоненты представляет собой набор гармоник поля и зависит от состояния поляризации компонент двухчастотного поля. Предложены дополнительные управляющие параметры задачи – углы Эйлера, связывающие конфигурационное пространство, ассоциированное с лазерным полем, и конфигурационное пространство, ассоциированное с направлением углового момента атома, которые позволяют оптимизировать величину продольной компоненты и параметры трехмерного распределения поляризации генерируемого излучения, в целом.
7. Теоретически обоснован новый метод нелинейного лазерного возбуждения ядер. На примере генерации валентными электронами атома тория резонансной для его внутриядерного перехода 5-ой гармоники  $Ti:Sa$  лазера продемонстрировано достижение значительных амплитуд полей такого излучения в точке нахождения родительского ядра.
8. Предложена и разработана интерференционная модель отклика протяженных газовых сред, взаимодействующих с интенсивными лазерными полями. Модель была использована для исследования эффектов фазового и квази-фазового согласования в сплошных и пространственно модулированных средах. Экспериментально ориентированные расчеты эффектов фазового и квази-фазового

согласования гармоник высокого и низкого порядков, а также ТГц излучения в газах, плазменных средах, в том числе, состоящих из набора плазменных факелов, в газо-кластерных смесях и смесях различных газов продемонстрировали количественное или хорошее качественное согласование полученных результатов с результатами экспериментальных исследований.

9. Предсказан квадратичный рост эффективности генерации выделенных групп гармоник в средах, представляющих собой набор газовых струй, взаимодействующих с двухчастотными лазерными полями, образованными первой и второй гармониками лазерного источника, при возрастании его длины волны. Показано, что при уменьшении ширины газовых струй положение пика усиленных гармоник смещается в коротковолновую область спектра, амплитуда пика возрастает  $\sim d^{-1.5}$ . На основании теоретических расчетов предложены простые соотношения между макропараметрами газовой среды и энергией фотонов генерируемого излучения, позволяющие управлять как фазовыми, так и квази-фазовыми условиями согласования для увеличения эффективности генерации выделенных гармоник. Указанные особенности возникают за счет эффектов квази-фазового согласования.

## Список литературы

1. *Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин А.С.* Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. – М: Наука. 1988. – С. 312.
2. *Беленов Э.М., Назаркин А.В.* О некоторых решениях уравнений нелинейной оптики без приближения медленно меняющихся амплитуд и фаз // Письма в ЖЭТФ. – 1990. – Т.51. – Вып. 5. – С. 252-255.
3. *Маймистов А.И.* Некоторые модели распространения предельно коротких электромагнитных импульсов в нелинейной среде // Квантовая электроника. – 2000. – Т. 30. – Вып. 4. – С. 287–304.
4. *Козлов С.А.* О классической теории дисперсии высокоинтенсивного света // Оптика и спектроскопия. – 1995. –Т.79. – № 2. – С. 290-292.
5. *Сазонов С.В., Соболевский А.Ф.* Резонанс Захарова-Бенни как механизм генерации предельно коротких импульсов в одноосных кристаллах // Письма в ЖЭТФ. – 2002. – Т.75. – С.746.
6. *Кучиев М.Ю.* Атомная антенна // Письма в ЖЭТФ. – 1987. – Т.45. –Вып. 7. – С. 319-321.
7. *Corkum P. B.* Plasma perspective on strong-field multiphoton ionization // Physical Review Letters. – 1993. – V. 71. – P. 1994–1997.
8. *Платоненко В.Т.* Интерференция электронных траекторий и генерация высоких гармоник света в кулоновской системе // Квантовая электроника. – 2001. – Т. 31. – №1. – С. 55-60.
9. *Андреев А.В.* Взаимодействие атома со сверхсильными полями // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1999. – Т.116. – №3(9). – С.793–806.
10. *Lambert G., Hara T., Garzella D., Tanikawa T., Labat M., Carre B., Kitamura H., Shintake T., Bougeard M., Inoue S., Tanaka Y., Salieres P., Merdji H., Chubar O., Gobert O., Tahara K., Couprie M.-E.* Injection of harmonics generated in gas in a free-electron laser providing intense and coherent extreme-ultraviolet light // Nature Physics. – 2008. – V. 4. – P. 296–300.

11. *Стрелков В.В., Платоненко В.Т., Стержантов А.Ф., Рябикин М.Ю.* Аттосекундные электромагнитные импульсы: генерация, изменение и применение. Генерация высоких гармоник интенсивного лазерного излучения для получения аттосекундных импульсов // *Успехи физически наук.* – 2016. – Т. 86. – №5. – С. 449-470.
12. *Borodin A.V., Panov N.A., Kosareva O.G., Andreeva V.A., Esaulkov M.N., Makarov V.A., Shkurinov A.P., Chin S.L., Zhang X.-C.* Transformation of terahertz spectra emitted from dual-frequency femtosecond pulse interaction in gases // *Optics Letters.* – 2013. – V. 38. – P. 1906-1908.
13. *Zhang D., Lü Z., Meng C., Du X., Zhou Z., Zhao Z., Yuan J.* Synchronizing Terahertz Wave Generation with Attosecond Bursts // *Physics Review Letters.* – 2012. – V. 109. – P. 243002.
14. *Fleischer A., Kfir O., Diskin T., Sidorenko P., Cohen O.* Spin angular momentum and tunable polarization in high-harmonic generation // *Nature Photonics.* – 2014. – V. 8. – P. 543–549.
15. *Hareli L., Shoulga G., Bahabad A.* Phase matching and quasi-phase matching of high-order harmonic generation – a tutorial // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* – 2020. – V. 53. – P. 233001.
16. *Dai J., Karpowicz N., Zhang X.C.* Coherent polarization control of terahertz waves generated from two-color laser-induced gas plasma // *Physical Review Letters.* – 2009. – V. 103. – P. 023001.
17. *Kim K.-Y., Glownia J.H., Taylor A.J., Rodriguez G.* Terahertz emission from ultrafast ionizing air in symmetry-broken laser fields // *Optics Express.* – 2007. – V. 15. – P. 4577.
18. *Wense L., Zhang C.* Concepts for direct frequency-comb spectroscopy of 229mTh and an internal-conversion-based solid-state nuclear clock // *European Physical Journal D.* – 2020. – V.74. –P. 146.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

*Научные статьи, опубликованные в журналах Scopus, WoS, RSCI, а также в Перечне изданий МГУ.*

- A1. *Stremoukhov S.Yu.* Quasi-Phase Matching of High Harmonics Driven by Mid-IR: Towards the Efficiency Drop Compensation // Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics. – 2022. – V. 39. – Iss. 4 – p.1203-1208. IF=2.106 (Вклад автора 1).
- A2. *Andreev A.V., Konovko A.A., Stremoukhov S.Yu.* High harmonics generation in gases near the gratings: towards the spectrum enhancement and enrichment // Laser Physics Letters. – 2022. – V. 19 – p. 045401. IF=2.016 (Вклад автора 0.5).
- A3. *Андреев А.В., Шутова О.А., Стремоухов С.Ю.* Генерация гармоник в оптических вихревых полях // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2021. – №5. – С. 79–90. IF= 0.672 (Вклад автора 0.3).
- A4. *Ganeev R.A., Boltaev G.S., Stremoukhov S.Y., Kim V.V., Andreev A.V., Alnaser A.S.* High-order harmonic generation during different overlaps of two-colored pulses in laser-produced plasmas and gases // European Physical Journal D. – 2020. – V. 74. – p.199. IF=1.425 (Вклад автора 0.3).
- A5. *Andreev A.V., Stremoukhov S.Yu., Shoutova O.A.* Spectrum of high harmonics generated by two-color circularly polarized laser field in atomic media// Laser Physics. – 2020. – V. 30. – P. 105402. IF=1.366 (Вклад автора 0.4).
- A6. *Stremoukhov S.Yu., Yakovlev A.A., Andreev A.V.* High harmonic generation in two-color elliptical laser fields of different helicity // Laser Physics Letters. – 2020. – V. 17. – P. 085405. IF=2.016 (Вклад автора 0.7).
- A7. *Migal E.A., Stremoukhov S.Yu., Potemkin F.V.* Ionization-free resonantly enhanced low-order harmonic generation in a dense gas mixture by a mid-IR laser field // Physical Review A. – 2020. – V. 101. – P. 021401(R). IF=3.14 (Вклад автора 0.1).
- A8. *Andreev A.V., Angeluts A.A., Balakin A.V., Kotelnikov I.A., Minaev N.V., Solyankin P.M., Stremoukhov S.Yu., Zhu Y., Shkurinov A.P.* THz Generation in

Laser-Induced Breakdown in Carbon Dioxide at Different Levels of Gas Pressure // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2020. – V. 10. P. 85-92. IF=3.274 (Вклад автора 0.2).

A9. *Stremoukhov S.Yu., Andreev A.V.* Discrete excited states influence on the harmonics spectrum generated in two-colour laser fields // Laser Physics Letters. 2019. – V. 16. – P. 125402. IF=2.016 (Вклад автора 0.9).

A10. *Ganeev R.A., Stremoukhov S.Y., Andreev A.V., Alnaser A.S.* Application of Quasi-Phase Matching Concept for Enhancement of High-Order Harmonics of Ultrashort Laser Pulses in Plasmas // Applied Science. – 2019. V. 9. – P. 1701. IF=2.679 (Вклад автора 0.4).

A11. *Andreev A.V., Savel'ev A.B., Stremoukhov S.Yu., Shoutova O.A.* Nuclear isomer excitation in  $^{229}\text{Th}$  atoms by superintense laser fields // Physical Review A. – 2019. – V. 99. – P. 013422. IF=3.14 (Вклад автора 0.4).

A12. *Андреев А.В., Стремоухов С.Ю., Шутова О.А.* Продольный ток, индуцируемый плоской электромагнитной волной в одиночном атоме // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2018. – Т. 154. – Вып.1(7). – С. 31–43. IF=1.129 (Вклад автора 0.4).

A13. *Mahieu B., Stremoukhov S., Gauthier D., Spezzani C., Alves C., Vodungbo B., Zeitoun P., Malka V., De Ninno G., G. Lambert G.* Control of ellipticity in high-order harmonic generation driven by two linearly polarized fields // Physical Review A. – 2018. – V. 97. – P. 043857. IF=3.14 (Вклад автора 0.3).

A14. *Stremoukhov S.Yu., 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 Physics. – 2018. – V. 28. – P. 035403. IF=1.366 (Вклад автора 0.8).

A15. *Andreev A., Stremoukhov S., Shoutova O.* Longitudinal current in single-atom interacting with laser field // Europhysics Letters. – 2017. – V. 120. – P. 14003. IF=1.947 (Вклад автора 0.4).

A16. *Stremoukhov S., Andreev A.* Quantum-mechanical fingerprints in generation of elliptical terahertz radiation by extended media interacting with two-color laser



field // Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics. – 2017. – V. 34(2). – Pp. 232-237. IF=2.106 (Вклад автора 0.9).

A17. *Andreev A.V., Stremoukhov S.Yu., Shoutova O.A.* Population dynamics of ground state sublevels: influence on polarization properties of high harmonics // Journal of Russian Laser Research – 2016. – V.37. – №5. – pp. 484-493. IF=0.607 (Вклад автора 0.2).

A18. *Stremoukhov S., Andreev A., Vodungbo B., Salières P., Mahieu B., Lambert G.* Origin of ellipticity of high-order harmonics generated by a two-color laser field in the cross-polarized configuration // Physical Review A – 2016. – V.94. – p. 013855. IF=3.14 (Вклад автора 0.6).

A19. *Стремоухов С.Ю., Андреев А.В., Шутова О.А.* Генерация гармоник высокого порядка: квантово-механическое описание и эффекты распространения // Известия Российской академии наук. Серия физическая – 2016 – Т. 80. – № 4. – с. 500-504. IF=0.665 (Вклад автора 0.6).

A20. *Lambert G., Vodungbo B., Gautier J., Mahieu B., Malka V., Sebban S., Zeitoun P., Luning J., Perron J., Andreev A., Stremoukhov S., Ardana-Lamas F., Dax A., Hauri C.P., Sardinha A., Fajardo M.* Towards enabling femtosecond helicity-dependant spectroscopy with high-harmonic sources // Nature Communications – 2015. – V.6. – p. 6167. IF=14.919 (Вклад автора 0.1).

A21. *Stremoukhov S.Yu., Andreev A. V.* Spatial variations of the intensity of THz radiation emitted by extended media in two-color laser fields // Laser Physics Letters – 2015. – V.12. – p. 015402. IF=2.016 (Вклад автора 0.8).

A22. *Andreev A.V., Stremoukhov S.Yu., Shoutova O.A.* High-order optical harmonic generation in ionization-free regime: origin of the process // Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics – 2013. – V.30 (7). – pp. 1794-1803. IF=2.106 (Вклад автора 0.6).

A23. *Andreev A.V., Stremoukhov S.Yu.* Terahertz-radiation generation in the ionization-free regime of light-atom interaction // Physical Review A – 2013. – V.87. – p. 053416. IF=3.14 (Вклад автора 0.8).

- A24. *Andreev A.V., Ganeev R.A., Kuroda H., Stremoukhov S.Yu., Shoutova O.A.* High-order harmonic cut-off frequency in atomic silver irradiated by femtosecond laser pulses: theory and experiment // *European Physical Journal D* – 2013 – V.67. – 22. IF=1.425 (Вклад автора 0.4).
- A25. *Andreev A.V., Stremoukhov S.Yu., Shoutova O.A.* Light-induced anisotropy of atomic response: prospects for emission spectrum control // *European Physical Journal D* – 2012. – V.66 – p.16. IF=1.425 (Вклад автора 0.5).
- A26. *Андреев А.В., Стремоухов С.Ю., Шутова О.А.* Управление откликом атома в многокомпонентных лазерных полях // *Оптика и спектроскопия* – 2012. – Т. 112. – № 3. – с. 454-464. IF=0.891 (Вклад автора 0.5).
- A27. *Андреев А.В., Стремоухов С.Ю., Шутова О.А.* Отклик атома, взаимодействующего с произвольно поляризованным электромагнитным полем // *Известия вузов. Радиофизика* – 2011. – Т.54. – №2. с. 139-158. IF=0.77 (Вклад автора 0.5).
- A28. *Андреев А.В., Стремоухов С.Ю., Шутова О.А.* Нелинейно-оптический отклик атома в поле фемтосекундных лазерных импульсов околоатомной напряженности // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики* – 2011. – Т. 93 – Вып. 8. – с. 522-533. IF=1.532 (Вклад автора 0.4).
- A29. *Андреев А.В., Стремоухов С.Ю., Шутова О.А.* Ионизация многоуровневого атома ультракороткими лазерными импульсами // *Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики* – 2010. – Т. 138. – Вып. 6. – с. 1060. IF=1,129 (Вклад автора 0.4).
- A30. *Andreev A.V., Stremoukhov S.Yu., Shoutova O.A.* Atom in electromagnetic field of near-atomic strength // *Journal of Russian Laser Research* – 2008. – V. 29. – № 3. – pp. 203-218. IF=0.607 (Вклад автора 0.5).
- A31. *Andreev A.V., Shoutova O.A., Stremoukhov S. Yu.* Ionization of a single hydrogen-like atom by laser pulses of near-atomic strength” // *Laser Physics* – 2007. – V.17(4). – pp. 496-507. IF=1.366 (Вклад автора 0.2).

*Монографии, учебные пособия*

A32. *Andreev A.V., Stremoukhov S.Yu., Shoutova O.A.* Interaction of Atom With Laser Pulses of Intra-Atomic Field Strength// Femtosecond-Scale Optics, – InTech, 2011 –pp. 247-284. (Вклад автора 0.4).

A33. *Шутова О.А., Стремоухов С.Ю., Андреев А.В.* Базовые принципы генерации гармоник фемтосекундного лазерного излучения одиночным атомом – М.: Физический факультет МГУ, 2019. – 15с. (Вклад автора 0.4).

*Иные публикации*

A34. *Андреев А.В., Стремоухов С.Ю., Шутова О.А.* Поляризационное управление спектром нелинейно оптического отклика атома // Электронный научный журнал "Исследовано в России" – 2011. – Т.14. – с. 321-358. (Вклад автора 0.5).

A35. *Андреев А.В., Стремоухов С.Ю., Шутова О.А.* О возможности поляризационного управления спектром нелинейно оптического отклика атома // Физическое образование в ВУЗах – 2011. – Т.17. – №1. – с. 96-101. (Вклад автора 0.6).

A36. *Андреев А.В., Стремоухов С.Ю., Шутова О.А.* Вероятность ионизации многоуровневого атома фемтосекундным лазерным импульсом // Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки – 2010. – Т.152. – Кн. 2. – с. 10-19. (Вклад автора 0.6).

A37. *Андреев А.В., Стремоухов С.Ю., Шутова О.А.* Правила отбора для одиночного атома в поле электромагнитной волны околоатомной напряженности // Теоретическая физика – 2008. – № 9. – с.36-53. (Вклад автора 0.5).

A38. *Zhvaniya I.A., Dzhidzhoev M.S., Semenov T.A., Savel'ev A.B., Stremoukhov S.Yu., Usmanov T., Gordienko V.M.* Comparative study of low-order harmonic generation in gas and cluster media at Ti:Sa femtosecond laser intensity up to 2000 TW/cm<sup>2</sup> // Journal of Physics: Conference Series – 2020. – V.1692. – p. 012017. (Вклад автора 0.2).

- A39. *Stremoukhov S.Yu., Ganeev R.A., Andreev A.V.* Enhancement of Harmonics Generated in Modulated Indium Laser-Plasmas: Experiment and Theory // Springer Proceedings in Physics – 2020. – V. 241. – p. 99-102. (Вклад автора 0.7).
- A40. *Stremoukhov S., Ganeev R., Andreev A.* Quasi-phase matching of harmonics generating in laser plasmas: experiment and theory // EPJ Web of Conferences – 2019. – V. 220. – p. 01013. (Вклад автора 0.7).
- A41. *Andreev A., Savel'ev A., Stremoukhov S., Shoutova O.* Toward the possibility of  $^{229}\text{Th}$  isomeric nuclear state excitation by two-color laser field” // EPJ Web of Conferences – 2019. – V.220. – p. 01001. (Вклад автора 0.6).
- A42. *Stremoukhov S.Yu., Andreev A.V.* Terahertz radiation in two-color laser fields: from single atom to extended gas response // EPJ Web of Conferences – 2018. – V.195. – p. 03009. (Вклад автора 0.9).
- A43. *Andreev A.V., Stremoukhov S.Yu., Shoutova O.A.* Longitudinal current in single-atom interacting with laser field // EPJ Web of Conferences – 2018. – V.190. – p. 02001. (Вклад автора 0.6).
- A44. *Stremoukhov S.Yu., Andreev A.V.* The Quantum-Mechanical Theory of THz Radiation Conical Structure Emitted from Extended Gas Media // EPJ Web of Conferences – 2015. – V.103. – p. 04011. (Вклад автора 0.9).
- A45. *Stremoukhov S.Yu., Andreev A.V.* The Basis of “Atom in the External Field” Eigenfunctions to the Problem of High Harmonic and Terahertz Radiation Generation Study // Proceedings of the 3rd International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology – 2015. – V.2. – pp. 128-133. (Вклад автора 0.8).
- A46. *Andreev A.V., Stremoukhov S.Yu., Shoutova O.A.* Enhancement of Efficiency of XUV Generation in Atomic Gases Irradiated by Intense Laser Fields // Springer Proceedings in Physics – 2014. – V.147. – pp. 7-12. (Вклад автора 0.6).
- A47. *Andreev A.V., Stremoukhov S.Yu., Shoutova O.A.* High-order optical harmonic generation as a process of single atom interaction with sub-relativistic single- and multicolor laser fields // AIP Conference Proceedings – 2012 – V.1464. – pp. 265-279. (Вклад автора 0.7).

A48. *Andreev A.V., Stremoukhov S.Yu., Shoutova O.A.* Terahertz Emission by Atom in Multicolor Laser Field in Ionization-free Regime // PIRS Proceedings, Kuala Lumpur – 2012. – pp. 1581-1583. (Вклад автора 0.7).

A49. *Andreev A.V., Stremoukhov S.Yu., Shoutova O.A.* Theory of Multilevel Atom Ionization // AIP Conference Proceedings – 2010. – V.1228. – pp. 92-111. (Вклад автора 0.6).