

**На правах рукописи**

**БОГАЦКАЯ Анна Викторовна**

**Новые методы усиления и генерации электромагнитного излучения в  
плазменных каналах, созданных в газах мощными ультракороткими лазерными  
импульсами и электронными пучками**

**01.04.08 – физика плазмы**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

Москва 2016

Работа выполнена на кафедре атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники Физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
профессор  
Попов Александр Михайлович

Официальные оппоненты: Гореславский Сергей Павлович,  
доктор физико-математических наук,  
профессор (Национальный  
исследовательский ядерный университет  
«МИФИ»), г. Москва

Крайнов Владимир Павлович,  
Доктор физико-математических наук,  
профессор (Московский физико-  
технический институт), г.  
Долгопрудный

Ведущая организация: Институт общей физики им. А. М.  
Прохорова Российской академии наук, г.  
Москва

Защита состоится «16» ноября 2016 года в 15 часов 00 минут на заседании совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Д 501.001.45 на базе Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова по адресу: 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр.5 (19-й корпус НИИ ядерной физики имени Д. В. Скобельцына МГУ имени М. В. Ломоносова), аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке МГУ имени М. В. Ломоносова, а также на сайтах

<http://istina.msu.ru/dissertations/21172990/>

<http://www.sinp.msu.ru/ru/dissertation/25214>

Автореферат разослан «23» сентября 2016 года.

Ученый секретарь совета по защите докторских и кандидатских диссертаций  
Д 501.001.45  
кандидат физико-математических наук

Вохник О. М.

## Общая характеристика работы

### Актуальность

Быстрый прогресс фемтосекундной лазерной техники привел к возможности создания протяженных ионизованных каналов в газовых средах ультракороткими импульсами. Формирование таких плазменных образований происходит в основном в результате многофотонной ионизации молекул и атомов газа в отсутствие столкновительных процессов, что ведет к сильно неравновесному энергетическому спектру электронов в плазме. Процессы релаксации спектра электронов в такой неравновесной плазме, а также ее взаимодействие с излучением представляют интерес как с фундаментальной точки зрения, открывая возможность исследования различных нелинейных эффектов, так и в ряде практических приложений. Среди последних, например, можно выделить генерацию импульсов жесткого УФ и мягкого рентгеновского излучения аттосекундной длительности [1,2], дистанционное зондирование атмосферы [3], коммутацию высоковольтных разрядников и формирование направленных разрядов [4-7], транспортировку радиочастотного излучения на макроскопически большие расстояния [8,9]. Обычно излучение жесткого ультрафиолета из лазерной плазмы связывают с процессом генерации высоких гармоник, излучаемых при перерасеянии электрона на родительском остове в процессе ионизации атома сильным лазерном полем [10]. Основные положения современной теории генерации высоких гармоник из плазмы, созданной фемтосекундными лазерными импульсами, сформулированы в [11-13]. С другой стороны, в работах [14,15] рассмотрен процесс генерации излучения терагерцового диапазона частот в лазерной плазме, созданной бихроматическими фемтосекундными лазерными импульсами. Также большой интерес вызывают процессы генерации электромагнитного излучения в режиме филаментации излучения [16]. В [17,18] экспериментально наблюдалось усиление спонтанного излучения из филамента, созданного титан-сапфировым лазерным импульсом в воздухе, в том числе из недавних работ - наблюдение флуоресценции от молекул в автоионизационном состоянии в направлении противоположном направлению распространения лазерного пучка в воздухе с примесью молекул гидрокарбонатов ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ) и воды [19].

Актуальность выбранной темы исследования обусловлена востребованностью источников излучения различных частотных диапазонов для изучения широкого круга физико-химических процессов а также возможностью управления такими процессами. В частности, особый интерес на данный момент представляет создание источников терагерцового и субтерагерцового диапазона частот, которые находят широкое применение в таких областях как химия [20], молекулярная биология [21], медицина [22], а также в различных технических приложениях [23] ввиду способности такого излучения проникать во многие материалы [24]. Кроме того, целый ряд физических и химических процессов, например колебательная динамика макромолекул и кристаллических решеток, протекает в пикосекундном масштабе времен и может контролироваться с помощью низкочастотных терагерцовых импульсов. Этой области частот также соответствует энергия водородной связи и вандерваальсовских сил межмолекулярного взаимодействия. Что касается более высокочастотной области спектра, то излучение таких диапазонов частот позволяет осуществлять контроль и управление процессами, происходящими в атомах и молекулах в газовых и конденсированных средах, и на их поверхности, в масштабах времен порядка атомных.

Помимо исследования процессов генерации и усиления электромагнитного излучения в лазерной плазме, важной задачей также является исследование возможности эффективной транспортировки терагерцового и субтерагерцового излучения на макроскопически большие расстояния. В данном случае обнаружение новых свойств плазмы, характеризующейся сильной неравновесностью энергетического спектра электронов, открывает новые перспективы и методы создания плазменных волноводов.

### **Цель диссертационной работы**

Целью данной работы является аналитическое и численное исследование процессов в сильно неравновесных плазменных каналах, созданных в различных газах мощными фемтосекундными лазерными импульсами УФ диапазона частот и пучками быстрых электронов, возможности возникновения в них инверсной населенности в дискретном спектре и континууме, а также процессов усиления и генерации в таких каналах электромагнитного излучения различных частотных диапазонов и определения оптимальных параметров газовой среды и ионизирующего

импульса (пучка электронов), при которых наблюдаемые эффекты будут проявляться наиболее ярко.

### **Научная новизна**

1. Обнаружено, что явление интерференционной стабилизации ридберговских атомов в поле высокоинтенсивного лазерного импульса ведет к возникновению инверсии между различными возбужденными состояниями, а также между группой возбужденных и основным состоянием атома, что может быть использовано для усиления и генерации излучения различных частотных диапазонов.
2. Предложено использовать плазму, созданную в результате многофотонной ионизации мощным фемтосекундным лазерным импульсом, как среду с инверсной населенностью энергетического спектра в континууме и, как следствие, способную усиливать низкочастотное излучение терагерцового и субтерагерцового диапазона в газах, характеризующихся минимумом Рамзауэра в транспортном сечении рассеяния.
3. Помимо возможности усиления, продемонстрировано, что плазма с неравновесностью электронного спектра на временах его релаксации может являться оптически более плотной средой по сравнению с неионизованным газом, что позволяет использовать такие плазменные каналы как волноводы для эффективной транспортировки терагерцового излучения.
4. Показано, что в воздушной плазме, созданной мощным фемтосекундным УФ импульсом, также возможно распространение и усиление микроволновых сигналов в режиме плазменного волновода длительностью в один - два периода колебаний усиливаемого поля волны.
5. Предложено использовать неравновесную плазму в смеси инертных и электроотрицательных газов, поддерживаемую высокоэнергетичным электронным пучком, как среду, обладающую инверсной населенностью в спектре, для усиления излучения субтерагерцового диапазона частот.

### **Практическая значимость**

Полученные результаты представляют большой научный интерес с фундаментальной точки зрения, обнаруживая качественно новые характеристики плазмы с инверсной населенностью в энергетическом континууме, созданной в

процессе фотоионизации мощным фемтосекундным лазерным импульсом, а также раскрывая новые особенности явления интерференционной стабилизации, а именно возможность генерации электромагнитного излучения при наличии интерференционной стабилизации.

Практическая ценность данных исследований связана прежде всего с возможностью получения генерации излучения в плазме в различных частотных диапазонах начиная от среднего и дальнего ИК и заканчивая ВУФ, а также усиления субтерагерцовых и терагерцовых сигналов. Последнее непосредственно актуально с практической точки зрения ввиду широких перспектив использования излучения терагерцового диапазона в различных научных и прикладных областях. В работе определены оптимальные параметры газовых сред и ионизирующих лазерных импульсов для достижения максимального преобразования энергии, запасенной в плазме, в энергию терагерцового (субтерагерцового) сигнала. Большой практический интерес вызывает также возможность получения генерации когерентного излучения из лазерной плазмы в режиме интерференционной стабилизации в широком диапазоне частот.

### **Достоверность результатов**

Достоверность полученных результатов обеспечивается тем, что они были получены методом прямого численного интегрирования уравнения Шредингера для атома в сильном лазерном поле, и кинетического уравнения Больцмана совместно с волновым уравнением для динамики плазменного образования, созданного мощным ультракоротким лазерным импульсом. Более того, проведено сопоставление с аналитическими моделями исследуемых в работе явлений, демонстрирующее хорошее согласие аналитических и расчетных данных в предельных случаях.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Явление интерференционной стабилизации ридберговских атомов в поле высокоинтенсивного лазерного импульса ведет к возникновению инверсии между различными возбужденными состояниями, а также между группой возбужденных и основным состоянием атома, что может быть использовано для

усиления и генерации электромагнитного излучения различных частотных диапазонов.

2. Эффект отрицательного поглощения (усиления) электромагнитного излучения в сильно неравновесном плазменном образовании, созданном в результате фотоионизации газов мощным фемтосекундным УФ лазерным импульсом, в газах, характеризующихся интервалом энергий с возрастающим транспортным сечением (например, с минимумом Рамзауера).
3. Эффект существования плазмы как оптически более плотной среды по сравнению с неионизованным газом на временах релаксации сильно неравновесной ФРЭЭ, содержащей интервалы энергий с инверсной населенностью спектра, в газах имеющих минимум Рамзауера в транспортном сечении.
4. Возможность формирования в поле фемтосекундного УФ лазерного импульса плазменного канала, который может использоваться как усилитель и волновод для излучения терагерцового (субтерагерцового) диапазона частот.
5. Эффект усиления радиочастотного излучения в плазме смеси инертного и электроотрицательного газов, поддерживаемой высокоэнергетичным пучком электронов.

### **Личный вклад**

Личный вклад автора в работы, вошедшие в диссертацию, является определяющим на этапах постановки задач, разработки физических моделей исследуемых явлений, построении аналитических решений исследуемых уравнений, а также при разработке ряда алгоритмов численного решения исследуемых уравнений, осмыслении полученных результатов, в том числе полученных в расчетах на суперкомпьютерном комплексе МГУ. Все изложенные в диссертационной работе теоретические результаты получены лично автором.

### **Апробация работы**

Основные результаты работы докладывались лично автором на

- 1) XX Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов" Москва, 8-13.04.2013
- 2) 4th Int. conf. on Attosecond Physics (АТТО'2013), Париж, Франция, 8-12.07.2013

- 3) 2nd International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology (PHOTOPTICS-2014), Лиссабон, Португалия, 7-9.01.2014
  - 4) XXIII Laser Physics Workshop, София, Болгария, 14-18.07.2014
  - 5) 33rd European Conference on Laser Interaction with Matter ((ECLIM), Париж, Франция, 31.08-05.09.2014
  - 6) XV Школа молодых ученых "Актуальные проблемы физики", Москва, ФИАН, 16-20 ноября 2014
  - 7) XIII Int. Conf. on Multiphoton Processes (ICOMP), Shanghai, China, 7-10.12.08, (2014)
  - 8) 3rd International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology (PHOTOPTICS-2015), Берлин, Германия, 12-14.03.2015
  - 9) Workshop "Novel Light Sources from Laser-Plasma Interaction", Дрезден, Германия, 20-24.04.2015
  - 10) XXIV Laser Physics Workshop, Шанхай, Китай, 20-25.08.2015
  - 11) XI Super Intense Laser Atomic Physics (SILAP), Бордо, Франция, 7-10 сентября 2015
  - 12) VI Всероссийская молодежная конференция по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики, Москва, Россия, 15-20 ноября 2015
  - 13) International Workshop on "ATOMIC PHYSICS", Дрезден, Германия, 23-27.11.2015
  - 14) 4rd International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology (PHOTOPTICS-016), Рим, Италия, 27.02-01.03.2016
  - 15) EMN Meeting on Terahertz, San-Sebastian, Spain, 14-18.05.2016
- а также докладывались на научных семинарах НИИЯФ МГУ, ОКРФ ФИАН, семинаре по физике многофотонных процессов ИОФАН, Макс-Борн-Института (Берлин, Германия) и Университета Йены (Германия)

Основные результаты диссертации изложены в 17 статьях, опубликованных в ведущих российских и международных реферируемых научных журналах [A1-A17], и 15 тезисах докладов на международных конференциях и симпозиумах [A18-A32].

## Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из Введения, четырех глав и Заключения. Объем диссертации 109 страниц, 55 рисунков, список литературы состоит из 117 позиций.

## Содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

**Глава 1** посвящена рассмотрению явления интерференционной стабилизации (ИС) ридберговских атомов в сильном лазерном поле как способа получения инверсии и генерации излучения различных диапазонов частот. В данной главе разработана теоретическая модель для описания динамики плазменного образования в режиме ИС, сопровождающейся процессом распада инверсной населенности ридберговских уровней с одновременным развитием усиления либо генерации электромагнитного излучения самосогласованно с движением ионизирующего лазерного импульса в среде.

В разделе 1.1 приводится краткий теоретический обзор работ по интерференционной стабилизации, в том числе экспериментальные наблюдения данного эффекта в гелии, полученные группой У. Эйхмана (U. Eichmann) [25-27], а также в аргоне и криптоне, полученные в недавней работе, выполненной группой Р. Мосхаммера (R. Moshhammer) [28] в Германии.

В разделе 1.2 представлены заселенности уровней атомов аргона и ксенона в зависимости от значений главного и орбитального квантовых чисел при различных интенсивностях воздействующего излучения первой и второй гармоник титан-сапфирового лазера, основанные на численном, *ab initio*, интегрировании нестационарного уравнения Шредингера. Приведенные данные явно демонстрируют наличие интерференционной стабилизации в газах, которая приводит к возникновению инверсной населенности между различными ридберговскими состояниями, а также между группой ридберговских и нижним возбужденным или основным состоянием атома. На основе данных по заселенности уровней получены оценки на коэффициенты усиления для различных частот

излучения (рисунок 1) и сделан вывод о большей эффективности процессов усиления и генерации в высокочастотной части спектра излучения в диапазоне от видимого до ВУФ, по сравнению с ИК и терагерцовым диапазонами.

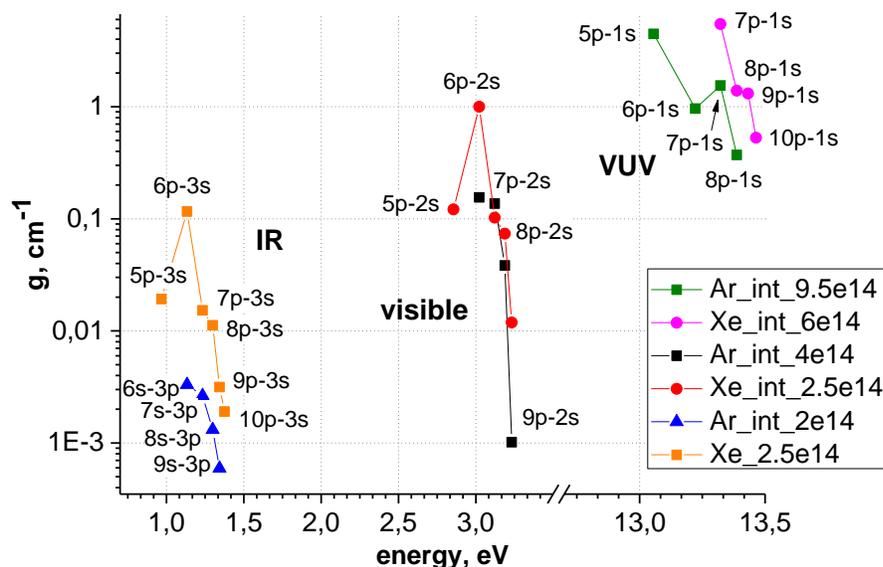


Рис. 1. Коэффициент усиления импульсов различных частотных диапазонов. Концентрация атомов  $2.5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , ионизирующее излучение - 2я гармоника титан-сапфирового лазера.

В разделе 1.3 на основе уравнений баланса излучения в плазме и скоростных уравнений для динамики инверсной населенности исследованы процессы усиления и генерации излучения видимого и ВУФ диапазонов в послеимпульсном режиме. В случае ВУФ излучения можно наблюдать эффективный процесс раскачки генерации, сопровождающийся распадом инверсной населенности ридберговских уровней, в частности интенсивность генерируемого сигнала достигает  $10^5 \text{ Вт/см}^2$  на длине усиления 5 см (рисунок 2а). Однако для видимого излучения вследствие меньшего значения коэффициента усиления процесс развития генерации происходит гораздо менее эффективно (рисунок 2б). Для исследования процесса усиления излучения видимого диапазона был взят входной сигнал с огибающей  $\sin^2$  – формы. Согласно полученным результатам, входной сигнал может быть усилен до 25 раз на расстоянии 25 см, если при этом усиливаемое поле не влияет на динамику

распада инверсной населенности в плазме. В заключение раздела 1.3 приведен качественный сравнительный анализ эффективности предложенного механизма генерации с широко известным механизмом генерации гармоник высокого порядка, основанным на модели перерасеяния П. Коркума/

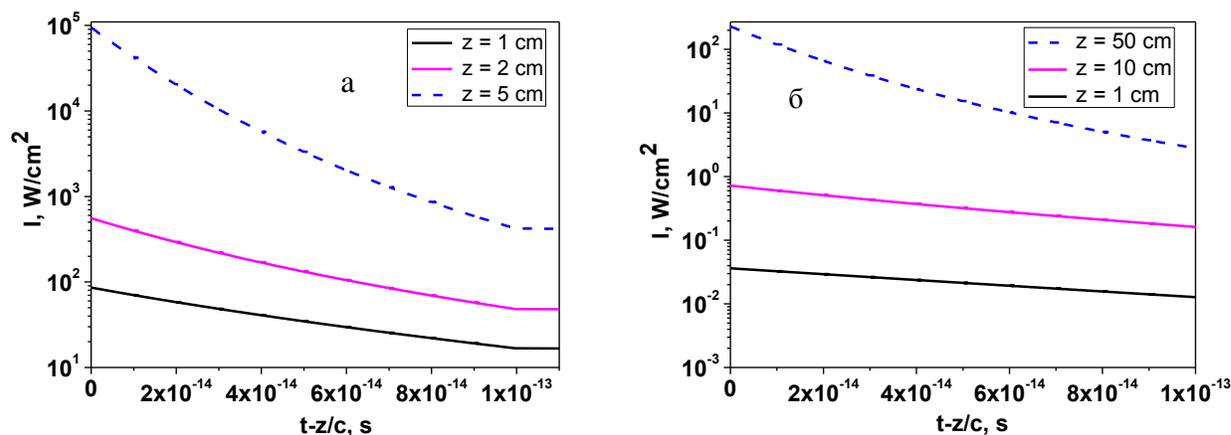


Рис. 2. Временная зависимость ВУФ (переход  $7p-1s$ ) (а) и видимого (переход  $7p-2s$ ) (б) импульса на различных длинах распространения.

В разделе 1.4 обсуждается процесс усиления и генерации излучения во время воздействия лазерного излучения, когда пондеромоторный сдвиг границы ионизации и ридберговских уровней может привести к возможности генерации более высокоэнергетичных квантов. Прделаны оценки на коэффициент усиления в данном режиме.

**Глава 2** посвящена исследованию процессов распространения и усиления радиочастотного излучения в плазменном канале, созданном в результате многофотонной ионизации инертных газов мощным фемтосекундным импульсом криптон-фторового лазера.

В разделе 2.1 представлено численное и аналитическое решение кинетического уравнения Больцмана для эволюции энергетического спектра фотоэлектронов в инертных газах ксеноне и аргоне после воздействия фемтосекундного ионизирующего импульса, в том числе с учетом влияния транспортируемого радиочастотного поля. Характерная динамика спектра фотоэлектронов при атмосферном давлении при низких концентрациях электронов ( $n_e < 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ) и в отсутствие влияния транспортируемого сигнала изображена на

рис.3. Как видно из рисунка, в течение всего расчетного интервала времени (200 нс) функция распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) характеризуется ярко выраженным максимумом, положение которого постепенно смещается в область меньших энергий, причем диффузионным расплыванием спектра в энергетическом пространстве фактически можно пренебречь. Более того, специфика зависимости частоты упругих столкновений  $\nu_{ir}$  от энергии, а именно наличие минимума Рамзауэра и участка растущего сечения в диапазоне энергий  $\varepsilon = 0.7 - 4$  эВ, по мере замедления электронов приводит к обратному эффекту – сужению пика в спектре фотоэлектронов. Численные расчеты энергетического спектра с учетом влияния электрон-электронных соударений и транспортируемого микроволнового сигнала показывают, что данные процессы приводят к дополнительному диффузионному расплыванию фотоэлектронного пика, в частности электрон-электронные соударения на временах  $\sim 200$  нс ведут к максвеллизации спектра. Анализ эволюции ФРЭЭ, выполненный аналитически, демонстрирует согласие расчетов скорости перемещения начального распределения электронов в пространстве энергий с результатами численного счета, однако не учитывает диффузионное расплывание ФРЭЭ.

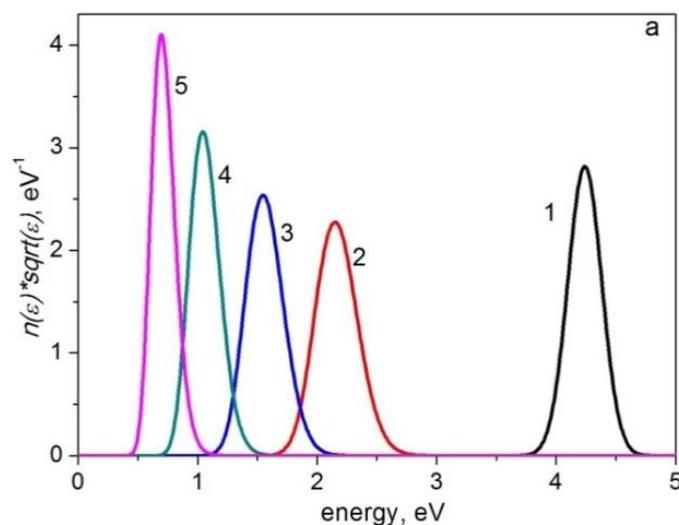


Рис.3. ФРЭЭ в аргоне в различные моменты времени после создания плазменного канала лазерным импульсом с  $\lambda = 248$  нм: 1 -  $t = 0$ , 2 - 25 нс, 3 - 50 нс, 4 - 100 нс, 5 - 200 нс.

Раздел 2.2 посвящен рассмотрению особенностей сильно неравновесной фотоионизационной плазмы, которые ведут к возможности усиления и эффективной транспортировки низкочастотного излучения. Действительно,

функция распределения электронов по энергиям в такой плазме характеризуется инверсной населенностью (рисунок 3), которая сохраняется в процессе эволюции в течение достаточно большого промежутка времени (десятки наносекунд). Известно, что наличие инверсии в плазме отвечает за возникновение усиления (отрицательного поглощения) при наличии в газе участка быстрорастущего транспортного сечения рассеяния, что реализуется в инертных газах [29]. Кроме того, дальнейший анализ диэлектрических свойств неравновесной плазмы показал, что такая неравновесная плазма является оптически более плотной средой, способной подавлять дифракционную расходимость радиочастотного сигнала и тем самым поддерживать его распространение в волноводном режиме одновременно с усилением. Эффект существования плазмы как оптически более плотной среды при равных условиях длится существенно дольше эффекта усиления. Показано, что увеличение концентрации электронов в плазме ведет к росту коэффициента усиления по абсолютной величине, но одновременно сокращает время существования усиления вследствие максвеллизации ФРЭЭ. Представленные в разделе аналитические расчеты коэффициента усиления и диэлектрической проницаемости плазмы, выполненные в условиях, когда электрон-электронными соударениями можно пренебречь, демонстрируют хорошее согласие с результатами численных расчетов.

В разделе 2.3 на основе численного интегрирования уравнения Больцмана совместно с волновым уравнением для распространения радиочастотного импульса в приближении медленно меняющихся амплитуд проанализирован процесс распространения импульса в плазменном канале. Из анализа процесса релаксации ФРЭЭ, проведенного в разделе 2.1, следует, что длительность процесса усиления  $\tau_{amp}$  в плазменном канале может составлять от нескольких наносекунд до 50 нс в зависимости от концентрации электронов и интенсивности усиливаемого импульса. Таким образом, фемтосекундный лазерный импульс, распространяясь в газе, создает за собой пространственный след – область усиления, протяженностью  $c \times \tau_{amp}$  ( $c$  – скорость света) в несколько десятков сантиметров. То же самое касается фокусирующих свойств плазменного канала, однако протяженность зоны каналирования обычно в несколько раз больше. Таким образом, лазерный импульс создает в газе плазменный канал, характеризующийся зонами усиления и каналирования (рисунок 4). Для наиболее эффективного усиления радиочастотного

импульса в такой ситуации удобно реализовать режим, когда импульсы движутся в среде один за другим, так что радиочастотный импульс постоянно находится в зоне усиления, создаваемой лазерным импульсом. Численный расчет усиления СВЧ импульса в процессе его распространения демонстрирует усиление начального сигнала вплоть до 25 раз по напряженности поля на длине распространения порядка 100 см.

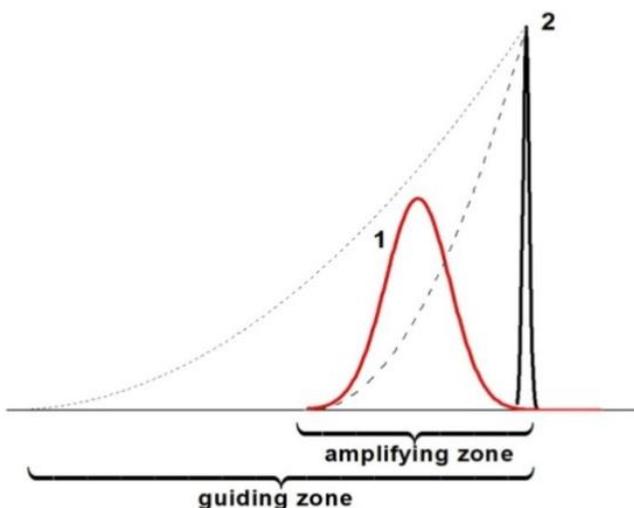


Рис.4. Пространственная структура СВЧ (1) и лазерного (2) импульсов в заданный момент времени. Пунктирные линии обозначают пространственные профили коэффициента усиления и показателя преломления, большего единицы, в плазменном канале.

В конце раздела проведен анализ эффективности процесса усиления при различных параметрах входного СВЧ сигнала (его частота и интенсивность), а также при различных радиусах плазменного канала. Получен оптимальный диапазон частот, который можно усиливать в плазменном канале заданного радиуса, а также высказано предположение, что для увеличения эффективности усиления нужно ставить временную задержку между лазерным и СВЧ импульсами вследствие небольшого возрастания коэффициента усиления и показателя преломления на начальных временах эволюции плазменного канала.

**Глава 3** диссертации состоит из одного раздела 3.1, в котором описан процесс распространения и усиления радиочастотного излучения в плазме, созданной в воздухе мощным фемтосекундным импульсом 3ей гармоники титан-сапфирового лазера.

В разделе 3.1 исследовано формирование и последующая эволюция плазменного образования в воздухе. Обращается внимание на существенное отличие скорости релаксации ФРЭЭ в плазме воздуха (десятки пикосекунд)

вследствие больших значений сечений колебательного возбуждения молекул азота, которые локализованы в области энергий от 2 до 4 эВ. Динамика релаксации функции распределения в плазме воздуха при атмосферном давлении для начального положения пика  $\varepsilon_0 = 1.8$  эВ представлена на рис. 5. В частности, данное положение пика является оптимальным, так как при энергиях больших  $\varepsilon_0 \sim 2$  эВ ФРЭЭ подвергается влиянию колебательных возбуждений, что приводит к разрушению инверсии в спектре, а при энергиях меньше 1.5 эВ отсутствие растущего участка транспортного сечения также не позволяет наблюдать усиление в плазме. Численные расчеты показывают, что положительный коэффициент усиления в данном случае существует на временах порядка десятков пикосекунд, что позволяет усиливать ультракороткие радиочастотные импульсы длительностью один-два периода колебаний поля. Следует отметить, что короткий промежуток времени существования усиления позволяет не учитывать электрон-электронные соударения при больших степенях ионизации плазмы по сравнению со случаем усиления в плазме инертных газов (см. Главу 2). Процесс распространения импульса с одновременным усилением аналогично разделу 2.3 Главы 2 анализировался на основе согласованного численного решения уравнения Больцмана и волнового уравнения.

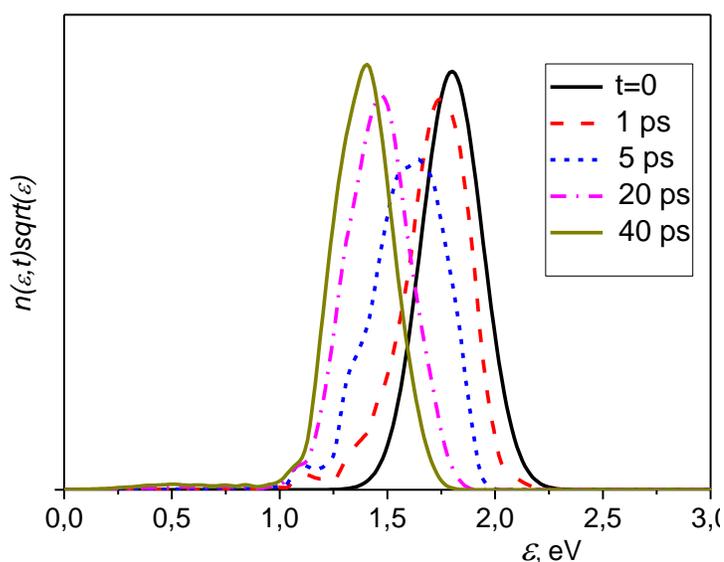


Рис. 5. ФРЭЭ в воздушной плазме в различные моменты времени после воздействия фемтосекундного импульса Ti-Sa лазера. Начальное распределение характеризуется средней энергией  $\varepsilon_0 = 1.8$  эВ. Концентрация электронов в плазме  $N_e = 10^{13}$  см<sup>-3</sup>.

**Глава 4** диссертации посвящена исследованию альтернативной возможности усиления радиочастотного излучения в плазме смеси инертного и электроотрицательного газов (на примере смеси Xe-F<sub>2</sub>), поддерживаемой высокоэнергетичным электронным пучком. В результате баланса процессов гибели низкоэнергетичных электронов вследствие прилипания к молекулам фтора и рождения электронов в процессе ионизации атомов ксенона электронным пучком формируется квазистационарный спектр электронов, содержащий инверсную населенность, которая ведет к усилению низкочастотного излучения, как показано в Главах 2 и 3 (рисунок 6).

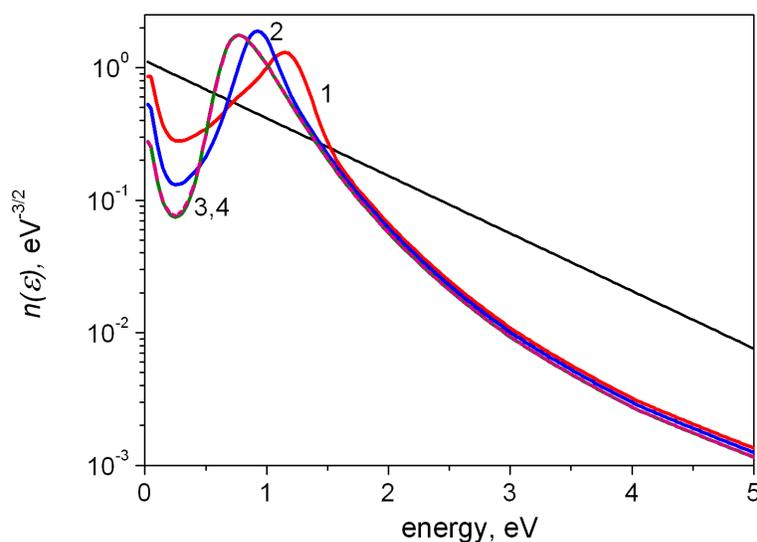


Рис 6. ФРЭЭ в плазме Xe:F<sub>2</sub> для различных моментов времени (нс):  $t=25$  (1), 50 (2), 200 (3), 400 (4); Черная прямая – начальная ФРЭЭ (Максвелл). Плотность молекул газа  $N = 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , концентрация молекул фтора  $N_{F_2} = 4 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , скорость рождения электронов  $q = 8 \times 10^{17} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$ .

На основе численного решения уравнения Больцмана получены зависимости коэффициента усиления для различных концентраций молекул фтора, скоростей рождения электронов в плазме, а также при различных интенсивностях транспортируемого радиочастотного сигнала. Показано, что концентрация электронов оказывается пропорциональна полной скорости рождения электронов  $q$ , положение же пика в спектре электронов не зависит от  $q$ . Следовательно, коэффициент усиления (поглощения) характеризуется линейной зависимостью от

*q*. Зависимость свойств усиления в плазме от концентрации молекул фтора более сложная, так как изменение концентрации молекул F<sub>2</sub> ведет к существенной перестройке ФРЭЭ. В частности, положение пика функции распределения  $\varepsilon_0$  смещается в сторону низких энергий с уменьшением концентрации компоненты F<sub>2</sub> в смеси. Возможность получения положительного коэффициента усиления пропадает, когда  $\varepsilon_0$  оказывается вне энергетического интервала с участком растущего транспортного сечения в ксеноне ( $\varepsilon = 0.7 - 4$  эВ).

В конце данной главы приведены расчеты коэффициента усиления при наличии влияния транспортируемого радиочастотного поля на эволюцию плазмы смеси Хе:F<sub>2</sub>. Показано, что при интенсивностях больших 1 Вт/см<sup>2</sup> перестройка ФРЭЭ радиочастотным полем становится существенной.

**В Заключении** диссертации сформулированы основные результаты, полученные в работе.

### Цитированная литература

1. Agostini P. and Di Mauro L.F. The physics of attosecond light pulses. *Rep. Prog. Phys.*, **67**, 813–855 (2004).
2. Krausz F. and Ivanov M. Attosecond physics. *Rev. Mod. Phys.*, **81**, 163–234 (2009)
3. Penano J., Sprangle P., Hafizi B., Gordon D., Fernsler R., Scully M. Remote lasing in air by recombination and electron impact excitation of molecular nitrogen. *J. Appl. Phys.*, **111**, 033105 (2012).
4. Zhao X.M., Wang Y.C., Diels J.-C., Elizondo J., Femtosecond ultraviolet laser pulse induced lightning discharges in gases *IEEE J. Quantum Electron.*, **31**, 599-612 (1995).
5. Tzortzakis S., Franco M.A., André Y.-B., Chiron A., Lamouroux B., Prade B.S., Mysyrowicz A., Formation of a conducting channel in air by self-guided femtosecond laser pulses *Phys. Rev. E*, **60**, R3505-R3507 (1999).
6. Rodriguez M., Sauerbrey R., Wille H., Wöste L., Fujii T., André Y.-B., Mysyrowicz A., Klingbeil L., Rethmeier K., Kalkner W., Kasparian J., Salmon E., Yu J., Wolf J.-P., Triggering and guiding megavolt discharges by use of laser-induced ionized filaments *Opt. Lett.*, **27**, 772-774 (2002).

7. Ionin A.A., Kudryashov S.V., Levchenko A.O., Seleznev L.V., Shutov A.V., Sinitsyn D.V., Smetanin I.V., Ustinovsky N.N., Zvorykin V.D., Triggering and guiding electric discharge by a train of UV picosecond pulses combined with a long UV pulse *Appl. Phys. Letts.*, **100**, 104105 (2012).
8. Châteauneuf M., Payeur S., Dubois J., Kieffer J.-C., Microwave guiding in air by a cylindrical filament array waveguide. *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 091104 (2008).
9. Зворыкин В.Д., Левченко А.О., Сметанин И.В., Устиновский Н.Н., Транспортировка СВЧ излучения в плазменных волноводах скользящих мод *Письма в ЖЭТФ*, **91**, 244-248 (2010) (*JETP Lett.*, 2010, **91**, 226–230).
10. Corkum P.B. Plasma perspective on strong field multiphoton ionization *Phys. Rev. Lett.*, **71**, 1994-1997 (1993)
11. L’Huillier A., Lewenstein M., Salieres P., Balcou Ph., Ivanov M.Yu., Larsson J., and Wahlström C.G. High-order Harmonic-generation cutoff *Phys. Rev. A*, **48**, R3433-3436 (1993)
12. Lewenstein M., Balcou Ph., Ivanov M.Yu., L’Huillier A., and Corkum P.B. Theory of high-harmonic generation by low-frequency laser fields *Phys. Rev. A*, **49**, 2117-2132 (1994)
13. Becker W., Long S., and McEver J.K. Modeling harmonic generation by a zero-range potential *Phys. Rev. A* **50**, 1540-1560 (1994)
14. Kreß M., Löffler T., Thomson M. D., Dörner R., Gimpel H., Zrost K., Ergler Th., Moshhammer R., Morgner U., Ullrich J. and Rosko H.G. Determination of the carrier-envelope phase of few-cycle laser pulses with terahertz-emission spectroscopy *Nature Phys.* **2**, 327-331, (2006)
15. Gildenburg V.B. and Vvedenskii N.V. Optical-to-THz wave conversion via excitation of plasma oscillations in the tunneling-ionization process *Phys. Rev. Lett.*, **98**, 245002, (2007)
16. Luo Q., Liu W. and Chin S.L. Lasing action in air induced by ultra-fast laser filamentation *Appl. Phys. B*, **76**, 337-340 (2003)
17. Wang T.-J., Ju J., Daigle J.-F., Daigle J.-F., Yuan Sh., Li R. and Chin S.L. Self-seeded forward lasing action from a femtosecond Ti:sapphire laser filament in air *Laser Phys. Lett.*, **10**, 125401 (2013)

18. Wang T.-J., Daigle J.-F., Ju J., Shuai Sh., Li R., and Chin S. L. Forward lasing action at multiple wavelengths seeded by white light from a femtosecond laser filament in air *Phys. Rev. A*, **88**, 053429 (2013)
19. Chin S.L., Xu H.L., Population inversion in fluorescing fragments of super-excited molecules inside an air filament *Chinese Physics B*, **24**, 013301, (2015)
20. Skinner J. L. Following the motions of water molecules in aqueous solutions *Science*, **328**, 985-986 (2010)
21. Meister K., Ebbinghaus S., Xu Y. et al Long-range protein–water dynamics in hyperactive insect antifreeze proteins *PNAS*, **110**, 1617-1622 (2013)
22. Titova L.V., Ayesheshim A.K., Golubov A. et al, Intense THz pulses down-regulate genes associated with skin cancer and psoriasis: a new therapeutic avenue *Scientific Reports*, **3**, paper 2363 (2013)
23. Grady N.K., Heyes J.E., Chowdhury D.R. et al, Terahertz metamaterials for linear polarization conversion and anomalous refraction *Science*, **340**, 1304-1307 (2013)
24. Jepsen P.U., Cooke D.G. and Koch M. Terahertz spectroscopy and imaging – Modern techniques and applications *Laser Photonics Rev.*, **5**, 124-166 (2011)
25. Nubbemeyer T., Gorling K., Saenz A., Eichmann U. and Sandner W., Strong-Field Tunneling without Ionization *Phys. Rev. Lett.* **101**, 233001 (2008)
26. Eichmann U., Nubbemeyer T., Rottke H. and Sandner W., Acceleration of neutral atoms in strong short-pulse laser fields *Nature* **461**, 1261-1264 (2009)
27. Eichmann U., Saenz A., Eilzer S., Nubbemeyer T. and Sandner W. Observing Rydberg Atoms to Survive Intense Laser Fields *Phys. Rev. Lett.* **110**, 203002 (2013)
28. Fechner L., Camus N., Krupp A., Ullrich J., Pfeifer Th., and Moshhammer R. Creation and survival of autoionizing states in strong laser fields *Phys. Rev. A* **92**, 051403(R) (2015)
29. Бункин Ф.В., Казаков А.Е., Федоров М.В. Взаимодействие интенсивного оптического излучения со свободными электронами (нерелятивистский случай) *УФН*, **107**, №4, 559-593 (1972).

### Список публикаций

- A1. Богацкая А.В., Попов А.М. О возможности усиления электромагнитного излучения субтерагерцового диапазона частот в плазменном канале, созданным

- ультракоротким высокоинтенсивным лазерным импульсом. *Письма в ЖЭТФ*, **97**, № 7, 453 - 457 (2013) (*JETP Letters*, **97**, 388-392 (2013))
- A2. Богацкая А.В., Волкова Е.А., Попов А.М. Плазменный канал, создаваемый импульсом фемтосекундного лазера, как среда для усиления электромагнитного излучения субтерагерцевого диапазона частот, *Квантовая электроника*, **43**, № 12, 1110-1117 (2013)
- A3. Bogatskaya A.V., Volkova E.A., Popov A.M. Propagation and Amplification of a Short Subterahertz Pulse in a Plasma Channel in Air Created by Intense Laser Radiation In Proceedings of 2nd International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology, pages 199-204 (2014) DOI: 10.5220/0004723501990204
- A4. Bogatskaya A.V., Smetanin I.V., Popov A.M. Amplification of the microwave radiation in plasma channel created by the ultrashort high-intensity laser pulse in noble gases. *J. Russian Laser Res.*, **35**, №5, 437-446 (2014)
- A5. Bogatskaya A.V., Volkova E.A., Popov A.M. On the possibility of a short subterahertz pulse amplification in a plasma channel created in air by intense laser radiation *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **47**, 185202 (8pp) (2014)
- A6. Богацкая А.В., Волкова Е.А., Попов А.М. Численное моделирование процесса усиления в плазменном канале, созданном в газе при его многофотонной ионизации фемтосекундным лазерным импульсом, *Квантовая электроника*, **44**, №12, 1091-1098 (2014)
- A7. Bogatskaya A.V., Smetanin I.V., Volkova E.A., and Popov A.M. Guiding and amplification of microwave radiation in a plasma channel created in gas by intense UV laser pulse, *Laser and Particle Beams*, v. **33**, № 1, 17-25 (2015)
- A8. Bogatskaya A.V., Volkova E.A., Popov A.M., Nonequilibrium plasma channel in gaseous media formed by powerful UV laser as a waveguide for transportation and amplification of short microwave pulses *Laser Phys. Lett.*, **12**, № 3, 035301 (2015)
- A9. Bogatskaya A.V., Popov A.M. Interference stabilization and UV lasing in a plasma channel formed in gas by intense RF field *Laser Phys. Lett.*, **12**, 045303 (2015)
- A10. Bogatskaya A.V., Volkova E.A., Popov A.M. Specific Electrodinamic Features of a Plasma Channel Created in Gas by Powerful Femtosecond UV Laser Pulse Application to the Problem of Guiding and Amplification of Microwave Radiation In Proceedings of 3rd International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology, pages 149-156 (2015)

- A11. Bogatskaya A.V., Popov A.M., Smetanin I.V., Volkova E.A. Propagation and amplification of short radio-frequency pulses in a plasma channel created in gaseous media by the intense laser radiation *Journal of Physics: Conference Series*, v. **594**, 012017-1-6 (2015)
- A12. Bogatskaya A.V., Volkova E.A., Popov A.M. Amplification and lasing in a plasma channel formed in gases by an intense femtosecond laser pulse in the regime of interference stabilization // *Laser Physics.*, V. **26**, no. 1., 015301 (2016).
- A13. Богацкая А.В., Волкова Е.А., Попов А.М., Сметанин И.В. Распространение и усиление микроволнового излучения в плазменном канале, создаваемом в газах мощным фемтосекундным УФ лазерным импульсом *Физика плазмы*, Т. **42**, № 2, 10-29 (2016)
- A14. Bogatskaya A.V., Popov A.M. Electron beam sustained plasma as a medium for amplification of electromagnetic radiation in subterahertz frequency band Proceedings of the 4th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology. — ISBN: 978-989-758-174-8. P. 281-288 (2016)
- A15. Bogatskaya A.V., Volkova E.A., Popov A.M. Interference stabilization and possibility of amplification and lasing in plasma channel formed in gas by intense femtosecond laser field Proceedings of the 4th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology. — ISBN: 978-989-758-174-8. P. 289–296 (2016).
- A16. Bogatskaya A.V., Popov A.M. E-beam sustained plasma as a medium for amplification of electromagnetic radiation in subterahertz frequency band *Journal of Physics D - Applied Physics.*, **49**, 025203 (2016)
- A17. Bogatskaya A.V., Popov A.M., Volkova E.A. Propagation of a short subterahertz pulse in a plasma channel in air created by intense UV femtosecond laser pulse Photoptics 2014: Proceedings of the 2nd International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology. — Vol. 177 of *Springer Proceedings Phys.* p.145-157 — Springer International Publishing Switzerland, Springer (2016)
- A18. Богацкая А.В. О возможности усиления электромагнитного излучения в плазменном канале, созданным высокоинтенсивным фемтосекундным лазерным импульсом XX международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», секция физика, с.26-28 Москва, (2013)
- A19. Bogatskaya A.V., Popov A.M., Volkova E.A. The amplification of electromagnetic radiation in the subterahertz frequency range in plasma channel created by high-

- intensity femtosecond laser pulse 4th Int. conf. on Attosecond Physics (ATTO'2013), p.41, Paris, France (2013)
- A20. Bogatskaya A.V., Popov A.M., Volkova E.A. Amplification of electromagnetic radiation in subterahertz frequency band in plasma channel created by high-intensity ultrashort laser pulse *Frontiers of Nonlinear Physics (FNP-13)*, p.107-108, Nizhniy Novgorod (2013)
- A21. Bogatskaya A.V., Popov A.M., Smetanin I.V., Volkova E.A. Propagation and Amplification of the Short Radio-Frequency Pulses in a Plasma Channel Created in Gaseous Media by the Intense Laser Radiation *XXIII Laser Physics Workshop*, Sofia, Bulgaria (2014) report 2.3.4
- A22. Bogatskaya A.V., Popov A.M. Analytical modeling of evolution of a plasma channel created in rare gases by femtosecond UV laser pulse *33rd European Conference on Laser Interaction with Matter*, Paris, France, 31.08-5.09, p.114 (2014)
- A23. Bogatskaya A.V., Smetanin I.V., Volkova E.A., Popov A.M. Guiding and amplification of a microwave radiation in a plasma channel created in gas in intense UV laser pulse *33rd -European Conference on Laser Interaction with Matter*, Paris, France, 31.08-5.09, p. 153 (2014)
- A24. Богацкая А.В. Распространение и усиление микроволнового излучения в плазменном канале, созданном в газовых средах мощным ультракоротким лазерным импульсом *XV Школа молодых ученых "Актуальные проблемы физики"*, Москва, ФИАН, 16-20 ноября 2014, стр.21
- A25. Bogatskaya A.V., Popov A.M. Analytical modeling of evolution of a plasma channel created in rare gases by femtosecond UV laser pulse *XIII Int. Conf. on Multiphoton Processes (ICOMP)*, Shanghai, China, 7-10.12.08, p. 70 (2014)
- A26. Bogatskaya A.V., Smetanin I.V., Volkova E.A., Popov A.M. Guiding and amplification of a radio-frequency radiation in a plasma channel created in gas by intense femtosecond laser pulse. *XIII Int. Conf. on Multiphoton Processes (ICOMP)*, Shanghai, China, 7-10.12.08, p.54 (2014)
- A27. Bogatskaya A.V., Volkova E.A., Popov A.M. Guiding and Amplification of Subterahertz Radiation in a Plasma Channel Formed in Gases by the Intense Ultrashort UV Laser Pulse *XXIV Laser Physics Workshop*, Шанхай, Китай, 20-25.08.2015, report S2.8.1

- A28. Bogatskaya A.V., Volkova E.A., Popov A.M. Interference Stabilization, Middle IR and UV Lasing in a Plasma Channel Formed in Gas by Femtosecond Laser Field XXIV Laser Physics Workshop, Шанхай, Китай, 20-25.08.2015, report S2.8.2
- A29. Bogatskaya A.V., Popov A.M., Volkova E.A. Specific Electrodinamic Features of a Plasma Channel Created in Gas by Powerful Femtosecond UV Laser Pulse Application to the Problem of Guiding and Amplification of Microwave Radiation 3rd International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology (PHOTOPTICS-2015), Берлин, Германия, 11-14 марта 2015
- A30. Bogatskaya A.V., Volkova E.A., Popov A.M. Guiding and amplification of radio-frequency radiation in a plasma channel created in gases by the intense femtosecond UV laser pulse XI Super Intense Laser Atomic Physics (SILAP) , Bordeaux, Франция, 7-10 сентября 2015, p.108
- A31. Bogatskaya A.V., Volkova E.A., Popov A.M. Interference stabilization, middle IR and UV lasing in a plasma channel formed in gas by high intensity laser field XI Super Intense Laser Atomic Physics (SILAP), Bordeaux, Франция, 7-10 сентября 2015, p.91
- A32. Богацкая А.В., Волкова Е.А., Попов А.М. О возможности генерации излучения в диапазоне частот от среднего ИК до вакуумного ультрафиолета в плазменных каналах, созданных в газах мощным фемтосекундным лазерным импульсом // VI Всероссийская молодежная конференция по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики, Москва, Россия, с.23, 15-20 ноября 2015

Подписано к печати 20.06.2016 г.  
Тираж 100 экз. Заказ № 92  
Отпечатано в отделе оперативной печати  
Физического факультета МГУ