

Отзыв

официального оппонента Корнева Алексея Станиславовича на диссертационную работу Хайрулина Ильяса Равильевича «Когерентные и поляризационные эффекты при формировании и усилении аттосекундных импульсов в модулированной активной среде плазменного рентгеновского лазера», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика.

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа Хайрулина Ильяса Равильевича посвящена актуальной проблеме создания компактных источников интенсивных аттосекундных импульсов ВУФ/рентгеновского излучения с управляемыми спектрально-временными и поляризационными характеристиками, которые позволяют производить высокоточные измерения сверхбыстрых процессов в веществе благодаря уникальной комбинации высокого пространственного и временного разрешений. Об актуальности этой темы также говорит и тот факт, что в 2023 г. Нобелевская премия по физике была присуждена за создание экспериментальных методов генерации аттосекундных импульсов для исследования динамики электронов в веществе.

На сегодняшний день основным методом получения таких импульсов является генерация высших гармоник в газовых средах. Существенным недостатком данного метода является низкая энергия, запасенная в импульсах высших гармоник в рентгеновском диапазоне, которая в лучшем случае не превышает несколько наноджоулей и дополнительно уменьшается с ростом эллиптичности генерируемых гармоник.

В представленной диссертационной работе автором развивается подход, основанный на пространственно-временной модуляции интенсивным лазерным полем характеристик резонансной инвертированной среды, в качестве которой выступает активная среда плазменного рентгеновского лазера, частота инвертированного перехода которого лежит в ВУФ/рентгеновском диапазоне. Такая модуляция позволяет модифицировать отклик резонансной среды и тем самым обогатить спектр усиления среды новыми комбинационными частотами, что позволяет усиливать и/или формировать в среде излучение с достаточно широким спектром; во временной области это может соответствовать аттосекундным импульсам. Из-за высокой энергии, сосредоточенной в активной среде плазменного рентгеновского лазера, интенсивность сформированных и/или усиленных таким образом аттосекундных импульсов может значительно превышать интенсивность импульсов высших гармоник.

Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, указаны её цели и задачи, а также описаны методы исследования; приведены краткое содержание диссертации и выносимые на защиту положения; представлены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, обоснована их достоверность; приведены сведения об апробации работы и о личном вкладе автора.

Первая глава посвящена когерентным эффектам, возникающим в результате распространения резонансного высокочастотного излучения в активной среде плазменного рентгеновского лазера, дополнительно облучаемой интенсивным линейно поляризованным лазерным полем. В качестве активной плазмы в первой главе рассматривается плазма водородоподобных ионов Li^{2+} , в которой дисперсия плазмы на частоте лазерного поля является умеренной, благодаря чему и возникают когерентные эффекты.

В разделе 1.1 приводится математическая модель, которая описывает распространение резонансного излучения в водородоподобной активной плазме, дополнительно облучаемой оптическим полем с линейной поляризацией. В этом случае лазерное поле приводит к линейной штарковской модуляции частот переходов, которые резонансно взаимодействуют с излучением затравки. При этом в теоретической модели учитываются нелинейность усиления среды и возникающее в ней усиленное спонтанное излучение.

В разделе 1.2 приведён вывод аналитического решения, которое описывает основные особенности распространения резонансного излучения через модулированную водородоподобную активную плазму. Согласно этому решению линейная штарковская модуляция частот резонансных переходов приводит к тому, что усиление среды для резонансного поля становится многочастотным и состоит из совокупности линий усиления, разнесённых друг от друга по частоте на величину частоты лазерного поля. При этом в плазме с умеренной дисперсией на частоте лазерного поля каждая частотная компонента падающего поля не только усиливается, но и генерирует когерентно рассеянное поле на частотах, отстоящих от неё на чётное число частот модулирующего поля. Суммарное когерентно рассеянное поле определённым образом согласованно по фазе с усиливаемым полем затравки, а их интерференция изменяет условия усиления падающего поля. Такие эффекты и называются в данной главе когерентными. В разделе 1.2 также кратко описываются характерные случаи проявления когерентных эффектов, которые детально рассматриваются в последующих разделах данной главы.

В разделе 1.3 приведён обзор литературы по созданию активной водородоподобной плазмы ионов Li^{2+} , на основе которого обосновывается выбор используемых далее параметров среды и лазерного поля.

В разделе 1.4 рассмотрен первый характерный случай, когда на входе в модулированную активную плазму имеется пикосекундный импульс квазимонохроматического излучения, которое находится в резонансе с центральной (разделы 1.4.1, 1.4.2) или боковой (раздел 1.4.3) линией усиления. В этом случае падающее поле не только усиливается, но и генерирует комбинационные частоты, которые в оптимальных условиях, найденных в этом разделе, оказываются достаточно интенсивными и синфазными к усиливаемому падающему полю. Во временной области этому соответствует преобразование пикосекундного импульса в усиленную последовательность аттосекундных импульсов. Рассмотренная постановка задачи является актуальной с точки зрения получения аттосекундных импульсов с высокой энергией, так как в качестве излучения затравки в этом случае может выступать пикосекундный импульс плазменного рентгеновского лазера.

В разделе 1.5 рассмотрен второй характерный случай, когда на входе в активную плазму имеется последовательность аттосекундных импульсов, образованных совокупностью высших гармоник, резонансных к индуцированным линиям усиления. Следует отметить, что такая постановка задачи ранее была рассмотрена в работе [V.A. Antonov et al., Phys. Rev. Lett. **123**, 243903 (2019)]. Однако, в качестве активной среды в цитированной работе рассматривалась плазма с сильной дисперсией на частоте лазерного поля, из-за чего эффекты когерентного рассеяния были несущественны, и гармоники усиливались независимо друг от друга. В разделе 1.5 произведено обобщение описанного в указанной работе режима усиления аттосекундных импульсов на случай активной плазмы с умеренной дисперсией на частоте модулирующего поля. В этом случае высшие гармоники не только усиливаются, но и генерируют частотные компоненты когерентно рассеянного поля на частотах других гармоник из-за взаимного рассеяния. В разделе 1.5.1 приведён вывод аналитического решения для амплитуд усиливаемых высших гармоник с учётом их взаимного рассеяния друг в друга. В разделах 1.5.2 и 1.5.3 аналитически и численно показано, что в зависимости от параметров резонансного и модулирующего полей, а также активной плазмы возможно как взаимное усиление гармоник (когда когерентно рассеянное поле оказывается в фазе с излучением падающих гармоник), так и интерференционное подавление усиления гармоник (когда когерентно рассеянное поле оказывается противофазным к падающим гармоникам). При этом эффект взаимного усиления реализуется для практически важного случая, когда высшие гармоники являются синфазными и образуют аттосекундные импульсы. В разделах 1.5.4 и 1.5.5 на основе полученного аналитического решения найдены оптимальные условия взаимного усиления высших гармоник, образующих последовательность аттосекундных импульсов, а также произведено сравнение с

результатами численных расчётов на основе теоретической модели, изложенной в разделе 1.1.

В разделе 1.6 приведено краткое описание основных результатов первой главы.

Во второй главе диссертации рассматриваются поляризационные эффекты и их приложения для усиления и управления поляризацией высших гармоник в активной среде плазменного рентгеновского лазера, дополнительно облучаемой интенсивным лазерным полем линейной поляризации. В качестве активной среды в данной главе рассматривается активная плазма неоноподобных (а не водородоподобных) ионов. Связано это с тем, что из-за особенностей модуляции энергий резонансных состояний линейно поляризованным лазерным полем в водородоподобной активной плазме удаётся формировать и усиливать аттосекундные импульсы только линейной поляризации, параллельной поляризации модулирующего лазерного поля. В случае же неоноподобной активной среды линейно поляризованное лазерное поле приводит к модуляции (вследствие квадратичного эффекта Штарка) частот резонансных переходов, дипольные моменты которых ориентированы как вдоль, так и поперёк направления поляризации модулирующего поля. Это приводит к тому, что спектры усиления становятся многокомпонентными для обеих поляризационных компонент резонансного излучения затравки, которая в общем случае является эллиптически поляризованной. В результате в модулированной неоноподобной активной плазме имеется возможность усиления совокупности эллиптически или циркулярно поляризованных высших гармоник, которые во временной области могут образовывать последовательность аттосекундных импульсов.

Структура второй главы аналогична первой. В разделе 2.1 приведена теоретическая модель, описывающая распространение в общем случае эллиптически поляризованного резонансного излучения затравки в неоноподобной активной среде плазменного рентгеновского лазера, дополнительно облучаемой интенсивным лазерным полем линейной поляризации. В модели учитываются нелинейность среды и усиленное спонтанное излучение. В качестве активной среды рассматривается активная плазма неоноподобных ионов Ti^{12+} .

В разделе 2.2 сделан обзор литературы по методам создания активной плазмы неоноподобных ионов Ti^{12+} , на основе которого обосновывается выбор используемых в данной главе параметров активной плазмы и модулирующего поля. Стоит отметить, что в отличие от водородоподобной плазмы ионов Li^{2+} , рассмотренной в первой главе, плазма неоноподобных ионов Ti^{12+} характеризуется сильной дисперсией для модулирующего поля ближнего и среднего ИК диапазона. В результате в такой среде когерентные эффекты,

рассмотренные в первой главе, оказываются несущественными, и частотные составляющие падающего поля затравки усиливаются независимо друг от друга.

В разделе 2.3 получено аналитическое решение для резонансного излучения затравки (в общем случае) с эллиптической поляризацией на выходе из модулированной неоноподобной активной плазмы.

В разделе 2.4 на основе полученного аналитического решения проанализированы условия усиления совокупности эллиптически поляризованных гармоник в такой среде. Показано, что для одновременного усиления ортогональных составляющих эллиптически поляризованных гармоник необходимо подобрать интенсивность и длину волны модулирующего лазерного поля таким образом, чтобы спектры усиления для ортогонально поляризованных составляющих поля полностью перекрывались. При этом в случае неоноподобных ионов Ti^{12+} существуют две характерные области в спектре усиления среды. В первой области коэффициенты усиления ортогональных составляющих близки друг к другу для целого ряда соседних высших гармоник. Во второй спектральной области одна из поляризационных составляющих для ряда соседних гармоник усиливается эффективнее другой. Соответственно первую область можно использовать для усиления циркулярно поляризованных гармоник с сохранением их поляризации, а вторую — для усиления эллиптически поляризованных гармоник с увеличением их эллиптичности (вплоть до единицы) вследствие преимущественного усиления более слабой поляризационной составляющей поля.

В разделе 2.5 представлены и проанализированы результаты численного моделирования на основе системы уравнений, приведённой в разделе 2.1. Показана возможность усиления излучения одной высшей гармоники, а также нескольких высших гармоник, образующих последовательность аттосекундных импульсов, как с сохранением, так и с изменением эллиптичности поля.

В разделе 2.6 предлагается метод преобразования линейно поляризованного излучения высших гармоник в циркулярно поляризованное путём введения небольшого частотного сдвига между первоначально совмещёнными спектрами усиления. В этом случае благодаря резонансной дисперсии между ортогонально поляризованными компонентами поля гармоник на оптимальной глубине среды набегает фазовый сдвиг $\pi/2$. Если к тому же амплитуды поляризационных компонент поля оказываются близкими друг к другу, то поляризация поля становится циркулярной. Важной особенностью этого метода является то, что эффективность (по энергии излучения) преобразования поляризации в этом случае оказывается выше 100%, т.е. излучение гармоник не ослабевает, а наоборот усиливается.

В Заключении сформулированы основные результаты работы.

Обзор литературы содержит свежие источники, демонстрирующие достижения в исследуемой области за последнее десятилетие.

Автореферат верно отражает основное содержание диссертационной работы.

Научная новизна диссертационной работы состоит, в частности, в следующем:

1. Построена аналитическая модель, которая позволяет описать основные особенности взаимодействия резонансного высокочастотного излучения с оптически модулированной активной средой плазменного рентгеновского лазера как на основе водородоподобных, так и на основе неоноподобных ионов, не прибегая к сложным численным расчётам.

2. Исследованы когерентные эффекты, возникающие при распространении резонансного ВУФ/рентгеновского излучения в модулированной активной плазме с умеренной дисперсией на частоте модулирующего лазерного поля. Показано, что благодаря им можно получить последовательность интенсивных аттосекундных импульсов двумя способами. В основе первого лежит преобразование пикосекундного импульса резонансного излучения характерного для плазменного рентгеновского лазера за счёт генерации многокомпонентного когерентно рассеянного поля. Второй способ состоит в увеличении эффективности усиления совокупности высших гармоник за счёт их конструктивной интерференции с когерентно рассеянным полем.

3. Предложен метод усиления и управления поляризацией излучения одной или нескольких высших гармоник, образующих последовательность аттосекундных импульсов, за счёт его распространения в оптически модулированной неоноподобной активной среде плазменного рентгеновского лазера.

Достоверность результатов диссертационной работы

Достоверность полученных автором результатов подтверждается использованием современных теоретических методов, основанных на формализме матрицы плотности, согласием между численными и аналитическими результатами, а также обеспечивается использованием экспериментальных данных о характеристиках рассматриваемых в диссертации ионов, взятых из цитируемой литературы и предоставленных лично руководителем экспериментальной группы профессором Х. Рокка, с которым у автора есть совместные публикации, вошедшие в диссертацию.

Кроме того, достоверность полученных результатов подтверждается их публикацией в девяти высокорейтинговых научных журналах, в том числе Physical Review Research,

Physical Review A и Scientific Reports, входящих в квартиль Q1 (Scimago Journal & Country Rank), а также многочисленными их представлениями на всероссийских и международных конференциях.

Замечания к диссертационной работе

По диссертационной работе имеется ряд замечаний:

1. Возможно, следовало бы несколько иначе структурировать диссертационную работу. К примеру, в первой главе изложить использованные теоретические методы; вторую главу посвятить активной плазме на основе водородоподобных ионов Li^{2+} , а третью главу — активной плазме на основе неоноподобных ионов Ti^{12+} .

2. На странице 48, 4я строка снизу, не ясно, какой режим ионизации лазерным полем подразумевается: туннельный, многофотонный или промежуточный. Кроме того, везде ли в диссертации, где использовалась модель Переломова – Попова – Терентьева, выполнены условия её применимости? Также вместе с моделью Переломова – Попова – Терентьева рекомендуется указывать модель Аммосова – Делоне – Крайнова, а для краткости можно было бы в самом начале ввести дополнительно аббревиатуры ППТ и АДК и использовать их в дальнейшем.

3. Если для получения активной плазмы ионов Li^{2+} необходимо высверливать микрокапилляр в твердотельном образце LiF, то каким способом можно получить активную плазму ионов Ti^{12+} с концентрацией достаточной для наблюдения исследованных в диссертации эффектов? Как можно удерживать такую плазму, предотвращая рекомбинацию?

4. В разделе 2.1 на странице 104 не обосновано использование пространственно одномерного приближения.

5. В отечественной литературе принято писать не «лоренцевый контур», а «лоренцев контур» (см. с. 26 после формулы (1.31)), и не «радиус Бора», а «боровский радиус». Кроме того, строго говоря, лоренцев контур определяется не выражением (1.31), а квадратом его модуля.

6. В конце раздела 1.1 на с. 22 после формулы (1.23) во фразе «квадраты модулей дипольных моментов свободно-связанных переходов в несколько десятков раз меньше квадратов модулей дипольных моментов рассматриваемых связанно-связанных переходов», строго говоря, некорректно использовать термин «дипольный момент», т.к. здесь речь идёт о матричных элементах дипольного момента.

7. В разделе «Заключение» каждый результат принято начинать с заглавной буквы и заканчивать не точкой с запятой, а точкой. Фразу «В данной работе получены следующие основные результаты» принято оканчивать не двоеточием, а точкой.

8. В ряде случаев имеются мелкие грамматические ошибки.

Заключение

Указанные замечания не являются принципиальными и не снижают общую положительную оценку диссертации. Считаю, что диссертационная работа «Когерентные и поляризационные эффекты при формировании и усилении аттосекундных импульсов в модулированной активной среде плазменного рентгеновского лазера» соответствует всем требованиям пп. 9–11, 13, 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013) к кандидатским диссертациям, а её автор Хайрулин Ильяс Равильевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика.

Официальный оппонент,

д.ф.-м.н. (01.04.02), доцент, профессор кафедры теоретической физики,

ФГБОУ ВО Воронежский государственный университет

Почтовый адрес:

Россия, 394018, г. Воронеж, Университетская площадь, 1

Телефон: +7 (473) 220-87-56

e-mail: a-kornev@yandex.ru

15.11.2023

А.С. Корнев



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ВГУ»)	
Подпись	<i>Корнева А.С.</i>
Веряю	начальник отдела кадров
	должность
	<i>Зверева</i> 15.11.2023
	расшифровка подписи

Выражаю своё согласие на обработку моих персональных данных, связанных с защитой диссертации И.Р. Хайрулина