

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки Федерального
исследовательского центра
«Институт общей физики им.
А.М. Прохорова Российской
академии наук» (ИОФ РАН),

член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н.
С.В. Гарнов



2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Федерального исследовательского центра
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»

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

Диссертационная работа Хайрулина Ильяса Равильевича посвящена исследованию когерентных и поляризационных эффектов, которые возникают при распространении резонансного ВУФ/рентгеновского излучения через активную среду плазменного рентгеновского лазера, дополнительно облучаемую интенсивным лазерным полем, а также возможности использования этих эффектов с целью получения импульсов ВУФ/рентгеновского излучения с управляемой поляризацией, с субфемто-/аттосекундной длительностью и высокой энергией.

Актуальность этой работы обусловлена возможностью объединения преимуществ двух типов лабораторных источников коротковолнового когерентного излучения, а именно плазменных рентгеновских лазеров, которые представляют собой плазму ионов, у которых в процессе эволюции плазмы на одном из переходов достигается инверсия населённостей, и источников высоких гармоник, которые основаны на эффекте генерации гармоник высокого порядка фемтосекундного излучения оптического диапазона. Источники высоких гармоник позволяют генерировать аттосекундные импульсы с управляемыми в широких пределах спектрально-временными и поляризационными свойствами, но с низкой эффективностью. Плазменные рентгеновские лазеры позволяют

генерировать импульсы с высокой степенью когерентности и энергией на несколько порядков выше, чем у источников высоких гармоник. Однако генерируемые ими импульсы, как правило, имеют пикосекундную длительность, что препятствует их применению для исследования процессов на фемто-/аттосекундных временных масштабах; кроме того, излучение плазменных рентгеновских лазеров является неполяризованным, что не позволяет использовать его для диагностики процессов в магнитных и хиральных средах.

В качестве **основных задач** диссертационной работы автором обозначены разработка аналитических моделей, которые бы описывали основные закономерности распространения резонансного излучения затравки в активной плазме на основе водородоподобных и неонородобных ионов, дополнительно облучаемых интенсивным лазерным полем линейной поляризации, а также аналитическое и численное исследование возможности (а) формирования аттосекундных импульсов из квазимонохроматического резонансного излучения затравки, (б) увеличения эффективности усиления аттосекундных импульсов, образованных высокими гармониками, и (в) усиления и управления поляризацией излучения одной или нескольких высоких гармоник, которые образуют последовательность аттосекундных импульсов.

Диссертация состоит из введения, основной части работы, которая состоит из двух глав, заключения, в котором сформулированы основные результаты работы, а также списка используемой литературы из 81 наименования и списка работ автора из 26 наименований, в которых изложены материалы диссертации. Общий объем диссертационной работы – 165 страниц, включая 34 рисунка.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы её цели и задачи, а также описаны методы исследования; также приведена информация о структуре диссертации, изложено краткое содержание диссертационной работы, приведены защищаемые положения; дана оценка научной новизны и практической значимости полученных результатов, а также обоснована их достоверность; приведены сведения об апробации работы и о личном вкладе автора.

В первой главе диссертационной работы рассматриваются когерентные эффекты, которые возникают при распространении резонансного ВУФ/рентгеновского излучения через активную водородоподобную среду плазменного рентгеновского лазера, которая дополнительно облучается интенсивным лазерным полем линейной поляризации. В главе показано, что в активной плазме с невысокой концентрацией свободных электронов, при которой дисперсия плазмы на частоте лазерного поля оказывается умеренной, частотные компоненты резонансного поля не только усиливаются, но и генерируют когерентно рассеянное поле на комбинационных частотах. Показано, что в оптимальных условиях когерентно рассеянное поле позволяет преобразовывать пикосекундный импульс резонансного ВУФ/рентгеновского излучения, характерного для плазменных рентгеновских лазеров, в последовательность высокоинтенсивных аттосекундных импульсов благодаря появлению интенсивных синфазных комбинационных частот. Кроме того показано, что когерентно рассеянное поле позволяет значительно увеличить эффективность усиления аттосекундных импульсов, образованных совокупностью резонансных высоких гармоник, в модулированной активной плазме благодаря конструктивной интерференции излучения гармоник с когерентным рассеянным полем.

Во второй главе диссертации ранее предложенный в работе [Antonov V.A. et al., Phys. Rev. Lett. 123(24), 243903 (2019)] метод усиления аттосекундных импульсов

обобщён на случай активных сред плазменных рентгеновских лазеров на основе неоноподобных ионов. Показано, что в таких средах, в отличие от водородоподобных, можно усиливать две поляризационные компоненты резонансного поля затравки – параллельную и перпендикулярную к оси поляризации модулирующего лазерного поля, что позволяет решить актуальную задачу усиления эллиптически/циркулярно поляризованных высоких гармоник, эффективность генерации которых обычно на несколько порядков ниже, чем для линейно поляризованных. В главе показано, что в активной плазме неоноподобных ионов Ti^{12+} в оптимальных условиях удаётся усиливать совокупность высоких гармоник циркулярной/эллиптической поляризации как с сохранением поляризационного состояния, так и с увеличением эллиптичности поля благодаря преимущественному усилению более слабой поляризационной компоненты. Кроме того, предложен подход, который позволяет преобразовывать линейно поляризованные аттосекундные импульсы, образованные совокупностью высоких гармоник, в циркулярно поляризованные благодаря появлению фазового сдвига $\pi/2$ с одновременным их усилением, а не ослаблением, которое характерно для традиционных методов фазовращательной оптики в диапазоне ВУФ/рентгеновского излучения.

В **заключении** приведены основные результаты диссертации.

В диссертационной работе представлен ряд **новых научных результатов**:

1. Найдены оптимальные условия преобразования пикосекундного импульса ВУФ/рентгеновского излучения, характерного для плазменного рентгеновского лазера, в последовательность интенсивных аттосекундных импульсов с наибольшим контрастом.
2. Показана возможность существенного увеличения эффективности усиления аттосекундных импульсов благодаря эффекту взаимного усиления высоких гармоник, когда генерируемое когерентно рассеянное поле конструктивно интерферирует с излучением усиливаемых гармоник.
3. Обобщён на практически значимый случай неоноподобных активных плазменных сред ранее предложенный в работе [Antonov V.A. et al., Phys. Rev. Lett. 123(24), 243903 (2019)] для случая водородоподобной активной плазмы метод усиления аттосекундных импульсов.
4. Показана возможность усиления циркулярно и эллиптически поляризованного излучения совокупности высоких гармоник в оптически модулированной неоноподобной активной плазме как с сохранением поляризационного состояния, так и с увеличением эллиптичности поля вследствие преимущественного усиления более слабой поляризационной компоненты.
5. Показана возможность преобразования линейно поляризованных аттосекундных импульсов, образованных высокими гармониками, в циркулярно поляризованные с одновременным усилением в оптически модулированной неоноподобной активной плазме.

По содержанию текста диссертации имеется ряд замечаний и вопросов, из которых стоит выделить следующие: в ряде разделов (в частности, в разделах 2.5, 2.6) интенсивность лазерного поля, использовавшаяся в расчетах, приводится с точностью до трех знаков ($8,26 \times 10^{16}$ Вт/см², $8,45 \times 10^{16}$ Вт/см²). Вряд ли такая точность доступна экспериментально, особенно для рассматриваемых высокоинтенсивных полей. Не рассмотрен вопрос о необходимости столь точного контроля интенсивности лазерного поля.

Указанное замечание носит скорее рекомендательный характер и не влияет на общую положительную оценку диссертационной работы.

Достоверность полученных автором результатов обеспечивается корректным применением математических методов и надёжных экспериментальных данных о характеристиках рассматриваемых в работе активных сред, а также подтверждается согласованностью результатов численных расчётов с полученными аналитическими решениями, которые находятся в согласии с общепризнанными представлениями. Достоверность полученных результатов также подтверждается публикациями в высокорейтинговых научных журналах и их представлением на всероссийских и международных конференциях. Результаты диссертационной работы изложены в 26 работах, из которых 8 статей опубликовано в рецензируемых российских и зарубежных журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, и 18 статей и тезисов докладов в сборниках трудов всероссийских и международных конференций.

Все представленные в диссертации **результаты получены лично автором либо при его непосредственном участии**, о чём свидетельствуют его свободное владение материалом и первое авторство в публикациях, в которых изложены основные результаты диссертационной работы.

Заключение

Диссертационная работа Хайрулина Ильеса Равильевича «Когерентные и поляризационные эффекты при формировании и усилении аттосекундных импульсов в модулированной активной среде плазменного рентгеновского лазера» удовлетворяет требованиям, установленным «Положением о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор несомненно заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика.

Диссертационная работа Хайрулина И.Р. заслушана и обсуждалась на семинаре им. А.А. Рухадзе теоретического отдела ИОФ РАН 4 октября 2023 года, заседание № 1623. Отзыв обсужден и утвержден на заседании Ученого совета теоретического отдела 11.10.2023 (протокол N 15).

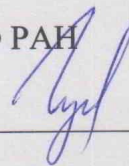
Отзыв составил главный научный сотрудник теоретического отдела ИОФ РАН, доктор физико-математических наук, А.М. Игнатов

Главный научный сотрудник теоретического отдела ИОФ РАН, доктор физико-математических наук



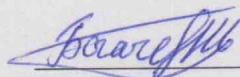
А.М. Игнатов

Председатель Ученого совета теоретического отдела ИОФ РАН
доктор физико-математических наук, профессор



Н.Г. Гусейн-заде

Ученый секретарь Ученого совета теоретического отдела ИОФ РАН
кандидат физико-математических наук
«11» октября 2023 г.



Н.Н. Богачев

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» ИОФ РАН

119991 ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38

Тел.: +7 (499) 503-8734

Факс: +7 (499) 503-8723

Email: office@gpi.ru