

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук Попова Александра Михайловича на диссертацию Хайрулина Ильяса Равильевича «Когерентные и поляризационные эффекты при формировании и усилении аттосекундных импульсов в модулированной активной среде плазменного рентгеновского лазера», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика.

Диссертация И.Р. Хайрулина посвящена теоретическому исследованию роли когерентных и поляризационных эффектов при формировании и/или усилении последовательности аттосекундных импульсов излучения вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) диапазона в активной среде плазменного рентгеновского лазера, модулированной сильным оптическим полем.

Тема диссертации представляется, несомненно, актуальной в связи перспективами использования фемто- и аттосекундных импульсов излучения ВУФ и рентгеновского диапазона для исследования и управления электронной динамикой в атомах, молекулах и твёрдых телах на её собственных временных масштабах. Существующие источники когерентного ВУФ/рентгеновского излучения не позволяют совместить аттосекундную длительность и высокую когерентность излучения, свойственные гармоникам оптического поля высокого порядка, с высокой интенсивностью и контролируемой поляризацией, которые могут быть достигнуты в лазерах на свободных электронах. В диссертационной работе И.Р. Хайрулина развит подход, потенциально позволяющий, до некоторой степени, сочетать эти свойства. Подход основан на преобразовании излучения одной или нескольких гармоник оптического поля высокого порядка в оптически модулированной активной среде плазменного рентгеновского лазера. Данный подход интересен ещё и тем, что потенциально позволяет расширить спектр усиления плазменного рентгеновского лазера на три порядка и сократить минимальную длительность усиливаемого сигнала с долей пикосекунды до долей фемтосекунды.

Работа состоит из введения, двух глав, заключения и списка литературы.

**Во введении** описаны современное состояние исследований и ключевые проблемы в области генерации электромагнитных импульсов аттосекундной длительности. Кроме того, сформулированы цели, новизна и практическая значимость диссертации, обоснована достоверность полученных результатов. Описаны личный вклад автора, апробация работы и выносимые на защиту положения. Приведены краткое содержание работы и её структура.

**В первой главе** исследуется роль взаимного когерентного рассеяния спектральных компонент резонансного ВУФ излучения линейной поляризации в оптически модулированной водородоподобной активной среде плазменного рентгеновского лазера. Данная глава, в свою очередь, состоит из трёх основных частей.

*Первую часть* составляют параграфы 1.1-1.3. В параграфе 1.1 сформулированы уравнения Максвелла – фон Неймана (обобщение уравнений Максвелла – Блоха на многоуровневую среду), описывающие преобразование резонансного ВУФ излучения затравки линейной поляризации с произвольным (в общем случае, непрерывным) спектром при



одномерном и однонаправленном распространении в водородоподобной активной среде рекомбинационного плазменного рентгеновского лазера, модулированной интенсивным монохроматическим лазерным полем видимого или ИК диапазона. Генерация усиленного спонтанного излучения произвольной поляризации учитывается посредством задания случайного начального распределения квантовых когерентностей на инвертированных переходах. Используемые уравнения являются нелинейными и в общем случае допускают только численное решение. В параграфе 1.2 в пренебрежении усиленным спонтанным излучением и изменением разностей населённостей на инвертированных переходах получено интегральное уравнение для Фурье-образа резонансного ВУФ излучения в среде и проанализированы основные свойства его решения. В частности, показано, что спектр усиления оптически модулированной активной среды содержит индуцированные линии усиления, отстоящие от частоты инвертированного перехода (с учётом её смещения вследствие эффекта Штарка) на целое число частот модулирующего поля. Также показано, что каждая из резонансных спектральных компонент ВУФ излучения, помимо усиления, генерирует когерентно-рассеянное поле на комбинационных частотах, отстоящих от её частоты на чётное число частот модуляции. Анализ влияния когерентного рассеяния резонансных компонент ВУФ излучения в комбинационные частоты на спектрально-временные характеристики излучения и составляет содержание первой главы. В параграфе 1.3 перечислены используемые в дальнейших расчётах параметры активной среды водородоподобных ионов  $Li^{2+}$ , а также кратко описан способ её создания.

*Вторую часть первой главы* образует параграф 1.4, посвящённый анализу возможностей использования когерентного комбинационного рассеяния резонансного ВУФ излучения для преобразования квазимонохроматического излучения затравки в последовательность аттосекундных импульсов. Исследованы случаи резонанса излучения затравки с центральной и боковыми индуцированными линиями усиления активной среды. Показано, что в активной среде водородоподобных ионов  $Li^{2+}$  излучением затравки с длиной волны около 13.5 нм может быть сгенерирован спектр синфазных комбинационных компонент, соответствующий последовательности субфемтосекундных импульсов с периодом повторения, равным половине периода модулирующего поля. Также показано, что эффективность когерентного комбинационного рассеяния ВУФ излучения возрастает с ростом невозмущённого коэффициента усиления активной среды и ослабевает с усилением плазменной дисперсии на частоте модулирующего оптического поля.

*В третьей части первой главы* (параграф 1.5) рассмотрен случай ВУФ излучения затравки, образованного совокупностью гармоник модулирующего поля высокого порядка в резонансе с индуцированными линиями усиления активной среды. Показано, что в определённых условиях взаимное когерентное рассеяние гармоник разных порядков в среде с умеренной плазменной дисперсией на частоте модулирующего поля позволяет в несколько раз повысить интенсивность выходного излучения по сравнению с аналогичной активной средой с сильной плазменной дисперсией на частоте модулирующего поля. Показана возможность использования данного эффекта для усиления субфемтосекундных импульсов ВУФ излучения с сохранением их формы и длительности.

**Вторая глава** диссертации посвящена исследованию возможности управления поляризационными свойствами резонансного ВУФ излучения при его распространении в оптически модулированной неоподобной активной среде столкновительного плазменного рентгеновского лазера.



*В первой части* (параграфы 2.1-2.4) представлена общая теория преобразования резонансного излучения произвольной поляризации в такой среде. В параграфе 2.1 описан теоретический подход, основанный на решении уравнений Максвелла – фон Неймана. Основными отличиями от уравнений, описывающих водородоподобный плазменный рентгеновский лазер (параграф 1.1), являются (а) учёт влияния модулирующего оптического поля посредством квадратичного (а не линейного) эффекта Штарка и (б) использование четырёхуровневой (а не пятиуровневой) модели среды. В параграфе 2.2 описаны характеристики рассматриваемой в дальнейших расчётах активной среды неоноподобных ионов  $Ti^{12+}$  (инверсия населённостей на длине волны 32.6 нм) и способ её создания. В параграфе 2.3 в приближении линейного взаимодействия излучения с веществом и без учёта спонтанного излучения получено интегральное уравнение для Фурье-образа резонансного ВУФ излучения в среде и проанализированы наиболее общие свойства его решения. В частности, показано, что индуцированные линии усиления для поляризационных компонент ВУФ излучения, параллельной и ортогональной к поляризации модулирующего поля, смещены друг от друга, что в общем случае препятствует усилению ВУФ поля эллиптической (или круговой) поляризации. В параграфе 2.4 проанализированы условия, при выполнении которых спектры усиления для ортогональных поляризационных компонент ВУФ излучения совмещаются. В результате появляется возможность усиления групп высоких гармоник модулирующего поля с произвольной поляризацией (а) с сохранением поляризационного состояния и (б) с увеличением эллиптичности.

*Вторая часть второй главы* (параграф 2.5) посвящена детальному численному анализу возможности усиления фемто- и субфемтосекундных импульсов ВУФ излучения эллиптической или круговой поляризации в активной среде неоноподобных ионов  $Ti^{12+}$ . Показано, что предложенный подход позволяет повысить интенсивность импульсов более чем на порядок при незначительном (порядка 10%) уменьшении их эллиптичности. Также показана возможность преобразования эллиптически поляризованных импульсов в циркулярно поляризованные с одновременным увеличением их интенсивности за счёт усиления более слабой компоненты поляризации.

*В третьей части второй главы* (параграф 2.6) аналитически и численно показана возможность преобразования поляризации одиночной гармоники модулирующего поля высокого порядка или совокупности таких гармоник из линейной в циркулярную. С этой целью предложено обеспечить небольшое рассогласование линий усиления для ортогональных поляризационных компонент (одной и той же спектральной компоненты) ВУФ поля, настроить каждую из гармоник с частотный интервал между указанными линиями усиления и ориентировать поляризацию ВУФ излучения на входе в среду под углом  $\pi/4$  относительно поляризации модулирующего поля. Показано, что в случае преобразования излучения одиночной гармоники при выполнении этих условий на определённой толщине среды поле гармоники приобретёт круговую поляризацию. В случае совокупности гармоник высокого порядка, образующих последовательность субфемтосекундных импульсов, на оптимальной толщине среды круговая поляризация будет достигнута в максимуме временной зависимости интенсивности каждого отдельного импульса.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

Диссертант проделал большую исследовательскую работу, безусловно обладающую высокой научной новизной. В первой главе на основе развитого в диссертационной работе аналитического подхода систематически проанализированы возможности и огра-



ничения метода формирования субфемтосекундных импульсов из квазимонохроматического излучения затравки в оптически модулированной активной среде плазменного рентгеновского лазера. Кроме того, показано, что взаимное когерентное рассеяние гармоник высокого порядка может существенно влиять на их усиление в оптически модулированной активной среде рентгеновского лазера. Во второй главе впервые рассмотрена возможность оптической модуляции наиболее значимого с практической точки зрения класса плазменных рентгеновских лазеров – столкновительных рентгеновских лазеров с инверсией населённостей на переходах неоноподобных ионов. При этом впервые показана возможность усиления групп гармоник с произвольной эллиптической (в том числе, циркулярной) поляризацией, а также управления поляризацией излучения высоких гармоник в процессе их усиления в оптически модулированной активной среде плазменного рентгеновского лазера.

И.Р. Хайрулин внёс определяющий вклад в решение рассмотренных в диссертации задач. В ряде случаев, в частности, для задач второй главы и в части вывода интегральных уравнений, представленных в параграфах 1.2 и 2.3, диссертант сыграл также определяющую роль и в формулировке задач.

И.Р. Хайрулин продемонстрировал свободное владение аналитическими и численными методами решения задач когерентной и нелинейной оптики. Следует отметить стремление диссертанта к использованию аналитических подходов даже при весьма общей постановке задач (см. параграфы 1.2 и 2.3). Полученные при этом результаты могут быть полезны широкому кругу специалистов, интересующихся резонансным взаимодействием электромагнитного излучения с веществом.

Основные результаты работы опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных рецензируемых научных журналах (Scientific Reports, Physical Review A, Physical Review Research, Photonics, Письма в ЖЭТФ, Квантовая электроника) и неоднократно докладывались на представительных российских и международных конференциях.

Достоверность полученных результатов подтверждается хорошим согласием аналитических решений с численными расчётами и не вызывает сомнений. Работа хорошо структурирована, научные положения и выводы обоснованы.

Вместе с тем по работе имеются следующие замечания.

1) В Главе 1 при обсуждении процесса генерации рентгеновского излучения на водородоподобных ионах лития  $\text{Li}^{2+}$  говорится, такие ионы образуются в плазме, формирующейся в микрокапиллярах из фторида лития (LiF). Следовательно, в плазме концентрации ионов лития и фтора равны друг другу. Следовало бы дополнительно обсудить возможную роль ионов фтора в динамике такой плазмы и ее излучения.

2) В Главе 2 автор рассматривает излучение плазмы из неоноподобных ионов титана ( $\text{Ti}^{12+}$ ). Следовало обсудить в работе методы получения такой плазмы многозарядных ионов, а также степень ее неоднородности (по концентрации и температуре), возможные длительности существования такой плазмы с требуемыми параметрами, что представляется важным для генерации импульсов когерентного излучения заданного качества.

3) На с. 22 автор пишет, что «квадраты модулей дипольных моментов свободносвязанных переходов в несколько десятков раз меньше квадратов модулей дипольных моментов рассматриваемых связанносвязанных переходов». Утверждение должно быть переформулировано, поскольку размерности указанных матричных элементов являются различными, что не допускает их прямое сопоставление. Вместе с тем, возможность не учи-



тывать процессы фотоионизации возбужденных атомов действительно должна быть как-то обоснована.

Отмеченные замечания не касаются принципиальных сторон проведенного в работе теоретического исследования и не снижают общей высокой оценки проделанной диссертантом работы и значимости полученных результатов, свидетельствующих о высокой квалификации автора как физика-теоретика. Диссертация полностью соответствует критериям ВАК, установленным Положением о присуждении учёных степеней, а её автор, И.Р. Хайрулин, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика.

Официальный оппонент,

д.ф.-м.н., профессор кафедры атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники,  
физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

Почтовый адрес:

Россия, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2, физический факультет

Телефон: +7 (495) 939-16-82

e-mail: alexander.m.popov@gmail.com

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

Попов А.М.

И.о. декана физического факультета МГУ,

д.ф.-м.н, профессор



Белокуров В.В.