

## ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

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 ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – «Лазерная физика»

И.Р. Хайрулин ведёт научно-исследовательскую работу в ИПФ РАН начиная с 2016 года, в том числе под моим руководством с 2017 года. Ещё будучи студентом радиофизического факультета ННГУ им. Н.И. Лобачевского, он активно включился в работу сразу по нескольким развиваемых в ИПФ РАН научным направлениям – аттосекундной физике, физике резонансных параметрических процессов в атомах и ионах и мессбауэровской гамма-фотонике – и продолжает успешно работать по всем этим направлениям, получив по каждому из них ряд важных научных результатов, нашедших отражение более чем в 25 статьях в высокорейтинговых научных журналах. В диссертационную работу включена часть полученных им результатов по тематике, находящейся на стыке первых двух из указанных выше научных направлений.

Работа И.Р. Хайрулина посвящена теоретическому исследованию возможностей создания компактных источников импульсов ВУФ/рентгеновского излучения с управляемой поляризацией, субфемто-/аттосекундной длительностью и высокой энергией импульсов. Эта тематика является безусловно актуальной и представляет большой интерес для реализации высокоточных пространственных и временных измерений сверхбыстрой временной динамики и пространственной структуры микро- и нанообъектов в химии, биологии, медицине и материаловедении, в том числе для измерений процессов, протекающих в магнитных и хиральных средах, обладающих свойством кругового дихроизма.

Следует отметить, что основные достигнутые в последнее время успехи в создании лабораторных источников когерентного короткоимпульсного (в том числе аттосекундного) ВУФ/рентгеновского излучения связаны с использованием генерации высоких гармоник фемтосекундного излучения оптического диапазона. Такой подход позволил создать источники излучения аттосекундной (до нескольких десятков аттосекунд) длительности с управляемыми в относительно широких пределах спектрально-временными и поляризационными свойствами. Однако эффективность генерации гармоник высокого порядка является весьма низкой и, в частности, быстро уменьшается с переходом ко всё более длинноволновым источникам накачки (позволяющим, с другой стороны, значительно

расширять спектр генерируемого излучения); более того, эта эффективность дополнительно уменьшается с ростом эллиптичности генерируемых гармоник. Определенной альтернативой такому типу коротковолновых источников являются плазменные рентгеновские лазеры – лабораторные импульсные источники, генерирующие излучение с высокой степенью когерентности и энергией на несколько порядков выше, чем у источников на основе генерации гармоник. Однако генерируемые импульсы в этом случае, как правило, имеют пикосекундную длительность, что препятствует применению таких источников для изучения процессов на фемто-/аттосекундных временных масштабах; кроме того, излучение плазменных рентгеновских лазеров является неполяризованным, что не позволяет его использовать для диагностики процессов в магнитных и хиральных средах. В диссертационной работе И.Р. Хайрулина изучены возможности получения импульсов ВУФ/рентгеновского излучения с управляемой поляризацией, с субфемто-/аттосекундной длительностью, как у источников высоких гармоник, и высокой энергией импульсов, характерной для плазменных рентгеновских лазеров. Основой для достижения таких целей служит резонансное взаимодействие сгенерированного излучения высоких гармоник с активной средой плазменного рентгеновского лазера, дополнительно облучаемой тем же самым интенсивным низкочастотным лазерным полем, которое использовалось для генерации этих гармоник. Интенсивное низкочастотное излучение вызывает модуляцию частоты резонансного перехода вследствие эффекта Штарка, что приводит к обогащению спектра усиления активной среды новыми линиями, т.е. к его уширению. Как продемонстрировано в данной работе, при определенных оптимальных условиях это даёт возможность эффективного преобразования пикосекундного импульса резонансного излучения в последовательность субфемто-/аттосекундных импульсов или усиления таких последовательностей ультракоротких импульсов, а использование в качестве усиливающей среды ионов определенных типов и надлежащий подбор экспериментальных условий позволяют управлять состоянием поляризации усиливаемых импульсов. Диссертация И.Р. Хайрулина обладает несомненной научной новизной и содержит ряд важных оригинальных результатов, ясно сформулированных автором в заключении к диссертации.

Следует отметить, что проведенные И.Р. Хайрулиным исследования по теме диссертации представляют собой успешное сочетание использования построенной им упрощенной аналитической модели и разработанных численных кодов для расчетов в рамках более общей системы уравнений. Во всех важных случаях им проведено сравнение результатов, полученных в рамках обоих подходов, и найдены границы применимости аналитической модели. Кроме того, И.Р. Хайрулиным были учтены результаты расчетов из первых принципов, проведенных ранее его соавторами для анализа ограничений на

интенсивность модулирующего поля. Отмечу также, что в ряде важных случаев соискатель опирался на имеющиеся экспериментальные данные и консультации со стороны ведущих специалистов по затрагиваемым в диссертации вопросам, в частности, по физике процессов в активных средах плазменных рентгеновских лазеров. Всё вышесказанное обеспечивает достоверность полученных И.Р. Хайрулиным научных результатов.

Оценивая важность проделанной работы, следует отметить, что исследованные в диссертации когерентные и поляризационные эффекты открывают возможность создания лабораторного источника интенсивных аттосекундных импульсов ВУФ/рентгеновского излучения с высокой яркостью и управляемой поляризацией, которые могут быть использованы в рентгеновской спектроскопии, микроскопии, биологии, физике магнитных явлений и аттосекундной физике. Кроме того, предложенная аналитическая модель позволяет без использования трудоёмких численных расчётов сформулировать основные условия, необходимые для генерации и усиления многочастотного излучения с необходимыми спектрально-временными и поляризационными характеристиками, и обеспечивает удобный и адекватный инструментарий для дальнейших теоретических исследований в данной области. Всё вышесказанное подчёркивает практическую и теоретическую значимость полученных результатов.

В ходе работы И.Р. Хайрулин продемонстрировал высокую работоспособность, незаурядную научную активность, инициативу, критическое отношение к получаемым результатам и хорошее владение аналитическими и численными методами решения научных задач. Он проанализировал большой объём материала и продемонстрировал отличное умение работать с литературой. И.Р. Хайрулин имеет богатый опыт выступлений на российских и международных научных конференциях и семинарах, многократно становился победителем и призером различных конкурсов научных работ молодых ученых. Результаты диссертационной работы опубликованы в 8 рецензируемых статьях в высокорейтинговых научных журналах и отражены в 18 статьях и тезисах докладов в сборниках трудов всероссийских и международных конференций.

Поставленные задачи исследованы И.Р. Хайрулиным со всей необходимой глубиной и тщательностью, а полученные результаты изложены в диссертационной работе ясно и подробно. Достигнутый И.Р. Хайрулиным высокий уровень компетентности в области лазерной физики не вызывает никаких сомнений.

Считаю, что представленная И.Р. Хайрулиным диссертационная работа «Когерентные и поляризационные эффекты при формировании и усилении аттосекундных импульсов в модулированной активной среде плазменного рентгеновского лазера» соответствует

