

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе
Национального исследовательского
Нижегородского государственного
университета им. Н.И. Лобачевского,
доктор физико-математических наук



В.Б. Казанцев

« 29 » ноября 2018 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

о диссертации Емелиной Анны Сергеевны

«Генерация гармоник высокого порядка лазерного излучения среднего ИК
диапазона в газах»,

представленной на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук по специальности

01.04.21 – лазерная физика

Диссертация Емелиной А.С. посвящена теоретическому исследованию генерации высоких гармоник оптического излучения в процессе ионизации газов интенсивными лазерными импульсами. Генерация гармоник высокого порядка возникает вследствие ионизации атомов электрическим полем лазерного импульса, ускорения электронов и возвратных соударений электронов с родительскими ионами. Особое внимание это явление привлекает в связи с возможностью генерации аттосекундных импульсов, имеющих большую перспективу использования в различных приложениях, в том числе, для

контроля электронной динамики в атомах и молекулах. Кроме того, спектр генерируемых высоких гармоник сам по себе содержит спектроскопическую информацию об ионизируемом атоме или молекуле, включая информацию о динамике внутренних орбиталей. Рост публикаций за последнее десятилетие указывает на неослабевающий интерес к данной теме исследования и ее актуальность в настоящее время. Представленные в диссертации исследования относятся к достаточно быстро развивающемуся новому направлению в современной физике – аттосекундной физике. Таким образом, **актуальность темы** диссертационной работы не вызывает сомнений.

Целью настоящей диссертационной работы является построение теоретической модели для расчета спектра высоких гармоник с учетом влияния магнитного поля лазерного импульса и динамики населенностей атомарных уровней, а также использование этой модели для исследования факторов, ограничивающих эффективность генерации высоких гармоник (дрейф свободных электронов в магнитном поле, опустошение основного состояния атомов) в широком диапазоне интенсивностей и длин волн лазерных импульсов и для различных атомных мишеней; для анализа возможности генерации рентгеновских волновых форм с модуляцией на аттосекундных временах; для поиска способов повышения эффективности генерации высоких гармоник при добавлении к лазерному импульсу поля на второй гармонике.

Рассмотренные в работе цели достигаются использованием современных методов лазерной физики, квантовой механики и атомной физики. Тематика исследования, формулировка целей и задач исследования, используемые методы решения, область приложения исследования указывают, что представленная диссертационная работа **соответствует паспорту специальности 01.04.21 – лазерная физика.**

Структура и содержание диссертации. Диссертация Емелиной А.С. состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и изложена на 123 страницах, включая 45 рисунков. Список цитированной литературы содержит 100 библиографических ссылок.

Во введении кратко обосновывается актуальность диссертационной работы, определяются цели и задачи работы, обсуждаются ее научная и практическая значимость, приводятся сведения о публикациях и апробации результатов, а также содержатся положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации разрабатывается теоретический подход для приближенного (полуаналитического) решения нестационарного уравнения Шрёдингера для нахождения высокочастотного дипольного момента с учетом эффектов истощения основного состояния атома и дрейфа электронов в континууме под действием магнитного поля лазерного импульса. В рамках этого подхода исследована генерация высоких гармоник излучения среднего ИК-диапазона в различных газах (водороде, гелии и однократно ионизированном гелии). Показана возможность генерации излучения с энергиями фотонов порядка и выше 10 кэВ в гелии и ионизированном гелии с использованием лазерных импульсов с длиной волны 4-10 мкм. Исследовано относительное влияние негативных факторов, ограничивающих эффективность генерации высоких гармоник при высоких интенсивностях и длинах волн: (а) опустошение основного состояния и (б) влияние магнитного поля лазерного импульса. Для водорода, гелия и ионов гелия найдены диапазоны интенсивностей и длин волн, в которых влияние обоих факторов не важно, диапазоны, в которых доминирует тот или иной ограничивающий фактор, а также диапазоны, где важны оба фактора. Показано, что в условиях сильного магнитного дрейфа электронов в континууме спектр генерируемого излучения становится дугообразным, и дается объяснение этого эффекта. Результаты исследования важны с точки зрения разработки компактных источников когерентного жесткого рентгеновского излучения, способных составить конкуренцию крупномасштабным синхротронным источникам.

Во второй главе диссертации с использованием разработанной модели за рамками электродипольного приближения исследована возможность генерации рентгеновского излучения с биениями амплитуды на зептосе-

кундных масштабах. Высокочастотные биения в отклике атомной системы возникают в результате интерференции различных траекторий электронов на заднем фронте лазерного импульса при условии, что лазерный импульс является предельно коротким (содержит 1-2 осцилляции поля). Проведенные ранее исследования этого явления не учитывали влияние магнитного поля на движение электронов в континууме. Исследования, выполненные во второй главе диссертации А.С. Емелиной показывают, что магнитный дрейф электрона не разрушает механизм генерации рентгеновских волновых форм, а в некоторых случаях выполняет полезную функцию, а именно, играет роль спектрального фильтра, изменяющего относительные веса вкладов в сигнал высоких гармоник от различных событий перерассеяния.

Третья глава диссертации посвящена исследованию генерации высоких гармоник в поле двухкомпонентного лазерного импульса, содержащего линейно поляризованное поле на основной частоте и добавочное поле (сопоставимое по интенсивности с основным) на второй гармонике, поляризованное вдоль ортогонального направления. Исследования проводятся в значительной мере в контексте объяснения результатов эксперимента, проведенного в Японии группой Р. Ганеева, где для генерации высоких гармоник использовался оптический параметрический генератор с центральной длиной волны 1310 нм и его вторая гармоника. Поскольку рабочей средой в эксперименте являлась плазма, состоящая из ионов серебра, золота и цинка, теоретическая модель, разработанная автором диссертации для $1s$ состояния в водородоподобной системе, была обобщена для активных электронных орбиталей с различным орбитальным моментом. На основе обобщенной модели дается объяснение наблюдаемому в эксперименте увеличению эффективности генерации гармоник при добавлении второй компоненты к основному лазерному импульсу. Находится оптимальный сдвиг фаз между первой и второй гармониками лазерного импульса, соответствующий максимальной эффективности генерации отдельных гармоник.

Научная новизна исследования. Диссертационная работа Емелиной А.С. представляет собой цельное, обладающее новизной исследование в стремительно развивающейся области современной физики – аттосекундной физике. Новизна наиболее существенных результатов состоит в следующем: проведено обобщение широко используемого «приближения сильного поля» для аналитического решения нестационарного уравнения Шрёдингера с целью учета влияния магнитного поля лазерного импульса; сделаны выводы об абсолютной и относительной роли различных факторов, ограничивающих эффективность генерации гармоник высокого порядка в различных газах в различных диапазонах параметров лазерных импульсов; показано, что магнитное поле лазерного импульса может играть полезную роль при получении высококонтрастных рентгеновских волновых форм субаттосекундной длительности; усовершенствованное «приближение сильного поля» модернизировано таким образом, чтобы учитывать отличие активной орбитали атома от $1s$ орбитали. Полученные автором результаты являются новыми и актуальными в данной области и, несомненно, должны привлечь большое внимание специалистов. **Достоверность** полученных результатов и **научная обоснованность** выводов диссертации, степень адекватности предложенных методов и моделей подтверждаются физической аргументированностью и согласием результатов с результатами прямого численного решения нестационарного уравнения Шрёдингера и с результатами выполненных ранее экспериментов.

Практическая значимость работы. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы при разработке источников рентгеновского излучения, в частности, обладающего сверхкороткой (аттосекундной и субаттосекундной) длительностью или содержащего амплитудную модуляцию на аттосекундных временных масштабах. Такие источники необходимы для исследования внутриатомных и внутриядерных

процессов. Найденные оптимальные параметры двухкомпонентных лазерных импульсов могут быть использованы для повышения мощности источников вакуумного ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения.

По диссертации имеются следующие замечания.

1. При обобщении «приближения сильного поля» для учета влияния магнитного поля лазерного импульса рассматривается только компонента дипольного момента вдоль направления электрического поля лазерного импульса. Пренебрежение компонентой дипольного момента вдоль направления распространения лазерного импульса представляется недостаточно обоснованным. Было бы уместным исследовать частотный спектр этой компоненты и определить вклад этого спектра в полный спектр генерации высоких гармоник при больших интенсивностях и длинах волн лазерных импульсов.
2. В Главе 1 диссертации (в частности, на рис. 1.1, рис. 1.4) показывается, что при учете опустошения основного состояния в рамках «приближения сильного поля» в спектре высоких гармоник может значительно уменьшаться спектральная интенсивность не только гармоник в области края «плато» (генерируемых только в центре лазерного импульса), но и на всем «плато» в целом. Остается непонятной причина сильного уменьшения спектральной интенсивности у гармоник, генерируемых на переднем фронте лазерного импульса (на интервале времени, в котором населенность основного состояния атома близка к единице).
3. Из рис. 2.4, 2.6, 2.8 диссертации видно, что спектральная интенсивность содержит модуляцию с малым частотным масштабом вблизи двух рассматриваемых пиков. Причиной этой модуляции, судя по

всему, является интерференция короткой и длинной траекторий, соответствующих одной и той же энергии возвращающегося электрона, но разному времени его рождения. Неясным остается то, почему магнитное поле лазерного импульса не приводит к существенному подавлению длинной траектории (по аналогии с тем, как это происходит при параметрах лазерных импульсов, рассмотренных в главе 1).

4. При расчете спектров генерации высоких гармоник в плазме, состоящей из ионов серебра и золота предполагается, что атомарный ион имеет одну активную ($4d$ или $5d$) орбиталь с определенным магнитным квантовым числом m . Остается неясным, какое магнитное число m бралось в расчетах. Кроме того, при рассмотрении динамики атомной системы в электрическом поле, не обладающем линейной поляризацией, вероятности ионизации орбиталей с различными числами m могут быть сопоставимы и давать существенный вклад в генерацию высоких гармоник. Пренебрежение этими эффектами представляется недостаточно обоснованным.

Перечисленные замечания не снижают высокой оценки выполненных исследований и не ставят под сомнение достоверность и значимость полученных результатов, а также сделанных на их основе выводов. Результаты диссертации Емелиной А.С. опубликованы в 33 печатных работах, в том числе в 4 статьях в международных реферируемых журналах, включая такие ведущие специализированные физические журналы, как «Physical Review A» и «Optics Express». Основные выводы диссертации полностью соответствуют целям, задачам и положениям, выносимым на защиту. Автореферат диссертации правильно и полно отражает содержание работы.

Результаты диссертационной работы Емелиной А.С. могут быть рекомендованы для использования в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского, Институте общей физики РАН, Воронежском государственном университете, Институте прикладной физики РАН и др.

Диссертация А.С. Емелиной «Генерация гармоник высокого порядка лазерного излучения среднего ИК диапазона в газах» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям. По объему выполненных исследований, новизне предложенных подходов, значимости полученных результатов А.С. Емелина безусловно заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 - лазерная физика.

Отзыв обсужден и принят на семинаре кафедры электродинамики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского 27 ноября 2018 года (протокол № 3).

Заведующий кафедрой электродинамики ННГУ,
доктор физ.-мат. наук, профессор



А.В. Кудрин

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского» 603950, Россия, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23,
тел.: +7 (831) 462-30-03, e-mail: unn@unn.ru, www.unn.ru