

ОТЗЫВ

официального оппонента Попова Александра Михайловича
на диссертационную работу Мининой Анастасии Александровны
«Адиабатическое приближение для процессов нелинейной ионизации и генерации
высших гармоник в интенсивных лазерных полях», представленную на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.22 – теоретическая физика

Диссертационная работа Мининой А.А. посвящена развитию аналитического подхода к теоретическому описанию процесса генерации высших гармоник в интенсивных низкочастотных лазерных полях. Тема диссертации является актуальной, поскольку процесс генерации высших гармоник на протяжении длительного времени является наиболее исследуемым и практически важными процессом, возникающим при взаимодействии интенсивного лазерного поля с веществом. Генерация высших гармоник в газовых средах используется для создания компактных источников когерентного ультрафиолетового и вакуумного ультрафиолетового излучения, аттосекундных импульсов, а также спектроскопии сверхбыстрых процессов. Необходимость в развитии новых аналитических подходов для описания этого существенно нелинейного процесса обусловлена тем, что аналитический подход даёт возможность описать особенности спектров генерации гармоник и надпороговой ионизации, а также предсказать возможные новые эффекты в этих спектрах для различных параметров лазерного поля. Несмотря на то, что процесс генерации гармоник изучается на протяжении многих лет, в существующих теориях до сих пор остаётся невыясненным или требует дополнительного изучения ряд вопросов, одним из которых, например, является учёт взаимодействия связанных электронов атома с лазерным полем, так и с атомным потенциалом.

Строго говоря, точный учёт взаимодействия атомного электрона как со световым полем, так и с атомным потенциалом возможен только при численном интегрировании нестационарного уравнения Шредингера. Однако, возможности численного интегрирования ограничена интенсивностью, частотой, поляризацией и длительностью светового импульса и прежде всего одноэлектронным приближением. Более того, результаты численного интегрирования уравнения Шредингера не позволяют интерпретировать общие закономерности нелинейных процессов взаимодействия лазерного поля с атомами с физической точки зрения, так как они получены при конкретных значениях лазерного импульса. Поэтому проблема создания общих аналитических моделей, описывающих процессы генерации гармоник и надпороговой ионизации, остаются весьма актуальными, несмотря на возможность численного решения.

Диссертация Мининой А.А. содержит Введение, Обзор литературы, четыре главы, Заключение и Список литературы, включающий 172 наименования. Общий объём работы составляет 130 страниц.

Во введении обоснована актуальность диссертации, сформулирована цель работы, представлены положения, выносимые на защиту, аргументированы практическая и научная

значимость работы. Также представлен список публикаций по теме диссертации и сведения об апробации работы.

В разделе Обзор литературы содержится краткое описание существующих теоретических моделей по теме диссертации.

В первой главе диссертации представлено краткое изложение метода эффективного радиуса и предложено его обобщение на случай лазерного поля с произвольной огибающей. На основании данного метода предложен приближённый подход для нахождения комплексной квазиэнергии. Также представлена процедура вычисления наведённого дипольного момента, определяющего амплитуду генерации высших гармоник, с помощью полученной поправки к комплексной квазиэнергии, обусловленной полем гармоники.

Вторая глава посвящена применению адиабатического приближения для вычисления кулоновских факторов и амплитуды фотоотрыва. За основу берётся выражение для амплитуды фотоотрыва в теории Келдыша, которая затем вычисляется в низкочастотном пределе. Далее показана процедура вычисления кулоновского фактора для амплитуды фотоотрыва, которая также основывается на малости времени подбарьерного движения электрона по сравнению с характерным периодом лазерного поля. Достоверность представленных результатов подтверждается путём сравнения аналитических данных для импульса и энергии фотоэлектрона, вычисленных с/без учёта кулоновского фактора, с экспериментальными данными.

В третьей главе адиабатическое приближение развито на случай генерации высших гармоник. Автор проводит вычисление индуцированного дипольного момента с помощью приближённого математического метода, известного как метод перевала, что приводит его к уравнениям для нахождения времён ионизации и возврата электрона к атомному остову и выражению для амплитуды генерации гармоник в виде суммы парциальных амплитуд. Стоит отметить, что каждая из этих парциальных амплитуд соответствует классической замкнутой траектории электрона. Показано, что парциальные дипольные моменты могут быть представлены в виде произведения трёх сомножителей, каждый из которых соответствует хорошо известному трёхшаговому сценарию генерации гармоник. Проведен асимптотический анализ развитой теории с методом квантовых орбит, из которого вытекает их совпадение в предельном случае. Стоит отметить, что предложенный в диссертации метод упрощает квазиклассическую интерпретацию процесса генерации гармоник, так как получаемые с его помощью времена ионизации и рекомбинации действительно, а не комплексны, как в случае метода квантовых орбит.

Наиболее важная в отношении практических приложений четвёртая глава диссертации посвящена процессу генерации гармоник атомными системами в бициркулярном лазерном поле. В начале главы приведено сравнение аналитических расчётов с результатами численного интегрирования нестационарного уравнения Шрёдингера. Хорошее соответствие результатов указывает на точность и достоверность предложенной диссертантом аналитической модели. При анализе полученных спектров генерации гармоник выявлены некоторые новые особенности, такие как отсутствие плато, изменение спектрального состава и поляризационных свойств гармоник от

задержки по времени между двумя импульсами бициркулярного поля. Далее в данной главе объяснены причины возникновения этих эффектов и более детально проанализирована зависимость спектра гармоник и их поляризационных свойств от временной задержки между импульсами бициркулярного поля. Существенной новизной обладает предложенный в диссертации метод управления спектром гармоник и их степенью циркулярной поляризации с помощью временной задержки между компонентами бициркулярного поля.

В Заключении представлены основные результаты диссертации.

Оценивая диссертационную работу Мининой А.А. в целом, можно сказать, что она обладает целостностью, является законченной, материал изложен последовательно, ясно, в нём представлены необходимые выводы конечных результатов. Автором выполнено основательное и разностороннее исследование, которое содержит целый ряд новых результатов. Так в работе впервые дано обобщение модели эффективного радиуса с двумя связанными состояниями на случай интенсивного лазерного поля с произвольной временной зависимостью. На основе данного обобщения предложена аналитическая модель для описания процесса генерации высших гармоник в интенсивном низкочастотном лазерном поле, учитывающая как взаимодействие оптически активного электрона с сильным лазерным полем, так и воздействие атомного остова на электрон, что реализуется путём введения кулоновского фактора в амплитуду генерации гармоник. Также предложено использовать задержку по времени между компонентами бициркулярного поля для контроля над спектром гармоник и их степенью циркулярной поляризации.

Ценность полученных в работе результатов связана с возможностью применения развитой аналитической модели для исследования генерации гармоник атомами и обнаружения новых каналов управления генерацией высших гармоник. Существует много экспериментальных групп, занимающихся изучением процесса генерации гармоник, для которых данная теоретическая модель будет весьма полезна, как для интерпретации полученных ими результатов, так и для предсказания используемых лазерных параметров для получения новых эффектов в процессе генерации гармоник.

По работе имеются некоторые замечания.

1) Автор справедливо указывает, что высокие гармоники лазерного излучения возникают в результате фоторекомбинации электрона в процессе его перерассеяния на родительском ионе. Этот процесс, по крайней мере на начальном этапе, который и рассматривается в диссертационной работе, носит спонтанный характер. В то же время автор ограничивается лишь полуклассической теорией, полагая, что интенсивность излучения гармоник определяется квадратом модуля матричного элемента дипольного оператора, посчитанного на волновых функциях, описывающих эволюцию атома в сильном поле. Такой подход вызывает некоторые возражения, особенно в случае сильных полей, когда существенно опустошение основного состояния (A.V. Bogatskaya, E.A. Volkova, V.Yu. Kharin, and A.M. Popov, "Polarization response in extreme nonlinear optics: when can the semiclassical approach be used?" *Laser Phys. Lett.* 13, 045301 (2016)). Альтернативный последовательный квантовоэлектродинамический подход развивается в (Bogatskaya A.V., Volkova

E.A., Popov A.M. Spontaneous transitions in atomic system in the presence of high intensity laser field Europhysics Letters, 116, 14003 (2016); A.I. Magunov and V.V. Strelkov, "S-Matrix approach to the problem of high-harmonic generation in the field of intense laser wave," Phys. Wave Phenom. 25(1), 24 (2017)) и ряде других работ тех же авторов. Я полагаю, что было бы важным как-то обсудить результаты, полученные в диссертации, с учетом этих недавних работ. Это особенно важно при генерации гармоник в режиме "выедания" начального (основного) состояния сильным лазерным полем (см. с.58)

2) Мне кажется, что следовало бы более детально остановиться на пределах применимости развитых автором моделей: по частоте, интенсивности и длительности лазерного воздействия, типу атомов, в частности, возможности ограничиться одноэлектронным приближением. Это тем более важно, поскольку численные расчеты на основе прямого интегрирования нестационарного уравнения Шредингера для динамики атома в поле волны проводились также в одноэлектронном приближении. Также в работе, ввиду использования приближённых методов, встречается много разложений, однако не везде оговорено, почему автор ограничивается тем или иным порядком разложения. Так, например, на стр. 35 автор не аргументирует, почему при разложении уравнения (2.5) он ограничивается лишь членами второго порядка. При этом уравнение (2.2) разложено до третьего порядка, а (2.4) – до первого.

3) В первой главе метод эффективного радиуса развит для двухуровневой системы (с орбитальными моментами $l=0$ и $l=1$), однако вся дальнейшая теория строится лишь для состояний с $l=0$. Также автором в принципе не аргументировано, почему он ограничивается только двумя орбитальными моментами

4). Имеется также ряд замечаний редакционного характера. Например, на с.58 следовало бы пояснить, что означают классический и квантовый механизмы обмена энергии электрона в континууме. В ряде случаев автор допускает использование жаргона "этапы формирования гармоник (ионизация, распространение, рекомбинация)" (с.7, с.103), "борноподобный ряд" (с.16), "контроль над свойствами ГВГ" (с.93).

Отмеченные замечания не касаются принципиальных сторон проведенных в работе исследований и не снижают высокой оценки уровня проделанной диссертантом работы и значимости полученных результатов. В целом диссертация Мининой А.А. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, посвящённую актуальной области современной лазерной физики. Автореферат достаточно полно и адекватно отражает содержание диссертации. Достоверность представленных результатов обусловлена совпадением полученных диссертантом аналитических результатов с существующими результатами численного интегрирования уравнения Шредингера, использованием в работе известных методов теоретической и математической физики, отсутствием противоречий предложенной модели с уже существующими теориями. Результаты работы опубликованы в ведущих рецензируемых журналах (Physical Review A, Phys. Rev. Lett., Квантовая электроника), докладывались на представительных российских и


международных конференциях и хорошо известны специалистам в области, к которой относится данное исследование. Тематика и содержание диссертации полностью отвечают специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Считаю, что данная диссертационная работа полностью соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, а ее автор, Минина Анастасия Александровна, несомненно заслуживает присвоения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Официальный оппонент:

Попов Александр Михайлович,

доктор физико-математических наук, профессор

 15.07.2019

ФГБОУ ВО Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ)

119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, 1

Тел.: +7 (495) 939-49-54; email: alexander.m.popov@gmail.com

Подпись Попова Александра Михайловича заверяю.

Директор НИИЯФ МГУ,

профессор



Натасюк М.И.