

На правах рукописи

Емелина Анна Сергеевна

**ГЕНЕРАЦИЯ ГАРМОНИК ВЫСОКОГО ПОРЯДКА
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
СРЕДНЕГО ИК ДИАПАЗОНА В ГАЗАХ**

01.04.21 - лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН), г. Нижний Новгород

Научный руководитель: Рябкин Михаил Юрьевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ФГБНУ Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук

Официальные оппоненты: Фролов Михаил Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Воронежского государственного университета

Попов Александр Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Защита состоится "17" декабря 2018 г. в _____ на заседании диссертационного совета Д002.069.02 в Институте прикладной физики РАН (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной физики РАН.

Автореферат разослан "10" ноября 2018 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Э. Б. Абубакиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Предмет исследования

Данная диссертационная работа посвящена детальному исследованию процесса генерации гармоник высокого порядка при взаимодействии интенсивного лазерного излучения среднего ИК диапазона с газами. Особое внимание в работе уделяется эффектам, ограничивающим эффективность генерации гармоник, таким как опустошение основного состояния и магнитный дрейф электрона и исследованию методов компенсации этих нежелательных эффектов. Кроме того, в работе исследуются способы получения импульсов субаттосекундной длительности при помощи механизма ГТВП. Исследования проводятся для различных активных сред, а также для широкого диапазона параметров лазерного излучения, в том числе как для одноцветных, так и для многоцветных полей. Полученные в данной работе результаты представляют интерес, как с фундаментальной, так и с практической точки зрения.

Актуальность работы

Генерация гармоник представляет собой нелинейно-оптическое явление, при котором некоторое число фотонов падающего на среду излучения преобразуется в один фотон с суммарной энергией. Под генерацией гармоник высокого порядка (ГТВП) принято подразумевать такой режим, в котором число генерируемых гармоник и их интенсивности значительно превышают значения, предсказываемые теорией возмущений. Явление ГТВП начало наблюдаться и исследоваться в конце 80х - начале 90х годов 20го века [8, 12, 20, 21] в связи с появлением мощных фемтосекундных лазерных источников.

Интерес к эффекту ГТВП продиктован большими возможностями его различных приложений. Так, на протяжении многих лет зондирование быстротекущих процессов в веществе являлось и является очень актуальной задачей. Обычно используемый для этого pump-probe метод (накачка-зондирование) основан на проведении серии измерений, в каждом из которых система подвергается воздействию последовательности двух импульсов – возбуждающего и зондирующего. Импульс накачки инициирует исследуемый процесс, а зондирующий импульс используется для измерения той или иной физической величины, характеризующей состояние исследуемого образца. Очевидно, что для получения временного разрешения, необходимого для исследования данного процесса, длительности импульсов накачки и зондирования должны быть меньше или хотя бы сравнимы с характерным временем развития исследуемого процесса. Зондирование молекулярной колебательно-вращательной динамики, как правило, требует использования фемтосекундных импульсов, в то время как для зондирования электронной динамики необходимо использование импульсов аттосекундной длительности, а для исследования внутриядерных процессов требуются уже зептосекундные им-

пульсы. Важным условием для получения ультракоротких импульсов является наличие излучения с широким спектром. Например, для получения ультракоротких импульсов длительностью порядка сотни аттосекунд необходимо излучение с шириной спектра порядка 20 эВ, тогда как для получения спектрально ограниченного импульса длительностью 1 ас требуется излучение спектральной шириной не менее 1.8 кэВ. Таким образом, ГГВП интенсивного лазерного излучения в газах является одним из методов получения аттосекундных и зептосекундных импульсов, так как обеспечивает необходимую для этого спектральную ширину генерируемого излучения. Получение и использование таких импульсов является основным предметом аттосекундной физики, науки, получившей в последнее время стремительное развитие [9].

Благодаря компактным источникам излучения, созданным на основе ГГВП лазерного излучения в газах, был произведён ряд выдающихся фундаментальных исследований. Впервые оказались возможными исследование и контроль внутриатомной электронной динамики (см. обзоры [3, 5, 15]) на её собственных временных масштабах; примерами её экспериментального исследования стали: спектроскопия Оже-релаксации в атомах криптона с аттосекундным временным разрешением [11], наблюдение туннелирования атомного оптического электрона через потенциальный барьер в сильном лазерном поле [31], прямое измерение времен задержки между моментами ионизации из разных электронных состояний атома [28] и твёрдого тела [6] с аттосекундным временным разрешением, исследование динамики локализации электрона в результате аттосекундной фотоионизации молекулы [26], исследование сверхбыстрых обратимых лазерно-индуцированных превращений «изолятор-проводник» в диэлектрике [27] и др.

ГГВП может являться основой для создания компактных источников когерентного ВУФ и рентгеновского излучения, которые в свою очередь могут использоваться для приложений в спектроскопии и микроскопии различных материалов, в том числе наноструктур и биологических сред. Измерение спектров ГГВП позволяет получать информацию о структуре молекул. Использование длинноволновой накачки, которая обеспечивает широкое плато в спектре гармоник, позволяет получать структурную информацию о сечениях элементарных процессов в атомах и молекулах, о структуре и внутренней динамике молекул и др. С помощью ГГВП в газах можно получать когерентное излучение в «водяном окне» [7, 29], которое важно для биохимических исследований в области длин волн между 2.3 и 4.4 нм, или энергий фотонов от 284 эВ до 543 эВ, где углеродсодержащие биологические объекты эффективно поглощают излучение, в то время как вода относительно прозрачна.

Благодаря высокой когерентности излучения, генерируемого в процессе ГГВП, оно может эффективно использоваться для управления временными характеристиками излучения лазеров ВУФ и рентгеновского диапазона. Так, экспериментальные исследования показали возможность значительного

улучшения когерентных свойств излучения рентгеновских плазменных лазеров [32, 33] и лазеров на свободных электронах [2, 19] с использованием одной из гармоник лазерного поля высокого порядка в качестве затравки.

Параллельно с развитием экспериментальной техники генерации высоких гармоник и получения аттосекундных импульсов развивались и теоретические методы описания указанных процессов. Полуклассическая теория перерассеяния [8] дала ключ к пониманию важнейших аспектов этих процессов; более детальное их описание стало возможным в результате развития численных и аналитических методов решения соответствующих задач. Развито значительное количество различных численных методов, позволяющих (как правило, в приближении одного активного электрона) получать решение нестационарного уравнения Шредингера «из первых принципов» (см., например, [10, 13, 18, 22, 24, 30]). В рамках определенных предположений удастся также построить аналитические и полуаналитические теории (см., например, [1, 4, 14, 20, 23]), позволяющие описать процесс ГВВП, не прибегая к численному решению уравнения Шредингера.

Современный уровень развития техники аттосекундного эксперимента ставит новые задачи перед теорией. Так, в последние годы наблюдается значительный прогресс в создании мощных фемтосекундных источников с большими длинами волн (от единиц до десятка микрон) по сравнению с широко использовавшимися до недавнего времени титан-сапфировыми лазерами (с длиной волны около 0.8 мкм). Выявился ряд значительных преимуществ использования таких длинноволновых источников. Однако, оказывается, например, что численные исследования процесса ГВВП при использовании источников среднего ИК диапазона требуют столь огромных вычислительных и временных ресурсов, что зачастую расчёты оказываются физически невозможными. С другой стороны, выясняется, что имевшиеся аналитические методы не учитывают ряд физических эффектов, становящихся всё более важными по мере увеличения длины волны действующего на атомы или молекулы лазерного излучения. Поэтому разработка аналитической теории, позволяющей учитывать факторы, ограничивающие эффективность ГВВП в длинноволновом режиме, а также проводить расчёты в широком диапазоне параметров лазерного излучения и для различных нелинейных сред, является актуальной проблемой. Решение данной проблемы составляет значительную часть данной диссертации.

Целью работы является:

- разработка аналитического описания генерации гармоник высокого порядка с учётом таких ограничивающих факторов, как опустошение основного состояния атома и влияние магнитного поля лазерного излучения;
- применение развитого аналитического подхода к изучению влияния ограничивающих факторов на процесс ГВВП для различных параметров лазерного излучения и для различных нелинейных сред;

- поиск способов компенсации магнитного дрейфа электрона при ГГВП лазерного излучения среднего ИК диапазона;
- поиск возможностей эффективной генерации ультракоротких рентгеновских волновых форм

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы – 123 страницы, включая 45 рисунков. Список литературы состоит из 100 наименований.

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована ее цель, аргументированы научная новизна исследований и достоверность полученных результатов, показана практическая значимость полученных результатов, представлены сведения об апробации работы, сформулированы выносимые на защиту научные положения и дан краткий обзор литературы по теме диссертации.

В **первой главе** диссертации развит теоретический подход, позволяющий рассчитывать нелинейный отклик атома на воздействие высокоинтенсивного излучения на основе аналитических квантово-механических расчётов. Этот подход основан на использовании приближения сильного поля [20], модифицированного с целью учёта опустошения связанных уровней атомов рабочей среды и магнитного дрейфа электрона в высокоинтенсивном лазерном поле. С учётом внесенных поправок, учитывающих влияние ограничивающих факторов, конечное выражение для дипольного момента приобретает следующий вид:

$$x(t) = i \int_0^{\infty} d\tau \left(\frac{\pi}{\varepsilon + i\tau/2} \right)^{3/2} d_x^* (\vec{p}_{st}(t, \tau) - \vec{A}(t)) d_x (\vec{p}_{st}(t, \tau) - \vec{A}(t - \tau)) E(t - \tau) \times \\ \times \exp \left[-i(S_d(t, \tau) + S_m(t, \tau)) - \int_0^t \frac{W(t)}{2} dt - \int_0^{t-\tau} \frac{W(t)}{2} dt \right] + c.c., \quad (1)$$

где $S(\vec{p}, t, t')$ – квазиклассическое действие, которое описывает свободное движение электрона в поле лазерного импульса:

$$S(\vec{p}, t, t') = \int_{t'}^t \left(\frac{[\vec{p} - \vec{A}(t'')]^2}{2} + I_p \right). \quad (2)$$

Для водородоподобных атомов матричный элемент, описывающий переходы из основного состояния в непрерывный спектр, имеет вид:

$$\vec{d}(\vec{p}) = i \left(\frac{2^{7/2} (2I_p)^{5/4}}{\pi} \right) \frac{\vec{p}}{(\vec{p}^2 + 2I_p)^3}. \quad (3)$$

Выражение для скорости ионизации $W(t)$ определяется выражением

$$W(t) = C_i^2 \left(\frac{2\kappa^2}{|E(t)|} \right)^{\frac{2Z}{\kappa}-1} \exp\left(-\frac{2\kappa^3}{3|E(t)|}\right) \exp\left(-\frac{\alpha Z^2 |E(t)|}{I_p \kappa^3}\right), \quad (4)$$

где C_i^2 – числовой коэффициент, который определяется из условия нормировки волновой функции; $\kappa = \sqrt{2I_p}$, где I_p – потенциал ионизации атома; $E(t)$ – поле лазерного импульса, Z – эффективный заряд ядра; S_m – добавка к фазе, приобретаемая электроном при движении в свободном пространстве и возникающая из-за учёта магнитного поля лазерного излучения:

$$S_m = \int_i^t \frac{1}{2} \left\{ p_z - \left[\frac{p_x}{c} \left(\frac{A(t'')}{c} \right) - \frac{1}{2c} \left(\frac{A(t'')}{c} \right)^2 \right]^2 \right\} dt'' . \quad (5)$$

В рамках этого подхода исследована генерация высоких гармоник лазерного излучения среднего ИК диапазона в различных газах. Показана возможность генерации высоких гармоник с энергиями фотонов более 10 кэВ при воздействии на атомы и ионы гелия фемтосекундными импульсами мощного лазерного излучения с центральной длиной волны, соответственно, 8 – 10.6 мкм (см. рис. 1б) и порядка 4 мкм.

Проанализирована относительная роль опустошения основного состояния и влияния магнитного поля в ограничении эффективности генерации гармоник, создаваемых импульсами среднего ИК диапазона в различных газовых мишенях. Показано, что относительная роль исследованных ограничивающих факторов в значительной степени определяется длиной волны лазерного излучения, а также потенциалом ионизации атома. В частности, для водорода во всем исследуемом диапазоне длин волн доминирующим фактором является опустошение основного состояния, а в случае иона гелия, имеющего значительно больший потенциал ионизации, магнитный дрейф электрона играет основную роль в ограничении эффективности выхода гармоник. В случае промежуточного потенциала ионизации, например, при воздействии на атомы гелия интенсивными фемтосекундными импульсами излучения с центральной длиной волны $\lambda = 2-3.9$ мкм основным ограничивающим эффектом является опустошение связанных состояний (рис. 1, а), в то время как при воздействии более длинноволнового излучения ($\lambda = 8-10.6$ мкм) основным фактором подавления генерации ГВП является влияние магнитного поля лазерного излучения (рис. 1, б). В последнем случае следует ожидать генерации ГВП с энергиями фотонов до 20 кэВ; при этом энергия наиболее эффективно генерируемых фотонов достигает 10–12 кэВ.

Результаты проведённого исследования представляют интерес с точки зрения выяснения перспектив создания компактных источников ультракорот-

ких импульсов жёсткого когерентного рентгеновского излучения, способных составить конкуренцию крупномасштабным синхротронным источникам. Кроме того, проанализировано влияние магнитного дрейфа электрона на форму спектра генерируемого излучения (см. рис. 1б), которая при продвижении в длинноволновую область становится дугообразной. Приведено теоретическое объяснение наблюдаемого эффекта, основанное на анализе спектрограмм генерируемого излучения. Как видно из рис. 2, влияние магнитного дрейфа электрона подавляет вклад длинных электронных траекторий, что приводит к возникновению провала в низкочастотной части спектра, а также самых длинных среди коротких траекторий, из-за чего возникает спад в области отсечки плато; таким образом, форма спектра качественно меняет свою форму (см. рис. 1).

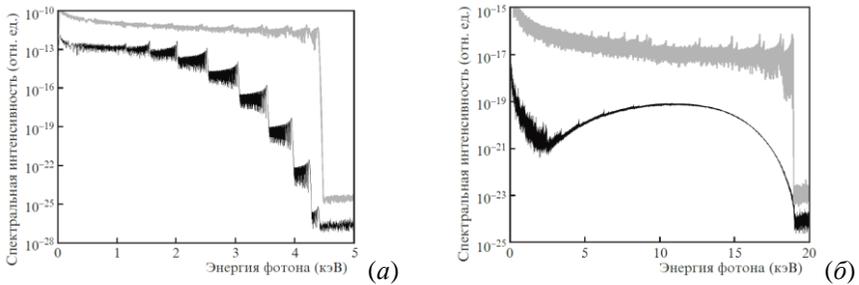


Рис. 1. Спектры ГВП для атома гелия в поле лазерных импульсов (импульсы с гауссовым профилем и длительностью на полувысоте $6T$, где T – период лазерного поля) с различными центральными длинами волн излучения и пиковыми интенсивностями: $\lambda = 2$ мкм, $I = 3.7 \times 10^{15}$ Вт/см² (а), $\lambda = 8$ мкм, $I = 10^{15}$ Вт/см² (б). Серые кривые – результаты вычислений в рамках теории Левенштейна без учёта ограничивающих факторов

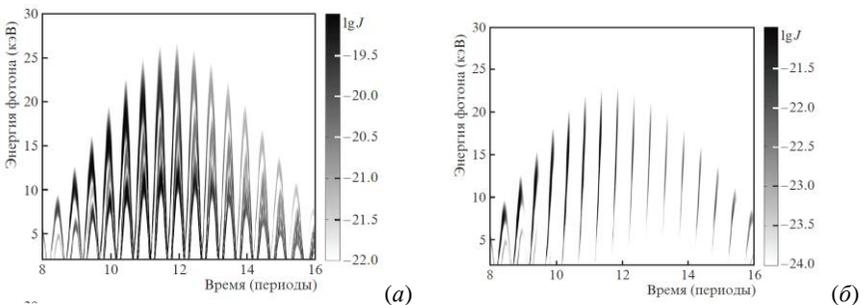


Рис. 2. Спектрограммы сигнала ГВП для атома гелия в поле лазерного импульса ($\lambda = 8$ мкм, $I = 1.2 \times 10^{15}$ Вт/см²), рассчитанные в электродипольном приближении (а) и за его рамками (б)

Во **второй главе** с использованием теоретического описания ГГВП за пределами электродипольного приближения рассмотрено влияние магнитно-

го дрейфа электронов на реализуемость и предельные возможности предложенного недавно метода [16] генерации зептосекундных рентгеновских осцилляций; в основе этого метода лежит интерференция вкладов в излучение высоких гармоник от множественных возвратов электронного волнового пакета к иону.

При рассмотрении генерации на заднем фронте короткого (длительностью в полтора периода) лазерного импульса (рис. 3) в спектре гармоник наблюдается два ярко выраженных пика (рис. 4), которые обусловлены вкладами различных электронных траекторий от различных полуциклов лазерного поля.

Рис. 3. Нормированное электрическое поле лазерного импульса $E(t)/E_0$, $\varphi = \pi/8$ (пунктирная линия) и оконная функция, используемая при анализе сигнала гармоник высокого порядка (сплошная линия)

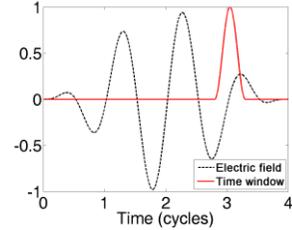
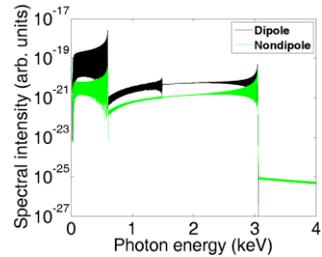


Рис. 4. Спектр рентгеновского всплеска, генерируемого на заднем фронте лазерного импульса с центральной длиной волны $\lambda_0 = 9$ мкм и фазой заполнения $\varphi = \pi/8$; показаны результаты, полученные в электродипольном приближении и за его рамками

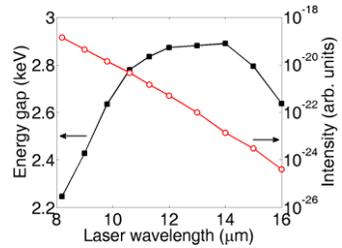


В определенные интервалы времени вклады от разных электронных траекторий могут интерферировать, формируя регулярную картину интерференционных биений, имеющих длительность вплоть до зептосекундной в случае использования лазеров с центральной длиной волны порядка 10 мкм. Эти биения могут обладать высоким контрастом, если фаза заполнения лазерного импульса подобрана должным образом. Одним из возможных препятствий для формирования сигналов зептосекундной длительности с использованием этой схемы является наличие магнитного поля лазерного импульса, влияние которого может значительно изменять спектральные интенсивности гармоник высокого порядка при использовании лазерных источников с центральной длиной волны 10 мкм и более.

Исследования, проведенные в данной главе, показывают, что магнитный дрейф электрона не разрушает механизм генерации рентгеновских волновых форм, а в некоторых случаях выполняет полезную функцию, играя роль спектрального фильтра, изменяющего относительные веса вкладов в сигнал высоких гармоник от различных событий перерассеяния (см. рис. 4, светлая кри-

вая). При продвижении в более длинноволновую область влияние магнитного поля возрастает, что влечёт за собой уменьшение выхода гармоник, особенно в низкочастотной области спектра, но при этом энергетический зазор между двумя пиками в спектре становится шире, что может обеспечить генерацию более коротких биений. Показано, что для источников среднего ИК диапазона управление фазой заполнения импульса в сочетании со спектральной фильтрацией позволяет скомпенсировать влияние магнитного дрейфа электрона и обеспечивает формирование интенсивных высококонтрастных биений длительностью менее 0,8 аттосекунд. Ограничения на длину волны лазера для реализации этого подхода определяются растущим дисбалансом между вкладами интерферирующих электронных траекторий и общим снижением эффективности генерации высоких гармоник при продвижении в более длинноволновую область (рис. 5).

Рис. 5. Энергетический зазор между низкоэнергетичным и высокоэнергетичным пиками (квадраты) и их интенсивность (круги) в зависимости от длины волны лазера для рентгеновского излучения, генерируемого на заднем фронте лазерного импульса с оптимизированной фазой заполнения



Третья глава диссертации посвящена теоретическому и экспериментальному изучению генерации гармоник высокого порядка в протяженной газовой среде, облучаемой двухцветным лазерным полем с ортогонально поляризованными спектральными компонентами:

$$E_x(t) = E_1(t) = E_0 \exp\left[-\ln(4) \frac{t^2}{T^2}\right] \exp(-i\omega t) + c.c.$$

$$E_y(t) = E_2(t) = \sqrt{\alpha} E_0 \exp\left[-\ln(4) \frac{t^2}{T^2}\right] \exp(-2i\omega t + i\phi) + c.c. \quad (6)$$

В данной главе задача о ГГВП в двухцветном поле рассматривается в значительной мере в контексте сравнения с экспериментом, проведенным в Японии группой Р. Ганеева, где исследовалась ГГВП в протяженном плазменном образце с использованием излучения оптического параметрического усилителя с центральной длиной волны 1310 нм и его второй гармоники при их сравнимых интенсивностях. В экспериментах, проведенных группой Р. Ганеева, наблюдалось значительное увеличение выхода гармоник высокого порядка по сравнению со случаем одноцветной накачки. В ходе сравнения результатов численных расчетов с результатами эксперимента выяснилось, что широко используемая теория ГГВП, предполагающая основным состоянием частицы 1s состояние, не воспроизводит экспериментально наблюдаемый спектр ГГВП. В связи с этим предложено развитие теории с целью учета

реальных квантовых состояний различных видов частиц (в данной работе – для ионов серебра, золота и цинка). В рамках данного исследования было получено общее выражение для дипольного матричного элемента, соответствующего переходу от произвольного связанного состояния водородоподобного атома в непрерывный спектр:

$$d(p) = \frac{i^{l-1} 2^{2l+3/2} (l+1)! \gamma^{l+3/2}}{\pi \sqrt{n}} \sqrt{(n-l-1)!(n+l)!(2l+1)} \times \\ \times \nabla_p \left[p^l P_l \left(\frac{p_z}{p} \right) \sum_{m=0}^{n-l-1} \frac{(2\gamma)^m}{m!(2l+1+m)!(n-l-1-m)!} \frac{d}{d\gamma^m} \frac{\gamma}{(\gamma^2 + p^2)^{l+2}} \right]. \quad (7)$$

На рис. 6 представлены спектры ГВВП в ионе серебра при использовании матричного элемента перехода, используемого в оригинальной теории Левенштейна (черная кривая) и матричного элемента для перехода из реального исходного состояния электрона (светлая кривая) в непрерывный спектр. Из сравнения с рис. 7, на котором изображен спектр, полученный в ходе физического эксперимента группой Р. Ганеева, видно, что спектр, вычисленный с учётом реального исходного атомарного состояния, хорошо согласуется с экспериментальными данными.

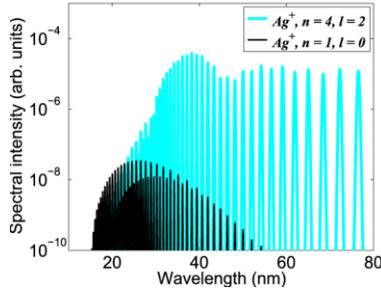


Рис. 6. Спектры откликов иона серебра для различных $d(p)$: черная линия – $n = 1$ и $l = 0$, светлая линия – $n = 4$ и $l = 2$

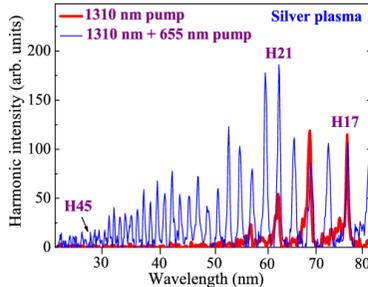


Рис. 7. Спектры гармоник, полученные в плазме серебра с использованием одноцветной (1310 нм, жирная линия) и двухцветной (1310 нм +655 нм, тонкая линия) лазерной накачки

Кроме того, в данной главе дается теоретическое объяснение наблюдаемому увеличению эффективности генерации гармоник в двухкомпонентном лазерном поле с ортогональными поляризациями частотных компонент. Как видно из рис. 8, *а*, в двухцветном случае максимум поля сдвигается вправо. Это означает, что по сравнению с одноцветным случаем большее количество электронов возвращается к иону с максимальной скоростью, что увеличивает интенсивность выходного излучения. В то же время, как видно из рис. 8, *б*, поперечное смещение электрона, возникающее из-за наличия поля второй гармоники, для большинства траекторий, вносящих вклад в ионизацию, меньше ширины волнового пакета. Это означает, что отклонение электрона полем второй гармоники не снижает существенным образом вероятность рекомбинации, а, значит, не оказывает значительного влияния на эффективность генерации гармоник. Принимая во внимание указанные факторы, получаем объяснение увеличения сигнала гармоник при использовании двухкомпонентного лазерного поля скрещенной поляризации.

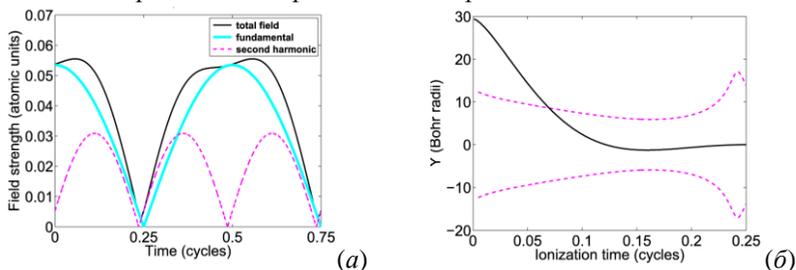


Рис. 8. (*а*) Абсолютное значение суммарного поля (черная кривая) и его отдельных компонент (светлая и пунктирная кривые); (*б*) поперечное смещение электрона в момент его возвращения к родительскому иону (чёрная кривая) и ширина волнового пакета электрона в момент его возвращения к родительскому иону (пунктирная кривая). Приведены результаты для $\alpha=1/3$, $\varphi=1/4$

Научная новизна

- Усовершенствована теория Левенштейна (приближение сильного поля) с целью учёта факторов (опустошение основного состояния атома и влияние магнитного поля лазерного излучения), ограничивающих эффективность генерации высоких гармоник.
- Впервые проведены детальные исследования явления ГТВП в поле интенсивного излучения ближнего и среднего ИК диапазонов с учётом влияния существенных ограничивающих факторов для широкого диапазона параметров лазерного излучения и для различных газов; сделаны выводы об абсолютной и относительной роли исследованных ограничивающих факторов в

процессе ГГВП в зависимости от параметров излучения и нелинейной среды и об их влиянии на форму и предельно достижимую ширину спектров высоких гармоник.

- Показано, что магнитное поле лазерного излучения не всегда оказывает разрушительное влияние на процесс ГГВП, а при определенных условиях может играть полезную роль при получении высококонтрастных рентгеновских волновых форм субаттосекундной длительности.

- На основе проведенных детальных исследований процесса ГГВП при воздействии на среду двухцветным лазерным полем различных конфигураций показано, что при использовании комбинации полей первой и второй гармоники с взаимно ортогональными линейными поляризациями эффективность генерации гармоник может быть значительно выше, чем в случае полей с параллельными поляризациями; найдены микроскопические и макроскопические факторы, обеспечивающие наблюдаемый выигрыш.

- Усовершенствованная модель Левенштейна модернизирована таким образом, чтобы учитывать начальное квантовое состояние, характерное для частиц определенной нелинейной среды

Практическая ценность

Для изучения физических процессов с достаточным временным разрешением необходимо использовать импульсы длительностью не больше длительности изучаемого физического процесса. Таким образом, для изучения внутриатомных и внутриядерных процессов необходимо уметь получать импульсы аттосекундной и субаттосекундной длительности. Одним из способов получения таких ультракоротких импульсов является ГГВП. Использование источников среднего ИК диапазона позволяет получать рентгеновские волновые формы субаттосекундной длительности. В результате проведенных исследований найдены оптимальные условия для достижения максимально эффективной генерации таких импульсов.

Увеличение энергии генерируемых фотонов, то есть расширение плато спектра гармоник, является одним из необходимых условий получения ультракоротких импульсов. В данной работе показана возможность получения фотонов с энергиями порядка 10 кэВ в разных газовых мишенях при оптимально подобранных параметрах источников ближнего или среднего ИК диапазона.

Низкая интенсивность генерируемых ультракоротких импульсов является одним из недостатков ГГВП как способа получения таких импульсов. Одним из результатов настоящей диссертации является предложенный способ увеличения выхода гармоник посредством использования двухцветного лазерного поля скрещенной конфигурации.

Основные положения, выносимые на защиту

- Эффекты опустошения атомарных уровней и магнитного дрейфа электрона в высокоинтенсивном лазерном поле, влияние которых на процесс

генерации высоких гармоник возрастает с увеличением длины волны лазерного излучения, могут быть адекватно учтены путем соответствующей модификации аналитической теории, основанной на приближении сильного поля.

- По мере увеличения длины волны лазерной накачки в интервале от ближнего до среднего ИК диапазона, наряду с общим уменьшением выхода гармоник, происходят существенные изменения профиля спектральной интенсивности высоких гармоник; эти изменения связаны с изменением относительных вкладов различных групп электронов в суммарный сигнал гармоник.

- Использование лазерных источников среднего ИК диапазона позволяет генерировать в различных газовых средах гармоники высокого порядка с энергиями фотонов порядка 10–20 кэВ.

- На основе эффекта генерации высоких гармоник при использовании предельно коротких импульсов излучения среднего ИК диапазона, несмотря на ограничения, связанные с магнитным дрейфом электрона, возможна генерация рентгеновских волновых форм субаттосекундной длительности.

- Использование двухцветной лазерной накачки со скрещенными линейными поляризациями спектральных компонент позволяет значительно повысить эффективность генерации гармоник в протяженной газовой среде.

Достоверность полученных результатов подтверждается хорошим согласием аналитически полученных выводов с результатами численных расчётов и физических экспериментов. Так, достоверность развитой в диссертации аналитической теории, учитывающей опустошение основного атомарного состояния и влияние магнитного поля лазерного импульса, подтверждается согласием аналитически полученных результатов с результатами имеющихся трёхмерных численных расчётов. В ряде частных и предельных случаев полученные в диссертации результаты согласуются с имеющимися литературными данными. Результаты теоретического рассмотрения ГГВП в двухцветном поле демонстрируют хорошее согласие с результатами реального эксперимента, проведенного группой Р. Ганеева (Япония).

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на 27 российских и международных конференциях, в том числе:

Frontiers of Nonlinear Physics (FNP), Нижний Новгород - Елабуга - Нижний Новгород, Россия (2013); Нижний Новгород - Санкт Петербург, Россия (2016);

International Laser Physics Workshop (LPHYS), Sophia, Bulgaria (2014); Armenia, Erevan (2016);

International Conference on Multiphoton Processes (ICOMP), Shanghai, China (2014); Budapest, Hungary (2017);

Ultrafast Optics 2013 (UFO IX) – Davos, Switzerland; International Conference on Coherent and Nonlinear Optics / International Conference on Lasers, Applications, and Technologies (ICONO/LAT 2013), Москва, Россия;

4th International Conference on Attosecond Physics (ATTO 2013), Paris, France
High-Intensity Lasers and High-Field Phenomena (HILAS), Berlin, Germany (2014);

XXIX International Conference on Photonics, Electronics and Atomic Collisions (ICPEAC 2015), Toledo, Spain;

11th Super Intense Laser Atom Physics Conference (SILAP 2015), Bordeaux, France;

VII International Symposium and Young Scientist School "Modern Problems of Laser Physics" (MPLP 2016), Новосибирск, Россия;

XVII научная конференция по радиофизике, Россия (Нижний Новгород);

XVIII научная конференция по радиофизике, Россия (Нижний Новгород);

XIX научная конференция по радиофизике, Россия (Нижний Новгород);

XX научная конференция по радиофизике, Россия (Нижний Новгород);

Семинар по физике многофотонных процессов на тему «Генерация высоких гармоник интенсивным двухцветным лазерным излучением в газовых средах», ИОФ РАН, Москва, 14 октября 2015 г.

По теме диссертации опубликовано 33 работы, из которых 4 статьи в реферируемых журналах, 8 статей в сборниках и 21 тезис докладов в сборниках материалов конференций.

Основные результаты

- Аналитическая теория, основанная на приближении сильного поля, модифицирована с целью адекватного учета важных факторов (опустошения основного атомарного состояния и магнитного дрейфа электрона), ограничивающих эффективность процесса генерации высоких гармоник в высокоинтенсивном низкочастотном лазерном поле, а также корректного учета типа исходного атомарного состояния.

- Показано, что по мере увеличения длины волны лазерной накачки в интервале от ближнего до среднего ИК диапазона, наряду с уменьшением эффективности генерации высоких гармоник, происходят значительные изменения профиля спектральной интенсивности генерируемых гармоник, которые связаны с изменением относительных вкладов различных групп электронов в суммарный сигнал гармоник.

- Показано, что при использовании лазерных источников среднего ИК диапазона в различных газовых средах могут быть эффективно сгенерированы гармоники высокого порядка с энергиями фотонов до 10-20 кэВ.

- Доказано, что преобразование предельно коротких импульсов излучения среднего ИК диапазона в рентгеновские волновые формы субаттосекундной длительности на основе эффекта генерации высоких гармоник возможно, несмотря на ограничения, связанные с магнитным дрейфом электрона, и найдены оптимальные условия такого преобразования.

- Показано, что значительного повышения выхода гармоник в протяженной газовой среде можно достичь посредством использования двухцвет-

ного лазерного поля со скрещенными линейными поляризациями спектральных компонент, и найдены микроскопические и макроскопические факторы, обуславливающие достигаемый выигрыш.

Список литературы

1. Платоненко В.Т. Интерференция электронных траекторий и генерация высоких гармоник света в кулоновской системе // Квантовая электроника. 2001. Т. 31, № 1, С. 55-60.
2. Ackermann S., Azima A., Bajt S. et al. Generation of coherent 19- and 38-nm radiation at a free-electron laser directly seeded at 38 nm // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 111, № 11. Art. no. 114801.
3. Agostini P., DiMauro L.F. The physics of attosecond light pulses // Rep. Prog. Phys. 2004. V. 67, № 11. P. 813-855.
4. Becker W., Long S., McIver J.K. Modeling harmonic generation by a zero-range potential // Phys. Rev. A. 1994. V. 50, № 2. P. 1540.
5. Calegari F., Sansone G., Stagira S., Vozzi C., Nisoli M. Advances in attosecond science // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 2016. V. 49, № 6. Art. no. 062001.
6. Cavalieri A.L., Muller N., Uphues Th., Yakovlev V.S., Baltuska A., Horvath B., Schmidt B., Blumel L., Holzwarth R., Hendel S., Drescher M., Kleineberg U., Echenique P.M., Kienberger R., Krausz F., Heinzmann U. Attosecond spectroscopy in condensed matter // Nature. 2007. V. 449, № 7165. P. 1029-1032.
7. Chang Z., Rundquist A., Wang H., Murnane M.M., Kapteyn H.C. Generation of coherent soft X rays at 2.7 nm using high harmonics // Phys. Rev. Lett. 1997. V. 79, № 16. P. 2967-2970.
8. Corkum P.B. Plasma perspective on strong field multiphoton ionization // Phys. Rev. Lett. 1993. V. 71, № 13. P. 1994-1997.
9. Corkum P.B., Krausz F. Attosecond science // Nature Phys. 2007. V. 3, № 6. P. 381-387.
10. Cormier E, Lambropoulos P. Above-threshold ionization spectrum of hydrogen using B-spline functions // J. Phys. B. 1997. V. 30, № 1. P. 77-91.
11. Drescher M., Hentschel M., Kienberger R., Uiberacker M., Yakovlev V., Scrinzi A., Westerwalbesloh Th., Kleineberg U., Heinzmann U., Krausz F. Time-resolved atomic inner-shell spectroscopy // Nature. 2002. V. 419, № 6909. P. 803-807.
12. Ferray M., L'Huillier A., Li X.F., Lompré L.A., Mainfray G., Manus C. Multiple-harmonic conversion of 1064 nm radiation in rare gases // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 1988. V. 21, № 2. P. L31-L35.
13. Fleck J.A., Jr, Morris J.R., Feit M.D. Time-dependent propagation of high energy laser beams through the atmosphere // Appl. Phys. 1976. V. 10, № 2. P. 129-160.
14. Frolov M. V et al. Analytic formulae for high harmonic generation // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 2009. V. 42, № 3. Art. no. 035601.
15. Gallmann L., Cirelli C., Keller U. Attosecond science: recent highlights and future trends // Annu. Rev. Phys. Chem. 2012. V. 63, № 1. P. 447-469.

16. Hernandez-Garcia C., Perez-Hernandez J.A., Popmintchev T., Murnane M.M., Kapteyn H.C., Jaron-Becker A., Becker A., Plaja L. Generation of bright isolated attosecond soft X-ray pulses driven by multicycle midinfrared lasers // *Phys. Rev. Lett.* 2013. V. 111, № 3. Art. no. 033002.
17. Krausz F., Ivanov M. Attosecond physics // *Rev. Mod. Phys.* 2009. V. 81, № 1. P. 163-234.
18. Krause J.L., Schafer K.J., Kulander K.C. High-order harmonic generation from atoms and ions in the high intensity regime // *Phys. Rev. Lett.* 1992. V. 68, № 24. P. 3535-3538.
19. Lambert G., Hara T., Garzella D. et al. Injection of harmonics generated in gas in a free-electron laser providing intense and coherent extreme-ultraviolet light // *Nature Phys.* 2008. V. 4, № 4. P. 296-300.
20. Lewenstein M., Balcou Ph., Ivanov M.Yu., L'Huillier A., Corkum P.B. Theory of high-harmonic generation by low-frequency laser fields // *Phys. Rev. A.* 1994. V. 49, № 3. P. 2117-2131.
21. McPherson A., Gibson G., Jara H., Johann U., Luk T.S., McIntyre I.A., Boyer K., Rhodes C.K. Studies of multiphoton production of vacuum-ultraviolet radiation in the rare gases // *J. Opt. Soc. Am. B.* 1987. V. 4, № 4. P. 595-601.
22. Muller H.G. Numerical simulation of high-order above-threshold-ionization enhancement in argon // *Phys. Rev. A.* 1999. V. 60, № 2. P. 1341-1350.
23. Perez-Hernandez J.A., Roso L., Plaja L. Harmonic generation beyond the Strong-Field Approximation: the physics behind the short-wave-infrared scaling laws // *Opt. Express.* 2009. V. 17, № 12. P. 9891-9903.
24. Popov A.M., Tikhonova O.V., Volkova E.A. Numerical investigation of atomic dynamics in strong ultrashort laser pulses // *Laser Phys.* 2011. V. 21, № 9. P. 1593-1612.
25. Strelkov V.V., Sterjantov A.F., Shubin N.Yu., Platonenko V.T. XUV generation with several-cycle laser pulse in barrier-suppression regime // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 2006. V. 39, № 3. P. 577-589.
26. Sansone G., Kelkensberg F., Perez-Torres J.F., Morales F., Kling M.F., Siu W., Ghafur O., Johnsson P., Swoboda M., Benedetti E., Ferrari F., Lepine F., Sanz-Vicario J.L., Zherebtsov S., Znakovskaya I., L'Huillier A., Ivanov M.Yu., Nisoli M., Martin F., Vrakking M.J.J. Electron localization following attosecond molecular photoionization // *Nature* 2010. V. 465, № 7229. P. 763-766.
27. Schultze M., Bothschafter E.M., Sommer A., Holzner S., Schweinberger W., Fiess M., Hofstetter M., Kienberger R., Apalkov V., Yakovlev V.S., Stockman M.I., Krausz F. Controlling dielectrics with the electric field of light // *Nature.* 2013. V. 493, № 7430. P. 75-78.
28. Schultze M., Fiess M., Karpowicz N., Gagnon J., Korbman M., Hofstetter M., Neppl S., Cavalieri A.L., Komninos Y., Mercouris Th., Nicolaidis C.A., Pazourek R., Nagele S., Feist J., Burgdorfer J., Azzeer A.M., Ernstorfer R., Kienberger R., Kleineberg U., Goulielmakis E., Krausz F., Yakovlev V.S. Delay in photoemission // *Science.* 2010. V. 328, № 5986. P. 1658-1662.

29. Spielmann Ch., Burnett N.H., Sartania S., Koppitsch R., Schnürer M., Kan C., Lenzner M., Wobrauschek P., Krausz F. Generation of coherent x-rays in the water window using 5-femtosecond laser pulses // *Science*. 1997. V. 278, № 5338. P. 661-664.

30. Tong X.M., Chu S.I. Theoretical study of multiple high-order harmonic generation by intense ultrashort pulsed laser fields: A new generalized pseudospectral time-dependent method // *Chem. Phys*. 1997. V. 217, № 2. P. 119-130.

31. Uiberacker M., Uphues Th., Schultze M., Verhoef A.J., Yakovlev V., Kling M.F., Rauschenberger J., Kabachnik N.M., Schroder H., Lezius M., Kompa K.L., Muller H.-G., Vrakking M.J.J., Hendel S., Kleineberg U., Heinzmann U., Drescher M., Krausz F. Attosecond real-time observation of electron tunnelling in atoms // *Nature*. 2007. V. 446, № 7136. P. 627-632.

32. Wang Y., Granados E., Pedaci F., Alessi D., Luther B., Berrill M., Rocca J.J. Phase-coherent, injection-seeded, table-top soft-X-ray lasers at 18.9 nm and 13.9 nm // *Nature Photon*. 2008. V. 2, № 2. P. 94-98.

33. Zeitoun P., Faivre G.; Sebban S. et al. A high-intensity highly coherent soft X-ray femtosecond laser seeded by a high harmonic beam // *Nature*. 2004. V. 431, № 7007. P. 426-429.

Основные материалы диссертации опубликованы в работах:

1а. А.С. Емелина, М.Ю. Емелин, М.Ю. Рябикин «О возможности генерации высоких гармоник с энергиями более 10 кэВ при взаимодействии интенсивного излучения среднего ИК диапазона с нейтральными газами», *Квантовая электроника*, т.44, №5, с.470-477 (2014)

2а. A.S. Emelina, M.Yu. Emelin, and M.Yu. Ryabikin «Multi-keV ultrahigh-order harmonics produced in gases with subrelativistically intense mid-IR laser pulses», *JOSA B*, Vol. 32, No 12, pp.2478-2487 (2015)

3а. A.S. Emelina, M.Yu. Emelin, and M.Yu. Ryabikin «Subattosecond keV beats of high-harmonics x-ray field produced with few-cycle mid-IR laser pulses: Magnetic-field effects», *Phys. Rev. A*, Vol. 93, 043802 (2016)

4а. A.S. Emelina, M.Yu. Emelin, R.A. Ganeev, M. Suzuki, H. Kuroda, and V.V. Strelkov «Two-color high-harmonic generation in plasmas: efficiency dependence on the generating particle properties», *Optics Express*, Vol. 24, No 13, 13971-13983 (2016)

5а. А.С. Большухина, М.Ю. Емелин, М.Ю. Рябикин, Генерация сверхвысоких гармоник при ионизации атомов фемтосекундными лазерами среднего ИК-диапазона: влияние эффекта опустошения основного состояния атома и магнитного поля импульса, *Труды Семнадцатой научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения В.С. Троицкого (Н. Новгород, 13–17 мая 2013 г.)* / Под ред. С.М. Грача, А.В. Якимова, Н. Новгород: ННГУ, 2013, с.155-157

6а. A. Emelina, M. Emelin, and M. Ryabikin, Limitations on high-energy photon generation by near- and mid-IR laser sources in atomic gases, *Research in Optical Sciences, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2014)*, paper JW2A.19

7а. А.С. Емелина, М.Ю. Емелин, М.Ю. Рябикин, Генерация сверхвысоких гармоник в субрелятивистском режиме взаимодействия лазерного излучения среднего ИК диапазона с газами, Труды XVIII научной конференции по радиофизике, посвященной Дню радио (Н. Новгород, 12–16 мая 2014 г.) / Под ред. С.М. Грача, А.В. Якимова, Н. Новгород: ННГУ, 2014, с.175-176

8а. А.С. Емелина, М.Ю. Емелин, М.Ю. Рябикин, Недипольные эффекты при генерации субаттосекундных рентгеновских биений на заднем фронте интенсивного лазерного импульса среднего ИК диапазона, Труды XIX научной конференции по радиофизике, посвященной 70-летию радиофизического факультета (Н. Новгород, 11–15 мая 2015 г.) / Под ред. С.М. Грача, А.В. Якимова, Н. Новгород: ННГУ, 2015, с.160-162

9а. А.С. Емелина, М.Ю. Емелин, Влияние сорта частиц среды на эффективность генерации высоких гармоник двухцветного лазерного излучения среднего ИК диапазона в газах, Труды XX научной конференции по радиофизике, посвященной 110-летию со дня рождения Г.С. Горелика (Н. Новгород, 12–20 мая 2016 г.), с.169-170

10а. A.S. Emelina, M.Yu. Emelin, R.A. Ganeev, M. Suzuki, H. Kuroda, and V.V. Strelkov, High harmonic generation in gases with two-color crossed laser fields: theory and experiment, *Technical Digest of the VII International Symposium and Young Scientists School "Modern Problems of Laser Physics" (MPLP-2016)*, Novosibirsk, Russia, August 22-28, 2016, pp.142-143

11а. .S. Emelina, M.Yu. Emelin, and M.Yu. Ryabikin, Effect of magnetic field of mid-IR laser pulse on the spectral shape of high harmonics produced in gases, *Technical Digest of the VII International Symposium and Young Scientists School "Modern Problems of Laser Physics" (MPLP-2016)*, Novosibirsk, Russia, August 22-28, 2016, pp.144-145

12а. А.С.Емелина, М.Ю.Емелин, М.Ю.Рябикин, Генерация высоких гармоник в газах лазерными источниками среднего ИК диапазона: влияние магнитного поля импульса на форму спектра гармоник, "Нелинейные волны 2016" (отв. ред. А.М.Сергеев, А.В.Слюняев), Н. Новгород: ИПФ РАН, 2017, с.69-79

ЕМЕЛИНА Анна Сергеевна

**ГЕНЕРАЦИЯ ГАРМОНИК ВЫСОКОГО ПОРЯДКА
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
СРЕДНЕГО ИК ДИАПАЗОНА В ГАЗАХ**

Автореферат

Подписано к печати 16.10.2018.
Формат $60 \times 90 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 1,25.
Тираж 100 экз. Заказ № 74 (2018).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН
603950, г.Н.Новгород, ул. Ульянова 46