

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»
(ИПФ РАН)

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)**

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

Аспирант: Емелина Анна Сергеевна

Научный руководитель:
Рябкин Михаил Юрьевич, к.ф.-м.н., в.н.с.

Направление подготовки:
03.06.01 Физика и астрономия

Направленность (профиль) подготовки:
01.04.21 Лазерная физика

Форма обучения: очная

Нижний Новгород
2018

Общая характеристика работы

Данная работа посвящена детальному исследованию процесса генерации гармоник высокого порядка (ГГВП) при взаимодействии интенсивного лазерного излучения среднего ИК диапазона с газами. Особое внимание в работе уделяется эффектам, ограничивающим эффективность генерации гармоник, таким как опустошение основного атомарного состояния и магнитный дрейф электрона, и исследованию методов компенсации этих нежелательных эффектов. Кроме того, в работе исследуется интерференционный способ получения импульсов субпикосекундной длительности на основе эффекта ГГВП. 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 принято подразумевать такой режим, в котором число генерируемых гармоник и их интенсивности значительно превышают значения, предсказываемые теорией возмущений. Явление ГГВП 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 ГГВП продиктован большими возможностями его различных приложений. Так, на протяжении многих лет зондирование быстропротекающих 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 импульсы. 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. Использование длинноволновой накачки, которая обеспечивает широкое плато спектра гармоник, позволяет получать информацию о дифференциальных сечениях элементарных процессов в атомах и молекулах в широком диапазоне энергий, о структуре и внутренней динамике молекул и др. С помощью ГГВП в газах ~~в~~ можно получать когерентное излучение в «водяном окне» [7, 29], которое важно для биохимических исследований 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 ГГВП, 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 (см. ниже). Однако, оказывается, например, что численные исследования процесса ГГВП при использовании источников среднего ИК-диапазона требуют столь огромных вычислительных и временных ресурсов, что зачастую делает расчёты 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 ГГВП в длинноволновом режиме, а также проводить расчёты в широком диапазоне параметров лазерного излучения и для различных активных 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 ГВП для различных параметров лазерного излучения и для различных нелинейных сред;
- поиск способов компенсации магнитного дрейфа электрона при ГВП лазерного излучения среднего ИК диапазона;
- поиск возможностей эффективной генерации ультракоротких рентгеновских волновых форм.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованной литературы. Общий объем работы – 121 страница включая 40 рисунков, и список литературы из 93 наименований.

Краткое содержание диссертации

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 индуцированного дипольного момента, определяющего нелинейную поляризацию среды, приобретает следующий вид:

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

где $S(\beta, t, t')$ - квазиклассическое действие, ~~которое~~ описывающее свободное движение электрона в поле лазерного импульса:

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

p_{st} – стационарное значение импульса электрона, определяемое условием $\nabla_{\beta} S(\beta, t, t') = 0$.

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

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

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

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

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.

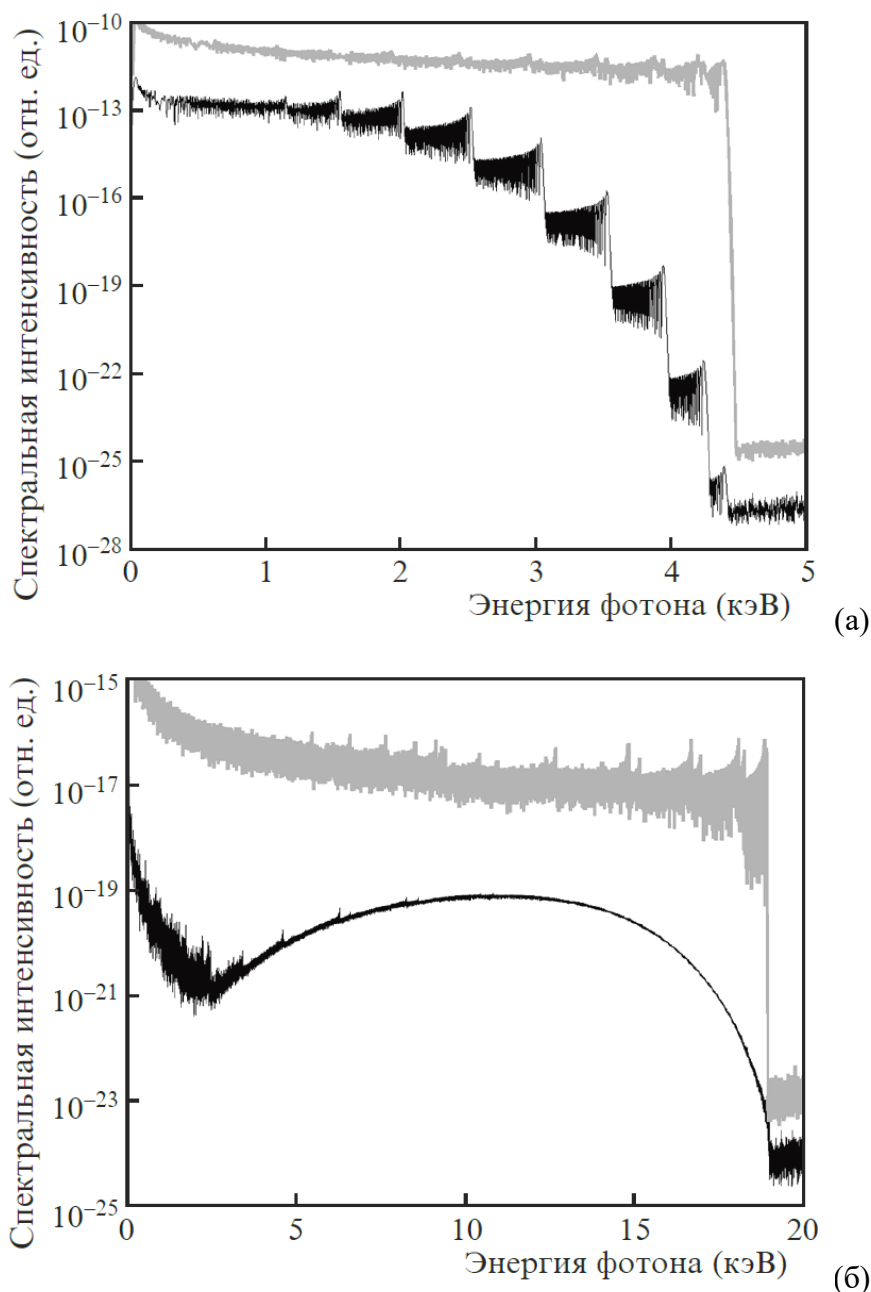


Рис. 1. Спектры ГВП для атома гелия в поле лазерных импульсов (импульсы с гауссовым профилем и длительностью на полувысоте $6T$, где T – период лазерного поля) с различными центральными длинами волн излучения и пиковыми интенсивностями: $\lambda = 2\text{ мкм}$, $I = 3.7 \times 10^{15} \text{ Вт/см}^2$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

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 генерации 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 (см. рис. 1а), 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 (см. рис. 1б). 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 проведенного исследования представляют интерес с точки зрения выяснения перспектив создания компактных источников ультракоротких импульсов жесткого 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 обеспечивает провал в низкочастотной части спектра, а также самых длинных среди коротких траекторий, из-за чего возникает спад в области отсечки плато; соответственно, спектр ГВП качественно меняет свою форму (см. рис. 1а-б).

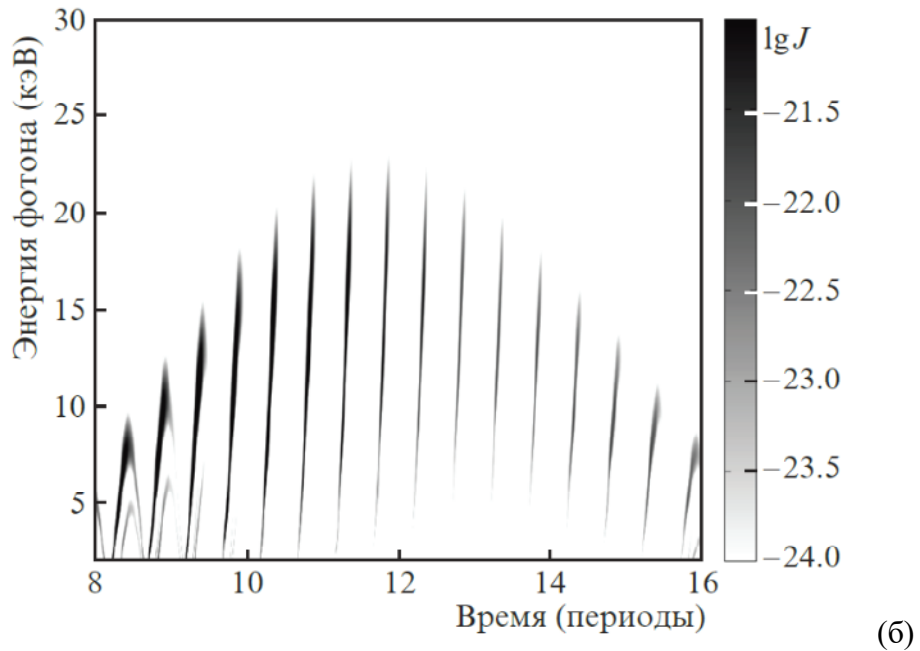
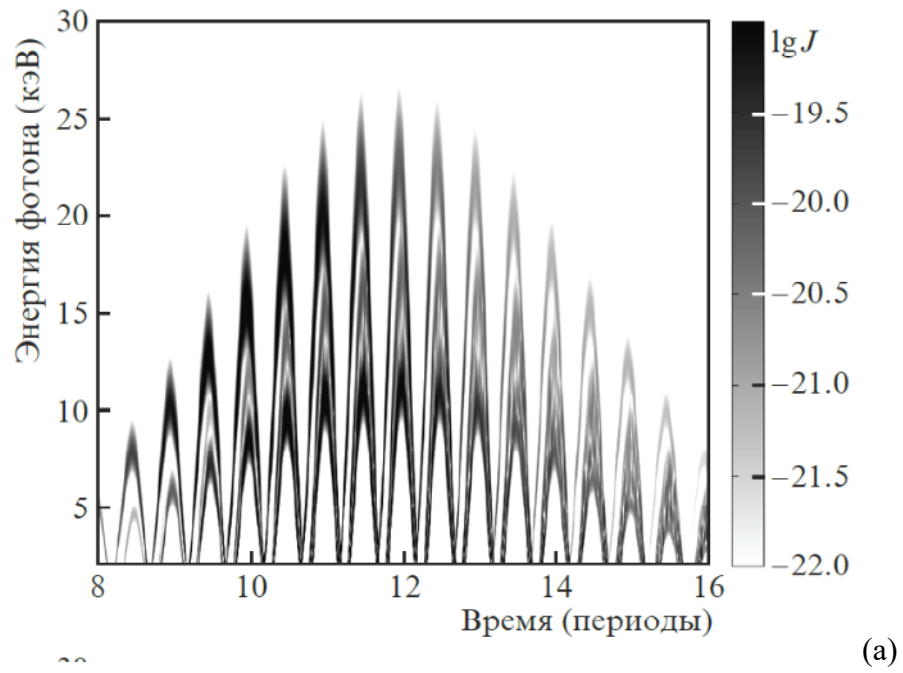


Рис. 2. Спектрограммы сигнала ГВП для атома гелия в поле лазерного импульса ($\lambda = 8$ мкм, $I = 1.2 \times 10^{15}$ Вт/см²), рассчитанные в электродипольном приближении (а) и за его рамками (б).

Во **второй главе** с использованием теоретического описания ГВП за пределами электродипольного приближения рассмотрено влияние магнитного 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 генерации на заднем фронте ультракороткого (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 полупериодов лазерного поля.

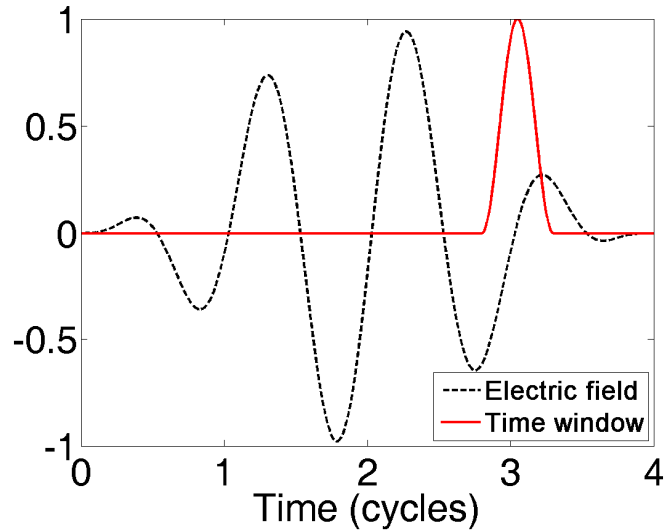


Рис. 3. Нормированное электрическое поле лазерного импульса $E(t)/E_0$, $\varphi = \pi/8$ (чёрная пунктирная линия) и оконная функция, используемая при анализе сигнала гармоник высокого порядка (красная сплошная линия).

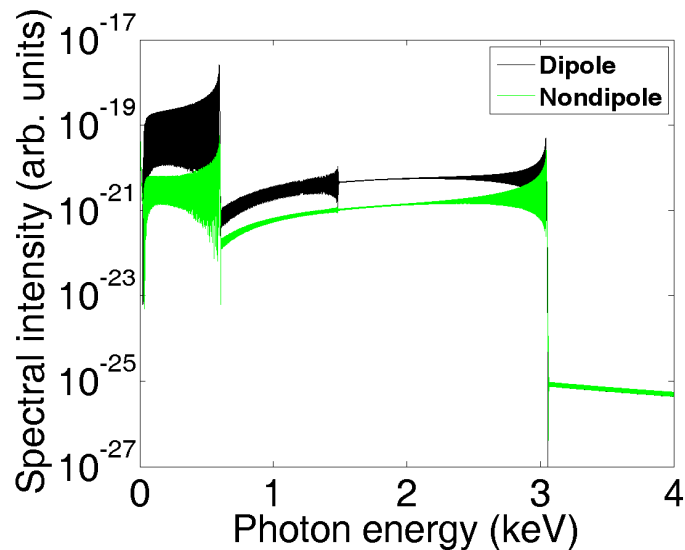


Рис. 4. Спектр рентгеновского всплеска, генерируемого на заднем фронте лазерного импульса с центральной длиной волны $\lambda_0 = 9$ мкм и фазой заполнения $\varphi = \pi/8$; показаны результаты, полученные в электродипольном приближении и за его рамками.

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, зеленая кривая). При продвижении в более длинноволновую область влияние магнитного поля усиливается, что влечёт за собой уменьшение эффективности 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 частично 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).

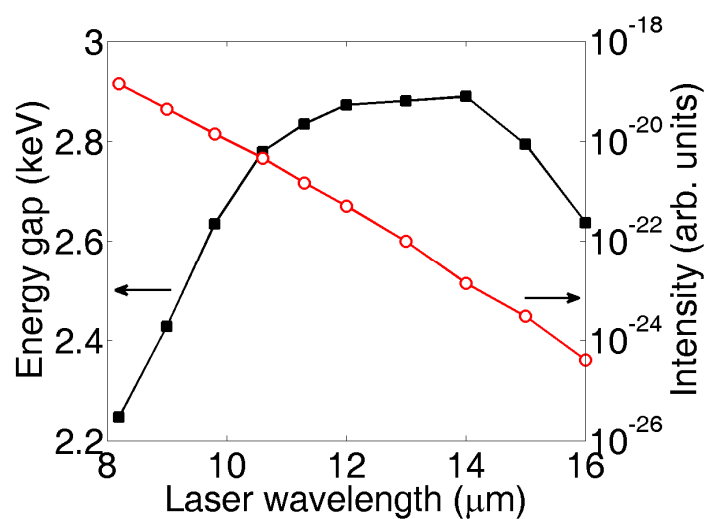


Рис. 5. Энергетический зазор между низкоэнергетичным и высокоэнергетичным пиками (черные квадраты) и их интенсивность (красные круги) в зависимости от длины волны

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:

$$\begin{aligned} E_x(t) = E_1(t) = E_0 \exp\left[-\ln(4)\frac{t^2}{T^2}\right] \exp(-i\omega t) + c.c. \\ E_y(t) = E_2(t) = \sqrt{\alpha} E_0 \exp\left[-\ln(4)\frac{t^2}{T^2}\right] \exp(-2i\omega t + i\varphi) + c.c. \end{aligned} \quad (6)$$

В данной главе рассматривается пример ГТВП двухцветного поля в протяженной плазменной струе с использованием излучения с центральной длиной волны 1310 нм оптического параметрического усилителя и его второй гармоники при их сравнимых интенсивностях. В экспериментах, проведенных в Японии группой Р. Ганеева, наблюдалось значительное увеличение выхода гармоник высокого порядка по сравнению со случаем одноцветной накачки. Экспериментальные результаты анализируются теоретически. В ходе сравнения результатов теоретических расчётов с результатами эксперимента выяснилось, что широко используемая теория ГТВП, предполагающая основным состоянием атомарной системы $1s$ состояние, не воспроизводит экспериментально наблюдаемый спектр ГТВП. В связи с этим предложено развитие теории, учитывающее реальные квантовые состояния различных видов частиц (в рассмотренных случаях – ионов серебра, золота и цинка). В рамках данного исследования было получено общее выражение для дипольного матричного элемента, соответствующего переходу из произвольного связанного состояния водородоподобного атома в непрерывный спектр (символы n , l и m – квантовые числа исходного атомарного состояния):

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

На рис. 6 представлены спектры ГТВП в ионе серебра при использовании матричного элемента перехода, фигурирующего в оригинальной теории Левенштейна (черная кривая) и матричного элемента для перехода из реального исходного состояния электрона в непрерывный спектр. Из сравнения с рис. 7, на котором изображен спектр гармоник,

полученной в ходе физического эксперимента группой Р. Ганеева, видно, что спектр, посчитанный с учётом реального исходного состояния частицы, хорошо согласуется с экспериментальными данными.

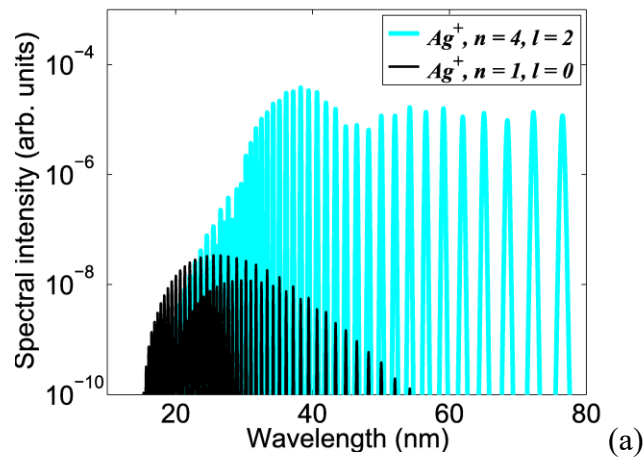


Рис. 6. Спектры откликов иона серебра для различных $\mathbf{d}(\mathbf{p})$: черная линия – $n = 1$ и $l = 0$, голубая линия – $n = 4$ и $l = 2$.

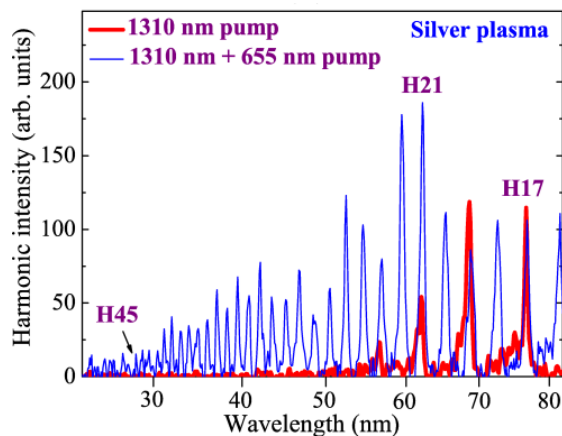


Рис.7 Спектры гармоник, полученные в плазме серебра с использованием одноцветной (1310 нм, красная кривая) и двухцветной (1310 нм +655 нм, синяя кривая) лазерной накачки титан сапфирового лазера.

Кроме того, в данной главе дается теоретическое объяснение наблюдаемому увеличению эффективности генерации в двухкомпонентном лазерном поле. Как видно из рис. 8(а), в двухцветном случае максимум поля сдвигается вправо от максимума поля на основной частоте. 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 приводит к значительному снижению вероятности рекомбинации, а значит, и эффективности генерации гармоник. Совокупность этих двух факторов приводит к увеличению сигнала гармоник при использовании двухкомпонентного лазерного поля скрещенной поляризации.

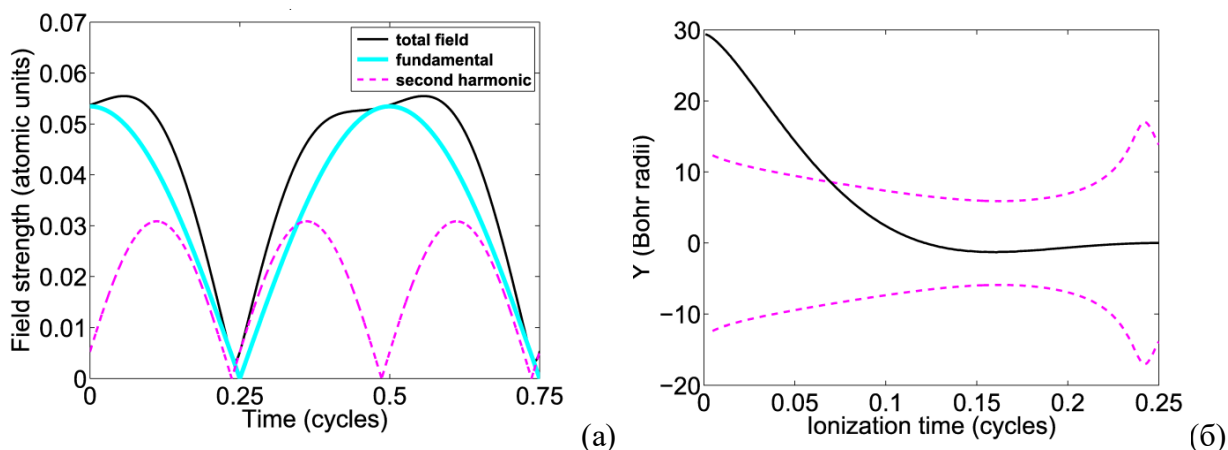


Рис. 8. (а) Абсолютное значение суммарного поля (черная кривая) и компонент поля (голубая и пунктирная кривая), $\alpha=1/3$, $\varphi=1/4$; (б) поперечное смещение (чёрная кривая) и ширина волнового пакета (пунктирная кривая) электрона в момент его возвращения к родительскому иону; $\alpha=1/3$, $\varphi=1/4$.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- 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 ГГВП 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 ГВВП 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 ГВВП. 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 в спектре 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 ГВВП как способа получения таких импульсов. Одним из результатов настоящей диссертации является предложенный способ увеличения выхода гармоник в протяженной газовой среде посредством использования двухцветного лазерного поля скрещенной конфигурации.

На защиту выносятся следующие **основные положения**:

- 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 г.), Нижний Новгород- Санкт Петербург, Россия (2016 г.);

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

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

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 г.);

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 конференции по
радиофизике, Россия (Нижний Новгород); XX научная конференции 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 опубликована 31 работа, из которых 4 статьи в реферируемых
журналах, 1 статья в книге и 26 публикаций в сборниках трудов и тезисов 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 эффективности генерации гармоник в протяженной газовой среде можно достичь посредством использования двухцветного лазерного поля со скрещенными линейными поляризациями спектральных компонент, и найдены микроскопические и макроскопические факторы, обуславливающие достигаемый выигрыш.

Список основных публикаций по теме диссертации

1. 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)
2. 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)
3. 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)
4. 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)
5. 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
6. A.S. Bolshukhina, M.Yu. Emelin, and M.Yu. Ryabikin, Ultrahigh-order harmonic generation from atoms driven by femtosecond mid-IR laser pulses: ground-state depletion and magnetic-field effects, Proceedings of V International Conference "Frontiers of Nonlinear Physics" (FNP-2013), Nizhny Novgorod – Yelabuga – Nizhny Novgorod, Russia, July 28 – August 2, 2013, pp.81-82.
7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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 радиوفизического факультета (Н. Новгород, 11–15 мая 2015 г.) / Под ред. С.М. Грача, А.В. Якимова, Н. Новгород: ННГУ, 2015, с.160-162.

11. А.С. Емелина, М.Ю. Емелин, М.Ю. Рябикин, Генерация субаттосекундных рентгеновских биений на заднем фронте интенсивного лазерного импульса среднего ИК диапазона: влияние магнитного поля, XX Нижегородская сессия молодых ученых. Естественные, математические науки: материалы докладов, 19–22 мая 2015 г. (отв. за вып. Зверева И.А.), Княгинино: НГИЭУ, 2015, с.18-19.

12. 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.

13. А.С. Емелина, М.Ю. Емелин, Генерация высоких гармоник двухцветного лазерного излучения скрещенной конфигурации в газах, XXI Нижегородская сессия молодых ученых. Естественные, математические науки: материалы докладов, 17–20 мая 2016 г. (отв. за вып. И.А. Зверева), Княгинино: НГИЭУ, 2016, с.19.

14. 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: species dependence of the yield, Proceedings of VI International Conference "Frontiers of Nonlinear Physics" (FNP-2016), Nizhny Novgorod – St.Petersburg, Russia, July 17 – July 23, 2016, pp.106-107.

15. A.S. Emelina, M.Yu. Emelin, and M.Yu. Ryabikin, Magnetic field-induced modification of the spectral shape of high harmonics in gases driven by mid-IR laser pulses, Proceedings of VI International Conference "Frontiers of Nonlinear Physics" (FNP-2016), Nizhny Novgorod – St. Petersburg, Russia, July 17–23, 2016, pp.108-109.
16. A.S. Bolshukhina, M.Yu. Emelin, and M.Yu. Ryabikin, Multi-keV high-order harmonics in gases in the subrelativistic regime from mid-IR laser sources, Ultrafast Optics 2013 Conference Materials, Davos, Switzerland, March 4-8, 2013, paper TuP.4.
17. 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, Тезисы докладов научной студенческой конференции Высшей школы общей и прикладной физики ННГУ «ВШОПФ’2013», Нижний Новгород, ИПФ РАН, 29–30 мая 2013 г., с.5.
18. M.Yu. Emelin, A.S. Bolshukhina, and M.Yu. Ryabikin, Ultrahigh-order harmonics in gases in the subnanometer wavelength range from mid-infrared laser sources, International Conference on Coherent and Nonlinear Optics / International Conference on Lasers, Applications, and Technologies (ICONO/LAT 2013), Conference Program, Moscow, Russia, June 18-22, 2013, paper IFR8.
19. A.S. Bolshukhina, M.Yu. Emelin, and M.Yu. Ryabikin, Ultrahigh-order harmonics in gases from near- and mid-IR laser sources: numerical and analytical study beyond the dipole approximation, 4th International conference on Attosecond physics (ATTO 2013), Compilation of contributions, Paris, France, July 8-12, 2013, p.184.
20. A.S. Emelina, M.Yu. Emelin, and M.Yu. Ryabikin, Magnetic-drift limited high-order harmonic generation in neutral and ionized gases with mid-IR lasers, Book of Abstracts of 23rd International Laser Physics Workshop (LPHYS’14), Sofia, Bulgaria, July 14-18, 2014, paper 2.8.4.
21. A.S. Emelina, M.Yu. Emelin, and M.Yu. Ryabikin, Generation of high harmonics with energies beyond 10 keV in neutral gases irradiated by mid-infrared laser pulses, Book of Abstracts of 23rd International Laser Physics Workshop (LPHYS’14), Sofia, Bulgaria, July 14-18, 2014, paper P2.3.
22. A.S. Emelina, M.Yu. Emelin, and M.Yu. Ryabikin, Magnetic-field effects in HHG by mid-IR laser pulses in atomic gases, Abstracts of 13th International Conference on Multiphoton Processes (ICOMP13, 2014), Shanghai, China, December 7–10, 2014, paper P10.
23. A.S. Emelina, M.Yu. Emelin, and M.Yu. Ryabikin, Subattosecond keV beats of high harmonic x-ray field produced with midinfrared laser pulses: magnetic field effects, XXIX

International Conference on Photonics, Electronics and Atomic Collisions (ICPEAC 2015), Conference Abstracts, Toledo, Spain, July 22-28, 2015, paper MO-021.

24. A.S. Emelina, M.Yu. Emelin, and M.Yu. Ryabikin, Electron magnetic-drift limited subattosecond X-ray beats at the trailing edge of mid-IR laser pulse, 11th Conference on Super-Intense Laser-Atom Physics (SILAP 2015), Abstracts, Bordeaux, France, September 7-10, 2015, p.110.

25. 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, XVII научная школа, 27 февраля–4 марта 2016 г., Тезисы докладов молодых ученых, Нижний Новгород, 2016, с.55.

26. А.С. Емелина, М.Ю. Емелин, В.В. Стрелков, Генерация высоких гармоник в газовых средах с использованием двухцветных лазерных скрещенных полей, Нелинейные волны - 2016, XVII научная школа, 27 февраля–4 марта 2016 г., Тезисы докладов молодых ученых, Нижний Новгород, 2016, с.56.

27. A.S. Emelina, M.Yu. Emelin, and M.Yu. Ryabikin, Electron magnetic-drift limited subattosecond keV beats of high-harmonic x-ray field at the trailing edge of mid-IR laser pulse, Book of Abstracts of 25th International Laser Physics Workshop (LPHYS'16), Yerevan, Armenia, July 11-15, 2016, paper 2.2.1.

28. A.S. Emelina, M.Yu. Emelin, R.A. Ganeev, M. Suzuki, H. Kuroda, and V.V. Strelkov, Two-color high-harmonic generation in plasma plumes: species dependence of the yield, Book of Abstracts of 25th International Laser Physics Workshop (LPHYS'16), Yerevan, Armenia, July 11-15, 2016, paper 2.2.3.

29. 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.

30. A.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.

31. A.S. Emelina, M.Yu. Emelin, and M.Yu. Ryabikin, Scaling laws for high-harmonic yield in the long-wavelength regime, International Conference on Multiphoton Processes (ICOMP 2017), Budapest, Hungary, September 24–27, 2017

Список цитированной 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. 1540-1560.
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-splite 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. 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. Art. no. 1341.
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, P. № 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., and 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.