

Работа выполнена в Институте прикладной физики РАН
(г. Нижний Новгород)

На правах рукописи

ПОЛОВИНКИН Владимир Андреевич

**ФОРМИРОВАНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНО КОРОТКИХ
ИМПУЛЬСОВ РЕЗОНАНСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ПОСРЕДСТВОМ АДИАБАТИЧЕСКОЙ МОДУЛЯЦИИ
ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ**

01.04.21 - лазерная физика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород - 2012

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук Е. В. Радионычев

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук М. В. Федоров

доктор физико-математических наук М. Д. Токман

Ведущая организация: Научно исследовательский институт ядерной физики (НИИЯФ) имени Д. В. Скобельцына МГУ имени М. В. Ломоносова

Защита состоится ___ февраля 2012 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 002.069.02 в Институте прикладной физики РАН (603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной физики РАН.

Автореферат разослан ___ января 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор

Ю. В. Чугунов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. С первых лет существования лазерные источники импульсного оптического излучения стали одним из основных средств исследования и контроля динамики микромира. Если использование фемтосекундных ($1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$) оптических импульсов позволило осуществить спектроскопию химических реакций со сверхвысоким временным разрешением [1] и показать возможность управления ходом их протекания, то для исследования и управления движением электронов на внутриатомных масштабах электромагнитные импульсы должны иметь аттосекундную ($1 \text{ ас} = 10^{-18} \text{ с}$) длительность [2]. В 2011 году исполнилось десять лет со времени проведения первых экспериментальных работ в области аттосекундной физики [3, 4]. Благодаря созданию источников оптических импульсов аттосекундной длительности, прежде всего путём генерации гармоник высокого порядка лазерного излучения в газах, впервые оказались возможными исследование и контроль электронной динамики в атомах [5-8]. Вехами экспериментального исследования внутриатомных процессов стали: спектроскопия Оже-релаксации в атомах криптона с аттосекундным временным разрешением [9], измерение времени рекомбинации сопровождающей туннельную ионизацию оптического электрона в интенсивном лазерном поле [10], прямое измерение вибрационной динамики молекулярного иона D_2^+ [11], прямое измерение мгновенного значения напряжённости электрического поля лазерного импульса [12], исследование динамики структурной перестройки и фрагментации, сопровождающей фотоионизацию молекул водорода H_2 , дейтерия D_2 и азота N_2 рентгеновским излучением [13, 14], наблюдение туннелирования оптического электрона сквозь атомный потенциальный барьер [15], прямое измерение процесса переноса заряда в твёрдом теле с аттосекундным временным разрешением [16].

Современные приложения экстремально коротких фемто- и аттосекундных оптических импульсов в исследовании внутриатомных и внутримолекулярных процессов в значительной степени ограничены возможностями существующих методов генерации импульсов. В настоящее время существует технология генерации одиночного аттосекундного импульса с малой эффективностью преобразования энергии падающего излучения [2, 17] и технология высокоэффективной генерации последовательности фемто- и субфемтосекундных импульсов, следующих друг за другом с периодом повторения, равным периоду колебаний лёгких молекул [18, 19]. Характерные значения относительной эффективности генерации одиночных аттосекундных импульсов, достигающиеся в эксперименте, составляют порядка 10^{-6} ;

характерные значения энергии экстремально коротких фемто- и аттосекундных оптических импульсов составляют от единиц до сотен наноджоулей ($1 \text{ нДж} = 10^{-9} \text{ Дж}$), что ограничивает возможности экспериментальных исследований нелинейно-оптических процессов со сверхбыстрым временным разрешением. Генерация экстремально коротких импульсов является сложно осуществимой в определённых спектральных диапазонах, таких как дальнейшее инфракрасное излучение, вакуумный ультрафиолет, жёсткий рентген и гамма-излучение. Кроме того, имеются технологические трудности, связанные с согласованием фаз спектральных составляющих излучения в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах.

Актуальными задачами в области генерации ультракоротких импульсов оптического излучения являются: повышение эффективности генерации при возможности формирования одиночного импульса, повышение сосредоточенной в импульсе энергии, генерация импульсов без использования внешней подстройки фаз составляющих спектра в тех диапазонах, где она трудно осуществима и осуществление генерации в различных спектральных диапазонах.

Целью работы является:

- разработка методов аналитического описания и численного моделирования процесса распространения резонансного излучения в среде, дополнительно облучаемой низкочастотным электромагнитным полем с интенсивностью существенно меньшей порога ионизации из основного энергетического состояния частиц среды;
- определение оптимальных для формирования экстремально коротких импульсов резонансного излучения режимов взаимодействия излучения с веществом;
- разработка предложений по экспериментальному формированию экстремально коротких фемто- и аттосекундных импульсов в различных спектральных диапазонах.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложен метод формирования экстремально коротких оптических импульсов, основанный на преобразовании резонансного излучения в среде, облучаемой далеким от резонанса низкочастотным электромагнитным полем с интенсивностью, много меньшей порога ионизации из основного состояния частиц среды.

2. Показано, что механизмами формирования экстремально коротких импульсов резонансного излучения являются (1) модуляция частот резонансных квантовых переходов во времени и пространстве; и (2) модуляция скоростей ионизации *из возбуждённых атомных состояний* во времени и пространстве низкочастотным электромагнитным полем.
3. Показана возможность формирования одиночного экстремально короткого оптического импульса благодаря использованию: (а) короткого импульса квазирезонансного падающего излучения; (б) высокоинтенсивного импульса квазирезонансного излучения с резким передним фронтом; (в) импульса низкочастотного излучения с резким передним фронтом.
4. Определены экспериментальные условия формирования импульсов с длительностью до 700 *ас* посредством преобразования излучения с длиной волны 122 *нм* в среде атомов водорода, облучаемых излучением параметрического источника света с длиной волны 3200 *нм*, а также импульсов с длительностью до 60 *ас* из излучения с длиной волны 13.5 *нм* в среде ионов Li^{2+} , облучаемых излучением второй гармоники Ti:Sa-лазера с длиной волны 400 *нм*.

Практическая ценность. Предложенный способ формирования экстремально коротких импульсов обладает более широкой спектральной областью применимости от СВЧ до рентгеновского диапазона и потенциально более высокой эффективностью по сравнению с известными способами формирования ультракоротких импульсов, что способствует развитию технологий получения сверхкоротких импульсов излучения для актуальных применений в области исследования и управления ходом протекания внутриатомных процессов со сверхбыстрым временным разрешением.

На защиту выносятся следующие **основные положения**:

1. Формирование экстремально коротких электромагнитных импульсов возможно посредством преобразования резонансного излучения в среде, облучаемой далеким от резонанса низкочастотным электромагнитным полем с интенсивностью, много меньшей порога ионизации из основного состояния частиц среды.
2. Физическими механизмами формирования экстремально коротких импульсов резонансного излучения являются: (1) модуляция частот резонансных квантовых переходов во времени и пространстве, (2)

модуляция скоростей ионизации *из возбуждённых атомных состояний* во времени и пространстве низкочастотным электромагнитным полем. В зависимости от условий эксперимента экстремально короткие импульсы могут быть сформированы под действием преимущественно одного из механизмов.

3. Формирование экстремально коротких импульсов резонансного излучения возможно: (а) без использования подстройки фаз и амплитуд сгенерированных спектральных компонент; (б) с использованием фильтрации определённых компонент сгенерированного спектра; (в) при помощи внешнего управления амплитудами и фазами сгенерированных спектральных компонент.
4. В оптимальных условиях длительность формируемых импульсов может быть менее полутора периодов высокочастотного заполнения, пиковая интенсивность - в десять и более раз превышать интенсивность падающего излучения, а эффективность генерации - достигать нескольких процентов по энергии и нескольких десятков процентов по пиковой интенсивности. Параметры формируемых импульсов устойчивы по отношению к изменениям условий эксперимента.
5. Формирование одиночного экстремально короткого импульса возможно благодаря использованию: (а) короткого импульса квазирезонансного падающего излучения; (б) высокоинтенсивного импульса квазирезонансного излучения с резким передним фронтом; (в) импульса низкочастотного излучения с резким передним фронтом.
6. В среде атомов водорода возможно формирование импульсов длительностью до 700 *ас* из резонансного излучения с длиной волны 122 *нм*, в среде ионов Li^{2+} возможно формирование импульсов длительностью до 60 *ас* из резонансного излучения с длиной волны 13.5 *нм*.

Достоверность положений и результатов диссертации обоснована сопоставлением результатов аналитических и численных расчётов, а также сопоставлением теоретических результатов с экспериментальными данными. Научные положения и выводы диссертации являются новыми и актуальными. Использование математических моделей обосновано соответствующими оценками и адекватной физической интерпретацией. Результаты работы опубликованы в ведущих российских и зарубежных реферируемых журналах, неоднократно докладывались на всероссийских и международных конференциях.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на 19 российских и международных физических конференциях, в том числе лично:

2007 г.: Н. Новгород (Россия), Н. Новгород – Саратов – Н. Новгород (Россия).

2008 г.: Н. Новгород (Россия).

2009 г.: Н. Новгород (Россия), Саров (Россия), Архангельск (Россия).

2010 г.: Н. Новгород (Россия), С. Петербург (Россия), Н. Новгород – С. Петербург (Россия), Казань (Россия).

2011 г.: Стамбул (Турция), Суздаль (Россия).

По теме диссертации опубликовано 25 работ, из которых 5 статей в реферируемых научных журналах и 20 публикаций в сборниках трудов и тезисов докладов конференций. Основные результаты второй и третьей глав опубликованы в Отчетном докладе президиума Российской академии наук «Научные достижения Российской академии наук в 2010 году» [20].

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы – 227 страниц, включая 77 рисунков. Список цитируемой литературы состоит из 178 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы ее цели, изложена структура диссертации, приведены выносимые на защиту положения, сделан обзор литературы.

В первой главе с использованием двухуровневого приближения исследуются общие закономерности взаимодействия высокочастотного излучения с распределенной квантовой системой, частота и ширина спектральной линии перехода которой адиабатически изменяются во времени и пространстве под действием низкочастотного поля вследствие эффекта Штарка или Зеемана и туннельной ионизации из возбужденного состояния соответственно. Исследуется модуляция частоты и ширины спектральной линии перехода по закону бегущей волны низкочастотным полем, распространяющимся совместно с высокочастотным излучением:

$$\begin{cases} \omega_{21}(t - z/V_M) = (E_2(z, t) - E_1(z, t))/\hbar, \\ \gamma_{21}(t - z/V_M) = \gamma_0 + \frac{1}{2} (w_{ion}^{(2)}(z, t) + w_{ion}^{(1)}(z, t)), \end{cases} \quad (1)$$

где t - время, z - продольная координата, V_M - фазовая скорость низкочастотного поля, ω_{21} - мгновенная частота, E_1 и E_2 - энергии атомных состояний, индекс "2" соответствует возбужденному, а "1" - основному состоянию, \hbar - постоянная Планка, γ_{21} - мгновенная полуширина спектральной линии перехода; $w_{ion}^{(1)}$ и $w_{ion}^{(2)}$ - скорости ионизации из состояний "1" и "2", γ_0 - скорость релаксации атомной когерентности в отсутствие низкочастотного поля.

Двумя различными аналитическими способами показано, что в линейном режиме взаимодействия высокочастотного излучения со средой, когда подавляющая часть атомов среды остаётся в основном состоянии, задача о распространении квазирезонансного излучения с произвольной начальной амплитудно-частотной модуляцией в двухуровневой среде, частота и ширина спектральной линии перехода которой зависят от времени и пространства по закону бегущей волны, сводится к задаче о распространении эффективного излучения, связанного с падающим, в стационарной среде. Определены условия, при выполнении которых нестационарность среды (многочастотность отклика на монохроматическое излучение) определяется модуляцией частоты или модуляцией ширины спектральной линии перехода. Показано, что в случае гармонической модуляции ширины спектральной линии перехода отклик оптически тонкого слоя среды на заданное монохроматическое резонансное излучение

представляет собой последовательность импульсов, близких к спектрально-ограниченному пределу, длительность которых убывает с ростом глубины изменения ширины линии перехода. В то же время показано, что в случае гармонической модуляции частоты перехода отклик оптически тонкого слоя среды на квазирезонансное излучение обладает сильной частотной модуляцией. Аналитически показано, что эффективное обогащение спектра излучения при распространении в двухуровневой среде достигается, если отстройка частоты падающего излучения от частоты резонанса меньше или порядка глубины модуляции частоты или ширины спектральной линии перехода.

Аналитически решена задача о распространении квазирезонансного излучения в протяжённой среде с гармонически изменяющейся во времени и пространстве частотой квантового перехода, и показана возможность преобразования монохроматического излучения в последовательность импульсов с длительностью, много меньшей периода модулирующего поля и пиковой интенсивностью, существенно превышающей интенсивность падающего квазирезонансного излучения (при том, что средняя по времени интенсивность преобразованного в среде излучения меньше интенсивности падающего излучения вследствие резонансного поглощения). Исследованы случаи изотропной / анизотропной среды с однородным / неоднородным уширением спектральной линии перехода. Показано, что амплитуды и фазы спектральных составляющих выходного излучения определяются частотой и глубиной модуляции частоты перехода, спектральной шириной линии перехода, отстройкой частоты падающего излучения от частоты резонанса и оптической толщиной среды. Произведён численный поиск оптимальных сочетаний значений параметров, при которых достигается формирование импульсов с максимальной пиковой интенсивностью и максимальным значением отношения пиковой интенсивности к средней интенсивности выходного излучения. Показано, что в случае гауссовского профиля неоднородно уширенной спектральной линии перехода возможно формирование импульсов с большими значениями пиковой интенсивности, чем в спектрально-однородной среде, обладающей лоренцевским профилем линии перехода, в силу меньшего поглощения спектральных составляющих излучения вдали от резонанса. Показано, что при распространении квазирезонансного излучения в анизотропной двухуровневой среде возможно формирование импульсов как с поляризацией падающего излучения, так и с ортогональной поляризацией; аналитически и численно показано, что различные поляризационные компоненты излучения обладают различающимися спектральными и временными свойствами.

Показана возможность компрессии сформированных импульсов и существенного повышения их пиковой интенсивности путём компенсации частотной модуляции и / или фильтрации определённых составляющих

спектра в диспергирующей среде. Рассмотрены случаи компрессии в прозрачной среде с квадратичной дисперсией, в резонансном поглотителе и путём компенсации дисперсии всех порядков [21, 22]. Показано, что вследствие нелинейной частотной модуляции сформированных импульсов компрессия в резонансном поглотителе является более эффективной по сравнению с компрессией в прозрачной среде с квадратичной дисперсией. Один из примеров временной зависимости интенсивности импульсов, сформированных в среде с гармонически изменяющейся во времени и пространстве частотой перехода и сжатых в резонансном поглотителе изображён на рис. 1. Пиковая интенсивность импульсов более чем в 7.5 раз превышает интенсивность падающего излучения, длительность импульсов составляет 1/17 от периода повторения.

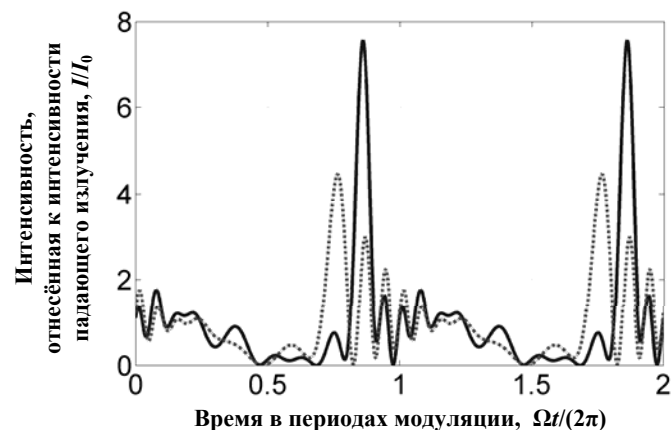


Рис. 1. Импульсы, сформированные из монохроматического квазирезонансного излучения в двухуровневой среде с гармонически изменяющейся частотой перехода (пунктирная линия), после компрессии в резонансном поглотителе (сплошная линия).

Показана возможность формирования импульсов среднего инфракрасного диапазона пикосекундной длительности в кристалле Dy^{2+} : CaF_2 благодаря адиабатической модуляции частоты оптического перехода с длиной волны $\lambda=2.36$ мкм магнитным полем вследствие линейного эффекта Зеемана. Показана возможность формирования импульсов фемтосекундной длительности при взаимодействии оптического излучения с δ -переходом серии Бальмера атомарного водорода $|n=2\rangle \leftrightarrow |n=6\rangle$ с резонансной длиной волны $\lambda_{21} = 410,17$ нм при адиабатической модуляции частоты перехода во времени и пространстве СВЧ полем гиротрона посредством линейного эффекта Штарка.

Во **второй главе** детально исследуется взаимодействие излучения со средой водородоподобных атомов, частоты квантовых переходов которых адиабатически изменяются вследствие линейного эффекта Штарка под действием низкочастотного поля, не ионизирующего атомы из основного энергетического состояния. Из уравнения Шрёдингера с использованием резонансного приближения по высокочастотному излучению и адиабатического приближения по низкочастотному полю выведены уравнения для элементов матрицы плотности с зависящими от времени частотами квантовых переходов и скоростями релаксации:

$$\frac{d\rho_{ij}(t)}{dt} + (i\omega_{ij}(t) + \gamma_{ij}(t))\rho_{ij}(t) = \frac{i}{\hbar} \sum_s (\rho_{sj}(t)\vec{d}_{is} - \rho_{is}(t)\vec{d}_{sj}) \cdot \vec{E}_{HF}(t), \quad (2)$$

где $\omega_{ij}(t)$ и $\gamma_{ij}(t)$ определяются уравнениями, аналогичными (1), \vec{d}_{is} - дипольный момент перехода $|i\rangle \leftrightarrow |s\rangle$, $\vec{E}_{HF}(t)$ - высокочастотное излучение, и суммирование ведётся по значимым атомным состояниям. Показано, что в рамках перечисленных приближений развитый формализм позволяет учесть взаимодействие атомов как с высокочастотным излучением, так и с низкочастотным полем за границами теории возмущений. Распространение линейно поляризованного излучения, близкого по частоте к резонансу с квантовым переходом из основного $|n=1\rangle$ в первое возбуждённое $|n=2\rangle$ состояние водородоподобных атомов (здесь n - главное квантовое число), в среде, облучаемой низкочастотным полем с той же линейной поляризацией и тем же направлением распространения, исследуется в трёхуровневом приближении: учитываются переходы из основного состояния в состояния, соответствующие подуровням энергетического уровня с $n=2$, идущие без изменения значения магнитного квантового числа, $\Delta m=0$, и приводящие к появлению линейно-поляризованных составляющих поляризации среды.

Проанализирована зависимость степени влияния линейной и нелинейной составляющих эффекта Штарка и туннельной ионизации *из возбуждённых атомных состояний* на отклик атомов, индуцированный высокочастотным излучением, от напряжённости низкочастотного поля и показано, что если амплитуда низкочастотного поля E_M удовлетворяет условию $E_M/E_a < 6.25 \cdot 10^{-3} \cdot Z^3$, где $E_a \cong 5.14 \cdot 10^9$ В/см - атомная единица поля, а Z - атомный номер (заряд ядра), то многочастотность резонансного атомного отклика обусловлена расщеплением и сдвигом энергетических уровней возбуждённых атомных состояний под действием низкочастотного поля вследствие линейного эффекта Штарка.

Рассмотрен случай монохроматического низкочастотного поля, приводящего к гармоническому изменению частот квантовых переходов во времени и пространстве. Аналитически показано, что если частота поля

достаточно велика, то при выполнении ограничения $E_M/E_a < 6.25 \cdot 10^{-3} \cdot Z^3$ влияние квадратичного эффекта Штарка и ионизации из возбуждённых атомных состояний сводится к *статическому* смещению частот и *статическому* уширению спектральных линий квантовых переходов соответственно. Показано, что гармоническая модуляция частот квантовых переходов низкочастотным полем вследствие линейного эффекта Штарка позволяет обогатить спектр и преобразовать монохроматическое падающее высокочастотное излучение в последовательность ультракоротких фемто- и аттосекундных импульсов с длительностью, составляющей менее десяти периодов заполнения и с пиковой интенсивностью, более чем десятикратно превышающей интенсивность падающего квазирезонансного излучения.

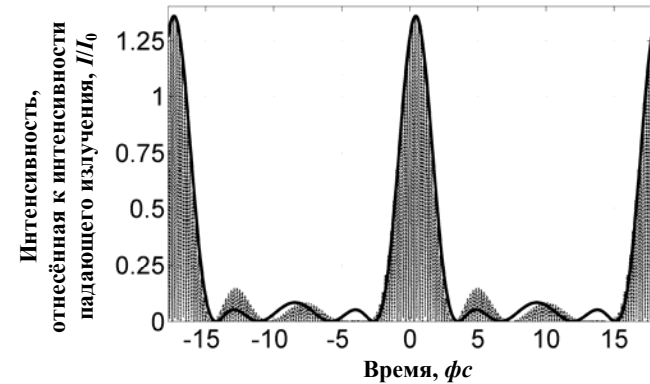


Рис. 2. Импульсы, сформированные из (квази)монохроматического излучения с длиной волны 122.15 нм в атомарном водороде, облучаемом излучением CO₂-лазера с длиной волны 10.65 мкм и интенсивностью $I_M=1.42 \cdot 10^{12}$ Вт/см². Длина области взаимодействия 1.1 мм, концентрация атомов водорода - 10^{17} 1/см³. Амплитуда центральной составляющей спектра выходного излучения ослаблена за средой в 3.2 раза. Длительность импульсов составляет 2.7 фс, период повторения - 17.8 фс пиковая интенсивность импульсов в 1.36 раз выше интенсивности падающего высокочастотного излучения. Сплошной жирной кривой показано аналитическое решение, а пунктиром - численное.

Определены условия, при выполнении которых благодаря интерференции составляющих резонансной поляризации, обусловленных квантовыми переходами из основного состояния $|1\rangle$ в возбуждённые состояния $|2\rangle$ и $|3\rangle$, соответствующие подуровням первого возбуждённого атомного энергетического уровня, и интерференции рассеянного излучения с падающим без подстройки фаз составляющих спектра преобразованного излучения после уменьшения амплитуды центральной составляющей спектра за средой формируется последовательность импульсов, близких к

спектрально-ограниченному пределу. Построена аналитическая модель, с высокой степенью точности описывающая формирование импульсов резонансного излучения (рис. 2) и показывающая устойчивость решения относительно изменения экспериментальных параметров. Определён режим распространения высокочастотного излучения, являющийся оптимальным при использовании подстройки фаз спектральных составляющих излучения за средой, позволяющий достигать высокой скважности и высокой пиковой интенсивности импульсов.

Показана возможность экспериментального формирования импульсов с длительностью 2.7 фс благодаря преобразованию излучения с длиной волны 122 нм при распространении в среде атомов водорода, дополнительно облучаемых излучением CO_2 -лазера с длиной волны 10.65 мкм , а также импульсов с длительностью $300\text{-}600 \text{ ас}$ из излучения с длиной волны 13.5 нм в среде ионов Li^{2+} , дополнительно облучаемых излучением Ti:Sa -лазера с длиной волны 800 нм .

В **третьей главе** исследуется распространение высокочастотного излучения с частотой, близкой к частоте перехода из основного в первое возбуждённое состояние, в среде водородоподобных атомов, облучаемых низкочастотным полем, достаточно сильным для того, чтобы вызывать ангармоническую модуляцию частот переходов и скоростей релаксации элементов матрицы плотности частиц среды во времени и пространстве вследствие нелинейного эффекта Штарка и туннельной ионизации из возбуждённых атомных состояний соответственно. Интенсивность поля в то же время остаётся существенно ниже порога ионизации из основного атомного состояния. Для описания резонансного атомного отклика на линейно поляризованное излучение использована трёхуровневая модель. Значения частот квантовых переходов $|1\rangle \leftrightarrow |2\rangle$, $|1\rangle \leftrightarrow |3\rangle$ и $|2\rangle \leftrightarrow |3\rangle$ и скоростей релаксации элементов матрицы плотности атомов в низкочастотном поле определяются равенствами, аналогичными (1), и выражениями [23]

$$E_{2,3}(z,t) = -\frac{m_e e^4 Z^2}{8\hbar^2} \left(1 \pm 3F_{LF}(z,t) + \frac{21}{2} F_{LF}^2(z,t) \pm \frac{195}{8} F_{LF}^3(z,t) \right), \quad (3)$$

$$w_{ion}^{(2,3)}(z,t) = \frac{m_e e^4 Z^2}{8\hbar^3} \left(\frac{4}{|F_{LF}(z,t)|} \right)^{2 \pm s(z,t)} \exp \left\{ -\frac{2}{3|F_{LF}(z,t)|} \mp 3s(z,t) \right\}, \quad (4)$$

где $F_{LF}(z,t) = (2/Z)^3 E_{LF}(z,t)/E_a$, $s = \text{sgn}(F_{LF})$, $E_{LF}(z,t)$ - напряжённость низкочастотного поля, m_e и e - масса и заряд электрона соответственно. Показано, что если амплитуда низкочастотного поля ограничена условием $E_M/E_a > 0.01 \cdot Z^3$, то глубина изменения скоростей релаксации элементов матрицы плотности, обусловленного ионизацией из возбуждённых атомных

состояний, существенно превышает глубину изменения частот переходов вследствие эффекта Штарка. При этом многочастотность отклика атомов на монохроматическое высокочастотное излучение обусловлена ионизацией, практически прерывающей взаимодействие квазирезонансного излучения со средой и приводящей к появлению интервалов прозрачности оптически плотной поглощающей среды для квазирезонансного излучения дважды за период низкочастотного поля в окрестности максимумов модуля его напряжённости.

Показано, что в режиме быстрой ионизации из возбуждённых атомных состояний низкочастотным полем после фильтрации центральной спектральной составляющей излучения за средой возможно преобразование монохроматического квазирезонансного излучения в последовательность импульсов с длительностью, существенно меньшей той, что достигается в случае гармонической модуляции частот квантовых переходов (рис. 3). Показано, что формируемые импульсы являются близкими к спектрально-ограниченному пределу, а их длительность в оптимальных условиях может составлять менее полутора периодов заполнения. Построена аналитическая модель, с высокой степенью точности описывающая результаты численной оптимизации формирования импульсов (рис. 3).

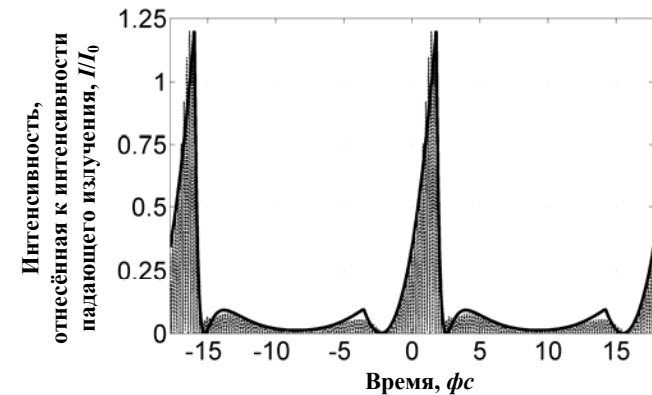


Рис. 3. Импульсы, сформированные из (квази)монохроматического излучения с длиной волны 121.6 нм в атомарном водороде, облучаемом излучением CO_2 -лазера с длиной волны 10.65 мкм и интенсивностью $I_M = 2.19 \cdot 10^{13} \text{ Вт/см}^2$. Длина области взаимодействия 0.9 мм , концентрация атомов водорода - 10^{17} 1/см^3 . Центральная составляющая спектра излучения за средой полностью подавлена. Длительность импульсов - 1.33 фс , период повторения - 17.8 фс пиковая интенсивность импульсов в 1.2 раза выше интенсивности падающего высокочастотного излучения. Сплошной жирной кривой показано аналитическое решение, а пунктиром - численное.

Аналитически и численно показано, что режим формирования импульсов из монохроматического квазирезонансного излучения является устойчивым к изменению параметров, характеризующих распространение излучения в среде в широких пределах. Исследован случай импульсного падающего квазирезонансного излучения, распространяющегося в среде, параметры которой модулируются монохроматическим или импульсным коллинеарно распространяющимся низкочастотным полем. Показано, что в режиме доминирующей ионизации из возбуждённых атомных состояний эффект формирования экстремально коротких импульсов сохраняется вплоть до длительностей импульса падающего квазирезонансного излучения, меньших данного периода. При этом импульс квазирезонансного излучения преобразуется при распространении в среде в цуг экстремально коротких импульсов с возможностью управления количеством импульсов в цуге.

Показана возможность формирования одиночного экстремально короткого импульса благодаря использованию: (1) короткого импульса падающего квазирезонансного излучения; (2) импульса квазирезонансного излучения с высокой интенсивностью и резким передним фронтом; и (3) импульса низкочастотного поля с резким передним фронтом (рис. 4).

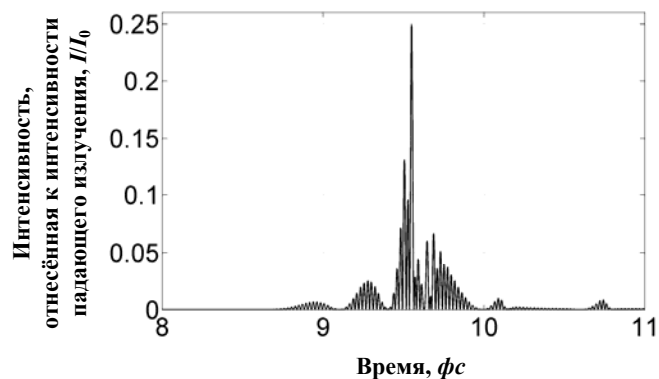


Рис. 4. Одиночный импульс, сформированный из излучения с центральной длиной волны 13.5 нм в среде ионов Li^{2+} , облучаемых импульсом второй гармоники Ti:Sa-лазера с центральной длиной волны 400 нм, длительностью 1.33 фс, (один период заполнения) и пиковой интенсивностью $I_M = 1.6 \cdot 10^{16} \text{ Вт/см}^2$. Длина среды - 130 мкм, концентрация ионов $\text{Li}^{2+} - 10^{19} \text{ 1/см}^3$. Центральная составляющая спектра излучения за средой отфильтрована с помощью спектрально-селективных Mo:Si зеркал [24]. Длительность сформированного импульса - 60 ас. При использовании импульса второй гармоники Ti:Sa-лазера с длительностью 4 фс (три периода заполнения) при тех же значениях остальных параметров за средой формируется одиночный импульс излучения с центральной длиной волны 13.5 нм длительностью 75 ас.

Показано, что при использовании источников интенсивного падающего квазирезонансного излучения эффективность преобразования в цуг экстремально коротких импульсов, определённая как отношение энергии, сосредоточенной в сформированных импульсах, к суммарной энергии импульсов падающего квазирезонансного и низкочастотного поля, может достигать нескольких процентов, а эффективность преобразования, определённая как отношение пиковой интенсивности сформированных экстремально коротких импульсов к суммарной интенсивности падающего низкочастотного и высокочастотного поля, - десятков процентов.

Показана возможность экспериментального формирования импульсов с длительностью до 700 ас из излучения с длиной волны 122 нм в среде атомарного водорода, облучаемой излучением параметрического источника света с центральной длиной волны 3200 нм, а также импульсов с длительностью до 60 ас из излучения с длиной волны 13.5 нм в среде ионов Li^{2+} , облучаемых излучением второй гармоники Ti:Sa-лазера с центральной длиной волны 400 нм. В первом случае длительность импульсов составляет менее двух, а во втором - менее полутора периодов заполнения, импульсы формируются без использования внешней подстройки фаз составляющих сгенерированного спектра.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Впервые показана возможность формирования экстремально коротких оптических импульсов на основе преобразования резонансного излучения в среде, облучаемой далеким от резонанса низкочастотным электромагнитным полем с интенсивностью, много меньшей порога ионизации из основного состояния частиц среды.
2. Выявлены и исследованы физические механизмы формирования экстремально коротких импульсов резонансного излучения: (1) модуляция частот резонансных квантовых переходов во времени и пространстве низкочастотным электромагнитным полем вследствие адиабатического эффекта Штарка или Зеемана; (2) возникновение интервалов прозрачности резонансных квантовых переходов в окрестности максимумов модуля напряженности низкочастотного поля вследствие туннельной ионизации *из возбужденных атомных состояний*.
3. Показано, что в зависимости от условий эксперимента экстремально короткие импульсы резонансного излучения могут быть сформированы под действием преимущественно одного из

механизмов. Аналитически и численно определены параметры формируемых импульсов и показана их устойчивость по отношению к изменениям условий эксперимента.

4. Показана возможность формирования ультракоротких импульсов резонансного излучения в двухуровневой и трёхуровневой среде с переменными частотами и ширинами спектральных линий квантовых переходов в трех случаях: (а) без использования подстройки фаз и амплитуд спектральных компонент выходного излучения, (б) с использованием фильтрации определённых составляющих спектра, (в) при помощи внешнего управления амплитудами и фазами спектральных составляющих. Определены оптимальные значения параметров.
5. Показано, что в оптимальных условиях длительность формируемых импульсов может быть менее полутора периодов высокочастотного заполнения, пиковая интенсивность - более чем десятикратно превышать интенсивность падающего излучения, а эффективность генерации - достигать нескольких процентов по энергии и нескольких десятков процентов по пиковой интенсивности.
6. Показана возможность формирования одиночного экстремально короткого импульса благодаря использованию: (а) короткого импульса квазирезонансного падающего излучения; (б) высокоинтенсивного импульса квазирезонансного излучения с резким передним фронтом; (в) импульса низкочастотного излучения с резким передним фронтом.
7. Определены экспериментальные условия формирования импульсов длительностью до 700 ас из резонансного излучения с длиной волны 122 нм в среде атомов водорода, а также импульсов длительностью до 60 ас из резонансного излучения с длиной волны 13.5 нм в среде ионов Li^{2+} .

Цитируемая литература

- [1] *A. H. Zewail* Femtochemistry: Atomic-Scale Dynamics of the Chemical Bond // *J. Phys. Chem. A* 2000, v. 104, № 24, pp. 5660–5694.
- [2] *F. Krausz, M. Ivanov* Attosecond physics // *Rev. Mod. Phys.* 2009, v. 81, № 1, pp. 163–234.
- [3] *P.M. Paul, E.S. Toma, P. Breger, G. Mullot, F. Augé, Ph. Balcou, H.G. Muller, P. Agostini* Observation of a train of attosecond pulses from high harmonic generation // *Science* 2001, v. 292, № 5522, pp. 1689–1692.
- [4] *M. Hentschel, R. Kienberger, Ch. Spielmann, G.A. Reider, N. Milosevic, T. Brabec, P. Corkum, U. Heinzmann, M. Drescher, F. Krausz* Attosecond metrology // *Nature* 2001, v. 414, № 6863, pp. 509–513.
- [5] *P. Agostini, L. F DiMauro* The physics of attosecond light pulses // *Rep. Prog. Phys.* 2004, v. 67, № 6, pp. 813–855.
- [6] *A. Scrinzi, M. Yu Ivanov, R. Kienberger, D. M. Villeneuve* Attosecond physics // *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys* 2006, v. 39, № 1, pp. R1–R37.
- [7] *P. B. Corkum, F. Krausz* Attosecond science // *Nature Physics* 2007, v. 3, № 6, pp. 381–387.
- [8] *E. Goulielmakis, V. S. Yakovlev, A. L. Cavalieri, M. Uiberacker, V. Pervak, A. Apolonski* Attosecond Control and Measurement: Lightwave Electronics // *Science* 2007, v. 317, № 5839, pp. 769–775.
- [9] *M. Drescher, M. Hentschel, R. Kienberger, M. Uiberacker, V. Yakovlev, A. Scrinzi, Th. Westerwalbesloh, U. Kleineberg, U. Heinzmann, F. Krausz* Time-resolved atomic inner-shell spectroscopy // *Nature*. 2002. v. 419, № 6909. pp. 803–807.
- [10] *L. C. Dinu, H. G. Muller, S. Kazamias, G. Mullot, F. Augé, Ph. Balcou, P. M. Paul, M. Kovačev, P. Breger, P. Agostini* Measurement of the Subcycle Timing of Attosecond XUV Bursts in High-Harmonic Generation // *Phys. Rev. Lett.* 2003, v. 91, № 6, Art. no. 063901.
- [11] *H. Niikura, F. Légaré, R. Hasbani, M. Yu Ivanov, D. M. Villeneuve, P. B. Corkum* Probing molecular dynamics with attosecond resolution using correlated wave packet pairs // *Nature* 2003, v. 421, № 6925, pp. 826–829.
- [12] *E. Goulielmakis, M. Uiberacker, R. Kienberger, A. Baltuska, V. Yakovlev, A. Scrinzi, Th. Westerwalbesloh, U. Kleineberg, U. Heinzmann, M. Drescher, F. Krausz* Direct Measurement of Light Waves // *Science* 2004, v. 305, № 5688, pp. 1267–1269.

- [13] *S. Baker, J. S. Robinson, C. A. Haworth, H. Teng, R. A. Smith, C. C. Chirilă, M. Lein, J. W. G. Tisch, J. P. Marangos* Probing Proton Dynamics in Molecules on an Attosecond Time Scale // *Science* 2006, v. 312, № 5772, pp. 424–427.
- [14] *E. Gagnon, P. Ranitovic, X.-M. Tong, C. L. Cocke, M. M. Murnane, H. C. Kapteyn, A. S. Sandhu* Soft X-ray-Driven Femtosecond Molecular Dynamics // *Science* 2007, v. 317, № 5843, pp. 1374–1378.
- [15] *M. Uiberacker, Th. Uphues, M. Schultze, A. J. Verhoef, V. Yakovlev, M. F. Kling, J. Rauschenberger, N. M. Kabachnik, H. Schröder, M. Lezius, K. L. Kompa, H.-G. Muller, M. J. J. Vrakking, S. Hendel, U. Kleineberg, U. Heinzmann, M. Drescher, F. Krausz* Attosecond real-time observation of electron tunnelling in atoms // *Nature*. 2007, v. 446, № 7136, pp. 627–632.
- [16] *A. L. Cavalieri, N. Müller, Th. Uphues, V. S. Yakovlev, A. Baltuka, B. Horvath, B. Schmidt, L. Blümel, R. Holzwarth, S. Hendel, M. Drescher, U. Kleineberg, P. M. Echenique, R. Kienberger, F. Krausz, U. Heinzmann* Attosecond spectroscopy in condensed matter // *Nature* 2007, v. 449, № 7165, pp. 1029–1032.
- [17] *E. Goulielmakis, M. Schultze, M. Hofstetter, V. S. Yakovlev, J. Gagnon, M. Uiberacker, A. L. Aquila, E. M. Gullikson, D. T. Attwood, R. Kienberger, F. Krausz, U. Kleineberg* Single-Cycle Nonlinear Optics // *Science* 2008, v. 320, № 5883 pp. 1614–1617.
- [18] *M. Y. Shverdin, D. R. Walker, D. D. Yavuz, G. Y. Yin, S. E. Harris* Generation of a Single-Cycle Optical Pulse // *Phys. Rev. Lett.* 2005, v. 94, № 3, Art. no. 033904.
- [19] *W.-J. Chen, Z.-M. Hsieh, S. W. Huang, H.-Y. Su, C.-J. Lai, T.-T. Tang, Ch.-H. Lin, C.-K. Lee, R.-P. Pan, C.-L. Pan, A. H. Kung* Sub-Single-Cycle Optical Pulse Train with Constant Carrier Envelope Phase // *Phys. Rev. Lett.* 2008, v. 100, № 16, Art. no. 163906.
- [20] Отчетный доклад президиума Российской академии наук «Научные достижения Российской академии наук в 2010 году». Москва: Наука, 2011, ISBN 978-5-02-037649-6.
- [21] *V. Pervak, I. Ahmad, J. Fulop, M. K. Trubetskov, A. V. Tikhonravov* Comparison of dispersive mirrors based on the time-domain and conventional approaches, for sub-5-fs pulses // *Opt. Express* 2009, v. 17, № 4, pp. 2207–2217.
- [22] *K. Hazu, T. Sekikawa, M. Yamashita* Spatial light modulator with an over-two-octave bandwidth from ultraviolet to near infrared // *Opt. Lett.* 2007, v. 32, № 22, pp. 3318–3320.

- [23] *Р. Я. Дамбург, В. В. Колосов* Теоретическое исследование водородных ридберговских атомов в электрических полях. В сб.: Ридберговские состояния атомов и молекул, под ред. *Р. Стеббингса и Ф. Даннинга*. Москва: Мир, 1985, стр. 42–87.
- [24] *T. Harada, T. Hatano, M. Yamamoto* Narrow Band Mo/Si Multilayers with Thick Si Structures // In proceedings of the 8th International Conference on X-ray Microscopy, edited by S. Aoki, Y. Kagoshima, Y. Suzuki, Conf. Proc. Series IPAP 2006, № 7, pp. 195–198, Tokyo, Japan: Institute of Pure and Applied Physics.

Основные материалы диссертации опубликованы в работах:

1. *Y.V. Radeonychev, V.A. Polovinkin, O. Kocharovskaya* Pulse Shaping via Modulation of Resonant Absorption // *Las. Phys.* 2009, v.19, № 4, pp. 769–775.
2. *В.А. Половинкин, Е.В. Радионычев* Формирование оптических импульсов посредством модуляции частоты резонансного квантового перехода в спектрально-неоднородной среде // *Квант. Электр.* 2010, т. 40, № 2, стр. 115–120.
3. *Y.V. Radeonychev, V.A. Polovinkin, O. Kocharovskaya* Extremely Short Pulses via Stark Modulation of the Atomic Transition Frequencies // *Phys. Rev. Lett.* 2010, v. 105, № 18, Art. no. 183902.
4. *V.A. Polovinkin, Y.V. Radeonychev, O. Kocharovskaya* Few-cycle attosecond pulses via periodic resonance interaction with hydrogen-like atoms // *Opt. Lett.* 2011, v. 36, № 12, pp. 2296–2298.
5. *Y.V. Radeonychev, V.A. Polovinkin, O. Kocharovskaya* Extremely Short Pulses via Resonantly Induced Transparency // *Las. Phys.* 2011, v. 21, № 7, pp. 1243–1251.
6. *В.А. Половинкин, Е.В. Радионычев* Формирование оптических импульсов в частотно модулированной резонансной двухуровневой среде // *Труды 11 Всероссийской научной конференции по радиофизике* (Н. Новгород, 7 мая 2007 г.), под ред. А. В. Кудрина, А. В. Якимова, стр. 109–110.
7. *В.А. Половинкин, Е.В. Радионычев* Компрессия оптических импульсов в резонансной двухуровневой среде // *Труды 12 Всероссийской научной конференции по радиофизике* (Н. Новгород, 7 мая 2008 г.), под ред. А. В. Якимова, С. М. Грача, стр.135–136.

8. *В.А. Половинкин, Е.В. Радионычев* Формирование видеоимпульсов оптического излучения в атомарном водороде посредством гармонической модуляции частот резонансных квантовых переходов // Доклады III Всероссийской школы по лазерной физике и лазерным технологиям, (Саров, 20–23 апреля 2009 г.), под ред. д. ф.–м. н. С.Г. Гаранина, стр. 106–111.
9. *V.A. Polovinkin, Y.V. Radeonychev, O. Kocharovskaya* Generation of few-cycle attosecond pulses via dynamic Stark shift and tunnel ionization in hydrogen-like medium // Proceedings of the IV-th International Conference "Frontiers of Nonlinear Physics" (Nizhny Novgorod – St.-Petersburg, Russia, July 13–20, 2010), p. 191–192.
10. *C. O'Brien, V. Polovinkin, F. Vagizov, R. Shakhmuratov, R. Akhmedzhanov, A. Bondartsev, L. Gushin, Y. Radeonychev, O. Kocharovskaya* Quantum coherence effects in solids: new regimes and applications // Proceedings of the IV-th International Conference "Frontiers of Nonlinear Physics" (Nizhny Novgorod – St.-Petersburg, Russia, July 13–20, 2010), p. 299.
11. *V.A. Polovinkin, Y.V. Radeonychev, O. Kocharovskaya* Nearly bandwidth-limited attosecond pulses via periodic resonance interaction with hydrogen-like atoms // Proceedings of the International OSA Topical Meeting "High Intensity Lasers and High Field Phenomena (HILAS 2011)" (Istanbul, Turkey, February 13–18, 2011), presentation number HWB4, published online: <http://www.opticsinfobase.org/search.cfm?meetingid=119&year=2011&meetingssession=HWB>.
12. *В.А. Половинкин* Генерация оптических импульсов при распространении резонансного монохроматического излучения в вибрирующей среде // Тезисы докладов 12 Нижегородской сессии молодых учёных (Н. Новгород, 16–21 апреля 2007г.), стр. 111.
13. *В.А. Половинкин, Е.В. Радионычев* Преобразование резонансного излучения в серию импульсов в двухуровневой среде с модулированной частотой перехода // Тезисы докладов конференции молодых учёных научной школы «Нелинейные волны – 2008» (Н. Новгород, 1–7 марта 2008г.), стр. 132–133.
14. *Y.V. Radeonychev, V.A. Polovinkin, O. Kocharovskaya* Pulse shaping via modulation of resonant absorption // Book of Abstracts of the 17-th International Laser Physics Workshop (LPHYS'08) (Trondheim, Norway, June 30 – July 4, 2008), p.85.
15. *В.А. Половинкин, Е.В. Радионычев* Формирование ультракоротких импульсов в резонансном поглотителе с гармонически модулированными параметрами // Тезисы докладов 14 Нижегородской сессии молодых ученых (Н. Новгород, 19–24 апреля 2009 г.), стр. 50.
16. *В.А. Половинкин, Е.В. Радионычев* Формирование ультракоротких импульсов на основе резонансного взаимодействия электромагнитного излучения с веществом // Тезисы докладов XIX Международной конференции «Фундаментальная атомная спектроскопия» (Архангельск - Соловки, 22–29 июня 2009 г.), стр. 58–59.
17. *В.А. Половинкин, Е.В. Радионычев* Формирование аттосекундных импульсов на основе динамического эффекта Штарка и туннельной ионизации возбуждённых состояний водородоподобных атомов // Тезисы докладов конференции молодых учёных научной школы «Нелинейные волны – 2010» (Н. Новгород, 6–12 марта 2010 г.), стр. 103.
18. *Е.И. Гаранькин, В.А. Половинкин, Е.В. Радионычев* Преобразование резонансного излучения в двухуровневой среде с модулированной шириной линии перехода // Тезисы докладов конференции молодых учёных научной школы «Нелинейные волны – 2010» (Н. Новгород, 6–12 марта 2010 г.), стр. 19.
19. *V.A. Polovinkin, Y.V. Radeonychev, O.A. Kocharovskaya* Attosecond pulses via dynamic Stark shift and tunnel ionization in hydrogen-like medium // in the Technical Digest of 14-th International conference Laser Optics 2010 on CD-ROM (St. Petersburg, Russia, June 28 – July 02, 2010), presentation number R5_099.
20. *F. Vagizov, R. Shakhmuratov, C. O'Brien, A. Bondartsev, L. Gushin, R. Akhmedzhanov, V. Polovinkin, Y. Radeonychev, O. Kocharovskaya* Quantum coherence effects in solids and their applications // in the Technical Digest of 19-th International Laser Physics Workshop (LPHYS' 10) on CD-ROM (Foz do Iguaçu, Brazil, July 5–9, 2010), presentation number 1.2.3.
21. *Y.V. Radeonychev, V.A. Polovinkin, O.A. Kocharovskaya* Extremely short pulses via resonantly induced transparency // in the Technical Digest of 19-th International Laser Physics Workshop (LPHYS' 10) on CD-ROM (Foz do Iguaçu, Brazil, July 5–9, 2010), presentation number 1.7.3.

22. *V.A. Polovinkin, Y.V. Radeonychev, O.A. Kocharovskaya* Extremely short pulses via periodic-resonance excitation of quantum system // in the Technical Digest of International conference ICONO/LAT 2010 on CD-ROM (Kazan, Russia, August 23–27, 2010), presentation number IThU4.
23. *V.A. Polovinkin, Y.V. Radeonychev, O. Kocharovskaya* Few-cycle attosecond pulses via periodic resonance interaction with hydrogen-like atoms // Book of Abstracts of the Physics of Quantum Electronics (PQE 2011) International Conference (Snowbird, Utah, USA, January 2–6, 2011), p. 157, <http://www.pqeconference.com/pqe2011/Abstract-Book-auth.pdf>.
24. *Y.V. Radeonychev, V.A. Polovinkin, O. Kocharovskaya* Resonant generation of few-cycle XUV pulses in hydrogenlike atoms // in the Technical Digest of 20-th International Laser Physics Workshop (LPHYS' 11) on CD-ROM (Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, July 11–15, 2011), presentation number 1.11.4.
25. *V.A. Polovinkin, Y.V. Radeonychev, O. Kocharovskaya* Formation of ultrashort gamma-ray pulses via vibration of resonant absorber // in the Technical Digest of 20-th International Laser Physics Workshop (LPHYS' 11) on CD-ROM (Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, July 11–15, 2011), presentation number P1.4.