

Свита Сергей Юрьевич

**ПОГЛОЩЕНИЕ И РАССЕЯНИЕ УЛЬТРАКОРОТКИХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ
НА АТОМАХ И НАНОЧАСТИЦАХ**

Специальность 01.04.21 – Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)».

- Научный руководитель** доктор физико-математических наук, доцент
Астапенко Валерий Александрович
- Официальные оппоненты:** Шапиро Давид Абрамович
доктор физико-математических наук,
профессор, «Институт автоматизации и
электрометрии СО РАН (ИАиЭ СО РАН)»,
заведующий лабораторией фотоники
- Есеев Марат Каналбекович
доктор физико-математических наук, доцент,
«Северный (Арктический) федеральный
университет имени М.В. Ломоносова»,
профессор кафедры фундаментальной и
прикладной физики
- Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Воронежский государственный
технический университет (ВГТУ)», г. Воронеж

Защита состоится 13 апреля 2017 года в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.156.09 Московского физико-технического института по адресу: 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского физико-технического института (государственного университета) и на сайте www.mipt.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2017г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Токунов Юрий Матвеевич

Общая характеристика работы

Актуальность и степень проработанности темы диссертации

Развитие технологии генерации ультракоротких электромагнитных импульсов (УКИ) с заданными параметрами открыли новые области исследования в физике взаимодействия излучения с веществом, важные как с фундаментальной точки зрения, так и для разнообразных технических, биологических и медицинских применений. Так, полученные к настоящему времени аттосекундные импульсы (с длительностью несколько десятков аттосекунд [1]) перспективны для исследования динамики квантовых систем в реальном масштабе времени [2], полуцикловые импульсы терагерцового диапазона [3] позволяют манипулировать Ридберговскими атомами, что открывает новые возможности для построения квантовых вычислительных устройств, зависимость электромагнитного взаимодействия от фазы несущей по отношению к огибающей, характерная для УКИ, позволяет реализовать фазовый контроль электромагнитных процессов [4].

Для описания взаимодействия УКИ с веществом, вообще говоря, оказывается недостаточным или даже неадекватным традиционный подход, основанный на применении понятия вероятности фотопроцесса в единицу времени и интенсивности излучения. Вместо этого следует использовать вероятность за все время действия импульса и напряженность электрического поля в импульсе, как это было показано в статье [5]. Полученная в работе формула для полной вероятности фотопроцесса описывает широкий круг электромагнитных процессов в рамках справедливости теории возмущений, она используется как базовый элемент рассмотрения в диссертации.

Применение вышеуказанного подхода позволяет выявить качественно новые характеристические черты электромагнитных явлений в поле УКИ, не имевшие место в случае длинных импульсов. К этим чертам в первую очередь следует отнести, вообще говоря, нелинейную зависимость вероятности от длительности импульса. Кроме того, спектральные и угловые характеристики фотопроцессов оказываются чувствительными к длительности импульса.

Наряду с формулой, выведенной в статье [5] в рамках теории возмущений, для описания возбуждения двухуровневой системы УКИ в работе [6] использовался непертурбативный подход, основанный на решении оптических уравнений Блоха. Достоинством указанного метода является возможность рассмотрения интенсивных импульсов вне рамок теории возмущений, а существенным недостатком – применимость только для связанно-связанных переходов в основном в двухуровневом приближении.

В данной работе рассматриваются три объекта воздействия УКИ на вещество: связанно-связанный переход в произвольной квантовой системе, нейтральные атомы различных типов и металлические наносферы в диэлектрической матрице. Выбор вышеуказанных мишеней обусловлен их важностью либо для фундаментальной науки, либо для технологических применений. Так, связанно-связанный переход в квантовой системе является элементарной составляющей множества фотоиндуцированных процессов в дискретном спектре. Фотоионизация атомов играет важную роль в самых различных областях науки: от физики плазмы до лазерной физики. Сферические наночастицы используются в качестве сенсоров, а также в ряде био-медицинских приложений.

Взаимодействие УКИ с двухуровневыми системами, атомами и металлическими наносферами рассматривалось и ранее (см. работы [6], [7], [8], а также монографию [9]). Были установлены ряд важных закономерностей этого взаимодействия, о некоторых из них говорилось выше, но, естественно, не были исследованы все аспекты рассмотренных явлений и все объекты воздействия УКИ. Кроме того, теоретический анализ, как правило, основывался на численных расчетах, не позволявших установить функциональные взаимосвязи между параметрами задачи и особенностями рассчитанных зависимостей. Настоящая диссертация в значительной степени устраняет указанный пробел. В ней, наряду с численным анализом, получен ряд существенных аналитических результатов, позволяющих на качественном уровне интерпретировать особенности взаимодействия УКИ с различными мишенями. Важным развитием предыдущих исследований является рассмотрение различных типов уширения возбуждаемого перехода в атоме, в частности, подробно проанализирован случай хольцмарковского уширения. При

анализе рассеяния УКИ на металлических наносферах в диэлектрике, проведенном в предыдущих работах, не учитывалась угловая зависимость вероятности рассеяния, а также интерференция вкладов поверхностных различных мультипольностей плазмонов, что весьма существенно для практических применений.

Цель диссертационной работы

Исследование спектрально-угловых и временных особенностей поглощения и рассеяния ультракоротких электромагнитных импульсов различной формы на атомах в основном и высоковозбужденных состояниях, а также на металлических наносферах в диэлектрической матрице с учетом плазмонных интерференционных эффектов.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи

- Построена аналитическая теория возбуждения неоднородно-уширенного перехода связанно-связанного перехода гауссовой формы под действием УКИ;
- проведен численный анализ полной вероятности возбуждения атомов и ионов в плазме при наличии различных типов уширения в зависимости от длительности и несущей частоты УКИ;
- выведены формулы, описывающие вероятность возбуждения хольцмарковски-уширенных переходов атомов в плазме через корреляционную функцию дипольных моментов;
- исследовано возбуждение дублетов атомов лития и натрия под действием УКИ;
- рассчитана и проанализирована фотоионизация атомов благородных газов в поле УКИ,
- получены аналитические выражения для полной вероятности ионизации Ридберговских атомов под действием ультракоротких вейвлет-импульсов;

- исследовано поглощение УКИ металлическими наночастицами за счет возбуждения поверхностных плазмонов различной мультипольности;
- рассчитаны и проанализированы спектрально-угловые зависимости рассеяния монохроматического излучения и УКИ на металлических наносферах с учетом интерференционных плазмонных эффектов;
- рассчитано и проанализировано фотовозбуждение экситонного перехода через рассеяние УКИ на атомном кластере.

Научная новизна

- Впервые получено выражение для полной вероятности фотовозбуждения неоднородно-уширенного перехода гауссовой формы электромагнитным импульсом малой длительности;
- выведена формула, позволяющая рассчитывать возбуждение хольцмарковски-уширенных переходов в атоме через коррелятор дипольных моментов плазменных электронов;
- впервые проанализированы особенности возбуждения спектральных дублетов в атомах щелочных металлов под действием УКИ;
- впервые рассчитаны и проанализированы вероятности фотоионизации атомов благородных газов (Ar, Kr, Xe) под действием УКИ скорректированной гауссовской формы;
- впервые получены аналитические выражения, описывающие фотоионизацию Ридберговских атомов в поле вейвлет-импульсов без несущей частоты;
- впервые исследована вероятность поглощения УКИ на металлических наносферах в диэлектрике как функция длительности возбуждающего импульса;
- впервые учтено влияние плазмонных интерференционных эффектов на спектрально-угловое распределение излучения при рассеянии УКИ на металлических наносферах;
- впервые исследована возможность увеличения вероятности возбуждения экситонного перехода ультракоротким импульсом, рассеянным на атомном кластере.

Теоретическая и практическая значимость

Результаты диссертации существенным образом дополняют теорию взаимодействия УКИ с атомами и наночастицами, выявляя новые закономерности фотопроцессов, характерные для ультракоротких импульсов. Так, полученное в работе выражение для энергии возбуждения связанно-связанного перехода при наличии гауссовского уширения является основой для анализа специфических черт зависимости вероятности процесса от длительности импульса. Оно может быть использовано в расчетах поглощения УКИ атомами, полупроводниковыми наночастицами, а также любыми квантовыми объектами, содержащими дискретный энергетический спектр в рамках применимости теории возмущений. Выведенное в диссертации представление вероятности фотовозбуждения атомов в случае хольцмарковского уширения позволяет использовать в расчетах взаимодействия УКИ с атомами в плазме имеющиеся данные для коррелятора дипольных моментов, полученные методами молекулярной динамики, открывая тем самым новые возможности моделирования радиационных процессов в плазме. Проведенный в диссертации анализ фотоионизации атомов благородных газов УКИ, в частности, важен для оценки возможности использования данных атомов в генерации гармоник и получении УКИ. Существенное практическое значение имеет исследование особенностей поглощения и рассеяния УКИ на металлических наносферах в диэлектрической среде для разнообразных сенсорных (оптических энкодерах), биологических и медицинских применений, а также в устройствах навигации, таких как приборы высокоточного определения направления на географический север, в которых основным измерительным элементом являются волоконно-оптические датчики. Среди этих применений важную роль играет фототермическая терапия опухолей, нанохирургия на клеточном уровне, модификация молекулярных и субклеточных структур. Проведенное в работе исследование возможности увеличения вероятности возбуждения связанно-связанных переходов в квантовых

объектах УКИ, рассеянными на атомарных кластерах, важно для решения проблемы селективного возбуждения нанообъектов электромагнитным полем.

Методология и методы исследования

В работе при исследовании возбуждения связанно-связанных переходов и ионизации атомов благородных газов использовались методы квантово-механической теории возмущений. Для расчета вероятности фотоионизации Ридберговских состояний атомов использовалась квазиклассическая формула Крамерса. В случае поглощения и рассеяния УКИ на металлических наносферах в диэлектрической среде применялась теория Ми.

Положения, выносимые на защиту

1. Аналитическое описание возбуждения связанно-связанного электронного перехода при наличии спектрального уширения гауссовой формы за все время действия УКИ.
2. Зависимости от времени вероятности возбуждения электронного перехода в атоме при различных формах спектральной линии.
3. Описание вероятности возбуждения хольцмарковски-уширенного атомного перехода в плазме через коррелятор дипольных моментов плазменных электронов.
4. Временные (от длительности импульса) зависимости вероятности возбуждения дублетов в атомах щелочных металлов.
5. Вероятность ионизации атомов благородных газов как функция несущей частоты и длительности УКИ.
6. Аналитическая теория ионизации Ридберговских атомов ультракороткими вейвлет-импульсами.
7. Зависимость от длительности импульса вероятности поглощения УКИ на металлических наносферах в диэлектрике.

8. Спектрально-угловые и временные зависимости рассеяния электромагнитных импульсов на металлических наносферах в диэлектрике с учетом плазмонных интерференционных эффектов.

9. Анализ вероятности возбуждения экситонного перехода полем рассеянного на атомном кластере УКИ.

Степень достоверности и апробация результатов

Все результаты диссертации получены на основании строго электродинамического подхода либо в рамках квантово-механической теории возмущений (для связанно-связанных переходах в квантовых системах и фотоионизации атомов), либо с использованием теории Ми (в случае металлических наносфер в диэлектрике). Численный анализ подтверждает функциональные зависимости, полученные в рамках аналитического подхода в области применимости последнего.

Основные результаты диссертации были представлены на следующих международных и всероссийских конференциях:

1. Astapenko V.A., Svita S.Yu. «Absorption of Ultrashort Electromagnetic Pulses», 22nd International Conference on Spectral Line Shapes, г. Туллахома, Теннесси, США. 1-6 июня 2014г.

2. Astapenko V.A., Svita S.Yu. «Excitation of Quantum Dot by Ultrashort Electromagnetic Pulse Scattering on Atomic Cluster», 7th International Conference on Photonics, Devices and Systems, г. Прага, Чехия. 27-29 августа 2014г.

3. Свита С.Ю., Астапенко В.А. «Фотоионизация атомов Kr, Хе ультракороткими электромагнитными импульсами», XII Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике, г. Самара, Россия. 12-16 ноября 2014 г.

4. Свита С.Ю., Астапенко В.А. «Поглощение ультракоротких электромагнитных импульсов серебряными наносферами в стекле», 57-й научной

конференции МФТИ с международным участием, посвященной 120-летию со дня рождения П.Л. Капицы, г. Долгопрудный, Россия. 24-29 ноября 2014г.

5. Astapenko V.A., Svita S.Yu. «Plasmonic interference effects in scattering of ultrashort electromagnetic pulses on silver nanospheres», Nanoplasmonics: Faraday Discussion 178, г. Лондон, Великобритания. 16-18 февраля 2015г.

6. Astapenko V.A., Svita S.Yu. «Photoionization of Rydberg States by Ultrashort Wavelet Pulses», Saint-Petersburg OPEN 2015, г. Санкт-Петербург, Россия. 6-8 апреля 2015г.

7. Astapenko V.A., Svita S.Yu. «Scattering of electromagnetic pulses on metallic nanospheres with account for plasmonic interference effects», META'15, the 6th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics», г. Нью-Йорк, США. 4-7 августа 2015г.

8. Astapenko V.A., Svita S.Yu. «Dipole and Quadrupole Scattering of Ultra Short Pulses on Metal Nanospheres», ICOP 2015: 17th International Conference on Optics and Photonics, г. Барселона, Испания. 17-18 августа 2015г.,

9. Svita S.Yu., Astapenko V.A. «Absorption of Ultrashort Electromagnetic Pulses on Gold Nanospheres in Various Dielectric Media», ICMTP 2016: 18th International Conference on Mathematical and Theoretical Physics, г. Нью-Йорк, США. 6-7 июня 2016г.

10. Astapenko V.A., Sakhno S.V., Svita S. Yu., Lisitsa V.S. «Excitation of atoms and ions in plasmas by ultrashort electromagnetic pulses», 23rd International Conference on Spectral Line Shapes, г. Торун, Польша. 19-24 июня 2016г.,

а также доложены на научных семинарах в университете Пьера и Марии Кюри (Париж, Сорбонна) и университете Экс-Марсель (Прованс, Франция) в 2014-2015 гг.

Работа по теме диссертационного исследования выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках Госзаказа (НИР №1940), а также государственного контракта от «17» июня 2014г. № 14.575.21.0017 «Разработка новых инструментальных средств для навигации и определения ориентации объектов в пространстве».

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 9 печатных работах, 7 из которых входят в список ВАК, а также индексируются в базе данных Web of Science и Scopus. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора

Все основные результаты диссертации получены лично автором, либо при его непосредственном участии. Автором были разработаны методы решения поставленных задач, дан аналитический вывод ряда основополагающих формул.

Основное содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность работы и полагаются цели. Также определяется научная новизна, практическая ценность и положения, выносимые на защиту.

В **Первой главе** настоящей работы рассматривается взаимодействие УКИ с неоднородно-уширенными переходами, зависимость поглощаемой энергии неоднородно-уширенным переходом от несущей частоты и длительности УКИ.

Выведено аналитическое выражение для энергии возбуждения связанно-связанного перехода с гауссовым уширением за все время действия УКИ гауссовой формы. На основании полученной формулы проанализированы частотно-временные характеристики процесса. В частности, установлены критерии появления экстремумов в зависимости поглощенной энергии от длительности УКИ.

В рамках теории возмущений энергии излучения, поглощенная на связанно-связанном переходе $|1\rangle \rightarrow |2\rangle$ за все время действия импульса имеет вид [5]:

$$\Delta E_{21} = \frac{c}{(2\pi)^2} \int_0^{\infty} \sigma_{21}(\omega') |E(\omega')|^2 d\omega', \quad (1)$$

где $\sigma_{21}(\omega')$ – сечение фотовозбуждения рассматриваемого перехода, который предполагаем неоднородно-уширенным $G_{21}(\omega') = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \Delta\omega_{inh}} \exp\left\{-\frac{(\omega' - \omega_c)^2}{2\Delta\omega_{inh}^2}\right\}$ (2), а $E(\omega')$ – фурье-образ напряженности электрического поля в импульсе, c – скорость света.

Вводится безразмерная длительность импульса:

$$y = \sqrt{2} \Delta\omega_{inh} \tau = 2\sqrt{2\pi} \frac{\Delta\omega_{inh}}{\omega} n, \quad (3)$$

и безразмерная отстройка несущей частоты импульса от центральной частоты перехода:

$$\rho = \frac{\omega - \omega_c}{\sqrt{2} \Delta\omega_{inh}}. \quad (4)$$

В результате вычисления интеграла функции (1) для поглощенной энергии на рассматриваемом переходе имеем:

$$\Delta E_{21} \cong \frac{\pi}{8} f_{21} \frac{e^2 E_0^2}{m \Delta\omega_{inh}^2} Fn(n, q, \rho), \quad (5)$$

где

$$Fn(n, q, \rho) = \frac{1}{q} \frac{n^2}{\sqrt{q^2 + n^2}} \exp\left\{-\rho^2 \frac{n^2}{q^2 + n^2}\right\} \quad (6)$$

– функция безразмерных переменных, определяющая зависимость поглощенной энергии от количества циклов несущей n частоты УКИ, спектральной отстройки (нормированная энергия возбуждения) и безразмерного параметра q :

$$q = \frac{\omega}{2\sqrt{2\pi} \Delta\omega_{inh}}, \quad (7)$$

который с учетом того, что $\omega \approx \omega_c$, можно назвать «добротностью» перехода.

На основании численного расчета проанализирована полная вероятность возбуждения связанно-связанного перехода как функция длительности УКИ при наличии различных типов уширения: лоренцевского, гауссовского и хольцмарковского.

Рассмотрено поглощение скорректированного гауссовского импульса [10] на связанно-связанном переходе, для различных типов уширения.

В случае хольцмарковского уширения линии перехода получено аналитическое выражение для полной вероятности фотовозбуждения атома в плазме через коррелятор дипольных моментов плазменных электронов, для которого хорошо развиты молекулярно-динамические методы расчета. Рассчитана вероятность возбуждения атомных переходов в случае холодной и плотной, а также горячей и разреженной плазмы.

Вероятность поглощения на радиационном переходе с хольцмарковским уширением определяется выражением:

$$W_{nk} = \frac{e^2}{\pi m \hbar} \beta f_{nk} \int_0^\infty \int_0^\infty x \cdot \sin(\beta x) \cdot \exp\left(-x^{\frac{3}{2}}\right) \cdot \frac{|E(\omega')|^2}{\omega'} dx \cdot d\omega' \quad (8)$$

где f_{nk} – сила осциллятора, $E(\omega')$ – фурье-образ напряженности электрического поля в импульсе, e – заряд электрона.

После подстановки фурье-образ напряженности электрического поля УКИ и интегрирования, получаем выражения (9), (10) вероятности поглощения УКИ на переходе с хольцмарковским уширением.

$$W_{Hol} \cong \frac{\sqrt{\pi}}{4} f_0 E_0^2 \frac{\tau}{\omega_0 \Delta} J_{Hol}\left(\Delta \tau, \frac{\omega - \omega_0}{\Delta}\right) \quad (9)$$

$$J_{Hol}(\alpha, \beta) \cong \int_0^\infty x \exp\left(-x^{3/2} - x^2/4\alpha^2\right) \left[x \frac{\cos(\beta x)}{2\alpha^2} + \beta \sin(\beta x) \right] dx \quad (10)$$

где α, β безразмерные величины, определяемые как $\alpha = \Delta \tau$, где Δ – величина хольцмарковского уширения, τ – длительность УКИ; $\beta = \frac{\omega - \omega_0}{\Delta}$.

Согласно полученному выражению (10) величина вероятности зависит от двух параметров: $\alpha = \Delta \tau$ и $\beta = \frac{\omega - \omega_0}{\Delta}$. Из рис. 1 видно, что максимумы функции $J_{Hol}(\alpha, \beta)$ достигаются при $\beta_{\max} \cong \pm 1.85$, причем с ростом параметра α значение β_{\max} уменьшается по модулю вплоть до $\beta_{\max} \cong \pm 1.65$, а при $\alpha \cong 0.4$ исчезает центральный минимум.

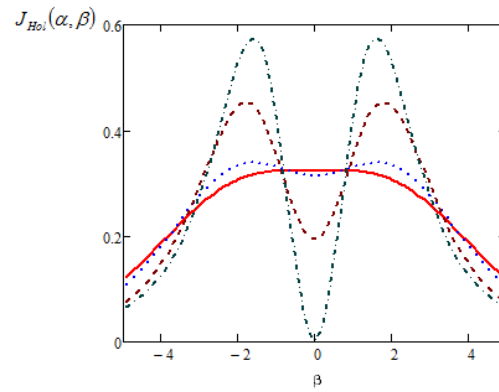


Рис. 1. Зависимость вероятности возбуждения перехода Ly_β УКИ от параметра β для разных значений параметра $\alpha = \Delta\tau$. Сплошная красная кривая – $\alpha = 0,4$, пунктирная – $\alpha = 0,5$, штриховая – $\alpha = 1$, штрих-пунктирная $\alpha = 10$.

Рассчитаны и проанализированы частотные и временные зависимости поглощенной энергии при возбуждении дублетных состояний в атомах щелочных металлов под действием УКИ. В частности, показано, что характер функциональной зависимости поглощенной энергии от длительности импульса существенно зависит от величины несущей частоты электромагнитного импульса.

Во **Второй главе** рассматриваются особенности фотоионизации атомов благородных газов под воздействием УКИ. В частности, рассмотрена ионизация атомов Kr, Xe, Ar скорректированными гауссовскими импульсами различной длительности.

В основе метода расчета полной (за все время действия УКИ) вероятности фотоионизации атомов W_{ph} лежит выражение для величины W_{ph} , полученное в работе [5]:

$$W_{ph} = \frac{c}{4\pi^2} \int_{I_{th}/\hbar}^{\infty} \sigma_{ph}(\omega') \frac{|E(\omega')|^2}{\hbar\omega'} d\omega', \quad (11)$$

где I_{th} – потенциал фотоионизации атома, $\sigma_{ph}(\omega')$ – сечение фотоионизации, $E(\omega')$ – Фурье-образ УКИ, c – скорость света в вакууме.

Зависимость полной вероятности фотоионизации атома ксенона от длительности импульса τ для различных частот ω , существенно превышающих пороговую частоту, приведена на рис 2.

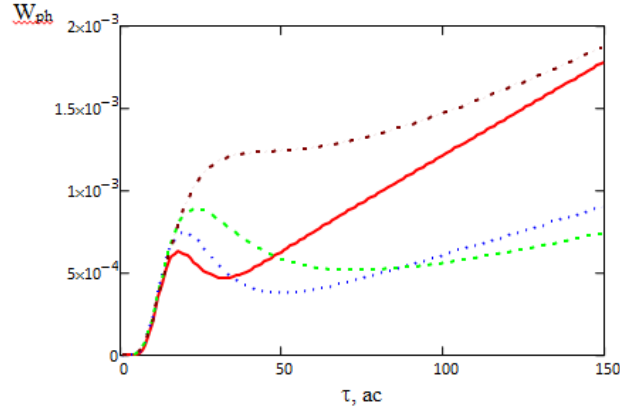


Рис. 2. Зависимость полной вероятности фотоионизации атома ксенона от длительности импульса τ для различных частот ω : сплошная кривая – $\hbar\omega = 40$ эВ; пунктир – $\hbar\omega = 50$ эВ; штриховая кривая – $\hbar\omega = 60$ эВ; штрих-пунктир – $\hbar\omega = 70$ эВ.

Построена аналитическая теория фотоионизации Ридберговских атомов под действием ультракоротких вейвлет-импульсов в рамках применимости теории возмущений и квазиклассического приближения.

Фурье-образы вейвлет импульсов имеют вид [8]:

$$E_{\cos}(\omega) = 2\sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt[4]{\pi} E_0 \omega^2 \tau^3 \exp(-\omega^2 \tau^2 / 2) \quad (12)$$

$$E_{\sin}(\omega) = 2i \sqrt[4]{\pi} E_0 \omega \tau^2 \exp(-\omega^2 \tau^2 / 2) \quad (13)$$

где E_0 – амплитуда напряженности электрической составляющей импульса, а τ – параметр, определяющий длительность импульса.

Используя выражения (11), (12) и формулу Крамерса, получаем следующее выражение для вероятности фотоионизации атома в Ридберговском состоянии \cos -вейвлет УКИ ($I_{nZ_{eff}} = Z_{eff}^2 / 2n^2$ есть потенциал ионизации Ридберговского состояния):

$$W_n^{(\cos)}(\tau) = \frac{2^8}{9\sqrt{3}} \left[\frac{E_0}{E_{sc}} \right]^2 f_c(\tilde{\tau} = \tau I_{nZ_{eff}}), \quad (14)$$

$$E_{sc}(n, Z_{eff}) = \frac{Z_{eff}^3}{n^{5/2}}, \quad (15)$$

здесь $f_c(\tilde{\tau}) = \tilde{\tau}^5 \operatorname{erfc}(\tilde{\tau})$ есть скэйлинговая функция обезразмеренной переменной времени $\tilde{\tau} = \tau I_{nZ_{\text{eff}}}$, $\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$.

На рис. 3 изображена вероятность фотоионизации Ридберговских состояний с заданным квантовым числом ($n = 10$, $Z_{\text{eff}} = 1$) как функция длительности. Величина амплитуды напряженности электрического поля задана $E_0 = 10^{-6}$ ат. ед. Малость напряженности электрического поля позволяет пренебречь смешиванием Ридберговских состояний в силу влияния Штарк-эффекта.

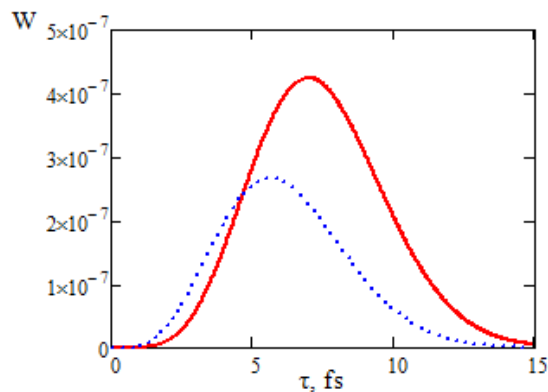


Рис. 3. Фотоионизация Ридберговского состояния ($n = 10$, $Z_{\text{eff}} = 1$) \cos -вейвлет (красная сплошная кривая) и \sin -вейвлет (синяя пунктирная кривая) УКИ.

Также для Ридберговских атомов проанализирована вероятность фотоионизации состояний с заданным главным квантовым числом и с заданными главным и орбитальным квантовыми числами. Анализируется воздействие УК \sin -, \cos -вейвлет-импульсом. Фурье-образы воздействующего УКИ описываются выражениями (12), (13).

В **Третьей** главе рассмотрено взаимодействие УКИ с металлическими наносферами, а также возбуждение квантовой точки через рассеяние на атомном кластере.

На рис. 4 представлена спектральная зависимость энергии, поглощенной наночастицей с радиусом 20 нм, после воздействия на нее СГИ различной длительности (поглощенная энергия разделена еще на число циклов на несущей частоте в СГИ).

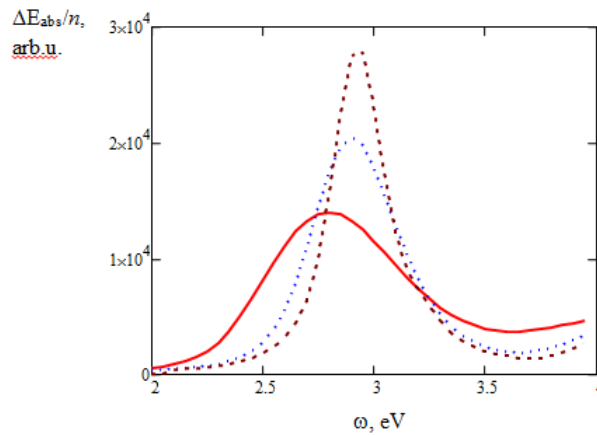


Рис. 4. Нормированная на число циклов энергия СГИ различной длительности, поглощенная серебряной наносферой радиуса 20 нм в стекле, как функция несущей частоты: сплошная кривая – двухцикловый импульс ($n = 2$), пунктир – четырехцикловый импульс ($n = 4$), штриховая кривая – восьмицикловый импульс ($n = 8$)

Рассчитана спектрально-угловая эффективность рассеяния монохроматического излучения на металлических наносферах в различных диэлектрических матрицах с учетом интерференции вкладов дипольных и квадрупольных поверхностных плазмонов в процесс рассеяния.

Исследована зависимость вероятности рассеяния УКИ на золотых и серебряных наносферах в стекле для различных несущих частот. Показано, что из-за влияния межзонного поглощения в золоте плазмонные интерференционные эффекты в рассеянии на золотых наносферах не проявляются, в то время как в случае серебряных наносфер эти эффекты весьма существенны в спектральном диапазоне, отвечающему квадрупольному резонансу.

Спектральные эффективности рассеяния назад, вперед и нормированная интегральная эффективность рассеяния излучения на серебряных наносферах с радиусом 40 нм, рассчитанные по вышеприведенным формулам, представлены на рис. 5.

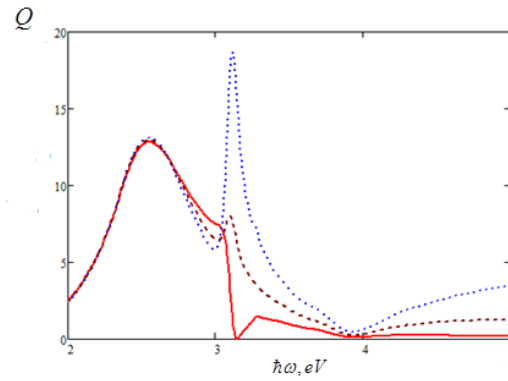


Рис. 5. Спектральная эффективность рассеяния на серебряной наносфере радиуса 40 нм в стекле: сплошная кривая – рассеяние назад, пунктир – рассеяние вперед, штриховая кривая – интегральное по углу рассеяние

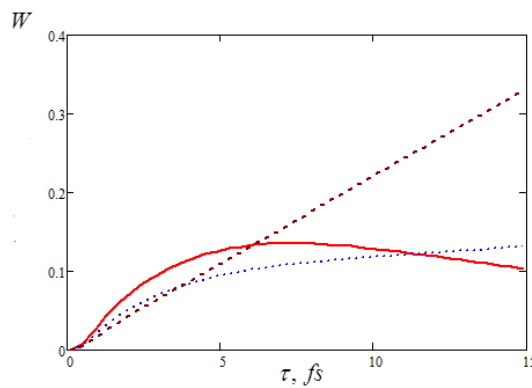


Рис. 6. Зависимость вероятности рассеяния электромагнитного импульса на серебряной наносфере ($r_s = 42$ нм) в стекле от его длительности для различных углов рассеяния: сплошная кривая – $\theta = 180^\circ$, пунктир – $\theta = 150^\circ$, штриховая кривая – $\theta = 135^\circ$; $\varphi = 0^\circ$, несущая частота $\hbar\omega = 3.132$ эВ.

Проанализирована вероятность возбуждения экситонного перехода в квантовой точке электрическим полем рассеянного на атомарном кластере УКИ скорректированной гауссовской формы. Установлены критерии увеличения вероятности такого возбуждения по сравнению с прямым возбуждением экситонного перехода (без рассеяния на атомарном кластере).

Получено отношение вероятности возбуждения квантовой точки через рассеяние на атомном кластере к вероятности прямого возбуждения:

$$\frac{W_{21}^{sc}}{W_{21}^{dir}} \cong (3 \cos^2 \theta + 1)^2 \cdot \left(\frac{R}{r}\right)^6 \left(\frac{\omega_p}{\Gamma}\right)^2 \quad (16)$$

На рис. 7 приведена зависимость отношения вероятностей возбуждения квантовой точки через рассеяние на атомном кластере Na_{40} к прямому возбуждению для различных расстояний между атомным кластером и квантовой точкой.

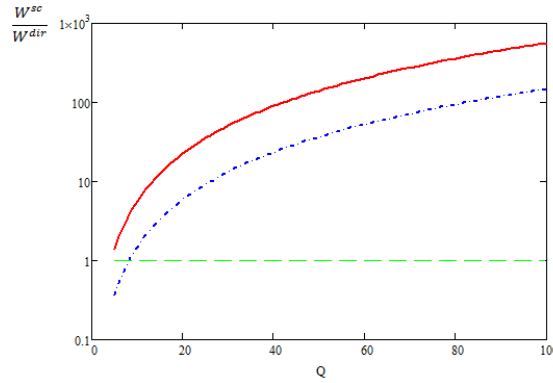


Рис. 7. Зависимость отношения вероятности возбуждения квантовой точки через рассеяние на атомном кластере к вероятности прямого возбуждения. Радиус атомного кластера $R = 0,78$ нм, плазмонная частота $\hbar\omega_p = 2$ эВ, $\theta = \pi$. Сплошная кривая – расстояние между квантовой точкой и кластером $r = 2$ нм, штрих-пунктирная – расстояние $r = 2,5$ нм.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации:

1. Выведено аналитическое выражение для энергии возбуждения связанно-связанного перехода с гауссовым уширением за все время действия УКИ гауссовой формы. Проанализированы частотно-временные характеристики процесса.
2. На основании численного расчета проанализирована полная вероятность возбуждения связанно-связанного перехода как функция длительности УКИ при наличии различных типов уширения: лоренцевского, гауссовского и хольцмарковского.
3. В случае хольцмарковского уширения линии перехода получено аналитическое выражение для полной вероятности фотовозбуждения атома в плазме через коррелятор дипольных моментов плазменных электронов, для которого хорошо развиты молекулярно-динамические методы расчета. Рассчитана

вероятность возбуждения атомных переходов в случае холодной и плотной, а также горячей и разреженной плазмы.

4. Рассчитаны и проанализированы частотные и временные зависимости поглощенной энергии при возбуждении дублетных состояний в атомах щелочных металлов под действием УКИ. В частности, показано, что характер функциональной зависимости поглощенной энергии от длительности импульса существенно зависит от величины несущей частоты электромагнитного импульса.

5. На основании общей формулы для вероятности фотопроцесса в поле УКИ и с использованием экспериментальных данных для сечений фотоионизации рассчитаны и проанализированы временные и частотные характеристики полной вероятности фотоионизации атомов благородных газов (аргона, криптона и ксенона).

6. Построена аналитическая теория фотоионизации Ридберговских атомов под действием ультракоротких вейвлет-импульсов в рамках применимости теории возмущений и квазиклассического приближения.

7. Исследовано поглощение УКИ скорректированной гауссовской формы металлическими наночастицами в диэлектрической матрице как функция длительности импульса. Детально проанализировано отличие поглощения УКИ от поглощения длинных импульсов для различных параметров задачи (радиуса наносферы, несущей частоты и длительности импульса).

8. Рассчитана спектрально-угловая эффективность рассеяния монохроматического излучения на металлических наносферах в различных диэлектрических матрицах с учетом интерференции вкладов дипольных и квадрупольных поверхностных плазмонов в процесс рассеяния.

9. Исследована зависимость вероятности рассеяния УКИ на золотых и серебряных наносферах в стекле для различных несущих частот. Показано, что из-за влияния межзонного поглощения в золоте плазмонные интерференционные эффекты в рассеянии на золотых наносферах не проявляются, в то время как в случае серебряных наносфер эти эффекты весьма существенны в спектральном диапазоне, отвечающему квадрупольному резонансу.

10. Проанализирована вероятность возбуждения экситонного перехода в квантовой точке электрическим полем рассеянного на атомарном кластере УКИ

скорректированной гауссовской формы. Установлены критерии увеличения вероятности такого возбуждения по сравнению с прямым возбуждением экситонного перехода (без рассеяния на атомарном кластере).

Заключение

В развитии настоящей работы предполагается исследовать возбуждение атомов в плазме под действием УКИ с учетом поглощения излучения, а также изменение формы УКИ при их рассеянии на атомах и наночастицах вне рамок дипольного приближения.

Результаты диссертации рекомендуются к использованию в следующих организациях: МФТИ, МИФИ, РНЦ «Курчатовский институт», НИИ «Полюс», МГУ, ВГУ, САФУ имени М. В. Ломоносова, ИРЭ РАН, ФИ РАН, ИОФ РАН.

Основные публикации по теме диссертации

1. Астапенко В.А. Фотоионизация атомов благородных газов ультракороткими электромагнитными импульсами / В.А.Астапенко, С.Ю. Свита. // ЖЭТФ. — 2014. — т.146, — вып. 5(11). — С. 927–932.

2. Астапенко В.А. Временная зависимость поглощения энергии коротких электромагнитных импульсов на неоднородно уширенном радиационном переходе / В.А.Астапенко, С.Ю. Свита // Известия ВУЗов. Физика. — 2014. — т.57, — №11. — С. 46–51.

3. Svita S.Yu. Absorption of ultrashort electromagnetic pulses on broadened dipole transitions / S.Yu.Svita, V.A.Astapenko // Journal of Physics: Conference Series. — 2014. — Vol. 548. — 012029.

4. Astapenko V.A. Absorption of ultrashort electromagnetic pulses by metal nanospheres in a dielectric medium / V.A.Astapenko, S.Yu.Svita // J. Modern Optics. — 2015. — Vol.62. — P. 200–204.

5. Astapenko V.A. Scattering of electromagnetic pulses by metal nanospheres in the vicinity of a Fano-like resonance / V.A.Astapenko, S.Yu.Svita // *Phys. Lett. A.* — 2015. — Vol. 379. — P. 1293–1296.
6. Астапенко В.А. Рассеяние электромагнитных импульсов на металлических наносферах с учетом плазмонных интерференционных эффектов / В.А.Астапенко, С.Ю. Свита // *ЖЭТФ.* — 2015. — т.148, — вып. 3(9). — С. 444–452.
7. Svita S.Yu. Photoionization of Rydberg States by Ultrashort Wavelet Pulses / S.Yu. Svita, V.A. Astapenko. // *Journal of Physics: Conference Series.* — 2015. — Vol 643, — 012070.
8. Свита С.Ю., Астапенко В.А. Взаимодействие ультракоротких импульсов с атомами и наночастицами: монография / С.Ю. Свита, В.А. Астапенко; — Германия: Lambert. 2015.
9. Трахтенберг Л.И. Синтез, строение и свойства металл/полупроводник содержащих наноструктурированных композитов: монография / Л.И.Трахтенберг, В.А. Астапенко, С.Ю. Свита; Москва: Техносфера. 2016.

Список цитированной литературы

1. Krausz F. Attosecond physics / F. Krausz, M.Ivanov // *Rev. Mod. Phys.* — 2009. — Vol. 81. — P. 163-234.
2. Hassan M.Th. Attosecond photonics: Synthesis and control of light transients / M.Th. Hassan, A. Wirth, I. Grguras, A. Moulet, T.T. Luu // *Rev. Sci. Instr.* — 2012. — Vol. 83. — P. 111301.
3. Jones R.R. Ionization of Rydberg atoms by subpicosecond half-cycle electromagnetic pulses / R.R. Jones, D.You, P.H. Bucksbaum // *Phys. Rev. Lett.* — 1993. — Vol.70. — P. 1236-1239.
4. Arustamyan M.G. Phase control of the excitation of a two-level system with short laser pulses / M.G. Arustamyan, V.A. Astapenko // *Laser Physics.* — 2008. — Vol. 18. — P. 768-773.
5. Astapenko V.A. Simple formula for photoprocesses in ultrashort electromagnetic field / V.A. Astapenko // *Physics Letters A.* — 2010. — Vol. 374, — № 13-14. — P. 1585-1590.
6. Astapenko V.A. Features of excitation of two-level system by short nonresonance laser pulses / V.A. Astapenko, V.A. Bagan // *Journal of Physical Science and application.* — 2013. — Vol. 3. — P. 269-277.
7. Bordyug N.V. Dynamics of two-level systems irradiated by sub-one-cycle laser pulses / N.V. Bordyug, V.P. Krainov // *Laser Phys. Lett.* — 2007. — Vol. 4(9). — P. 674-677.
8. Gets A. Ionization of atoms by attosecond pulses / A. Gets, V. Krainov // *Contrib. Plasma Phys.* — 2013. — Vol.53. — P. 140-147.
9. Astapenko V.A. Interaction of ultrafast electromagnetic pulses with matter // *Springer Briefs in Physics.* 2013. P.94.
10. Lin Q. Subcycle Pulsed Focused Vector Beams / Q. Lin, J. Zheng, W. Becker // *Phys. Rev. Lett.* — 2006. — Vol. 97, — 253902.

Свита Сергей Юрьевич

**ПОГЛОЩЕНИЕ И РАССЕЯНИЕ УЛЬТРАКОРОТКИХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ
НА АТОМАХ И НАНОЧАСТИЦАХ**

АВТОРЕФЕРАТ

Подписано в печать 19.01.2017. Формат 60 x 84 1/16. Тираж 100 экз. Заказ № ____

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)». Отдел оперативной полиграфии «Физтех-полиграф» 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9