

ГУЛЯЕВ Алексей Владимирович

**Особенности распространения
ультракоротких лазерных импульсов
в линейных и нелинейных средах**

01.04.05 – Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Работа выполнена на Кафедре атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники Физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
профессор
Тихонова Ольга Владимировна

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
профессор
Кандидов Валерий Петрович
(Московский государственный университет имени
М. В. Ломоносова.)

кандидат физико-математических наук
зав. сектором теоретической радиофизики
Сметанин Игорь Валентинович
(Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Физический институт им. П. Н. Лебедева
Российской академии наук)

Ведущая организация: Московский физико-технический институт
(государственный университет)
Московская область, г. Долгопрудный

Защита состоится «11» декабря 2013 года в 16 часов 30 минут на заседании совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Д.501.001.45 на базе Московского Государственного Университета имени М. В. Ломоносова по адресу: 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 5, (19-й корпус НИИ ядерной физики имени Д. В. Скобельцына МГУ имени М. В. Ломоносова), аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИ ядерной физики имени Д. В. Скобельцына МГУ имени М. В. Ломоносова.

Автореферат разослан « 31 » октября 2013 года.

Ученый секретарь
совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д.501.001.45,
кандидат физико-математических наук

Вохник О. М.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Источники лазерного излучения продолжают стремительно развиваться с момента своего появления. Сравнительно недавно удалось экспериментально получить импульсы фемтосекундной ($1\text{ фс} = 10^{-15}\text{ с}$) длительности с центральной частотой в оптическом диапазоне, имеющие в своем составе всего несколько оптических колебаний поля [1-4]. Параллельно с развитием технологии появляется большое число практических приложений, в которых важную роль играют уникальные свойства лазерного излучения, такие как: высокая пространственная и временная когерентность и рекордная интенсивность излучения. Импульсы столь малой длительности находят применения в экспериментальных приложениях, связанных с исследованием и контролем протекания процессов на атомарном уровне с высоким пространственным и временным разрешением [5-8]. При помощи ультракоротких импульсов оказывается возможным управлять квантовым состоянием отдельных атомов и молекул, а также эффективно и избирательно задавать каналы молекулярной диссоциации, что можно использовать для управления протеканием химических реакций с повышением выхода требуемых продуктов. Одним из возможных применений фемтосекундных лазерных импульсов является их использование в системах квантовых вычислений и квантовой криптографии для записи и считывания информации путем взаимодействия с атомно-молекулярной системой, находящейся в перепутанном состоянии [9-11].

Во всех приложениях ключевое значение имеют характеристики воздействующего на атомно-молекулярные системы лазерного импульса, такие как длительность, пиковая интенсивность и даже форма его временного профиля. В результате, задача распространения ультракоротких импульсов приобретает важнейшее значение, так как именно корректное описание распространения позволит предсказывать эволюцию спектра и формы распространяющегося лазерного импульса в среде и их влияние на исследуемые квантовые объекты. Проблема взаимодействия электромагнитного излучения с веществом, а также распространения электромагнитных импульсов в различных средах была широко исследована множеством авторов. Существует несколько упрощенных теоретических методов, развитых для рассмотрения распространения лазерных импульсов, состоящих из большого числа колебаний электромагнитного поля. Самые распространенные из них – это приближения, основанные на представлении о медленно меняющейся амплитуде и ограничение материальной дисперсии среды несколькими ее низшими порядками [12-14], и их обобщения на случай меньших длительностей [15-18]. Все подобные приближения основываются в первую очередь на малой спектральной ширине распространяющихся импульсов, а также на адиабатической плавности их временной структуры [19]. Огибающая импульса в таких подходах считается слабо изменяющейся на расстоянии, сравнимом с длиной волны лазерного излучения, что позволяет существенно упростить волновое уравнение, описывающее трансформацию лазерного импульса при его распространении в среде, отбросив высшие производные огибающей импульса как по временной, так и по пространственной координате. В результате, порядок волнового уравнения снижается, что позволяет строить приближенные аналитические решения, а также использовать при анализе результатов оптико-квантовомеханическую аналогию. В этом случае для описания влияния среды на распространение часто вводятся такие полуфеноменологические характеристики, как средний показатель преломления среды, несущая частота импульса и его групповая скорость [12], позволяющие описать динамику лазерного импульса, как целостного и относительно устойчивого объекта.

В то же время, распространение предельно коротких лазерных импульсов характеризуется целым рядом особенностей и может существенным образом отличаться от традиционных взглядов на прохождение в среде «плавных» импульсов с адиабатическими передним и задним фронтами. В последнее время принято связывать термин «предельно короткий лазерный

импульс» не с его абсолютной длительностью, а с числом входящих в него циклов поля [20]. Главными особенностями таких импульсов являются чрезвычайно широкий спектральный состав и неадиабатичность нарастания и спада электрического поля во времени. Большая спектральная ширина таких импульсов, которая в случае «одноциклового» импульса оказывается порядка центральной лазерной частоты, обуславливает особенности пространственно-временной эволюции при прохождении в среде. Помимо непосредственного увеличения дисперсионного расплывания экстремальная спектральная ширина затрудняет отстройку спектра от линий поглощения в среде, что приводит к необходимости учета резонансного взаимодействия со средой и влияние процесса поглощения. Кроме того, наличие резонансного взаимодействия импульса со средой требует детального рассмотрения формирования поляризационного отклика среды из первых принципов за рамками стандартного разложения в ряд по степеням поля. Описанные эффекты играют важную роль в процессе формирования формы импульса в процессе распространения и должны быть корректно учтены при исследовании задачи распространения. Поэтому корректный анализ распространения ультракоротких импульсов в среде с учетом эффектов неадиабатического возбуждения среды и резонансного поглощения имеет принципиальное значение и является крайне актуальной задачей.

В ряде случаев взаимодействие распространяющегося лазерного импульса со средой выходит за рамки применимости пертурбативных подходов. Тогда обе задачи – распространение излучения и возникновение индуцированного полем поляризационного отклика среды – должны решаться согласованно. Такой подход является крайне сложным не только с теоретической точки зрения, но и требует больших ресурсов в случае численной реализации, что, зачастую, делает фактически невозможным решение поставленной проблемы. В этом ключе большое значение приобретает разработка приближенных аналитических подходов, а также создание эффективных численных алгоритмов.

Отдельной интересной и важной задачей является исследование распространения лазерного импульса в молекулярной среде, характеризующейся ориентационной нелинейностью [21,22]. В частности, режимы, когда вращательная динамика молекул среды является определяющей в создании наведенного поляризационного отклика, представляются крайне перспективными с точки зрения генерации излучения в низкочастотном и терагерцовом диапазоне частот. Также практический интерес представляет исследование схем последовательного распространения нескольких импульсов, в которых наведенная предшествующими импульсами динамика квантового состояния молекул среды позволяет реализовать процесс уширения спектра для пробных импульсов.

Цель диссертационной работы

Целью диссертационной работы является теоретическое исследование распространения ультракоротких лазерных импульсов предельно малой длительности (вплоть до одного-двух циклов поля) в атомно-молекулярных газовых средах за рамками теории возмущений с корректным учетом влияния эффектов неадиабатического нарастания поля, большой спектральной ширины импульса и резонансного поглощения на эволюцию спектра и временного профиля импульса, а также на динамику состояния среды.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. В точном решении рассмотрены эффекты резонансного поглощения и дисперсионного расплывания импульсов длительностью до одного цикла поля, возникающие при их распространении в модельной линейной среде.

2. Решена задача о распространении коротких лазерных импульсов в среде двухуровневых атомов: рассмотрен процесс формирования остаточной поляризации за счет резонансного взаимодействия импульса со средой, в точном решении за рамками приближения «вращающейся волны» исследован режим самоиндуцированной прозрачности и уширение спектра импульса.

3. Решена задача о динамике квантового состояния двух взаимодействующих друг с другом атомов в поле лазерного импульса и проанализирована временная эволюция их дипольного отклика при различных режимах взаимодействия. Найлены собственные состояния такой двухчастичной системы, проанализированы методы экспериментального наблюдения и управления возникающими «перепутанными» состояниями двух атомов.

4. Решена задача о распространении короткого лазерного импульса в молекулярной среде с ориентационной нелинейностью в режиме эффективного вращательного возбуждения. Проанализировано самосогласованное взаимовлияние индуцированной нелинейной динамики среды и эволюции спектра и пространственно-временного профиля импульса друг на друга.

5. Решена задача о последовательном распространении пары импульсов в молекулярной среде с ориентационной нелинейностью и рассмотрены различные режимы влияния первоначально возбужденной среды на эволюцию пробного импульса.

6. Найдено приближенное аналитическое решение задачи о распространении пробного импульса в первоначально возбужденной молекулярной среде с ориентационной нелинейностью, позволяющее проанализировать физические механизмы возникающих эффектов.

Научная новизна

- В данной работе впервые представлен разработанный самосогласованный метод решения задачи распространения, предполагающий точное совместное численное решение волнового уравнения и материальных уравнений, описывающих поляризационный отклик среды из первых принципов.
- На основе проведенных исследований впервые описано влияние резонансного взаимодействия лазерного импульса предельно короткой длительности со средой в процессе его распространения, приводящее к наличию поглощения, экстремальному дисперсионному расплыванию и возбуждению сигнала остаточной поляризации на собственных частотах среды.
- Впервые в точном решении задачи о взаимодействии ультракороткого лазерного импульса со средой двухуровневых атомов исследован режим самоиндуцированной прозрачности, в том числе и в случае отсутствия точного резонанса между центральной лазерной частотой и собственными частотами среды.
- Впервые обнаружена возможность контролируемого направленного уширения спектра в среде в условиях насыщения сигнала поляризации.
- Впервые аналитически найдены собственные состояния пары взаимодействующих атомов в лазерном поле с учетом симметричных свойств системы, что позволило описать специфику возникающего дипольного отклика, а также объяснить природу эффекта дипольной блокады.
- В задаче о динамике двух взаимодействующих атомов в лазерном импульсе впервые продемонстрирована возможность генерации сигнала поляризации на перестраиваемой низкой частоте, реализующаяся за счет инициации сильного межатомного взаимодействия.
- Предложен ряд схем подавления поляризационного отклика среды, основанных как на специальном задании начального состояния среды, так и на подборе параметров

последовательности двух лазерных импульсов. Подобные схемы позволяют уменьшить искажения, приобретаемые лазерным излучением по мере распространения за счет дисперсии и поглощения.

- Впервые получено аналитическое решение задачи последовательного распространения импульса накачки и пробного импульса в молекулярной среде с ориентационной нелинейностью, позволяющее описать процесс распространения на малых глубинах проникновения.
- Впервые в точном решении исследована задача самосогласованного распространения короткого лазерного импульса в молекулярной среде с ориентационной нелинейностью в условиях эффективного вращательного возбуждения молекул.

Практическая значимость

Полученные результаты имеют фундаментальную научную значимость с точки зрения разработки новых подходов к описанию процессов взаимодействия атомно-молекулярных систем с интенсивными ультракороткими лазерными импульсами, а также выявления новых эффектов, которые позволят объяснить результаты физических экспериментов и предложить новые экспериментальные схемы. Полученные результаты имеют принципиальную важность для осуществления лазерного контроля и управления динамикой молекулярных систем с фемтосекундным временным и субангстремным пространственным разрешением. Обнаруженный эффект контролируемого уширения спектра импульса в среде в условиях насыщения сигнала поляризации имеет принципиальное значение для генерации низкочастотного излучения, в том числе, в терагерцовом диапазоне частот. Предложенные схемы подавления поляризационного отклика среды, основанные на подборе параметров последовательности двух лазерных импульсов, позволяют существенно уменьшить искажения, приобретаемые лазерным излучением по мере распространения за счет дисперсии и поглощения.

На защиту выносятся следующие **основные результаты и положения**:

1. Разработанный подход для точного решения самосогласованной задачи о распространении лазерных импульсов предельно-короткой длительности вплоть до одного оптического цикла, основанный на совместном решении волнового уравнения для поля и нестационарного уравнения Шредингера для среды, позволяющий корректно учесть возникающие эффекты неадиабатичности ультракороткого лазерного воздействия, дисперсионного расплывания импульса, а также резонансного возбуждения среды.
2. Управление уширением спектра фемтосекундного импульса при его распространении в атомной среде в режиме самовоздействия в условиях квазирезонансности и насыщения поляризационного отклика.
3. Аналитическая теория динамики системы двух взаимодействующих атомов в поле лазерного импульса.
4. Методы использования фемтосекундных лазерных импульсов для контролируемого возбуждения и создания перепутанных состояний в системе двух взаимодействующих атомов.
5. Обнаружение генерации поляризации среды попарно взаимодействующих атомов в лазерном поле на низкой перестраиваемой частоте.
6. Схемы подавления мощного дисперсионного расплывания ультракоротких импульсов в среде, основанные на сведении к минимуму влияния резонансных атомных характеристик в двухимпульсных экспериментальных схемах типа «pump-probe».
7. Схемы подавления мощного дисперсионного расплывания ультракоротких импульсов в среде, основанные на возбуждении режима, аналогичного электромагнитно-индуцированной прозрачности, в случае среды взаимодействующих атомов.

8. Разработанный уникальный численный алгоритм решения самосогласованной задачи о распространении ультракоротких лазерных импульсов в молекулярной газовой среде с ориентационной нелинейностью за рамками теории возмущений и приближения медленноменяющихся амплитуд.
9. Аналитическое решение задачи распространения пробного фемтосекундного лазерного импульса в первоначально возбужденной молекулярной газовой среде с ориентационной нелинейностью, позволяющее достоверно количественно описать особенности пространственно-временной эволюции спектра и профиля импульса в процессе распространения и проанализировать физические причины возникающих эффектов.
10. Метод контролируемого уширения спектра фемтосекундного импульса при его распространении в молекулярной среде с ориентационной нелинейностью в режиме пробного зондирования.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на семинарах отдела микроэлектроники НИИЯФ МГУ. Основные положения и результаты диссертации были представлены на 13 международных конференциях и симпозиумах:

1. XIV Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», Москва (11-14.04.2007).
2. XIX International Conference on Coherent and Nolinear Optics (ICONO), Minsk, Belorussia (28.05-01.06.2007).
3. 16th International Laser Physics Workshop (LPHYS'07), Leon, Guanajuato, Mexico (20.08-24.08.2007).
4. 17th International Laser Physics Workshop (LPHYS'08), Trondheim, Norway (30.06-04.07.2008).
5. XVI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», Москва (13-18.04.2009).
6. 18th International Laser Physics Workshop (LPHYS'09), Barcelona, Spain (13-17.07.2009).
7. VI Международная конференция молодых ученых и специалистов «Оптика-2009», Санкт-Петербург (19-23.10.2009).
8. International Workshop on Atomic Physics, Dresden, Germany (23-27.11.2009).
9. X European Conference on Atoms, Molecules and Photons (ECAMP10), Salamanca, Spain (4-9.07.2010).
10. 20th International Laser Physics Workshop (LPHYS'11), Sarajevo, Bosnia and Herzegovina (11-15.07.2011).
11. International Workshop on Atomic Physics, Dresden, Germany (26-30.11.2012).
12. International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO 2013), International Conference on Lasers, Applications, and Technologies (LAT 2013), Moscow, Russia (18-22.06.2013).
13. 22th International Laser Physics Workshop (LPHYS'13), Prague, Czech Republic (15-19.07.2013).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 16 печатных работ, в том числе 5 статей в реферируемых российских и зарубежных журналах [A1 - A5] и 11 тезисов докладов на международных конференциях [A6 - A16].

Личный вклад автора

Личный вклад автора в работы, вошедшие в диссертацию, является определяющим при разработке теоретических моделей, аналитического и численного анализа, реализации численного решения и интерпретации полученных результатов. Все изложенные в диссертационной работе результаты получены лично автором.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из пяти глав. В главе 1 представлен обзор литературы, посвященный задачам и проблемам, которые рассматриваются в диссертации. В главе 2 изложена общая постановка задачи и решается задача о распространении предельно-коротких лазерных импульсов в модельной линейной среде, состоящей из классических гармонических осцилляторов, что позволяет рассмотреть специфику дисперсионного расплывания и поглощения в линейном случае. В главе 3 исследуется возбуждение поляризационного отклика атомной среды в модели квантовой двухуровневой системы и его согласованное влияние на распространение импульса: эволюцию его спектра и временной структуры. Получение точного численного решения позволяет исследовать режим самоиндуцированной прозрачности как в резонансном, так и в квазирезонансном случае. Несмотря на наличие эффекта насыщения и слабость нелинейности, обнаружена возможность направленного контролируемого уширения спектра лазерного импульса. В главе 4 рассматривается влияние межатомного взаимодействия на возбуждение поляризационного отклика атомной среды в модели двух взаимодействующих двухуровневых атомов. Получено приближенное аналитическое решение задачи, учитывающее перепутанные состояния двухатомной системы. Обнаружена возможность генерации излучения на перестраиваемой низкой частоте за счет наличия межатомного взаимодействия. Обнаружен аналог режима электромагнитно-индуцированной прозрачности, реализующийся за счет симметричных свойств межатомного взаимодействия и наличия перепутанных состояний. В главе 5 рассматривается задача распространения ультракоротких лазерных импульсов в молекулярных средах с ориентационной нелинейностью. Разработан эффективный алгоритм самосогласованного решения уравнения Шредингера для среды и волнового уравнения для поля за рамками теории возмущений и приближения медленноменяющихся амплитуд. Исследуется динамика временного профиля импульса и эволюция его спектра, как в процессе самовоздействия, так и при распространении в заранее возбужденной среде (схема pump-probe). В случае распространения последовательности импульсов получено приближенное аналитическое решение задачи, позволяющее описать распространение коротких импульсов с помощью показателя преломления, характеризующегося пространственно-временной зависимостью, и демонстрирующее возникновение целого ряда новых эффектов. Основные результаты работы представлены в Заключение.

Содержание работы

Во **Введении** сформулирована цель диссертационной работы, обоснованы ее актуальность, научная и практическая значимость, а также описана структура работы.

Первая глава представляет собой обзор литературы, посвященный решаемым в диссертации задачам: описывается актуальное состояние развитых на данный момент подходов и методов к исследованию распространения ультракоротких лазерных импульсов в материальных средах, а

также эффекты, возникающие при взаимодействии лазерного излучения умеренной интенсивности с атомно-молекулярными системами.

Вторая глава состоит из трех разделов. В разделе 2.1 описана общая постановка задачи распространения лазерных импульсов в различных средах и применяемый в диссертации метод ее исследования, основанный на получении совместного численного решения волнового уравнения, описывающего эволюцию лазерного импульса в среде, и материального уравнения, задающего динамику поляризационного отклика. Также обсуждается форма задания лазерных импульсов.

В разделе 2.2. приведено аналитическое решение задачи распространения лазерного импульса произвольной длительности в модельной линейной среде, состоящей из классических гармонических осцилляторов, получены выражения для пространственно-временной эволюции поля и индуцированной им поляризации среды.

В разделе 2.3. описываются обнаруженные особенности распространения лазерных импульсов предельно малой длительности в линейном случае, основанные на экстремальной ширине временного спектра, а также на неадиабатичности воздействия лазерного поля на атомы среды. Несмотря на крайнюю простоту модели, найден важный специфический режим взаимодействия со средой, при котором спектр импульса одновременно не изолирован от полос поглощения, но в то же время и не перекрывается полностью с одной из них. В результате это приводит к наличию резонансного поглощения энергии импульса в среде и одновременному резкому увеличению дисперсионного расплывания. Полученные результаты свидетельствуют о значимости такой величины, как количество циклов поля, задающих длительность импульса. В данном разделе также предлагается простейшая схема подавления дисперсионного расплывания двухимпульсных лазерных структур (схема pump-probe) предельной длительности, основанная на подборе положения минимумов в суммарном спектре последовательности импульсов, что может быть важно для минимизации искажений при передаче импульсов предельно малой длительности.

Глава 3 посвящена взаимодействию ультракоротких лазерных импульсов с атомами, рассмотренными в модели двух дискретных уровней. В разделе 3.1. описывается модель двухуровневого атома, взаимодействующего с лазерным импульсом, и получено общее выражение для поляризационного отклика среды, состоящей из таких атомов. В резонансном случае в рамках приближения «вращающейся волны» получено аналитическое выражение для поляризации. Показано, что нелинейная связь поляризации среды с полем лазерного импульса может иметь гораздо более сложный характер, чем разложение в ряд по различным степеням поля.

В разделе 3.2. описываются результаты решения задачи распространения коротких лазерных импульсов в среде, состоящей из двухуровневых атомов, в случае точного резонанса между собственной частотой атома и центральной частотой спектра лазерного импульса. Обнаружено существенное дисперсионное расплывание начального импульса даже на небольших глубинах проникновения и наличие резонансного поглощения, сопровождающееся возникновением сигнала остаточной поляризации даже в случае малого изменения населенностей уровней атома по сравнению с их начальными значениями. Продемонстрировано, что в случае распространения импульсов длительностью в несколько оптических циклов происходят полная потеря временной структуры импульса в процессе распространения и увеличение эффективной длительности импульса в несколько раз. В разделе 3.3 исследуются особенности взаимодействия и распространения ультракоротких лазерных импульсов в среде двухуровневых атомов в случае ненулевой отстройки от резонанса. Результаты точного расчета сравниваются с решением, полученным в приближении «вращающейся волны». В точном численном решении детально рассматривается влияние отстройки на динамику населенностей атомных уровней и влияние нерезонансной динамики атомных состояний на режим самоиндуцированной прозрачности. В

разделе 3.4 исследуется влияние нелинейности среды на эволюцию спектра лазерного импульса в процессе распространения. Обнаружена генерация новых частот в процессе взаимодействия с атомной средой и возможность контролируемого направленного уширения спектра в случае отстройки от точного резонанса (см. рисунок 1).

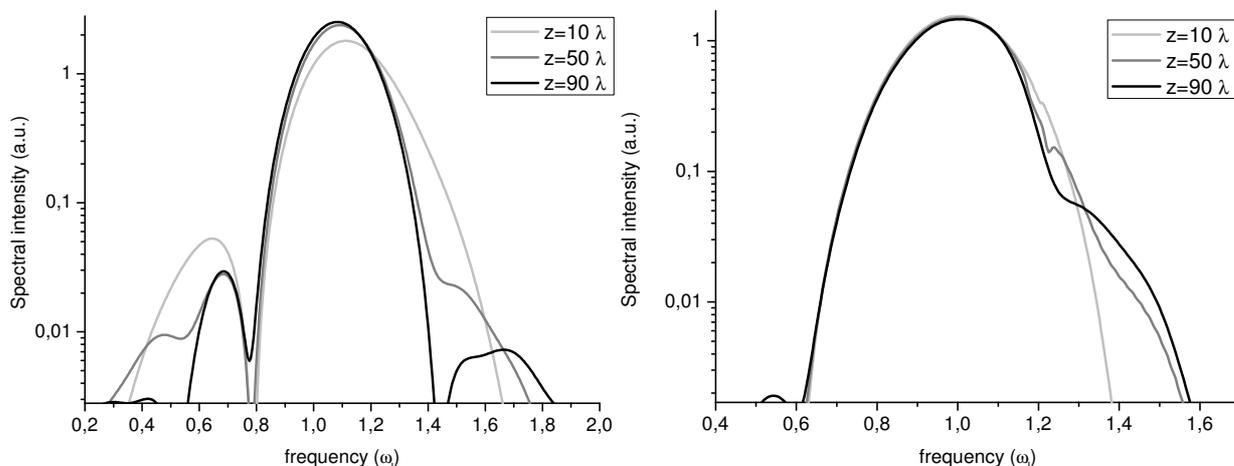


Рисунок 1. Графики эволюции спектров (а) поляризационного отклика среды, (б) электрического поля лазерного импульса в случае отстройки $\omega_{12} = 1.2\omega_1$, при распространении пятициклового импульса интенсивностью $I = 0,9 \cdot 10^{13} \text{ Bm/cm}^2$ в среде. Частота приведена в единицах лазерной частоты ω_1 .

В реальных средах атомы среды могут взаимодействовать друг с другом. Обобщение результатов главы 3 на этот случай, а также исследование задачи о лазерном управлении динамикой взаимодействующих атомных систем, представляющей практический интерес с точки зрения квантовой информации и квантовых вычислений, представлено в **главе 4**. В разделе 4.1. описывается исследуемая модель и формулируются основные предположения, позволяющие получить аналитические выражения для собственных состояний системы пары взаимодействующих атомов. В этом же разделе исследуется динамика квантового состояния системы в отсутствие лазерного поля при различных величинах силы межатомного взаимодействия и ее влияние на поляризационный отклик среды. Обнаружена возможность эффективной генерации сигнала остаточной поляризации на перестраиваемой низкой частоте в случае сильного межатомного взаимодействия (см. рисунок 2). Также в этом разделе предлагается объяснение эффекта дипольной блокады.

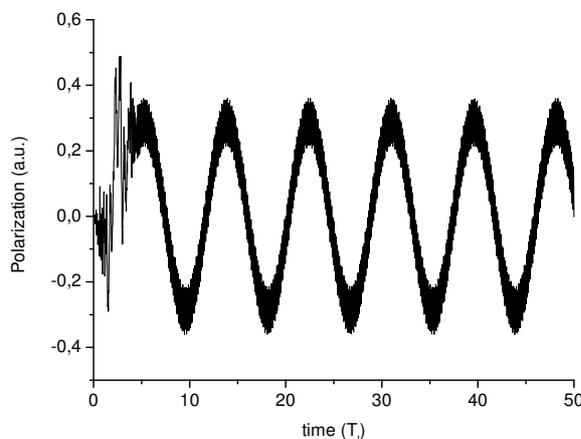


Рисунок 2. Поляризационный отклик на низкой частоте, возбужденный в системе коротким лазерным импульсом, параметры расчета: $(\Omega_1 - \Omega_2) / 2\Omega \cong 4.23$, $I = 5 \cdot 10^9 \text{ Bm/cm}^2$.

В разделе 4.2. анализируется динамика квантовой системы в случае, когда взаимодействие с лазерным полем существенно сильнее взаимодействия атомов между собой, но тем не менее атомы остаются связанными. В рамках приближения вращающейся волны в резонансном случае получается аналитическое решение задачи аналогично тому, как это было сделано в главе 3. Исследуется динамика населенностей системы двух атомов при различных начальных состояниях. Кроме того, исследуется эволюция перепутанности квантового состояния атомов в процессе взаимодействия с полем лазерного импульса.

В разделе 4.3. анализируется дипольный отклик связанных взаимодействием атомов, как в процессе их взаимодействия с лазерным полем, так и в постимпульсном режиме, при различном соотношении параметров задачи и предлагаются различные схемы его подавления. В подразделе 4.3.1. обсуждается невозможность факторизации отклика пары атомов в виде суммы откликов отдельных атомов за счет перепутанности квантового состояния атомной системы. Проанализирована динамика дипольного отклика при различных начальных состояниях атомной системы и предложены схемы его подавления, основанные на симметричных свойствах системы и наличии сильного межатомного взаимодействия. В подразделе 4.3.2. предлагается более общая двухимпульсная схема подавления атомного отклика, эффективность которой слабо зависит от интенсивности и длительности отдельного лазерного импульса.

В **главе 5** рассматривается задача распространения ультракоротких лазерных импульсов в молекулярной среде, характеризующейся наличием ориентационной нелинейности. В разделе 5.1. приведена постановка задачи и описано однотермовое приближение.

В разделе 5.2. рассмотрено выстраивание молекул под действием ультракоротких лазерных импульсов и возникновение поляризационного отклика такой молекулярной среды. В разделе 5.3 формулируется задача о распространении последовательности двух лазерных импульсов существенно различной интенсивности: мощный импульс накачки задает в разных точках среды динамику ориентированности молекул среды, а пробный импульс в зависимости от задержки может чувствовать различное влияние со стороны среды. Для описанного случая получено аналитическое решение, дающее прекрасное согласие с результатами точных численных расчетов на умеренных глубинах проникновения и раскрывающее физические механизмы возникающих эффектов. Согласно аналитическому решению эволюцию формы пробного лазерного импульса в среде можно описать выражением:

$$E(z, t) = \varepsilon_0(\tau) \exp(-i\omega\tau) \exp\left(-\xi \frac{1}{c} \frac{\partial n(\tau)}{\partial \tau} - i \frac{2\pi}{kc^2} \frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2}\right) \Bigg|_{\xi=z, \tau=t-zn/c}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_0(\tau)$ - начальная огибающая лазерного импульса, $n(z, t) = \sqrt{1 + 4\pi A(z, t)}$, а $A(z, t) = N\Delta\alpha \langle \Phi_1 | \cos^2 \theta | \Phi_1 \rangle$ - заданная функция координат и времени, определяющаяся действием импульса накачки на молекулярную среду.

Полученное аналитическое решение проясняет физический смысл понятия показателя преломления среды, зависящего от временной и пространственной координат, а также свидетельствует о важной роли процесса обмена энергией между импульсом и средой. В разделе 5.4 получено точное численное решение о распространении пробного импульса в молекулярной газовой среде в условиях эффективного начального вращательного возбуждения молекул. Исследуется процесс эволюции формы и спектра пробного импульса при различных значениях межимпульсной задержки и длительности пробного импульса. Продемонстрировано прекрасное согласие полученного аналитического решения с результатами численного расчета для умеренных глубин распространения импульса. Обнаружены сильная амплитудная и фазовая модуляции пробного импульса в процессе распространения, обусловленные пространственно-временной зависимостью показателя преломления среды и эффективным

обменом энергией между импульсом и средой. Обнаружено существенное уширение спектра пробного импульса (см. рисунок 3) в процессе распространения, и предложены методы направленного спектрального уширения.

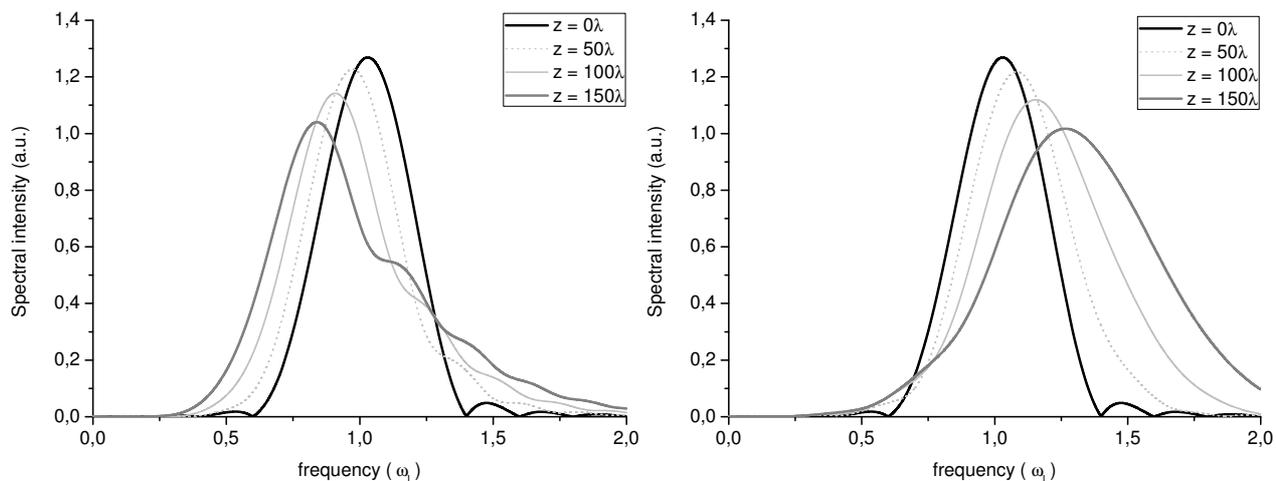


Рисунок 3: Эволюция спектра пробного лазерного импульса длительностью 5 оптических циклов на разных глубинах распространения при различных значениях задержки относительно заднего фронта импульса накачки: (а) $\delta t = 6.5T_l$, (б) $\delta t = 32.5T_l$.

В разделе 5.5 на основе разработанного эффективного численного алгоритма решается задача о самосогласованном распространении фемтосекундного лазерного импульса в молекулярной среде. Обнаружено, что все эффекты, имеющие место при распространении пробного импульса, проявляются в данном случае еще в большей мере. Продемонстрирована сильная модуляция пространственно-временного профиля импульса, сопровождающаяся эффектом «чирпирования». Обнаружено существенное изменение формы спектра импульса в процессе распространения импульса в среде и преимущественная генерация ряда выделенных частот, сдвинутых относительно центральной частоты исходного спектра импульса на величину, кратную характерной частоте выстраивания молекулярного вращательного волнового пакета.

Список публикаций

- A1. Gulyaev A.V., Tikhonova O.V. Propagation of few-cycle laser pulses through a linear gas medium // *Las. Phys.* – 2008 – Vol. 18, №3, pp. 201-210.
- A2. Gulyaev A.V., Tikhonova O.V. Polarization response of a linear gas medium with resonant properties in the problem of ultra-short laser pulse propagation // *Las. Phys. Lett.* – 2009 – Vol. 6, № 4, pp. 297-303.
- A3. Gulyaev A.V. and Tikhonova O.V. Propagation of the ultrashort laser pulses through the quantum nonlinear medium with resonant properties // *Laser Phys.* – 2010 – Vol. 20, №5, pp. 1051-1060.
- A4. Гуляев А.В., Тихонова О.В. Поляризационный отклик взаимодействующих атомных систем в интенсивном резонансном лазерном поле // *ЖЭТФ* – 2012 – т. 141, №5, стр. 882-898.
- A5. Гуляев А.В., Тихонова О.В. Особенности распространения ультракоротких лазерных импульсов в молекулярной газовой среде с ориентационной нелинейностью // *Квантовая электроника* – 2013 – т. 43, №7, стр. 621–629.
- A6. Гуляев А.В. Трансформация ультракоротких лазерных импульсов в линейной поглощающей среде // *Материалы докладов XIV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов 2007», секция «Физика», 11-14 апреля 2007, Москва, Россия.*
- A7. Gulyaev A.V., Tikhonova O.V. Ultra-short laser pulse transformation and atomic response in a linear gas medium // *Technical Digest XIX International Conference on Coherent and Nonlinear Optics, ICONO 2007*, May 28 – June 1, 2007, Minsk, Belarus. rep. IO3–9.
- A8. Gulyaev A.V., Tikhonova O.V. Propagation of a few-cycle laser pulses through a linear gas medium // *Book of abstracts 16th International Laser Physics Workshop, LPHYS'07*, August 20-24, 2007, Leon, Mexico. p. 79.
- A9. Gulyaev A.V. and Tikhonova O.V. Specific features of the linear gas medium polarization response in the problem of few-cycle laser pulse propagation // *Book of abstracts 17th International Laser Physics Workshop, LPHYS'08*, June 30-July 4, 2008, Trondheim, Norway. p.159.
- A10. Гуляев А.В. Распространение предельно коротких импульсов в квантовых нелинейных средах с резонансными характеристиками // *Материалы докладов XVI Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов 2009», секция «Физика», 13-18 апреля 2009, Москва, Россия.*
- A11. Gulyaev A.V. and Tikhonova O.V. Propagation of ultrashort laser pulses through the quantum nonlinear medium with resonant properties // *Book of abstracts 18th International Laser Physics Workshop, LPHYS'09*, July 13-17, 2009, Barcelona, Spain. p.167.
- A12. Гуляев А.В., Тихонова О.В. Особенности взаимодействия со средой и распространения ультракоротких лазерных импульсов в квантовых нелинейных средах // *Труды VI Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2009», 19-23 октября 2009, Санкт-Петербург, Россия.*
- A13. Gulyaev A.V., Tikhonova O.V. Interaction of the ultrashort laser pulses with quantum nonlinear media // *Book of abstracts X European Conference on Atoms, Molecules and Photons ECAMP10*, July 4-9, 2010, Salamanca, Spain. p.155.

A14. Gulyaev A.V., Tikhonova O.V. Interaction of ultrashort laser pulses with entangled atomic systems // *Book of abstracts 20th International Laser Physics Workshop, LPHYS'11*, July 11-15, 2011, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina. rep. P2.3.

A15. Gulyaev A.V., Krassil'nikov S.S., Tikhonova O.V. Propagation of femtosecond laser pulses through molecular gas medium with orientational nonlinearity // *Book of abstracts International Conference on Coherent and Nonlinear Optics, ICONO 2013*, June 18-22, 2013, Moscow, Russia, p. 104

A16. Gulyaev A.V. and Tikhonova O.V. Self-consistent propagation of femtosecond laser pulses through a gas medium with efficient field-induced rotational dynamics of molecules // *Book of abstracts 22th International Laser Physics Workshop, LPHYS'13*, July 15-19, 2013, Prague, Czech Republic, p. 34.

Цитированная литература

1. Spielmann C., Curley P.F., Brabec T. and Krausz F., Ultrabroadband femtosecond lasers // *IEEE Journal of Quantum Electronics* – 1994 – Vol. 30, №4, pp. 1100–1114.
2. Brabec Th. and Krausz F., Intense few-cycle laser fields: Frontiers of nonlinear optics // *Rev. Mod. Phys.* – 2000 – Vol. 72, pp.545–591.
3. Baltuska A., Wei Zh., Pshenichnikov M. S., Wiersma D. A., Brabec Th., and Krausz F., Optical pulse compression to 5 fs at a 1-mhz repetition rate // *Opt. Lett.* – 1997 – Vol. 22, №2, pp. 102–104.
4. Agostini P., DiMauro L.F., The physics of attosecond light pulses // *Rep.Prog.Phys.* – 2004 – Vol. 67, p. 813.
5. Scrinzi A., Ivanov M. Yu., Kienberger R., and D M Villeneuve., Attosecond physics // *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* – 2006 – Vol. 39, R1.
6. Hosseini S. A., Goswami D., Coherent control of multiphoton transitions with femtosecond pulse shaping // *Phys. Rev. A.* – 2001 – Vol. 64, №3, p.033410.
7. Niikura H., Villeneuve D. M., and Corkum P. B., Stopping a vibrational wave packet with laser-induced dipole forces // *Phys. Rev. Lett.* – 2004 – Vol. 92, №13, p.133002.
8. Ergler Th., Rudenko A., Feuerstein B., Zrost K., Schroter C. D., R. Moshhammer, and J. Ullrich., Time-resolved imaging and manipulation of H₂ fragmentation in intense laser fields // *Phys. Rev. Lett.* – 2005 – Vol. 95, №9, p.093001.
9. Килин С.Я. Квантовая информация // *УФН.* – 1999 – В.169, № 5, с. 507-527.
10. Wootters W. K. Entanglement of Formation of an Arbitrary State of Two Qubits // *Phys.Rev.Lett.* – 1998 – Vol. 80, №10, pp.2245–2248.
11. Lukin M.D., Fleischhauer M., Cote R., Duan L.M., Jaksch D., Cirac J.I., and Zoller P., Dipole blockade and quantum information processing in mesoscopic atomic ensembles // *Phys. Rev. Lett.* – 2001 – Vol. 87, p. 037901.
12. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн – М.: Наука, 1979.
13. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика – М.: Мир, 1996.

14. Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин А.С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов – М.: Наука, 1988.
15. Brabec Th. and Krausz F. Nonlinear optical pulse propagation in the single-cycle regime // Phys. Rev. Lett. – 1997 – Vol. 78, pp. 3282–3285.
16. Prokopovich I.P., Belenov E.M., Nazarkin A.V., Dynamics of an intense femtosecond pulse in a raman-active medium // JETP letters – 1992 – Vol. 55, pp. 218–223.
17. Prokopovich I.P., Two-photon resonance generation of single and double attosecond pulses in Ar+ // Las. Phys. – 2005 – Vol. 15, pp. 804–811.
18. Prokopovich I.P. Two-photon raman-type self-induced transparency for few-cycle laser pulses // Las. Phys. Lett. – 2005 – Vol. 2, pp. 120–125.
19. Lamb G. L., Analytical descriptions of ultrashort optical pulse propagation in a resonant medium // Rev. Mod. Phys. – 1971 – Vol. 43, pp. 99–124.
20. Козлов С.А., Самарцев В.В., Оптика фемтосекундных лазерных импульсов – СПб: Изд-во СПбГУ ИТМО, 2007.
21. Popov A.M., Tikhonova O.V., and Volkova E.A. Laser-induced rotational and vibrational dynamics of a molecular system in a strong field // Las. Phys. – 2003 – Vol. 13, pp. 1069–1076.
22. Kalosha V., Spanner M., Herrmann J., Ivanov M. Generation of single dispersion precompensated 1-fs pulses by shaped-pulse optimized high-order stimulated raman scattering // Phys. Rev. Lett. – 2002 – Vol. 88, p. 103901.

Подписано к печати 29.10.13
Тираж 100 Заказ 166

Отпечатано в отделе оперативной печати
Физического факультета МГУ