

ХАРИН Василий Юрьевич

**Взаимодействие интенсивных ультракоротких
низкочастотных лазерных импульсов с
двухатомными гетероядерными молекулами**

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 Крайнов Владимир Павлович
(Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)», г. Москва)

доктор физико-математических наук, профессор Попруженко Сергей Васильевич
(Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт общей физики им. А.М. Прохорова российской академии наук», г. Москва

Защита состоится «8» октября 2014 года в 15 часов 00 минут на заседании совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Д501.001.45 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 и на сайте <http://sinp.msu.ru/ru/dissertation/19698>

Автореферат разослан «2» сентября 2014 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Д501.001.45,
кандидат физико-математических наук

Вохник О. М

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Актуальность поставленной задачи обусловлена возможностью генерации в настоящее время интенсивных лазерных импульсов предельно короткой длительности вплоть до нескольких оптических циклов. Взаимодействие таких импульсов с веществом является предметом современных физических исследований и открывает целую область новых физических эффектов, наблюдающихся в режиме сильных неадиабатических полей. При этом воздействие мощных ультракоротких низкочастотных импульсов на ядерную подсистему гетероядерных молекул остается до сих пор малоисследованной задачей, особенно с точки зрения корректного учета экстремальных параметров (высокой интенсивности и короткой длительности) лазерного излучения. Взаимодействие молекул с интенсивным лазерным полем широко рассматривалось и ранее как с классических [1-3], так и с квантовых позиций [4–12]. Однако, как правило, исследование эффектов сильного поля в молекулах ограничивается случаем, когда перезаселение колебательно-вращательных состояний молекулы происходит за счет рамановских переходов через вышележащий электронный терм [7-9]. В гомоядерных молекулах при отсутствии собственного дипольного момента это зачастую является практически единственным путём перезаселения. В случае же гетероядерных молекул существует непосредственное действие внешнего поля на ядерную подсистему молекулы. Поэтому возникает задача корректного рассмотрения воздействия поля на ядерные степени свободы в гетероядерных молекулах. При этом представляет большой интерес возможность обнаружения в случае колебательно-вращательных переходов ряда эффектов, наблюдавшихся ранее только на электронном спектре квантовых систем (например, таких как фотостабилизация). Кроме того, для достижимых интенсивностей лазерного излучения оказывается неправомерным использование при описании таких эффектов разложений, часто используемых в нелинейной оптике и основанных на теории возмущений по полю. Еще одно ограничение на существующие методы описания — неприменимость приближения медленно меняющихся амплитуд. В условиях, когда возможна генерация одноцикловых и даже «полуцикловых» импульсов, оно является слишком грубой аппроксимацией. В случае ультракороткого воздействия одним из возможных методов анализа является приближение «встряски» [13,14]. В настоящее время существуют работы, в которых этот подход применён к жёсткому ротатору. [4,5] Однако, в случае достаточно высоких значений напряжённости поля пренебрежение колебаниями может существенно повлиять на получаемые результаты. Таким образом, одновременный учет и колебательных и вращательных степеней свободы молекулы при взаимодействии с ультракороткими импульсами является важной и пока еще не решенной задачей.

Всё вышесказанное свидетельствует о необходимости разработки новых теоретических подходов к описанию взаимодействия мощных ультракоротких низкочастотных импульсов с ядерной подсистемой гетероядерных молекул, с учетом одновременного воздействия поля как на колебательные, так и на вращательные степени свободы молекулы, а также их влияния друг на друга. Разработанные теоретические методы могут привести к предсказанию качественно новых физических эффектов, позволят предложить экспериментальные схемы для их наблюдения и на этой основе развить перспективные практические приложения.

Цель диссертационной работы

Целью данной работы является разработка теоретических подходов к проблеме взаимодействия низкочастотных лазерных импульсов, в том числе ультракороткой длительности, с ядерной подсистемой двухатомных гетероядерных молекул в условиях эффективного колебательно-вращательного возбуждения, развитие методов контроля и управления эффективным возбуждением ядерных степеней свободы молекулы за счет их взаимовлияния друг на друга, а также анализ поляризационного отклика среды, состоящей из двухатомных гетероядерных молекул, на интенсивное ультракороткое лазерное воздействие. Для решения поставленной задачи в диссертации развит теоретический подход, основанный на точном численном решении нестационарного уравнения Шредингера для динамики ядерной подсистемы двухатомной гетероядерной молекулы в лазерном поле с учетом как колебательных, так и вращательных степеней свободы. Кроме того, для случая ультракороткой длительности воздействия проведено обобщение приближения “встряски” на случай эффективных индуцированных полем колебательно-вращательных переходов в гетероядерной двухатомной молекуле в пределах одного электронного терма, позволяющее проанализировать заселение различных состояний в процессе импульсного воздействия и раскрывающее влияние колебательных и вращательных степеней свободы друг на друга.

Научная новизна

- В данной работе впервые представлен подход к задаче о взаимодействии интенсивных ультракоротких лазерных импульсов с двухатомными гетероядерными молекулами, разработанный на основе точного учета как колебательных, так и вращательных ядерных степеней свободы в условиях прямых переходов в пределах одного терма.
- В рамках разработанного подхода впервые обнаружено явление существенного подавления диссоциации гетероядерных молекул в сильном поле и продемонстрирована его интерференционная природа.

- В точном решении задачи о взаимодействии ультракороткого лазерного импульса с ядерной подсистемой двухатомной гетероядерной молекулы впервые обнаружены эффективные Λ и V – переходы, возникающие в сильном поле между колебательно-вращательными состояниями в пределах одного электронного терма молекулы, и продемонстрирована их роль в формировании колебательно-вращательного волнового пакета, устойчивого к процессу диссоциации.
- В случае ультракороткого воздействия впервые получены аналитические выражения, позволяющие корректно описать заселение различных колебательно-вращательных состояний и диссоциацию молекулы, а также разработать методы эффективного возбуждения большого числа высоких вращательных состояний, что определяет динамику выстраивания молекулы в постимпульсном режиме.
- На основе использованного аналитического подхода впервые продемонстрировано взаимовлияние колебательных и вращательных степеней свободы молекулы друг на друга и предложены методы управляемого колебательно-вращательного возбуждения на основе схем типа «pump-probe».
- Впервые продемонстрировано возникновение низкочастотных компонент в поляризационном отклике среды из двухатомных гетероядерных молекул на интенсивное ультракороткое воздействие, имеющее важное прикладное значение для генерации излучения в терагерцовом диапазоне частот.

Практическая значимость

Полученные результаты имеют фундаментальную научную значимость с точки зрения разработки новых подходов к проблеме взаимодействия интенсивных низкочастотных лазерных импульсов с двухатомными гетероядерными молекулами и обнаружения новых физических эффектов, обусловленных высокой интенсивностью и малой длительностью воздействия. Полученные результаты имеют большое значение для осуществления лазерного контроля и управления колебательно-вращательной динамикой гетероядерных молекул, а также разработки экспериментальных схем по управляемому выстраиванию молекул и созданию молекулярных сред с требуемым колебательно-вращательным возбуждением. Обнаруженный эффект взаимовлияния колебательных и вращательных степеней свободы друг на друга позволяет осуществлять скоррелированное воздействие на ядерные степени свободы и формировать квантовый колебательно-вращательный волновой пакет с заданными свойствами. Предложенные двухимпульсные схемы типа «pump-probe» для направленного усиления низкочастотных компонент в спектре поляризационного отклика среды гетероядерных молекул

имеют принципиальное значение для генерации низкочастотного излучения, в том числе, в терагерцовом диапазоне частот.

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

1. Разработанный подход для точного решения задачи о взаимодействии интенсивных низкочастотных ультракоротких лазерных импульсов с двухатомными гетероядерными молекулами, основанный на решении нестационарного уравнения Шредингера для ядерной подсистемы молекулы в лазерном импульсе, позволяющий точно учесть как колебательные, так и вращательные степени свободы молекулы в условиях их эффективного возбуждения сильным лазерным полем.
2. Обнаружение эффекта интерференционной стабилизации гетероядерных молекул относительно процесса диссоциации в сильном лазерном поле в условиях колебательно-вращательных переходов в пределах одного электронного терма молекулы.
3. Обнаружение эффективных Λ и V –переходов, возникающих в интенсивном лазерном импульсе между колебательно-вращательными состояниями в пределах одного электронного терма молекулы и приводящих к формированию волнового пакета связанных ядерных состояний, устойчивого к процессу диссоциации.
4. Методы экспериментального наблюдения обнаруженного эффекта стабилизации и характеристик сформированного стабильного ядерного волнового пакета, основанные на двухимпульсных схемах типа «pump-probe».
5. Аналитические выражения, позволяющие корректно описать колебательно вращательное возбуждение гетероядерных молекул в случае предельно короткой длительности воздействия и демонстрирующие возможность эффективного возбуждения большого числа высоких вращательных состояний, что имеет принципиальное значение для разработки методов эффективного выстраивания и ориентирования молекул.
6. Эффективное взаимовлияние колебательных и вращательных степеней свободы гетероядерной молекулы друг на друга в процессе воздействия в условиях начального колебательного возбуждения молекулы.
7. Методы управления свойствами формирующегося колебательно-вращательного волнового пакета двухатомной гетероядерной молекулы на основе воздействия последовательности двух ультракоротких импульсов.
8. Методы направленного усиления низкочастотных компонент в поляризационном отклике среды из двухатомных гетероядерных молекул, основанные на предварительном сильном колебательно-вращательном возбуждении среды и открывающие новые возможности в области генерации излучения в терагерцовом диапазоне частот.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинарах отдела микроэлектроники НИИЯФ МГУ, семинаре по физике многофотонных процессов ИОФ РАН (руководитель - проф. М.В. Федоров), были представлены на 8 международных конференциях и симпозиумах:

1. XIV Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», Москва (12-15.04.2010).
2. International conference on coherent and nonlinear optics, Kazan, Russia, 22-27.08.2010
3. VI международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики» Санкт- Петербург, (2010)
4. 20th International Laser Physics Workshop (LPHYS'11), Sarajevo, Bosnia and Herzegovina (11-15.07.2011).
5. III International conference on Ultra-intense Laser Interaction science (ULIS 2011), 9-13.10.2011, Lisbon, Portugal
6. XXI International Laser Physics Workshop (LPHYS'13), 23-27.07.2012, Calgary, Canada
7. International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO 2013), International Conference on Lasers, Applications, and Technologies (LAT 2013), Moscow, Russia (18-22.06.2013).
8. 22th International Laser Physics Workshop (LPHYS'13), Prague, Czech Republic (15-19.07.2013).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 14 печатных работ, в том числе 6 статей в реферируемых российских и зарубежных журналах [A1–A6] и 8 тезисов докладов на международных конференциях [A7–A14].

Личный вклад автора

Личный вклад автора в работы, вошедшие в диссертацию, является определяющим на этапе построения теоретических моделей, разработки аналитических и численных подходов, реализации численных алгоритмов, получения результатов и их интерпретации. Все изложенные в диссертационной работе результаты получены лично автором.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из Введения, четырёх глав, Заключения и Списка литературы. В главе 1 представлен обзор литературы, посвящённой эффектам сильного поля в атомах и молекулах и существующим методам их описания. В главе 2 развит теоретический подход к задаче о взаимодействии интенсивных ультракоротких лазерных импульсов с двухатомными

гетероядерными молекулами, разработанный на основе точного численного решения нестационарного уравнения Шрёдингера и учитывающий динамику как колебательных, так и вращательных ядерных степеней свободы в условиях прямых переходов в пределах одного молекулярного терма. В этой же главе продемонстрирована возможность интерференционной стабилизации гетероядерных молекул относительно процесса фотодиссоциации, а также обсуждается диссоциация молекул последовательностью импульсов. В главе 3 рассмотрено взаимодействие гетероядерных молекул с импульсами, гораздо более короткими, чем колебательный период молекулы. На основе приближения “встряски” построено аналитическое описание взаимодействия подобных импульсов с молекулами с учётом взаимовлияния молекулярных колебаний и вращений. Подробно рассматриваются случаи, в которых структура матричных элементов между колебательными состояниями играет критическую роль в перезаселении вращательных состояний. Обсуждается возможность эффективного выстраивания молекул ультракоротким импульсом, рассматриваются каналы диссоциации молекулы в случае такого воздействия. В главе 4 проанализирован поляризационный отклик гетероядерной молекулы на интенсивное внешнее воздействие в условиях сильного поля. Продемонстрировано возникновение низкочастотного крыла в спектре отклика колебательно возбуждённой молекулы на интенсивное лазерное излучение. Выявлены характерные черты поляризационного отклика молекулы, как в течение импульса, так и в постимпульсном режиме. Рассмотрены случаи импульса длительностью в несколько оптических циклов и ультракороткого импульса. Основные результаты работы представлены в **Заключении**.

Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационной работы и ее научная и практическая значимость, сформулирована цель работы, представлены выносимые на защиту научные положения

В **первой главе** представлен обзор литературы, посвященный решаемым в диссертации задачам. Описываются основные существующие подходы к рассмотрению молекулярных систем в сильном лазерном поле, обсуждаются модели взаимодействия молекулярных сред с лазерными импульсами экстремально короткой длительности. Рассматриваются их пределы применимости и основные проблемы существующих теоретических приближений.

Вторая глава посвящена обсуждению разработанного теоретического подхода для решения задачи о взаимодействии интенсивных низкочастотных ультракоротких лазерных импульсов с двухатомными гетероядерными молекулами, основанный на решении нестационарного уравнения Шрёдингера для ядерной подсистемы молекулы во внешних импульсах поля с

учётом как колебаний, так и вращений, а также исследованию режима интерференционной стабилизации молекул в интенсивном лазерном поле в условиях прямых колебательно-вращательных переходов в пределах одного электронного терма. Она состоит из четырёх разделов. В разделе 2.1 сформулирована основная цель второй главы.

В разделе 2.2. приведены основные использовавшиеся уравнения, обсуждается рассматриваемая модель гетероядерной молекулы и ее параметры, а также описаны численная схема и методы численного расчёта. Детально описана процедура расчёта для одномерной системы и особенности расчёта в случае взаимодействия ядерной подсистемы молекулы с лазерным полем в трёхмерном пространстве.

Раздел 2.3 посвящён анализу режима интерференционной стабилизации при взаимодействии колебательно возбуждённой молекулы с интенсивным лазерным излучением. В подразделе 2.3.1. рассмотрены характерные черты процесса фотодиссоциации для одномерной квантовомеханической системы. Получены общие условия на спектр молекулы и на параметры излучения, необходимые для наблюдения фотостабилизации. Рассмотрение проведено для случаев сильно- и слабосвязанных молекул. В подразделе 2.3.2. полученные для одномерной системы выводы используются для получения условий фотостабилизации в трёхмерном случае. Продемонстрировано наличие стабилизации молекул относительно фотодиссоциации при одновременном учете и колебаний и вращений (рисунок 1). Показано, что при выполнении условий интерференционной фотостабилизации для молекулы, в отличие от атомов, невозможно получение “чистой” стабилизации Λ -типа, так как множественные рамановские переходы Λ -типа в молекуле будут неизбежно сопровождаться квазирезонансной связью с нижележащими состояниями и переходами V -типа. Рассмотрена роль вращательной степени свободы в процессе фотостабилизации. Обсуждаются вопросы формирования широкого профиля заселённости по вращательным состояниям, а также выстраивание колебательно возбуждённых молекул интенсивным внешним воздействием.

В разделе 2.4. рассмотрена диссоциация возбуждённой молекулы при взаимодействии с последовательностью двух одинаковых импульсов (“pump-probe”). Первый импульс помимо диссоциации формирует широкую суперпозицию возбужденных колебательно-вращательных состояний, второй импульс взаимодействует и вызывает диссоциацию уже «приготовленной» системы. Вероятность диссоциации вторым импульсом в этом случае существенно зависит от задержки между импульсами и периодически характеризуется значениями, существенно меньшими, чем диссоциация, индуцированная импульсом «накачки». Таким образом, обнаружена возможность сформировать колебательно-вращательный волновой пакет, устойчивый к последующей диссоциации. Также продемонстрировано, что наблюдаемая

зависимость вероятности диссоциации системы от задержки между импульсами характеризуется суперпозицией колебаний с различными частотами, в которых проявляется спектр возбуждённых состояний, заселенных под действием первого импульса.

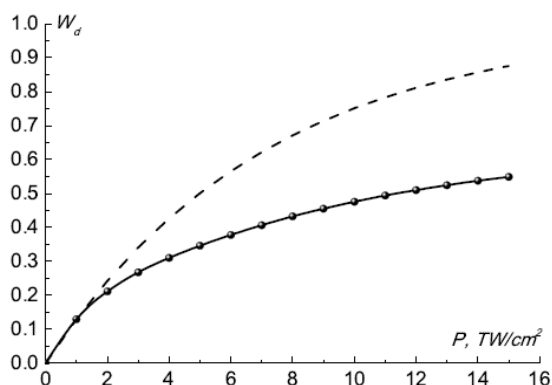


Рисунок 1 Зависимость вероятности диссоциации от интенсивности при однофотонной связи с континуумом для трёхмерной системы. Штриховая линия – обобщение золотого правила Ферми, сплошная – результат численного решения нестационарного уравнения Шрёдингера

Третья глава посвящена изучению взаимодействия гетероядерных молекул с импульсами предельно короткой длительности. В разделе 3.1. сформулирована цель третьей главы. В разделе 3.2. проведён анализ пределов применимости широко используемой модели “встряски” для жёсткого ротатора и построена модель, включающая как колебательную, так и вращательную степени свободы. Получена оценка на высоту колебательно возбуждённого состояния, начиная с которой колебания вносят существенный вклад в формирование профиля заселённости по вращательным состояниям. В приближении мгновенного воздействия получены выражения для амплитуд заселённости C_{VJM} состояний с квантовыми числами V, J, M , соответствующими колебательному номеру, моменту импульса и проекции момента импульса соответственно:

$$C_{VJM}(+0) = \sum_{V'J'L} C_{V'J'M'}(-0) (2L+1) \sqrt{(2J+1)(2J'+1)} i^L \begin{pmatrix} J' & LJ \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J & LJ \\ -M' & 0 \end{pmatrix} \int_0^\infty u_{VJ} u_{V'J'} j_L(\lambda r) dr \quad (1)$$

Здесь λ — параметр, определяющий «силу» воздействия поля и соответствующий импульсу, переданному молекуле от поля (в обратных сантиметрах). Следствия из полученного выражения описываются в разделе 3.3. Показано, что асимптотика этого выражения для низких значений λ соответствует модели жёсткого ротатора. Продемонстрировано, что при больших значениях λ оказывается существенным влияние последнего интегрального множителя на амплитуды вероятности состояний. При этом зависимости суммарных заселённостей

вращательных состояний от параметра λ качественно повторяют ход сферических функций Бесселя, входящих в выражение (1) (рисунок 2). Также показано, что в случае, когда молекула изначально находится в колебательно возбуждённом состоянии, формируемое импульсом распределение заселённости по вращениям гораздо шире, чем это предсказывается моделью жёсткого ротатора, что может быть использовано в задаче выстраивания молекул ультракороткими импульсами. Вид соответствующего двумерного распределения по колебаниям и вращениям (рисунок 3) свидетельствует о наличии двух каналов диссоциации молекулы, которые описываются в разделе 3.4.

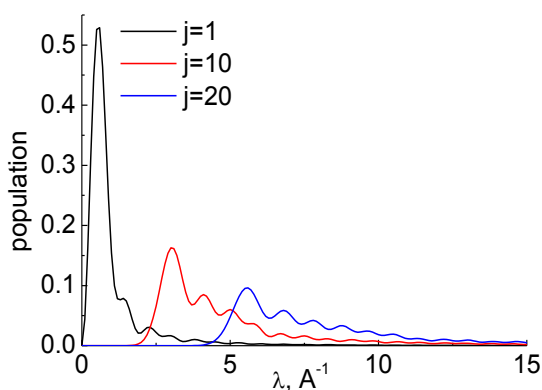


Рисунок 2. Суммарные заселённости вращательных состояний после действия дельта—импульса как функции импульса, сообщённого системе

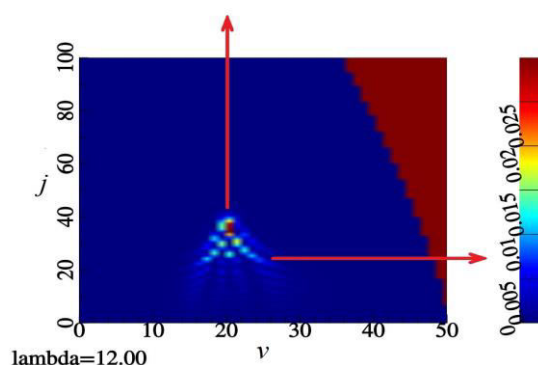


Рисунок 3. Зависимость заселённости после действия дельта—импульса от квантовых чисел (ν, j) . Красная область справа сверху — диссоциационный континуум. Начальное состояние $j=0, \nu=20$.

Первый — разрыв связи за счёт вращений — обеспечивается вертикальным движением максимума распределения заселённости. Для него характерно возникновение диссоциации за счёт заселения состояний с высокими j (что возможно при превышении полем некоторого значения) и большие значения вероятности диссоциации. На распределении данная ситуация соответствует пересечению максимумом заселённости границы континуума по вертикали. Второй канал — диссоциация по колебательным состояниям (рисунок 3). Она присутствует при любых ненулевых значениях интенсивности. На распределении она может быть проиллюстрирована как выход широкого по колебаниям “хвоста” за границу континуума по горизонтали. Так как заселённость этой области распределения небольшая, соответствующий вклад в диссоциацию невелик.

В четвёртой главе рассматривается дипольный отклик гетероядерной молекулы на сильное поле. Рассмотрены случаи полуциклового воздействия и воздействия длительностью в несколько циклов поля. Также рассмотрен отклик предварительно возбуждённой молекулы на слабое внешнее поле. Показано, что в режиме интерференционной стабилизации спектр

импульса обогащается усиленным низкочастотным крылом (рисунок 4), что является следствием эффективного возбуждения вращательных состояний молекулы.

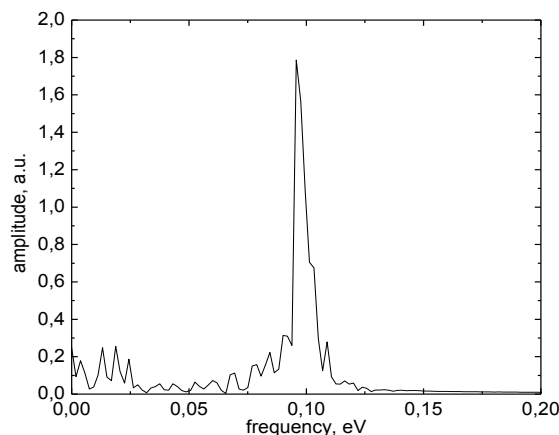


Рисунок 4. Спектр дипольного отклика возбуждённой молекулы на квазимонохроматическое излучение с энергией кванта 0.1eV интенсивности 2 TW/cm²

Заключение

В работе развит теоретический подход для описания взаимодействия интенсивных низкочастотных лазерных импульсов с двухатомными гетероядерными молекулами за рамками теории возмущений и с учетом колебательных и вращательных степеней свободы молекулы, а также их взаимовлияния друг на друга. Для случая воздействия импульсов ультракороткой длительности получены аналитические выражения для амплитуд вероятностей различных колебательно-вращательных состояний молекулы обусловленных «дельта-воздействием». В спектре поляризационного отклика на сильное лазерное поле обнаружены низкочастотные компоненты, которые могут быть усилены предварительным эффективным возбуждением среды более мощным импульсом накачки. Полученные результаты имеют принципиальное значение для проблемы генерации излучения в терагерцовом диапазоне частот.

Список публикаций

- A1. Буренков И.А., Волкова Е.А., Попов А.М., Тихонова О.В., Харин В.Ю. Динамика квантовых систем в интенсивных ультракоротких лазерных импульсах // XIV Международная молодежная научная школа «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия», сборник методических заметок, Изд-во Казанского университета. — Казань. 2010. — с. 79-87.
- A2. Fedorov M.V., Poluektov N.P., Popov A.M., Tikhonova O.V., Kharin V.Yu., Volkova E.A. Interference stabilization revisited // IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics, V. 18, Issue 1. 2012. — pp. 42-53.
- A3. Kharin V.Yu., Popov A.M., Tikhonova O.V. Vibrational-rotational behavior of diatomic heteronuclear molecular systems in intense laser pulses // Laser Phys., V. 11, Issue 11. 2012. — p. 1693.
- A4. Попов А.М., Тихонова О.В., Харин В.Ю. Диссоциация колебательно возбуждённых гетероядерных молекул интенсивным инфракрасным полем // ЖЭТФ, Том 145, Выпуск 3. 2014. — с. 405-413.
- A5. Kharin V.Yu., Tikhonova O.V. Mutual influence of rotations and vibrations of a strongly “kicked” diatomic heteronuclear molecule // Laser Phys. Lett., V. 11. 2014. — p. 075302.
- A6. Kharin V.Yu., Popov A.M., Tikhonova O.V., Volkova E.A. Nonperturbative atomic dynamics: population trapping and polarization response in strong laser fields // Chinese Journal of Physics, V. 51, Issue 2014. — pp. 340-365.
- A7. Попов А.М., Тихонова О.В., Харин В.Ю. Колебательная динамика двухатомных гетероядерных молекул в интенсивных лазерных импульсах // Материалы Международного молодежного научного форума "ЛОМОНОСОВ"-2010, секция "Физика", подсекция "Оптика", доклад №20, М.: МАКС Пресс; 2010.
- A8. Popov A.M., Tikhonova O.V., Kharin V.Yu. Vibrational dynamics of diatomic heteronuclear molecules in intense femtosecond laser pulses // Abstracts of the International conference on coherent and nonlinear optics. — Kazan, Russia. 2010.
- A9. Попов А.М., Тихонова О.В., Харин В.Ю. Динамика колебательных волновых пакетов гетероядерных молекул в интенсивных фемтосекундных лазерных импульсах // Сборник трудов конференции "Фундаментальные проблемы оптики-2010", ИТМО. — Санкт-Петербург. 2010.

- A10. Kharin V.Yu., Popov A.M., Tikhonova O.V. Vibrational-rotational behavior of diatomic heteronuclear molecules in intense laser pulses // XX Laser Phys. Workshop. — Sarajevo. 2011.
- A11. Kharin V.Yu., Popov A.M., Tikhonova O.V. Vibrational-rotational dynamics of diatomic heteronuclear molecules in intense femtosecond laser pulses // 3rd International conference on Ultra-intense Laser Interaction science (ULIS 2011), Book of abstracts. — Lisbon, Portugal. 2011. — p. 59.
- A12. Kharin V.Yu., Popov A.M., Tikhonova O.V. The interplay between vibrations and rotations of a diatomic heteronuclear molecule in an intense low-frequency laser field // XXI Laser Phys. Workshop. — Calgary, Canada. 2012.
- A13. Kharin V.Yu., Popov A.M., Tikhonova O.V. Vibrational-rotational dynamics of the shocked diatomic heteronuclear molecule // Abstracts of the International conference on coherent and nonlinear optics. — Moscow, Russia. 2013.
- A14. Kharin V.Yu., Tikhonova O.V. Rotational and vibrational dynamics of a diatomic heteronuclear molecule in an ultrashort low-frequency laser pulse // XXII Laser Physics Workshop. — Prague, Czech Republic. 2013.

Цитированная литература

1. Sukharev M.E., Krainov V.P. Rotation and alignment of diatomic molecules and their molecular ions in strong laser fields // JETP, V. 86. 1998. — pp. 318-322.
2. Sukharev M.E., Krainov V.P. Vibration, rotation and dissociation of molecular ions in a strong laser field // J.Opt.Soc.Am.B, V. 15. 1998. — pp. 2201-2205.
3. B.A., Zon Classical theory of the molecule alignment in a laser field // Eur.Phys.Journal D, V. 8. 2000. — p. 377.
4. Averbukh I.Sh., Arvieu R. Angular focusing, squeezing and rainbow formation in a strongly driven quantum rotor // Phys.Rev.Lett., V. 87. 2001. — p. 163601.
5. Leibcher M., Averbukh I.Sh., Rabitz H. Enhanced molecular alignment by short laser pulses // Phys.Rev.A, V. 69. 2004. — p. 013402
6. Molodenski M.S., Tikhonova O.V. Comparison of quantum and classical approaches to the problem of rotational molecular dynamics in the presence of a laser field // Laser Phys., V. 14. 2004. — pp. 1191-1199.
7. Seideman T. Rotational excitation and molecular alignment in intense laser fields // J.Chem.Phys., V. 103. 1995. — p. 7887.

8. Seideman T. On the dynamics of rotationally broad, spatially aligned wave packets // *J.Chem.Phys.*, V. 115. 2001. — p. 5965.
9. Sukharev M.E., Fedorov M.V. Strong-Field Interference Stabilization in Molecules // *Laser Phys.*, V. 12, Issue 2. 2002. — pp. 491-497.
10. Giusti-Suzor A., He X., Atabek O., Mies F.H. Above-threshold dissociation of H₂ in intense laser fields // *Phys. Rev. Lett.*, V. 64. 1990. — p. 515.
11. Jiang, T.F. High-frequency stabilization and high-order harmonic generation of an excited Morse oscillator under intense fields // *Phys. Rev. A*, V. 48. 1993. — p. 3995.
12. Zavriyev A., Bucksbaum P.H. Light-induced vibrational structure in H₂⁺ and D₂⁺ in intense laser fields // *Phys. Rev. Lett.*, V. 70. 1993. — p. 1077.
13. Дыхне А.М., Юдин Г.Л. Вынужденные эффекты при "встряске" электрона во внешнем электромагнитном поле // *УФН*, Том 121, Выпуск 1. 1977. — с. 157-168.
14. Дыхне А.М., Юдин Г.Л. "Встряхивание" квантовой системы и характер стимулированных им переходов // *УФН*, Том 125, Выпуск 3. 1978. — с. 377-407.

Подписано в печать 01.07.2014

Формат А5

Бумага офсетная. Печать цифровая.

Тираж 100 экз. Заказ № 2648

Отдел полиграфии Научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова
119192 Москва, Ломоносовский проспект, 27