

На правах рукописи



АСЕЕВ Сергей Анатольевич

**Лазерное детектирование атомно-молекулярных структур и
процессов в nano-аттосекундном диапазоне**

Специальность: 01.04.05 - Оптика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Москва, Троицк – 2015

Работа выполнена в Отделе лазерной спектроскопии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института спектроскопии Российской академии наук (ИСАН)

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук, профессор,
КРАЙНОВ Владимир Павлович,
профессор Московского физико-технического
института (государственного университета)
доктор физ.-мат. наук,
МИСОЧКО Олег Викторович,
ведущий научный сотрудник Института
физики твердого тела Российской академии
наук
доктор физ.-мат. наук, профессор,
САВЕЛЬЕВ-ТРОФИМОВ Андрей Борисович,
профессор Московского государственного
университета им. М.В. Ломоносова

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт химической
физики им. Н.Н. Семенова Российской
академии наук (ИХФ РАН)

Защита диссертации состоится “20” октября 2015 г. в 12 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.014.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении наук Институте спектроскопии Российской академии наук (ИСАН) по адресу: 142190, г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института спектроскопии и на сайте ИСАН по адресу: http://isan.troitsk.ru/ru/diss_sovet.php.

Отзывы на автореферат (два заверенных экземпляра) просим направлять на адрес диссертационного совета.

В отзыве указываются фамилия, имя, отчество лица, представившего отзыв, почтовый адрес, телефон, адрес электронной почты, наименование организации, работником которой является указанное лицо, и должность в этой организации (выдержка из Положения о порядке присуждения ученых степеней).

Автореферат разослан “ ___ ” _____ 2015 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук



Каримуллин К.Р.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена исследованиям возможностей применения высокочувствительных лазерных ионизационных методов к анализу изотопного состава вещества, спектроскопии электронных коррелированных состояний в отрицательных ионах, наблюдению индуцированного сильным электромагнитным полем электрон-ионного взаимодействия в атомах и генерации ультракоротких электромагнитных импульсов, извлечению пространственно-структурной информации о строении поверхности конденсированных сред.

Цели диссертации:

- детектирование редких изотопов и коллинеарная лазерная фотоионизационная спектроскопия возбуждённых отрицательных ионов в быстром пучке;
- исследование молекул, возбуждённых лазером в состояния с высокими вращательными квантовыми числами;
- детектирование органических микроструктур на поверхности методом лазерной фотоэлектронной микроскопии;
- аттосекундная фотоэлектронная спектроскопия с угловым разрешением и детектирование ультракоротких электромагнитных сгустков.

Исследования выполнены с помощью импульсного лазерного излучения и охватывают широкий временной диапазон от наносекунд до аттосекунд. Все эксперименты осуществлены в вакууме, что позволило создать условия для транспортировки и надёжной регистрации заряженных частиц, фотоионов и электронов, и, соответственно, обеспечило высокую чувствительность измерений.

Актуальность

Мощное импульсное лазерное излучение способно селективно разрывать связи в веществе и создавать электронные и ионные сгустки.

Высококочувствительная регистрация фотоионов с помощью хорошо-развитой техники обеспечивает детектирование редких химических элементов с беспрецедентно низким уровнем обнаружения. Фотоэлектронная мода, формируемая в вакууме на поверхности конденсированных сред под действием интенсивной электромагнитной волны, является важным источником информации о пространственно-структурном составе вещества. Короткая длительность импульсов фемтосекундных лазеров позволяет концентрировать энергию во времени и пространстве, достигая высоких пиковых значений напряжённостей поля, что прокладывает путь в область всё более коротких временных масштабов. Фотоэмиссионные процессы в веществе обеспечивают переносимость кратковременного воздействия импульсов света на фотоэлектронные сгустки, испускаемые в результате фотоэффекта, и приводят к качественно новым возможностям для электронной микроскопии.

Актуальность выполненных исследований проявляется в широком спектре их приложений, включающем в себя детектирование редких изотопов, микроскопию органических структур на поверхности, фотоэлектронную спектроскопию со сверхвысоким временным разрешением. Полученные результаты оказали влияние на развитие коллинеарной лазерной фотоионизации быстрых атомов и отрицательных ионов, лазерной фотоэмиссионной проекционной микроскопии, аттосекундной фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением. Накопленный багаж знаний представляет интерес для развития сверхбыстрой электронной микроскопии и дифракции в нашей стране.

Новизна

Все представленные в настоящей диссертации основные результаты получены впервые и опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных реферируемых периодических изданиях. Список публикаций автора приведен ниже.

Защищаемые положения:

- Коллинеарная лазерная резонансная ионизационная спектроскопия - высокочувствительный метод исследования ускоренных атомов в пучке. Ионизация быстрых ридберговских атомов в постоянном магнитном поле сохраняет разброс в кинетической энергии пучка.
- Электромагнитное излучение пикосекундной длительности с «раскручивающейся» во времени поляризацией позволяет управлять вращательной степенью свободы гомоядерной двухатомной молекулы.
- Новое направление - вакуумная фемтосекундная лазерная микроскопия на основе полого острья с использованием пространственно-сжатых сгустков ионов, электронов и мягкого рентгеновского излучения.
- Органические микроструктуры визуализированы методом лазерной фотоэлектронной проекционной микроскопии, когда в качестве подложки применено диэлектрическое остриё.
- Профиль высокоинтенсивного острогофокусированного лазерного пучка измерен фотоионной лупой, основанной на действии расходящегося вблизи проводящего острья электрического поля.
- Новое направление в аттосекундной физике - фотоэлектронная спектроскопия с угловым разрешением. (Это позволяет разделить каналы ионизации, отвечающие поглощению различного числа фотонов.)

Основные результаты:

1. Впервые наблюдалась магнитная ионизация быстрых ридберговских атомов, предварительно приготовленных лазерным излучением. Показано, что такой процесс может быть использован в коллинеарной лазерной резонансной ионизационной спектроскопии.

Впервые методом коллинеарной лазерной фотоионизации исследованы двойные ридберговские состояния отрицательных ионов гелия.

2. Впервые реализована импульсная оптическая центрифуга для молекул, позволившая осуществить их диссоциацию.
3. Разработана концепция вакуумной лазерной микроскопии с использованием пустотелого острья. С помощью пучка заряженных частиц визуализирована 0.1-мкм апертура на кончике кварцевого капилляра. Впервые с помощью лазерной фотоэлектронной проекционной микроскопии проведено исследование проводящего полимера. Впервые реализована импульсная рентгеновская десорбция органического проводящего полимера на основе использования мощного фемтосекундного лазерного излучения.
4. При облучении плоского тонкоплёночного металлического катода фемтосекундным лазерным излучением приготовлен импульсный фотоэлектронный пучок с начальной длительностью около 40 фс.
5. Развита новый подход в области микроскопии фотоионизационных процессов в газовой среде на основе проекционного принципа.
6. Впервые исследована генерация аттосекундных электромагнитных импульсов на трёх различных мишенях (аргон, ксенон и неон).

Практическая ценность

Детектирование редких изотопов с использованием перестраиваемых лазеров имеет явно-выраженную практическую направленность, т.к. это существенным образом дополняет информацию о состоянии окружающей среды, получаемую иными, неоптическими методами (*экология*). Исследования в области кластерной физики, когда на практике реализуется эффективное взаимодействие мощного лазерного излучения с веществом, по ряду характеристик близкому к конденсированным средам, перспективно с точки зрения создания интенсивных источников электромагнитного излучения в области экстремального ультрафиолета (*микроэлектроника*). Многофотонная ионизация газа в откачиваемой камере может стать основой широкополосного профилометра, позволяющего регистрировать профиль интенсивного остросфокусированного лазерного излучения в широком

спектральном диапазоне (*лазерная техника*). Отметим, что такой прибор будет иметь определённые преимущества по сравнению с уже существующими коммерчески-доступными профилометрами электромагнитного излучения. Работы в области фотоэлектронной микроскопии на основе пустотелого, очень тонкого острия перспективны в плане развития возможностей сканирующей зондовой микроскопии (*потенциальное расширение рынка сканирующей микроскопии*).

Личный вклад автора

Основная часть результатов, выносимых на защиту, получено лично автором. Большинство публикаций по теме диссертации подготовлены также лично автором.

Апробация работы

По материалам диссертации опубликовано 39 работ в периодических реферируемых научных изданиях, 1 монография и 24 работы в сборниках международных научных конференций.

Структура диссертации

Настоящая диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Диссертация содержит 274 страницы, 63 рисунка и 2 таблицы. В списке цитируемой литературы - 285 наименований.

Первая глава содержит описание фотоионизационных процессов с участием атомно-молекулярных структур в импульсных лазерных пучках. Подробно рассмотрена туннельная ионизация атомов в сильном электромагнитном поле ультракороткой длительности. Дано введение в область сверхбыстрой фотоэлектронной микроскопии, осуществляемой с помощью фемтосекундных лазерных источников, когда короткие зондирующие электронные импульсы получаются в результате фотоэффекта. Высокочувствительные методы лазерной фотоионизации и фотоэлектронной

микроскопии представляются наиболее подходящими для решения поставленных в диссертационной работе задач.

Вторая глава посвящена коллинеарной лазерной фотоионизации быстрых атомов и отрицательных ионов. Работы выполнены с помощью перестраиваемых по частоте источников когерентного электромагнитного излучения наносекундной длительности. Ступенчатая резонансная фотоионизация, когда лазерное излучение на каждой ступени возбуждения настроено на соответствующую частоту атомного перехода, а возбуждённый атом затем ионизируется, является высокочувствительным химически-селективным методом анализа состава вещества [1, 2]. Хорошая развитая техника ионной регистрации позволяет подойти к проблеме детектирования одиночных атомов.

В ряде случаев такой, в общем-то, универсальный метод целесообразно осуществлять через оптическое заселение долгоживущих ридберговских уровней, имеющих большие главные квантовые числа n , с последующей ионизацией высоковозбуждённых атомов в статическом электрическом поле. К достоинству данного подхода относится возможность использования более низких энергий лазерных импульсов по сравнению с оптической ионизацией непосредственно в континуум: при этом эффективность фотоионизации оказывается достаточно высокой. В этой схеме не требуются слишком большие электрические поля. Например, для высоковозбуждённого атома водорода с $n = 25$ величина критической напряженности поля, когда такое состояние перестаёт быть связанным, равна приблизительно 0.8 кВ/см.

В эксперименте пучок быстрых атомов сформирован в результате перезарядки ускоренных после ионного источника положительно-заряженных ионов на парах щёлочного металла, с эффективностью процесса конвертации в несколько десятков процентов. Это позволило получать быстрые атомы благородных газов в высоколежащих метастабильных состояниях и тем самым обеспечило условия для резонансного ступенчатого

заселения ридберговских уровней за счёт поглощения такими атомами квантов видимого или ближнего ультрафиолетового спектрального диапазона.

Коллинеарная геометрия (рис. 1) предусматривает облучение быстрых атомов лазерным излучением, распространяющимся навстречу, либо вдогонку пучку, что имеет важные достоинства. Большой искусственный изотопический сдвиг в спектре поглощения является следствием проявления эффекта Доплера для атомов разных изотопов, движущихся с разной скоростью при одной и той же энергии пучка. Высокий уровень сигнала обусловлен перекрытием на большой длине импульсного лазерного и атомного пучка. Применение такой схемы позволяет уменьшить величину неоднородного уширения атомных спектральных линий поглощения, что является следствием квадратичной зависимости кинетической энергии от скорости. В результате открывается возможность изотопически-селективного оптического возбуждения для атомов любых химических элементов. В этой главе приведены оптимальные схемы оптического возбуждения для атомов гелия, криптона и водорода.

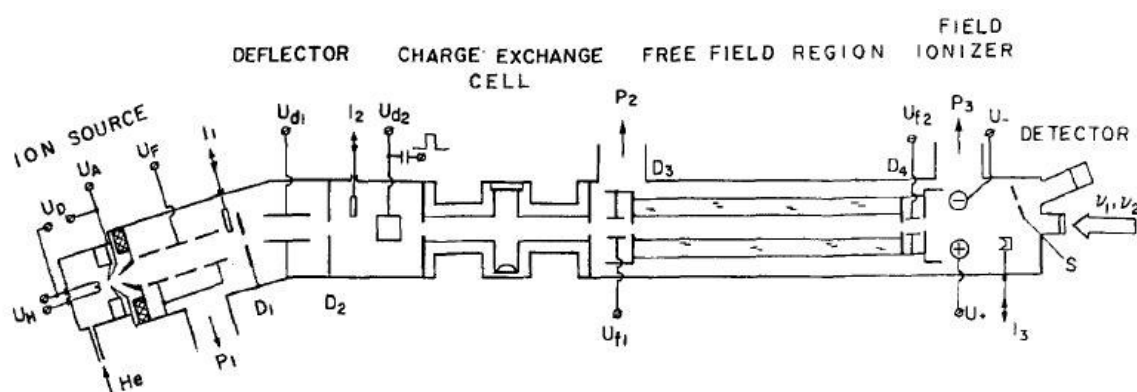


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. Введены следующие обозначения: 1 – ионный источник; 2 – перезарядная ячейка; 3 – область возбуждения (длиной 1 м); 4 – полевой ионизатор; 5 – детектор (вторичный электронный умножитель – ВЭУ). U_A – ускоряющее напряжение, определяющее кинетическую энергию быстрых ионов и, соответственно, быстрых атомов после перезарядки. U_D – напряжение разряда. U_H – накал катода. U_F – электрический потенциал, приложенный к линзе. U_{d1} – электрический потенциал, приложенный к дефлектору. U_{d2} – электрический потенциал, приложенный к модулятору. U_{f1} , U_{f2} – потенциалы, приложенные к

фильтрующим конденсаторам. U_+ , U_- – потенциалы, приложенные к полевому ионизатору (здесь для упрощения показана только ионизатор с поперечным полем). I_1 - I_3 – измерители тока пучка быстрых ионов. D_1 - D_4 – диафрагмы. P_1 - P_3 – вакуумные насосы.

Факторами, ограничивающими возможности метода, являются столкновительные процессы. Так, быстрые атомы основного изотопа могут ионизоваться, либо возбуждаться в ридберговские состояния без воздействия на них лазерного излучения, в результате столкновений с молекулами остаточного газа в вакуумной системе. При этом улучшение вакуума в экспериментальной установке является малоэффективным способом, не позволяющим значительно расширить диапазон исследований редких изотопов. В данной главе показаны иные пути преодоления такого ограничения.

Сочетая оптический подход с времяпролётной техникой, продемонстрировано детектирование редких изотопов гелия-3 с относительной концентрацией до 10^{-9} на фоне основного изотопа гелия-4. Используя подобный метод, наши коллеги в ФРГ измерили относительное содержание редких изотопов стронция Sr-89, Sr-90 [3].

Ионизация ридберговских атомов в электрическом поле сопровождается разбросом в кинетической энергии ионов на выходе из такого ионизатора, что не позволяет применить последующую масс-сепарацию пучка. Для расширения возможностей метода можно использовать магнитный ионизатор¹. На атом, движущийся в магнитном поле \mathbf{B} со скоростью \mathbf{v} , в собственной системе отсчёта действует эффективное лоренцево электрическое поле $\mathbf{F}_{\text{Лор}} = [\mathbf{v} \times \mathbf{B}]$. В нашем эксперименте, при $v \approx$

¹ За работы в этой области автор настоящей диссертации, будучи молодым исследователем, в 1994 году на международной конференции по резонансной ионизационной спектроскопии в ФРГ получил награду RIS-94 Excellence Award.

4×10^5 м/с и $B \approx 0.35$ Т, величина поля достигала $F_{Lor} \approx 1.4$ кВ/см.² Используя постоянный магнит, продемонстрирована ионизация быстрых ридберговских атомов He, предварительно возбуждённых селективным образом лазерным излучением в состояния nS , либо nD . Экспериментально обнаружены один канал ионизации для S – состояний атомов гелия и два канала для D – состояний (рис. 2). По аналогии с ионизацией He^{**} в электрическом поле [4] им приписаны адиабатический (для S – состояний и первого пика, отвечающему D – состоянию) и диабатический (для D – состояний) механизмы эволюций высоковозбуждённых состояний атома в нарастающем электрическом, в данном случае, магнитном поле.

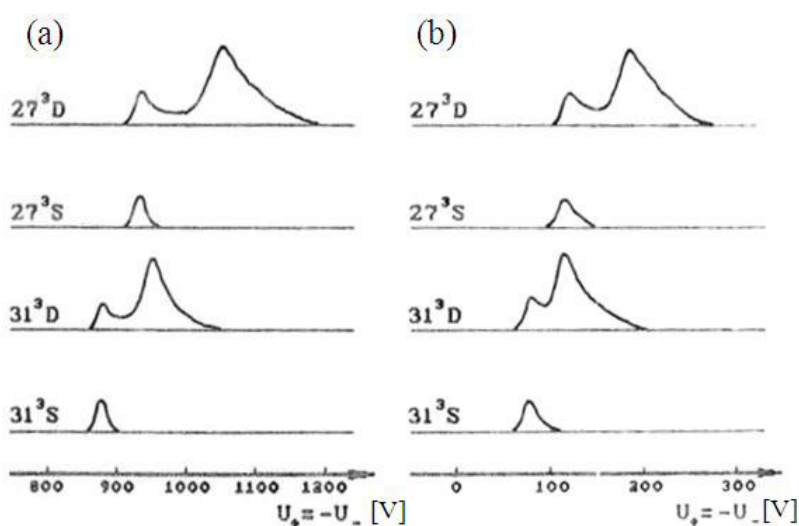


Рис. 2. Зависимости сигнала при лазерном возбуждении различных ридберговских состояний от напряжения на электродах. Атомы ионизовались в поперечном электрическом (а) и магнитном (б) полях. Образованные ионы отклонялись на детектор электростатическим конденсатором. Заметим, что в случае (а) функции отклоняющего конденсатора и ионизатора совмещены (рис. 1).

Метод коллинеарной лазерной фотоионизации оказалось удобным использовать для изучения высоколежащих состояний отрицательных ионов

² Заметим, что электрическом поле с напряжённостью 1,4 кВ/см согласно формуле т.н. седловой точки для ионизации атома является критическим для состояний с эффективным главным квантовым числом $n^* \approx 22$.

[5]. Исследование $(\text{He}^-)^{**}$ осуществлено вблизи порога, когда возможна эмиссия двух электронов из такого иона. Двойные ридберговские состояния приготовлены за счёт однофотонного поглощения второй гармоники от перестраиваемого по частоте лазера на красителе. Для наблюдения таких состояний в He^- использована экспериментальная установка, по своей схеме близкая к той, что применялась при лазерном детектировании редких изотопов.

В результате испускания электронов возбуждённые состояния отрицательных ионов быстро распадались с формированием пучка нейтральных ридберговских атомов, который затем анализировался с помощью ионизатора на основе поперечного электрического поля. Используя зависимость фотоионного сигнала от длины волны лазерного излучения, оказалось возможным определить энергии и ширины нескольких двойных ридберговских состояний отрицательного иона гелия (Табл. 1), которые не исследовались ранее.

Таблица 1. Энергии E [eV] и ширины Γ [meV] трёх резонансов $\text{He}^-(^4P)$. Положения резонансов даны относительно основного уровня гелия. Результаты расчёта на основе формулы $E(n, n' = n) = -\frac{(1-\mu)^2}{(n-\delta)^2}$, где $\mu = 0.1699$ - параметр экранировки, $\delta = 0.2572$ - величина квантового дефекта, представлены в столбце E_{cal} . Значения E_{exp} и Γ_{fit} найдены из экспериментальных данных.

n, n'	E_{cal}	E_{exp}	Γ_{fit}
13, 13	24.4809	24.4803(3)	1.8(2)
14, 14	24.4954	24.4960(5)	1.4(2)
15, 15	24.5071	24.5089(5)	1.1(2)

Важность такого рода работ обусловлено во многом тем, что подобные состояния оказываются весьма чувствительными к проявлениям электронной корреляции вследствие подавления влияния положительно заряженного остова: в отрицательных ионах связывающий потенциал является

быстроспадающим по сравнению как с нейтральными атомами, так и положительно заряженными ионами [6].

Третья глава содержит результаты исследований в области молекулярной и кластерной физики, выполненных с применением мощных пикосекундных лазерных импульсов. Используются два подхода, позволяющие из широкополосного электромагнитного излучения Ti:Sa лазера сформировать достаточно интенсивные электромагнитные поля с раскручивающейся поляризацией в одном случае и «подстраиваемом под наилучший экспериментальный результат» временным профилем в другом.

Первая часть посвящена управлению вращательной степенью свободы молекул в лазерном поле, в котором поляризация начинает ускоренно вращаться. При описании такого процесса стоит напомнить о возможности эффективного выстраивания (либо ориентирования) молекул в сильном линейно-поляризованном лазерном поле, что в настоящее время продолжает оставаться предметом изучения для многих научных лабораторий [7, 8]. В таких условиях, вследствие анизотропии поляризуемости молекулы происходит её «фиксация» относительно поляризации падающей электромагнитной волны. Для большинства двухатомных молекул, помещённых в высокоинтенсивное, но не приводящее к заметной ионизации, лазерное поле пикосекундной длительности, глубина потенциальной ямы может достигать достаточно больших величин в районе нескольких сотых долей электрон-вольта, что в принципе позволяет проводить исследования с молекулярным ансамблем даже при комнатных температурах.

Цель выполненного эксперимента – создать оптическую центрифугу на основе фемтосекундного лазера, чтобы заставить молекулы Cl_2 в газовой струе вращаться вслед за вращением лазерной поляризации (рис. 3). Длина волны лазера 800 нм. В результате продемонстрирована возможность возбуждения ансамбля молекул в состояния с очень высокими вращательными квантовыми числами с последующей диссоциацией. Атомы

хлора с начальной кинетической энергией около 1 эВ, образованные в результате такого процесса, ионизовались фемтосекундным лазерным излучением и наблюдались с помощью времяпролётного масс-спектрометра.

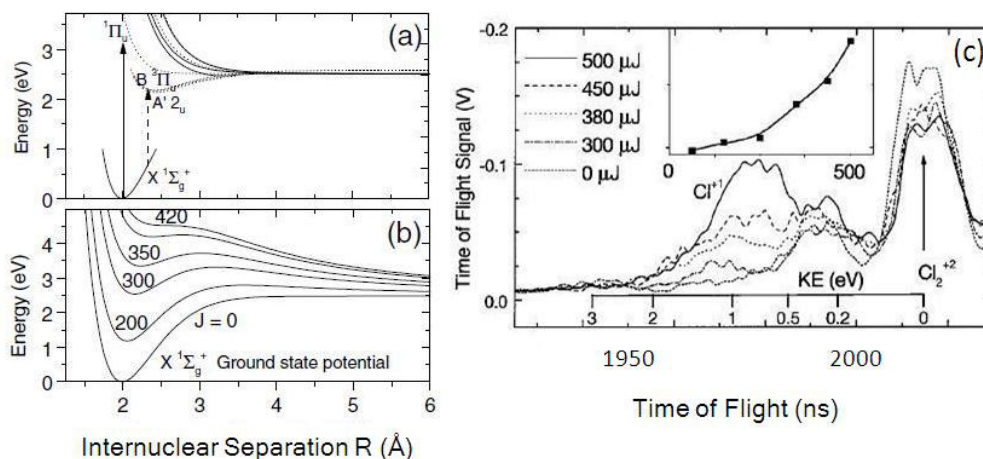


Рис. 3. Диаграмма энергетических состояний для молекулы хлора, включая основной уровень (а). Энергии кванта с длиной волны 800 нм – недостаточно для возбуждения электронного состояния в данной молекуле (пунктирная вертикальная стрелка), если её возбуждать из точки равновесия. Сплошной стрелкой обозначено действие 400-нм излучения, которое может вызвать диссоциацию молекулы. На панели (b) показана трансформация основного состояния по мере роста вращательного квантового числа J . Как видно из приведенных данных, диссоциация молекулы Cl_2 наступает при $J \approx 420$. На панели (c) дан фрагмент времяпролётного масс-спектра вблизи Cl^+ , полученный с использованием оптической молекулярной центрифуги при разных энергиях в импульсе лазерной центрифуги 0.3 – 0.5 мДж. Начальная кинетическая энергия фрагментов (KE) определена из их времени пролёта. Фотоионный сигнал при $\text{KE} \approx 1$ эВ получен вследствие диссоциации молекулы хлора в оптической центрифуге. На вставке представлен сигнал, проинтегрированный вблизи $\text{KE} = 1$ эВ, как функция энергии в лазерном импульсе оптической центрифуги (единица энергии - мкДж).

Во второй части данной главы исследован распад кластеров в пикосекундном лазерном поле высокой интенсивности, которое в отличие от оптической центрифуги не только обеспечивало фрагментацию облучаемого вещества, но и приводило к образованию многократно-заряженных ионов. «Включенная» обратная связь позволила в ходе самого эксперимента изменять временной профиль мощного лазерного импульса, оперативно его

подстраивать так, чтобы усилить действие электромагнитного излучения на кластерный ансамбль и в результате увеличить выход многократно-заряженных фотоионов. В качестве основы использован т.н. генетический алгоритм, который получил своё распространение в современной лазерной физике [9]. Основополагающий принцип заключается в такой организации эксперимента, что реализуется «самостоятельный» поиск решений в многомерном пространстве, при которых в конечном результате достигается максимальный выход каких либо процессов. В данном эксперименте подобная идеология впервые применена для кластерных мишеней.

Для достижения цели временная форма облучающих пучок кластеров ксенона лазерных импульсов изменялась контролируемым образом. Образованные ионы Xe регистрировались с помощью времяпролётного масс-спектрометра, а сигнал, отвечающий ионам высокой кратности, подавался на компьютер, где сравнивался с данными, накопленными при других временных профилях электромагнитного излучения. В результате применения генетического алгоритма достигнута высокая кратность ионизации, а на временной шкале лазерное излучение оказывалось представленным в виде двух импульсов с пикосекундной задержкой между ними. Заметим, что ионы ксенона с кратностью заряда +10 и +11 привлекательны в плане создания источников для литографии в спектральной области в районе 13.5 нм [10].

В четвёртой главе описаны исследования в области генерации и детектирования ультракоротких электромагнитных импульсов (аттосекундная физика), а также фотоэлектронных и фотоионных сгустков.

Высокоинтенсивное, $I \sim 10^{14} - 10^{15}$ Вт/см², остросфокусированное, импульсное лазерное излучение способно обеспечить туннельную ионизацию атомно-молекулярной структуры, при которой отрыв электрона происходит вследствие понижения потенциального барьера в сильном

электромагнитном поле [11, 12]. В результате этого, как показано ранее, ионизированная система, состоявшая из электрона и положительно-заряженного остова, может поглотить значительное количество энергии из электромагнитной волны, существенно превышавшее, например, потенциал ионизации нейтрального атома. Это в свою очередь должно сопровождаться генерацией коротковолнового излучения в экстремальном ультрафиолетовом спектральном диапазоне³, которое для атомной мишени представлено серией нечётных гармоник от облучающего мишень лазерного излучения. Развита ранее трёхступенчатая модель, довольно часто используемая для объяснения подобных процессов в современной физике, включает в себя ионизацию атома, ускорение электрона, а также его возврат к положительно-заряженному остову вследствие действия на атом интенсивной *линейно-поляризованной* электромагнитной волны. Газовая атомарная мишень в таких условиях становится источником аттосекундных импульсов [12], что проявляется в когерентных осцилляциях высших нечётных гармоник. Первый успешный эксперимент в этой области, выполненный ранее с 40-фс ИК лазерными импульсами и фотоэлектронным времяпролётным спектрометром, основан на измерении относительных фаз и амплитуд соседних нечётных гармоник [13]. Для этого использована ионизация вспомогательной аргоновой мишени под совместным действием сформированного на первой газовой мишени ЭУФ излучения и ИК импульсов от задающего фемтосекундного лазера, что приводило к появлению сателлитов в фотоэлектронном спектре. При сравнительно невысокой интенсивности ($I \sim 10^{12}$ Вт/см² и ниже) лазерного излучения в области зондирования ЭУФ аттосекундных импульсов эти особенности фотоэлектронного спектра оказывались проявлением интерференции нескольких каналов с поглощением соседних высших нечётных гармоник и поглощением/испусканием ИК-фотонов. Зарегистрировав фотоэлектронный

³ ЭУФ: стык вакуумной ультрафиолетовой и мягкой рентгеновской области

сигнал, включая сателлиты, при различных временных задержках между лазерными и ЭУФ импульсами, удалось определить относительные фазы высших нечётных гармоник и в результате восстановить временную форму аттосекундных сгустков (рис. 4).

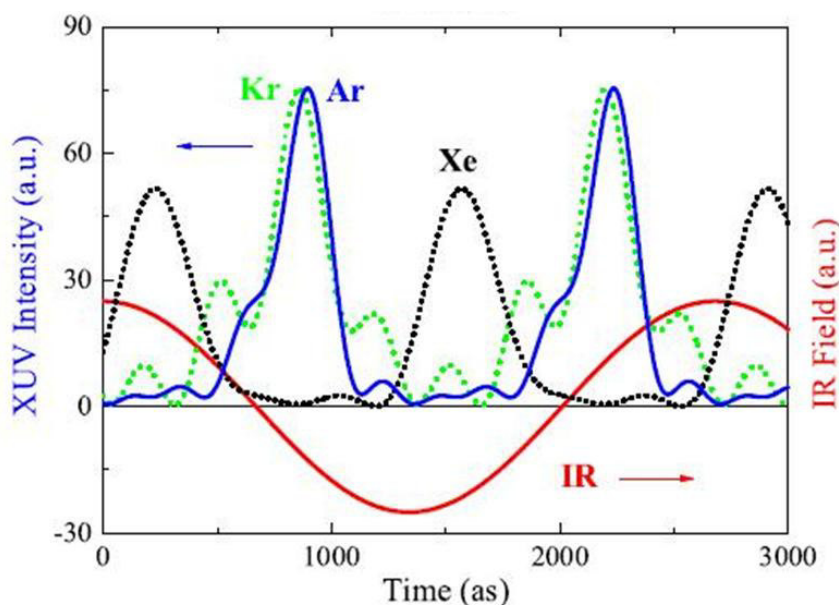


Рис. 4. Временные формы аттосекундных сгустков, реконструированные с учётом полученных экспериментально разностных фаз и амплитуд высоких гармоник. В качестве мишени для генерации высоких гармоник были выбраны три массива атомов: аргоновая (результаты показаны синими треугольниками), криптоновая (полученные данные представлены зелёными квадратами) и ксеноновая (чёрными кружками).

В нашем эксперименте для детектирования ультракороткого ЭУФ излучения впервые использована техника пространственной визуализации скоростного распределения (англ. *velocity map imaging technique*) фотоэлектронов, испущенных под действием ЭУФ – ИК импульсов, что позволило впервые осуществить аттосекундную фотоэлектронную спектроскопию с угловым разрешением. В настоящее время такой подход получил большое распространение в аттосекундной физике [14], что вызвано его высокой информативностью: каналы ионизации атомов с участием различного числа квантов, сопровождаются фотоэлектронным сигналом с разным угловым распределением. В нашем эксперименте впервые определены длительности

ультракоротких импульсов, сформированных с помощью трёх различных газовых мишеней – аргоновой, криптоновой и ксеноновой. Продемонстрировано, что с помощью газовой струи Ar можно получить ~ 250-ас импульсы (рис. 4). Экспериментальные данные позволили также узнать, в какой момент времени относительно максимума высокоинтенсивного ИК лазерного поля аттосекундный импульс был сформирован, что имело вполне определённый смысл в рамках вышеприведенной трёхступенчатой модели, исходя из которой, «соударение» электрона с положительно-заряженным остовом должно осуществляться с задержкой, равной $0.7T_{IR}$ (T_{IR} – период осцилляции ИК поля). В результате получены следующие величины: ~ $0.8T_{IR}$ - для аргоновой/криптоновой мишени и ~ $0.6T_{IR}$ для ксеноновой. Заметная разница между Ar (Kr) и Xe обусловлена тем, что генерация высших гармоник происходила в туннельном режиме для первых двух химических элементов и в многофотонном режиме для последней мишени.

Мощное импульсное лазерное излучение способно эффективно разрывать связи в веществе. Облучая твёрдое тело фемтосекундным лазером, можно формировать пучки коротких импульсов электронов, ионов и мягкого рентгена. С одной стороны это открывает возможность исследования структуры вещества, регистрируя такие пучки соответствующими детекторами, а с другой – прокладывает путь к достижению высокого временного разрешения при наблюдении сверхбыстрых, лазерно-индуцированных процессов [15].

Важным условием достижения подобной цели является переносимость кратковременного воздействия, оказываемого фемтосекундным лазером в процессе генерации фотоэлектронов, фотоионов, либо рентгеновского излучения, на временные характеристики сформированных пучков. Показано, что вблизи твёрдотельного катода длительность фотоэлектронных импульсов может достигать величины в районе 40 фс. (Естественно, что в

процессе распространения электронные сгустки расплываются в силу кулоновского расталкивания). Для этого использована экспериментальная схема, близкая по своей сути к ранее предложенному сверхбыстрому электронному зеркалу, в котором электроны могли бы отражаться от мощной импульсной поверхностной (англ. evanescent) волны, сформированной на границе диэлектрика в результате полного внутреннего отражения в нём интенсивного фемтосекундного лазерного импульса. Возможность реализации подобного зеркала ограничена оптическим пробоем диэлектрика в сильном лазерном поле, требуемом для отражения слишком быстрых электронов. Поэтому в эксперименте использованы сравнительно «медленные», не успевшие разогнаться, фотоэлектроны в непосредственной близости от области их формирования. Интенсивное фемтосекундное лазерное излучение обеспечило изменение скоростного распределения фотоэлектронного пучка, что измерено высокочувствительной схемой.

Довольно часто в эксперименте становится принципиально важным осуществить преобразование пространственного распределения пучка электронов (ионов, или рентгена), например, обеспечить его фокусировку, как это реализовано в стандартном просвечивающем электронном микроскопе за счёт действия электрических и магнитных линз. В диссертации продемонстрирован универсальный подход, позволяющий осуществлять коллимацию пучков в результате их пропускания сквозь очень острый диэлектрический капилляр. Коммерчески-доступное кварцевое полое остриё может иметь 100-нм апертуру на кончике. Напыляя тонкий слой металла на капилляр, размер сквозного отверстия возможно уменьшить. Пропустив фотоэлектронные сгустки сквозь диэлектрический коллиматор, приготовлен импульсный пучок электронов с диаметром, равным размеру выходной апертуры капилляра, и пикосекундной временной длительностью. С помощью фотоэлектронных (фотоионных) пучков, полученных с помощью

мощного фемтосекундного лазера, визуализирована 100-нм апертура в кварцевом капилляре.

Продемонстрирована возможность десорбции молекулярных ионов под действием импульсного рентгеновского излучения, сформированного в результате облучения твёрдотельной мишени фемтосекундными лазерными импульсами с энергией в несколько мДж и пропущенного затем сквозь диэлектрический капилляр. Это прокладывает путь к импульсной нанолокальной десорбции молекулярных ионов с поверхности в целях изучения вещества с высоким пространственным разрешением, определяемым «точечным» воздействием рентгеновского излучения после коллиматора, в комбинации с высоким элементным разрешением, реализуемым с помощью времяпролётной масс-спектрометрии. Для контролируемого перемещения точечного рентгеновского источника пригодны подходы, развитые в сканирующей микроскопии [16].

Детектируя ионные сгустки, созданные в результате облучения молекул остаточного газа в вакуумной камере интенсивным ($I \sim 10^{14}$ Вт/см²) остророфокусированным фемтосекундным лазерным излучением, удалось «взглянуть внутрь фокального пятна» и определить его размер. Для этого использовалась металлическая игла с миллиметровым закруглением, вблизи которой происходила фотоионизация остаточного газа. Между иглой и (плоской) позиционно-чувствительной регистрирующей схемой создано расходящееся электрическое поле, которое проецировало фотоионную область на детектор с пространственным увеличением около 100. Уменьшая размер острия, можно добиться субмикронного разрешения, что представляет определённый интерес для микроскопии фотоионизационных процессов в газовой среде [17].

В пятой главе приведены результаты в области фотоэлектронной микроскопии, полученные с помощью фемтосекундной лазерной техники. Разработана концепция вакуумной лазерной микроскопии с использованием

пустотелого острия. В этой новой области исследований проведена серия экспериментальных работ для четырёх возможных схем (рис. 5). В первой из них (рис. 5 – а), пучок фотоэлектронов (фотоионов) пропущен сквозь остриё и зарегистрирован позиционно-чувствительным детектором. Можно поместить образец в непосредственной близости от кончика иглы и наблюдать его тенеграмму в расходящемся ионном, либо электронном пучке.

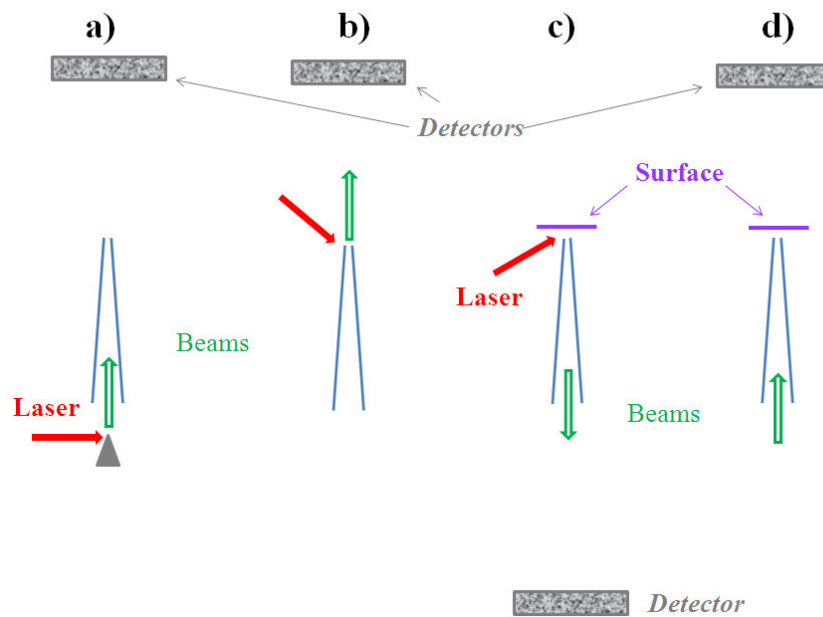


Рис. 5. Лазерная вакуумная микроскопия с полым остриём. Проекционная геометрия: а) фотоэлектронный/ионный пучок пропущен сквозь острый капилляр и формирует изображение апертуры на кончике капилляра; б) фотоэлектронный/ионный пучок сформирован при облучении лазером кончика острия с образцом. Сканирующая геометрия: в) фотоэлектроны (фотоионы), полученные при облучении образца лазерным излучением, пропущены сквозь пустотелое остриё, контролируемым образом перемещаемое в вакууме (при этом имеется возможность использования острия в «классическом» режиме сканирующего зондового микроскопа); г) мягкое рентгеновское излучение колимировано острым капилляром и вызывает десорбцию образца на поверхности тонкоплёночного фильтра (вместо коротковолнового электромагнитного излучения может быть использован фотоионный пучок для формирования микромодификации поверхности).

Во второй схеме (рис. 5 - б) использована геометрия автоэмиссионного проекционного микроскопа [18], в котором образец помещается на кончик

проводящего острия и облучается лазером, а электроны за счёт радиального движения в расходящемся электрическом поле между иглой и детектором формируют увеличенное в $10^5 - 10^6$ раз изображение поверхности образца. В отличие от автоэмиссионного микроскопа, фотоэффект за счёт применения лазерного излучения позволяет избежать сверхсильных электрических полей на поверхности иглы, которые способны вызвать деформацию структуры вещества.

Фотоэмиссионное изображение апертуры для полый иглы использовано в качестве удобного реперного сигнала, передающего пространственный масштаб. Используя вторую гармонику от фемтосекундного Ti:Sa лазерного генератора получено фотоэлектронное изображение металлизированного кварцевого 100-нм острия после нанесения на него органической структуры на основе красителя кумарин-153, эффективно поглощавшего 400-нм электромагнитное излучение. Таким образом, используя метод лазерной фотоэлектронной проекционной микроскопии, впервые визуализирован органический комплекс. Для улучшения качества изображения увеличена энергия лазерных импульсов. Отмечено, что при увеличении мощности лазерного излучения органическая структура переместилась по поверхности острия. При этом также наблюдалось уменьшение фотоэмиссионного тока, что вероятно обусловлено термической десорбцией вещества в импульсных лазерных полях с мегагерцовой частотой повторения.

Используя фемтосекундное лазерное излучение с частотой следования импульсов 1 кГц, получены фотоэлектронные изображения кончика 100-нм кварцевого капилляра, покрытого тонким слоем проводящего полиниалина (ПАН). Это открыло возможность фотоэмиссионной визуализации редокс-гетерогенных структур органического полимера, отвечающих контактирующим друг с другом участкам с различной степенью окисления. В эксперименте образец облучался основной и второй гармониками от Ti:Sa лазера, что позволило визуализировать пространственное распределение

полуокисленной формы ПАНа, эффективно поглощавшей излучение обоих гармоник, отдельно от изображения структур неокисленной формы полимера с максимумом поглощения в районе 350 нм. Сравнивая экспериментальные данные, полученные при использовании обеих гармоник фемтосекундного лазера, впервые установлена редокс-гетерогенность полианилина в нанометровом масштабе.

Используя третью схему (рис. 5 – с), продемонстрировано, что новый метод, основанный на пропускании фотоэлектронов сквозь тонкий диэлектрический капилляр, позволяет получить изображение поверхности твёрдого тела. Для этого острый кварцевый капилляр сканировался вблизи поверхности гадолиния, облучаемой фемтосекундным лазерным излучением, и регистрировались фотоэлектроны, образованные вследствие фотоэффекта и затем пролетевшие сквозь полое острие. Результаты сканирования в «shear force» моде, без лазерного облучения, когда острый капилляр использован в качестве «обычного» зонда вакуумного микроскопа оказались качественно идентичными.

Четвёртая схема (рис. 5 – d) предполагает исследование вещества с помощью очень тонких пучков ионов, либо мягкого рентгеновского излучения, приготовленных путём их коллимации в тонком капилляре. Техника сканирующей микроскопии позволяет осуществлять контролируемое перемещение подобных точечных источников вдоль поверхности как в целях её модификации, так и для её исследования.

Фотоэффект в фемтосекундном лазерном поле позволяет формировать пикосекундные и субпикосекундные фотоэлектронные импульсы, длительность которых определяется процессами расплывания электронных сгустков, в том числе кулоновским расталкиванием при их распространении от фотокатода до зондируемого образца. Их использование в колонне просвечивающего электронного микроскопа или электронографа открывает возможность визуализации быстропротекающих изменений в структуре

вещества, облучаемого ультракороткими лазерными импульсами [19 – 21]. На базе коммерчески-доступного прибора Hitachi H-300 создан сверхбыстрый просвечивающий электронный микроскоп (рис. 6) и продемонстрирована возможность проведения электронной микроскопии, а также наблюдения электронной дифракции с использованием ультракоротких фотоэлектронных импульсов.

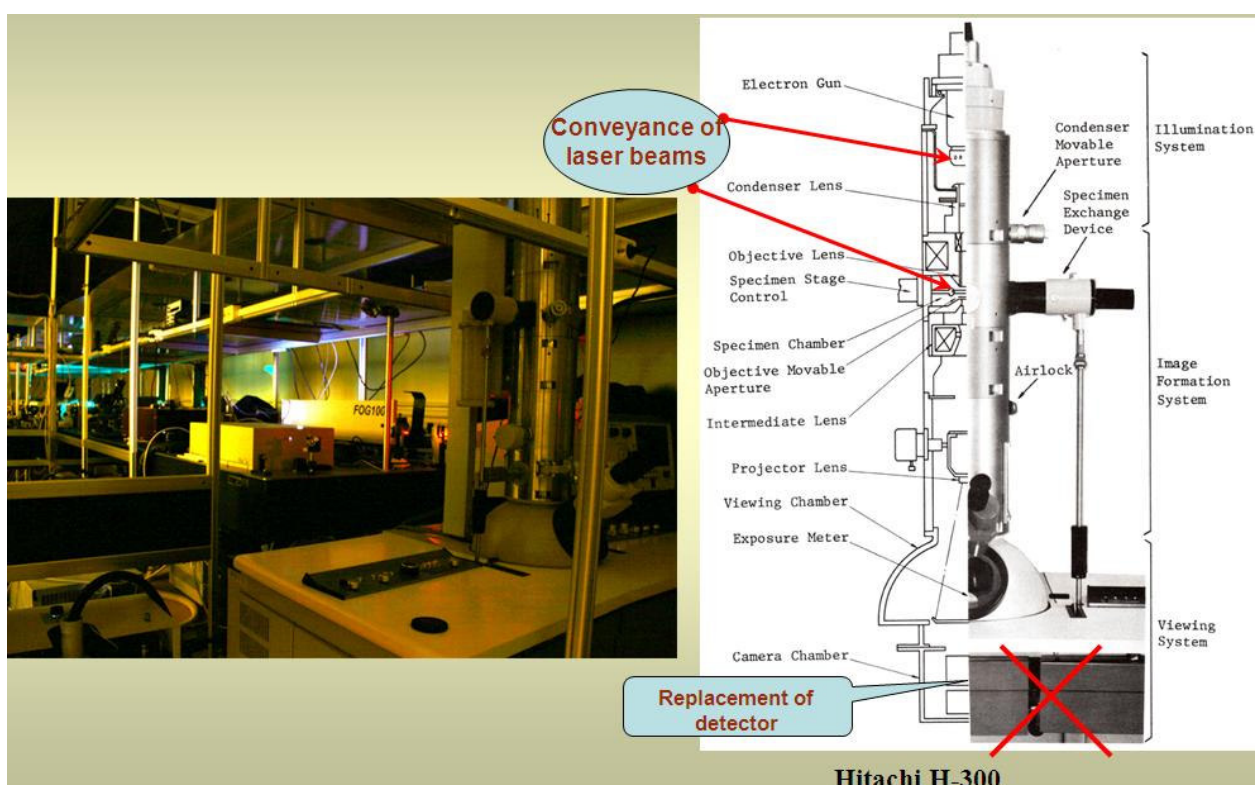


Рис. 6. Просвечивающий электронный микроскоп нового поколения, предназначенный для исследования быстропротекающих процессов в конденсированных средах с высоким пространственно-временным разрешением и расположенный в ИСАНе, в отделе лазерной спектроскопии. Установка работает с короткими фотоэлектронными сгустками, формирование которых происходит в результате фотоэффекта под действием УФ излучения фемтосекундной длительности. Для подвода лазерного пучка к катоду и отдельно к образцу в базовую модель микроскопа внесены существенные конструктивные изменения. Для прецизионной подстройки лазерных лучей использованы системы Picomotors. Вместо штатного детектора использована высокочувствительная регистрирующая схема, состоящая из люминофорного экрана, фокона, электронно-оптического преобразователя (усилителя яркости) и CCD-камеры Hamamatsu.

Заключение

1. Впервые наблюдалась магнитная ионизация быстрых ридберговских атомов, предварительно приготовленных лазерным излучением. На примере быстрых ридберговских атомов гелия проведено сравнение ионизации атомарного пучка в постоянном магнитном и электрическом поле.
2. Магнитная ионизация может быть использована в коллинеарной лазерной резонансной ионизационной спектроскопии.
3. Впервые методом коллинеарной лазерной фотоионизации исследованы двойные ридберговские состояния отрицательных ионов гелия.
4. Коллинеарная лазерная фотоионизационная спектроскопия является высокочувствительным инструментом для анализа изотопного состава вещества и исследования электрон-электронной корреляции в атомных системах.
5. Продемонстрировано, что профилирование во времени мощных пикосекундных лазерных импульсов приводит к новым интересным возможностям в молекулярной и кластерной физике.
6. Впервые реализована импульсная оптическая центрифуга для молекул, позволившая «раскручивать» молекулярный ансамбль до состояний с высокими вращательными квантовыми числами. Продемонстрировано, что это может привести к диссоциации молекул.
7. Впервые в аттосекундной физике экспериментально реализована фотоэлектронная спектроскопия с угловым разрешением: это обеспечивает дополнительные возможности в данной области исследований (и, как следует из недавних сообщений, является базовой конфигурацией большинства современных экспериментов).
8. Впервые, на едином экспериментальном комплексе исследована генерация аттосекундных электромагнитных импульсов на трёх различных мишенях (аргон, ксенон и неон).

9. При облучении плоского тонкоплёночного металлического катода фемтосекундным лазерным излучением приготовлен импульсный фотоэлектронный пучок с начальной длительностью около 40 фс. Впервые измерена сила Гапонова-Миллера, с которой остросфокусированное мощное лазерное излучение в ближнем ИК диапазоне действует на свободные электроны в вакууме.

10. Продемонстрировано, что пространственный профиль мощного остросфокусированного лазерного излучения может быть зарегистрирован с помощью проекционной «лупы», основанной на действии расходящегося вблизи проводящего острия электрического поля. В этой геометрии, ионы, образованные при ионизации молекул в вакууме, либо электроны, эмитированные катодом, способны сформировать увеличенное изображение фокального пятна на детекторе.

11. Установлено, что использование настольного фемтосекундного лазера позволяет наблюдать десорбцию молекулярных ионов мягким рентгеновским излучением, сформированным при облучении твёрдотельной мишени мощным остросфокусированным лазерным импульсом. Это открывает возможность для исследования поверхности с высоким пространственно-элементным разрешением.

12. Развита новая методика – лазерная вакуумная микроскопия с пустотелым остриём. Экспериментально установлено, что лазерная фотоэлектронная проекционная микроскопия с использованием полого диэлектрического острия может быть использована для исследования органических микроструктур.

13. Впервые запущен динамический просвечивающий электронный микроскоп на базе Hitachi H-300, в котором применены зондирующие образец фотоэлектронные сгустки ультракороткой длительности.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Aseyev S.A., Kudryavtsev Y.A., Letokhov V.S., Petrunin V.V. Laser detection of the rare isotope He-3 at concentrations as low as 10^{-9} // Opt. Lett. 1991. V. 16. P.514-516.
2. Aseyev S.A., Kudryavtsev Y.A., Letokhov V.S., Petrunin V.V. A method of detecting the rare isotopes Kr-85 and Kr-81 by means of collinear laser photoionization of atoms in an accelerated beam // J. Phys. B. 1991. V. 24. P. 2755-2763.
3. Aseyev S.A., Kudryavtsev Y.A., Petrunin V.V. Formation of Rydberg states in collisions of fast Hydrogen atoms with H₂, N₂ and He // J. Phys. B. 1991. V. 24. P. L647-L651.
4. Aseyev S.A., Kudryavtsev Yu.A., Petrunin V.V. Ionization of fast Rydberg atoms in longitudinal and transverse electric fields // Appl. Phys. B. 1993. V. 56. P.391-398.
5. Aseyev S.A., Kudryavtsev Yu.A., Petrunin V.V. Remote measurement of vapor density spatial distribution by laser photoionization of accelerated atoms // Opt. Comm. 1993. V. 97. P. 360-362.
6. Асеев С.А., Кудрявцев Ю.А., Летохов В.С., Петрунин В.В. Лазерная коллинеарная ионизация ускоренных атомов в пучке как метод детектирования редких изотопов криптона // Оптика и спектроскопия 1994. Т. 76. С. 227-236.
7. Асеев С.А., Кудрявцев Ю.А., Ларюшин Д.В., Летохов В.С., Петрунин В.В. Ионизация быстрых ридберговских атомов в магнитном поле // Письма ЖЭТФ. 1995. Т. 61. С. 373-375.
8. Aseyev S.A., Petrunin V.V., Letokhov V.S. Ionization of fast Rydberg atoms in a magnetic field // Comm. At. Mol. Phys. 1996. V. 33. P. 41-49.
9. Aseev S.A., Kunets A.V., Letokhov V.S. Development of a laser method for the detection of a rare aluminum isotope // Las. Phys. 1997. V. 7. P. 356-357.
10. Andersen H.H., Balling P., Kristensen P., Pedersen U.V., Aseyev SA, Petrunin V.V., Andersen T. Positions and isotope shifts of the H-(P-1(0)) dipole resonances below the H(n=2) threshold // Phys. Rev. Lett. 1997. V. 79. P. 4770-4773.
11. Corkum P.B., Ellert C., Mehendale M., Dietrich P., Hankin S., Aseyev S.A., Rayner D., Villeneuve D.M. Molecular science with strong laser fields // Faraday Discussions. 1999. V. 113. P. 47-59.
12. Villeneuve D.M., Aseyev S.A., Dietrich P., Spanner M., Ivanov M.Y., Corkum P.B. Forced molecular rotation in an optical centrifuge // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 85. P. 542-545.
13. Bhardwaj V.R, Aseyev S.A., Mehendale M., Yudin G.L., Villeneuve D.M., Rayner D.M., Ivanov M.Y., Corkum P.B. Few cycle dynamics of multiphoton double ionization // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 86. P. 3522-3525.
14. Verver R.J., Matussek D.R., Wright J.S., Gibson G.N., Bhardwaj R., Aseyev S.A., Villeneuve D.M., Corkum P.B., Ivanov M.Y. Production and study of triply charged diatomic ions with femtosecond pulses: Application to Cl₂³⁺ // J. Phys. Chem. A. 2001. V. 105. P. 2435-2443.

15. Villeneuve D.M., Aseyev S.A., Avery A., Corkum P.B. Using frequency-domain manipulation of stretched femtosecond laser pulses to create fast rise and fall times on picosecond pulses // *Appl. Phys. B*. 2002. V. 74. Suppl. P. S157-S161.
16. Springate E., Aseyev S.A., Zamith S., Vrakking M.J. Electron kinetic energy measurements from laser irradiation of clusters // *Phys. Rev. A*. 2003. V. 68. P.053201.
17. Aseyev S.A., Ni Y., Frasinski L.J., Muller H.G., Vrakking M.J.J. Attosecond angle-resolved photoelectron spectroscopy // *Phys. Rev. Lett.* 2003. V. 91. P. 223902.
18. Petrunin V.V., Jacobsen M.H., Madsen L.B., Aseyev S.A., Andersen T. Photodetachment of He- in the vicinity of the two-electron escape threshold // *Phys. Rev. Lett.* 2003. V. 90. P. 013002.
19. Zamith S., Martchenko T., Ni Y., Aseyev S.A., Muller H.G. and Vrakking M.J. Control of the production of highly charged ions in femtosecond-laser cluster fragmentation // *Phys. Rev. A*. 2004. V. 70. P. (R)011201.
20. Асеев С.А., Миронов Б.Н., Чекалин С.В., Летохов В.С. Фотоэлектронная фемтосекундная лазерная проекционная микроскопия органических наноконплексов // *Письма ЖЭТФ*. 2004. Т. 80. С. 645-649.
21. Миронов Б.Н., Асеев С.А., Чекалин С.В., Летохов В.С. Лазерная фемтосекундная фотоэмиссионная микроскопия капиллярных наноострий со сверхвысоким пространственным разрешением // *ЖЭТФ*. 2005. Т. 128. С. 732-739.
22. Миронов Б.Н., Асеев С.А., Чекалин С.В., Летохов В.С. Генерация нано локализованного, узконаправленного пучка фотоэлектронов с помощью фемтосекундных лазерных импульсов // *Письма ЖЭТФ*. 2006. Т. 83. С. 435-438.
23. Aseyev S.A., Mironov B.N., Chekalin S.V., Letokhov V.S. Femtosecond laser source of nanolocalized directed photoelectrons // *Appl. Phys. Lett.* 2006. V. 89. P. 112513.
24. Миронов Б.Н., Асеев С.А., Миногин В.Г., Чекалин С.В. Получение и диагностика пучка фотоэлектронов длительностью менее 100 фс, созданного облучением мишени фемтосекундными лазерными импульсами // *ЖЭТФ*. 2008. Т. 133. С. 1155-1161.
25. Асеев С.А., Миронов Б.Н., Чекалин С.В., Летохов В.С. Формирование нано локализованных фотоионных пакетов вольфрама с помощью фемтосекундных лазерных импульсов // *Письма ЖЭТФ*. 2008. Т. 87. С. 422-425.
26. Миронов Б.Н., Асеев С.А., Чекалин С.В., Макин В.С., Летохов В.С. Формирование протяжённых периодических микроструктур при «точечном» облучении золотой плёнки фемтосекундными лазерными импульсами // *Письма ЖЭТФ*. 2008. Т. 88. С. 299-302.
27. Асеев С.А., Миронов Б.Н., Миногин В.Г., Чекалин С.В., Летохов В.С. Визуализация пространственно-временной структуры импульсного фотоэлектронного пучка, образованного фемтосекундным лазерным излучением // *Письма ЖЭТФ*. 2009. Т. 90. С. 15-20.

28. Асеев С.А., Миронов Б.Н., Миногин В.Г., Чекалин С.В. Развитие методов наблюдения процессов, индуцированных фемтосекундными лазерными импульсами, с высоким пространственно-временным разрешением // Известия РАН. Сер. Физ. 2010. Т. 74. С. 974-976.
29. Асеев С.А., Миногин В.Г., Миронов Б.Н., Чекалин С.В. Управление пространственно-временной структурой электронных пучков фемтосекундным лазерным излучением высокой интенсивности // ЖЭТФ. 2010. Т. 138. С.803-811.
30. Миронов Б.Н., Асеев С.А., Чекалин С.В., Иванов В.Ф., Грибкова О.Л. Лазерная фотоэлектронная проекционная микроскопия органического проводящего полимера // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 92. С. 860-864.
31. Асеев С.А., Миронов Б.Н., Миногин В.Г., Чекалин С.В. Измерение силы Гапонова – Миллера, создаваемой в вакууме остророфокусированным интенсивным фемтосекундным лазерным излучением // ЖЭТФ. 2011. Т. 139. С. 894-898.
32. Aseyev S.A., Minogin V.G., Mironov B.N. Projection microscopy of photoionization processes in gases // Appl. Phys. B. 2012. V. 108. P. 755-759.
33. Миронов Б.Н., Асеев С.А., Чекалин С.В., Иванов В.Ф., Грибкова О.Л. Десорбция органического проводящего полимера мягким рентгеновским излучением, созданным с помощью фемтосекундного лазера // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 96. С. 670-673.
34. Асеев С.А., Миронов Б.Н., Миногин В.Г., Черкун А.П., Чекалин С.В. Микроскопия фотоионизационных процессов // Квантовая электроника. 2013. Т. 43. С. 308-312.
35. Sergei A. Aseyev, Peter M. Weber, Anatoli A. Ischenko - Ultrafast Electron Microscopy for Chemistry, Biology and Material Science // J. Analytical Sciences, Methods and Instrumentation. 2013. V. 3. P. 30-53.
36. Aseyev S.A., Mironov B.N., Chekalin S.V. Ultrafast desorption of molecular ions by XUV-photons, passing through dielectric hollow tip // J. Chem. Phys. 2013. V. 139. P. 144202.
37. Асеев С.А., Миронов Б.Н., Чекалин С.В., Миногин В.Г. Формирование ультракоротких электронных импульсов в электростатическом лазерном рефлектроне-дефлекторе // Квантовая электроника. 2014. Т. 44. С. 259-262.
38. Ischenko A.A., Aseyev S.A. Time Resolved Electron Diffraction: For Chemistry, Biology and Material Science. Elsevier, New York. 2014. 310 p.
39. Ищенко А.А., Асеев С.А., Баграташвили В.Н., Панченко В.Я., Рябов Е.А. Сверхбыстрая электронная дифракция и электронная микроскопия: современное состояние и перспективы // УФН. 2014. Т. 184. P. 681–722.
40. Черкун А.П., Миронов Б.Н., Асеев С.А., Чекалин С.В. Фотоэлектронная сканирующая микроскопия с полым острием // Письма ЖЭТФ. 2014. Т. 99. С. 683–686.

Публикации в сборниках трудов научных конференций:

1. Aseyev S.A., Kudryavtsev Yu.A., Letokhov V.S., Petrunin V.V. Detection of very rare isotopes by collinear resonance ionization of accelerated atoms // Inst. Of Phys. Conf. Ser. 1991. V. 114. P. 7-12.
2. Aseyev S.A., Kudryavtsev Y.A., Letokhov V.S., Petrunin V.V. Detailed study of collisional background in collinear laser photoionization of fast atoms // AIP conf. Proc. 1995. V. 329. P. 339-341.
3. Aseyev S.A., Kudryavtsev Y.A., Laryushin D.V., Letokhov V.S., Petrunin V.V. New field ionizer for fast Rydberg atoms // AIP conf. Proc. 1995. V. 329. P. 157-159.
4. Aseyev S.A., Villeneuve D.M., Dietrich P., Spanner M., Ivanov M.Yu., Corkum P.B. Strong field molecular optics. Multiphoton Processes: ICOMP VIII. October 3-8. 1999. // AIP Conf. Proc. 1999. V. 525. P. 399-406.
5. Villeneuve D.M., Aseyev S.A., Ivanov M.Y., Dietrich P., Corkum P.B. Molecular optics: using lasers to push molecules. McLean. VA. 2000 // Proc. Int. Conf. on Lasers '99. 2000. P. 260-264.
6. Villeneuve D.M., Aseyev S.A., Dietrich P., Spanner M., Ivanov M.Y., Corkum P.B. Centrifugal dissociation of a molecule using the optical centrifuge // Ultrafast Phenomena. 2001. V. XII. P. 326-330.
7. Zamith S., Ni Y., Aseyev S.A., Springate E., Vrakking M.J.J. Control of the production of highly charged ion in femtosecond laser cluster fragmentation // Femtochemistry and Femtobiology: Ultrafast events in molecular science. 2004. V. VI. P. 119-122.
8. Aseyev S.A., Ni Y., Frasinski L.J., Muller H.G. and Vrakking M.J.J. Characterization of attosecond laser pulses using angle-resolved photoelectron spectroscopy // Ultrafast optics IV: selected contributions to the 4th International Conference on Ultrafast Optics. 2004. P. 293-300.
9. Асеев С.А., Миронов Б.Н., Чекалин С.В., Летохов В.С. Фотоэлектронная лазерная проекционная микроскопия органических наноструктур // XXIII съезд по спектроскопии. Звенигород, Московск. обл.. Тезисы докладов. 2005. С. 63.
10. Aseyev S.A., Mironov B.N., Chekalin S.V., Letokhov V.S. Production of nanolocalized directed photoelectron bunches with the aid of femtosecond laser // Intern. Conf. On High Power Laser Beams. HPLB-2006. 2006. P. 12-13.
11. Aseyev S.A., Mironov B.N., Chekalin S.V. Deflection of sub-100-fs electrons by femtosecond light // Proc. SPIE. 2007. V. 6735. P. 673511.
12. Асеев С.А., Миронов Б.Н., Чекалин С.В., Летохов В.С. Фемтосекундный источник пучка направленных электронов на основе капиллярного наноострия // XI Международный Симпозиум 2007 «Нанофизика и наноэлектроника». 2008. Т. 2. С. 458-459.
13. Миронов Б.Н., Асеев С.А., Чекалин С.В. Создание компактного наноисточника мягкого рентгена на основе использования фемтосекундного лазерного

- излучения // VII Международная научная конференция «Лазерная физика и оптические технологии». 2008. Т. II. С. 125-128.
14. Миронов Б.Н., Асеев С.А., Чекалин С.В. Создание компактного наноисточника ультракоротких импульсов мягкого рентгеновского излучения // Четвёртый международный научный семинар «Современные методы анализа дифракционных данных (топография, дифрактометрия, электронная микроскопия)». 2008. С. 140-141.
 15. Миронов Б.Н., Асеев С.А., Чекалин С.В. Микроскопия проводящего полимера полианилин с нанометровым пространственным разрешением // XIII Международный Симпозиум 2009 «Нанофизика и нанoeлектроника». 2009. Т. 1. С. 141-142.
 16. Миронов Б.Н., Асеев С.А., Макин В.С., Чекалин С.В., Летохов В.С. Создание протяжённых квазипериодических микроструктур в результате «точечного» облучения металлической плёнки лазерным излучением фемтосекундной длительности // XIII Международный Симпозиум 2009 «Нанофизика и нанoeлектроника». 2009. Т. 1. С. 248-249.
 17. Aseyev S.A., Mironov B.N., Minogin V.G., Chekalin S.V., and Letokhov V.S. Development of the methods of observation of femtosecond laser-induced processes with high spatio-temporal resolution // Russian-French-German Laser Symposium RFGLS 2009. 2009. P. 121-122.
 18. Миронов Б.Н., Асеев С.А., Миногин В.Г., Черкун А.П., Чекалин С.В. Формирование протяжённых микроструктур при «точечном» облучении тонких металлических плёнок фемтосекундным лазерным излучением // The third international conference Deformation & Fracture of Materials and Nanomaterials. DFMN 2009. 2009. V. 1. P. 491-492.
 19. Aseyev S.A., Mironov B.N., Minogin V.G., Chekalin S.V. Ultrafast microlocalized photoelectron bunches: formation and applications // Proc. SPIE. 2010. V. 7993. P. 79931F.
 20. Mironov B.N., Aseyev S.A., Chekalin S.V. Cloning of microstructures due to irradiation of thin gold foil by femtosecond laser radiation // Proc. SPIE. 2010. V. 7994. P. 79940R.
 21. Черкун А.П., Миронов Б.Н., Асеев С.А., Чекалин С.В. Вакуумный сканирующий микроскоп на основе микрокапилляра // 4-я Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». DFMN-2011. 2011. С. 856-858.
 22. Черкун А.П., Миронов Б.Н., Асеев С.А., Чекалин С.В. Вакуумный зондовый сканирующий микроскоп на основе полого микроострия // XVI Международный симпозиум «Нанофизика и нанoeлектроника». 2012. Т. 2. С. 465-466.
 23. Cherkun A.P., Mironov B.N., Aseyev S.A., Chekalin S.V. Vacuum scanning microscopy and nanopatterning based on a hollow tip // 20th Int. Symp. «Nanostructures: Physics and Technology». St. Petersburg. 2012. P. 104-105.

Список цитированной литературы

1. Летохов В.С. Лазерная фотоионизационная спектроскопия. М.: Наука. 1987. 319 с.
2. Letokhov V.S. Laser Control of Atoms and Molecules. Oxford Univ. Press. UK. 2007. 320p.
3. Trautmann N., Passler G., Wendt K.D.A. Ultratrace analysis and isotope ratio measurements of long-lived radioisotopes by resonance ionization mass spectrometry (RIMS) // Analytical and Bioanalytical Chemistry. 2004. V. 378. P. 348-355.
4. Ридберговские состояния атомов и молекул. Ред. Стеббингса Р. и Даннинга Ф. М.: Мир. 1985. 354 с.
5. Andersen T. Atomic negative ions: structure, dynamics and collisions // Physics Reports. 2004. V. 394. P. 157–313.
6. Buckman S.J., Clark C.W. Atomic negative-ion resonances // Rev. Mod. Phys. 1994. V. 66. P. 539–655.
7. Stapelfeldt H., Seideman T. Colloquium: Aligning molecules with strong laser pulses // Rev. Mod. Phys. 2003. V. 75. P. 543-557.
8. Korobenko A., Milner A. A., Milner V. Complete control, direct observation and study of molecular super rotors // Phys. Rev. Lett. 2014. V. 112. P. 113004.
9. Rabitz H. Perspective. Shaped Laser Pulses as Reagents // Science. 2003. V. 299. P. 525-527.
10. EUV Lithography. Ed. by Vivek Bakshi. SPIE Press. 2008. 702 p.
11. Brabec T., Krausz F. Intense few-cycle laser fields: Frontiers of nonlinear optics // Rev. Mod. Phys. 2000. V. 72. P. 545–591.
12. Krausz F., Ivanov M. Attosecond Physics // Rev. Mod. Phys. 2009. V. 81. P. 163-234.
13. Paul P.M., Toma E.S., Breger P., Mullot G., Audebert F., Balcou P., Muller H.G., Agostini P. Observation of a train of attosecond pulses from high harmonic generation // Science. 2001. V. 292. P. 1689-92.
14. Vrakking M. J. J. Attosecond imaging // Phys. Chem. Chem. Phys. 2014. V. 16. P. 2775–2789.
15. Miller R.J.D. Femtosecond Crystallography using Ultrabright Electron and X-ray Sources: Capturing Chemistry in Action // Science. 2014. V. 343. P. 1108-1116.
16. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Институт физики микроструктур РАН. Н. Новгород. 2004. 114 с.
17. Schultze M., Bergues B., Schröder H., Krausz F., Kompa K.L. Spatially resolved measurement of ionization yields in the focus of an intense laser pulse // New J. Phys. 2011. V. 13. P. 033001.
18. Мюллер Э.В., Цонг Т.Т. Полевая ионная микроскопия. Полевая ионизация и полевое испарение. Наука, Москва. 1980. 220 с.

19. Zewail A.H., Thomas J.M. 4D electron microscopy: imaging in space and time. Imperial College Press, London. 2010. 346 p.
 20. Baskin J.S., Zewail A.H. Seeing in 4D with electrons: Development of ultrafast electron microscopy at Caltech // C. R. Physique. 2014. V. 15. P. 176–189.
 21. Ischenko A.A., Aseyev S.A. Time Resolved Electron Diffraction: For Chemistry, Biology and Material Science. Elsevier, New York. 2014. 310 p.
-