

На правах рукописи

Вильшанская Евгения Владимировна

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ  
КАЛЬЦИЯ-40**

Специальность 1.3.9 –

«Физика плазмы»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединённом институте высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).

Научный руководитель: д.ф.-м.н., зав. лаб. № 1.4 Лазерного охлаждения и ультрахолодной плазмы ФГБУН ОИВТ РАН, г. Москва,  
**Зеленер Борис Борисович**

Официальные оппоненты: д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник Отдела физики плазмы Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва

**Скворцова Нина Николаевна**

к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Отдела спектроскопии Физического института имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, г. Москва

**Вишнякова Гульнара Александровна**

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение "Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", г. Москва

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г. в \_\_ ч. \_\_ мин. на заседании диссертационного совета Д 24.1.193.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединённого института высоких температур, по адресу 125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединённого института высоких температур: [jiht.ru/science/dissert-council/](http://jiht.ru/science/dissert-council/). Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просьба направлять по адресу: 125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
Д 24.1.193.01, д.ф.-м.н.



М.М. Васильев

© ФГБУН Объединённый институт высоких температур РАН, 2021

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В связи с развитием лазерной техники и исследований охлажденных газов в магнитооптической ловушке (МОЛ) [1], появилось новое направление в изучении сильно неидеальной плазмы [2, 3]. В настоящей работе показана возможность получения ультрахолодной плазмы в стационарном режиме с концентрацией до  $10^6 \text{ см}^{-3}$  с помощью подпороговой ионизации охлажденных в МОЛ атомов кальция-40. Исследования свойств ультрахолодной неидеальной плазмы малой плотности дают представление о свойствах более плотной плазмы [4, 5], изучаемой в задачах, связанных с физикой высоких плотностей и энергий, в том числе имеющей отношение к проблеме термоядерного синтеза. Кинетические и переносные свойства плазмы могут быть выражены через параметр неидеальности, обозначающий отношение средней потенциальной энергии взаимодействия частиц к их средней кинетической энергии. Неидеальная плазма различной природы с одинаковым параметром неидеальности является подобной и имеет одинаковые кинетические и переносные свойства, а значит такие свойства плазмы, как диффузия, проводимость, теплопроводность, вязкость, сечения столкновений, рекомбинация, временная эволюция и другие неидеальной низкотемпературной плазмы могут быть использованы для изучения высокотемпературной плазмы с аналогичным значением параметра неидеальности.

Изучение ультрахолодной плазмы также имеет практическую ценность для усовершенствования ионных [6] и электронных микроскопов [7]. Авторы [8] представили модификацию ионного микроскопа, которая позволила достичь фокусировки ионного пучка до пятна размером  $(5,8 \pm 1,0)$  нм. Однако при формировании ионного пучка имеет место эффект саморазогрева плазмы (Disorder-Induced Heating – DIH), который мешает уменьшить расходимость пучка и увеличить разрешающую способность микроскопа. В работе [9] рассматривается возможность возбуждения холодных нейтральных атомов в плазму через ридберговские состояния. За счет эффекта дипольной блокады ридберговские атомы создают упорядоченную структуру, после чего атомы в ридберговских состояниях возбуждаются в изначально упорядоченную плазму, и эффект DIH может быть подавлен. Хотя ионный микроскоп на базе тяжелых ионов оказывает разрушающее действие на исследуемый образец, такой ионный пучок хорошо подходит для высокоточного «выжигания» наноструктур и добавления примесей в полупроводники.

**Целью** данной работы является экспериментальное исследование свойств ультрахолодной неидеальной плазмы кальция-40 в стационарном режиме, полученной надпороговой ионизацией охлажденных в магнитооптической ловушке атомов.

Для достижения данной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

- Собрать вакуумную и оптическую части установки по лазерному охлаждению атомов кальция-40.
- Исследовать параметры созданной магнитооптической ловушки.
- Реализовать возбуждение захваченных в магнитооптическую ловушку атомов кальция-40 в ридберговские состояния с главным квантовым числом от 40 до 120
- Реализовать схему получения и регистрации ультрахолодной неидеальной плазмы кальция в стационарном режиме; провести исследование основных параметров плазмы.

**Основные научные положения, выносимые на защиту:**

1. Реализовано лазерное охлаждение и захват в магнитооптическую ловушку порядка  $3 \cdot 10^7$  атомов кальция-40.
2. Порог ионизации атомов кальция-40 составляет  $49305,91966(4) \text{ см}^{-1}$ , что является наиболее точным значением по сравнению с известными данными.
3. Получена стационарная ультрахолодная плазма с концентрацией до  $10^6 \text{ см}^{-3}$  с помощью надпороговой ионизации охлажденных в магнитооптической ловушке атомов кальция-40.
4. Разработан чувствительный метод диагностики разреженной ультрахолодной плазмы на основе эффекта автоионизации ридберговских состояний атомов кальция-40, позволяющий детектировать плазму с концентрацией ионов до  $10^3 \text{ см}^{-3}$ .

**Научная новизна:**

Впервые создана уникальная установка по лазерному охлаждению атомов кальция-40 с непрерывным режимом работы фотоионизирующих лазеров, позволяющая создавать и исследовать ультрахолодную неидеальную плазму в стационарном режиме.

При помощи метода двухфотонной спектроскопии были измерены энергии ридберговских переходов в  $n \ ^1S_0$ -состояния атомов  $^{40}\text{Ca}$  для  $n = 40 - 120$ , по которым получено значение потенциала ионизации  $49305,91966(4) \text{ см}^{-1}$ , являющееся самым точным на данный момент.

Впервые получена ультрахолодная плазма в стационарном режиме с концентрацией до  $10^6 \text{ см}^{-3}$  при помощи надпороговой ионизации охлажденных в магнитооптической ловушке атомов кальция-40.

Создан новый метод диагностики разреженной ультрахолодной плазмы на основе эффекта автоионизации ридберговских состояний атомов кальция-40, позволяющий детектировать плазму с концентрацией ионов до  $10^3 \text{ см}^{-3}$ , что соответствует

напряженности электрического поля порядка  $10^{-2}$  В/м.

**Практическая значимость:**

Определение наиболее точного значения потенциала ионизации позволяет увеличить точность определения абсолютных значений энергий ридберговских переходов атомов кальция-40 и начальной температуры электронов в экспериментах по созданию ультрахолодной плазмы.

Исследуемые в работе свойства ультрахолодной плазмы с концентрацией до  $10^6$  см<sup>-3</sup> дают представление о физике плазмы с более высокой плотностью и энергией, так как неидеальная плазма различной природы с одинаковым параметром неидеальности является подобной и имеет одинаковые кинетические и переносные свойства. Также изучение ультрахолодной неидеальной плазмы кальция позволит улучшить разрешающую способность ионных просвечивающих микроскопов путем создания плазмы с упорядоченной структурой.

Разработанная экспериментальная установка является универсальной. Некоторые модификации установки позволят использовать ее для различных направлений исследований, например, в области метрологии и задачах квантовой информатики.

**Апробация работы.** Основные результаты по теме диссертации докладывались и обсуждались на Международной конференции XXXII International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter (Эльбрус, Кабардино-Балкария, Россия, 2017); Международной конференции XXXIII International Conference on Equations of State for Matter (Эльбрус, Кабардино-Балкария, Россия, 2018); XXIV международной научно-технической конференции студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика" (НИУ "МЭИ Москва, Россия, 2018); Всероссийской научной конференции "Физика ультрахолодных атомов" (Академгородок, Новосибирск, Россия, 2018); Международной конференции XXXIV International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter (Эльбрус, Кабардино-Балкария, Россия, 2019); XXV международной научно-технической конференции студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика" (НИУ "МЭИ Москва, Россия, 2019); Международной конференции XXXV International Conference on Equations of State for Matter (Эльбрус, Кабардино-Балкария, Россия, 2020); Всероссийской научной конференции "Физика ультрахолодных атомов" (Академгородок, Новосибирск, Россия, 2020); Международной конференции XXXVI International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter (Эльбрус, Кабардино-Балкария, Россия, 2021).

**Личный вклад автора** заключается в выполнении основного объема

экспериментальных исследований, изложенных в диссертационной работе. Все выносимые на защиту результаты и положения получены автором лично или при его непосредственном участии. Автор принимал активное участие в расчете и создании вакуумной и оптической частей установки, реализации стационарной концентрации ультрахолодной плазмы кальция, а также анализе и интерпретации полученных экспериментальных данных. Научный вклад автора является определяющим.

#### **Публикации.**

Основные результаты работы изложены в 8 публикациях в рецензируемых журналах, входящих в перечень Web of Science.

#### **Объем и структура работы.**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и приложения. Полный объем диссертации составляет 108 страниц текста с 35 рисунками и 6 таблицами. Список литературы содержит 82 наименования.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **Введении** обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируются её цели и задачи, кратко излагаются полученные результаты.

**Первая глава "Лазерное охлаждение атомов  $^{40}\text{Ca}$ "** посвящена описанию созданной в рамках данной диссертационной работы первой в России экспериментальной установки по лазерному охлаждению и захвату в магнитооптическую ловушку (МОЛ) атомов кальция-40. Приведены основные характеристики захваченного в ловушку облака атомов, описаны используемые методики исследования газа в МОЛ.

Экспериментальная установка состоит из вакуумной системы и оптической части. Вакуумная система состоит из источника атомного пучка (печки), зеemanовского замедлителя, в котором происходит первый этап охлаждения, и основной камеры, в которой облако атомов захватывается в МОЛ. Установка выполнена на заказ из нержавеющей стали. Двухступенчатая откачка воздуха с помощью форвакуумного роторного и турбомолекулярного, ионного и ионно-геттерного насосов, а также отжиг металлической части установки при температуре около  $300^\circ\text{C}$ , позволили создать в системе давление порядка  $10^{-10}$  Торр.

Нагретая до  $530^\circ\text{C}$  печка формирует на выходе коллимированный атомный пучок, который охлаждается в зеemanовском замедлителе при поглощении встречного резонансного лазерного излучения мощностью порядка 100 мВт. Многократное повторение процесса поглощения встречного фотона и его изотропного излучения при

движении атома в области замедлителя уменьшает скорость атомов с 700 м/с до 25 м/с. В главе 1 данной работы подробно описан расчет соленоида переменного радиуса зеемановского замедлителя для эффективного охлаждения атомов кальция. Далее медленные атомы попадают в магнитооптическую ловушку, где происходит их дальнейшее охлаждение и захват с помощью направленных с шести сторон резонансных лазерных пучков.

Оптическая часть состоит из нескольких полупроводниковых лазеров: для реализации лазерного охлаждения атомов кальция используются лазерные источники с длиной волны 423 нм (охлаждающее излучение) и 672 нм (лазерное излучение оптической накачки атомов кальция). На рисунке 1 представлена энергетическая схема уровней атома кальция-40.

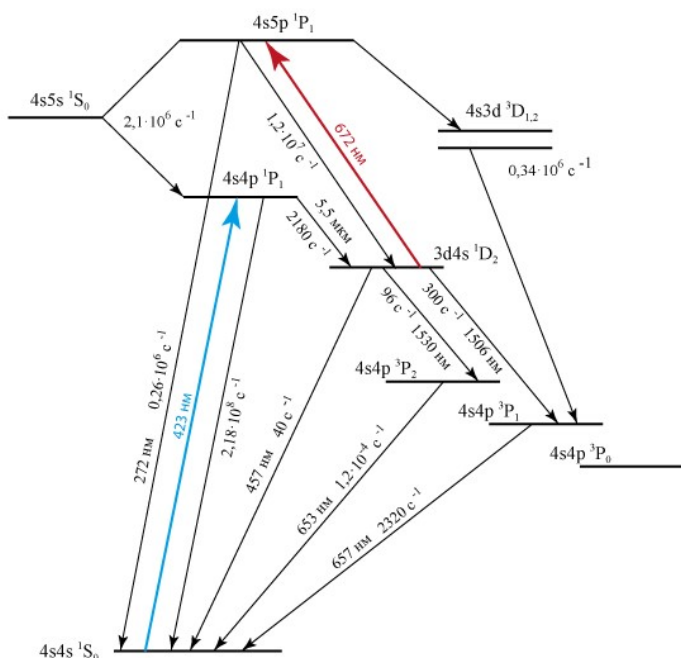


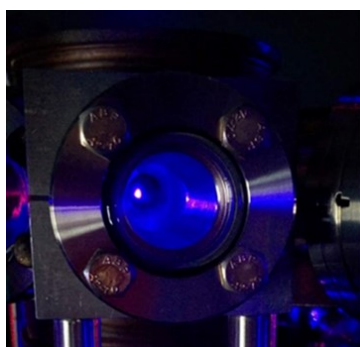
Рисунок 1 – Схема энергетических уровней атома кальция-40; цветными стрелками указаны используемые для лазерного охлаждения атомные переходы

Основное состояние  $4s^2 1S_0$ . Это состояние не имеет тонкой или сверхтонкой структуры из-за отсутствия ядерного спина. Для охлаждения атомов кальция используется переход  $4s^2 1S_0 - 4s4p 1P_1$ , частота которого равна  $709078373,01(35)$  МГц [10]. Потери из цикла лазерного охлаждения происходят, в первую очередь, из-за распада из состояния  $4s4p 1P_1$  в состояние  $3d4s 1D_2$ , а затем в состояния  $4s4p 3P_1$  (коэффициент ветвления 83%) и  $3P_2$  (коэффициент ветвления 17%). Уровень  $3P_2$  является метастабильным, а его время

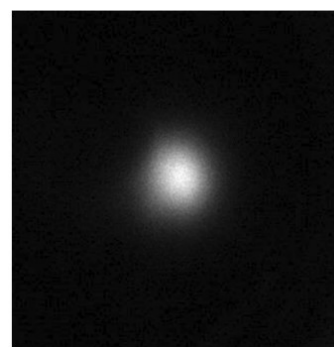
жизни составляет 118 минут [11]. В результате чего значительная часть атомов выводится из цикла охлаждения, что ограничивает время жизни атомов кальция в МОЛ. Для предотвращения данного процесса используется излучение, возбуждающее атом с уровня  $3d4s\ ^1D_2$  на уровень  $4s5d\ ^1P_1$ , из которого с высокой вероятностью атом снова распадается в основное состояние и возвращается в циклический процесс охлаждения. Частота перехода  $3d4s\ ^1D_2 - 4s5d\ ^1P_1$  равна 446150837(10) МГц [12]. Естественная ширина спектральной линии охлаждающего перехода (обратная величина от времени жизни энергетического уровня)  $\Gamma/2\pi \approx 34,7$  МГц.

Стабилизация частоты лазера оптической накачки осуществляется по пикам пропускания термостабилизированного сканирующего интерферометра Фабри-Перо, дрейф которого составляет менее 2 МГц/ч. Для формирования отстроек частот лазерных пучков для различных этапов приготовления излучения, а именно, стабилизации, охлаждения и реализации ловушки, используются акустооптические модуляторы.

После захвата холодных атомов в МОЛ часть рассеянного атомами излучения на длине волны охлаждающего перехода 423 нм регистрируется с помощью CCD камеры для определения размера облака атомов. Также излучение от облака атомов кальция заводится в оптическое волокно и затем регистрируется фотоэлектронным умножителем для контроля флуоресценции атомов и количества захваченных частиц в ловушку. Фотография облака атомов кальция представлена на рисунке 2. Диаметр облака на уровне FWHM составляет порядка 2 мм.



(а)



(б)

Рисунок 2 – (а) Фотография облака холодных атомов кальция-40 в МОЛ, сделанная на обычную бытовую камеру; (б) Фотографии облака холодных атомов кальция-40 в МОЛ, сделанная на CCD камеру

Концентрация атомов определяется с помощью поглощения пробного резонансного излучения облаком атомов. Зависимость концентрации атомов в ловушке от



отстройки охлаждающего излучения представлена на рисунке 3.

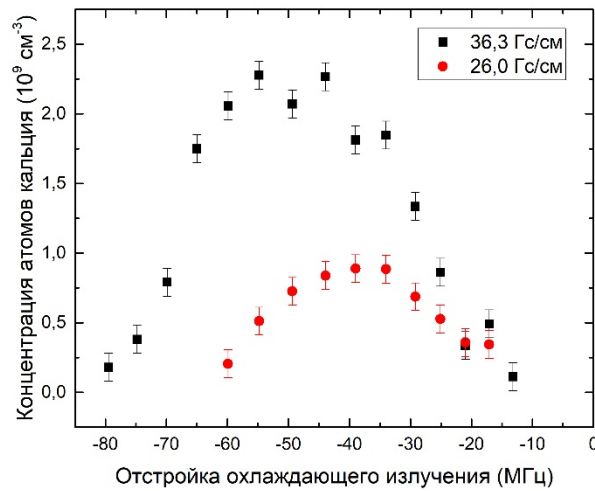


Рисунок 3 – Зависимость концентрации атомов в ловушке от отстройки охлаждающего излучения для двух значений градиента магнитного поля в магнитооптической ловушке

В первой главе также рассматривается определение температуры захваченного облака атомов методом баллистического разлета. Зависимость диаметра атомного облака  $W(\Delta t)$  от времени разлета атомов в пустоту  $\Delta t$  определяется выражением:

$$W(\Delta t) = \sqrt{w^2(0) + \frac{8kT\Delta t^2}{m}}, \quad (1)$$

где  $w(0)$  – диаметр облака в начальный момент времени  $\Delta t = 0$ ,  $k$  – постоянная Больцмана,  $m$  – масса кальция,  $T$  – температура атомов. Сделав ряд фотографий облака с временами разлета от 1 мкс до 600 мкс и подставив соответствующие значения в формулу 1, можно вычислить температуру атомов, которая составила порядка 5 мК.

Во Второй главе "Реализация высоковозбужденных состояний атомов  $^{40}\text{Ca}$ " приводится описание проводимых в рамках диссертационной работы экспериментов по возбуждению ридберговских переходов в кальции с большим значением главного квантового числа.

Для реализации возбуждения атомов в ридберговские состояния используется ультрафиолетовый (УФ) источник непрерывного лазерного излучения с длиной волны 390 нм, переводящий атомы кальция из состояния  $4s4p \ ^1P_1$  в высоколежащие уровни  $nL$ . Частота УФ излучения настраивается в резонанс с атомным переходом согласно

следующей формуле:

$$E_{uv} = E_I - \frac{R}{(n - \delta(n))^2} - \frac{v_c}{c}, \quad (2)$$

где  $E_{uv}$  – энергия УФ излучения,  $E_I$  – энергия ионизации,  $R$  – постоянная Ридберга для кальция,  $n$  – главное квантовое число,  $\delta$  – квантовый дефект,  $v_c$  – частота охлаждающего излучения,  $c$  – скорость света.

Регистрация спектров энергий ридберговских переходов проводилась с использованием неразрушающей методики, основанной на падении резонансной флуоресценции атомов кальция в МОЛ. По определенным значениям энергий переходов в  $n \ ^1S_0$ -состояния атомов  $^{40}\text{Ca}$  для  $n = 40 - 120$ , было определено значение потенциала ионизации  $49305,91966(4) \text{ см}^{-1}$ , являющееся самым точным на данный момент. Погрешность измерения энергий переходов составила не более 2 МГц. Для проведения дальнейших экспериментов необходимо точно знать значение порога ионизации атомов  $^{40}\text{Ca}$ , так как это сильно увеличивает точность настройки источников лазерного излучения в резонанс с исследуемыми ридберговскими переходами. Это позволяет более точно определять температуру электронов при возбуждении атомного облака кальция выше порога ионизации для экспериментов по исследованию ультрахолодной плазмы кальция, описанных в следующей главе диссертационной работы.

В данной главе также описан неразрушающий метод измерения температуры атомов, не требующий отключения МОЛ, основанный на регистрации когерентного двухфотонного ридберговского перехода  $4s^2 \ ^1S_0 - 50 \ ^1S_0$  с отстройкой от промежуточного уровня  $4s4p \ ^1P_1$  на 240 МГц. Оптическая схема собрана с возможностью возбуждения когерентных переходов при разных углах между волновыми векторами двух возбуждающих лазерных пучков ( $\vec{k}_1$  и  $\vec{k}_2$  для одного значения угла,  $\vec{k}'_1$  и  $\vec{k}'_2$  для другого). По разнице ширин когерентных резонансов  $\Delta\omega' - \Delta\omega$  по формуле 3 определена температура захваченных атомов кальция с массой  $M$ , которая сопоставима с измеренной методом баллистического разлета температурой:

$$T = \frac{M}{2k_B} \left( (\Delta\omega' - \Delta\omega) 2\sqrt{\ln 2} (|\vec{k}'_1 - \vec{k}'_2| - |\vec{k}_1 - \vec{k}_2|) \right)^2. \quad (3)$$

На рисунке 4 приведена зависимость температуры облака атомов от отстройки

охлаждающего излучения.

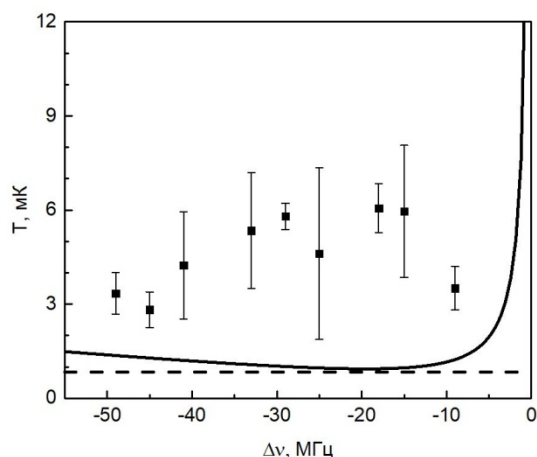


Рисунок 4 – Зависимость температуры захваченных атомов кальция от отстройки охлаждающего излучения МОЛ. Пунктирной линией обозначено значение доплеровского предела для кальция 0,831 мК [13]. Кривая – теоретическая зависимость температуры от отстройки частоты охлаждающего излучения по простой доплеровской теории

В Третьей главе "Ультрахолодная плазма  $^{40}\text{Ca}$ " описана методика получения и регистрации ультрахолодной стационарной плазмы кальция-40. Показано, что в отличие от работ [14, 15, 16], где получение плазмы происходит в импульсном режиме, в нашем случае за счет достижения небольших концентраций ионов и электронов при температуре порядка 0,1К удастся достичь максимального значения параметра неидеальности для ионов порядка 2. Приведены некоторые оценки полученной стационарной плазмы, температура ионов которой не превышает 0,1 К. Дебаевский радиус не превышает размеров исследуемой среды, так для концентрации ионов порядка  $10^4 \text{ см}^{-3}$  и начальной температуры электронов 0,05 К составляет порядка 0,15 мм при характерном диаметре облака 1,4 мм на уровне.

Для получения плазмы УФ излучение с длиной волны 390 нм настраивается выше порога ионизации. Для регистрации ионов в видимом диапазоне используются лазеры с длинами волн 397 нм и 866 нм (рисунок 5). Первый лазерный источник обеспечивает непосредственно флюоресценцию ионов в видимой области спектра, а второй – значительно увеличивает эффективность данного процесса, возвращая электроны с уровня  $3d^2D_{3/2}$  на уровень  $4p^2P_{1/2}$ .

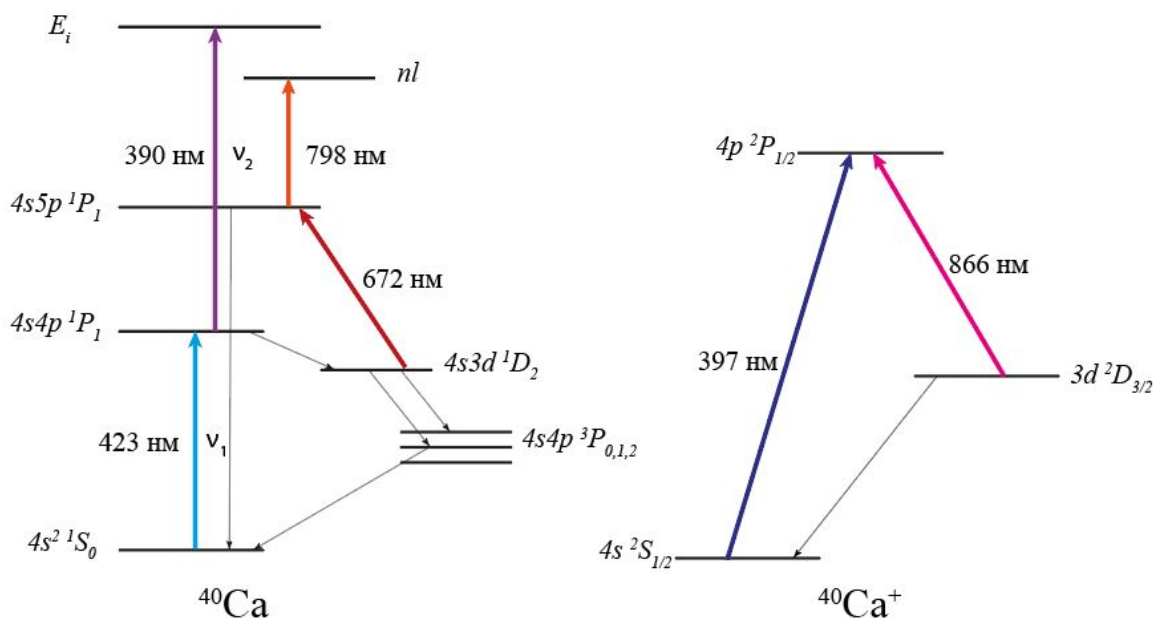
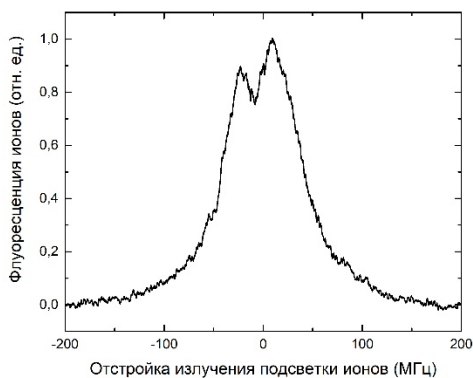
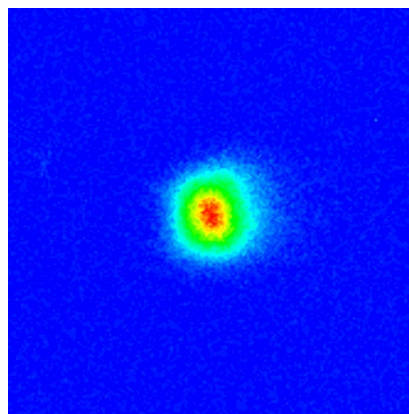


Рисунок 5 – Схема энергетических уровней атома (слева) и иона (справа) кальция-40

Для регистрации флуоресценции ионов  $^{40}\text{Ca}$  необходимо иметь высокую стабильность частоты лазерного излучения 866 нм, в связи с небольшой естественной шириной спектральной линии перехода  $3d\ ^2D_{3/2} - 4p\ ^2P_{1/2}$  (1,69 МГц). Для стабилизации частоты этого излучения используется высокостабильный вакуумный интерферометр Фабри-Перо Stable Laser Systems VH-610-4, сделанный из стекла марки ULE. Частота ионизирующего излучения также стабилизируется на этом интерферометре, что обеспечивает более точный контроль начальной температуры электронов в возбуждаемой им плазме, который осуществляется отстройкой частоты ионизирующего излучения выше порога ионизации. Излучение длиной волны 397 нм сканируется в окрестности частоты подсвечивающего плазму перехода  $4s\ ^2S_{1/2} - 4p\ ^2P_{1/2}$ . Когда частота излучения совпадает с частотой перехода, при помощи фотоэлектронного умножителя регистрируется увеличение интенсивности на длине волны 397 нм. Пример сигнала флуоресценции ионов представлен на рисунке 6 (а). Для оценки объема, занимаемого ионами, делается фотография на калиброванную CCD камеру (рисунок 6 (б)), из которой вычитается засветка от флуоресценции облака нейтральных атомов и фоновая засветка отражения лазерных пучков от стенок металлической вакуумной камеры. Диаметр получившегося облака ионов в данном эксперименте составляет 1,4 мм на уровне FWHM.



(а)



(б)

Рисунок 6 – (а) Сигнал флуоресценции ионов на длине волны 397 нм, где 0 по горизонтальной оси соответствует частоте перехода  $4s^2S_{1/2} - 4p^2P_{1/2}$  в ионах; (б) фотография облака ионов, сделанная на CCD камеру

В работе приведено описание чувствительного метода диагностики разреженной ультрахолодной плазмы на основе эффекта автоионизации ридберговских состояний атомов  $^{40}\text{Ca}$ . Показана возможность детектирования плазмы с концентрацией ионов до  $10^3 \text{ см}^{-3}$ . Проведены экспериментальные исследования резонансов на двухфотонном ридберговском переходе  $4s3d^1D_2 - 90^1D_2$  с использованием двух лазерных пучков с длинами волн 672 и 798 нм. Была получена зависимость амплитуды автоионизационного резонанса (рисунок 7), зарегистрированного по флуоресценции однозарядных ионов  $^{40}\text{Ca}$  на длине волны 397 нм, от концентрации ионов непрерывно создаваемой ультрахолодной плазмы.

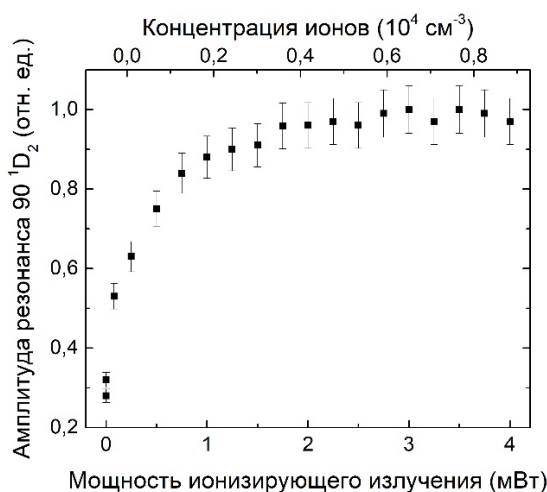


Рисунок 7 – Зависимость амплитуды резонанса на ридберговском переходе от мощности ионизирующего излучения или от концентрации ионов в ультрахолодной плазме

Исходя из электронейтральности создаваемой плазмы, мы можем определить среднее микрополе в центре плазменного облака по распределению Хольцмарка:

$$E_H = (2/225)^{1/3} en_i^{2/3} \frac{1}{\epsilon_0}. \quad (4)$$

В теоретической работе [17] было показано отличие микрополя в ультрахолодной плазме от микрополя, полученного из распределения Хольцмарка, в случае увеличения параметра неидеальности. В нашем случае максимальное электрическое поле, создаваемое ультрахолодной плазмой, составляет  $E \approx 1,3E_H$ . Для концентрации ионов порядка  $10^3 \text{ см}^{-3}$  с учетом поправок на неидеальность поле составляет порядка  $10^{-2} \text{ В/м}$ . Такая высокая чувствительность связана с сильным влиянием ультрахолодной плазмы на эффективность автоионизации [18]. Кроме того, высокая чувствительность процесса автоионизации к внешним полям показана в работах [19, 20]. Таким образом, в настоящей работе представлен чувствительный метод детектирования электрических полей при помощи наблюдения автоионизационных состояний атома  $^{40}\text{Ca}$ . Возможность создания ультрахолодной плазмы с хорошо контролируемыми параметрами позволяет использовать ее для калибровки автоионизационных резонансов. Это открывает возможность использования предложенного метода, например, для детектирования паразитных малых полей в экспериментальных работах по созданию сверхточных атомных часов на основе щелочноземельных металлов.

В **Заключении** обобщены основные результаты, полученные в диссертации, которые сводятся к следующему:

1. Создана первая в России экспериментальная установка по лазерному охлаждению атомов  $^{40}\text{Ca}$ , на которой произведен захват в магнитооптическую ловушку  $3 \cdot 10^7$  атомов, температура которых составляет порядка 5 мК.
2. С использованием неразрушающей ридберговские состояния методики, основанной на падении резонансной флуоресценции атомов в магнитооптической ловушке, проведена регистрация спектров переходов в  $n \ ^1\text{S}_0$ -состояния атомов  $^{40}\text{Ca}$  для  $n$  от 40 до 120, по энергиям которых было определено значение потенциала ионизации, равное  $49305,91966(4) \text{ см}^{-1}$ . Полученный потенциал ионизации является самым точным на данный момент.
3. Впервые экспериментально получена ультрахолодная неидеальная плазма в стационарном режиме с концентрацией до  $10^6 \text{ см}^{-3}$ .

4. Проведено исследование основных параметров ультрахолодной стационарной плазмы. Показано, что радиус Дебая не превышает размеров исследуемой среды, параметр неидеальности может достигать 2 при максимальной концентрации ионов, температура ионов составляет порядка 0,1 К.
5. Разработан чувствительный метод диагностики электрических полей, создаваемых разреженной ультрахолодной плазмой, на основе эффекта автоионизации ридберговских состояний атомов кальция. Показана возможность детектирования плазмы с концентрацией ионов до  $10^3 \text{ см}^{-3}$ , что соответствует напряженности электрического поля порядка  $10^{-2} \text{ В/м}$ .

## Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. *Sautenkov, V.A.* Power broadening of two-photon coherent resonances on Rydberg atomic transitions in a magneto-optical trap / V.A. Sautenkov, S.A. Saakyan, E.V. Vilshanskaya, B.V. Zelener, B.V. Zelener // *Journal of Russian Laser Research*. — 2017. — Vol. 38., no. 1. — Pp. 91-95.
2. *Зеленер, Б.Б.* Когерентное возбуждение ридберговских состояний в холодном газе атомов  $^{40}\text{Ca}$  / Б.Б. Зеленер, И.Д. Аршинова, А.А. Бобров, Е.В. Вильшанская, С.А. Саакян, В.А. Саутенков, Б.В. Зеленер, В.Е. Фортов // *Письма в ЖЭТФ*. — 2018. — Vol. 108., no. 12. — Pp. 829-833.
3. *Зеленер, Б.Б.* Измерение температуры оптически охлажденных атомов кальция с использованием метода дифференциальной двухфотонной спектроскопии / Б.Б. Зеленер, А.А. Бобров, Е.В. Вильшанская, И.Д. Аршинова, С.А. Саакян, В.А. Саутенков, Б.В. Зеленер, В.Е. Фортов // *ДАН*. — 2018. — Vol. 485., no. 3. — Pp. 281-284.
4. *Vilshanskaya, E.V.* Saturation spectroscopy of calcium atomic vapor in hot quartz cells with cold windows / E.V. Vilshanskaya, S.A. Saakyan, V.A. Sautenkov, D.A. Murashkin, B.V. Zelener, B.V. Zelener // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2018. — Vol. 946., no. 1. — Pp. 012130.
5. *Зеленер, Б.Б.* Измерение энергий ридберговских переходов в  $n\ ^1S_0$  состояния и порога ионизации атомов  $^{40}\text{Ca}$  / Б.Б. Зеленер, С.А. Саакян, В.А. Саутенков, Е.В. Вильшанская, Б.В. Зеленер, В.Е. Фортов // *Письма в ЖЭТФ*. — 2019. — Vol. 110., no. 12. — Pp. 767-771.
6. *Vilshanskaya, E.V.* The setup for laser cooling and trapping of calcium atoms / E.V. Vilshanskaya, S.A. Saakyan, V.A. Sautenkov, B.V. Zelener // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2019. — Vol. 1147., no. 1. — Pp. 012097.
7. *Zelener, B.V.* Differential two-photon spectroscopic measurements of cold atoms temperature with variable angle between probe beams / B.V. Zelener, E.V. Vilshanskaya, S.A. Saakyan, I.D. Arshinova, A.A. Bobrov, V.A. Sautenkov, B.V. Zelener // *Laser Physics*. — 2020. — Vol. 30., no. 2. — Pp. 025501.
8. *Зеленер, Б.Б.* Диагностика разреженной ультрахолодной плазмы на основе эффекта автоионизации ридберговских состояний атомов  $^{40}\text{Ca}$  / Б.Б. Зеленер, Е.В. Вильшанская, С.А. Саакян, В.А. Саутенков, Б.В. Зеленер, В.Е. Фортов // *Письма в ЖЭТФ*. — 2021. — Vol. 113. no. 2. — Pp. 92-95.



## Список цитируемой в автореферате литературы

1. *Phillips, W.D.* Nobel Lecture: Laser cooling and trapping of neutral atoms / W.D. Phillips // *Reviews of Modern Physics*. — 1998. — Vol. 70, no. 3. — P. 721.
2. *Lyon, M.* Ultracold neutral plasmas / M. Lyon, S.L. Rolston // *Reports on Progress in Physics*. — 2016. — Vol. 80, no. 1. — P. 017001.
3. *Killian, T.C.* Creation of an ultracold neutral plasma / T.C. Killian, S. Kulin, S.D. Bergeson et al. // *Physical Review Letters*. — 1999. — Vol. 83, no. 23. — P. 4776.
4. *Bobrov, A.A.* Conductivity and diffusion coefficients in fully ionized strongly coupled plasma: Method of molecular dynamics / A.A. Bobrov, A.M. Bunkov, S.Ya. Bronin et al. // *Physics of Plasmas*. — 2019. — Vol. 26, no. 8. — P. 082102.
5. *Bobrov, A.A.* Molecular dynamics calculation of thermal conductivity and shear viscosity in two-component fully ionized strongly coupled plasma / A.A. Bobrov, S.Y. Bronin, A.B. Klyarfeld et al. // *Physics of Plasmas*. — 2020. — Vol. 27, no. 1. — P. 010701.
6. *McClelland, J.J.* Bright focused ion beam sources based on laser-cooled atoms / J.J. McClelland, A.V. Steele, B. Knuffman et al. // *Applied physics reviews*. — 2016. — Vol. 3, no. 1. — P. 011302.
7. *McCulloch, A.J.* Cold electron sources using laser-cooled atoms / A.J. McCulloch, B.M. Sparkes, R.E. Scholten // *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*. — 2016. — Vol. 49, no. 16. — P. 164004.
8. *Jacob, G.* Transmission microscopy with nanometer resolution using a deterministic single ion source / G. Jacob, K. Groot-Berning, S. Wolf et al. // *Physical review letters*. — 2016. — Vol. 117, no. 4. — P. 043001.
9. *Murphy, D.* Increasing the brightness of cold ion beams by suppressing disorder-induced heating with Rydberg blockade / D. Murphy, R.E. Scholten, B.M. Sparkes // *Physical review letters*. — 2015. — Vol. 115, no. 21. — P. 214802
10. *Salumbides, E.J.* High-precision frequency measurement of the 423-nm Ca I line / E.J. Salumbides, V. Maslinskas, I.M. Dildar et al. // *Physical Review A*. — 2011. — Vol. 83, no. 1. — P. 012502.
11. *Derevianko, A.* Feasibility of cooling and trapping metastable alkaline-earth atoms / A. Derevianko // *Physical Review Letters*. — 2001. — Vol. 87, no. 2. — P. 023002.
12. *Mills, M.* Efficient repumping of a Ca magneto-optical trap / M. Mills, P. Puri, Y. Yu et al. // *Physical Review A*. — 2017. — Vol. 96, no. 3. — P. 033402.

13. *Cavasso Filho, R.L.* Deceleration, trapping, and two-photon cooling of calcium atoms / R.L. Cavasso Filho, W.C. Magno, D.A. Manoel et al. // *JOSA B*. — 2003. — Vol. 20, no. 5. — Pp. 994–1002.
14. *Dunning, F.B.* Recent advances in Rydberg physics using alkaline-earth atoms / F.B. Dunning, T.C. Killian, S. Yoshida, J. Burgdorfer // *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*. — 2016. — Vol. 49, no. 11. — P. 112003.
15. *Langin, T.K.* Laser cooling of ions in a neutral plasma / T.K. Langin, G.M. Gorman, T.C. Killian // *Science*. — 2019. — Vol. 363, no. 6422. — Pp. 61–64.
16. *Lyon, M.* Using higher ionization states to increase Coulomb coupling in an ultracold neutral plasma / M. Lyon, S.D. Bergeson, A. Diaw, M.S. Murillo // *Physical Review E*. — 2015. — Vol. 91, no. 3. — P. 033101.
17. *Bobrov, A.A.* Ion microfield in ultracold strongly coupled plasma / A.A. Bobrov, S.Ya. Bronin, A.B. Klyarfeld et al. // *Physics of Plasmas*. — 2020. — Vol. 27, no. 12. — P. 122103.
18. *McQuillen, P.* Imaging the evolution of an ultracold strontium Rydberg gas / P. McQuillen, X. Zhang, T. Strickler et al. // *Physical Review A*. — 2013. — Vol. 87, no. 1. — P. 013407.
19. *Fields, G.* Autoionization of very-high- $n$  strontium Rydberg states / G. Fields, X. Zhang, F.B. Dunning et al. // *Physical Review A*. — 2018. — Vol. 97, no. 1. — P. 013429.
20. *Lothead, G.* Number-resolved imaging of excited-state atoms using a scanning autoionization microscope / G. Lothead, D. Boddy, D.P. Sadler et al. // *Physical Review A*. — 2013. — Vol. 87, no. 5. — P. 053409.

Вильшанская Евгения Владимировна

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ  
КАЛЬЦИЯ-40**

Автореферат

Подписано в печать _____	Уч.-изд.л. 0,82	Формат 60x84/16
Печать офсетная	Заказ N	Усл.-печ.л. 1
Тираж 100 экз.		Бесплатно

ОИВТ РАН. 125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2