На правах рукописи

Вильшанская Евгения Владимировна

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ КАЛЬЦИЯ-40**

Специальность 01.04.08 –

«Физика плазмы»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

|  |  |
| --- | --- |
| Научный руководитель: | д.ф.-м.н. Зеленер Борис Борисович |
| Официальные оппоненты: | ФИО 1  Степень  Организация  ФИО 2  Степень  Организация |
| Ведущая организация: | Название ведущей организации |

Защита состоится DD mm YYYY г. в XX часов на заседании диссертационного совета NN на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединённого института высоких температур Российской академии наук по адресу: 1254112, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, экспозал.

Ученый секретарь

диссертационного совета

NN, д.ф.-м.н. ФИО

Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Метод лазерного охлаждения был предложен в 1975 году Хэншем и Шавловым [1]. В 1979 году группой под руководством Летохова [2] был проведен первый эксперимент по торможению пучка атомов натрия светом. Первая магнитооптическая ловушка для атомов натрия была спроектирована и реализована американским физиком Стивеном Чу в 1987 году. В 1997 году за пионерские работы в области лазерного охлаждения Стивен Чу, Уильям Филипс и Клод Коэн-Таннуджи были удостоены Нобелевской премии по физике [3]. Одним из распространенных способов охлаждения и захвата нейтральных атомов является магнитооптическая ловушка. Преимуществами магнитооптической ловушки являются низкие температуры и скорости атомов, что означает практически полное отсутствие доплеровского уширения, возможность манипулировать атомами, большие времена взаимодействия излучения с холодными атомами, высокая степень локализации атомов в пространстве, а также возможность контроля абсолютного количества атомов и их концентрации. В настоящее время ведутся работы в области создания квантовых компьютеров. Исследования высоковозбужденных атомных систем и ультрахолодной нейтральной плазмы могут быть полезны для задач квантовой информатики. В 2017 году группа ученых [4] построила рекордный 51-кубитный квантовый симулятор на основе ультрахолодных ридберговских атомов рубидия. Авторы [5] показали, что наличие в системе ионов блокирует образование ридберговских атомов и возникает эффект кулоновской блокады, которая обеспечивает квантовую запутанность и может быть использована при создании логических вентилей для квантовых симуляторов. В связи с развитием лазерной техники и исследований охлажденных газов в магнитооптической ловушке (МОЛ) [6], появилось новое направление в изучении сильно неидеальной плазмы [7, 8]. Изучение ультрахолодной плазмы также имеет практическую ценность для усовершенствования ионных микроскопов. Авторы [9] представили модификацию ионного микроскопа, которая позволила достичь фокусировки ионного пучка до пятна размером (5,8 ± 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 [10] 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 исследуемы образец, такой ионный пучок хорошо подходит для высокоточного «выжигания» наноструктур и добавления примесей в полупроводники.

Также в работах [11,12] было показано, что исследуемые свойства ультрахолодной плазмы малой плотности дают представление о физике плазмы с более высокой плотностью и энергией. Кинетические и переносные свойства плазмы могут быть выражены через параметр неидеальности, обозначающий отношение потенциальной и кинетической энергии заряженных частиц. Неидеальная плазма различной природы с одинаковым является подобной и имеет одинаковые кинетические и переносные свойства.

**Целью** данной работы является создание установки по лазерному охлаждению атомов 40Са, а также получение и исследование свойств ультрахолодной плазмы кальция в стационарном режиме.

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

1. Собрать вакуумную и оптическую части установки по лазерному охлаждению атомов кальция.
2. Реализовать возбуждение захваченных в МОЛ нейтральных атомов в ридберговские состояния.
3. Реализовать схему получения и регистрации ультрахолодной неидеальной стационарной плазмы кальция.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Реализовано лазерное охлаждение и захват в магнитооптическую ловушку порядка 107 атомов кальция-40.
2. Впервые измерен порог ионизации атомов 40Ca с большой точностью. Определенный в этой работе потенциал ионизации составил 49305,91966(4) см-1, что является наиболее точным на данный момент значением.
3. Показана возможность получения стационарной ультрахолодной плазмы плотностью до 106 см-3 на уникальной установке по лазерному охлаждению атомов кальция-40.
4. Разработан чувствительный метод диагностики разреженной ультрахолодной плазмы на основе эффекта автоионизации ридберговских состояний захваченных в МОЛ атомов. Показана возможность детектирования плазмы с плотностью ионов до 103 см-3.

**Научная новизна:**

Впервые в России создана уникальная установка по лазерному охлаждению атомов кальция-40, позволяющая создавать и исследовать плазму в стационарном режиме.

При помощи метода двухфотонной спектроскопии были измерены энергии ридберговских переходов в 𝑛 1𝑆0-состояния атомов 40Ca для 𝑛 = 40 − 120, по которым было получено наиболее точное значение потенциал ионизации, равное 49305,91966(4) см‑1.

**Практическая значимость:**

Определение наиболее точного значения потенциала ионизации позволяет увеличить точность определения абсолютных значений энергий ридберговских переходов атомах кальция-40 и начальной температуры электронов в экспериментах по созданию ультрахолодной плазмы. Исследуемые в работе свойства ультрахолодной плазмы с плотностью 106 см-3 дают представление о физике плазмы с более высокой плотностью и энергией, так как неидеальная плазма различной природы с одинаковым параметром неидеальности Γ*i* 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 ислледований, 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.**

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.

**Публикации.**

Основные результаты работы изложены в 8 публикациях в рецензируемых журналах входящих в перечень ВАК.

Содержание работы

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

**Первая глава "Лазерное охлаждение атомов 40Ca"** 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), зеемановского 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 300оС, позволили создать в системе давление порядка 10‑10 Торр.

Нагретая до 530оС печка формирует на выходе коллимированный атомный пучок, который охлаждается в зеемановском 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 излучения) и 672 нм (лазерное излучение оптической накачки атомов кальция). На рисунке 1 представлена энергетическая схема уровней атома кальция-40.

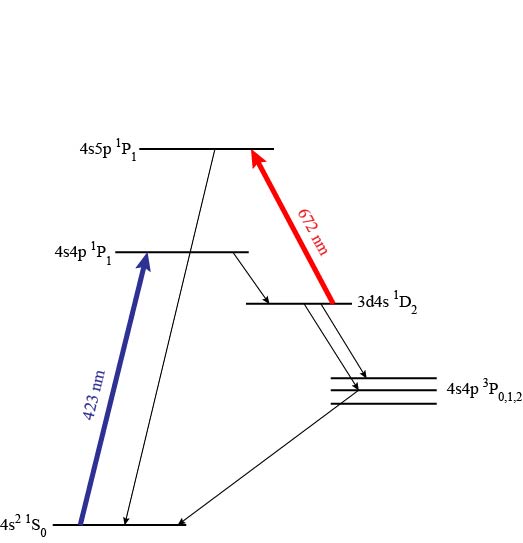


Рисунок 1 – Энергетическая схема уровней атома 40Са

Охлаждение атомов кальция происходит на переходе 4𝑠2 1𝑆0 – 4𝑠4𝑝 1𝑃1. Стабилизация частоты охлаждающего излучения происходит по резонансам насыщенного поглощения в кювете открытого типа с парами кальция-40. При населении уровня 4𝑠4𝑝 1𝑃1 существует вероятность, что атомы распадутся в состояние 3𝑑4𝑠 1𝐷2, а затем в состояния 4𝑠4𝑝 3𝑃1 и 3𝑃2. Уровень 3𝑃2 является метастабильным, а его время жизни составляет 118 минут. Таким образом, значительная часть атомов выводится из цикла охлаждения, что ограничивает время жизни кальция в ловушке. Для предотвращения данного процесса используется второй лазерный источник с длиной волны 672 нм, возбуждающий электрон с уровня 3𝑑4𝑠 1𝐷2 на уровень 4𝑠5𝑑 1𝑃1, из которого с высокой вероятностью атом снова распадается в основное состояние и возвращается в циклический процесс охлаждения. 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 регистрируется с помощью CCD камеры для определения размера облака атомов, а часть излучения 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 составляет порядка 2 мм.

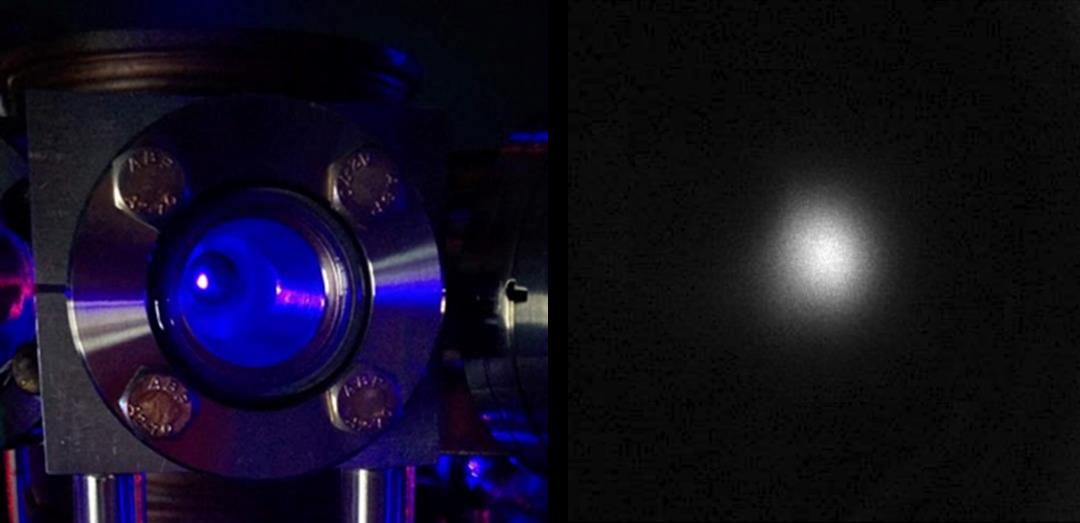


Рисунок 2 – Фотография облака охлажденных атомов в МОЛ

Концентрация атомов определяется с помощью поглощения пробного резонансного излучения облаком атомов. Зависимость концентрации атомов в ловушке от отстройки охлаждающего излучения представлена на рисунке 3.

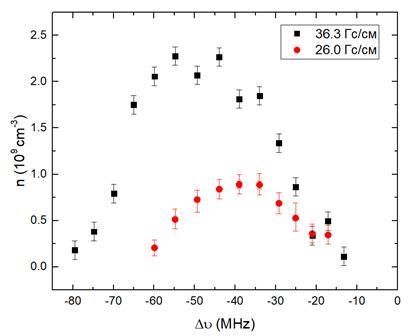


Рисунок 3 – Зависимость концентрации атомов в ловушке от отстройки охлаждающего излучения для двух значений градиента магнитного поля в магнитооптической ловушке

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

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

где 𝑤(0) – диаметр облака в начальный момент времени 𝑡 = 0, 𝑘𝐵 – постоянная Больцмана, *m* – масса кальция. 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 40Ca"** 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 1𝑃1 в высоколежащие уровни 𝑛𝐿. Частота УФ излучения настраивается в резонанс с атомным переходом согласно следующей формуле:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |

где 𝐸𝑢𝑣 – энергия УФ излучения, 𝐸𝐼 – энергия ионизации, 𝑅 – постоянная Ридберга для кальция, 𝑛 – главное квантовое число, 𝛿 – квантовый дефект, 𝜈𝑐 – 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 1𝑆0-состояния атомов 40Ca для 𝑛 = 40 − 120, было определено значение потенциала ионизации 49305,91966(4) 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 40Ca, так как это сильно увеличивает точность настройки источников лазерного излучения в резонанс с исследуемыми ридберговскими переходами. Также 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. Оптическая схема собрана с возможностью возбуждения когерентных переходов при разных углах между двумя возбуждающими лазерными пучками (**𝑘1** и **𝑘2** для одного значения угла, **𝑘'1** и **𝑘′2** для другого). По разнице ширин когерентных резонансов по формуле 3 определена температура захваченных атомов кальция с массой *M*, которая сопоставима с измеренной методом баллистического разлета температурой.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |

На рисунке 4 приведена зависимость температуры облака атомов от отстройки охлаждающего излучения.

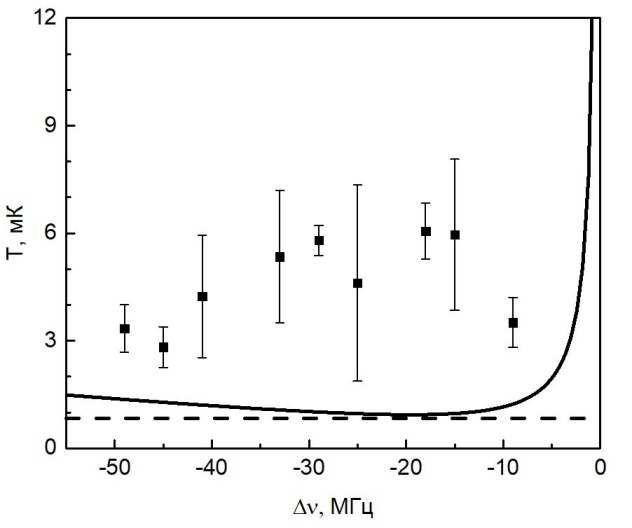
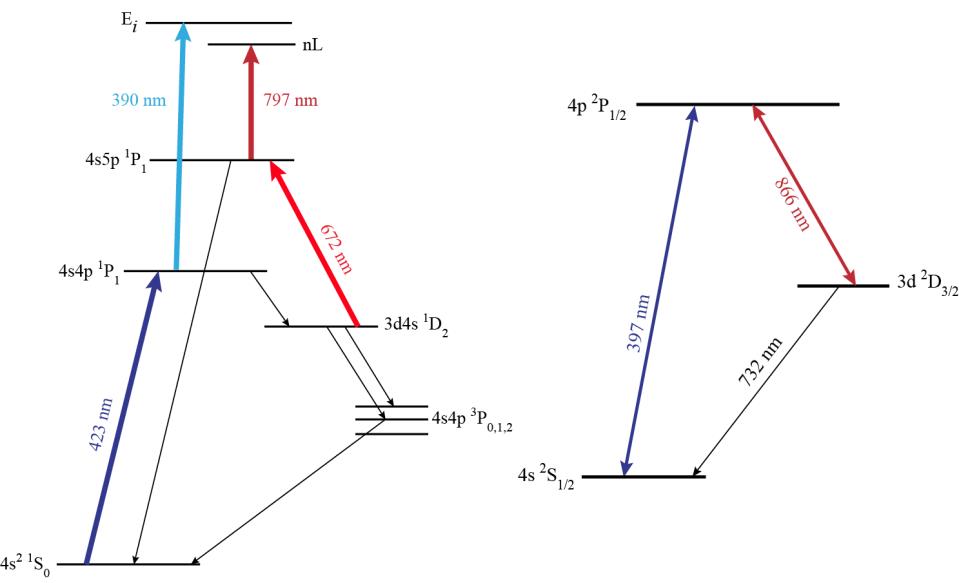


Рисунок 4 – Зависимость температуры захваченных атомов кальция от отстройки охлаждающего излучения МОЛ. Пунктирной линией обозначено значение допплеровского предела для кальция 0,831 мК [13]. Кривая – теоретическая зависимость температуры от отстройки частоты охлаждающего излучения по простой допплеровской теории [14]

В **третьей главе "Ультрахолодная плазма 40Ca"** описана методика получения и регистрации ультрахолодной стационарной плазмы кальция-40 с максимальным параметром неидеальности Γ*i* 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 плотности ионов порядка 105 см-3 составляет 0,05 мм при характерном диаметре облака 1,9 мм.

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 2𝐷3/2 на уровень 4𝑝 2𝑃1/2.

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

Для регистрации флуоресценции ионов 40Ca необходимо иметь высокую стабильность частоты лазерного излучения 866 нм, в связи с небольшой естественной шириной спектральной линии перехода 3𝑑 2𝐷3/2 – 4𝑝 2𝑃1/2 (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, которая осуществляется отстройкой частоты ионизующего излучения выше порога ионизации.

Приведено описание чувствительного метода диагностики разреженной ультрахолодной плазмы на основе эффекта автоионизации ридберговских состояний атомов 40Ca. Показана возможность детектирования плазмы с плотностью ионов до 103см-3. Проведены экспериментальные исследования резонансов на двухфотонном ридберговском переходе 4𝑠3𝑑 1𝐷2 – 901𝐷2 с использованием двух лазерных пучков с длинами волн 672 и 798 нм. Была получена зависимость амплитуды автоионизационного резонанса, зарегистрированного по флюоресценции однозарядных ионов 40Са на длине волны 397 нм, от концентрации ионов непрерывно создаваемой ультрахолодной плазмы.

В **заключении** обобщены основные результаты, полученные в диссертации. Основные результаты работы сводятся к следующему:

1. Создана первая в России экспериментальная установка по лазерному охлаждению атомов 40Ca, на которой произведен захват в магнитооптическую ловушку 107 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 1S0-состояния атомов 40Ca для n от 40 до 120, по энергиям которых было определено значение потенциал ионизации, равное 49305,91966(4) см-1. Полученный потенциал ионизации является самым точным на данных момент.
3. Впервые экспериментально получена ультрахолодная неидеальная плазма в стационарном режиме плотностью до 106 см-3.
4. Проведено исследование основных параметров ультрахолодной стационарной плазмы. Показано, что радиус Дебая не превышает размеров исследуемой среды, параметр неидеальность может достигать 2 при максимальной плотности 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 плотностью ионов до 103 см-3, что примерно соответствует напряженности электрического поля 10-2 В/м.

# Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Sautenkov V.A., Saakyan S.A., Vilshanskaya E.V., Zelener B.B., Zelener B.V. Power broadening of two-photon coherent resonances on Rydberg atomic transitions in a magneto-optical trap // Journal of Russian Laser Research. – 2017. – Т. 38. – №. 1. – С. 91-95.
2. Б.Б. Зеленер, И.Д. Аршинова, А.А. Бобров, Е.В. Вильшанская, С.А. Саакян, В.А. Саутенков, Б.В. Зеленер, В.Е. Фортов. Когерентное возбуждение ридберговских состояний в холодном газе атомов 40Ca //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2018. – Т. 108. – №. 12. – С. 829-833.
3. Б.Б. Зеленер, А.А. Бобров, Е.В. Вильшанская, И.Д. Аршинова, С.А. Саакян, В.А. Саутенков, Б.В. Зеленер, В.Е. Фортов. Измерение температуры оптически охлаждённых атомов кальция с использованием метода дифференциальной двухфотонной спектроскопии //Доклады Академии наук. – 2018. – Т. 485. – №. 3. – С. 281-284.
4. Vilshanskaya E.V., Saakyan S.A., Sautenkov V.A., Murashkin D.A., Zelener B.B., Zelener B.V. Saturation spectroscopy of calcium atomic vapor in hot quartz cells with cold windows //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 946. – №. 1. – С. 012130.
5. Б.Б. Зеленер, С.А. Саакян, В.А. Саутенков, Е.В. Вильшанская, Б.В. Зеленер, В.Е. Фортов. Измерение энергий ридберговских переходов в n1S0 состояния и порога ионизации атомов 40Ca //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2019. – Т. 110. – №. 12. – С. 767-771.
6. Vilshanskaya E.V., Saakyan S.A., Sautenkov V.A., Zelener B.B. The setup for laser cooling and trapping of calcium atoms //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1147. – №. 1. – С. 012097.
7. Zelener B.B., Vilshanskaya E.V., Saakyan S.A., Arshinova I.D., Bobrov A.A., Sautenkov V.A., Zelener B.V. Differential two-photon spectroscopic measurements of cold atoms temperature with variable angle between probe beams // Laser Physics. – 2020. – Т. 30. – №. 2. – С. 025501.
8. Зеленер Б.Б., Вильшанская Е.В., Саакян С.А., Саутенков В.А., Зеленер Б.В., Фортов В.Е. Диагностика разреженной ультрахолодной плазмы на основе эффекта автоионизации ридберговских состояний атомов 40Ca // Письма в ЖЭТФ. – 2021. – Т. 113. – №. 2. – С. 92-95.

Список цитируемой в автореферате литературы

1. Hansch, Theodor W. Cooling of gases by laser radiation / Theodor W Hansch, Arthur L Schawlow // Optics Communications. — 1975. — Vol. 13, no. 1. — Pp. 68–69.
2. Радиационное замедление и монохроматизация пучка атомов натрия до 1, 5 К во встречном лазерном луче / СВ Андреев, ВИ Балыкин, ВС Летохов, ВГ Миногин // Письма в ЖЭТФ. — 1981. — Vol. 34, no. 8. — Pp. 463–467.
3. Чу, Стивен. Управление нейтральными частицами / Стивен Чу // Успехи физических наук. — 1999. — Vol. 169, no. 3. — Pp. 274–291.
4. Bernien H. et al. Probing man y-body dynamics on a 51- atom quantum simulator //Nature. – 2017. – Т. 551. – №. 7682. – С. 579.
5. Engel F. et al. Observation of R ydberg Blockade Induced by a Single Ion //Physical review letters. – 2018. – Т. 121. – №. 19. – С. 193401.
6. Phillips, W. D. (1998). Nobel Lecture: Laser cooling and trapping of neutral atoms. Reviews of Modern Physics, 70(3), 721.
7. Lyon, M., & Rolston, S. L. (2016). Ultracold neutral plasmas. Reports on Progress in Physics, 80(1), 017001.
8. Killian, T. C., Kulin, S., Bergeson, S. D., Orozco, L. A. , Orzel, C., & Rolston, S. L. (1999). Creation of an ultracold neutral plasma. Physical Review Letters, 83(23), 4776.
9. Jacob G. et al. T ransmission microscopy with nanometer resolution using a deterministic single ion source //Physical review letters. – 2016. – Т. 117. – №. 4. – С. 043001.
10. Murphy D., Scholten R. E., Sparkes B. M. Increasing the brightness of cold ion beams by suppressing disorder - induced heating with R ydberg blockade //Physical review letters. – 2015. – Т. 115. – №. 21. – С. 214802.
11. Bobrov A.A., Bunkov A.M., Bronin S.Y., Klyarfeld A.B., Zelener B.B., Zelener B.V. Conductivity and diffusion coefficients in fully ionized strongly coupled plasma: Method of molecular dynamics //Physics of Plasmas. – 2019. – Т. 26. – №. 8. – С. 082102.
12. Bobrov A.A., Bronin S.Y., Klyarfeld A.B., Zelener B.B., Zelener B.V. Molecular dynamics calculation of thermal conductivity and shear viscosity in two-component fully ionized strongly coupled plasma //Physics of Plasmas. – 2020. – Т. 27. – №. 1. – С. 010701.
13. R. L. Cavasso Filho, W. C. Magno, and D. A. Manoel, J. Opt. Soc. Am. B 20 (7), 994 (2003).
14. S.-K. Choi, S.-E. Park, and J. Chen, Phys. Rev. A 77, 015405 (2008).