

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ П.Н. ЛЕБЕДЕВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Семериков Илья Александрович

ЛАЗЕРНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ ИОНОВ Mg^+ И Yb^+ В
КВАДРУПОЛЬНОЙ ЛОВУШКЕ ПАУЛЯ ДЛЯ
КВАНТОВОЙ ЛОГИКИ

Специальность 01.04.05 – Оптика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва - 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте имени П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН).

Научный руководитель: член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук
Колачевский Николай Николаевич

Официальные оппоненты: **Юдин Валерий Иванович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ФГБУН ИЛФ СО РАН)

Пальчиков Виталий Геннадьевич,
доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Главного метрологического центра Государственной службы времени и частоты (ГМЦ ГСВЧ (НИО-7)) Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ВНИИФТРИ).

Ведущая организация: Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ)

Защита состоится 05 октября 2020 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.023.03 при ФИАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института имени П.Н. Лебедева РАН и на сайте института www.lebedev.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.023.03
доктор физико-математических наук

А.С. Золотько

Общая характеристика работы

Диссертация посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию лазерного охлаждения ионов кристаллов в линейной квадрупольной ловушке Пауля для их последующего использования в задачах квантовой логики.

Актуальность работы.

В 1994 году Ди-Винчнезо впервые предложил использовать ионы индия в качестве кубит.[1] А уже в 1995 Цираком и Цоллером была предложена схема реализации контролируемой двухкубитной операции с использованием общей колебательной моды ионной цепочки, что теоретически позволяет создать масштабируемый универсальный квантовый вычислитель на ионах [2]. В 1995 году в группе под руководством Вайнленда экспериментально продемонстрирована контролируемая двух кубитная операция, в которой кубиты представляли собой колебательное расщепление двух сверхтонких подуровней основного состояния иона ${}^9\text{Be}^+$, охлажденного до основного колебательного состояния[3]. В той же группе в 1998 году было продемонстрировано управляемое перепутывание состояний двух ионов [4], а в 2000 уже четырех[5]. Дальнейшим шагом по масштабированию квантовых вычислений на ионах стала реализация в 2003 г двухкубитной операции с использованием двух ионов ${}^{40}\text{Ca}^+$ в основном колебательном [6]. Достоверность двухкубитной операции составила 80%.

Одной из важных задач, требующих решения при реализации двухкубитных операций является необходимость достижения основного колебательного состояния ионов. В течение проведения всего цикла квантовых вычислений колебательное состояние иона не должно изменяться. Для решения этой задачи были проведены теоретические[7,8] и экспериментальные[9,10] исследования темпов нагрева ионов и предложены подходы по их минимизации: криогенное охлаждение электродов ловушки[11,12], использование высокотемпературных сверхпроводников в электродах ловушки[13], очищение электродов плазмой[14,15] или импульсным лазером[16]. На данный момент в криогенных ловушках достигнуты темпы нагрева на уровне 1 фонона в секунду при расстоянии от иона до электродов ловушки порядка 100 мкм [13].

Также выполняются работы по созданию схем двухкубитных операций без использования основного колебательного состояния. В 1999-2000 годах Андерс Соренсен и Клаус Молмер предложили концепцию управляемого фазового гейта (МС гейта) [17,18]. Преимуществом таких гейтов перед обычными адиабатическими гейтами типа Цирака-Цоллера является высокая скорость, возможность

работы в неосновном колебательном состоянии, хорошая масштабируемость вплоть до систем, состоящих из сотен ионов.

После изобретения МС гейтов открылась возможность масштабирования квантовых вычислений на ионах[19]. Было предложено несколько концепций масштабируемого квантового вычислителя: адиабатическое перемещение ионов для проведения операции [20], связь разнесенных ионных кристаллов при помощи оптических связей по волокну [21], использование градиентов магнитных полей для адресации кубитов глобальными оптическими полями[22–25], использование массивов микроловушек. Были проведены экспериментальные работы по алгоритмам коррекции ошибок[26]. Также были проведены эксперименты с различными типами кубит: оптическими[27], на сверхтонкой структуре[28], на зеемановских подуровнях[29], на тонкой структуре[30]. Использовались различные ионы: $^{25}\text{Mg}^+$ [31], $^{171}\text{Yb}^+$ [32], $^9\text{Be}^+$ [28], $^{40}\text{Ca}^+$ [33], $^{43}\text{Ca}^+$ [34], $^{88}\text{Sr}^+$ [33]. В результате были достигнуты достоверности однокубитных операций на уровне 0.99996 при времени гейта 2 мкс [31].и двухкубитных на уровне 0.9991(6) при времени выполнения операции 30 мкс [31]. Времена когерентности составляют до 10 минут [35]. Совокупность этих факторов делает ионы фактически лучшей системой для квантовых вычислений.

Для выполнения исследований в этом направлении требуется создание универсальной линейной ловушки Пауля с системой оптической регистрации, реализация лазерного охлаждения ионов, исследования по загрузке и глубокому охлаждению ионов. В диссертации приведены экспериментальные результаты по захвату и лазерному охлаждению цепочек ионов $^{24}\text{Mg}^+$ в линейной квадрупольной ловушке Пауля и исследование их колебательного спектра. Ион магния является одним из наиболее легких ионов, доступных для прямого лазерного охлаждения, что позволяет проводить на нем одни из наиболее достоверных и быстрых двухкубитных квантовых операций[36]. Также в работе приводятся теоретические расчеты для глубокого охлаждения иона $^{171}\text{Yb}^+$ методом двойной индуцированной электромагнитной прозрачности. Задача эффективного глубокого охлаждения является одной из ключевых при масштабировании квантовых вычислителей, а ион $^{171}\text{Yb}^+$ обладает целым рядом преимуществ, что уже позволило создать на нем 17-кубитный универсальный квантовый вычислитель [37]. Исследования, выполненные в данной диссертации, закладывают экспериментальную и теоретическую основу для реализации элементов квантовой логики на ионах Mg и Yb в лабораториях ФИАН.

Целью данной работы являлось экспериментальное и теоретическое исследование лазерного охлаждения ионов Yb и Mg.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Создать линейную квадрупольную ловушку Пауля для захвата и исследования одиночных ионов с системой генерации атомных пучков и системой ионизации атомов.
2. Исследовать процесс захвата ионов и методы их регистрации в линейной ловушке при помощи канальных электронных умножителей.
3. Исследовать многочастичные потери и время жизни ионов, захваченных в ловушку.
4. Реализовать лазерное охлаждение ионов Mg и исследовать спектр колебаний ионов в линейной ловушке.
5. Измерить температуру ионов при доплеровском охлаждении.
6. Произвести расчеты населенности возбужденного уровня энергии в ионе $^{171}\text{Yb}^+$ в присутствии трех оптических полей, а затем на его основе произвести расчет минимально достижимого среднего колебательного числа иона в ловушке при глубоком охлаждении методом двойной индуцированной прозрачности.

Научная новизна:

1. Методом численного решения уравнений движения с полным учетом межсионных взаимодействий исследованы многочастичные потери захваченных в ловушку Пауля ионов. Метод позволяет исследовать динамику потерь для ловушки с количеством ионов до 30. Результаты расчетов подтверждены экспериментально с использованием ионов магния.
2. Измерена верхняя граница температуры иона Mg после цикла лазерного охлаждения методом анализа зависимости интенсивности флюоресценции иона от отстройки охлаждающего излучения от резонанса. Для обработки экспериментальных данных использовался профиль Фойгта, учитывающий, как уширение линии за счет эффекта Доплера, так и уширение мощностью. Верхняя граница температуры составила 39 мК при погрешности 5 мК.
3. Впервые предложен метод двойной электромагнитно индуцированной прозрачности для охлаждения ионов иттербия в основное колебательное состояние с использованием трех оптических полей. Произведен расчет

спектра поглощения иона с использованием статического решения уравнения Линдблада, получена зависимость среднего колебательного числа от частоты моды для различных параметров оптических полей. Метод позволит производить охлаждение ионов иттербия до колебательного состояния с $\langle n \rangle < 0,1$ в диапазоне секулярных частот от $\Omega_{\text{сек}} = 2\pi \times 0,9$ МГц до $\Omega_{\text{сек}} = 2\pi \times 2,5$ МГц.

Практическая значимость

Линейная ловушка Пауля с оптической системой регистрации ионов, созданная в рамках этой работы, может быть использована для реализации элементов квантовой логики в линейных цепочках ионов различных масс от ${}^9\text{Be}^+$ до ${}^{199}\text{Hg}^+$.

Программа для расчетов многочастичных потерь может быть использована для расчета динамики загрузки ловушек в различных ионных экспериментах и позволит подбирать оптимальные параметры загрузки ионов в ловушку.

Лазерное охлаждение кристаллов Mg^+ и исследование их колебательного спектра является необходимым шагом для проведения квантовых операций на сверхтонкой структуре ионов магния-25, имеющего ненулевой спин ядра.

Предложенный метод глубокого лазерного охлаждения иттербия может быть использован как в стандартах частоты для достижения глубокого режима Лэмба-Дике, так и в квантовых вычислителях на основе ионов для улучшения достоверности двухкубитных квантовых операций.

Результаты работы востребованы такими организациями как МГУ им. Ломоносова, МФТИ, АО РКС, ВНИИФТРИ, ООО МЦКТ, ИЛФ СО РАН, ЗАО “Время-Ч”.

Положения, выносимые на защиту:

1. Число захваченных ионов Mg^+ в созданную линейную квадрупольную ловушку Пауля с радиальной секулярной частотой $2\pi \times 0,16$ МГц и аксиальной циклической частотой $2\pi \times 0,08$ МГц экспоненциально уменьшается со временем удержания. При 16и изначально захваченных частицах постоянная времени составляет 1,7 сек при давлении в вакуумной камере 10^{-8} мбар. Постоянная времени определяется в основном кулоновским взаимодействием ионов друг с другом, что подтверждается численным моделированием.

2. При помощи лазерного охлаждения иона $^{24}\text{Mg}^+$ в созданной установке достигнута температура иона менее 39 мК. Верхняя граница температуры иона получена при помощи анализа сигнала люминесценции иона в зависимости от отстройки охлаждающего излучения от частоты перехода. Предложенный метод обеспечивает точность измерения верхней границы температуры иона не хуже 15% при используемых параметрах.
3. Расчеты, основанные на решении уравнения Линдблада, показывают, что метод двойной индуцированной электромагнитной прозрачности, примененный к иону $^{171}\text{Yb}^+$, позволит получить среднее колебательное число $\langle n \rangle$ ниже 0,1 в диапазоне секулярных частот от $\Omega_{\text{сек}} = 2\pi \times 0,9$ МГц до $\Omega_{\text{сек}} = 2\pi \times 2,5$ МГц.

Апробация работы. Результаты работы были представлены автором лично на 5 международных и российских научных конференциях и симпозиумах:

1. “Текущее состояние разработки и изготовления стандарта частоты на одиночных ионах $^{27}\text{Al}^+$ ”, И.А. Семериков Физика ультрахолодных атомов (21-22 декабря 2015, Новосибирск, Россия)
2. “Trapping of $^{27}\text{Al}^+$ and $^{25}\text{Mg}^+$ ions in a linear Paul trap for creation an optical frequency standard, based on $^1\text{S}_0 \rightarrow ^3\text{P}_0$ aluminum transition”, Iliya Semerikov, 3-ий объединённый симпозиум МФТИ-ФИАН-ИЭК(Токио) (20-23 октября 2015, Москва, ФИАН) https://sites.lebedev.ru/en/smfti/show.php?page_id=3998
3. “Multiparticle losses in a linear Paul trap”, Ilya Semerikov, European Conference on Atoms, Molecules and Photons (EGAS-ECAMP-12) (5-9 сентября 2016, Франкфурт, ФРГ)
4. “Many-particle losses in a linear Paul trap”, I. Semerikov, I. Zalivako, A. Borisenko, T. Shpakovsky, V. Sorokin, K. Khabarova, N. Kolachevskiy, Modern Problems of Laser Physics, MPLP (22-28 августа 2016, Новосибирск, Россия)
5. “On the way to robust laser cooled magnesium ion microwave frequency standard”, Ilya Semerikov, 4 -ий объединённый симпозиум МФТИ-ФИАН-ИЭК(Токио) (25-29 марта 2017, Токио, Япония)

Основные результаты работы опубликованы в трёх статьях в рецензируемых научных журналах, входящих в базу данных **Web of Science**, а также в трудах конференций, ссылки на которые приведены на стр. 21

Личный вклад. Все изложенные в данной работе результаты получены лично автором, либо при его непосредственном участии.

Содержание работы

Во введении вначале приводится краткая история создания радиочастотных ловушек и доплеровского охлаждения ионов, затем рассматриваются современные направления использования радиочастотных ловушек и ультрахолодных ионов в задачах квантовой логики. В конце обосновывается актуальность представляемой работы в рамках текущих исследований, использующих ультрахолодные ионы.

В первой главе описывается теория захвата и лазерного охлаждения ионов в линейной квадрупольной ловушке Пауля. В п. 1.1 рассматривается классическая теория работы линейной квадрупольной ловушки Пауля, рассматриваются классические уравнения движения заряженной частицы в радиочастотном квадрупольном потенциале и приводится их решение в приближении $\beta \ll 1$.

$$x(t) = 2AC_0 \cos\left(\frac{\beta\omega}{2}t\right) \left(1 - \frac{q}{2} \cos \omega t\right), \quad (1)$$

где x – координата иона, ω – частота напряжения прикладываемого к электродам ловушки, $2AC_0$ – амплитуда секулярных движений, $\beta = \sqrt{a + \frac{q^2}{2}}$, a и q – безразмерные параметры движения, $q = \frac{2eV_{ac}}{m\omega^2 r_0^2}$, e – заряд иона, m – его масса, r_0 – расстояние от поверхности электрода до центра ловушки, V_{ac} – амплитуда радиочастотного напряжения на электродах ловушки, $a = \frac{4eU_{dc}}{m\omega^2 r_0^2}$, U_{dc} – постоянная составляющая напряжения на электродах. Из решения классического уравнения движения видно, что движение иона в квадрупольном потенциале складывается из гармонического движения с секулярной частотой $\Omega_{сек} = \frac{\beta\omega}{2}$ и амплитудой $2AC_0$ и модуляции на частоте радиочастотного поля – микродвижения с амплитудой $2AC_0q$.

В п. 1.2 рассматривается взаимодействие иона в квадрупольном потенциале с оптическим полем. Вначале приводится квантовое рассмотрение движения иона в квадрупольном потенциале, далее добавляется взаимодействие двухуровневой системы с оптическим полем и выводится гамильтониан для иона, взаимодействующего с оптическим полем в режиме Лэмба-Дике в условиях низкого ангармонизма. В таком гамильтониане остаются 3 резонанса, соответствующие трем типам переходов: без изменения колебательного состояния $|n\rangle|g\rangle \leftrightarrow |n\rangle|e\rangle$, с увеличением колебательного числа $|n\rangle|g\rangle \leftrightarrow |n+1\rangle|e\rangle$ и с его уменьшением $|n\rangle|g\rangle \leftrightarrow |n-1\rangle|e\rangle$.

$$\hat{H}_c = \frac{\hbar}{2} \Omega'_{\text{раби}} (\hat{\sigma}_+ e^{i\phi} + \hat{\sigma}_- e^{-i\phi}), \quad (2)$$

$$\hat{H}_{\text{кбч}} = \frac{\hbar}{2} \Omega'_{\text{раби}} \eta_D (\hat{a} \hat{\sigma}_+ e^{i\phi} + \hat{a}^\dagger \hat{\sigma}_- e^{-i\phi}), \quad (3)$$

$$\hat{H}_{\text{сбч}} = \frac{\hbar}{2} \Omega'_{\text{раби}} \eta_D (\hat{a}^\dagger \hat{\sigma}_+ e^{i\phi} + \hat{a} \hat{\sigma}_- e^{-i\phi}). \quad (4)$$

Где $\eta_D = kx_0 = k \sqrt{\frac{\hbar}{2m\Omega_{\text{сек}}}}$ - параметр Лэмба-Дике, характеризующий отношение амплитуды нулевых колебаний одиночного иона в ловушке к длине волны излучения. $\Omega'_{\text{раби}}$ - частота Раби, \hat{a} , \hat{a}^\dagger - операторы рождения и уничтожения для колебаний иона в ловушке, $\Omega_{\text{сек}}$ - секулярная частота движения иона, $\Delta_{\text{св}}$ - отстройка излучения от перехода. Соответствующие частоты Раби:

$$\Omega_{n,n} = \Omega'_{\text{раби}} \quad (5)$$

$$\Omega_{n,n-1} = \Omega'_{\text{раби}} \sqrt{n} \eta_D \quad (6)$$

$$\Omega_{n,n+1} = \Omega'_{\text{раби}} \sqrt{n+1} \eta_D \quad (7)$$

Необходимым условием режима Лэмба-Дике является $\eta_D \sqrt{2\langle n \rangle + 1} \ll 1$ где $\langle n \rangle$ – среднее колебательное число иона в ловушке. Из этого рассмотрения следует, что в спектре поглощения и испускания одиночного иона в ловушке в режиме Лэмба-Дике возникают боковые частоты. При этом вероятность спонтанного распада без изменения колебательного числа примерно в $1/\sqrt{n} \eta_D$ раз выше чем для распадов с увеличением или уменьшением n . В п.1.3 рассматриваются два основных режима взаимодействия иона с излучением: режим с разрешенными боковыми частотами в котором естественная ширина линии свободного атома Γ много меньше секулярной частоты движения иона в ловушке $\Gamma \ll \Omega_{\text{сек}}$ и режим с неразрешенными боковыми частотами где $\Gamma > \Omega_{\text{сек}}$

В п. 1.4 описывается доплеровское охлаждение ионов в ловушке Пауля, приводится доплеровский предел температуры.

$$T_{\text{доп}} = \frac{\hbar \Gamma}{2k_b} = 3,8 \times 10^{-6} \left[\frac{K}{\text{МГц}} \right] \times \Gamma. \quad (8)$$

Пункт 1.5 посвящен методам определения температуры лазерно-охлажденных ионов. Перечисляются используемые методы определения температуры: измерение разности интенсивностей красной и синей боковых колебательных частот переходов, имеющих относительно узкие спектральные линии (естественная ширина перехода меньше секулярной частоты) в спектре поглощения частицы, метод определения температуры по размеру изображения получаемого от

одионого иона на камере, измерение амплитуды колебаний одионого иона методом синхронного детектирования и подробно рассматривается обобщение метода измерения температуры при помощи исследования спектра люминесценции одионого иона предлагающееся в данной работе. Для измерения температуры одионого иона используется доплеровская компонента профиля Фойгта аппроксимирующего спектр люминесценции иона. Температура может быть получена из выражения

$$T = \frac{mc^2}{k_B} \left(\frac{\sigma_T}{\nu_0} \right)^2 \quad (9)$$

Где σ_T - параметр гауссова распределения в профиле Фойгта, ν_0 - частота охлаждающего излучения, m – масса иона, k_B – постоянная Больцмана.

Результатом первой главы является вывод теоретических предпосылок для проектирования экспериментальной установки, проведения исследований по захвату и охлаждению ионов, а также расчету квантовой динамики ионов, взаимодействующих с лазерным излучением.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальной установки для охлаждения ионов, исследования колебательного спектра ионных кристаллов. В п. 2.1 описывается глубоковакуумная система для проведения экспериментов с ионами. Камера позволяет достигать уровня вакуума лучше 10^{-10} мбар. Камера обладает хорошим оптическим доступом, а электрические высоковакуумные вводы позволяют подводить все необходимые напряжения к ионной ловушке и вспомогательному оборудованию, установленному в вакуумной камере. Общий вид вакуумной системы представлен на Рис. 1

В п. 2.1.1 рассмотрены основные правила для проектирования линейных ловушек Пауля с малыми темпами нагревов, высокой гармоничностью поля и хорошим оптическим доступом. Также описывается устройство созданной ловушки Пауля и ее основные параметры. Общий вид ловушки представлен на Рис. 2. В 2.1.2 приводится численное моделирование электрических полей в созданной ловушке. На Рис. 3 представлены результаты численного моделирования потенциала вдоль оси x , его аппроксимация квадратичным потенциалом и идеальным квадрупольным. На Рис. 4 представлен результат численного моделирования для потенциала вдоль оси z .

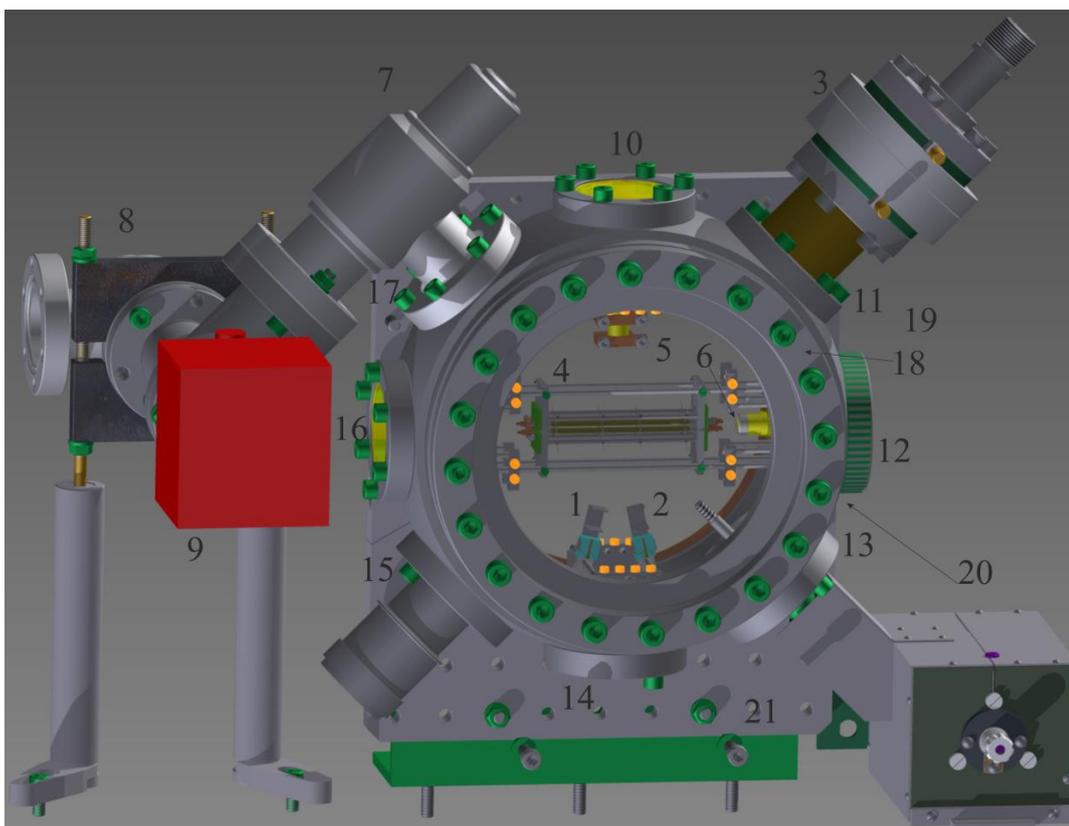


Рис. 1 Модель вакуумной камеры в сборе. Цифрами обозначены: 1,2 – атомные испарители, 3 – электронная пушка, 4 – линейная ловушка Пауля в сборе, 5 – верхний каналный электронный умножитель, 6 – каналный электронный умножитель на оси ловушки, 7,8 – высоковакуумный полностью металлический вентиль, 9 – ион-геттерный насос, 10,14,16 – кварцевые окна cf40, 11 – удлинитель cf40, 12 – дополнительный коаксиальный электрический ввод, 13 – электрический ввод высокой мощности, 15 – многштырьковый электрический высоковакуумный ввод, 17,18 – кварцевое окно cf160, 19 – система юстировки положения электронной пушки, 20 – высоковакуумная камера 21 – крепление вакуумной камеры

Из результатов моделирования следует, что потенциалы создаваемые вдоль осей $x - y$ и z в ловушке близки к идеальным квадрупольным и гармоническим потенциалам соответственно.

Пункт 2.1.3 посвящен системе генерации атомных пучков и ионизации электронным ударом. В нем описывается конструкция атомных испарителей, а также приведены и обоснованы используемые параметры электронного пучка. В пункте 2.1.4 описывается система регистрации ионов на основе каналных электронных умножителей и счетчика импульсов способная детектировать одиночные ионы с временным разрешением не хуже 20 нс.

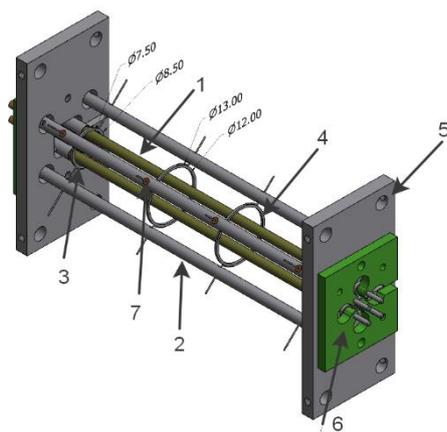


Рис. 2 Общий вид квадрупольной ловушки Пауля, изготовленной в ФИАНе. 1 – один из 4х цилиндрических электродов, используемых для радиального удержания, 2 – один из 4х электродов используемых для компенсации паразитных статических полей, 3 – один из двух крайних кольцевых электродов, используемый для аксиального удержания, 4 – один из двух центральных кольцевых электродов, используемый для аксиального удержания, 5 – пластина из нержавеющей стали, 6 – каптоновый держатель электродов ловушки, 7 – каптоновый изолятор

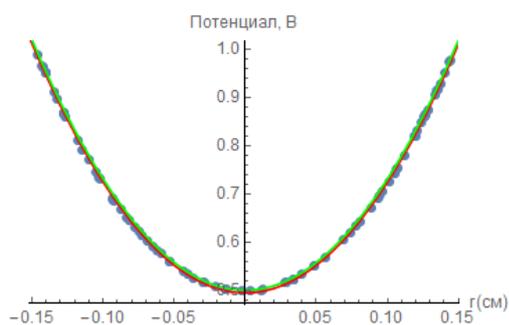


Рис. 3 Параболическая аппроксимация потенциала вдоль оси, соединяющей центры электродов с потенциалом 1 В. Точками показаны результаты численного моделирования, красная кривая соответствует аппроксимации численного решения. Зеленая кривая соответствует идеальному квадрупольному потенциалу с $r_0 = 1.5$ мм.

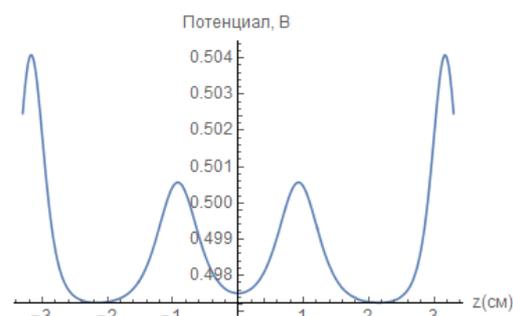


Рис. 4 Результаты численного моделирования потенциала вдоль оси z на оси ловушки. Видны 3 зоны удержания: центральная, левая и правая. К каждому из цилиндрических колец приложен потенциал 1 В.

Пункт 2.2.1 посвящен радиочастотному питанию ловушки и содержит в себе описание теории работы резонансного трансформатора, а также описывает исследования двух изготовленных резонансных трансформаторов различной конструкции. По результатам этого пункта выводится максимально доступная амплитуда радиочастотного напряжения ловушки с используемым усилителем и

резонансным трансформатором: $V_{ac_{\max}} = 590$ В. Пункт 2.3 посвящен краткому описанию используемой в доплеровском охлаждении лазерной системы на основе коммерческого диодного лазера с рупорным усилителем, выдающим 830 мВт на длине волны 1120 нм. Далее производится 2 удвоения частоты. В результате получается 10 мВт на длине волны 280 нм. В пункте 2.4 описана используемая система оптической регистрации сигнала люминесценции одиночных ионов на основе высокоапертурного объектива из кварца Ку-1, ПЗС матрицы с электронным усилением и фотоэлектронного умножителя, рассчитаны ее критические параметры. В пункте 2.6 обсуждаются возможные применения созданной системы удержания и детектирования одиночных ионов. В частности, получено ограничение на массу однозарядных ионов доступных для захвата. В пункте 2.7 приводятся основные результаты второй главы состоящие в создании системы для захвата, охлаждения, детектирования одиночных ионов $^{24}\text{Mg}^+$ с уровнем вакуума $P_{\min} = 1 \times 10^{-10}$ мбар, телесным углом сбора излучения от одиночного иона $4\pi \times 0.033$ ср, 3х секционной ловушкой Пауля, позволяющей работать с ионами с широким диапазоном масс, включающим в себя ионы от Ве до Нг, а атомные источники и электронная пушка позволяют проводить ионизацию электронным ударом любых ионов используемых в квантовой логике. Лазерная система позволяет получать до 10 мВт излучения на длине волны 280 нм, что является достаточным для доплеровского охлаждения $^{24}\text{Mg}^+$. При модернизации лазерной системы созданная установка позволит проводить квантово-логические операции с широким набором ионов.

Третья глава посвящена эксперименту по исследованию Вигнеровских кристаллов в созданной ловушке. Пункт 3.1.1 посвящен проверке системы регистрации ионов путем измерения зависимости количества задетектированных ионов остаточного газа в зависимости от тока электронной пушки. Также в этих экспериментах проверялась система ионизации электронным ударом. Линейная зависимость числа отсчетов на каналатроне от тока электронной пушки свидетельствует о корректной работе системы детектирования ионов и ионизации электронным ударом. В пункте 3.1.2 проверяется совместная работа системы ионизации электронным ударом и системы генерации атомного пучка магния. Для этого измеряется зависимость числа отсчетов на каналатроне в зависимости от тока нагревателя атомной пушки. Резкое увеличение числа отсчетов при превышении порогового тока через нагреватель атомной пушки подтверждает корректную совместную работу систем генерации атомного пучка и ионизации электронным ударом. В пункте 3.1.3 описаны эксперименты по загрузке ионов в

квадрупольную ловушку и исследование числа удерживаемых ионов в зависимости от времени удержания без использования лазерного охлаждения. Результаты этих экспериментов приведены на Рис. 5 и Рис. 6.

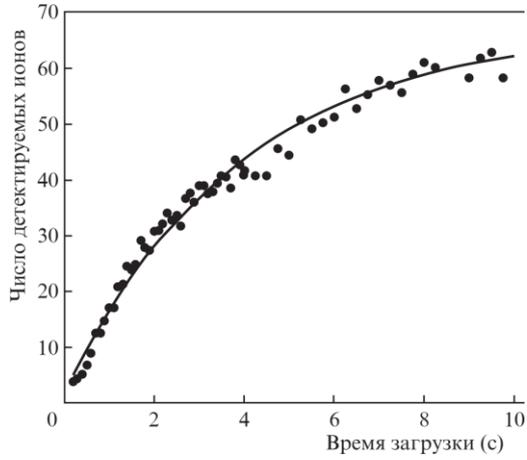


Рис. 5 Зависимость числа детектируемых частиц от времени загрузки ловушки.

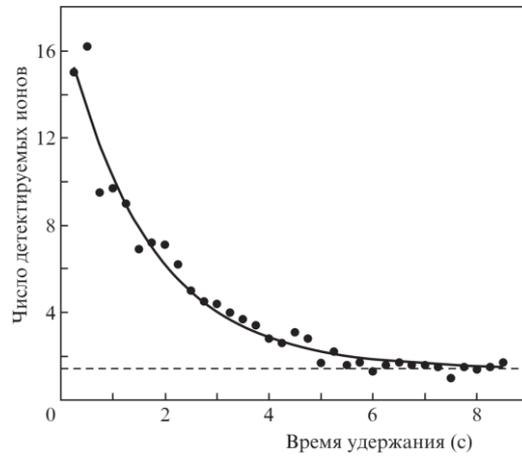


Рис. 6 Зависимость числа регистрируемых частиц от времени их удержания. Линией показана экспоненциальная аппроксимация данных.

В пункте 3.1.4 обсуждаются механизмы потерь ионов из ловушки в отсутствие охлаждения, предложен механизм многочастичных потерь связанный с взаимным кулоновским взаимодействием ионов, произведено численное моделирование такого механизма потерь с использованием численного решения уравнений движения учитывающих взаимодействие каждого иона с каждым:

$$\frac{d^2x_k}{d\tau^2} + 2q \cos(2\tau) x_k = \frac{e^2}{\pi\epsilon_0\omega^2m} \sum_{i=1, i \neq k}^N \frac{x_k - x_i}{r_{ik}^{3/2}} \quad (10)$$

$$\frac{d^2y_k}{d\tau^2} - 2q \cos(2\tau) y_k = \frac{e^2}{\pi\epsilon_0\omega^2m} \sum_{i=1, i \neq k}^N \frac{y_k - y_i}{r_{ik}^{3/2}} \quad (11)$$

$$\frac{d^2z_k}{d\tau^2} + \frac{4\omega_z^2}{\omega^2} z_k = \frac{e^2}{\pi\epsilon_0\omega^2m} \sum_{i=1, i \neq k}^N \frac{z_k - z_i}{r_{ik}^{3/2}} \quad (12)$$

Где x_k, y_k, z_k – координаты k-го иона, r_{ik} – расстояние между i-м и k-м ионами, ω_z – циклическая частота колебаний иона вдоль оси z , $\tau = \omega t/2$ – безразмерный параметр времени. При пересечении границы расчетной области ион считается вылетевшим из ловушки и больше не учитывается в вычислениях. Потери ионов в этих вычислениях составляли около 3 с^{-1} при 8 удерживаемых частицах, что

согласуется с результатами эксперимента. Также были проведены оценки для механизма потерь за счет обмена зарядом с нейтральными атомами буферного газа. Характерное время для потерь по этому механизму было оценено на уровне 10^4 с.

По результатам экспериментов, описанных в пункте 3.1 было получено облако ионов с временем жизни достаточным для применения лазерного охлаждения.

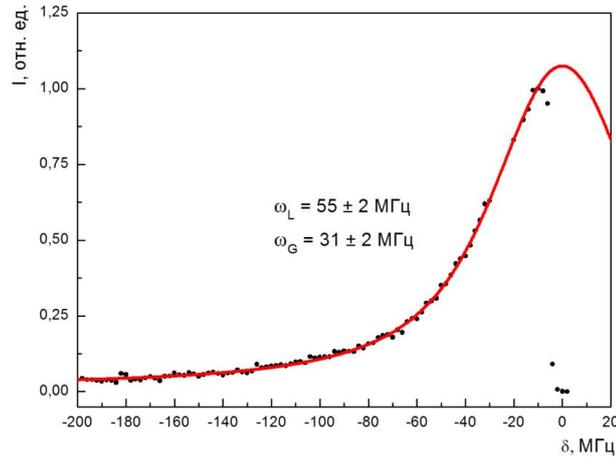


Рис. 7 Интенсивность флуоресценции одиночного иона при сканировании отстройки частоты охлаждающего излучения из красной области в синюю. Резкий спад интенсивности вблизи резонанса соответствует делокализации иона из-за нагрева. Красной линией представлен результат аппроксимации данных профилем Фойгта. Ширина лоренцевской части контура составила $\gamma_L = 110 \pm 4$ МГц, а гауссовой - $\sigma_G = 13 \pm 0.85$ МГц.

Пункт 3.2 посвящён экспериментам по лазерному охлаждению ионов $^{24}\text{Mg}^+$ в линейной квадрупольной ловушке. В пункте 3.2.1 описана энергетическая структура уровней однократно ионизованного иона 24 изотопа магния, состоящая из одного дипольно-разрешенного перехода $^2S_{1/2} \rightarrow ^2P_{3/2}$ на длине волны 280 нм с естественной шириной линии $\Gamma_{mg} = 2\pi \times 41$ МГц используемого для доплеровского охлаждения. В пункте 3.2.2 приведены оценки на температуру иона магния полученные из анализа профиля линии охлаждающего перехода. Зависимость интенсивности флуоресценции от частоты отстройки охлаждающего излучения аппроксимируется профилем Фойгта (Рис. 7). По параметру ширины гауссовой составляющей производится оценка температуры иона. Верхняя граница температуры, полученная этим методом для одиночного иона $^{24}\text{Mg}^+$ составила

$$T = 39 \pm 5 \text{ мК.} \quad (13)$$

Пункт 3.2.3 посвящен описанию экспериментов по исследованию спектра колебаний одиночного иона и кристалла из двух ионов. Для этого излучение охлаждающего лазера модулировалось с секулярной частотой иона. В случае совпадения частоты модуляции охлаждающего излучения изображение кристалла на камере расплывается. Примеры такого размытия приведены на Рис. 8.

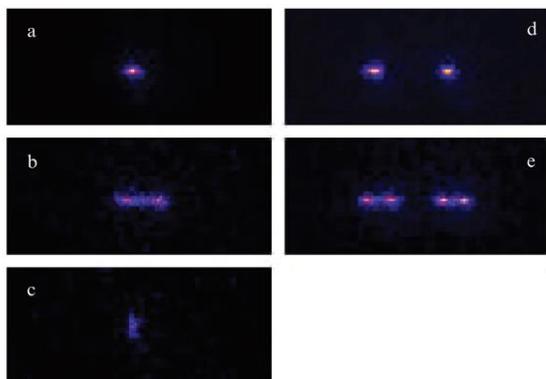


Рис. 8 Фотографии одиночного иона $^{24}\text{Mg}^+$ (a) и ионного кристалла из 2х ионов(d). Также примеры размытия изображения иона и кристалла при модуляции охлаждающего излучения на собственной частоте колебаний иона (кристалла) по оси z (b,e) и x (c)

Собственные частоты колебаний иона зависят от амплитуды радиочастотного напряжения на электродах ловушки, потенциала на удерживающих кольцах и числа ионов в кристалле. Для одиночного иона магния и $V_{ax} = 500$ В, измеренная секулярная частота по оси z равняется $\Omega_z = 2\pi(51,5 \pm 1,0)$ кГц. Также исследовалась зависимость радиальной секулярной частоты иона от амплитуды радиочастотного напряжения (Рис. 9).

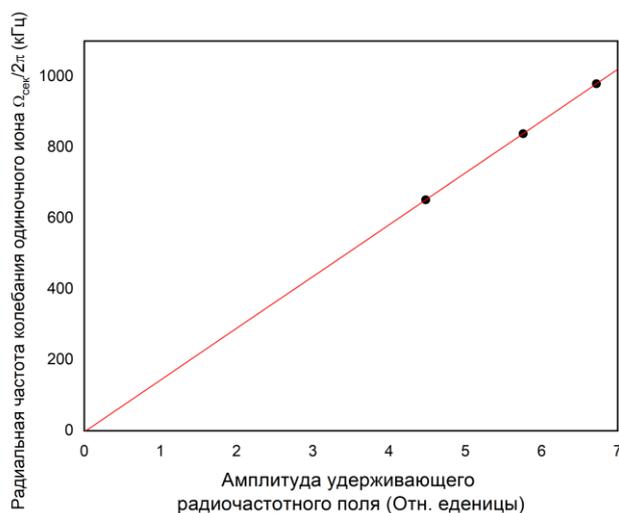


Рис. 9 Зависимость секулярной частоты движения иона от напряжения подаваемого на усилитель

Результатом пункта 3.2 является измерение температуры лазерно-охлажденного иона $T = 40 \pm 4$ мК и спектра колебаний простых ионных кристаллов.

В четвертой главе рассматривается глубокое лазерное охлаждение методом двойной индуцированной прозрачности применительно к иону $^{171}\text{Yb}^+$. В пункте 4.1 производится обзор методов глубокого лазерного охлаждения ионов: охлаждение на узком спектроскопическом переходе, охлаждение с использованием вынужденного рамановского процесса, охлаждение методом индуцированной электромагнитной прозрачности.

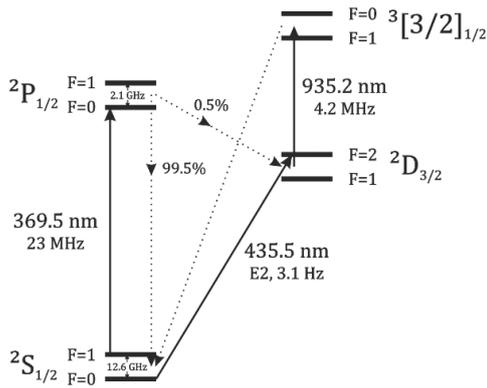


Рис. 10 Частичная схема уровней $^{171}\text{Yb}^+$

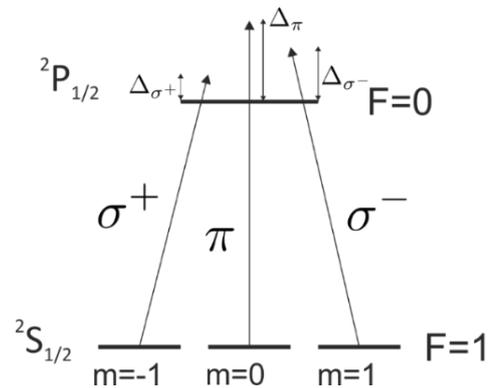


Рис. 11 Схема уровней $^{171}\text{Yb}^+$ используемая в расчетах глубокого лазерного охлаждения.

Пункт 4.2.1 описывает структуру энергетических уровней иттербия и конкретизирует используемую в расчетах модель используемых уровней. В пункте 4.2.2 производится вычисление стационарного распределения населенности энергетических уровней иона $^{171}\text{Yb}^+$ в присутствии трех оптических полей методом решения обобщенных оптических уравнений Блоха в стационарном случае. Результатом этих вычислений является зависимость населенности возбужденного состояния $^2P_{1/2}(F=0)$ от частоты отстройки π излучения от резонанса при фиксированных параметрах σ^+ и σ^- излучения. На рисунке Рис. 12 приведена такая зависимость для случая $\Delta_{\sigma^+} = 2\pi \times 1$ МГц, $\Delta_{\sigma^-} = 2\pi \times 5$ МГц, $\Omega_{\sigma^+} = 5\Gamma_{\text{Yb}}$, $\Omega_{\sigma^-} = 0.5\Gamma_{\text{Yb}}$, $\Omega_{\pi} = 3\Gamma_{\text{Yb}}$. где $\Delta_{\sigma^{\pm}}$ - отстройки от перехода σ^+ и σ^- излучений соответственно, $\Omega_{\sigma^{\pm},\pi}$ - частоты Раби для соответствующих излучений, пропорциональные их мощности, Γ_{Yb} - естественная ширина линии в иттербии. На рисунке Рис. 13 приведены результаты расчетов с аналогичными параметрами, но в этом случае $\Omega_{\sigma^-} = 0.1\Gamma_{\text{Yb}}$.

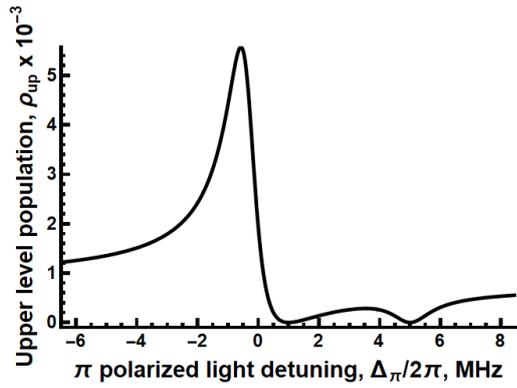


Рис. 12 населенность верхнего уровня от отстройки линейно поляризованного излучения $\Omega_{\sigma^-} = 2,5 \Gamma$, $\Omega_{\sigma^+} = 25 \Gamma$, $\Omega_{\pi} = 15 \Gamma$; $\Delta_{\sigma^+} = 2\pi \times 1 \text{ МГц}$, $\Delta_{\sigma^-} = 2\pi \times 5 \text{ МГц}$.

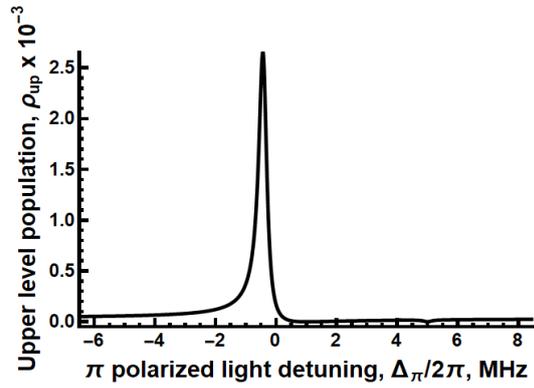


Рис. 13 населенность верхнего уровня от отстройки линейно поляризованного излучения $\Omega_{\sigma^-} = 0,5 \Gamma$, $\Omega_{\sigma^+} = 25 \Gamma$, $\Omega_{\pi} = 15 \Gamma$; $\Delta_{\sigma^+} = 2\pi \times 1 \text{ МГц}$, $\Delta_{\sigma^-} = 2\pi \times 5 \text{ МГц}$.

Из рисунков видно, что при помощи параметров излучений можно добиваться различных характеров зависимости населенности от отстройки π излучения. Так нули заселенности соответствуют отстройке Δ_{σ^+} и Δ_{σ^-} , а ширина пика обратно пропорциональна мощности σ^+ излучения.

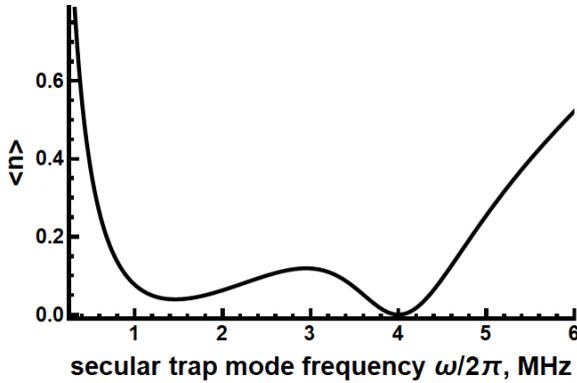


Рис. 14 Зависимость среднего колебательного числа от секулярной частоты моды колебаний. $\Omega_{\sigma^-} = 2,5 \Gamma$, $\Omega_{\sigma^+} = 25 \Gamma$, $\Omega_{\pi} = 15 \Gamma$; $\Delta_{\sigma^+} = 2\pi \times 1 \text{ МГц}$, $\Delta_{\sigma^-} = 2\pi \times 5 \text{ МГц}$, $\Delta_{\pi} = 2\pi \times 1 \text{ МГц}$.

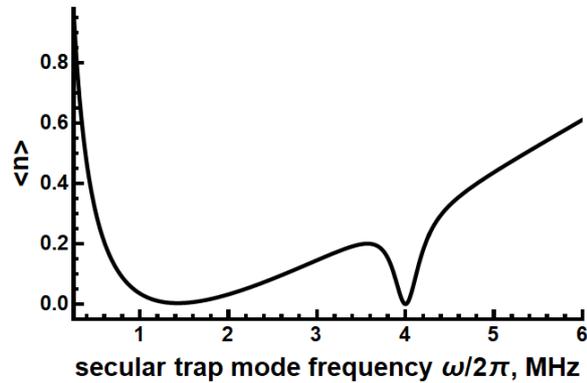


Рис. 15 Зависимость среднего колебательного числа от секулярной частоты моды колебаний. $\Omega_{\sigma^-} = 0,5 \Gamma$, $\Omega_{\sigma^+} = 25 \Gamma$, $\Omega_{\pi} = 15 \Gamma$; $\Delta_{\sigma^+} = 2\pi \times 1 \text{ МГц}$, $\Delta_{\sigma^-} = 2\pi \times 5 \text{ МГц}$, $\Delta_{\pi} = 2\pi \times 1 \text{ МГц}$.

В подпункте 4.2.3 на основании вычислений приведенных в пунктах 4.1.1 и 4.2.2 производится вычисление стационарного среднего колебательного числа для $^{171}\text{Yb}^+$ в зависимости от параметров ловушки и охлаждающего излучения. Итоговое выражение для среднего колебательного числа принимает вид

$$\langle n \rangle_{fin} = \frac{\rho_{44}(\Delta_{\pi}) + \rho_{44}(\Delta_{\pi} - \Omega_{сек})}{\rho_{44}(\Delta_{\pi} + \Omega_{сек}) - \rho_{44}(\Delta_{\pi} - \Omega_{сек})}. \quad (14)$$

Здесь $\rho_{44}(\Delta)$ – зависимость вычисленная в п 4.2.2.

Результаты вычисления среднего колебательного числа с параметрами излучения аналогичными приведенным в п 4.2.2 представлены на Рис. 14 и Рис. 15. Результат полученный при более слабом σ^- излучении позволяет добиться более низких значений $\langle n \rangle_{min} = 0.003$, но в более узком диапазоне секулярных частот. Минимальное значение среднего колебательного числа получаемое в расчетах с большим Ω_{σ^-} больше $\langle n \rangle_{min} = 0.04$, но при этом диапазон доступных для эффективного охлаждения частот также выше. Представленные результаты расчетов показывают возможность эффективного охлаждения иона $^{171}\text{Yb}^+$ с использованием метода двойной индуцированной прозрачности.

В заключении приводятся основные результаты работы, которые состоят в следующем:

1. Спроектирована линейная ловушка Пауля с квадратичным потенциалом вдоль оси ловушки в области $z \in [-3 \text{ мм}, 3 \text{ мм}]$ и двумерным квадрупольным потенциалом в ортогональной плоскости в области $x, y \in [-1,4 \text{ мм}, 1,4 \text{ мм}]$. Ловушка обеспечивает эффективный оптический доступ. Телесный угол, доступный для сбора излучения при помощи объектива составляет $\Omega_{\text{опт}} = 0,43 \text{ ср}$. Произведено численное моделирование электрических полей в ловушке. Вычисленные геометрические факторы составили $\kappa_z = 33,2 \text{ м}^{-2}$ (22), $\kappa_x = 0,996$ (28).
2. На основании расчетов создана система для удержания ионов в ловушке Пауля и электронной регистрации ионов, размещенная в вакуумной камере с остаточным давлением лучше 10^{-10} мбар. Регистрация отдельных заряженных частиц производится при помощи канальных электронных умножителей и счетчика импульсов с временным разрешением 20 нс. Регистрация люминесценции от одиночных ионов производится с эффективностью лучше 0,15% в диапазоне длин волн от 200 до 1000 нм. с разрешением порядка 3 мкм в районе области удержания ионов на длине волны 280 нм. Рассчитан и создан резонансный трансформатор для питания ловушки Пауля. Максимальная амплитуда напряжения на электродах составляет около 1000 В при частоте около 18 МГц. Реализована система ионизации нейтральных атомов электронным ударом. Энергия электронного пучка 25-500 эВ, максимальный ток 1 мА.

3. Произведена загрузка ионов магния в ловушку Пауля. Измерены скорость загрузки и время жизни неохлажденных ионов в ловушке в условиях глубокого вакуума. Экспериментально при помощи каналотронов зарегистрировано до 60 ионов в ловушке при времени загрузки 10 с.
4. Число захваченных ионов Mg^+ в линейную квадрупольную ловушку Пауля с радиальной секулярной частотой $2\pi \times 0,87$ МГц и аксиальной циклической частотой $2\pi \times 100$ кГц экспоненциально уменьшается со временем удержания. При 16 изначально захваченных частицах постоянная времени составляет 1,7 сек и при давлении в вакуумной камере 10^{-8} мбар. Оценен темп потерь иона из ловушки по механизму перезарядки при столкновении с атомом остаточного газа. Произведено численное моделирование динамики 30 ионов в линейной ловушке Пауля с учетом кулоновского взаимодействия между ионами. Оценена скорость потерь ионов из ловушки засечёт такого многочастичного взаимодействия. Скорость потерь составляют порядка 3 с^{-1} при 8и удерживаемых частицах с учетом начальных условий загрузки.
5. Разработана и изготовлена лазерная система для доплеровского охлаждения иона $^{24}Mg^+$. Выходная мощность лазерного излучения на длине волны 280 нм составила 10 мВт. Произведено доплеровское охлаждение цепочки из 11 ионов $^{24}Mg^+$ в линейной ловушке Пауля.
6. Измерены секулярные частоты для 1 и 2 ионов соответственно. Измеренные частоты с точностью до погрешности совпадают с теоретически предсказанными частотами для квадратичного потенциала, что подтверждает высокую гармоничность поля в созданной ловушке.
7. Из зависимости флюоресценции иона от отстройки охлаждающего излучения от резонанса произведена верхняя оценка температуры охлажденного иона $T = 39 \pm 5$ мК.
8. Проведено исследование стационарной населенности уровня $^2P_{1/2}(F = 0)$ энергии в ионе $^{171}Yb^+$ в присутствии трех сфазированных оптических полей. Произведен расчет минимально достижимого среднего колебательного числа иона в ловушке при глубоком охлаждении методом двойной индуцированной прозрачности в зависимости от частот колебаний иона в ловушке и параметров охлаждающих излучений. Показано, что метод двойной индуцированной прозрачности, примененный к иону $^{171}Yb^+$, позволит получить среднее колебательное число $\langle n \rangle$ ниже 0,1 в диапазоне секулярных частот от $\Omega_{\text{сек}} = 2\pi \times 0,9$ МГц до $\Omega_{\text{сек}} = 2\pi \times 2,5$ МГц.

Публикации автора по теме диссертации:

Научные журналы, входящие в базу данных *Web of Science*:

1. И. А. Семериков, И. В. Заливакоа, Т. В. Шпаковский, А. С. Борисенко, К. Ю. Хабарова, В. Н. Сорокина, Н. Н. Колачевский/ Многочастичные потери в линейной квадрупольной ловушке Пауля // Квантовая электроника – 2016 – Т. 46, № 10 – с.935-940.
2. И. В. Заливако, А. С. Борисенко, И. А. Семериков, К. Ю. Хабарова, Н. Н. Колачевский/ Доплеровское лазерное охлаждение и исследование колебательного спектра ионов $^{24}\text{Mg}^+$ в линейной ловушке Пауля// Квантовая электроника – 2018 – Т. 48, № 5 – с.448-452.
3. I. A. Semerikov I. V. Zalivako A. S. Borisenko K. Y. Khabarova N. N. Kolachevsky/ EIT Ground State Cooling Scheme of $^{171}\text{Yb}^+$ Based on the $^2\text{S}_{1/2} \rightarrow ^2\text{P}_{1/2}$ Cooling Transition// Journal of Russian Laser Research – 2018 – Vol. 39, Iss. 6 – pp.568-574.

Тезисы докладов в сборниках трудов конференций:

1. I. Semerikov, I. Zalivako, A. Borisenko, T. Shpakovsky, V. Sorokin, K. Khabarova, N. Kolachevsky/ Many-particle losses in a linear Paul trap //MODERN PROBLEMS OF LASER PHYSICS MPLP-2016. – Новосибирск, Россия. – 2016. – С. 234.
2. I. Semerikov/ Multiparticle losses in a linear Paul trap// 12 European Conference on Atoms, Molecules and Photons – Франкфурт-на-Майне, Германия. – 2016. – С. 523
3. I. Semerikov/ Trapping of $^{27}\text{Al}^+$ and $^{25}\text{Mg}^+$ ions in a linear Paul trap for creation an optical frequency standard, based on $^1\text{S}_0 \rightarrow ^3\text{P}_0$ aluminum transition// III International workshop MIPT (Moscow, Russia) - UEC (Tokyo, Japan): atomic, molecular and optical physics - Москва. – 2015. – С. 42

Список литературы

1. DiVincenzo D.P. Two-bit gates are universal for quantum computation // *Phys. Rev. A*. 1995. Vol. 51, № 2. P. 1015–1022.
2. Cirac J.I., Zoller P. Quantum computations with cold trapped ions // *Phys. Rev. Lett.* 1995. Vol. 74, № 20. P. 4091–4094.
3. Monroe C. et al. Demonstration of a fundamental quantum logic gate // *Phys. Rev. Lett.* 1995. Vol. 75, № 25. P. 4714–4717.
4. Turchette Q.A. et al. Deterministic entanglement of two trapped ions // *Phys. Rev. Lett.* 1998. Vol. 81, № 17. P. 3631–3634.
5. Sackett C.A. et al. Experimental entanglement of four particles // *Nature*. 2000. Vol. 404, № 6775. P. 256–259.
6. Schmidt-Kaler F. et al. Realisation of the Cirac-Zoller controlled-NOT quantum gate // 2003 *Eur. Quantum Electron. Conf. EQEC 2003*. 2003. Vol. 422, № March. P. 384.
7. Safavi-Naini A. et al. Selected for a Viewpoint in Physics Microscopic model of electric-field-noise heating in ion traps // *Phys. Rev. A*. 2011. Vol. 84. P. 23412.
8. Dubessy R., Coudreau T., Guidoni L. Electric field noise above surfaces: A model for heating-rate scaling law in ion traps // *Phys. Rev. A - At. Mol. Opt. Phys.* 2009. Vol. 80, № 3. P. 031402.
9. Deslauriers L. et al. Scaling and suppression of anomalous heating in ion traps // *Phys. Rev. Lett.* 2006. Vol. 97, № 10. P. 103007.
10. Daniilidis N. et al. Erratum: Fabrication and heating rate study of microscopic surface electrode ion traps // *New Journal of Physics*. 2012. Vol. 14. P. 013032.
11. Labaziewicz J. et al. Suppression of heating rates in cryogenic surface-electrode ion traps // *Phys. Rev. Lett.* 2008. Vol. 100, № 1. P. 013001.
12. Brandl M.F. et al. Cryogenic setup for trapped ion quantum computing // *Rev. Sci. Instrum.* AIP Publishing LLC, 2016. Vol. 87, № 11. P. 113103.
13. Lakhmanskiy K. et al. Observation of superconductivity and surface noise using a single trapped ion as a field probe // *Phys. Rev. A*. 2019. Vol. 99, № 2. P. 023405.
14. Daniilidis N. et al. Surface noise analysis using a single-ion sensor // *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.* 2014. Vol. 89, № 24. P. 1–7.
15. McKay K.S. et al. Ion-trap electrode preparation with Ne⁺ bombardment // *arXiv Prepr.* 1406.1778. 2014. P. 1–4.
16. Allcock D.T.C. et al. Reduction of heating rate in a microfabricated ion trap by pulsed-laser cleaning // *New J. Phys.* 2011. Vol. 13. P. 123023.

17. Sørensen A., Mølmer K. Entanglement and quantum computation with ions in thermal motion // *Phys. Rev. A - At. Mol. Opt. Phys.* 2000. Vol. 62, № 2. P. 11.
18. Sørensen A., Mølmer K. Quantum computation with ions in thermal motion // *Phys. Rev. Lett.* 1999. Vol. 82, № 9. P. 1971–1974.
19. Lekitsch B. et al. Blueprint for a microwave trapped ion quantum computer // *Sci. Adv.* 2017. Vol. 3, № 2. P. 1–12.
20. Home J.P. et al. Complete methods set for scalable ion trap quantum information processing // *Science (80-.)*. American Association for the Advancement of Science, 2009. Vol. 325, № 5945. P. 1227–1230.
21. Olmschenk S. et al. Quantum Teleportation Between Distant Matter Qubits // *Science (80-.)*. 2009. Vol. 323, № 5913. P. 486–489.
22. Carsjens M. et al. Surface-electrode Paul trap with optimized near-field microwave control // *Appl. Phys. B Lasers Opt.* Springer Berlin Heidelberg, 2014. Vol. 114, № 1–2. P. 243–250.
23. Amini J.M. et al. Toward scalable ion traps for quantum information processing // *New J. Phys.* 2010. Vol. 12. P. 1–15.
24. Ospelkaus C. et al. Trapped-ion quantum logic gates based on oscillating magnetic fields // *Phys. Rev. Lett.* 2008. Vol. 101, № 9. P. 1–4.
25. Weidt S. et al. Trapped-Ion Quantum Logic with Global Radiation Fields // *Phys. Rev. Lett.* American Physical Society, 2016. Vol. 117, № 22. P. 220501.
26. Schindler P. et al. Experimental repetitive quantum error correction // *Science (80-.)*. American Association for the Advancement of Science, 2011. Vol. 332, № 6033. P. 1059–1061.
27. Erhard A. et al. Characterizing large-scale quantum computers via cycle benchmarking // *arXiv Prepr. arXiv1902.08543*. 2019. P. 1–13.
28. Gaebler J.P. et al. High-Fidelity Universal Gate Set for Be ⁹ + Ion Qubits // *Phys. Rev. Lett.* 2016. Vol. 117, № 6. P. 1–5.
29. Keselman A. et al. High-fidelity state detection and tomography of a single-ion Zeeman qubit // *New J. Phys.* 2011. Vol. 13. P. 073027.
30. Toyoda K. et al. Quantum gate using qubit states separated by terahertz // *Phys. Rev. A - At. Mol. Opt. Phys.* 2010. Vol. 81, № 3. P. 1–3.
31. Tan T.R. et al. Multi-element logic gates for trapped-ion qubits // *Nature*. 2015. Vol. 528, № 7582. P. 380–383.
32. Debnath S. et al. Demonstration of a small programmable quantum computer with atomic qubits // *Nature*. Nature Publishing Group, 2016. Vol. 536, № 7614. P. 63–66.
33. Bermudez A. et al. Assessing the progress of trapped-ion processors towards

- fault-tolerant quantum computation // Phys. Rev. X. 2017. Vol. 7, № 4. P. 1–41.
34. Ballance C.J. et al. High-Fidelity Quantum Logic Gates Using Trapped-Ion Hyperfine Qubits // Phys. Rev. Lett. 2016. Vol. 117, № 6. P. 1–6.
 35. Wang Y. et al. Single-qubit quantum memory exceeding ten-minute coherence time // Nat. Photonics. Nature Publishing Group, 2017. Vol. 11, № 10. P. 646–650.
 36. Ratcliffe A.K. et al. Scaling Trapped Ion Quantum Computers Using Fast Gates and Microtraps // Phys. Rev. Lett. 2018. Vol. 120, № 22. P. 1–6.
 37. Landsman K.A. et al. Two-qubit entangling gates within arbitrarily long chains of trapped ions. 2019. P. 1–10.