

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук

На правах рукописи

Заливако Илья Владимирович

Лазерно-охлажденные ионы магния и иттербия для задач метрологии и квантовых вычислений

Специальность 1.3.19 – Лазерная физика

Автореферат на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Москва — 2022

Работа выполнена в Физическом институте им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН).

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

Официальные
оппоненты: **Кулик Сергей Павлович,**
доктор физико-математических наук,
профессор, научный руководитель Центра
квантовых технологий Московского
государственного университета им. М.В.
Ломоносова

Бетеров Илья Игоревич,
кандидат физико-математических наук, доцент,
старший научный сотрудник лаборатории
нелинейных резонансных процессов и лазерной
диагностики Института физики
полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского
отделения Российской Академии Наук

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ»

Защита состоится «19» сентября 2022 г. в 10:00 часов на заседании
диссертационного совета 24.1.262.01 на базе ФИАН по адресу: 119991, г.
Москва, Ленинский проспект, д. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН, а также на сайте
института www.lebedev.ru

Автореферат разослан « ____ » _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.262.01,
доктор физико-математических наук

А. С. Золотько

Общая характеристика работы

Диссертация посвящена поиску и исследованию новых перспективных способов загрузки ионных ловушек Пауля, кодирования квантовой информации в энергетической структуре ионов, а также теоретическому исследованию характеристик нового микроволнового репера частоты на основе ионов магния.

Актуальность работы

Прецизионная спектроскопия атомов и ионов уже много десятилетий является одним из важнейших инструментов для изучения фундаментальных законов природы. Изучение спектров различных элементов послужило важным шагом для формулирования базовых принципов квантовой механики, а экспериментальное обнаружение, например, лэмбовского сдвига в спектре водорода [1] легло в основу появления КЭД. Сегодня спектроскопия продолжает оставаться одним из мощных методов исследования фундаментальных теорий. Так, к примеру, прецизионная спектроскопия атомов мюонного водорода, направленная на уточнение значения радиуса протона, в 2013 году [2] обнаружила результаты, существенно противоречащие значению, полученному при исследовании обыкновенного водорода, а также экспериментов по рассеянию электронов, что получило в литературе название «загадка зарядового радиуса протона». Это привело к обширному обсуждению данного явления в научной литературе и проведению целого ряда новых уточняющих экспериментов [3–5]. Другим примером является исследование спектров многозарядных ионов, где вклад поправок квантовой электродинамики оказывается более существенным, чем в случае нейтральных атомов [6,7], а значит возможные отклонения от предсказанных теорией значений – более заметными. Эти и другие спектроскопические эксперименты позволяют подтвердить верность господствующих сегодня фундаментальных теорий на все более и более глубоком уровне [8–11].

Помимо фундаментальных научных приложений спектроскопические методы имеют широчайшее практическое применение. Это, например, высокочувствительные сенсоры [12,13] и стандарты частоты. Так, посредством цезиевых фонтанов [14] сейчас реализуется единица времени СИ – секунда, а создание в конце прошлого века фемтосекундной гребенки частот [15] позволило на несколько порядков улучшить характеристики атомных часов благодаря использованию в качестве опоры оптических переходов [16–

18] вместо микроволновых. Компактные микроволновые стандарты частоты на нейтральных атомах уже давно используются на спутниках систем глобального позиционирования [19] и в датацентрах [20] для обеспечения синхронизации баз данных. Также активно ведутся работы над созданием компактных и коммерчески доступных ионных микроволновых стандартов частоты как для наземных [21], так и космических применений [22], обладающие более высокими показателями стабильности и точности. Оптические часы также начали превращаться из требовательных к внешним условиям лабораторных установок в транспортируемые автоматические устройства [23,24] (такие работы успешно ведутся и в ФИАН [25]).

Ещё одним из важнейших приложений методов атомной спектроскопии, получившим большое распространение в последние несколько десятилетий, являются квантовые вычисления [26]. Возможность захватить и локализовать атомы и ионы при помощи разного рода ловушек [27,28], их охлаждения до ультранизких температур [29], изоляции от внешней среды [30], их идентичность и другие свойства частиц делает их перспективной платформой для квантовых вычислений. Были продемонстрированы квантовые симуляторы на основе 256 нейтральных атомов в массиве оптических пинцетов [31], а также универсальные квантовые вычислители из более чем 11 ионных кубитов [32].

Ионы, захваченные в радиочастотные ловушки Пауля [33], имеют ряд преимуществ в некоторых областях перед нейтральными атомами. Во-первых, как уже было отмечено ранее, вклад некоторых поправок квантовой электродинамики в структуру спектра ионов оказывается выше, нежели у нейтральных частиц, что делает ряд экспериментов более чувствительными. Во-вторых, наличие заряда позволяет удерживать и охлаждать частицы более простыми методами, требующими заметно меньшее количество лазерных пучков и накладывающих меньшие требования на их юстировку. Это делает системы на базе ультрахолодных ионов более надежными и подходящими для использования вне лабораторий, в том числе и в экстремальных условиях космоса [22]. В-третьих, ионы могут храниться в ловушках в течение длительного времени, достигающего нескольких месяцев [34], что в совокупности с их расположением в нуле электрического удерживающего поля и возможности эффективной изоляции от внешних полей, делает их идеальными кандидатами для реализации квантовой памяти [30]. Кулоновское взаимодействие между ионами, захваченными в одну ловушку, также обеспечивает эффективный метод квантового перепутывания частиц между собой. На сегодняшний день ионы в ловушках являются рекорсменами среди

всех платформ для квантовых вычислений по времени когерентности, а также достоверности однокубитных и двухкубитных операций [35]. Таким образом, лазерно-охлажденные ионы в ловушках являются важным и перспективным направлением как в фундаментальных исследованиях, так и основой для нового поколения высокоточных прикладных устройств.

Цель и задачи работы

Целью данной работы является разработка и создание новых методов подготовки, считывания и управления квантовыми состояниями одиночных ионов при помощи оптических полей для улучшения характеристик стандартов частоты и квантовых вычислителей.

Для достижения этой цели было необходимо решить следующие научные задачи:

1. Разработать и экспериментально реализовать эффективную процедуру загрузки ионов в ловушку Пауля с использованием фотоэлектронной эмиссии.
2. Теоретически исследовать стабильность и точность нового микроволнового репера частоты на основе лазерно-охлажденных ионов $^{25}\text{Mg}^+$.
3. Провести спектроскопию квадрупольного перехода $^2\text{S}_{1/2}(F = 0, m_F = 0) \rightarrow ^2\text{D}_{3/2}(F = 2, m_F = 0)$ в ионе иттербия-171 с естественной шириной 3.1 Гц на длине волны 435.5 нм для исследования характеристик нового оптического кубита. Разработать и создать компактную лазерную систему для манипуляции квантовым состоянием оптического кубита 435.5 нм в ионе иттербия-171.
4. Измерить достоверность (fidelity) считывания квантового состояния оптического кубита 435.5 нм в ионе иттербия-171.
5. Экспериментально исследовать достоверности однокубитных операций на оптическом кубите 435.5 нм в ионе иттербия-171.

Научная новизна

1. Впервые был предложен и экспериментально реализован новый оптический метод загрузки ионных ловушек с использованием эффекта фотоэлектронной эмиссии с электродов ловушки.

2. Впервые теоретически исследованы характеристики нового микроволнового репера частоты на основе лазерно-охлажденных ионов магния на частоте 1.789 ГГц.
3. Предложен и впервые реализован оптический кубит на переходе ${}^2S_{1/2}(F = 0, m_F = 0) \rightarrow {}^2D_{3/2}(F = 2, m_F = 0)$ в ионе иттербия-171 на длине волны 435.5 нм, исследованы основные характеристики кубита.

Практическая значимость

Благодаря своей простоте, надежности и дешевизне реализации, предложенный новый метод загрузки ионных ловушек имеет широкие перспективы для применения в серийных образцах компактных устройств на основе ионов (например, в реперах частоты и квантовых вычислителях). Предложенный микроволновый репер частоты может иметь широкую практическую применимость, например, в области телекоммуникации и космической навигации. Транспортируемая конфигурация разработанной и созданной в рамках этой работы ультрастабильной лазерной системы позволяет применять её в ионных квантовых вычислителях, а также компактных оптических часах для решения современных задач метрологии времени и частоты.

Положения, выносимые на защиту

1. Облучение покрытых слоем оксида иттрия электродов ионной ловушки Пауля светодиодом, излучающим на длине волны 395 нм и обеспечивающим плотность мощности излучения на электродах 50 Вт/м², вызывает эмиссию фотоэлектронов, позволяющих реализовать ионизацию нейтральных атомов магния в области ловушки и их последующую загрузку.
2. Теоретически показано, что сверхтонкий переход ${}^2S_{1/2}(F = 2, m_F = 0) \rightarrow {}^2S_{1/2}(F = 3, m_F = 0)$ с частотой 1.789 ГГц в ансамбле из 10^6 лазерно-охлажденных ионов магния-25 позволяет реализовать репер частоты с относительной нестабильностью $1.3 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$.
3. Переход ${}^2S_{1/2}(F = 0, m_F = 0) \rightarrow {}^2D_{3/2}(F = 2, m_F = 0)$ в ионе иттербия-171 на длине волны 435.5 нм позволяет реализовать оптический кубит, удовлетворяющий критериям ДиВинченцо. Данный кубит позволяет обеспечить достоверность считывания квантового состояния не менее 98% без учета нерезонансных процессов и достоверность однокубитных операций типа Паули-X и Паули-Y не менее 94 % (включая ошибки

подготовки и считывания состояния), что подтверждается экспериментом. Достоверность однокубитной операции может быть улучшена путем более глубокого охлаждения иона.

Методология и методы исследования

Для проведения исследований использовались ловушки Пауля в различных конфигурациях. В них производился захват однозарядных ионов магния или иттербия. Были использованы методы доплеровского лазерного охлаждения, стабилизации частот лазерных источников относительно высокочастотных оптических резонаторов. Полученные в эксперименте данные были аппроксимированы теоретическими моделями с целью вычисления интересующих характеристик.

Личный вклад автора

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

Достоверность результатов

Достоверность результатов работы подтверждается использованием апробированных и протестированных измерительных приборов, воспроизводимостью экспериментальных данных, а также согласием экспериментальных данных с выводами теоретических моделей.

Структура и объём работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объём диссертации – 127 стр.

Сведения об апробации и публикации результатов работы

Результаты работы докладывались автором на 3 международных и 1 всероссийской научных конференциях: IV International Conference on Ultrafast Optical Science «UltrafastLight-2020», 2020 г., Москва, Россия; International Conference Modern Nanotechnologies And Nanophotonics For Science And Industry, 2021 г., Владимир, Россия; III Международная конференция

"Лазерные, плазменные исследования и технологии", 2017 г., Москва, Россия; Всероссийская конференция "Физика ультрахолодных атомов-2020", 2020 г., Новосибирск, Россия.

Основные результаты работы опубликованы в 4 статьях в рецензируемых научных журналах, входящих в базу данных Web of Science, а также в трудах конференций, ссылки на которые приведены на стр. 21.

Основное содержание работы

Во **введении** приведен краткий обзор приложений лазерно-охлажденных ионов в областях метрологии и квантовых вычислений, обосновывается актуальность проделанных в рамках работы исследований. Также описаны цель и задачи, научная новизна, практическая значимость исследования, а также защищаемые положения. В последующих главах диссертационной работы описываются общие принципы захвата и лазерного охлаждения ионов, работы микроволновых ионных реперов частоты, а также квантовых вычисления на ионах. Описан новый метод загрузки ионов в ловушку Пауля с использованием фотоэффекта, исследованы характеристики перспективного микроволнового репера частоты на ионах магния-25, а также приведены результаты экспериментального исследования оптического кубита на квадрупольном переходе в ионе иттербия-171.

Глава 1 посвящена обзору принципов захвата и доплеровского охлаждения ионов. В п. 1.1 описаны основы работы ионной ловушки Пауля (радиочастотной ионной ловушки) – системы электродов, которые при приложении к ним постоянных и радиочастотных потенциалов с правильно подобранными амплитудами и частотами позволяют удерживать заряженные частицы. Кратко описана динамика ионов в таких ловушках, показано что движение ионов при низких амплитудах удерживающих потенциалов может быть представлено как суперпозиция быстрых низкоамплитудных осцилляций с частотой ловушки (микродвижение) и относительно медленных колебаний в эффективном гармоническом псевдопотенциале (секулярное движение). Описаны наиболее распространенные конфигурации ловушек: линейная и трехмерная ловушка Пауля. В п. 1.2 приведено описание метода доплеровского лазерного охлаждения ионов, основанном на рассеянии ионом лазерного излучения, отстроенного по частоте в красную область от некоторого сильного циклического перехода. Метод позволяет охлаждать ионы до энергии, приблизительно равной $\hbar\Gamma/2$, где Γ – естественная ширина используемого перехода, и используется во всех последующих главах данной работы.

В **Главе 2** описывается предложенный в этой работе метод загрузки ионов в ловушки Пауля при помощи электронной фотоэмиссии из электродов ловушки. В начале, в п. 2.1, описаны основные этапы загрузки радиочастотных ионных ловушек: обеспечение в области захвата ловушки атомов требуемого вещества и ионизация этих атомов.

Далее приводится обзор наиболее распространенных на сегодняшний день способов загрузки. В пунктах 2.1.1-2.1.3 описаны методы с применением электронной пушки (2.1.1), фотоионизации (2.1.2) и лазерной абляции (2.1.3).

В данной работе предлагается новый метод загрузки, описанный в п. 2.2. Основные принципы работы метода сформулированы в пункте 2.2.1. Аналогично методу загрузки с применением электронной пушки, атомы требуемого вещества в области захвата предлагается образовывать при помощи атомного испарителя, а ионизацию производить электронным ударом. Однако электроны для ионизации предлагается получать путем фотоэмиссии, облучая электроды ловушки, при необходимости покрытые веществом с малой работой выхода, источником света. Единственным требованием к источнику света здесь является наличие в его спектре составляющей с энергией превышающей работу выхода материала электродов или их покрытия. Разгон электродов до энергий, требуемых для ионизации атомов, обеспечивается полем самой ловушки. Анализ траектории электронов в поле ловушки также приведен в данном пункте работы. Показано, что при характерных параметрах ионных ловушек часть эмитированных электронов несколько раз пересекает область захвата ловушки с энергией порядка сотен электронвольт, чего достаточно для ударной ионизации.

В п. 2.2.2 описывается экспериментальная установка, использованная для демонстрации и исследования предложенного метода загрузки (рисунок 1). Описаны конструкция и параметры линейной ионной ловушки, использованной в эксперименте и оптимизированной для захвата ионов магния, электроды которой были покрыты слоем оксида иттрия. Также описана вакуумная камера, в которую была помещена ловушка, атомный испаритель, а также вторичный электронный умножитель (ВЭУ), позволяющий регистрировать заряженные частицы. Кратко описана лазерная система на длине волны 280 нм, использованная в данной работе для доплеровского охлаждения ионов магния и система регистрации флуоресценции частиц.

В п. 2.2.3 описан эксперимент по демонстрации загрузки ионов $^{24}\text{Mg}^+$ в описанную выше ионную ловушку предложенным методом. Для этого электроды ловушки, покрытые оксидом иттрия, облучались светодиодом на

длине волны 280 нм при включенном атомном испарителе. Эффективность загрузки ионов $^{24}\text{Mg}^+$ определялась как среднее количество флуоресцирующих ионов $^{24}\text{Mg}^+$ на изображении кристалла после загрузки (рисунок 2).

Также в данном пункте представлены результаты исследования зависимости среднего количества загруженных ионов $^{24}\text{Mg}^+$ от оптической мощности светодиода (рисунок 3). Наблюдаемая линейная зависимость соответствует ожидаемой при таком механизме загрузки.

Пункт 2.2.4 посвящен экспериментальному исследованию зависимости эффективности загрузки ионов в ловушку предложенным методом от спектра используемого источника света. При помощи нескольких лазерных источников показано, что загрузка наблюдается только под воздействием излучения с длиной волны короче некоторого порогового значения. Для более точного определения пороговой длины волны исследовалась эффективность загрузки при помощи нескольких светодиодов с различными спектрами (которые были предварительно измерены).

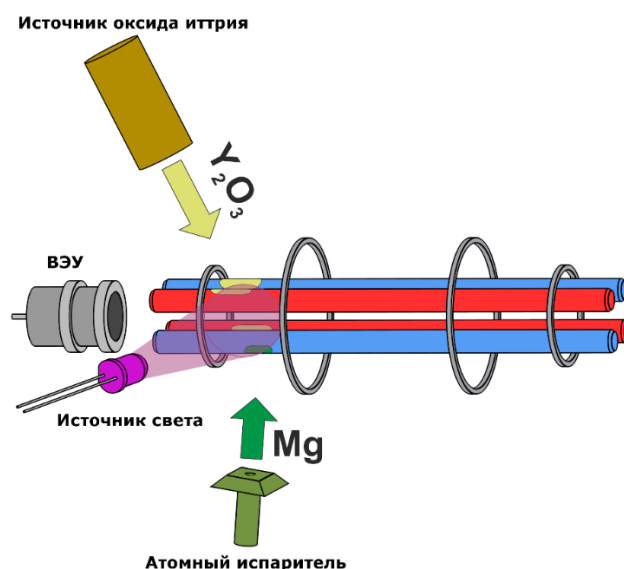


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки для демонстрации предложенного метода загрузки ионов. Синие и красные стержни, а также кольцевые электроды – ловушка Пауля; ВЭУ – вторичный электронный умножитель; желтые пятна на электродах – напыление оксида иттрия.

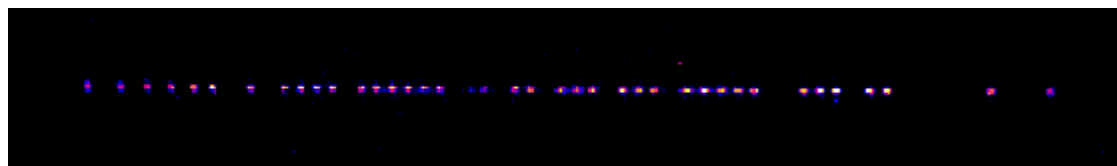


Рисунок 2. Пример изображения ионного кристалла полученного в ходе эксперимента по демонстрации предложенного метода загрузки. Каждая

светящаяся точка – ион $^{24}\text{Mg}^+$. Пропуски в цепочке – ионы других элементов или изотопов, также захваченные в ловушку.

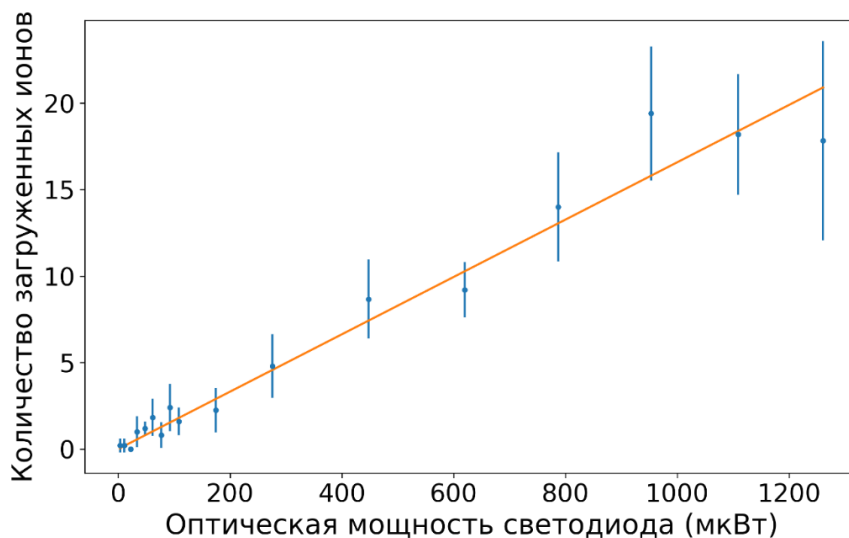


Рисунок 3. Зависимость количества загруженных ионов $^{24}\text{Mg}^+$ от оптической мощности светодиода.

Результаты измерения аппроксимировались численной моделью. Было показано хорошее совпадение экспериментальных данных с результатами предложенной модели и найден порог фотоэмиссии $\lambda_c = 440 \pm 20$ нм, близкий к таковому для оксида иттрия (477 нм). Отличия могут быть связаны с поверхностными эффектами.

В п. 2.2.5 описан эксперимент, подтверждающий, что ионизация атомов магния в проведенных экспериментах осуществляется именно за счет электронного удара. Для этого эффективность загрузки ионов при помощи разных светодиодов сравнивалась с напрямую измеряемым при помощи ВЭУ потоком электронов. Показано, что наблюдаемая в эксперименте эффективность загрузки пропорциональна регистрируемому потоку электронов (рисунок 4).

В п. 2.2.6 описаны преимущества данного метода, по сравнению с аналогами, а именно: отсутствие необходимости помещать внутрь вакуума электронную пушку, простота и надежность его реализации. Аргументирована эффективность его применения в компактных устройствах на основе ионов в ловушках, включая микроволновые ионные часы космического базирования [22]. Предложены пути его дальнейшего улучшения, такие как использование более коротковолновых светодиодов во избежание необходимости использования покрытий электродов, а также использование эффекта LIAD [36] для одновременной генерации атомов нужного вещества и их ионизации

при помощи одного и того же источника света и избавления от атомного испарителя. Основные результаты данной главы опубликованы в [37].

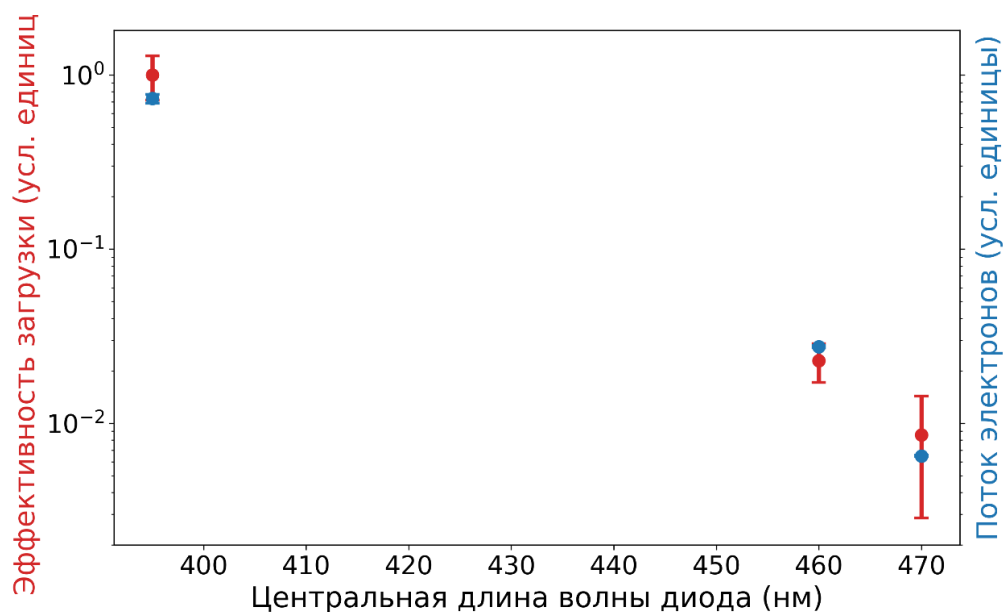


Рисунок 4. Зависимость эффективности загрузки ионов в ловушку (красные точки) и поток фотоэмитированных электронов (синие точки), зарегистрированный при помощи ВЭУ, от длины волны светодиода, облучающего электроды ловушки.

Глава 3 посвящена теоретическому исследованию ожидаемых характеристик нового микроволнового репера частоты на основе лазерно-охлажденных ионов $^{25}\text{Mg}^+$. Данный изотоп имеет спин ядра $I = 5/2$, что приводит к возникновению сверхтонкого расщепления основного состояния, переход между компонентами которого на частоте 1.789 ГГц может использоваться в качестве «часового». Несмотря на широкое применение ионов магния в других областях, таких как квантовые вычисления и квантово-логическая спектроскопия [38], их использование в качестве основы для микроволновых реперов до сих пор исследовано не было. При этом такой репер частоты может быть реализован на основе экспериментальной установки, использованной в предыдущей главе, после ряда модификаций, что, однако, выходит за рамки данной работы.

В п. 3.1 приведено сравнение микроволновых ионных стандартов частоты с другими атомными микроволновыми стандартами, указаны преимущества ионных устройств (высокая изоляция ионов от окружающей среды при сохранении небольших размеров системы), перечислены ионы, на которых уже были реализованы такие реперы. В п. 3.2 описаны общие принципы работы микроволновых ионных реперов частоты: их составные части,

алгоритм привязки частоты локального осциллятора к переходу в ионе, а также обсуждается необходимость охлаждения частиц для повышения точности и стабильности системы. Описана энергетическая структура иона $^{25}\text{Mg}^+$ (рисунок 5) и сформулированы его преимущества в качестве основы репера частоты, такие как наличие магнитонечувствительного микроволнового перехода (в первом порядке теории возмущений) $^2\text{S}_{1/2} (F = 2, m_F = 0) \rightarrow ^2\text{S}_{1/2} (F = 3, m_F = 0)$ на частоте 1.789 ГГц, а также необходимость лишь одного лазерного источника.

П. 3.2.1 посвящен выбору типа и параметрами ионной ловушки для реализации предложенного стандарта. Обсуждаются влияние эффекта Доплера второго порядка, в том числе и обусловленного микродвижением, на стабильность и точность репера, а также зависимость вклада этого эффекта в погрешность от параметров удержания ионов. В п. 3.2.2 описываются особенности процедуры загрузки ионов в ловушку в реперах частоты. Обсуждается возможность использования методов фотоионизации магния и метода, предложенного в Главе 2, уже продемонстрированного на примере ионов данного элемента.

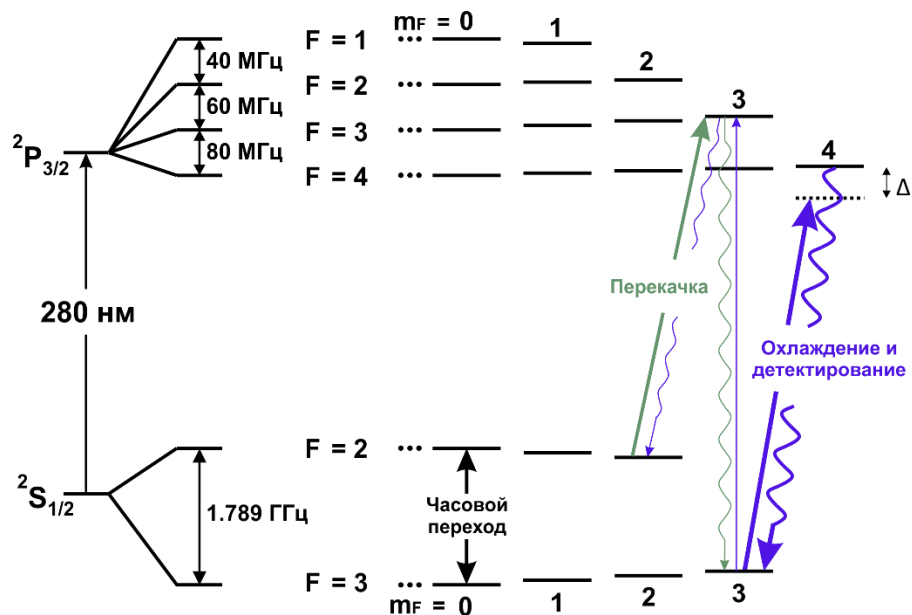


Рисунок 5. Частичная схема уровней иона $^{25}\text{Mg}^+$. Отмечен «часовой» переход в ионе, а также лазерные пучки, необходимые для охлаждения.

В п. 3.2.3 обсуждаются особенности доплеровского лазерного охлаждения иона $^{25}\text{Mg}^+$. Показано, что для эффективного проведения этой процедуры требуется два лазерных пучка, отстроенных друг от друга по частоте приблизительно на 1.9 ГГц, а также выбор оптимальной поляризации излучения. В п. 3.2.4 предлагается схема оптической накачки населенности ионов в состояние $^2\text{S}_{1/2} (F = 2, m_F = 0)$ путем небольшого изменения частот и поляризаций пучков охлаждения. Приведены результаты численной

симуляции данного процесса, демонстрирующие возможность накачки ионов в это состояние за время менее 10 мкс. Также описана и просимулирована схема накачки в состояния $^2S_{1/2}$ ($F = 2$, $m_F = \pm 2$), что необходимо для калибровки магнитного поля в области захвата частиц. Описан метод определения магнитного поля.

В п. 3.2.5 обсуждаются способы возбуждения «часового» перехода. Рассчитаны параметры простейшей микроволновой антенны для возбуждения перехода по схеме Рэмси. В п. 3.2.6 аргументирована необходимость и описаны способы контроля параметров магнитного поля в области удержания частиц. В п. 3.2.7 описывается предполагаемая схема регистрации доли возбужденных ионов после приложения микроволнового поля.

В п. 3.2.8 предлагается конфигурация экспериментальной установки для реализации такого репера частоты, включая описание лазерной системы, коммутации лазерных пучков и их завода в ловушку. Схема предполагает использование лишь одного лазерного источника и подобна использованной в Главе 2, что позволяет относительно несложными изменениями последней реализовать такой репер.

В п. 3.3 проводится оценка ожидаемых характеристик предложенного репера частоты. Пункт 3.3.1 посвящен оценке относительно стабильности системы. В качестве меры стабильности используется девиация Аллана [39]. Предельно достижимая девиация Аллана определяется квантовым проекционным шумом [40] и составила $\sigma_y(\tau) = 1.3 \times 10^{-13} / \sqrt{\tau}$, где τ – время усреднения. При вычислении этой величины использовались параметры: промежуток времени между Рэмси-импульсами $\Delta t_R = 1$ с, время цикла $T_c = 2$ с, количество ионов $N_{ions} = 10^6$. В пункте 3.3.2 оценивалась ожидаемая погрешность репера. Были рассмотрены вклады эффектов Доплера второго порядка и Зеемана второго порядка, которые являются доминирующими во всех созданных на сегодняшний день микроволновых ионных стандартах частоты. Вклад в относительную погрешность из-за неопределенности доплеровского сдвига (включая вклад микродвижения) составил $\sigma_{Doppler} \approx 2 \times 10^{-14}$ при неопределенности температуры $\Delta T = 1$ К. Погрешность из-за неопределенности магнитного поля оценена как $\sigma_{Zeeman} \approx 3 \times 10^{-14}$, при средней величине магнитного поля во время опроса $B \approx 1$ мГс и неопределенности индуктивности поля $\delta B = 10$ мкГс. Суммарная неточность репера при этом составляет 3.6×10^{-14} .

В п. 3.3.3 приведено сравнение ожидаемых характеристик предложенного репера частоты с аналогами на основе других ионов. Показано, что оцененные

характеристики сравнимы с характеристиками других подобных систем. Основные результаты данной главы опубликованы в [41].

Глава 4 посвящена экспериментальному исследованию оптического кубита на основе квадрупольного перехода $^2S_{1/2} (F = 0, m_F = 0) \rightarrow ^2D_{3/2} (F = 2, m_F = 0)$ на длине волны 435.5 нм в ионе $^{171}\text{Yb}^+$.

В п. 4.1 описаны базовые принципы квантовых вычислений. Определены понятие кубита и квантового вентиля (операции), универсального набора квантовых операций. Сформулированы особенности, отличающие квантовые вычисления от классических. Описано из каких этапов состоит цикл выполнения квантового алгоритма. Сформулированы критерии ДиВинченцо, описывающие требования к квантовой системе, чтобы она могла служить основой для квантовых вычислений:

1. Это должна быть масштабируемая система с хорошо определенными кубитами;
2. Должна быть возможность инициализации кубитов в некоторое начальное состояние;
3. Кубиты должны иметь достаточно большое время когерентности;
4. Она должна позволять реализовывать некоторый универсальный набор квантовых вентилях;
5. Должна быть обеспечена возможность измерения состояния каждого из кубитов.

Далее в этом пункте приведен обзор наиболее перспективных платформ для квантовых вычислений, существующих на сегодняшний день: систем на базе сверхпроводников, нейтральных атомов и ионов в ловушках Пауля. Описаны основные преимущества и недостатки каждой из них с точки зрения квантовых вычислений. Так, ионные квантовые вычислители на сегодняшний день демонстрируют рекордные значения времени когерентности кубитов [30] и достоверности (fidelity) операций [35]. Помимо этого ионы – единственная платформа, позволяющая перепутать любую пару кубитов за одну операцию, а не только соседние частицы. Основным сложностью для дальнейшего развития вычислений на ионах является проблема масштабирования таких систем. Описаны существующие на сегодняшний день подходы к решению данной задачи.

Пункт 4.2 описывает предложенный в этой работе оптический кубит в ионе иттербия на длине волны 435.5 нм. Приведено сравнение микроволновых и оптических ионных кубитов (закодированных в микроволновых переходах между сверхтонкими компонентами основного состояния и узких оптических переходах, соответственно). Обосновано, что несмотря на более короткое

время когерентности, оптические кубиты имеют ряд преимуществ с точки зрения масштабирования, такие как возможность оптической адресации только одним лазерным пучком и наличие более эффективных оптических компонентов в требуемом спектральном диапазоне (видимая и инфракрасная области) по сравнению с ультрафиолетовой областью, которая обычно используется для оптического контроля микроволновых кубитов. Перечислены преимущества предложенного оптического кубита в ионе иттербия (рисунок 6): удобная энергетическая структура иона для охлаждения, подготовки и считывания квантового состояния, возможность комбинировать данное кодирование с микроволновым в одной системе для увеличения времени когерентности, а также более удобное масштабирование по сравнению с микроволновым кубитом.

Произведено сравнение предложенного оптического кубита с наиболее часто используемым оптическим кубитом в ионе $^{40}\text{Ca}^+$. Показано, что помимо возможности комбинирования с микроволновым кубитом в одной системе, предложенный кубит имеет на два порядка меньшую чувствительность к флуктуациям магнитного поля по сравнению с кубитом в кальции.

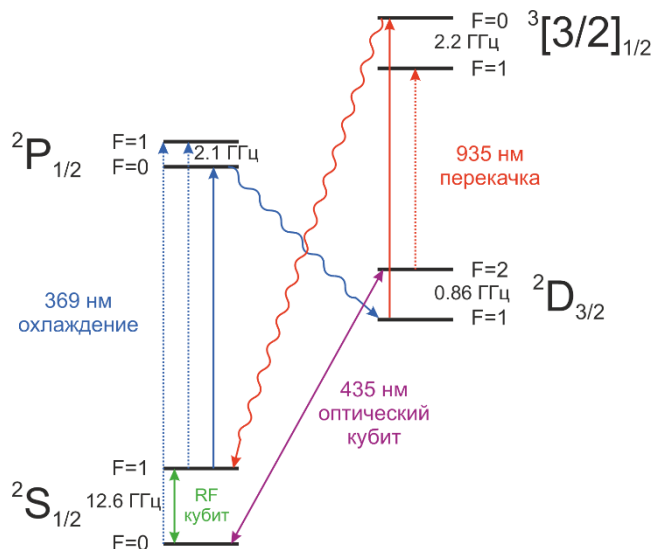


Рисунок 6. Частичная схема уровней иона $^{171}\text{Yb}^+$. RF кубит – микроволновый кубит. Сплошные стрелки показывают лазерные поля для управления ионом, пунктирные – поля, образованные фазовой модуляцией этих пучков для контроля населенности сверхтонких компонент, волнистые – спонтанные распады.

Пункт 4.3 посвящен экспериментальной установке для исследования предложенного кубита. В п. 4.3.1 описаны использованные алгоритмы захвата и охлаждения одиночного иона $^{171}\text{Yb}^+$, инициализации квантового состояния кубита, проведения однокубитных операций и считывания его состояния.

Последнее осуществляется методом квантовых скачков («electron shelving» [33]). Пункт 4.3.2 посвящен краткому описанию двух ионных ловушек, использованных в данном эксперименте. В пункте 4.3.3 кратко описаны характеристики лазерных систем, использованных для загрузки, охлаждения ионов и считывания состояния кубита. Пункт 4.3.4 описывает систему считывания кубита, состоящую из асферической линзы для сбора излучения иона, высокочувствительной камеры и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). Последний подключен к счетчику импульсов на базе ПЛИС, также разработанному в рамках данной работы. Это же устройство отвечало за синхронизацию всех остальных устройств установки.

В пункте 4.3.5 описана высокостабильная лазерная система для управления квантовым состоянием кубита. Для эффективной манипуляции кубитом ширина линии используемого для этого лазерного источника должна быть не более ширины кубитного перехода. Описана конфигурация лазерной системы на базе диодного лазера на длине волны 871 нм, стабилизированного относительно оптического резонатора из стекла ULE, после чего претерпевающего удвоение частоты. Отличительной особенностью данной системы является компактность вакуумной системы резонатора: объем вакуумной камеры в 2.5 раза меньше предшествующих систем, разработанных в нашей лаборатории, а масса – в 3 раза. В работе описаны характеристики системы, а также эксперимент по сравнению стабильности её частоты относительно другой подобной системы на длине волны 1140 нм через фемтосекундную гребенку частот. Результат сравнения показывает (рисунок 7), что уменьшение габаритов не повлекло за собой ухудшения метрологических характеристик.

Пункт 4.4 описывает эксперименты по исследованию предложенного оптического кубита на длине волны 435.5 нм. Пункт 4.4.1 посвящен описанию процедуры подготовки экспериментальной установки, настройке параметров охлаждения и компенсации паразитных электрических полей.

В пункте 4.4.2 дано описание эксперимента по оценке достоверности считывания квантового состояния в данной установке. Аргументирована необходимость оптимизации параметров насыщения лазерных пучков, участвующих в процедуре считывания, для максимизации достоверности данной операции из-за влияния нерезонансных процессов. Приведены результаты эксперимента по измерению скорости нерезонансных процессов от мощности лазерных источников методом квантовых скачков. Показано, что при оптимальных параметрах нерезонансные эффекты вносят вклад в достоверность не более нескольких процентов.

Исследована статистика количества зарегистрированных отсчетов в процессе считывания, когда ион был подготовлен в состоянии $^2S_{1/2}$ ($F = 0, m_F = 0$), а также при подавленном сигнале флуоресценции путем отключения перекачивающего излучения, что позволяет симитировать состояние $^2D_{3/2}$ ($F = 2, m_F = 0$) (рисунок 8). Продемонстрирована возможность различать эти два состояния с достоверностью 98 % (без учета нерезонансных эффектов). Данное значение определяется эффективностью сбора излучения иона и может быть увеличено путем использования более светосильного объектива.

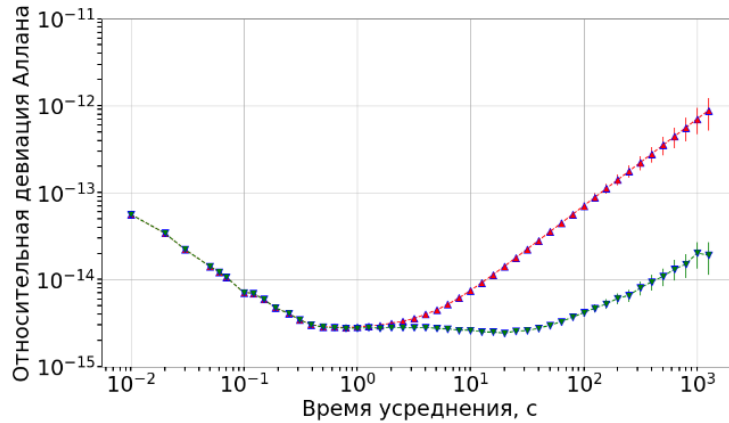


Рисунок 7. Зависимость модифицированной девиации Аллана лазерной системы на длине волны 871 нм относительно опорного источника на длине волны 1140 нм. Треугольниками вверх показана нестабильность сигнала без вычета линейного дрейфа, треугольниками вниз – с вычетом дрейфа.

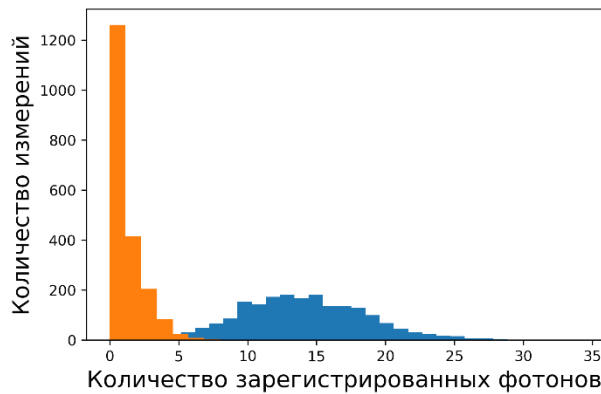


Рисунок 8. Гистограмма отсчетов, зарегистрированных ФЭУ, когда ион в состоянии $^2S_{1/2}$ ($F = 0, m_F = 0$) (синие столбцы) и когда флуоресценция иона подавлена (оранжевые столбцы).

В п. 4.4.3 описаны схемы и результаты экспериментов по возбуждению кубитного перехода $^2S_{1/2}$ ($F = 0, m_F = 0$) \rightarrow $^2D_{3/2}$ ($F = 2, m_F = 0$) на длине волны 435.5 нм, а также оптимизации параметров магнитного поля в области захвата иона по спектроскопии магнитных компонент.

Пункт 4.4.4 посвящен измерению достоверности однокубитной операции типа $R_\phi(\theta)$ – вращению состояния кубита на сфере Блоха относительно оси в экваториальной плоскости под углом ϕ к оси x на угол θ . Для проведения такой операции достаточно подействовать на ион лазерным импульсом, резонансным с кубитным переходом. Для оценки достоверности данной операции была измерена зависимость населенности верхнего состояния кубита после совершения над ним операции $R_\phi(\theta)$, в зависимости от угла поворота θ . Для этого варьировалась длительность приложенного лазерного импульса (рисунок 9). Показано, что затухание наблюдаемых осцилляций Раби главным образом определяется температурой иона. Аппроксимация зависимости теоретической кривой по формуле (2), учитывающей конечную температуру, также приведена на рисунке 9. Через $\Omega(n_x, n_y)$ обозначена частота Раби в зависимости от колебательных чисел радиальных осей. Из данных аппроксимации была получена информация о среднем количестве колебательных квантов в радиальных модах иона ($\bar{n}_x = \bar{n}_y = 25$). Основные результаты данной главы опубликованы в [42] и [43].

$$P_{|1\rangle}(t) = \sum_{n_x=0}^{\infty} \sum_{n_y=0}^{\infty} \frac{\bar{n}_x^{n_x}}{(\bar{n}_x + 1)^{n_x+1}} \frac{\bar{n}_y^{n_y}}{(\bar{n}_y + 1)^{n_y+1}} \frac{1}{2} (1 - \cos \Omega(n_x, n_y)t) \quad (2)$$

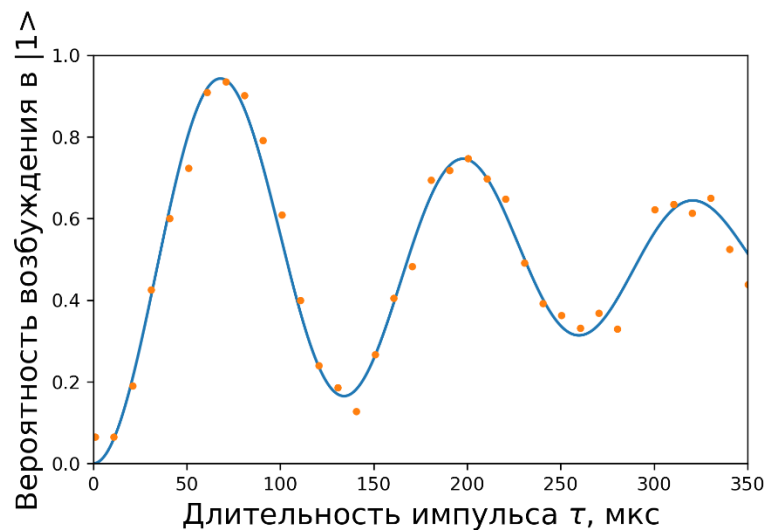


Рисунок 9. Зависимость населенности верхнего состояния кубита после совершения над ним операции $R_\phi(\theta(\tau))$, в зависимости от длительности лазерного импульса τ . Синяя линия соответствует результату теоретической симуляции при тепловом распределении фононов в радиальных модах и среднем количестве фононов $\bar{n}_x = \bar{n}_y = 25$.

На основании этих данных была оценена достоверность однокубитных операций типа Паули-Х, Паули-У, соответствующих переводу кубита из состояния $|0\rangle = {}^2S_{1/2} (F = 0, m_F = 0)$ в $|1\rangle = {}^2D_{3/2} (F = 2, m_F = 0)$ вращением вокруг оси x или y . В качестве оценки достоверности была взята населенность состояния $|1\rangle$ после проведения операции. Результат составил 94 % (включая ошибки инициализации и считывания состояния). Данный результат главным образом определяется температурой иона и может быть существенно улучшен путем более глубокого охлаждения частицы.

Основные результаты работы

1. Предложен и реализован новый метод загрузки ионной ловушки Пауля путем электронной фотоэмиссии из электродов ловушки.
2. Путем прямого измерения количества эмитированных фотоэлектронов экспериментально подтверждено соответствие механизма наблюдаемой загрузки ионов в ловушку предложенному в работе методу.
3. Экспериментально продемонстрирована загрузка крупных ионных кристаллов (вплоть до 350 ионов магния) в линейную ловушку Пауля предложенным в работе методом под действием некогерентного излучения с центральной длиной волны 395 нм и облученностью электродов 50 Вт/м².
4. Предложена схема микроволнового репера частоты на лазерно-охлажденных ионах ${}^{25}\text{Mg}^+$ с оцененными характеристиками относительной нестабильности и неточности $1.3 \times 10^{-13} / \sqrt{\tau}$ и 3.6×10^{-14} , соответственно.
5. Создана и охарактеризована высокостабильная лазерная система для управления состоянием оптического кубита в ионе иттербия на длине волны 435.5 нм. Относительная нестабильность частоты системы на временах от 0.5 с до 50 с составила не более 3×10^{-15} .
6. Предложен и экспериментально реализован новый оптический кубит на квадрупольном переходе ${}^2S_{1/2} (F = 0, m_F = 0) \rightarrow {}^2D_{3/2} (F = 2, m_F = 0)$ в ионе иттербия-171, удовлетворяющий критериям ДиВинченцо.
7. Измерена достоверность считывания квантового состояния оптического кубита в ионе иттербия, составившая 98% без учета нерезонансных эффектов.

8. Экспериментально исследована достоверность однокубитных операций типа Паули-Х, Паули-У на оптическом кубите в ионе иттербия, составившая 94%, включая ошибки подготовки и считывания.

Публикации автора по теме диссертации

Научные журналы, входящие в базы данных Web of Science и Scopus:

1. Zalivako I., Borisenko A., Semerikov I., Sidorov P., Vishnyakov P., Khabarova K., Kolachevsky N. Nonselective Paul ion trap loading with a light-emitting diode // Appl. Phys. Lett. AIP Publishing LLC. 2019. - Т. 115. - № 10. - С. 104102.
2. Заливако И.В., Семериков И.А., Борисенко А.С., Хабарова К.Ю., Сорокин В.Н., Колачевский Н.Н. Микроволновый стандарт частоты на ионах $^{25}\text{Mg}^+$: ожидаемые характеристики и перспективы // Квантовая электроника. 2017. - Т. 47. - № 5. - С. 426.
3. Заливако И.В., Семериков И.А., Борисенко А.С., Аксенов М.Д., Вишняков П.А., Сидоров П.Л., Семенин Н.В., Головизин А.А., Хабарова К.Ю., Колачевский Н.Н. Компактная высокостабильная лазерная система для спектроскопии квадрупольного перехода $^2\text{S}_{1/2} \rightarrow ^2\text{D}_{3/2}$ в ионе иттербия $^{171}\text{Yb}^+$ // Квантовая электроника. 2020. - Т. 50. - № 9. - С. 850–854.
4. Заливако И.В., Семериков И.А., Борисенко А.С., Аксенов М.Д., Хабарова К.Ю., Колачевский Н.Н., Экспериментальное исследование оптического кубита на квадрупольном переходе 435 нм в ионе $^{171}\text{Yb}^+$ // Письма в ЖЭТФ. 2021. - Т. 114. - № 2. - С. 53–29.

Публикации в материалах научных конференций:

1. I.V. Zalivako, I.A. Semerikov, A.S. Borisenko, M.D. Aksenov, P.A. Vishnyakov, P.L. Sidorov, N.V. Semenin, A.A. Golovizin, K.Yu. Khabarova, N.N. Kolachevsky «Characterization of a compact ultrastable laser system via optically referenced frequency comb», IV International Conference on Ultrafast Optical Science «UltrafastLight-2020», Москва, Россия, 2020 г., С. 273
2. Заливако И.В., Семериков И.А., Борисенко А.С., Хабарова К.Ю., Сорокин В.Н., Колачевский Н.Н. «Микроволновый стандарт частоты на основе ионов $^{25}\text{Mg}^+$ », III Международная конференция "Лазерные, плазменные исследования и технологии", Москва, Россия, 2017 г., С. 012113

Список литературы, цитируемой в автореферате:

1. Lamb W.E., Retherford R.C. Fine structure of the hydrogen atom by a microwave method // *Phys. Rev.* 1947. - Т. 72. - № 3. - С. 241–243.
2. Antognini A. и др. Proton Structure from the Measurement of 2S-2P Transition Frequencies of Muonic Hydrogen // *Science*. 2013. - Т. 339. - № 6118. - С. 417–420.
3. Beyer A. и др. The Rydberg constant and proton size from atomic hydrogen // *Science*. 2017. - Т. 358. - № 11. - С. 79–85.
4. Racetti S., Tomasi-Gustafsson E. The origin of the proton radius puzzle // *Eur. Phys. J. A*. 2021. - Т. 57. - № 2. - С. 72.
5. Thomas S. и др. High-Resolution Hydrogen Spectroscopy and The Proton Radius Puzzle // *Ann. Phys.* 2019. - Т. 531. - № 5. - С. 1800363.
6. Micke P. и др. Coherent laser spectroscopy of highly charged ions using quantum logic // *Nature*. 2020. - Т. 578. - № 7793. - С. 60–65.
7. Herrmann M. и др. Feasibility of coherent xuv spectroscopy on the 1S-2S transition in singly ionized helium // *Phys. Rev. A*. 2009. - Т. 79. - № 5. - С. 1–15.
8. Peik E. и др. Limit on the present temporal variation of the fine structure constant // *Phys. Rev. Lett.* 2004. - Т. 93. - № 17. - С. 15–18.
9. Lange R. и др. Improved Limits for Violations of Local Position Invariance from Atomic Clock Comparisons // *Phys. Rev. Lett.* 2021. - Т. 126. - № 1. - С. 11102.
10. Cacciapuoti L., Salomon C. Space clocks and fundamental tests: The ACES experiment // *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 2009. - Т. 172. - № 1. - С. 57–68.
11. Dzuba V.A. и др. Strongly enhanced effects of Lorentz symmetry violation in entangled Yb⁺ ions // *Nat. Phys.* 2016. - Т. 12. - № 1. - С. 465–468.
12. Nishi K., Ito Y., Kobayashi T. High-sensitivity multi-channel probe beam detector towards MEG measurements of small animals with an optically pumped K-Rb hybrid magnetometer // *Opt. Express*. 2018. - Т. 26. - № 2. - С. 1988–1996.
13. Patton B. и др. A remotely interrogated all-optical ⁸⁷Rb magnetometer // *Appl. Phys. Lett.* 2012. - Т. 101. - № 8. - С. 83502.
14. Guena J. и др. Progress in atomic fountains at LNE-SYRTE // *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*. 2012. - Т. 59. - № 3. - С. 391–410.
15. Reichert J. и др. Measuring the Frequency of Light with Mode-Locked Lasers // *Opt. Commun.* 1999. - Т. 172. - С. 59–68.
16. McGrew W.F. и др. Atomic clock performance beyond the geodetic limit // *Nature*. 2018.
17. Huntemann N. и др. Single-Ion Atomic Clock with 3×10^{-18} Systematic Uncertainty // *Phys. Rev. Lett.* 2016. - Т. 116. - № 6. - С. 063001.
18. Sukachev D. и др. Inner-shell magnetic dipole transition in Tm atoms: A candidate for optical lattice clocks // *Phys. Rev. A*. 2016. - Т. 94. - № 2. - С. 1–13.
19. Steigenberger P., Montenbruck O. Galileo status: orbits, clocks, and

- positioning // *GPS Solut.* 2017. - Т. 21. - № 2. - С. 319–331.
20. Corbett J.C. и др. Spanner: Google’s Globally Distributed Database // *ACM Trans. Comput. Syst.* 2013. - Т. 31. - № 3. - С. 8:1-8:22.
 21. Schwindt P.D.D. и др. A highly miniaturized vacuum package for a trapped ion atomic clock // *Rev. Sci. Instrum.* 2016. - Т. 87. - № 5. - С. 053112.
 22. Tjoelker R.L. и др. Mercury ion clock for a NASA technology demonstration mission // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control.* 2016. - Т. 63. - С. 1034–1043.
 23. Cao J. и др. A compact, transportable single-ion optical clock with 7.8×10^{-17} systematic uncertainty // *Appl. Phys. B.* 2017. - Т. 123. - № 4. - С. 1–9.
 24. Koller S.B. и др. Transportable Optical Lattice Clock with 7×10^{-17} Uncertainty // *Phys. Rev. Lett.* 2017. - Т. 118. - № 7. - С. 73601.
 25. Semerikov I.A. и др. Compact Transportable Optical Standard Based on a Single $^{171}\text{Yb}^+$ Ion (“YBIS” Project) // *Bull. Lebedev Phys. Inst.* 2018. - Т. 45. - № 11. - С. 337–340.
 26. Nielsen M.A., Chuang I. Quantum Computation and Quantum Information // *Am. J. Phys.* 2002. - Т. 70. - № 5. - С. 558–559.
 27. Saffman M. Quantum computing with atomic qubits and Rydberg interactions: Progress and challenges // *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics.* 2016. - Т. 49. - № 20. - С. 202001.
 28. Bruzewicz C.D. и др. Trapped-ion quantum computing: Progress and challenges // *Appl. Phys. Rev.* 2019. - Т. 6. - № 2. - С. 021314.
 29. Chen J.-S. и др. Efficient-sideband-cooling protocol for long trapped-ion chains // *Phys. Rev. A.* 2020. - Т. 102. - № 4. - С. 43110.
 30. Wang P. и др. Single ion qubit with estimated coherence time exceeding one hour // *Nat. Commun.* 2021. - Т. 12. - № 1. - С. 1–8.
 31. Ebadi S. и др. Quantum phases of matter on a 256-atom programmable quantum simulator // *Nature.* 2021. - Т. 595. - № 7866. - С. 227–232.
 32. Wright K. и др. Benchmarking an 11-qubit quantum computer // *Nat. Commun.* 2019. - Т. 10. - № 1. - С. 1–6.
 33. Leibfried D. и др. Quantum dynamics of single trapped ions // *Rev. Mod. Phys.* 2003. - Т. 75. - № 1. - С. 281–324.
 34. Hua G. и др. Precision spectroscopy with a single $\text{Ca-40}(+)$ ion in a Paul trap // *Chinese Phys. B.* 2015. - Т. 24. - № 5. - С. 14.
 35. Gaebler J.P. и др. High-Fidelity Universal Gate Set for $\text{Be } 9 + \text{ Ion Qubits}$ // *Phys. Rev. Lett.* 2016. - Т. 117. - № 6. - С. 1–5.
 36. Atutov S.N. и др. Fast and efficient loading of a Rb magneto-optical trap using light-induced atomic desorption // *Phys. Rev. A.* 2003. - Т. 67. - № 5. - С. 6.
 37. Zalivako I. и др. Nonselective Paul ion trap loading with a light-emitting diode // *Appl. Phys. Lett.* 2019. - Т. 115. - № 10. - С. 104102.
 38. Schmidt P.O. и др. Spectroscopy using quantum logic. // *Science.* 2005. - Т. 309. - № July. - С. 749–752.
 39. Allan D.W. Time and frequency(time-domain) characterization, estimation, and prediction of precision clocks and oscillators // *IEEE Trans. Ultrason.*

- Ferroelectr. Freq. Control. 1987. - Т. 34. - № 6. - С. 647–654.
40. Fisk P.T.H. Trapped-ion and trapped-atom microwave frequency standards // Reports Prog. Phys. 1997. - Т. 60. - № 8. - С. 761–817.
 41. Заливако И.В. и др. Микроволновый стандарт частоты на ионах 25Mg^+ : ожидаемые характеристики и перспективы // Квантовая электроника. 2017. - Т. 47. - № 5. - С. 426–430.
 42. Заливако И.В. и др. Компактная высокостабильная лазерная система для спектроскопии квадрупольного перехода $2S_{1/2} \rightarrow 2D_{3/2}$ в ионе иттербия 171Yb^+ // Квантовая электроника. 2020. - Т. 50. - № 9. - С. 850–854.
 43. Заливако И.В. и др. Экспериментальное исследование оптического кубита на квадрупольном переходе 435 нм в ионе 171Yb^+ // Письма в ЖЭТФ. 2021. - Т. 114. - № 2. - С. 53–59.