

МИНИСТЕРСТВО
НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Национальный
исследовательский ядерный
университет «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)»**

Каширское шоссе, д.31, г. Москва, 115409
Тел. (499) 324-87-66, факс (499) 324-21-11
<http://www.mephi.ru>

№ _____
На № _____ от _____



«УТВЕРЖДАЮ»
Ректор Национального исследовательского
ядерного университета «МИФИ»
доктор физ.-мат. наук
Шевченко Владимир Игоревич

«24» 06 2022 г.

Отзыв ведущей организации

федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)»**

на диссертацию Заливако Ильи Владимировича

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

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.19 – Лазерная физика

Актуальность темы диссертационной работы

Ионы в ловушках Пауля представляют собой перспективный объект для исследования в целом ряде областей науки и техники. Ярко выраженные квантовые свойства захваченных ионов, высокая степень изоляции от внешней среды, а также простота устройства радиочастотных ловушек позволили реализовать на основе этих частиц стандарты частоты с рекордными или близкими к ним метрологическими показателями как в оптическом, так и в микроволновом диапазонах, в том числе и в виде компактных транспортируемых устройств. Эти же свойства обуславливают эффективность применения ионов в качестве квантовой памяти, а сильное кулоновское взаимодействие между несколькими захваченными в одну ловушку частицами представляет собой естественный путь для перепутывания их электронных состояний через обобщенные механические колебания. Так, ионная платформа сегодня является одной из лидирующих в гонке, направленной на создание квантового вычислителя, способного к решению практически значимых задач. Не менее обширно применение

ионов в фундаментальной науке. Прецизионная лазерная спектроскопия захваченных ионов является чувствительным методом для поиска отклонений от предсказаний господствующих сегодня фундаментальных теорий, таких как теория относительности или квантовая электродинамика.

Диссертация И. В. Заливако посвящена поиску новых путей улучшения характеристик стандартов частоты и квантовых вычислителей на основе ионов. В частности, предложен новый способ загрузки ионов в ловушки Пауля, в перспективе позволяющий улучшить массогабаритные характеристики компактных микроволновых ионных часов, теоретически исследован новый микроволновый репер частоты на основе лазерно-охлажденных ионов $^{25}\text{Mg}^+$, а также предложен и экспериментально изучен новый оптический кубит, закодированный в квадрупольном переходе в ионе $^{171}\text{Yb}^+$, обладающий рядом преимуществ с точки зрения масштабирования квантовых вычислителей. Таким образом, тема диссертации И. В. Заливако является актуальной как с научной, так и с практической точки зрения.

Структура и основное содержание диссертации

Структурно диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 127 страниц, включая 38 рисунков.

Во **введении** обоснована актуальность, сформулированы цель работы, решаемые задачи, научная новизна, практическая значимость, защищаемые положения, апробация работы и личный вклад автора.

В **первой главе** описываются базовые принципы работы радиочастотных ионных ловушек (ловушек Пауля), их виды, динамика движения заряженных частиц в удерживающих полях, а также основы доплеровского лазерного охлаждения ионов.

Вторая глава посвящена новому методу загрузки ионов в ловушки Пауля. Метод основан на облучении электродов ловушки, при необходимости покрытых веществом с низкой работой выхода, коротковолновым излучением, вызывающим фотоэмиссию электронов. Ускоренные полем ловушки электроны производят ионизацию атомов внутри ловушки и их последующий захват. Приведены результаты экспериментов, демонстрирующих данный метод на примере ионов $^{24}\text{Mg}^+$. Предложены пути дальнейшего совершенствования метода.

В **третьей главе** предложен микроволновый репер частоты на лазерно-охлажденных ионах $^{25}\text{Mg}^+$. Ранее использование данного иона в качестве основы для микроволнового репера частоты не рассматривалось. Описана возможная схема реализации такого репера,

включая конфигурацию ловушки и лазерной системы, схему подготовки квантового состояния, опроса и считывания. Рассчитаны ожидаемые характеристики точности и стабильности, произведено сравнение с аналогичными системами на других ионах.

Четвертая глава посвящена предложенному оптическому кубиту на квадрупольном переходе $^2S_{1/2} (F = 0, m_F = 0) \rightarrow ^2D_{3/2} (F = 2, m_F = 0)$ на длине волны 435.5 нм. В начале главы описаны основные принципы квантовых вычислений на ионах. Далее описан предложенный способ кодирования квантовой информации и проведено его сравнение с аналогами. Показано, что данный кубит имеет ряд преимуществ для масштабирования квантовых вычислителей. Далее приведены результаты экспериментальных исследований данного кубита. Описана использованная установка, включая высокостабильную лазерную систему для управления кубитом на длине волны 435.5 нм. Приведены результаты экспериментов по исследованию достоверностей считывания квантового состояния кубита и однокубитной операции (получены результаты 98 % и 94 %, соответственно). Показано, что данные достоверности в эксперименте ограничивались апертурой системы считывания и температурой иона, соответственно, и могут быть впоследствии существенно увеличены.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы.

Научная новизна и значимость диссертационной работы

Результаты работы являются новыми и имеют высокую научную значимость. В частности:

1. Предложен новый метод загрузки ионных ловушек Пауля на основе электронной фотоэмиссии из электродов ловушки, отличающийся высокой эффективностью и простотой реализации.
2. Описанный метод загрузки продемонстрирован экспериментально на примере загрузки ионов $^{24}\text{Mg}^+$ путем облучения электродов, покрытых окидом иттрия, светодиодом на длине волны 395 нм. Также исследована эффективность загрузки в зависимости от мощности и спектра источника излучения.
3. Предложен и теоретически исследован новый микроволновый репер частоты на базе лазерно-охлажденных ионов $^{25}\text{Mg}^+$. Предложена возможная схема реализации такого репера. Теоретически оценены достижимые значения относительных неточности и нестабильности системы на уровне $1.3 \times 10^{-13} / \sqrt{\tau}$ и 3.6×10^{-14} , соответственно.
4. Предложен новый оптический кубит 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 $^{171}\text{Yb}^+$. Показано, что

по сравнению с микроволновым кубитом в том же ионе он имеет преимущества с точки зрения адресации, а с оптическими кубитами в других ионах – с точки зрения возможности реализации комбинированного кодирования информации в микроволновом и оптическом переходах одновременно.

5. Разработана и создана высокостабильная лазерная система на длине волны 435.5 нм для управления предложенным оптическим кубитом. Данная система имеет компактные массогабаритные характеристики и в то же время обеспечивает уровень относительной нестабильности частоты не более 3×10^{-15} на временах усреднения от 0.5 с до 50 с.
6. Экспериментально измерены достоверности считывания состояния предложенного кубита и однокубитных операций типа Паули-Х или Паули-У, составившие 98 % и 94 %, соответственно. Показано, что данные достоверности определяются техническими факторами и могут быть улучшены увеличением апертуры считывающей оптики и реализацией глубокого охлаждения иона, соответственно.

Практическая значимость диссертационной работы

Практическая значимость результатов работы выражается в следующем:

1. Предложенный в работе метод загрузки ионных ловушек за счет своей простоты, надежности и дешевизны реализации является перспективной заменой загрузке при помощи электронной пушки в таких приложениях как, например, компактные микроволновые и оптические стандарты частоты, в том числе и космического базирования.
2. Микроволновый репер частоты на ионах магния, предложенный и теоретически исследованный в диссертации, может применяться, например, для задач навигации, коммуникации, синхронизации распределенных баз данных.
3. Разработанная в рамках диссертации компактная высокостабильная лазерная система пригодна для использования в транспортируемых оптических часах на базе ионов иттербия, а также компактных прототипах квантовых вычислителей.
4. Предложенный и исследованный оптический кубит на основе квадрупольного перехода в ионе $^{171}\text{Yb}^+$ является многообещающим кандидатом для создания следующего поколения квантовых вычислителей, пригодных для решения практически важных задач.

Результаты диссертации имеют высокую научную и техническую значимость и могут быть применены в таких организациях как НИЯУ МИФИ, Российский квантовый центр, ИЛФ СО РАН, АО РКС и других.

Обоснованность и достоверность основных результатов и выводов

Достоверность полученных результатов подтверждается воспроизводимостью экспериментальных данных, их согласием с результатами предложенных теоретических моделей, обоснованностью сделанных в работе допущений и приближений, а также публикацией основных результатов работы в рецензируемых журналах, входящих в базы Web of science и Scopus.

Результаты диссертации прошли апробацию на российских и международных конференциях. Они также опубликованы в четырех статьях, входящих в базы Web of science и Scopus.

Замечания по диссертации

Несмотря на общее положительное впечатление, к работе имеется и ряд замечаний:

1. В главе 4 в качестве одного из преимуществ ионов иттербия для квантовых вычислений была указана возможность комбинировать преимущества микроволнового и оптического кубитов путем изменения типа кодирования в процессе вычислений в зависимости от текущей задачи – долговременного хранения информации или проведения двухкубитных операций. Однако описания способов проведения данной процедуры приведено не было.
2. В главе 3 было оценено ожидаемое значение относительной неточности частоты предложенного микроволнового репера частоты на ионах магния, составившее и 3.6×10^{-14} . Однако с учетом того, что это теоретическая оценка, корректнее было бы округлить это число до первой значащей цифры: 4×10^{-14} .
3. В главе 4 также несколько раз упоминается термин «температура иона», однако понятие температуры обычно определяется для некоторого ансамбля. Поэтому в работе следовало бы пояснить что именно подразумевается под температурой одиночного иона.

Приведенные замечания не снижают высокой научной ценности представленной работы и значимости ее вклада для развития прецизионной спектроскопии ионов, квантовой информатики и метрологии.

Общая оценка диссертации

Диссертация Заливако Ильи Владимировича «Лазерно-охлажденные ионы магния и иттербия для задач метрологии и квантовых вычислений» является законченным научным исследованием. По тематике она соответствует заявленной специальности и удовлетворяет требованиям, изложенным в Положении о присуждении ученых степеней № 842, утвержденным Правительством Российской Федерации от 24 сентября 2013 г., а ее автор заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и корректно представляет достигнутые результаты.

Доклад по материалам диссертации был сделан Заливако Ильей Владимировичем 22 июня 2022 года на семинаре Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ. Отзыв составлен директором Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ Кузнецовым Андреем Петровичем.

Директор
Института лазерных и плазменных технологий
НИЯУ МИФИ,
доктор физико-математических наук,
профессор

APKuznetsov@mephi.ru

Кузнецов Андрей Петрович

Отзыв на диссертацию И. В. Заливако обсужден и одобрен на семинаре Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ
протокол № 078/010 от "22" июня 2022 г.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ);
115409, Россия, Москва,
Каширское шоссе, 31
+7 (495) 788 56 99, доб. 9388

Список основных работ сотрудников ведущей организации Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» по тематике защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. A. N. Konenkov, N. V. Konenkov, A. A. Sysoev, Modeling dipolar excitation for quadrupole mass filter, *European Journal of Mass Spectrometry*, 28(1), 65-72 (2022);
2. S. P. Derevyashkin, P. V. Borisyuk, K. Yu. Khabarova, N. N. Kolachevsky, S. A. Strelkin, E. V. Tkalya, D. O. Tregubov, I. V. Tronin, V. P. Yakovlev, Cumulative loading of the ion trap by laser ablation of thorium target in buffer gas, *Laser Physics Letters*, 18(1), 015501 (2020);
3. P. V. Borisyuk, E. V. Chubunova, Yu. Yu. Lebedinskii, E. V. Tkalya, O. S. Vasilyev, V. P. Yakovlev, E. Strugovshchikov, D. Mamedov, A. Pishtshev, S. Zh. Karazhanov, Experimental studies of thorium ion implantation from pulse laser plasma into thin silicon oxide layers, *Laser Physics Letters*, 15(5), 056101 (2018);
4. A. A. Sysoev, A. V. Karpov, V. V. Milyaeva, A. A. Sysoev, Novel approach to constructing laser ionization elemental time-of-flight mass spectrometer. *European Journal of Mass Spectrometry*, 24(1), 96-107 (2018)