

ОТЗЫВ

официального оппонента Кулика Сергея Павловича на диссертацию Заливако Ильи Владимировича «Лазерно-охлажденные ионы магния и иттербия для задач метрологии и квантовых вычислений», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика

Диссертация Заливако И. В. посвящена задаче повышения характеристик квантовых вычислителей и стандартов частоты на основе лазерно-охлажденных ионов. Для этого в работе экспериментально и теоретически исследуется возможность создания таких устройств на ряде перспективных переходов в ионах магния и иттербия, а также предложен и изучен новый метод загрузки ионов в ловушку Пауля.

Квантовые вычисления сегодня стали одним из бурно развивающихся направлений науки. Квантовые компьютеры, если они будут созданы, позволят эффективно решать задачи оптимизации, криптоанализа, проектирования новых материалов и лекарств. Уже сегодня достигнут определенный прогресс как в создании квантовых симуляторов, способных решать некоторый выделенный круг задач, так и универсальных квантовых вычислителей. На базе различных физических платформ были продемонстрированы системы из десятков кубитов, доступ к которым может получить любой желающий посредством облачного доступа. В 2019 году компания Google заявила о достижении так называемого квантового превосходства на примере специально разработанного алгоритма. Ионы в ловушках Пауля являются, наряду с системами на основе сверхпроводников, фотонных чипов, а также атомов в микродипольных ловушках, одной из наиболее перспективных на сегодняшний день платформой для квантовых вычислений, на которой были продемонстрированы большие времена когерентности и высокие значения достоверности (fidelity) квантовых операций. Однако дальнейшее масштабирование таких вычислителей требует поиска новых подходов, в том числе и поиска более эффективных способов кодирования информации в ионах. Не менее существенное место ионы занимают и в области стандартов частоты, которые играют важную роль как в фундаментальных исследованиях, например посвященных проверке теории относительности или поиску темной материи, так и в технике. Наиболее ярким примером применения стандартов частоты на практике являются спутниковые системы навигации, где построение, по возможности, компактных бортовых часов играет существенную роль при обеспечении точности позиционирования. Использование перехода с крайне низкой чувствительностью частоты к влиянию излучения черного тела в ионе $^{27}\text{Al}^+$ позволило создать оптические часы с рекордно низкой погрешностью, а микроволновые ионные часы на базе ионов $^{199}\text{Hg}^+$ претендуют на то, чтобы стать наиболее стабильным стандартом частоты спутникового базирования.

Таким образом, тема диссертационной работы Заливако И. В., безусловно, является актуальной. Диссертация имеет существенную практическую значимость в контексте ведущихся разработок в области квантовых вычислений и квантовых сенсоров. В работе предложен метод загрузки ионов в ловушки Пауля, который имеет широкие перспективы использования в компактных ионных устройствах, таких как стандарты частоты. Также в рамках диссертации была разработана и охарактеризована компактная высокостабильная

лазерная система, которая может быть использована в транспортируемых оптических часах или квантовых вычислителях. Предложенная в работе реализация оптического кубита на длине волны 435.5 нм в перспективе может лечь в основу квантового вычислителя, пригодного для решения практически значимых задач. Данные результаты могут быть использованы целым рядом научно-технических организаций, таких как, АО РКС, ИЛФ СО РАН, НИЯУ МИФИ, ОИЯИ, Российский квантовый центр, ФИАН и другими.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, из которых три главы посвящены оригинальным результатам, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 127 страниц.

Введение посвящено аргументации актуальности темы исследования, а также формулировке цели и задач работы, научной новизне, практической значимости, положений, выносимых на защиту, а также информации об апробации и публикациях по теме диссертации.

В первой главе кратко описывается теория работы ионной ловушки Пауля, а также метода доплеровского охлаждения захваченных частиц. Вводятся основные понятия и определения, такие как секулярная частота, микродвижение, линейная и трехмерные ионные ловушки, параметры стабильности ловушки, доплеровский предел.

Вторая глава посвящена загрузке ионных ловушек Пауля методом электронной фотоэмиссии. Описан принцип работы метода. Он заключается в облучении электродов ловушки, предварительно покрытых веществом с низкой работой выхода, источником света с энергией фотонов, достаточной для возникновения фотоэффекта. В результате этого возникает эмиссия электронов, которые разгоняются полем ловушки и вызывают ионизацию атомов требуемого вещества в области захвата. Описаны эксперименты по демонстрации данного метода на примере загрузки ионов $^{24}\text{Mg}^+$ путем облучения покрытых оксидом иттрия электродов различными источниками света, как когерентными, так и некогерентными. Автором показана возможность загружать таким образом как одиночные частицы, так и крупные ионные кристаллы используя легкодоступные светодиоды видимого диапазона. Подробно исследована зависимость эффективности загрузки от оптической мощности источника света и его спектра. Путем сравнения полученных результатов с теоретической моделью обосновано соответствие экспериментально наблюдаемых процессов описанному выше механизму. Также были предложены способы дальнейшего усовершенствования метода, включая использование эффекта светоиндуцированной атомной десорбции. Описанный в данной главе метод имеет особенно большое практическое значение, так как применим для широкого спектра задач в области прецизионной спектроскопии и метрологии, и при этом значительно проще, дешевле и надежнее, чем традиционный путь с использованием электронной пушки.

В третьей главе описана схема предложенного нового микроволнового репера частоты на базе перехода $^2S_{1/2}(F = 2, m_F = 0) \rightarrow ^2S_{1/2}(F = 3, m_F = 0)$ в лазерно-охлажденных ионах $^{25}\text{Mg}^+$. Описаны преимущества использования данного иона перед аналогичными системами: необходимость использования лишь одного лазерного источника, наличие магнитно-нечувствительного в первом порядке часового перехода, что важно для

практической реализации такого репера и обеспечения его метрологических характеристик, соответственно. Автором представлена возможная схема реализации такого репера частоты, включая конфигурацию лазерной системы, предлагаемую схему оптической накачки, опроса часового перехода. Произведены необходимые расчеты для обоснования предложенных решений. Осуществлена теоретическая оценка ожидаемых характеристик относительной нестабильности и неточности частоты такого репера. В заключении главы произведено сравнение полученных результатов с характеристиками систем на других ионах и показано, что полученные значения относительных нестабильности и неточности частоты ($1.3 \times 10^{-13} / \sqrt{\tau}$ и 3.6×10^{-14} , соответственно) конкурентны с аналогами.

Четвертая глава посвящена реализации нового типа оптического кубита на квадрупольном переходе $^2S_{1/2}(F = 0, m_F = 0) \rightarrow ^2D_{3/2}(F = 2, m_F = 0)$ в ионе $^{171}\text{Yb}^+$. В начале главы сделано краткое введение в область квантовых вычислений на ионах. Затем автор подробно обсуждает различные способы кодирования квантовой информации в энергетической структуре ионов, описывает достоинства и недостатки микроволновых и оптических кубитов. Далее идет описание предлагаемого нового оптического кубита на квадрупольном переходе в ионе $^{171}\text{Yb}^+$ и его сравнение с микроволновым кубитом в том же ионе, а также с оптическим кубитом в ионе $^{40}\text{Ca}^+$. Остальная часть главы посвящена эксперименту по исследованию данного кубита. Приведено описание экспериментальной установки. С практической точки зрения здесь стоит отметить созданную компактную высокостабильную лазерную систему для управления кубитом, объем вакуумной части которой составляет всего 3.5 л, при сохранении высокой стабильности частоты (девиация Аллана на времена усреднения от 0.5 с до 50 с не превышает 3×10^{-15}), которая помимо квантовых вычислений может использоваться в транспортируемых оптических часах. Далее автор описывает эксперименты по исследованию достоверности считывания предложенного оптического кубита и достоверности однокубитных операций типа Паули-Х, Паули-У, которые составили 98 % и 94 %, соответственно. Важно отметить, что автором также были исследованы факторы, определяющие данные значения достоверности, и показано, что эти числа могут быть существенно увеличены за счет использования более светосильного объектива считывания и более глубокого охлаждения частиц. Полученные в данной главе результаты особенно интересны тем, что оптическое кодирование кубита позволяет более эффективно масштабировать такую систему, на что сейчас направлены основные усилия исследователей в этой области. При этом выбор иона $^{171}\text{Yb}^+$ позволяет комбинировать в одной системе как преимущества микроволновых кубитов, так и оптических, путем перекодирования одного типа в другой в процессе выполнения квантового алгоритма.

В заключении приводятся основные результаты диссертационной работы.

Замечания по содержанию диссертационной работы:

1. На Рис. 2.9 (зависимость зарегистрированного потока электронов от центральной длины волны излучения светодиода) во второй Главе экспериментальные точки расположены на краях спектрального диапазона. К сожалению, в середине диапазона измерения не были проведены. Было бы полезно нанести на этот график

и теоретическую зависимость, а также обсудить адекватность теории экспериментальным данным.

2. В третьей Главе при описании предлагаемой схемы работы репера частоты на ионах магния указано, что ионная ловушка требует периодической перезагрузки из-за постепенной потери частиц, что должно также влиять и на стабильность выходной частоты репера. В связи с этим хотелось бы, чтобы в разделе, посвященном оценке стабильности, данный фактор также был упомянут.
3. Также в третьей Главе в разделе, посвященном исследованию метрологических характеристик репера, сказано, что выбранное для оценки число ионов в ловушке является компромиссным для обеспечения оптимальных значений точности и стабильности. В то время как зависимость стабильности от числа ионов в явном виде отражена в работе, конкретный характер зависимости точности от этой величины из текста установить тяжело. В связи с этим для наглядности полезно было бы отразить в работе то, как точность репера зависит от этого числа, чтобы понятно, как будут меняться обе эти характеристики в зависимости от числа задействованных ионов.
4. В Главе 4 обсуждается эксперимент по исследованию влияния нерезонансных эффектов на достоверность считывания состояния кубита, для чего наблюдаются квантовые скачки между уровнями кубита. При этом динамика данного процесса описана чрезмерно кратко. В частности, не было ни приведено ссылки на источник, откуда была взята формула 4.9, ни описано подробностей как эта формула была выведена.
5. Помимо этого, в Главе 4 указано, что полученные в эксперименте значения достоверности считывания и однокубитных операций могут быть существенно улучшены путем дальнейшей модификации установки. При этом хотелось бы, чтобы в работе также были приведены оценки достижимых характеристик квантового вычислителя, на которые можно рассчитывать после устранения указанных в работе технических проблем.

Данные замечания носят рекомендательный характер, не затрагивают основных положений работы и общую положительную оценку диссертации.

Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертационной работы. Основные результаты работы были в достаточной степени представлены на всероссийских и международных конференциях, а также опубликованы в рецензируемых научных изданиях, входящих в списки Web of Science и Scopus, в том числе, в Appl. Phys. Lett., Письмах в ЖЭТФ и Квантовой электронике.

Стоит также отметить высокий научно-технический уровень работы, логическое структурирование текста, ясность изложения и обширный литературный обзор по теме диссертации, подкрепленный большим количеством ссылок на публикации других авторов. Особенно отмечу, что стиль изложения материалов диссертации лаконичен и достаточен для понимания, что свидетельствует не только о профессионализме И.В.Заливако как экспериментатора, но и об умении четко излагать мысли. На мой взгляд это является проявлением высокой квалификации, что и закрепляется присвоением искомой степени.

Заключение

Оценивая диссертационную работу Заливако Ильи Владимировича в целом, можно заключить следующее:

- тема диссертации актуальна, заключения, научные выводы и рекомендации диссертации научно обоснованы;

- результаты диссертации обладают научной новизной, практической значимостью, прошли апробацию, в достаточной степени представлены в научных трудах автора;

- достоверность результатов работы подтверждается согласием экспериментальных данных и выводов, сделанных на основании теоретических моделей, а также воспроизводимостью экспериментальных данных и использованием апробированных и протестированных измерительных приборов;


- диссертация Заливако Ильи Владимировича представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Заливако Илья Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика.

Официальный оппонент:

д.ф.-м.н., Кулик Сергей Павлович,
научный руководитель Центра квантовых технологий Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,
Российская Федерация, 119991, г. Москва, Ленинские горы 1, стр. 35.

тел.: 7-(910)484-06-22

e-mail: sergei.kulik@physics.msu.ru


30.08.2022

/Кулик Сергей Павлович/

Подпись Кулика Сергея Павловича удостоверяю:

Сысоев Николай Николаевич,
Декан физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова,
профессор
Российская Федерация, 119991, г. Москва, Ленинские горы 1, стр. 2.
тел.:7-(495)939-31-60





/Сысоев Николай Николаевич/

Список основных публикаций оппонента доктора физико-математических наук С. П. Кулика по тематике защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. L. V. Gerasimov, R. R. Yusupov, I. B. Bobrov, D. Shchepanovich, E. V. Kovlakov, S. S. Straupe, S. P. Kulik, and D. V. Kupriyanov, Dynamics of a spin qubit in an optical dipole trap, *Physical Review A*, 103(6), 062426 (2021);
2. Y. S. Teo, S. Shin, H. Jeong, Y. Kim, Y. Kim, G. I. Struchalin, E. V. Kovlakov, S. S. Straupe, S. P. Kulik, G. Leuchs, Benchmarking quantum tomography completeness and fidelity with machine learning, *New Journal of Physics*, 23(10), 103021 (2021);
3. S. R. Samoilenko, A. V. Lisitsin, D. Schepanovich, I. B. Bobrov, S. S. Straupe, S. P. Kulik, Single atom movement with dynamic holographic optical tweezers, *Laser Physics Letters*, 17(2), 025203 (2020);
4. A. D. Moiseevskiy, G. I. Struchalin, S. S. Straupe, S. P. Kulik, Experimental adaptive quantum state tomography based on rank-preserving transformations, *Laser Physics Letters*, 17(10), 105210 (2020);
5. V. M. Porozova, L. V. Gerasimov, I. B. Bobrov, S. S. Straupe, S. P. Kulik, and D. V. Kupriyanov, Raman sideband cooling of a single atom in an optical dipole trap: Toward a theoretical optimum in a three-dimensional regime, *Physical Review A*, 99(4), 043406 (2019).