

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Сидорова Павла Леонидовича
**"Масштабирование квантового вычислителя на ионах иттербия-171
с использованием кудитов и быстрых квантовых вентиляей"**,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических
наук по специальности 1.3.19 - Лазерная физика

Актуальность темы и соответствие специальности

Исследования по созданию квантового компьютера с кубитами на основе одиночных ионов проводятся с середины 1990-х годов. Этот тип кубитов позволяет реализовать одно- и двухкубитовые квантовые операции с наиболее высокой точностью, а также обеспечивает связанность всех кубитов в квантовом регистре за счет фононных колебаний цепочки ионов. Однако до настоящего времени остается нерешенной проблема масштабирования ионного квантового регистра к большому числу кубитов. Для полноценного квантового процессора необходимо иметь порядка 1000 логических кубитов, в то время как в линейных радиочастотных ловушках Пауля число ионов не превышает 100. Поиск методов масштабирования ионных квантовых регистров является актуальной задачей современной физики.

Диссертационная работа П.Л. Сидорова направлена на поиск методов масштабирования и увеличения точности квантовых операций в квантовом процессоре на основе линейной цепочки одиночных ионов $^{171}\text{Yb}^+$. Поэтому тема диссертационной работы является актуальной, а ее результаты представляют интерес для широкого круга исследователей. Поскольку управление квантовыми состояниями отдельных ионов и их цепочек осуществляется посредством резонансного лазерного излучения, получаемого от специальных высокостабильных узкополосных лазеров, тема диссертационной работы соответствует выбранной специальности 1.3.19 - Лазерная физика.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Обоснованность результатов диссертации П.Л. Сидорова обусловлена проведенным сопоставлением результатов теоретических расчетов и полученных экспериментальных данных по выполнению одно- и двухкубитовых квантовых операций. Предложенные теоретически методы глубокого лазерного охлаждения ионов и быстрых неадиабатических квантовых операций подтверждены численными и аналитическими расчетами на основе адекватных теоретических моделей. Таким образом, степень обоснованности достаточна для кандидатской диссертации.

Научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационной работы

Научная новизна диссертации П.Л. Сидорова заключается в разработке нового метода подбора параметров лазерных импульсов для осуществления

лазерного охлаждения ионов до основного колебательного состояния, в первой экспериментальной демонстрации полного набора одно- и двухкубитовых квантовых операций на оптических переходах в кудитах, представленных четырьмя электронными состояниями иона $^{171}\text{Yb}^+$, а также в предложении нового метода оценки достоверности неадиабатической операции перепутывания ионов с использованием быстрых лазерных импульсов с учётом когерентных эффектов.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в проверке справедливости используемых теоретических моделей путем сравнения с полученными экспериментальными данными.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в возможности применения разработанных новых методик для реализации масштабируемого квантового процессора на базе ионных кудитов, а также для достижения более глубокого рамановского охлаждения ионов в задачах прецизионной лазерной спектроскопии и квантовой метрологии.

Содержание и структура диссертации

Диссертация состоит из Введения, трех Глав, Заключения, Списка литературы и Приложения. Во **Введении** сформулированы актуальность исследований, цели работы, практическая новизна и значимость, защищаемые положения, а также приведен краткий обзор состояния дел в области квантовых вычислений с ионными процессорами.

В **Главе 1** представлена теоретическая модель ионного кристалла, расположенного вдоль оси линейной ловушки Пауля, и реализован способ нахождения положения равновесия и собственных мод такой конфигурации. Изложен принцип лазерного охлаждения иона до основного колебательного состояния с использованием оптических рамановских переходов между боковыми колебательными частотами верхнего и нижнего уровней иона. Предложен метод оптимизации длительности лазерного импульса и отстройки в каждом цикле охлаждения, и показана его применимость для охлаждения иона $^{25}\text{Mg}^+$ за 120 циклов охлаждения.

В **Главе 2** обсуждается переход от кубитов к кудитам (многоуровневым кубитам) как один из методов масштабирования ионного квантового процессора, так как один физический кудит может быть эквивалентным двум и более физическим кубитам. Представлены экспериментальные результаты по реализации одно- и двухкудитных квантовых операций с одиночными ионами $^{171}\text{Yb}^+$. Приведено описание экспериментальной установки, которая реализует полный цикл работы квантового процессора: предварительное доплеровское охлаждение, глубокое рамановское охлаждение, инициализацию квантового состояния, выполнение квантовых операций и считывание конечного состояния ионов. Индивидуально адресуемые однокудитные операции выполнялись одиночным лазерным лучом с управляемой частотой и направлением. Для выполнения двухкудитной операции (гейта Мельмера-Соренсена) использовалось бихроматическое лазерное излучение, настроенное на боковые колебательные резонансы. Получена точность двухкудитной операции $(65\pm 4)\%$. Было определено, что основным фактором ошибок в данном случае являлись фазовые шумы лазера.

В **Главе 3** рассмотрена теория неадиабатических квантовых операций с ионными кубитами как метод увеличения точности за счет применения более коротких управляющих лазерных импульсов. Показано, что можно подобрать последовательность лазерных импульсов, которая реализует двухкубитные квантовые операции независимо от начального колебательного состояния иона. Это уменьшает ошибку, связанную с тепловым движением ионов в квантовом регистре. Также был исследован фактор когерентного суммирования ошибок последовательных неидеальных спин-зависимых толчков ионов под действием лазерных импульсов и показано, что имеется зависимость точности квантовых операций от периода повторений лазерных импульсов. Для исследования возможности масштабирования ионного квантового процессора с использованием неадиабатических квантовых операций было проведено численное моделирование быстрого гейта при наличии нескольких ионов, находящихся в массиве ловушек Пауля. Обнаружено, что достоверность операций уменьшается при увеличении числа ионов, но асимптотически стремится к некоторому постоянному значению. Также было выполнено исследование влияния флуктуаций мощности лазерных пучков на достоверность в случае двумерного массива ловушек. Обнаружено, что флуктуации мощности на уровне 1% приводят к достоверности ниже 90%. Поэтому реализация неадиабатических гейтов требует высокой стабильности интенсивности лазерного излучения.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы и области их возможного применения.

Список замечаний по диссертации

1. В **Главе 1** и первом защищаемом положении сформулированы теоретические результаты полученные для рамановского охлаждения ионов $^{25}\text{Mg}^+$. При этом остальные главы посвящены экспериментам и теории для ионов $^{171}\text{Yb}^+$. Хотя на стр.24-25 указано, что "Выбор иона для численного моделирования глубокого охлаждения обусловлен историческим контекстом исследований в нашей лаборатории", в рамках данной работы было бы естественным также выполнить расчеты рамановского охлаждения для ионов $^{171}\text{Yb}^+$, однако этого сделано не было.
2. В **Главе 1** на стр. 22 имеются запутывающие читателя опечатки, например: "... вклад в эволюцию состояния слагаемых **первого** типа пренебрежимо мал по сравнению со слагаемыми **первого** типа ...", "Выполнение этого условия позволяет разложить экспоненту в выражении (1.30) ...", но здесь должна быть ссылка на формулу (1.29).
3. В **Главе 2** на стр.38 написано, что "В данной работе индивидуальное считывание каждого из ионов не было реализовано: излучение от обоих ионов собиралось линзой и фокусировалось на одном канале ФЭУ". В то же время, в схеме эксперимента имелась высокочувствительная EMCCD камера, на которую проецировалось изображение ионов с пространственным разрешением. Известно, что такие камеры позволяют производить счет фотонов, испущенных одиночными атомами или ионами, что фактически

обеспечивает индивидуальное считывание сигналов от отдельных ионов. Непонятно, почему это не было использовано в проведенных экспериментах.

4. В Главе 2 на рис.2.22 на стр.55 представлена зависимость вероятности возбуждения перехода от отстройки лазера от резонанса. Эта зависимость выглядит необычно для спектра узкого перехода - имеется заметный максимум при отстройке 600 кГц, сравнимый по амплитуде с резонансом в центре линии при нулевой отстройке. Этот максимум объясняется автором как следствие большого фазового шума лазера. Обычно в прецизионной спектроскопии лазерный шум не приводит к появлению такого большого бокового максимума. Возникает ощущение, что по вертикали автором используется логарифмическая шкала, хотя на рисунке она показана как линейная. Следовало бы также измерить реальный спектр излучения лазера и привести его для сравнения.
5. В Главе 3 на рис.3.7 на стр.80 приведен график с результатами теоретических расчетов точности неадиабатических квантовых операций в зависимости от числа ионов в цепочке. С увеличением числа ионов данная зависимость выходит на некоторую константу. На стр.81 указано, что это "...согласуется с результатами предыдущих исследований [57]", но физическая причина данного явления не объяснена. Возникает вопрос, что будет, например, в цепочке из 100 ионов при масштабировании квантового процессора?

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы П.Л. Сидорова.

Заключение оппонента о соответствии работы требованиям ВАК

Оценивая диссертационную работу П.Л. Сидорова в целом, следует отметить актуальность поставленных задач и большой объем проведенных теоретических и экспериментальных исследований. Отмечу, что проведенные эксперименты с ионными кудитами являются первыми в РФ и будут способствовать развитию квантовых технологий в РФ. Созданная экспериментальная установка довольно сложна и требует высоких компетенций в вакуумной технике, радиоэлектронике и лазерной физике. Высокий научный уровень полученных результатов и квалификация П.Л. Сидорова подтверждаются публикацией 3 научных статей по теме диссертационной работы в изданиях из списка ВАК и несколькими докладами на международных конференциях. Достоверность результатов подтверждается их воспроизводимостью, а также использованием адекватных теоретических моделей.

Тема исследования диссертационной работы П.Л. Сидорова полностью отвечает специальности 1.3.19 - Лазерная физика. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Диссертационная работа удовлетворяет 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 – Сидоров Павел Леонидович – заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 - Лазерная физика.

Официальный оппонент:

Член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, лаборатория нелинейных резонансных процессов и лазерной диагностики, заведующий

Рябцев Игорь Ильич

24.07.2024

Подпись Рябцева Игоря Ильича заверяю:
Заместитель директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, кандидат физико-математических наук



А.В. Каламейцев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук

Почтовый адрес: 630090, Россия,
Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13
тел. (383) 333-24-08
факс (383) 333-27-71
E-mail: ryabtsev@isp.nsc.ru

Список основных работ официального оппонента Рябцева Игоря Ильича по тематике диссертации Сидорова Павла Леонидовича «Масштабирование квантового вычислителя на ионах иттербия-171 с использованием кудитов и быстрых квантовых вентилях» в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. A.M.Farouk, I.I.Beterov, P.Xu, S.Bergamini, I.I.Ryabtsev, "Parallel implementation of CNOT^N and C₂NOT² gates via homonuclear and heteronuclear Förster interactions of Rydberg atoms", *Photonics*, Special Issue "Precision Atomic Spectroscopy", 2023, v.10, p.1280. DOI: 10.3390/photronics10111280
2. D.B.Tretyakov, V.M.Entin, I.I.Beterov, E.A.Yakshina, Yu.Ya.Pechersky, V.G.Gol'dort, I.I.Ryabtsev, "Two-photon laser excitation of Rb Rydberg atoms in the magneto-optical trap and vapor cell", *Photonics*, Special Issue "Precision Atomic Spectroscopy", 2023, v.10, p.1201. DOI:10.3390/photronics10111201
3. А.М.Фарук, И.И.Бетеров, Пэн Сюй, И.И.Рябцев, "Масштабируемая архитектура гетероядерного квантового регистра из нейтральных атомов на основе электромагнитно-индуцированной прозрачности", *ЖЭТФ*, 2023, т.164, в.2, с.230-240. DOI: 10.31857/S0044451023080096
4. И.И.Бетеров, Е.А.Якшина, Д.Б.Третьяков, Н.В.Альянова, Д.А.Скворцова, Г.Сулиман, Т.Р.Загиров, В.М.Энтин, И.И.Рябцев, "Трехфотонное лазерное возбуждение одиночных ридберговских атомов рубидия в оптической дипольной ловушке", *ЖЭТФ*, 2023, т.164, в.2, с.282-290. DOI: 10.31857/S0044451023080151
5. I.N.Ashkarin, I.I.Beterov, E.A.Yakshina, D.B.Tretyakov, V.M.Entin, I.I.Ryabtsev, P.Cheinet, K.-L.Pham, S.Lepoutre, P.Pillet, "Toffoli gate based on a three-body fine-structure-state-changing Förster resonance in Rydberg atoms", *Phys. Rev. A*, 2022, v.106, p.032601; DOI: 10.1103/PhysRevA.106.032601.
6. Д.Б.Третьяков, В.М.Энтин, Е.А.Якшина, И.И.Бетеров, И.И.Рябцев, "Динамика трехфотонного лазерного возбуждения мезоскопических ансамблей холодных атомов рубидия в ридберговские состояния", *Квантовая электроника*, 2022, т.52, в.6, с.513-522. DOI: 10.1070/QEL18064.
7. И.И.Бетеров, Е.А.Якшина, Д.Б.Третьяков, В.М.Энтин, Н.В.Альянова, К.Ю.Митянин, И.И.Рябцев, "Реализация однокубитовых квантовых операций на СВЧ-переходе в одиночном атоме рубидия в оптической дипольной ловушке", *ЖЭТФ*, 2021, т.159, в.3, с.409-423. DOI: 10.31857/S0044451021030032
8. И.И.Бетеров, Е.А.Якшина, Д.Б.Третьяков, В.М.Энтин, Н.В.Альянова, К.Ю.Митянин, А.М.Фарук, И.И.Рябцев, "Реализация однокубитовых квантовых операций с индивидуальной адресацией двух атомов рубидия в двух оптических дипольных ловушках", *Квантовая электроника*, 2021, т.51, в.6, с.464-472. DOI: 10.1070/QEL17583.
9. I.I.Beterov, E.A.Yakshina, D.B.Tretyakov, V.M.Entin, U.Singh, Ya.V.Kudlaev, K.Yu.Mityanin, K.A.Panov, N.V.Alyanova, C.Andreeva, I.I.Ryabtsev, "Trapping, detection and manipulation of single Rb atoms in an optical dipole trap using a long-

- focus objective lens", J. Phys. Conference Series, 2021, v.1859, p.012049 (8 pages). DOI:10.1088/1742-6596/1859/1/012049.
10. Е.А.Якшина, Д.Б.Третьяков, В.М.Энтин, И.И.Бетеров, И.И.Рябцев, "Наблюдение эффекта дипольной блокады при регистрации ридберговских атомов методом селективной ионизации электрическим полем", ЖЭТФ, 2020, т.157, в.2, с.206-220. DOI: 10.1134/S1063776120010215.
 11. П.Шене, К.-Л.Фам, П.Пиле, И.И.Бетеров, И.Н.Ашкарин, Д.Б.Третьяков Е.А.Якшина, В.М.Энтин, И.И.Рябцев, "Трехчастичные резонансы Фёрстера нового типа в ридберговских атомах", Квантовая электроника, 2020, т.50, №3, с.213-219. DOI: 10.1070/QEL17253.
 12. И.И.Бетеров, Е.А.Якшина, Д.Б.Третьяков, В.М.Энтин, У.Сингх, Я.В.Кудлаев, К.Ю.Митянин, К.А.Панов, Н.В.Альянова, И.И.Рябцев, "Захват и регистрация одиночных атомов рубидия в оптической дипольной ловушке с использованием длиннофокусного объектива", Квантовая электроника, 2020, т.50, №6, с.543-550. DOI: 10.1070/QEL17336.
 13. I.I.Beterov, D.B.Tretyakov, V.M.Entin, E.A.Yakshina, I.I.Ryabtsev, M.Saffman, S.Bergamini, "Application of adiabatic passage in Rydberg atomic ensembles for quantum information processing", J. Phys. B, 2020, v.53, p.182001. DOI: 10.1088/1361-6455/ab8719.
 14. И.И.Рябцев, К.Ю.Митянин, И.И.Бетеров, Д.Б.Третьяков, В.М.Энтин, Е.А.Якшина, Н.В.Альянова, И.Г.Неизвестный, "Квантовая информатика с одиночными ультрахолодными атомами в оптических ловушках", Автометрия, 2020, т.56, №5, с.72-80. DOI: 10.15372/AUT20200500