

УТВЕРЖДАЮ

Проректор, начальник Управления
научной политики Федерального государственного

бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Московский государственный
университет имени М. В. Ломоносова»,
Доктор физико-математических наук, профессор



А. А. Федянин

«10» 07 2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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

Исследования в области квантовых вычислений охватывают разработку квантовых методов шифрования и защиты данных, проверку фундаментальных теорий, инновационные методы оптимизации, создание новых материалов и другие направления. Захваченные в ловушку ионы являются перспективной платформой для квантовых вычислений благодаря высокому времени когерентности и достоверности операций. Основная проблема ионной квантовой платформы заключается в масштабируемости — увеличении числа кубитов без значительного снижения достоверности квантовых операций. Решение данной проблемы является важным этапом в развитии более мощных квантовых процессоров, способных решать широкий спектр задач на порядки быстрее классических вычислительных систем.

Диссертационная работа П.Л. Сидорова посвящена масштабированию ионного квантового вычислителя на ионах с использованием кудитов и быстрых квантовых вентиляей. В работе было предложено использование дополнительных уровней ионов иттербия-171 для кодирования квантовой информации, то есть переход от кубитов к кудитам. Этот подход позволяет уменьшить количество ионов при сохранении размерности гильбертова пространства системы. Данный способ масштабирования ионного квантового вычислителя был реализован экспериментально на разработанном в рамках работы двухкудитном квантовом процессоре. Кроме того, было произведено численное моделирование

неадиабатической операции запутывания с использованием ультракоротких лазерных импульсов и показано возникновение когерентных эффектов, которые могут значительно влиять на достоверность (fidelity) операций. Численное моделирование было также выполнено в случае присутствия нескольких ионов в отдельных ловушках. Продемонстрировано, что достоверность операции асимптотически приближается к некоторому постоянному значению при увеличении числа ионов. Полученные теоретические результаты могут быть использованы в дальнейшем при проектировании эксперимента. Использование неадиабатических операций позволяет решить проблему адресации отдельных колебательных мод в частотном пространстве, которая является важным фактором при масштабировании ионного квантового вычислителя. Таким образом, тема диссертации П.Л. Сидорова является актуальной.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Объем диссертации составляет 100 страницы, включая 29 рисунков. Список цитируемой литературы насчитывает 59 наименований.

Во введении приводится краткая история квантовых вычислений, обосновывается актуальность научной работы, а также описываются цели и задачи, указывается научная новизна, практическая значимость проведённых исследований, личный вклад автора и формулируются защищаемые положения.

В первой главе описывается динамика ионов в ловушке Пауля и приводится теория взаимодействия захваченных ионов с лазерным излучением. Далее подробно объясняется механизм лазерного охлаждения иона до основного колебательного состояния на боковых колебательных частотах. Затем описывается предложенный в рамках работы метод оптимизации параметров импульсов для достижения основного колебательного состояния на примере иона магния-25. В отличие от ранее опубликованных работ по оптимизации стратегии охлаждения иона магния, предложенный метод позволяет оптимизировать как длительности импульсов, так и отстройки их частот от резонанса. Было произведено численное моделирование охлаждения иона со среднего колебательного числа 20.5 до 0.05 за 120 циклов. Данный метод может быть применён для оптимизации стратегии охлаждения ионов любого типа.

Вторая глава диссертации посвящена созданию кудитного процессора на основе ионов иттербия-171. В главе описывается переход от кубитной системе к системе квантовых объектов, имеющих больше двух состояний для кодирования квантовой информации (то есть кудитам), как один из методов масштабирования ионного квантового вычислителя и показано, что система из N кувартов имеет размерность гильбертова пространства 2^{2N} , равную

размерности пространства системы из $2N$ кубитов. Далее объясняется, каким образом в структуре иона иттербия-171 может быть закодирован кукварт и показывается реализация полного цикла работы квантового вычислителя. В главе также описана собранная экспериментальная установка для демонстрации работы двухкудитного квантового процессора и приведены результаты экспериментов по выполнению квантовых операций.

Третья глава диссертации посвящена неадиабатическим квантовым операциям на ионных кубитах. В первой части главы изложен принцип работы неадиабатической импульсной квантовой операции и показано, как с помощью серии спин-зависимых толчков может быть создано максимально запутанное состояние. Далее объясняется, как спин-зависимый толчок может быть сформирован с использованием ультракоротких лазерных импульсов. Приводятся полученные в рамках работы аналитические выражения, демонстрирующие, что достоверность операции, состоящей из спин-зависимых толчков, формируемых таким образом, зависит от их периода повторений. После этого описываются результаты проведённого численного моделирования операции неадиабатического запутывания в присутствии нескольких ионов в отдельных ловушках в одномерных и двумерной конфигурациях. Показано, что достоверность операции стремится к некоторому постоянному значению при увеличении числа ионов и зависит от периода повторений лазерных импульсов. В конце главы исследуется зависимость достоверности от флуктуации интенсивности лазерных пучков.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации. В приложениях описан принцип работы гейта Мельмера-Соренсена и метод измерения достоверности его выполнения.

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

1. Проведена симуляция лазерного охлаждения иона магния-25 до основного колебательного состояния за 120 циклов с температуры доплеровского предела до температуры, при которой среднее колебательное число составляет 0.05, с использованием оптимальной стратегии охлаждения. Параметры стратегии охлаждения были оптимизированы согласно описанному в диссертационной работе методу.
2. Продемонстрирована работа кудитного квантового процессора, основанного на паре захваченных в ловушку ионов иттербия. Экспериментально подтверждена достоверность однокудитных операций свыше 82% и двухкудитной операции на уровне 65%. С помощью

теоретического анализа установлено, что достоверность двухкубитной операции определяется фазовыми шумами лазерного источника.

3. Показано возникновение когерентных эффектов при реализации неадиабатической двухкубитной операции с ультракороткими лазерными импульсами, существенно влияющих на достоверность.
4. Проведена симуляция неадиабатической двухкубитной операции с учётом когерентных эффектов для нескольких ионов, расположенных в одномерных и двумерных массивах ловушек. Установлено, что с помощью оптимизации периода повторений импульсов можно повысить достоверность операции до 95% для двух ионов и до 93% для семи ионов, при увеличении числа ионов достоверность асимптотически приближается к некоторой константе.
5. Рассчитаны моды нормальных колебаний конфигурации ионов иттербия, расположенных в двумерном массиве ловушек размером 3×3 .
6. Проведено исследование зависимости достоверности неадиабатической двухкубитной операции от флуктуаций интенсивности лазерных пучков. Показано, что флуктуации на уровне 1% приводят к достоверности операции ниже 90%.

Предложенный в работе метод оптимизации процесса лазерного охлаждения ионов до основного колебательного состояния позволит достигать более низких температур ионов и, в свою очередь, более высоких показателей достоверности квантовых операций. Реализация кудитного квантового процессора на основе ионов иттербия создаёт возможности для дальнейшего масштабирования ионного квантового вычислителя, что позволит выполнять полезные алгоритмы для решения задач оптимизации, моделирования квантовых систем и машинного обучения. Предложенный в диссертации теоретический подход к оценке достоверности неадиабатической операции перепутывания ионных кубитов может быть использован для предварительного подбора параметров для проведения эксперимента по запутыванию ионных кубитов, а также для проектирования оптической схемы квантового компьютера.

Результаты диссертации могут быть применены в таких организациях как Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Российский квантовый центр, Институт лазерной физики Сибирского Отделения Российской академии наук.

Достоверность полученных результатов обеспечивается воспроизводимостью экспериментов, согласием данных, полученных в различных экспериментах и использованием

поверенного оборудования. Заключение, научные выводы и рекомендации диссертации научно обоснованы.

Результаты работы докладывались лично автором на 4х российских и международных научных конференциях, а также были опубликованы в 3х статьях, входящих в международные базы данных WOS и Scopus.

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

1. Во введении на стр. 5 имеется неточность: на квантовом процессоре компании Google была решена задача сэмплинга псевдослучайных квантовых цепей, но не сэмплинга бозонов. Также впоследствии, несмотря на заявленное достижение квантового превосходства, данная задача была решена на классическом компьютере значительно быстрее изначальных оценок.
2. При декомпозиции куквартов в двухкубитовые схемы не учитывается (де)локализация кубитов: два кубита всегда представимы в виде кукварта, а обратное утверждение неверно: кукварт не всегда можно представить в виде двух делокализованных кубитов.
3. На стр. 32 указывается, что универсальным набором кудитных операций являются произвольные однокудитные операции и операция запутывания кубитов, закодированных в различных кудитах. Однако в приведённой в диссертации кодировке продемонстрированная операция Мёльмера-Соренсена создаёт запутанное состояние всех четырёх кубитов. Для удобства читателя имело смысл выбрать кодировку, в которой оказываются запутанными два конкретных кубита.

Приведенные замечания не снижают высокой научной ценности представленной работы и значимости ее вклада для развития квантовой информатики и квантовой оптики. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и корректно представляет достигнутые результаты.

Диссертация Сидорова Павла Леонидовича «Масштабирование квантового вычислителя на ионах иттербия-171 с использованием кудитов и быстрых квантовых вентилях» является законченным научным исследованием. Полученные результаты подтверждают квалификацию П.Л.Сидорова как физика-экспериментатора. По тематике диссертационная работа соответствует заявленной специальности и удовлетворяет требованиям, изложенным в Положении о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор

заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 Лазерная физика.

Доклад по материалам диссертации был сделан автором 17 июня 2024 года на совместном семинаре кафедры квантовой электроники и Центра квантовых технологий физического факультета МГУ. Отзыв на диссертацию составлен научным руководителем Центра квантовых технологий МГУ доктором физико-математических наук профессором Куликом Сергеем Павловичем и одобрен на заседании семинара.

д.ф.-м.н., Кулик Сергей Павлович,
научный руководитель Центра квантовых технологий,
профессор кафедры квантовой электроники физического факультета
МГУ имени 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



/Кулик Сергей Павлович/

Список основных работ сотрудников ведущей организации Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. А.П. Алоджанц, Д. В. Царёв, Д. А. Куц, С. А. Подошведов, С. П. Кулик, "Квантовая оптическая метрология", Успехи физических наук, vol. 3, pp. 1-40, 2024;
2. С.П.Кулик. Квантовые вычисления: прогнозы и препятствия. Квантовая электроника 53:8, 622-630 (2023);
3. Y. Kartashov, B. Ren, A. Arkhipova, Y. Zhang, H. Wang, S. A. Zhuravitskii, N. N. Skryabin, I. Dyakonov, A. A. Kalinkin, S. P. Kulik, V. Kompanets, S. Chekalin, and V. N. Zadkov, "Observation of nonlinear disclination states", Light-science & Applications, vol. 12, no. 194, 2023;
4. A. A. Arkhipova, Y. Zhang, Y. V. Kartasov, S. A. Zhuravitskii, N. N. Skryabin, I. V. Dyakonov, A. A. Kalinkin, S. P. Kulik, V. O. Kompanets, S. V. Chekalin, and V. N. Zadkov, "Observation of a solitons in oscillating waveguide arrays", Science Bulletin, vol. 23, no. 1, p. 2095, 2023;
5. С. П. Кулик, "Квантовые сенсоры", Наука и инновации. Научно-практический журнал, vol. 8, no. 246, pp. 31–36, 2023;
6. S. A. Moiseev, M. M. Minnegaliev, E. S. Moiseev, K. I. Gerasimov, A. V. Pavlov, T. A. Rupasov, N. N. Skryabin, A. A. Kalinkin, and S. P. Kulik, "Pulse-area theorem in a single-mode waveguide and its application to photon echo and optical memory in tm^3+ ", Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics, vol. 107, no. 4, p. 043708, 2023;
7. L. V. Gerasimov, R. R. Yusupov, A. D. Moiseevsky, I. Vybornyi, K. S. Tikhonov, S. P. Kulik, S. S. Straupe, C. I. Sukenik, and D. V. Kupriyanov, "Coupled dynamics of spin qubits in optical dipole microtraps: Application to the error analysis of a Rydberg-blockade gate", Physical Review A - Atomic, Molecular, and Optical Physics, vol. 106, no. 4, 2022;
8. Gerasimov, L.V., Yusupov, R.R., Bobrov, I.B., Shchepanovich, D., Kovlakov, E.V., Straupe, S.S., Kulik, S.P., Kupriyanov, D.V. Dynamics of a spin qubit in an optical dipole trap (2021) Physical Review A, 103 (6), статья № 062426;
9. Г. И. Стручалин, Я. А. Загоровский, Е. В. Ковлаков, С. С. Страупе, С. П. Кулик, "Оценка свойств квантовых состояний с использованием классических теней", Нано-индустрия, vol. 13, no. S4 (99), pp. 671 2020.