

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт
им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук

На правах рукописи

Сидоров Павел Леонидович

**Масштабирование квантового вычислителя на ионах иттербия-171 с
использованием кудитов и быстрых квантовых вентиляей**

Специальность 1.3.19 —

Лазерная физика

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук (ФИАН).

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

Официальные
оппоненты **Рябцев Игорь Ильич**
член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, руководитель лаборатории нелинейных резонансных процессов и лазерной диагностики Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук

Саакян Сергей Арамович
кандидат физико-математических наук, доцент факультета физики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова»

Защита состоится «16» сентября 2024 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 « _____ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.262.01,
доктор физико-математических наук

А.С. Золотко

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Впервые в 1980 году физик Пол Бениофф предложил использовать квантовую механику в вычислительных целях [1]. Эту идею продолжил Ричард Фейнман в 1982 году, добавив, что на гипотетическом квантовом компьютере возможно симулировать поведение квантовых систем [2]. Однако революционным открытием стала разработка Питером Шором в 1994 году квантового алгоритма по факторизации чисел, т.е. разложению числа на простые множители [3]. Шор теоретически доказал, что такая задача решается на квантовом компьютере за полиномиальное время, тогда как классические алгоритмы обеспечивают лишь экспоненциальное время. Это означает, что существует некоторое критическое количество единиц квантовой информации квантового вычислителя, кубитов, начиная с которого факторизация больших чисел на классическом компьютере значительно превысит время выполнения такой же задачи на квантовом компьютере. Такое потенциальное свойство квантовых компьютеров называют квантовым превосходством. Открытие Шора справедливо считается революционным, так как ставит под вопрос надёжность современных криптографических алгоритмов, например, алгоритм RSA, в основе которого лежит идея о невозможности быстрого решения задачи факторизации больших чисел. Следующее потенциальное практическое применение квантового компьютера было представлено в 1996 году: Лов Гровер предложил квантовый алгоритм поиска в базе данных [4]. Таким образом, существует целый класс практически важных задач, которые решаются квантовым компьютером потенциально быстрее, чем классическим.

Первая квантовая операция над двумя кубитами была реализована экспериментально в 1995 году группой учёных из университета NIST во главе с Кристофером Монро [5]. Команда учёных продемонстрировала операцию контролируемого отрицания (CNOT gate) над двумя захваченными в ловушку

ионами бериллия. Собранный учеными система представляла собой первый двухкубитный квантовый компьютер. В следующие годы происходило дальнейшее масштабирование квантового вычислителя вплоть до настоящего времени. Так, в 2001 году на 7-кубитном квантовом компьютере IBM реализовали алгоритм Шора [6]. В качестве кубитов в этом компьютере использовались ядерные спины и явление ядерного магнитного резонанса для манипуляций их состояниями. В 2016 году группой Кристофера Монро был продемонстрирован 5-кубитный квантовый компьютер, основанный на захваченных в ловушку ионах $^{171}\text{Yb}^+$ [7]. Через три года команда представила 11-кубитный ионный квантовый компьютер [8]. В настоящее время компания IonQ, основанная учеными из группы Кристофера Монро, предоставляет облачный доступ к их 25-кубитному ионному квантовому вычислителю. В том же 2019 году ученые из компании Google достигли квантового превосходства на процессоре, состоящем из 53 сверхпроводящих кубитов [9]. Задача гауссового бозонного сэмплинга, выполненная на этом процессоре, была спроектирована как пример задачи, решаемой квантовым компьютером значительно быстрее классического, хотя и не представляла практического интереса.

Как было отмечено выше, в настоящее время существуют функционирующие квантовые компьютеры, основанные на захваченных в ловушку ионах и на сверхпроводниках. Ионные кубиты отличаются высоким отношением времени когерентности к времени выполнения операции [10], что позволяет выполнять больше операций с высокой достоверностью. Манипуляция состояниями таких кубитов осуществляется с помощью лазерных пучков: каждый ион ионной цепочки может быть адресован с помощью фокусирующей системы, системы пьезозеркал и дифракционных элементов. С увеличением числа ионов уменьшается расстояние между ними в цепочке, могут иметь место фазовые переходы из одномерной конфигурации в двумерную [11,12]. Кроме того, собственные моды колебаний

цепочки из большого числа ионов расположены близко к друг другу в частотном пространстве, что затрудняет их спектральное разрешение. Стоит также отметить, скорость нагрева ионной цепочки возрастает с увеличением длины цепочки, что предъявляет дополнительные требования к качеству предварительного охлаждения ионов. Несмотря на перечисленные проблемы масштабирования квантовых вычислений на ионных кубитах, ионы в цепочке обладают более сильной связью друг с другом из-за кулоновского взаимодействия. Это позволяет проводить двухкубитные операции над парами ионов в цепочке даже если они не являются соседними. Такие особенности ионных кубитов, наряду с перспективами их использования, превращают масштабирование ионного квантового вычислителя в одну из наиболее актуальных задач в области квантовых вычислений.

В настоящее время существует ряд подходов к масштабированию ионного квантового вычислителя: использование нескольких ловушек и отдельных областей для хранения информации и взаимодействия [13]; переход к неадиабатическим квантовым операциям [14], время выполнения которых сравнимо с периодом колебаний ионов в ловушке, позволяющий избавиться от проблемы разрешения отдельных колебательных мод цепочки ионов; использование большего количества внутренних квантовых состояний ионов для кодирования, что увеличивает объём доступного гильбертового пространства без добавления дополнительных ионов [15–17] – в таком случае ионные кубиты становятся ионными кудитами. Кроме того, дополнительные состояния ионов могут использоваться не только для хранения квантовой информации, но и применяться в качестве вспомогательных состояний для реализации мультикубитных квантовых операций таких, как, например, гейт Тоффли [18,19].

Среди многообразия ионов, используемых в квантовых вычислениях ($^{25}\text{Mg}^+$ [20], $^9\text{Be}^+$ [21], $^{171}\text{Yb}^+$ [7], $^{43}\text{Ca}^+$ [22]), можно выделить $^{171}\text{Yb}^+$. Благодаря значительной массе иона задача достижения режима Лэмба-Дике упрощается, а

процесс лазерного охлаждения до основного колебательного состояния становится более эффективным. Также можно отметить относительную простоту структуры уровней иона иттербия, которая облегчает реализацию циклов охлаждения. Кроме того, структура уровней позволяет создавать не только кубиты, но и кудиты. Это, как было отмечено, расширяет потенциал масштабирования ионного квантового вычислителя.

Целью данной работы являлась исследование кодирования квантовой информации в оптические кудиты в ионе иттербия-171 и экспериментальная реализация полного набора одно- и двухкудитных операций, а также теоретическое исследование быстрых квантовых операций для масштабирования вычислительных возможностей ионного квантового компьютера.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Создание экспериментальной установки, включая систему считывания кудитных состояний, систему адресации ионов и систему контроля магнитного поля.
2. Численное моделирование охлаждения иона в ловушке Пауля до основного колебательного состояния методом боковых колебательных частот.
3. Осуществление доплеровского охлаждения двух ионов иттербия в линейной ловушке Пауля, а также охлаждения до основного колебательного состояния аксиальных мод колебаний ионов.
4. Проведение однокудитных операций на паре ионов иттербия, захваченных в ловушку Пауля, а именно контролируемое возбуждение оптических переходов

$$\begin{aligned}
 & {}^2S_{\frac{1}{2}}(F = 0, m_F = 0) \leftrightarrow {}^2D_{\frac{3}{2}}(F = 2, m_F = 0), & {}^2S_{\frac{1}{2}}(F = 0, m_F = 0) \leftrightarrow \\
 & {}^2D_{\frac{3}{2}}(F = 2, m_F = +1), & {}^2S_{\frac{1}{2}}(F = 0, m_F = 0) \leftrightarrow {}^2D_{\frac{3}{2}}(F = 2, m_F = -1)
 \end{aligned}$$

5. Проведение операции перепутывания кудитов (гейта Мельмера-Соренсена) с помощью бихроматического лазерного поля, отстроенного по частоте от резонанса с переходом ${}^2S_{\frac{1}{2}}(F = 0, m_F = 0) \leftrightarrow {}^2D_{\frac{3}{2}}(F = 2, m_F = 0)$ и измерение достоверности проведённой операции.
6. Численное моделирование неадиабатической квантовой операции с использованием быстрых лазерных импульсов на паре ионов иттербия, захваченных в планарный массив ловушек Пауля, с учётом когерентных эффектов.

Научная новизна:

Предложен новый метод подбора параметров лазерных импульсов для осуществления лазерного охлаждения ионов до основного колебательного состояния. Впервые продемонстрирован полный набор квантовых операций (одно- и двухкудитных) на оптических кудитах, с использованием электронных состояний иона иттербия-171. Впервые предложен новый метод оценки достоверности неадиабатической операции перепутывания ионов с использованием быстрых лазерных импульсов с учётом когерентных эффектов.

Практическая значимость:

Метод оптимизации процесса лазерного охлаждения ионов на боковых колебательных частотах позволит достигать более низких температур ионного кристалла и более высоких показателей достоверности квантовых операций.

Продемонстрированная в данной работе реализация кудитных квантовых операций на оптических переходах ионов иттербия открывает возможности для дальнейшего масштабирования ионного квантового вычислителя вплоть до 100 кубит в одной линейной ловушке, что позволит выполнять полезные алгоритмы.

Предложенный в данной работе теоретический метод оценки достоверности быстрой операции перепутывания ионных кубитов может быть использован для предварительного подбора параметров для проведения эксперимента.

Шумные процессоры промежуточного масштаба (около 100 кубит) востребованы при решении практических задач оптимизации, квантовой химии, фармацевтики и могут быть использованы как в научных организациях (ФИАН, РКЦ, МГУ), так и в коммерческих организациях (Сбербанк, Газпромнефть).

Методология и методы исследования. В работе использовалась линейная квадрупольная ловушка Пауля, помещённая в вакуумную камеру, для захвата цепочки ионов иттербия. Для охлаждения ионов применялся метод доплеровского охлаждения, а также метод охлаждения до основного состояния на боковых колебательных частотах. Для инициализации состояния кубитов был использован метод оптической накачки. Стабилизация лазерной частоты по частоте моды резонатора выполнялась методом Паунда-Древера-Холла. Для осуществления операции перепутывания кубитов был использован гейт Мельмера-Соренсена. Результаты экспериментов были аппроксимированы теоретическими моделями для вычисления необходимых параметров. Для численного моделирования использовались аналитические решения уравнения Шрёдингера.

Положения, выносимые на защиту:

1. Предложенный метод оптимизации лазерного охлаждения на боковых колебательных частотах, применённый к ионам $^{25}\text{Mg}^+$, позволяет согласно моделированию получить среднее колебательное число \bar{n} , равное 0.05 за 120 циклов охлаждения.
2. Использование подуровней терма $^2D_{3/2}$ в $^{171}\text{Yb}^+$ позволяет реализовать двухкубитный квантовый процессор с оптическими кудитами, эквивалентный четырёхкубитному процессору, с достоверностью однокубитных операций не

менее 82% и достоверностью двухкудитной операции не менее 65% в условиях эксперимента.

3. Когерентные эффекты, возникающие при реализации неадиабатической операции перепутывания с ультракороткими лазерными импульсами, существенно влияют на её достоверность. Подбором времени свободной эволюции между последовательными импульсами можно добиться увеличения достоверности до 95% для линейного массива из двух ионов в отдельных ловушках Пауля, и до 93% для цепочки из 7 ионов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается воспроизводимостью экспериментов, использованием поверенного оборудования, а также согласованностью экспериментальных данных и теоретической модели.

Личный вклад. При непосредственном участии автора была собрана экспериментальная установка для демонстрации работы ионного квантового вычислителя. Лично автором была разработана и сконструирована система контроля магнитного поля. Также был изготовлен резонансный трансформатор с оптимальными параметрами для питания электродов ловушки Пауля. Автор принимал активное участие в проектировании и сборке системы считывания состояний ионов и системы адресации. Лично автором была собрана система стабилизации лазера методом Паунда-Древера-Холла. Автор разработал программный код для численного моделирования процесса охлаждения ионов до основного колебательного состояния методом боковых частот и предложил новый метод оптимизации параметров. Автор лично провёл теоретические исследования быстрых квантовых операций на ионах и показал, что когерентные эффекты могут существенно влиять на достоверность неадиабатической операции перепутывания ионных кубитов. Наличие когерентных эффектов было продемонстрировано как аналитически, так и численно с помощью разработанного программного кода. Также автором была разработана модель двумерного массива ловушек Пауля,

рассчитан спектр колебательных мод ионов в такой конфигурации и проведено численное моделирование неадиабатической операции запутывания пары ионов с учётом когерентных эффектов.

Апробация работы. Результаты работы докладывались лично автором на 4х российских и международных научных конференциях: XVI Всероссийский молодежный Самарский конкурс – конференция научных работ по оптике и лазерной физике, Самара, Россия, 2018 г.; «Физика ультрахолодных атомов - 2021», Новосибирск, Россия, 2021 г.; XI семинар Д.Н.Клышко, Москва, Россия, 2022 г.; «Protection of trapped ion quantum states from magnetic field noise for qudit-based quantum computations», VII International Conference on Quantum Technologies (ICQT-2023), Москва, Россия, 2023 г.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 3 научных статьях в рецензируемых научных изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus.

Основное содержание работы

Во **введении** приведена краткая история квантовых вычислений, обосновывается актуальность данной научной работы, а также описываются цели и задачи, указывается научная новизна и практическая значимость проведённых исследований. В **первой главе** диссертации описывается принцип работы ловушки Пауля. Ион в ловушке находится в электрическом переменном потенциале с частотой изменения порядка нескольких десятков мегагерц. В каждый момент времени форма потенциала представляет собой седловидную поверхность, причём с течением времени происходят осцилляции типа экстремума вдоль осей x и y с минимума на максимум. В случае, когда параметры ловушки удовлетворяют условиям стабильности, такое периодическое изменение формы потенциала приводит к появлению средней силы, направленной к центру ловушки. При малых

смещениях от положения равновесия эта сила является гармонической и вызывает колебания иона, называемые секулярными. Частота этого движения обычно на порядок меньше частоты ловушки. Во многих случаях для простоты ловушка Пауля может быть представлена, как некоторый гармонический псевдопотенциал.

Далее приводится модель ионного кристалла, расположенного вдоль оси линейной ловушки Пауля, и показывается способ нахождения положения равновесия и собственных мод такой ионной конфигурации. Кроме того, даются асимптотические оценки межионного расстояния в ионной цепочке и показано, что при большом количестве ионов оптическая адресация отдельных ионов затруднена.

В следующем пункте описывается взаимодействие двухуровневого иона с полем, приводится вывод формулы гамильтониана взаимодействия в приближении Лэмба-Дике и рассматриваются три резонансных случая, соответствующих разным отстройкам частоты поля от частоты перехода. Затем показывается принцип охлаждения иона до основного колебательного состояния методом боковых колебательных частот: процесс охлаждения представляет собой последовательность импульсов с отстройкой $\delta = -\nu_{\text{сек}}, -2\nu_{\text{сек}}$, чередующихся с актами спонтанного распада в начальное состояние. Использование таких отстроек позволяет возбуждать электронного-колебательные переходы с уменьшением числа фононов в системе, что в итоге приводит к охлаждению. При этом спонтанные переходы происходят преимущественно без изменения числа фононов в режиме Лэмба-Дике. Эффективность охлаждения зависит от использованной стратегии, то есть от выбранной длительности импульса и отстройки в каждом цикле охлаждения. В работе был предложен метод оптимизации этих параметров и показано его применение для охлаждения иона магния-25. Суть метода состоит в следующем. Вначале выбирается известная стратегия «25x2+15x1», то есть последовательность 25 импульсов с отстройкой $-2\nu_{\text{сек}}$ и 15 импульсов с отстройкой $-\nu_{\text{сек}}$ и повторяется 3 раза. При этом выбираются длительности импульсов,

соответствующие длительностям пи-импульсов для колебательных переходов между n и $n-1$ (или $n-2$) для некоторого n , причём длительность импульсов внутри одной серии одинакова. Находится некоторый набор длительностей, соответствующий локальному минимуму среднего колебательного числа после охлаждения. После этого варьируется точка переключения между сериями с отстройкой на один и два колебательных кванта с сохранением общего числа импульсов также для минимизации конечного среднего колебательного числа. Процедура повторяется несколько раз, пока варьирование точки переключения не будет приводить к более глубокому охлаждению. Использование данного метода согласно результатам численного моделирования позволило охладить одиночный ион магния с $\bar{n} = 20.5$ до $\bar{n} = 0.05$ за 120 циклов охлаждения, что соответствует времени охлаждения порядка 3 мс.

Основные результаты этой главы опубликованы в [23].

Во второй главе описывается переход от кубитной системы к кудитной системе как один из методов масштабирования ионного квантового вычислителя и демонстрируется созданный в нашей лаборатории кудитный процессор на основе ионов $^{171}\text{Yb}^+$.

Под кудитом понимается квантовый объект, имеющий более двух состояний. Так, например, ион может иметь 4 электронных состояния, в таком случае пространство состояний системы из N ионов является гильбертовым пространством размерности 4^N . Легко заметить, что система из $2N$ ионных кубитов имеет такую же размерность, то есть кудитная и кубитная системы являются эквивалентными. Таким образом, использование дополнительных состояний ионов позволяет уменьшить количество ионов при сохранении размерности гильбертова пространства, что существенно упрощает масштабирование. Можно показать, что набор однокудитных квантовых операций вместе с операцией перепутывания

кубитов, закодированных в двух различных ионах, образуют универсальный набор квантовых операций [15]. В настоящее время продемонстрирован универсальный кудитный процессор, основанный на захваченных ионах $^{40}\text{Ca}^+$, для кодирования были использованы зеемановские подуровни состояний $^2S_{1/2}$ и $^2D_{3/2}$ и лазерное излучение на длине волны 729 нм для возбуждения переходов [24].

Далее в главе рассматривается использование ионов $^{171}\text{Yb}^+$ для создания кудитов. Предлагается кодировать информацию в 4-х квантовых состояниях иона: $^2S_{1/2}|F = 0; m_F = 0\rangle$, $^2D_{3/2}|F = 2; m_F = 0\rangle$, $^2D_{3/2}|F = 2; m_F = +1\rangle$, $^2D_{3/2}|F = 2; m_F = -1\rangle$ (Рис. 1) и использовать лазерное излучение на длине волны 435 нм для выполнения однокудитных операций, т.е. произвольных вращений в пространстве состояний каждого из кудитов. Стоит отметить, что состояния $^2S_{1/2}|F = 0; m_F = 0\rangle$ и $^2D_{3/2}|F = 2; m_F = 0\rangle$ обладают нулевой проекцией полного момента, поэтому имеют низкую чувствительность к флуктуациям магнитного поля. В следующих пунктах описывается реализация полного цикла работы квантового вычислителя: доплеровского охлаждения, инициализации состояния, глубокого охлаждения, выполнения квантовых операций и считывания.

Доплеровское охлаждение иона иттербия реализуется с помощью воздействия излучения на длине волны 369 нм, отстроенного в красную область от резонанса и перекачивающего излучения на длине волны 935 нм для возврата иона обратно в цикл (Рис. 2). Инициализация кудитов в состояние $^2S_{1/2}|F = 0; m_F = 0\rangle$ может быть осуществлена при помощи метода оптической накачки. Для квадрупольного перехода $^2S_{1/2}|F = 0; m_F = 0\rangle \leftrightarrow ^2D_{3/2}|F = 2; m_F = 0\rangle$ выполнено условие разрешения колебательных резонансов, поэтому может быть реализовано глубокое охлаждение на боковых колебательных частотах.

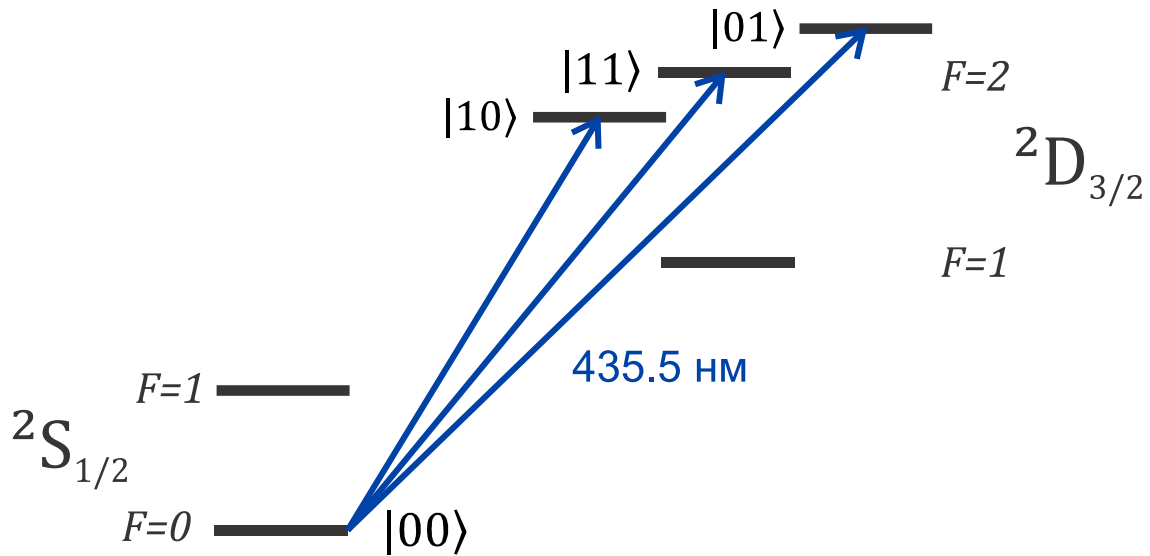


Рис. 1 Частичная схема уровней $^{171}\text{Yb}^+$. Стрелки показывают возбуждение переходов между различными кудитными состояниями с помощью воздействия резонансных лазерных полей (однокудитные операции).

Однокудитные операции на каждом из кудитов могут быть проведены при помощи воздействия одного лазерного пучка, положение и частота излучения которого контролируется акустооптическим дефлектором (АОДом) и акустооптическим модулятором (АОМом), соответственно. Выбор возбуждаемого иона и электронного резонанса обеспечивается правильным подбором частот сигналов, подаваемых на АОД и АОМ.

Для выполнения двухкубитной операции (гейта Мельмера-Соренсена) бихроматическое излучение может быть создано с использованием бихроматического сигнала, подаваемого на АОМ с частотами, близкими к резонансным с «красным» и «синим» колебательными резонансами для перехода $^2S_{1/2}|F=0; m_F=0\rangle \leftrightarrow ^2D_{3/2}|F=2; m_F=0\rangle$. Причём в случае двухкудитного квантового компьютера пучок может быть направлен вдоль оси, возбуждая оба иона.

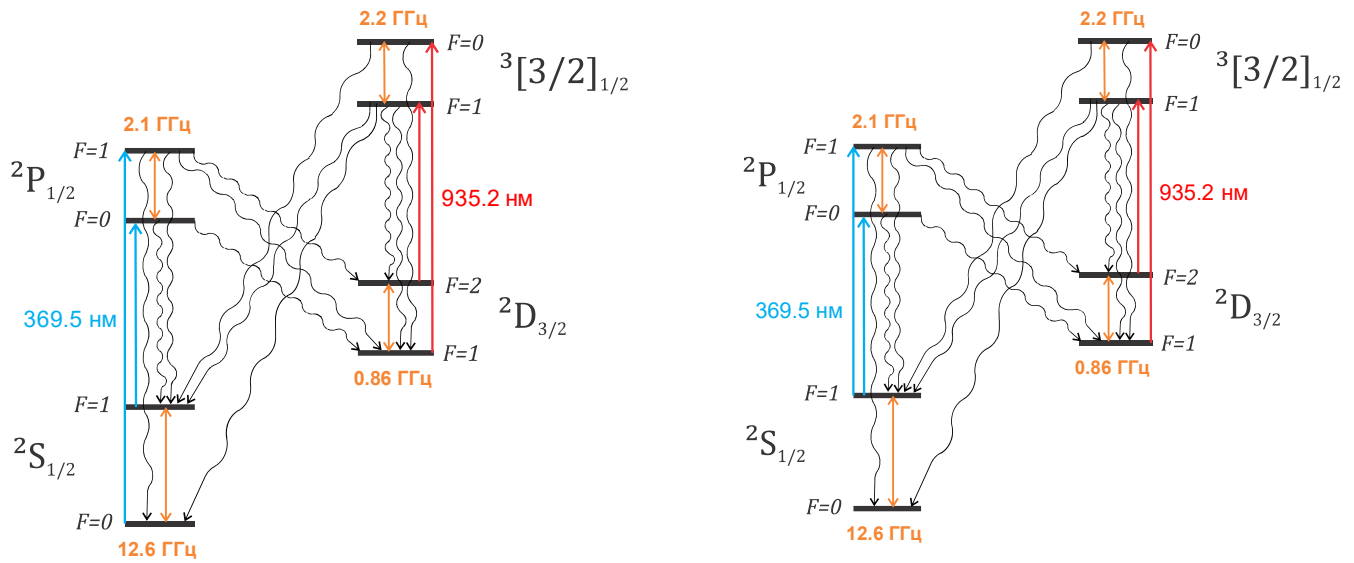


Рис. 2 Электронные переходы в ионе $^{171}\text{Yb}^+$ в процессе доплеровского охлаждения (слева) и инициализации состояния (справа). Через небольшое время воздействия излучения ион окажется в темновом состоянии $^2S_{1/2}|F = 0; m_F = 0\rangle$.

Далее описывается процесс считывания населённости всех базисных состояний. В простейшем случае считывания состояния одного кудита для измерения населённости состояния $|0\rangle$ необходимо получить сигнал флюоресценции под воздействием излучения на длине волны 369 нм и перекачивающего излучения на длине волны 935 нм для переноса населённости из состояния $^2D_{3/2}|F = 1\rangle$. Значение числа собранных с помощью ФЭУ фотонов больше некоторого выбранного дискриминатора соответствует нахождению иона в состоянии $|0\rangle$. Для считывания состояния $|k\rangle$ перед измерением сигнала флюоресценции необходимо провести резонансный с переходом $|0\rangle \leftrightarrow |k\rangle$ π -импульс, который меняет местами населённости состояний $|0\rangle$ и $|k\rangle$. Вся цепочка процедур, то есть подготовка кудитов, выполнение квантовых операций и считывание должна быть выполнена большое количество раз для сбора статистики и получения более точного значения населённости, как отношения количества исходов со свечением иона к общему числу измерений.

Далее в тексте описывается экспериментальная установка. Для удержания ионов использовалась квадрупольная линейная ловушка Пауля, изготовленная и собранная в ФИАНе нашей группой. Особенностью ловушки является наличие сквозных отверстий в осевых электродах, что позволяет направлять лазерный пучок вдоль ионного кристалла. Для согласования импеданса радиочастотного усилителя и ловушки был спроектирован и изготовлен резонансный трансформатор с добротностью около 800 и резонансной частотой 20 МГц. Смещением антенны относительно вторичной катушки достигается требуемое согласование импедансов.

Лазерная система состоит из нескольких диодных лазеров (Рис. 3), частота которых стабилизируется по волномеру. Излучение проходит через серию оптических элементов и фокусируется в центре ловушки. Лазерное излучение на длине волны 435 нм получено с помощью удвоения частоты излучения диодного лазера на длине волны 871 нм. Так как с помощью этого излучения возбуждается квадрупольный переход, необходима узкая ширина спектра излучения. Для этого частота излучения на длине волны 871 нм стабилизируется по оптическому резонатору методом Паунда-Древера-Холла. Далее лазерное излучение на длине волны 435 нм разделяется на два пучка – индивидуальный, направленный перпендикулярно оси, и глобальный, направленный вдоль оси, воздействующий на оба иона.

Величина и направление магнитного поля контролируется с помощью трёх пар катушек в конфигурации Гельмгольца, питающихся от прецизионных источников тока. Наличие магнитного поля необходимо для уменьшения нерезонансного возбуждения соседних кудитных состояний, а также для подавления эффекта когерентного пленения населённостей.

Система считывания состоит из EMCCD камеры и фотоэлектронного умножителя. Флюоресценция ионов собирается асферической линзой и

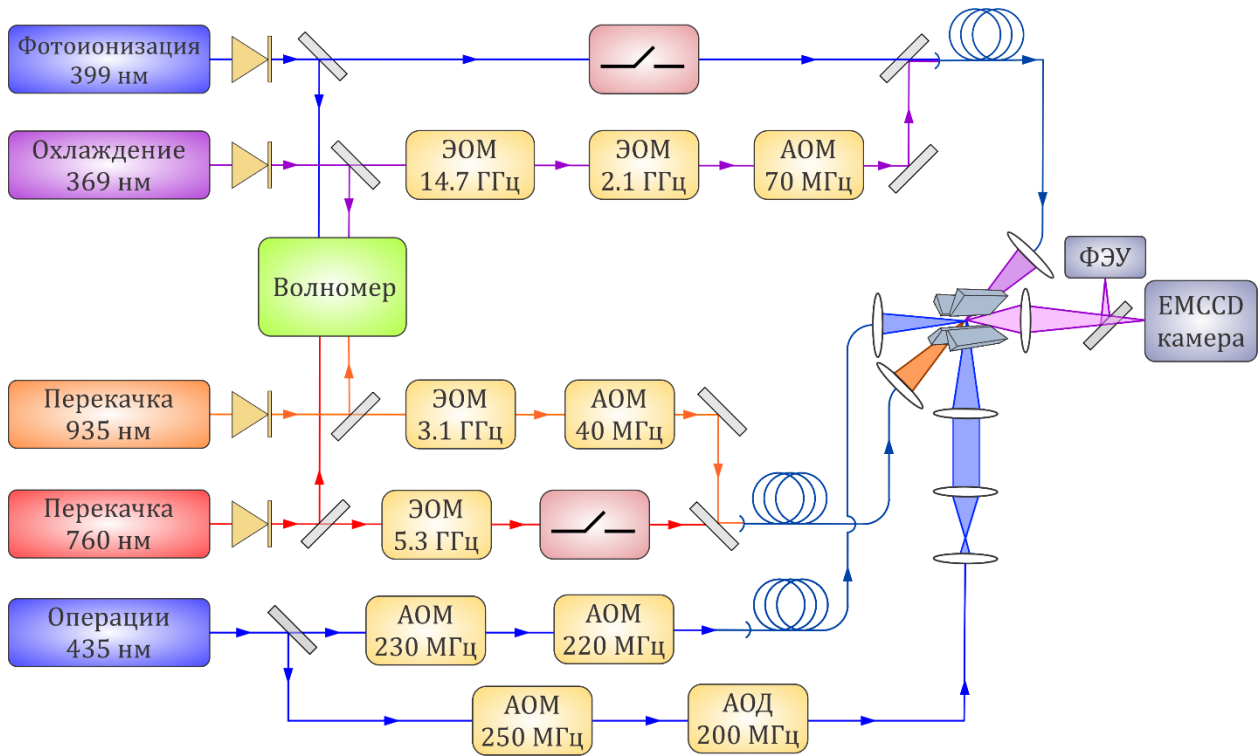


Рис. 3 Схема экспериментальной установки.

фокусируется на матрице камеры или на ФЭУ в зависимости от положения подвижного зеркала на сервоприводе.

В следующем пункте приводятся результаты экспериментов по проведению

	$R_{01}^i(x, \pi)$	$R_{02}^i(x, \pi)$	$R_{03}^i(x, \pi)$
Кудит 0	$84.8 \pm 0.5 \%$	$82.6 \pm 1.0 \%$	$86.6 \pm 0.9 \%$
Кудит 1	$86.5 \pm 0.9 \%$	$89 \pm 2 \%$	$86.5 \pm 0.6 \%$

Табл. 1 Достоверности однокудитных операций, полученные в эксперименте.

полного набора квантовых операций – однокудитных и двухкудитной. Были получены осцилляции Раби между состояниями $|0\rangle$ и $|k\rangle$ для каждого из кудитов. Можно оценить достоверность операции $R_{0k}^i(\phi, \pi)$ как максимум населённости верхнего состояния. Полученные результаты приведены в таблице 1.

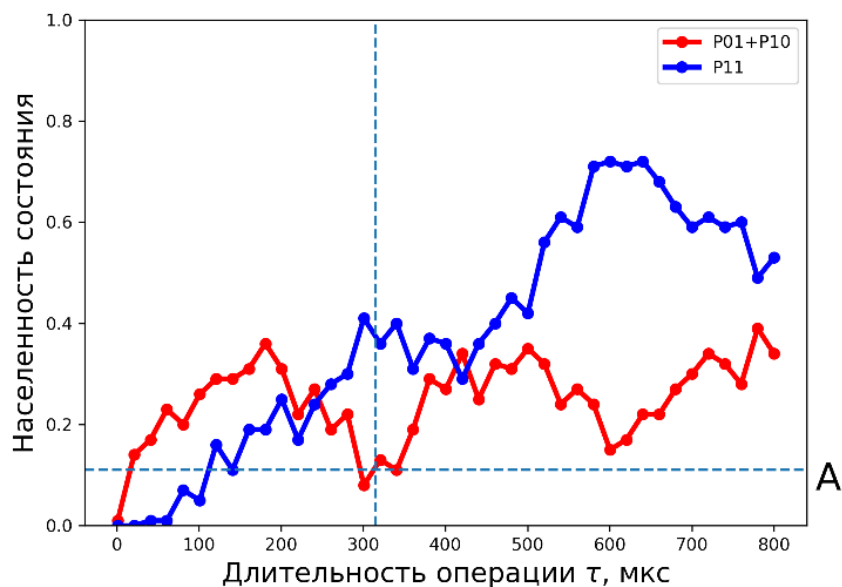


Рис. 4 Динамика населённости при воздействии бихроматического поля на пару ионов. При оптимальной длительности воздействия τ_0 населённости состояний $|01\rangle$ и $|10\rangle$ принимают минимальное значение (в идеальном случае обращаются в 0).

Доминирующим фактором, определяющим ошибку в данном случае, является температура радиальных мод.

Для демонстрации работы двухкудитной операции была получена зависимость населённости базисных состояний от длительности воздействия бихроматического поля (Рис. 4). При длительности, соответствующей максимальному запутыванию, населённость состояний с чётностью -1 принимает минимальное значение $A = 0.11 \pm 0.07$ (в идеальном случае обращается в 0). Далее при оптимальной длительности операции была получена зависимость чётности состояния от фазы дополнительного анализирующего $\pi/2$ импульса (Рис. 5). Размах осцилляций составил $B = 0.83 \pm 0.06$. Из полученных данных можно вычислить достоверность двухкудитной операции как $F = \frac{1-A}{2} + \frac{B}{4} = (65 \pm 4) \%$. Результаты численного моделирования показывают, что основным фактором ошибок в данном случае являются фазовые шумы лазера.

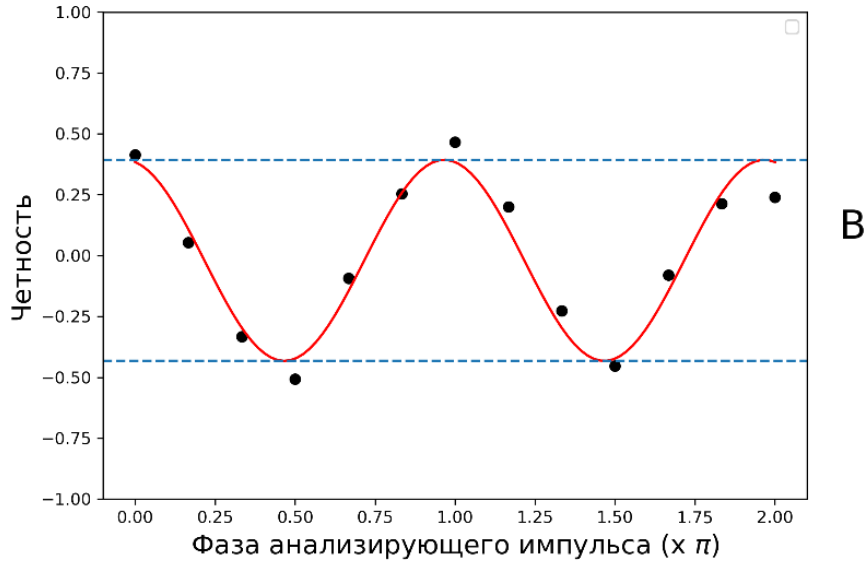


Рис. 5 Зависимость чётности состояний ионов от фазы анализирующего импульса после проведения гейта с оптимальными параметрами. В случае идеальной двухкубитной операции размах осцилляций чётности составляет 2.

Основные результаты данной главы опубликованы в [25].

Третья глава посвящена неадиабатическим квантовым операциям. В главе сначала излагается общая теория таких операций. Их суть состоит в воздействии серии коротких по сравнению с периодом колебания иона в ловушке π -импульсов, каждый из которых воздействует на ион в соответствии с оператором эволюции

$$\hat{U} = \hat{\sigma}_+ e^{i\eta(\hat{a}+\hat{a}^\dagger)} + \hat{\sigma}_- e^{-i\eta(\hat{a}+\hat{a}^\dagger)}. \quad (1)$$

Можно заметить, что передаваемый импульс зависит от электронного состояния иона, поэтому такие импульсы называют спин-зависимыми толчками (СЗТ). На фазовой плоскости, вращающейся с частотой колебательной моды, серию СЗТ можно представить в виде некоторой траектории. Если удаётся подобрать моменты прихода СЗТ и их количество так, что кривая на фазовой плоскости замыкается, то действие данной последовательности не зависит от начального колебательного

состояния. При этом траектория ограничивает некоторую площадь, поэтому состояние приобретает геометрическую фазу, зависящую от электронного состояния. Существует ряд стратегий для подбора моментов прихода и количества СЗТ, за счёт своей симметрии обеспечивающих замыкание траекторий для всех колебательных мод с некоторой точностью. Например, стратегия FRAG, в которой количество импульсов и моменты прихода задаются как $Z_k = \{-n, 2n, -2n, 2n, -2n, n\} (n \in N)$, $t_k = \{-\tau_1, -\tau_2, -\tau_3, \tau_3, \tau_2, \tau_1\}$. Суммарно по всем колебательным модам набирается некоторая фаза Φ и действие серии импульсов на базисные состояния пары кубитов можно записать как

$$|00\rangle \rightarrow e^{i\Phi} |00\rangle$$

$$|01\rangle \rightarrow e^{-i\Phi} |01\rangle$$

$$|10\rangle \rightarrow e^{-i\Phi} |10\rangle$$

$$|11\rangle \rightarrow e^{i\Phi} |11\rangle.$$

При $\Phi = \pi/4$ состояние $|\psi_0\rangle = \frac{1}{2}|00\rangle + \frac{1}{2}|01\rangle + \frac{1}{2}|10\rangle + \frac{1}{2}|11\rangle$ перейдёт в максимально запутанное состояние $|\psi_{id}\rangle = \frac{1}{2}i|00\rangle + \frac{1}{2}|01\rangle + \frac{1}{2}|10\rangle + \frac{1}{2}i|11\rangle$. Так с помощью данного неадиабатического фазового гейта создаётся запутанное состояние.

Далее в тексте описывается единственная экспериментальная реализация неадиабатической операции запутывания с использованием ультракоротких импульсов (то есть коротких по сравнению с частотой возбуждаемого перехода). В этом предельном случае оператор эволюции под действием импульса можно записать в виде

$$\hat{U}_{t_0} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} i^n J_n(\theta) e^{in\Delta\phi(t_0)} \hat{\sigma}_{x1}^n \prod_{p=1}^{3L} D \left[in \vec{b}_1^{(p)} \vec{\eta}_p \right], \quad (2)$$

что соответствует дифракции состояния иона на стоячей волне. Показано теоретически и экспериментально, что с помощью серии из N специально сфазированных дифракций можно добиться формирования СЗТ с достоверностью больше 99.8 % уже начиная с $N=8$ [26]. Поэтому данный гейт сводится к общему гейту, состоящему из серии СЗТ.

Было продемонстрировано создание запутанного состояния ионов $^{171}\text{Yb}^+$ с использованием импульсного лазера на длине волны 355 нм с достоверностью 76 % [27]. Изучено несколько факторов, лимитирующих достоверность, включая неидеальность спин-зависимых толчков и микродвижение иона [28,29]. В настоящей работе был исследован фактор когерентного суммирования ошибок последовательных неидеальных спин-зависимых толчков, который оказывается

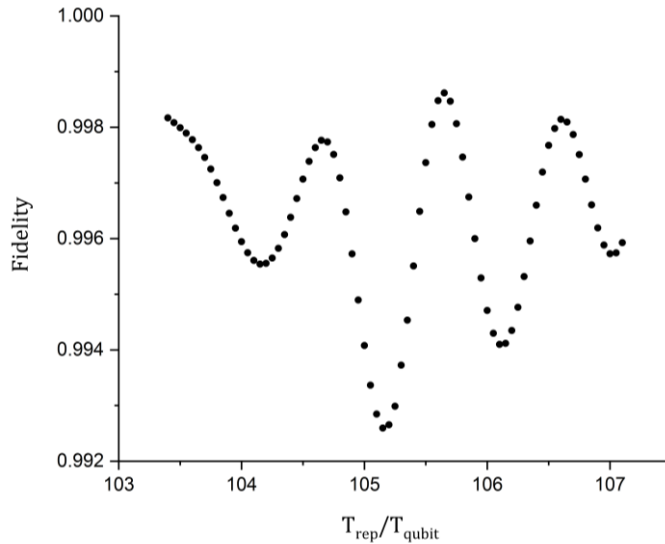


Рис. 6 Достоверность операции в зависимости от периода повторений лазерных импульсов, состоящей из четырёх последовательных СЗТ, приводящая к изменению импульса на 4η .

одним из доминирующих для неадиабатического запутывания с использованием ультракоротких импульсов.

В следующем пункте приводится аналитическое исследование когерентных эффектов и результаты численного моделирования. Был записан оператор эволюции под действием двух последовательных СЗТ. Замечено, что в получившемся выражении присутствуют нерезонансные слагаемые, изменяющиеся с частотой кубитного перехода при изменении длительности свободной эволюции между СЗТ. Также было выполнено численное моделирование эволюции состояния иона под действием четырёх последовательных СЗТ (Рис. 6), и получена зависимость достоверности такой операции от периода повторений лазерных импульсов. Результаты выполненного моделирования подтверждают зависимость достоверности от частоты повторений.

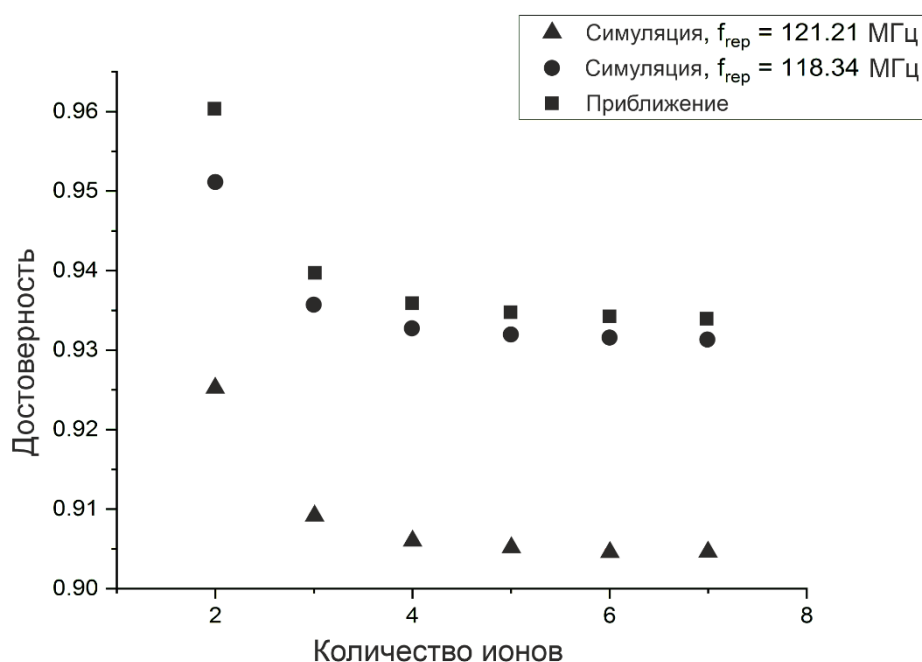


Рис. 7 Зависимость достоверности операции запутывания от количества ионов для двух различных частот повторений лазерных импульсов. Точки-квадраты соответствуют оценке достоверности без учёта когерентных эффектов.



Рис. 8 Зависимость достоверности операции запутывания от отклонения интенсивности лазерных пучков от оптимального значения.

В следующем пункте описывается численное моделирование неадиабатического гейта с учётом описанной схемы формирования СЗТ. Для исследования возможности масштабирования ионного квантового вычислителя с использованием быстрых квантовых операций было проведено численное моделирование быстрого гейта при наличии нескольких ионов, находящихся в массиве ловушек Пауля. Секулярная частота иона в ловушке принималась равной 33.5 КГц, что меньше обычных значений 0.1-2 МГц из-за необходимости замыкания фазовых траекторий с использованием небольшого числа импульсов. Расстояние между ловушками было выбрано 150 мкм. Для подбора параметров импульсов была использована стратегия FRAG при $n=1$. Моделирование было выполнено для линейного массива ловушек в количестве от 2 до 7 при двух различных значениях частоты повторений лазерных импульсов для демонстрации когерентных эффектов (Рис. 7). Из рисунка видно, что достоверность операции уменьшается при увеличении числа ионов, но стремится к некоторому постоянному значению

асимптотически. При этом достоверность зависит от частоты повторений, что ещё раз демонстрирует присутствие когерентных эффектов.

Также было выполнено исследование влияния флуктуаций мощности лазерных пучков на достоверность в случае двумерного массива ловушек. Для этого вычислен спектр колебаний ионов в квадратном массиве ловушек 3×3 и выполнено моделирование операции запутывания пары ионов при различных отклонениях интенсивности пучков от оптимальной (Рис. 8). Из графика видно, что флуктуации на уровне 1 % уже приводят к достоверности ниже 90 %. Поэтому реализация неадиабатических гейтов требует высокой стабильности интенсивности лазерного излучения.

В заключении приведены основные результаты работы:

1. Проведена оптимизация параметров глубокого охлаждения иона магния-25 согласно предложенному методу и произведено численное моделирование охлаждения за 120 циклов охлаждения с температуры доплеровского предела до температуры, соответствующей среднему колебательному числу, равному 0.05.
2. Сконструирована экспериментальная установка, выполнен захват пары ионов иттербия в ловушку Пауля. Выполнено доплеровское охлаждение и охлаждение до основного колебательного состояния осевых мод колебаний.
3. Продемонстрирован универсальный набор кудитных квантовых операций на паре захваченных в ловушку ионах иттербия. Получены достоверности однокудитных операций выше 82% и достоверность двухкудитной операции 65%. Показано, что основной вклад в ошибку двухкудитной операции вносят фазовые шумы лазерного источника.
4. Показано, что при реализации неадиабатической операции перепутывания с ультракороткими лазерными импульсами возникают когерентные эффекты,

которые существенно влияют на достоверность.

5. Произведено численное моделирование быстрого гейта с учётом когерентных эффектов в случае присутствия нескольких ионов, расположенных в одномерных и двумерном массивах ловушек Пауля. Показано, что подбором периода повторений импульсов возможно увеличить достоверность операции до 95% для двух ионов и до 93% для 7 ионов, при этом достоверность выходит на некоторую константу при увеличении числа ионов.
6. Вычислены собственные частоты и амплитудные вектора конфигурации ионов иттербия, находящихся в двумерном массиве ловушек Пауля 3x3.
7. Произведена оценка влияния флуктуаций интенсивности лазера на достоверность неадиабатической операции запутывания. Показано, что флуктуации на уровне 1% приводят к достоверности операции ниже 90%.

Публикации автора по теме диссертации

1. M. A. Aksenov, I. V. Zalivako, I. A. Semerikov, A. S. Borisenko, N. V. Semenin, P. L. Sidorov, A. K. Fedorov, K. Yu. Khabarova, and N. N. Kolachevsky Realizing quantum gates with optically addressable $^{171}\text{Yb}^+$ ion qudits //Physical Review A. – 2023. – Т. 107. – №. 5. – С. 052612.
2. Sidorov P., Aksenov M., Zalivako I., Borisenko A., Semerikov I., Khabarova K., & Kolachevsky N. Coherent effects of pulsed fast gate in 1D-and 2D ion quantum computer architectures //Physics Letters A. – 2022. – Т. 450. – С. 128370.
3. P. L. Sidorov, I. V. Zalivako, A. S. Borisenko, I. A. Semerikov, K. Y. Khabarova Optimization of Raman Cooling of $^{25}\text{Mg}^+$ Ion to Ground Vibrational State in Linear Paul Trap //Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2019. – Т. 46. – С. 138-142.

Список литературы

1. Benioff P. The computer as a physical system: A microscopic quantum mechanical

- Hamiltonian model of computers as represented by Turing machines // *J. Stat. Phys.* 1980. Vol. 22, № 5. P. 563–591.
2. Feynman R.P. Simulating Physics with Computers // *Int. J. Theor. Phys.* 1982. Vol. 21. P. 467–488.
 3. Shor P.W. Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring // *Proceedings of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science.* 1994. P. 124–134.
 4. Grover L.K. A fast quantum mechanical algorithm for database search // *Proceedings of the twenty-eighth annual ACM symposium on Theory of computing.* 1996. P. 212–219.
 5. Monroe C. et al. Demonstration of a fundamental quantum logic gate // *Phys. Rev. Lett.* 1995. Vol. 75, № 25. P. 4714–4717.
 6. L.M.K. Vandersypen et al. Experimental realization of Shor’s quantum factoring algorithm using nuclear magnetic resonance // *Nature.* 2001. Vol. 414, № 1976. P. 883–887.
 7. Debnath S. et al. Demonstration of a small programmable quantum computer with atomic qubits // *Nature.* 2016. Vol. 536, № 7614. P. 63–66.
 8. Wright K. et al. Benchmarking an 11-qubit quantum computer // *Nat. Commun.* 2019. № 2019. P. 1–6.
 9. Arute F. et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor // *Nature.* 2019. Vol. 574, № 7779. P. 505–510.
 10. Wang P. et al. Single ion qubit with estimated coherence time exceeding one hour // *Nat. Commun.* 2021. Vol. 12, № 1.
 11. James D.F.V. Quantum dynamics of cold trapped ions with application to quantum computation // *Appl. Phys. B Lasers Opt.* 1998. Vol. 66, № 2. P. 181–190.

12. Schiffer J.P. Phase transitions in anisotropically confined ionic crystals // *Phys. Rev. Lett.* 1993. Vol. 70, № 6. P. 818–821.
13. Kielpinski D., Monroe C. W.D.J. Architecture for a large-scale ion-trap quantum computer // *Nature*. 2002. Vol. 417. P. 709–711.
14. Duan L.M. Scaling ion trap quantum computation through fast quantum gates // *Phys. Rev. Lett.* 2004. Vol. 93, № 10. P. 1–4.
15. Nikolaeva A.S., Kiktenko E.O., Fedorov A.K. Efficient realization of quantum algorithms with qudits // *arXiv Prepr. arXiv2111.04384*. 2021. P. 1–14.
16. Klimov A.B. et al. Qutrit quantum computer with trapped ions // *Phys. Rev. A - At. Mol. Opt. Phys.* 2003. Vol. 67, № 6. P. 7.
17. Low P.J. et al. Practical trapped-ion protocols for universal qudit-based quantum computing // *Phys. Rev. Res. American Physical Society*, 2020. Vol. 2, № 3. P. 33128.
18. Ralph T.C., Resch K.J., Gilchrist A. Efficient Toffoli gates using qudits // *Phys. Rev. A - At. Mol. Opt. Phys.* 2007. Vol. 75, № 2. P. 1–5.
19. Ionicioiu R., Spiller T.P., Munro W.J. Generalized Toffoli gates using qudit catalysis // *Phys. Rev. A - At. Mol. Opt. Phys.* 2009. Vol. 80, № 1. P. 1–5.
20. Tan T.R. et al. Multi-element logic gates for trapped-ion qubits // *Nature. Nature Publishing Group*, 2015. Vol. 528, № 7582. P. 380–383.
21. Gaebler J.P. et al. High-Fidelity Universal Gate Set for Be 9 + Ion Qubits // *Phys. Rev. Lett.* 2016. Vol. 117, № 6. P. 1–5.
22. Ballance C.J. et al. High-Fidelity Quantum Logic Gates Using Trapped-Ion Hyperfine Qubits // *Phys. Rev. Lett.* 2016. Vol. 117, № 6. P. 1–6.
23. П. Л. Сидоров, И. В. Заливако, А. С. Борисенко, И. А. Семериков, К.Ю.Хабарова Оптимизация процесса рамановского охлаждения иона 25Mg^+

до основного колебательного состояния в линейной ловушке Пауля // Краткие сообщения по физике Физического института им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук. 2019. Vol. 46, № 4. P. 46–53.

24. Ringbauer M. et al. A universal qudit quantum processor with trapped ions // Nat. Phys. 2022. Vol. 18, № 9. P. 1053–1057.
25. Aksenov M.A. et al. Realizing quantum gates with optically addressable Yb + 171 ion qudits // Phys. Rev. A. 2023. Vol. 107, № 5. P. 1–11.
26. Mizrahi J.A. Ultrafast Control of Spin and Motion in Trapped Ions // PhD thesis. University of Maryland, College Park, 2013.
27. Wong-Campos J.D. et al. Demonstration of Two-Atom Entanglement with Ultrafast Optical Pulses // Phys. Rev. Lett. 2017. Vol. 119, № 23. P. 1–5.
28. Gale E.P.G. et al. Optimized fast gates for quantum computing with trapped ions // Phys. Rev. A. American Physical Society, 2020. Vol. 101, № 5. P. 052328.
29. Ratcliffe A.K., Oberg L.M., Hope J.J. Micromotion-enhanced fast entangling gates for trapped-ion quantum computing // Phys. Rev. A. American Physical Society, 2020. Vol. 101, № 5.