

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»

И.о. ректора Национального
исследовательского
ядерного университета «МИФИ»
доктор физ.-мат. наук, профессор
Нагорнов Олег Викторович



2022 г.

Отзыв ведущей организации

Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ) на диссертацию
Борисенко Александра Станиславовича
«Спектроскопия оптических переходов в ионах иттербия
для реализации квантовых вычислений»
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.19 - Лазерная физика

Актуальность темы диссертационной работы

Квантовые вычисления являются одним из самых бурно развивающихся направлений прикладной физики в последние десятилетия. Мощным толчком данной темы стала разработка Питером Шором в 1994 году алгоритма, показывающего преимущество квантовых вычислителей над классическими в задаче факторизации. С того момента был предложен ещё целый ряд квантовых алгоритмов, а также разработаны квантовые вычислители, позволяющие реализовать часть из них. Среди всех существующих на данный момент платформ для реализации квантовых вычислений, ионные вычислители являются одними из самых перспективных. Кубит в ионе формируется электронными состояниями и может быть, как микроволновым, так и оптическим. При этом за счёт наличия заряда ионы легко

захватываются и удерживаются в радиочастотных ловушках на протяжении нескольких дней. Находясь в потенциале ловушки, ионы обладают общими колебательными модами, с помощью которых реализуется перепутывание между частицами. На ионных системах продемонстрированы рекордные времена когерентности, достоверности одно- и двух-кубитных операций. Среди большого числа пригодных для реализации квантовых вычислителей ионов выгодно выделяется ион иттербия-171, на основе которого на данный момент реализован вычислитель с наибольшим квантовым объёмом.

Диссертация А. С. Борисенко посвящена исследованию методами прецизионной лазерной спектроскопии в ионах иттербия оптических переходов, необходимых для подготовки и контроля квантовых состояний ионов, а также переходов участвующих в реализации квантовых алгоритмов. В работе предложена модель, позволяющая оптимизировать процедуру считывания состояния оптического кубита в ионе иттербия-171. Впервые предложен и экспериментально реализован метод определения температуры и темпа нагрева ионов в многочастичном линейном ионном кристалле по анализу дефазировки осцилляций Раби на узком оптическом переходе. Таким образом, тема диссертации А. С. Борисенко 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 106 страниц, включая 36 рисунков и 4 таблицы.

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

В **первой главе** рассматриваются особенности использования иона иттербия в качестве кубита в квантовом вычислителе. Приводится описание

экспериментальной установки, созданной в рамках диссертационной работы, а также принцип её работы. Описывается процедура захвата иона в ловушку Пауля и его лазерного охлаждения. Приведены результаты измерения длин волн, используемых для охлаждения переходов в различных изотопах иттербия.

Во второй главе приводится численный анализ пространственных и частотных характеристик линейных ионных кристаллов, выполнен расчёт потенциала ловушки для создания эквидистантного ионного кристалла. Также приводится результат моделирования и описание изготовления линейной квадрупольной ловушки Пауля для выполнения квантовых операций на ионных кубитах.

Третья глава посвящена исследованию и оптимизации процедуры считывания квантового состояния оптического кубита на ионе иттербия-171 методом квантовых скачков в зависимости от параметров эксперимента. Выполнен учёт нерезонансных и переходных эффектов, спонтанного распада и паразитной засветки фотодетектора.

В четвертой главе приводится анализ существующих на данный момент методов измерения температуры ионных кристаллов, а также вводится новый метод измерения температуры и темпа нагрева многочастичных ионных кристаллов, основанный на исследовании дефазировки осцилляций Раби на узком оптическом переходе. Показано, что применение данного метода для захваченных в изготовленную ловушку Пауля ионов иттербия-171 позволяет определить температуру пяти ионов с ошибкой менее 5%, а также измерить скорость нагрева одиночного иона.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Научная новизна и значимость диссертационной работы

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

1. Уточнены значения длин волн, используемых для охлаждения переходов $^2S_{1/2} \rightarrow ^2P_{1/2}$ и $^2D_{3/2} \rightarrow ^3[3/2]_{1/2}$ в ионах изотопов иттербия-170, 171, 172, 174, 176. Погрешность измерений уменьшена в три раза по сравнению с ранее известными данными.
2. Смоделирована и собрана линейная квадрупольная ловушка Пауля с электродами-лезвиями. Собрана лазерная система охлаждения ионов иттербия и система детектирования их состояний.
3. Предложена аналитическая модель процедуры считывания квантового состояния оптического кубита в ионе иттербия-171 методом квантовых скачков, в зависимости от экспериментальных параметров, таких как эффективность регистрации фотонов флюоресценции, время считывания, значение дискриминатора, коэффициент паразитной засветки, а также учтены нерезонансные и переходные эффекты и спонтанный распад. Показано, что предел достоверности считывания состояния оптического кубита в ионе иттербия-171 методом квантовых скачков при использовании лазерной системы охлаждения составляет 99.4%.
4. Впервые предложен и апробирован метод определения температуры и темпа нагрева ионов в многочастичном ионном кристалле по анализу дефазировки осцилляций Раби на узком оптическом переходе в режиме Лэмба-Дике. Предложенным методом экспериментально определена температура кристалла из 5 ионов иттербия-171 после доплеровского охлаждения, составившая 1.69 ± 0.08 мК, а также измерен темп нагрева одиночного иона вдоль оси ловушки, который составил 8 ± 2 фононов/мс.

Практическая значимость диссертационной работы

Практическая значимость результатов работы выражается в следующем:

1. Уточнённые значения длин волн охлаждающих переходов в ионах изотопов иттербия могут быть использованы для более точных расчётов

характеристик электронных оболочек ионов иттербия, а также в экспериментах по охлаждению и подготовке начального состояния ионов иттербия для оптимизации и автоматизации процесса.

2. Разработанная в рамках диссертации модель считывания квантового состояния оптического кубита в ионе иттербия позволяет оптимизировать параметры эксперимента для достижения максимальной достоверности считывания кубита. Кроме того, предложенная модель может применяться и для оптимизации считывания состояния оптического кубита, использование которых позволяет увеличить квантовый объём вычислителя без наращивания числа ионов в регистре.
3. Предложенный метод измерения температуры и темпа нагрева ионов в многочастичном линейном кристалле по дефазировки осцилляций Раби расширяет диапазон поддающихся измерению параметров кристаллов и ионных ловушек.

Результаты диссертации имеют высокую научную и техническую значимость и могут быть применены в таких организациях как НИЯУ МИФИ, Российский квантовый центр, Институт лазерной физики Сибирского отделения РАН, Акционерное общество «Российские космические системы» и других.

Обоснованность и достоверность основных результатов и выводов

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием поверенного оборудования, воспроизводимостью и согласованностью расчётов и экспериментальных данных, обоснованностью сделанных в работе допущений и приближений, а также публикацией основных результатов работы в рецензируемых журналах.

Результаты диссертации прошли апробацию на российских и международных конференциях. Они также опубликованы в пяти 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 1 приводится описание экспериментальной установки для наблюдения флуоресценции ионов и считывания их квантового состояния, при этом в системе в качестве детектора используются и высокочувствительная камера и фотоэлектронный умножитель. Однако в тексте диссертации в явном виде не указывается причина использования сразу двух датчиков в установке.
2. В главе 3 вводится модель для расчёта достоверности считывания оптического кубита в ионе иттербия-171 методом квантовых скачков и демонстрируется теоретическое ограничение достоверности в 99.4%. В то же время в литературном обзоре указано, что на ионных кубитах на данный момент реализована достоверность считывания более 99.9%. В работе стоило бы более подробно пояснить за счёт чего в других группах достигаются более высокие достоверности считывания.
3. В главе 4 приводится результат измерения темпа нагрева иона иттербия-171 в изготовленной линейной ловушке Пауля при фиксированном значении потенциала, а значит и при одном значении секулярных частот. В работе следовало бы аргументировать выбор таких параметров удерживающего потенциала, либо провести исследование по минимизации темпа нагрева захваченного иона в зависимости от секулярных частот.

Приведенные замечания не снижают высокой научной ценности представленной работы и значимости ее вклада для развития прецизионной спектроскопии ионов и квантовых вычислений.

Общая оценка диссертации

Диссертация Борисенко Александра Станиславовича «Спектроскопия оптических переходов в ионах иттербия для реализации квантовых вычислений» является законченным научным исследованием. По тематике она 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.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и корректно представляет достигнутые результаты.

Доклад по материалам диссертации был сделан Борисенко Александром Станиславовичем 26 октября 2022 года на семинаре Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ. Отзыв составлен доцентом отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ (М) НИЯУ МИФИ Борисюком Петром Викторовичем.

Отзыв на диссертацию А. С. Борисенко обсужден и одобрен на семинаре Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ протокол №078/015а от «26» октября 2022 г.

Отзыв составил:

Доцент Отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ (М) НИЯУ МИФИ,
д.ф.-м.н. по специальности 01.04.07 –
физика конденсированного состояния,
PVBorisyuk@mephi.ru

Борисюк
Петр Викторович

Директор
Института лазерных и плазменных технологий
НИЯУ МИФИ,
д.ф.-м.н. по специальности 01.04.21 –
Лазерная физика, профессор,
APKuznetsov@mephi.ru

Кузнецов
Андрей Петрович

Председатель совета по аттестации
и подготовке научно-педагогических кадров
НИЯУ МИФИ,
д.ф.-м.н. по специальности 01.01.03
– математическая физика, профессор,
NAKudryashov@mephi.ru

Кудряшов
Николай Алексеевич

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 НИЯУ МИФИ по теме диссертации А.С. Борисенко 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. Borisjuk, 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. Borisjuk, 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).