

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Борисенко Александра Станиславовича «Спектроскопия оптических переходов в ионах иттербия для реализации квантовых вычислений», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика

Актуальность темы диссертационного исследования.

Диссертация Борисенко А. С. посвящена актуальной и востребованной на сегодняшний день тематике – реализации квантовых алгоритмов и логических операций с высокой степенью достоверности считывания состояния оптического кубита при использовании цепочки атомных ионов в качестве отправного пункта исследований. Кубит, как основа реализации квантовых вычислений и квантовой криптографии, в ионной среде может быть образован за счет манипулирования электронными состояниями иона с помощью лазерных источников. В отличие от нейтральных атомов, ионы достаточно просто захватываются в ловушку Пауля и могут находиться в ней длительное время. Другим важным обстоятельством в пользу использования ионных рабочих сред является возможность перепутывания внутренних состояний ионов сразу для нескольких ионов в ловушке Пауля посредством использования общих колебательных мод. Между тем, для реализации отмеченных выше преимуществ в использовании ионных рабочих сред необходимо обеспечить решение задач, связанных с лазерным охлаждением ионов вплоть до уровня основного колебательного состояния, обеспечить надежный контроль температуры ионных кристаллов, разработать конструкции ловушек Пауля с низкими скоростями нагрева и т.д.

Тема диссертационного исследования Борисенко А.С. связана с поисками путей решения для перечисленных выше актуальных проблем на основе реализации следующих задач: повышение достоверности считываемых квантовых состояний в цепочке ионов иттербия, разработка оригинальных способов мониторинга температуры и скоростей нагрева ионов в ловушке Пауля, повышение точности измерений длин волн переходов для нескольких изотопов иона иттербия.

Общая характеристика диссертации.

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, 4-х глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 106

страниц машинописного текста. Список литературы включает 80 наименований.

Во Введении обосновывается актуальность диссертационной работы; там же приведены формулировки цели и задачи диссертационного исследования, перечислены положения, выносимые на защиту.

В первой Главе диссертации автором обосновываются преимущества использования иона иттербия для его применения в качестве кубита в квантовых вычислениях, связанные с относительной простотой атомных уровней иона и доступностью лазерных источников для его охлаждения. Там же описывается схема экспериментальной установки, используемой автором для получения основных результатов диссертационного исследования. В заключительном разделе первой Главы содержатся результаты измерений длин волн переходов для некоторых изотопов иона иттербия, превосходящие по точности все имеющиеся в литературе аналоги.

Основное содержание второй Главы диссертации связано с описанием колебательных состояний ионов в кристалле. В той же Главе обсуждается конструкция ловушки Пауля, используемой для проведения квантовых логических операций на ионных кубитах. С этой целью было проведено математическое моделирование для равновесных положений ионов в цепочке (до 10 ионов в цепочке). Для описания ионов в цепочке предложено аналитическое представление для биквадратичного потенциала, обеспечивающего постоянность расстояний между ионами по аксиальному направлению.

В третьей Главе диссертации описывается процедура оптимизации параметров эксперимента с целью минимизации ошибки считывания квантового состояния иона. Главным результатом этой Главы является доказательство возможности достижения уровня достоверности считывания состояния, равном 99.4%. Для доказательства этого утверждения использовались результаты оптимизации значений порога дискриминатора и времени детектирования при различных уровнях засветки и эффективности считывания.

Наконец, в четвертой Главе диссертации изложен оригинальный подход автора к измерению и мониторингу температуры многочастичных ионных кристаллов, основанный на анализе динамики осцилляций Раби с применением узкой спектральной линии оптического перехода для отдельного иона кристалла. Далее, в тексте данной Главы описана этапность этих измерений, включающая процесс охлаждения ионного кристалла до уровня доплеровского предела, оптическую накачку в основное состояние, а также измерения температуры кристалла и скорости нагрева иона в ловушке, основанные на методе автора (параграф 4.5 диссертации).

В Заключении сформулированы основные научные результаты и выводы.

Новизна научных положений и результатов. Новизна научных результатов отражена в тексте диссертации, а также в автореферате, и сводится, в основном, к следующему:

1. Впервые в России создана экспериментальная установка, с помощью которой успешно реализована процедура логических квантовых операций. В качестве отправного пункта исследований использовалась рабочая среда, состоящая из цепочки ионов иттербия.
2. Уточнены значения длин волн переходов в ионах иттербия.
3. На основе метода квантовых скачков показана возможность достижения уровня достоверности считывания состояния оптического кубита в ионе иттербия, равного 99.4%.
4. Впервые предложен и экспериментально реализован метод оценки температуры ионного кристалла, на основе измерений затухания осцилляций Раби.

Теоретическая и практическая значимость результатов диссертационного исследования заключается в уточнении значений экспериментально измеренных длин волн радиационных переходов в ионах иттербия, представляющем самостоятельный интерес в атомной спектроскопии. Теоретические оценки для достоверности считывания состояния оптического кубита в ионе иттербия важны с точки зрения практических приложений, таких, например, как квантовая криптография. Представляет научный и методический интерес предложенный автором метод определения температуры ионного кристалла.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивается постановкой задач диссертационного исследования, использованием современных методов математического моделирования и статистической обработки результатов исследований, проведением сопоставительного анализа с данными авторов, полученными в рамках других альтернативных подходов, а также применением поверенного оборудования.

Замечания по диссертационной работе:

1. В первой Главе диссертации приводятся результаты измерений длин волн переходов в ионах иттербия с утверждением, что уточнение их значений может привести к уточнению поляризуемостей для рассматриваемых состояний ионов иттербия. С этим трудно согласиться, поскольку наряду с длинами волн переходов в определение поляризуемостей состояний входят также силы осцилляторов, являющимися основным источником погрешности расчета поляризуемостей. Кроме того, необходимо также учитывать

переходы в континуум, вклад которых может быть существенным и в ряде случаев может достигать десятков процентов.

2. Во второй Главе диссертации (параграф 2.1.4) представлены коэффициенты k_2 и k_4 , определяющие биквадратичный потенциал ловушки с отсылкой на систему уравнений 2.6. Не до конца ясен и требует пояснений алгоритм их получения.
3. Текст автореферата в разделе «Основное содержание работы», на мой взгляд, перегружен излишней детализацией в описании экспериментальной установки, а также в анализе методов получения результатов измерений.

Перечисленные замечания не снижают общую высокую оценку диссертационной работы и носят, скорее, рекомендательный характер.

Результаты диссертационного исследования прошли необходимую апробацию, были представлены на представительных конференциях в России, а также на Международных конференциях и симпозиумах, своевременно опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных работ.

Автореферат соответствует содержанию и структуре диссертации.

Судя по автореферату и тексту диссертации, следует отметить логичность и обоснованность подхода автора к решению поставленных задач. К достоинствам диссертационной работы следует также отнести грамотное и корректное изложение полученных результатов, а также глубину проведенного автором научного анализа.

Результаты диссертационной работы Борисенко А.С. **можно классифицировать как решение важной научной задачи** в области экспериментальной реализации квантовых логических операций на цепочке ионов иттербия, как ключевого элемента квантовых вычислений.

Заключение по диссертационной работе. Диссертация Борисенко Александра Станиславовича «Спектроскопия оптических переходов в ионах иттербия для реализации квантовых вычислений» является законченной научно-квалификационной работой. Представленная диссертация соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 11.09.2021)) и специальности 1.3.19 – Лазерная физика, а ее автор - Борисенко Александр Станиславович заслуживает

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

Официальный оппонент:

д.ф.-м.н., Пальчиков Виталий Геннадьевич,
главный научный сотрудник Главного метрологического центра
Государственной службы времени и частоты (ГМЦ ГСВЧ (НИО-7))
Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский
научно-исследовательский институт физико-технических и
радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ»),

Российская Федерация, 141570, Московская область, город
Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево, промзона ФГУП
«ВНИИФТРИ», корпус 28

Тел. 8-495-660-57-24

e-mail: palchikov@vniiftri.ru



/ Пальчиков В.Г. /

Подпись Пальчикова Виталия Геннадьевича удостоверяю:

Лобова Оксана Алексеевна,

начальник отдела кадров Федерального государственного унитарного
предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-
технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ»),

Российская Федерация, 141570, Московская область, город
Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево, промзона ФГУП
«ВНИИФТРИ», корпус 11

Тел. 8-495-546-63-28

e-mail: lobova@vniiftri.ru



/ Лобова Оксана Алексеевна /

Список основных публикаций оппонента доктора физико-математических наук В. Г. Пальчикова по теме диссертации А.С. Борисенко в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. V.D. Ovsiannikov, V. G., Palchikov, I. L. Glukhov, Microwave Field Metrology Based on Rydberg States of Alkali-Metal Atoms, Photonics, 9(9), art. no. 635 (2022)
2. А. В. Семенко, Г. С. Белотелов, Д. В. Сутырин, С. Н. Слюсарев, В. И. Юдин, А. В. Тайченачев, В. Д. Овсянников, В. Г. Пальчиков, Анализ неопределенностей стандарта частоты на холодных атомах иттербия с использованием операционных параметров оптической решетки, Квантовая электроника, 51 (6), 484--489 (2021)
3. A. 1. Magunov and V. G. Palchikov, On the efficiency of laser pumping of hyperfine structure sublevels of Rubidium-87 and Cesium-133 atoms, J. Phys.: Conf. Ser. v. 2036, art. no. 012003, (2021).
4. М. Н. Скворцов, С. М. Игнатович, В. И. Вишняков, Н. Л. Квашнин, И. С. Месензова, Д. В. Бражников, В. А. Васильев, А. В. Тайченачев, В. И. Юдин, С. Н. Багаев, И. Ю. Блинов, В. Г. Пальчиков, Ю. С. Самохвалов, Д. А. Парёхин, Миниатюрный квантовый стандарт частоты на основе явления когерентного пленения населённости в парах атомов Rb-87, Квантовая электроника, 50(6), 576-580 (2020)
5. В. Д. Овсянников, С. И. Мармо, С. Н. Мохненко, В. Г. Пальчиков, Операционная компенсация неопределенностей высших порядков в стандартах частоты на атомах магния и кальция в оптических решетках, Квантовая электроника, 48(5), 419-424 (2018)