

## О Т З Ы В

**официального оппонента Бетерова Ильи Игоревича на диссертацию Заливако Ильи Владимировича "Лазерно-охлажденные ионы магния и иттербия для задач метрологии и квантовых вычислений", представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 "Лазерная физика"**

Диссертационная работа И.В.Заливако посвящена экспериментальному исследованию лазерного охлаждения и захвата одиночных ионов магния и иттербия, разработке методов кодирования квантовой информации в квантовых состояниях холодных ионов и теоретическому исследованию стандарта частоты на основе ионов магния. Актуальность выбранной темы обусловлена перспективностью использования ультрахолодных ионов для реализации квантовых вычислений, создания квантовых стандартов частоты и других задач прецизионной лазерной спектроскопии.

Диссертация состоит из Введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Первая глава посвящена экспериментальным методам захвата ионов и лазерного охлаждения ионов. Кратко описаны основные типы ловушек для ионов и методы доплеровского охлаждения ионов.

Во второй главе рассматривается загрузка ионов в ловушки методом электронной фотоэмиссии. Приведен обзор существующих методов загрузки ионов. Предложен и экспериментально реализован новый метод загрузки ионов, в основе которого лежит фотоэмиссия электронов из электродов ловушки нерезонансным излучением и последующая ионизация нейтральных атомов в результате столкновений с электронами. Интересной особенностью метода является то, что необходимая для ударной ионизации энергия приобретает электронами, движущимися в поле радиочастотной ионной ловушки. Экспериментально продемонстрировано получение ионных кристаллов с использованием предложенного метода загрузки. Проведены отдельные эксперименты по исследованию зависимости скорости загрузки от мощности и спектральных характеристик излучения. Результаты этих экспериментов подтверждают гипотезу о фотоэмиссионном механизме загрузки ионов.

Третья глава посвящена микроволновому реперу частоты на лазерно-охлажденных ионах магния. В главе обсуждаются общие принципы создания стандартов частоты на основе ультрахолодных ионов, схемы лазерного охлаждения, оптической накачки,

индуцирования «часовых» микроволновых переходов, управления и магнитным полем и регистрации квантового состояния иона. Приведена схема экспериментальной установки, предназначенной для создания стандарта частоты. Сделаны оценки ожидаемых характеристик предложенного стандарта, и показано, что они в целом соответствуют характеристикам аналогичных систем.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальной реализации кубита на основе ультрахолодного иона иттербия. В главе приведен краткий обзор основных принципов квантовых вычислений, схема реализации кубита на основе оптических переходов между состояниями иона иттербия в сравнении с альтернативными (микроволновыми) переходами. Описана экспериментальная установка для реализации кубита на основе одиночного иона иттербия, включая ионную ловушку, лазерную систему для управления квантовыми состояниями иона и их регистрации. Отдельно обсуждается стабилизация частоты лазерного излучения, приведены результаты экспериментов по оптической регистрации одиночных ионов и спектроскопии оптических переходов. Экспериментально продемонстрированы осцилляции Раби на оптическом переходе между состояниями одиночного иона, что является демонстрацией однокубитовых вентилях. Сделаны оценки точности однокубитовых вентилях «НЕ». Путем численного моделирования осцилляций Раби для колеблющегося в ловушке иона сделан вывод о том, что основным источником снижения точности является конечная температура иона.

Диссертация содержит важные экспериментальные результаты, имеющие принципиальное значение для дальнейшего развития квантовых технологий на основе ультрахолодных ионов, включая реализацию квантовых вычислений и оптических стандартов частоты. Результаты работы опубликованы в ведущих российских и зарубежных научных журналах, прошли апробацию на научных конференциях.

В то же время, имеются замечания:

1) В рамках диссертации решены связанные друг с другом, но при этом достаточно самостоятельные научные задачи (загрузка ионов в ловушку, оценка характеристик микроволнового стандарта частоты, реализация однокубитовых вентилях с использованием ионов). Это несколько затруднило автору последовательное и ясное изложение работы. В частности, первая глава не содержит ни полноценного литературного обзора по теме диссертации, ни оригинальных результатов, полученных автором. Фрагменты

литературного обзора при этом включены в последующие главы. Такая структура изложения несколько затрудняет восприятие работы.

2) Автор работы характеризует выполненные однокубитовые вентили как X и Y. Это создает впечатление, что был проведен независимо анализ точности вентилях обоих типов. В действительности, было проведено наблюдение когерентных осцилляций Раби, которое само по себе не позволяет определить разницу между X и Y вращениями. На этом вопросе имело бы смысл отдельно остановиться при интерпретации результатов.

3) Оценка достоверности однокубитового вентиля была сделана фактически по первому полупериоду осцилляций Раби, то есть для перехода «0»-«1». В то же время, по имеющимся данным можно было бы сделать и оценку снизу для перехода «1»-«0» по второму полупериоду осцилляций. Это позволило бы построить хотя бы полную таблицу истинности. В этом случае, значение точности без поправки на ошибки при приготовлении начальных состояний, оказалось бы несколько ниже.

Указанные замечания никак не уменьшают ценности результатов, полученных в диссертации.

Научная ценность работы подтверждена публикациями в реферируемых журналах и трудах конференций.

Практическая значимость заключается в возможном использовании полученных результатов для увеличения точности оптических стандартов частоты.

### Заключение

Оценивая диссертационную работу Заливако Ильи Владимировича в целом, можно сделать следующее заключение:

- тема диссертации актуальна, научные положения, выводы, заключения и рекомендации диссертации научно обоснованы;
- результаты диссертации обладают практической значимостью, научной новизной, прошли апробацию, в достаточной степени представлены в научных трудах автора;
- достоверность результатов подтверждается их воспроизводимостью и хорошим согласием теоретических выводов с экспериментальными данными.

Диссертация И.В. Заливако является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на хорошем научном уровне, что подтверждает высокую квалификацию

соискателя в своей области. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации. Диссертация 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, Заливако Илья Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – "Лазерная физика".

Официальный оппонент:

к.ф.-м.н. Илья Игоревич Бетеров,

старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук» (ФГБУН ИФП СО РАН),

Российская федерация, 630090, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13,  
ФГБУН ИФП СО РАН

тел.: +7 (383)333-24-08

e-mail: [beterov@isp.nsc.ru](mailto:beterov@isp.nsc.ru)

/ Бетеров Илья Игоревич /

23.08.2022

Подпись Бетерова Ильи Игоревича заверяю:

Аржанникова София Андреевна

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук» (ФГБУН ИФП СО РАН), к.ф.-м.н.,

Российская федерация, 630090, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13,  
ФГБУН ИФП СО РАН

тел.: +7(383)333-24-88

e-mail: [science@isp.nsc.ru](mailto:science@isp.nsc.ru)



/ Аржанникова София Андреевна /

Список основных публикаций оппонента кандидата физико-математических наук И. И. Бетерова по тематике защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. 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*, 51(6), 464–472 (2021);
2. 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*, 159(3), 409 (2021);
3. I. I. Beterov, D. V. 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, *Journal of Physics B*, 53(18), 182001 (2020);
4. 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*, 157(2), 206 (2020);
5. M. Saffman, I. I. Beterov, A. Dalal, E. J. Páez, and B. C. Sanders, Symmetric Rydberg controlled-Z gates with adiabatic pulses, *Physical Review A*, 101(6), 062309 (2020);
6. I. I. Beterov, I. N. Ashkarin, E. A. Yakshina, D. V. Tretyakov, V. M. Entin, I. I. Ryabtsev, P. Cheinet, P. Pillet, and M. Saffman, Fast three-qubit Toffoli quantum gate based on three-body Förster resonances in Rydberg atoms, *Physical Review A*, 98(4), 042704 (2018).