

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Семерикова Ильи Александровича  
«Лазерное охлаждение ионов  $Mg^+$  и  $Yb^+$  в квадрупольной ловушке Пауля  
для квантовой логики»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 01.04.05 – Оптика

Диссертация И.А. Семерикова «Лазерное охлаждение ионов  $Mg^+$  и  $Yb^+$  в квадрупольной ловушке Пауля для квантовой логики» посвящена вопросам локализации, лазерного охлаждения и динамики ионов  $Mg^+$  и  $Yb^+$  в квадрупольной радиочастотной ловушке Пауля, которые являются необходимым шагом для проведения квантовых вычислений на ультрахолодных ионах.

Квантовые вычисления являются одной из наиболее динамично развивающихся областей в физике в два последних десятилетия. При этом рассматриваются различные физические платформы: нейтральные атомы, сверхпроводящие цепи, фотоны и некоторые другие. Среди других платформ ультрахолодные ионы в квадрупольных ловушках отличаются рекордными временами когерентности и достоверностью квантовых операций, что делает их перспективными кандидатами для создания универсальных квантовых компьютеров способных решать полезные вычислительные задачи.

Рассмотренные в данной работе ионы  $Mg$  и  $Yb$  являются одними из наиболее перспективных в задачах квантовой логики. Ион  $Mg$  обладает малой массой, простой структурой уровней и большим для легких ионов сверхтонким расщеплением основного состояния, что делает его перспективным ионом для реализации быстрых квантовых операций с высокими временами когерентности, а также двухкубитных операций с использованием радиочастотных источников. Ион  $Yb$ , в свою очередь, обладает одним из наиболее низко чувствительных к флуктуациям магнитного поля радиочастотным переходом и большим числом оптически доступных энергетических уровней, что делает его перспективным для новых типов кубитов и квантовой памяти.

Экспериментальная установка, созданная в данной работе, включает в себя первую в России линейную ловушкой Пауля, в которой было проведено лазерное охлаждение ионов, что является важным шагом на пути развития квантовых вычислений в России. Результаты по глубокому охлаждению ионов  $Yb$  могут быть применены для охлаждения больших ионных цепочек до основного колебательного состояния, что является важным для достижения высоких достоверностей операций на больших квантовых регистрах. Таким образом, тема диссертационной работы Семерикова И.А. является безусловно актуальной.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и изложена на 120 страницах.

В первой главе описываются общие теоретические предпосылки, необходимые для создания экспериментальной установки, проведения экспериментов и расчетов

Во второй главе описывается созданная по результатам работы экспериментальная установка для захвата, охлаждения, манипуляции и детектирования одиночных ионов и ионных кристаллов как при помощи каналотронов, так и по сигналу люминесценции с возможностью детектирования как одиночных ионов, так и больших ионных ансамблей. Стоит отметить, что созданная установка может быть использована для первых российских экспериментов в области квантовой логики с использованием холодных ионных ансамблей.

В третьей главе описываются эксперименты по исследованию времени жизни ионов в созданной ловушке Пауля, проводится интерпретация результатов этих экспериментов при помощи численной модели, предлагается новый механизм потерь горячих ионов из линейной ловушки Пауля. Результаты численного моделирования согласуются с экспериментальными данными. Численная модель может быть в дальнейшем использована для моделирования загрузки сравнительно больших ионных ансамблей, например, в экспериментах по радиочастотным ионным стандартам частоты. Также в третьей главе описываются эксперименты по лазерному охлаждению ионов Mg, предложен и реализован новый метод измерения верхней границы температуры одиночного иона при помощи аппроксимации спектра люминесценции профилем Фойгта, описывается экспериментальное исследование колебательной структуры для одного и двух ионов в ловушке.

В четвертой главе проведены расчеты для глубокого охлаждения иона  $^{171}\text{Yb}^+$  методом двойной электромагнитно-индуцированной прозрачности. Получены зависимости среднего колебательного числа от частоты колебательной моды при различных параметрах трех сфазированных оптических полей. Теоретические расчеты, проведенные в работе И.А. Семерикова могут стать основой для проведения экспериментов по глубокому охлаждению больших ионных цепочек, что является важной задачей для масштабирования квантовых вычислений на ионах.

Подводя итоги стоит отметить обширность работы И.А. Семерикова. В ней есть и техническая часть, связанная с созданием экспериментальной установки, и эксперименты как с горячими, так и с лазерно-охлажденными ионами, и численные расчеты динамики ионов, и теоретические выкладки, связанные со схемой двойной электромагнитно-индуцированной прозрачности, что характеризует И.А. Семерикова как всесторонне развитого исследователя.

Все результаты, полученные в работе И.А. Семерикова являются достоверными и обоснованными. Достоверность результатов следует из соответствия теоретических расчетов и эксперимента, достаточной обоснованности предположений в теоретических расчетах, корректных экспериментальных методик и высокого класса экспериментальной техники.

В работе И.А. Семерикова был предложен и промоделирован новый механизм потери ионов из линейной ловушки Пауля за счет многочастичного межсионного взаимодействия, предложен и реализован новый метод измерения верхней границы температуры одиночного иона, также был предложен метод двойной электромагнитно индуцированной прозрачности для глубокого охлаждения ионов  $\text{Yb}$  и рассчитаны параметры эффективности охлаждения ионов  $\text{Yb}$  таким методом.

Основные результаты были доложены И.А. Семериковым лично на 5 Международных и российских конференциях и симпозиумах. Основные результаты диссертации представлены в 6-ти научных публикациях, в том числе в 3-х статьях в рецензируемых научных журналах, входящих в базу WebofScience.

Несмотря на общую положительную оценку диссертации, диссертация не лишена недостатков:

1. В п. 3.2.3.1 главы 3 описываются эксперименты по возбуждению колебаний ионов в ловушке при помощи модуляции интенсивности охлаждающего излучения; при этом не приводятся параметры эксперимента такие как интенсивность охлаждающего излучения, глубина модуляции. Эти параметры были бы интересны для оценки амплитуды возбуждающей силы.
2. В п. 4.2.2 главы 4 при численном моделировании стационарной населенности уровня  $^2P_{1/2}$  указано, что для задания оси квантования прикладывается слабое магнитное поле вдоль оси  $z$ . Однако, это поле не входит в дальнейший гамильтониан для расчета населенности уровня  $^2P_{1/2}$ . Такое решение требует обоснования, которое в работе не представлено.
3. В п. 4.2.3 главы 4 проводится расчет среднего колебательного числа в зависимости от частоты моды при этом не уточняется по какой причине возникают различные частоты колебаний ионов при фиксированных параметрах ловушки.

Перечисленные замечания не уменьшают ценность работы И.А. Семерикова и не влияют на положительную оценку его диссертации

Представленная диссертация “Лазерное охлаждение ионов  $\text{Mg}^+$  и  $\text{Yb}^+$  в квадрупольной ловушке Пауля для квантовой логики” удовлетворяет всем требованиям, установленным Положением о присуждении ученых степеней,

утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г, а ее автор, Семериков Илья Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 «Оптика».

Отзыв составил:

Доктор физико-математических наук, Юдин Валерий Иванович, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ФГБУН ИЛФ СО РАН),

/Юдин Валерий Иванович/

08.09.2020

Российская федерация, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева 15Б,  
ФГБУН ИЛФ СО РАН  
тел.: 8-913-207-46-37  
e-mail: viyudin@mail.ru

Подпись Юдина Валерия Ивановича заверяю.

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук» (ФГБУН «ИЛФ СО РАН»), к.ф.м.н.



/Покасов Павел Викторович/

Российская федерация, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева 15Б,  
ФГБУН ИЛФ СО РАН  
тел.: 8-(383) 330-89-21  
e-mail: pokasov@laser.nsc.ru

Список основных работ оппонента доктора физико-математических наук В.И. Юдина по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. M. Shuker, J. W. Pollock, V. I. Yudin, A. V. Taichenachev, J. Kitching, E.A. Donley, Ramsey Spectroscopy with Displaced Frequency Jumps, *Phys. Rev. Lett.*, v. 122, no. 11, art. no. 113601 (2019).
2. V.I. Yudin, A.V. Taichenachev, M.Y. Basalaev, T. Zanon-Willette, J. W. Pollock, M. Shuker, E.A. Donley, J. Kitching, Generalized Autobalanced Ramsey Spectroscopy of Clock Transitions, *Physical Review Applied*, v. 9, no. 5, art. no. 054034 (2018).
3. X. Liu, E. Ivanov, V.I. Yudin, J. Kitching, E.A. Donley, Low-Drift Coherent Population Trapping Clock Based on Laser-Cooled Atoms and High-Coherence Excitation Fields, *Physical Review Applied*, v. 8, no. 5, art. no. 054001 (2017).
4. О. Н. Прудников, С. В. Чепуров, А. А. Луговой, К. М. Румынин, С. Н. Кузнецов, А. В. Тайченачев, В. И. Юдин, С. Н. Багаев, Лазерное охлаждение ионов  $^{171}\text{Yb}^+$  в частотно-модулированном поле, *Квантовая электроника*, т. 47(9), 806–811 (2017).
5. А.В. Тайченачев, В.И. Юдин, С.Н. Багаев, Сверхточные оптические стандарты частоты на ультрахолодных атомах: состояние и перспективы, *Успехи физических наук*, т. 186(2), 193–205 (2016).
6. V.I. Yudin, A.V. Taichenachev, and M.Y. Basalaev, Dynamic steady state of periodically driven quantum systems, *Phys. Rev. A*, v. 91? no. 1, art. no. 013820 (2016)