

## ОТЗЫВ

*официального оппонента Пальчикова Виталия Геннадьевича на диссертацию Вишняковой Гульнары Александровны «Вторичное лазерное охлаждение атомов тулия», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика*

В диссертации Вишняковой Г.А. выполнен цикл исследований, направленных на изучение вторичного лазерного охлаждения редкоземельных атомов тулия на спектрально-узком переходе  $4f^{13}(^2F^o)6s^2 (J = 7/2, F = 4) \rightarrow 4f^{12}(^3H_6)5d_{5/2}6s^2 (J' = 9/2, F' = 5)$ , а также на измерения знака и величины сверхтонкой структуры верхнего уровня  $4f^{12}(^3H_6)5d_{5/2}6s^2 (J' = 9/2)$  охлаждающего перехода.

Актуальность темы диссертационного исследования предопределяется рядом обстоятельств:

- перспективными разработками атомных стандартов времени и частоты нового поколения, основанных на использовании современных технологий лазерного охлаждения атомов, включая редкоземельные элементы, которые характеризуются наличием больших магнитных моментов в основных состояниях, а также существованием узких запрещенных переходов, имеющих различную симметрию;

- поисками перспективных рабочих сред для исследования конденсированных состояний атомов;

- потребностями разработки новых подходов к исследованию спектроскопических и фундаментальных свойств холодных атомов и ионов (магнитные диполь-дипольные взаимодействия, резонансы Фешбаха и т.д.)..

Помимо чисто прикладной значимости, эта проблематика важна и для фундаментальных исследований, в частности, в области измерений физических величин, описывающих вариации фундаментальных физических констант во времени, анализа применимости Стандартной модели и т.д.

Основные результаты диссертационного исследования вносят вклад в решение перечисленных выше задач. Среди наиболее важных результатов диссертации следует особо отметить следующие:

- впервые в мировой литературе экспериментально осуществлено вторичное лазерное охлаждение редкоземельных атомов тулия до уровня 16 мК и 8 мК в вертикальном (вдоль направления ) и поперечном направлениях, соответственно;

- экспериментально определена величина сверхтонкой структуры верхнего уровня  $4f^{12}(^3H_6)5d_{5/2}6s^2 (J' = 9/2)$  охлаждающего перехода с точностью, превосходящей как минимум на порядок известные из литературы данные измерений этой величины.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Материал диссертации изложен на 134 страницах машинописного текста. Список литературы включает 121 наименование.

Во введении обсуждается актуальность темы диссертации, формулируется цель и задачи работы, ее научная и практическая значимость. Там же обосновываются преимущества используемых автором диссертации подходов применительно к кругу проблем, рассматриваемых в диссертации.

Первая глава содержит детальное описание различных механизмов лазерного охлаждения. Наиболее подробно описаны разновидности охлаждения на узких переходах, приведены ссылки на пионерские работы. Обоснована актуальность лазерного охлаждения редкоземельных элементов.

Вторая глава диссертации посвящена описанию первичного охлаждения атомов тулия на сильном переходе  $4f\ 13(2F_0)6s_2\ (J = 7/2, F = 4) \rightarrow 4f\ 12(3H_5)5d_{3/2}6s_2\ (J'' = 9/2, F'' = 5)$  с длиной волны 410,6 нм и сужению линии генерации лазерного источника на длине волны 530,7 нм для вторичного охлаждения. Описана установка для осуществления первой стадии охлаждения атомов тулия, процедура детектирования облака и приведены полученные характеристики ансамбля, которые тем самым являются стартовыми для загрузки атомов во вторичную магнито-оптическую ловушку и дальнейшего охлаждения. Далее особое внимание уделяется стабилизации частоты излучения полупроводникового лазерного источника на длине волны 1,06 мкм, вторая гармоника которого используется в цикле второй стадии охлаждения. Обоснована необходимость сужения линии генерации, описаны метод Паунда-Дривера-Холла стабилизации по внешнему высокочастотному интерферометру, вакуумная термостабилизированная камера, оптическая схема и полученные результаты.

Третья глава посвящена измерению знака и величины сверхтонкого расщепления возбужденного уровня  $4f\ 12(3H_6)5d_{5/2}6s_2\ (J' = 9/2)$  атома тулия. Измерение абсолютной величины расщепления производилось методом частотно-модуляционной спектроскопии насыщения, что позволило уменьшить погрешность более, чем на порядок, по сравнению с предыдущими работами. Итоговая ошибка не превышает 0,1% и определяется в основном геометрическим фактором, а именно уширением за счет кривизны волнового фронта используемых в эксперименте пучков. Проведен тщательный анализ возможных уширений и роли оптической накачки в соотношении амплитуд наблюдаемых резонансов.

Наконец, в четвертой главе подробно описана вторая стадия лазерного охлаждения атомов тулия на спектрально-узком переходе, имеющим ширину  $\Gamma = 2\pi \times 350$  кГц. Несмотря на то, что она почти в 100 раз больше энергии отдачи для этого перехода, в

эксперименте удалось пронаблюдать поведение облака, характерное для охлаждения на переходах шириной порядка нескольких десятков кГц. Зависимость температуры ансамбля от параметров охлаждающего излучения качественно согласуется с теоретическими предсказаниями. Продемонстрирован перезахват атомов из первичной магнито-оптической ловушки во вторичную с эффективностью, близкой к 100%, в широком диапазоне параметров. Детально изучено поведение облака при температурах порядка 10 мкК. Исследовано взаимодействие облака холодных атомов с излучением, имеющим положительную отстройку, в результате которого атомы объединяются в дискретные скоростные группы и при свободном баллистическом разлете формируют отдельные облака.

Заключение диссертации отражает основные результаты и выводы, изложенные в диссертационной работе.

Переходя к общей оценке диссертационной работы, следует прежде всего отметить широкий диапазон выполненных Вишняковой Г.А. исследований, а также значительное число представленных в ней физических и практических результатов.

К недостаткам диссертации следует отнести следующие:

1. Во Введении диссертации обосновываются преимущества использования переходов между тонкими компонентами основного состояния тулия в качестве «часовых» переходов за счет вакансий в 4f-оболочке и, следовательно, эффектов экранировки внешних полей и столкновений. Для полноты картины здесь следовало бы указать и на проблемы практической реализации таких оптических часов в части поиска «магических» длин волн оптической решетки, корректной оценки нелинейно-оптических эффектов высшего порядка и т.д.
2. В параграфе 3.7 диссертации отмечено, что результаты измерений СТС с точностью 0.008% «позволяют лучше оценить ошибки теоретических вычисления». А есть ли какие-либо иные приложения результатов измерений СТС и мотивации к дальнейшему повышению точности измерений СТР?

Перечисленные замечания носят рекомендательный характер и не могут существенно повлиять на общую положительную оценку диссертационной работы.

Достоверность результатов диссертационной работы Вишняковой Г.А. подкреплена согласованностью с данными других авторов, полученных в рамках независимых альтернативных подходов, а также с результатами теоретических расчетов. Диссертация написана ясным и четким языком.

Следует отметить целостность подхода автора к решению поставленных задач. В работе уделено достаточное внимание дальнейшему развитию подхода автора для всей

совокупности научных проблем, рассматриваемых в диссертации. Все научные положения и основные результаты автора докладывались на представительных конференциях и семинарах, своевременно опубликованы в отечественной и зарубежной печати. Изложенное в диссертации основное содержание работы позволяет оценить полноту и достоинства выполненных автором исследований.

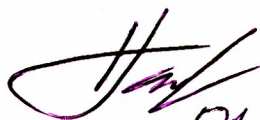
В диссертации Вишняковой Г.А. сформулированы и обоснованы научные положения, совокупность которых можно классифицировать как решение важной задачи в области разработки методов и средств охлаждения редкоземельных атомов тулия, имеющих реальную перспективу внедрения в оптических стандартах времени и частоты нового поколения.

**Заключение.** На основании вышеизложенного можно сделать следующий вывод. Представленная диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.04.21 – лазерная физика, а ее автор Вишнякова Гульнара Александровна безусловно заслуживает присуждения искомой степени.

Официальный оппонент:

д.ф.-м.н. Пальчиков Виталий Геннадьевич,  
заместитель начальника 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» (ВНИИФТРИ) по научной работе,  
Пром.зона Менделеево, Солнечногорский р-н, Менделеево пгт., Московская обл., 141570

тел.: 8-495-660-57-24  
e-mail: [vitpal@mail.ru](mailto:vitpal@mail.ru)



/Пальчиков Виталий Геннадьевич/

01.03.17

Подпись Пальчикова Виталия Геннадьевича удостоверяю:

Лобова Оксана Алексеевна,  
Начальник отдела кадров  
Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ВНИИФТРИ),  
Пром.зона Менделеево, Солнечногорский р-н, Менделеево пгт., Московская обл., 141570



/ Лобова Оксана Алексеевна /

02.03.2017

Список основных научных публикаций заместителя начальника 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» (ВНИИФТРИ) по научной работе д.ф.-м.н. Пальчикова Виталия Геннадьевича по теме диссертации Вишняковой Гульнары Александровны «Вторичное лазерное охлаждение атомов тулия», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика

1. Multipole, nonlinear, and anharmonic uncertainties of clocks of Sr atoms in an optical lattice, V. D. Ovsiannikov, V. G. Pal'chikov, A. V. Taichenachev, V. I. Yudin, H. Katori, Phys. Rev. A 88, 013405, 2013
2. Higher-order effects on the precision of clocks of neutral atoms in optical lattices, V. D. Ovsiannikov, S. I. Marmo, V. G. Palchikov, H. Katori, Phys. Rev. A 93, 043420, 2016
3. Strategies for reducing the light shift in atomic clocks, H. Katori, V. D. Ovsiannikov, S. I. Marmo, V. G. Palchikov, Phys. Rev. A 91, 052503, 2015
4. Лазерная система для вторичного охлаждения атомов стронция – 87, К. Ю. Хабарова, С. Н. Слюсарев, С. А. Стрелкин, Г. С. Белотелов, А. С. Костин, В. Г. Пальчиков, Н. Н. Колачевский, Квант. Электрон., 42, 11, 1021–1026, 2012
5. Состояние и перспективы развития оптических стандартов времени и частоты на холодных атомах и ионах, В. Г. Пальчиков, Труды института прикладной астрономии РАН, 23, 107-111, 2012
6. Selective laser pumping of magnetic sublevels in the hyperfine structure of the cesium atom, A. I. Magunov, V. G. Palchikov, Journal of Experimental and Theoretical Physics, 118, 5, 687–700, 2014
7. The Development of Nuclear Frequency Standard with the Use of Ion Crystals Manipulation System, V. I. Troyan, V. G. Pal'chikov, Y. P. Yakovlev, A. V. Krasavin, P. V. Borisyyuk, D. M. Chernyshev, S. S. Poteshin, A. A. Sysoev, Conference of Physics of Nonequilibrium Atomic Systems and Composites, PNASC 2015, Volume 72, 245–248, 2015