

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. Городецкого Михаила Леонидовича 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»

Диссертация соискателя Вишняковой Гульнары Александровны посвящена исследованию лазерного охлаждения редкоземельных атомов тулия. Созданию оптических стандартов частоты на основе редкоземельных элементов в настоящее время уделяется особенное внимание, поскольку именно с их помощью были получены наилучшие результаты по относительной стабильности. Интерес к тулию, как и к другим лантаноидам, обусловлен его электронной структурой (они имеют незаполненную $4f$ -оболочку при заполненных внешних $5s$ и $6s$ оболочках, что делает перспективной разработку часов на переходах между компонентами тонкой структуры основного состояния) и большим дипольным моментом с большим разнообразием диполь-дипольных взаимодействий. Для осуществления этих экспериментов необходимо глубокое охлаждение ансамблей атомов. Для получения низких температур в представленной работе осуществлено лазерное охлаждение и захват атомов тулия в магнито-оптическую ловушку атомов на спектрально-узком переходе с длиной волны $530,7$ нм и радиационной шириной 350 кГц. Были детально исследованы характеристики облака холодных атомов тулия в зависимости от параметров охлаждающего излучения и получено качественное соответствие с теоретическими предсказаниями известных моделей. Достигнутая в работе температура 16 мкК является наименьшей достигнутой для атомов тулия. Отдельная часть работы посвящена измерению сверхтонкого расщепления верхнего уровня охлаждающего перехода методом частотно-модуляционной спектроскопии насыщения в кювете с парами тулия. Относительная погрешность измерения составила менее $0,01\%$, что на порядок меньше, чем в предыдущих работах. В работе была также осуществлена стабилизация и сужение линии генерации лазера, используемого для вторичного охлаждения атомов, с помощью высокочастотного сверхстабильного резонатора типа Фабри-Перо.

Диссертационная работа изложена на 134 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, содержащего 121 наименование.

Во введении автор обосновывает актуальность проблемы, формулирует цели и задачи работы, научную новизну и практическую значимость проведенных исследований, приводит сведения об апробации и публикации полученных результатов, формулирует защищаемые положения. Перечислены основные области применения ансамблей холодных атомов в современных физических исследованиях.

Первая глава традиционно посвящена обзору литературы по теме диссертации. В ней подробно описаны различные методы лазерного охлаждения. Особое внимание автор уделил охлаждению редкоземельных элементов, таких как иттербий, эрбий, диспрозий и гольмий.

Вторая глава состоит из двух логических частей. Первая часть посвящена описанию электронной структуры атома тулия. В этой части также сформулированы возможные направления дальнейших исследований, а именно создание оптического репера частоты на переходе с длиной волны $1,14$ мкм и ожидаемой радиационной шириной порядка 1 Гц и исследование столкновительных эффектов при низких температурах, приведены

характеристики двух охлаждающих переходов и описана первая стадия лазерного охлаждения атомов тулия на сильном переходе с длиной волны 410,6 нм и радиационной шириной 10 МГц, обоснована необходимость более глубокого охлаждения. Во второй части описывается стабилизация частоты излучения лазерного генератора на длине волны 530,7 нм с привязкой методом Паунда-Драйвера-Холла к резонатору из материала УЛЕ, которая позволяет также сузить ширину спектра генерации. Сужение линии генерации необходимо для работы на узком охлаждающем переходе. Получена верхняя экспериментальная оценка ширины спектра стабилизированного лазера, измерены положение нулевой точки теплового расширения корпуса резонатора и скорость дрейфа его частоты.

В третьей главе описано исследование сверхтонкой структуры уровня, задействованного в цикле вторичного охлаждения. Порядок сверхтонких компонент имеет важное значение для лазерного охлаждения и был определен путем облучения облака холодных атомов тулия, захваченных в первичную магнито-оптическую ловушку, излучением на длине волны 530,7 нм. Было показано, что, как и для других уровней, задействованных в эксперименте, компоненты имеют обратный порядок, то есть подуровень $F' = 5$ имеет меньшую энергию, чем $F' = 4$. Абсолютная величина расщепления была измерена в кювете с парами тулия методом частотно-модуляционной спектроскопии насыщения и составила $-2110,56 \pm 0,16$ МГц. Детально проанализированы возможные механизмы уширений и сдвигов полученных контуров. Показано, что определяющий вклад в погрешность измерения вносит сдвиг за счет кривизны волнового фронта возбуждающих пучков.

Четвертая глава посвящена описанию эксперимента по охлаждению атомов тулия, рассмотрению существующих теоретических моделей и их сравнению с полученными результатами. Схема перезахвата атомов из первичной магнито-оптической ловушки отличается простотой и эффективностью. Было реализовано два режима работы ловушки в зависимости от параметров охлаждающего излучения, один из которых аналогичен случаю охлаждения на сильном переходе, а второй специфичен для охлаждения на узком переходе и характеризуется смещением равновесного положения облака в поле силы тяжести вниз при больших отстройках охлаждающего излучения и, как следствие, независимостью температуры от отстройки. Минимально полученные температуры составили 16 мК и 8 мК для вертикального и горизонтального направлений, соответственно, при числе атомов порядка 10^6 и концентрации 10^{10} см⁻³. Было измерено время жизни атомов в ловушке. Оно составило 2 с и определялось остаточным газом в вакуумной камере. Получены зависимости важнейших характеристик облака, таких как число, концентрация и фазовая плотность захваченных атомов от параметра насыщения и отстройки охлаждающего излучения. Интересным результатом является формирование так называемых кристаллов в импульсном пространстве при взаимодействии облака холодных атомов с излучением, имеющим положительную отстройку.

Основные результаты работы опубликованы в 4 статьях в ведущих научных журналах и представлены автором лично на ряде российских и международных конференций (на некоторых присутствовал и оппонент), что подтверждает достоверность и обоснованность результатов.

Диссертация хорошо оформлена, написана ясным и четким языком, схемы и рисунки прекрасно иллюстрируют изложенный материал. Автор продемонстрировал высокий уровень экспериментальной культуры и умение структурированно излагать свои мысли.

Исследование мирового уровня носит самостоятельный, законченный характер и вносит важный вклад в понимание процессов лазерного охлаждения и открывает возможность дальнейших экспериментов с холодными атомами тулия. Вторичное лазерное охлаждение атомов тулия было реализовано впервые, и новизна работы не вызывает сомнений.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

В качестве одного из недостатков можно отметить использование автором слишком простых теоретических моделей без учета магнитных подуровней атома, тогда как зачастую они играют важную роль в процессе лазерного охлаждения. Также следовало бы привести экспериментальные результаты измерения времени жизни атомов в ловушке при различных интенсивностях охлаждающего излучения, а не ограничиться утверждением об отсутствии зависимости от мощности. В главе, посвященной стабилизации лазерной системы с помощью Фабри-Перо резонатора рассмотрен только один фактор, связанный с резонатором – дрейф его линейных размеров, но не оценены другие шумовые характеристики, влияющие на стабилизацию, прежде всего, броуновские флуктуации корпуса. Ширина линии генерации стабилизированного лазера лишь заявлена (<10 кГц, при измеренной добротности резонатора такая оценка представляется слишком консервативной), но результаты измерения не приведены.

Указанные недостатки носят рекомендательный характер и ни в коей мере не умаляют общей высокой оценки проведенного исследования.

Считаю, что диссертационная работа «Вторичное лазерное охлаждение атомов тулия» удовлетворяет требованиям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а сама Вишнякова Гульнара Александровна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 «Лазерная физика».

Официальный оппонент

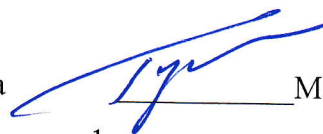
Доктор физико-математических наук, профессор

физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1

Телефон: +7 (495) 939-39-03

E-mail: gorodetsky@physics.msu.ru



М. Л. Городецкий

2.03.2017

Подпись профессора М.Л.Городецкого заверяю

Декан физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова,

профессор Н.Н.Сысоев



Н.Н.Сысоев

Список основных научных публикаций профессора кафедры физики колебаний физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова» (МГУ имени М. В. Ломоносова) д.ф.-м.н. Городецкого Михаила Леонидовича 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. Kippenberg T. J., Schliesser A., Gorodetsky M. L., Phase noise measurement of external cavity diode lasers and implications for optomechanical sideband cooling of GHz mechanical modes, *NEW JOURNAL OF PHYSICS*, 15, 015019, 2013
2. Lecaplain C., Javerzac-Galy C., Gorodetsky M. L., Kippenberg T J., Mid-infrared ultra-high-Q resonators based on fluoride crystalline materials, *NATURE COMMUNICATIONS*, 7, 13383, 2016
3. Gorodetskii M. L., Demchenko Yu. A., Zaitsev D. F., Krutikov V. N., Zolotarevskii Yu. M., Lyaskovskii V. L., High-Q Factor Optical Whispering-Gallery Mode Microresonators and Their Use in Precision Measurements, *MEASUREMENT TECHNIQUES*, 57, 12, 1386-1395, 2015
4. Demchenko Y. A., Gorodetsky M. L., The effect of an absorbed layer on the resonant frequencies and Q-factors of spherical microresonators, *MOSCOW UNIVERSITY PHYSICS BULLETIN*, 70, 3, 195-200, 2015
5. Kondratiev N. M., Gorodetsky M. L., Electro-optical interaction in whispering gallery mode resonators for radio-to-optical frequency modulators, *BULLETIN OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES: PHYSICS*, 77, 1432, 2013
6. Demchenko Y. A., Gorodetsky M. L., Analytical estimates of eigenfrequencies, dispersion, and field distribution in whispering gallery resonators, *JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA B*, 30, 11, 3056-3063, 2013
7. Brasch V., Geiselmann M., Herr T., Lihachev G., Pfeiffer M. H. P., Gorodetsky M. L., Kippenberg T. J., Photonic Chip Broadband Frequency Comb for Coherent Telecommunication, 2015 CONFERENCE ON LASERS AND ELECTRO-OPTICS (CLEO), San Jose, CA , 2015