

УТВЕРЖДАЮ

Директор
государственного
учреждения науки
спектростроения
академии наук (ИСАН),
д.ф.-м.н., профессор

Федерального
бюджетного
Институт
Российской

Задков В.Н.

01 марта 2017 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Вишняковой Гульнaры Александровны «Вторичное лазерное охлаждение атомов тулия», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 лазерная физика

Диссертационная работа Вишняковой Гульнaры Александровны «Вторичное лазерное охлаждение атомов тулия» посвящена вторичному доплеровскому охлаждению атомов тулия. Интерес в глубоком охлаждении атомов тулия вызван тем фактом, что данные атомы обладают одной вакансией на внутренней $4f$ -оболочке. Это приводит к большому ($4\mu_B$) магнитному моменту в основном состоянии атома тулия и открывает возможность исследования магнитных диполь-дипольных взаимодействий холодных атомов. Помимо этого использование узких магнито-дипольных резонансов атомов тулия рассматривается в качестве перспективного метода построения стандарта частоты в оптическом диапазоне спектра.

С фундаментальной точки зрения исследование особенностей лазерного охлаждения элементов со сложной электронной структурой, такой как у атома тулия, позволит углубить понимание процесса и оптимизировать методики понижения температуры ансамблей атомов. В рассматриваемом случае, охлаждение осуществляется за счет взаимодействия атомов с излучением, отстроенным в красную сторону от узкого перехода $4f^{13}(^2F^o)6s^2 (J = 7/2, F = 4) \rightarrow 4f^{12}(^3H_6)5d_{5/2}6s^2 (J' = 9/2, F' = 5)$ шириной 350 кГц. Сравнение экспериментальных зависимостей температуры от параметров излучения, полученных в результате работы, качественно совпадают с теоретическими предсказаниями. Количественное расхождение вызвано, по-видимому, использованием моделей, которые не учитывают наличие магнитных подуровней основного и возбужденного состояний охлаждающего перехода.

В диссертационной работе были получены следующие результаты:

1) Измерено сверхтонкое расщепление верхнего уровня $4f^{12}(^3H_6)5d_{5/2}6s^2 (J' = 9/2)$ охлаждающего перехода с погрешностью 0,008%. Константа сверхтонкого расщепления составила $A_J = -422,112 \pm 0,032$ МГц.

2) Продемонстрировано вторичное охлаждение атомов тулия на узком переходе. Минимально полученные температуры составили 16 ± 3 мкК и 8 ± 2 мкК вдоль и поперек направления силы тяжести, соответственно, при числе атомов порядка 10^6 .

3) При малых параметрах насыщения положение облака начинает зависеть от

отстройки излучения и смещается вниз под действием силы тяжести. При этом температура практически перестает зависеть от отстройки.

4) При взаимодействии облака атомов с излучением, имеющим положительную отстройку, наблюдается формирование кристаллов в импульсном пространстве.

Результаты работы прошли широкую апробацию на российских и международных конференциях и симпозиумах и опубликованы в 4 статьях, входящих в базу данных *Web of Science*. Результаты могут быть использованы в институтах, связанных с атомной оптикой и охлаждением атомов, таких как ИСАН, ВНИИФТРИ, ИПФ РАН, ИЛФ СО РАН, ОИВТ РАН и других.

Структурно диссертация состоит из Введения, четырех Глав, Заключение и Списка литературы. Объем диссертации составляет 134 страницы. Работа содержит 48 рисунков и 5 таблиц.

Введение посвящено обсуждению актуальности проблемы глубокого охлаждения атомов и особенно атомов редкоземельных элементов. Помимо этого во Введении описана цель, новизна и практическая значимость проводимого исследования, а так же представлены сведения об апробации результатов, защищаемых положениях.

Глава 1 представляет собой обзор литературы посвященный различным методам лазерного охлаждения нейтральных атомов. Помимо этого описаны физические принципы охлаждения и локализации атомов в магнито-оптической ловушке.

Глава 2 разделена на две части. Первая часть носит вводный характер и описывает проведенный ранее эксперимент по первичному охлаждению атомов тулия на широком переходе с длиной волны 410,6 нм. Вторая часть посвящена задаче подготовки лазерного источника для второй ступени охлаждения. Данная подготовка включает в себя стабилизацию частоты лазерного излучения, а так же сужение линии генерации лазерного источника методом Паунда-Драйвера-Холла с использованием высокочастотного сверхстабильного резонатора. Ширина спектра и дрейф частоты стабилизированного источника составляют 20 кГц и 600 Гц/час, соответственно.

В **Главе 3** описано измерение сверхтонкой константы уровня $4f^{12}(^3H_6)5d_{5/2}6s^2 (J' = 9/2)$ методом частотно-модуляционной спектроскопии насыщения в кювете с парами тулия. Проанализированы различные механизмы уширения и сдвигов регистрируемых контуров. Ошибка измерения составила 160 кГц и не превышает 0,01% по относительной величине. Доминирующим вкладом является сдвиг за счет кривизны волнового фронта пучков.

Глава 4 посвящена загрузке атомов из первичной магнито-оптической ловушки (МОЛ) во вторичную, реализованную на узком переходе. Во вторичной МОЛ происходит дополнительное охлаждение атомов. Автор подробно описывает экспериментальную установку и приводит вывод выражения для температуры с учетом влияния силы тяжести. В ходе произведенных экспериментов получен большой объем данных для зависимости температуры, числа и концентрации атомов от параметров излучения. Измерено время жизни атомов во вторичной МОЛ. Полученные характеристики жизни атомов в ловушке подтверждают цикличность используемого для охлаждения перехода. Реализованная максимальная концентрация $5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ позволит эффективно осуществить загрузку атомов тулия в оптическую дипольную ловушку для дальнейших исследований.

В **Заключении** сформулированы основные научные результаты диссертационной работы.

Работа не лишена некоторых недостатков, которые перечислены ниже:

1. Глава 1 посвящена существующим методам лазерного охлаждения и пленения атомов. Данной теме посвящена ни одна работа. Поэтому столь обширный

обзор литературы, который включает в себя описание методик не используемых автором в своей работе – излишен.

2. Для стабилизации частоты лазерного излучения, которое необходимо на второй ступени охлаждения атомов тулия, используется методика стабилизации по пику пропускания высокодобротного и стабильного эталона Фабри-Перо. Описанная в диссертационной работе схема (рисунок 2.8) состоит из ряда поляризационных элементов, таких как полуволновая пластинка, четвертьволновая пластинка и поляризационный делительный куб. Излучение доставляется к эталону Фабри-Перо с использованием одномодового оптического волокна. Однако в работе не указано какое оптическое волокно использовалось. При использовании оптического волокна не сохраняющего поляризацию излучения будут происходить потери на поляризационных оптических элементах, что в конечном итоге приведет к дополнительной нестабильности сигнала, используемого для стабилизации частоты лазерного излучения.

3. В описании схемы исследования сверхтонкого расщепления уровня $4f^{12}(^3H_6)5d_{5/2}6s^2$ с использованием спектроскопии насыщенного поглощения автор допускает неточность в описании перекрестного резонанса утверждая, что: «Этот резонанс не соответствует реальному переходу в атоме». Это не верно. На частоте перекрестного резонанса в атоме происходят реальные переходы и при этом появляется концентрация атомов в возбужденном состоянии. Отличием данного типа резонансов от основных является тот факт, что взаимодействие лазерного поля происходит с атомами ненулевой скоростной группы.

4. При исследовании влияния оптической накачки на относительную интенсивность переходов между сверхтонкими подуровнями (Раздел 3.5 диссертационной работы) автор сравнивает теоретически рассчитанное отношение интенсивностей линий с экспериментально измеренными. Экспериментальные результаты получены с использованием частотной модуляции лазерного излучения. В данной методике измеряемый сигнал пропорционален первой производной от формы линии, что при сканировании частоты лазерного излучения через резонанс дает дисперсионную форму измеряемого сигнала. Это видно из приведенных экспериментальных данных (Рисунок 3.4). В работе не указано как из данного сигнала получена интенсивность линий (выражение 3.7) отношение которых сравнивается с предсказаниями теоретических вычислений (выражение 3.6). Какова ошибка при определении интенсивности линий из экспериментальных данных?

5. Автор пренебрегает в описании работы вторичной МОЛ бинарными столкновениями. Однако на данной системе в процессе первичного охлаждения было экспериментально обнаружено влияние бинарных столкновений при увеличении количества атомов в МОЛ более 10^6 (Сукачев Д.Д. «Лазерное охлаждение атомов тулия», диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук, 2013). При этом концентрация атомов в работе ($n=2 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$) близка к предельной концентрации в МОЛ тулия определяемой бинарными столкновениями ($n \approx 10^{12} \text{ см}^{-3}$).

Приведенные замечания не снижают высокой научной ценности представленной работы и значимости вклада для развития данной области.

Автореферат полностью соответствует содержанию и результатам диссертации.

Доклад по материалам диссертации был представлен автором 21 декабря 2016 года на Семинаре №1058 отдела лазерной спектроскопии ИСАН.

Диссертационная работа «Вторичное лазерное охлаждение атомов тулия», представленная Вишняковой Гульнарой Александровной, является законченным научным исследованием, по своей тематике полностью соответствует заявленной специальности и удовлетворяет условиям, установленным в Положении о присуждении ученых степеней,

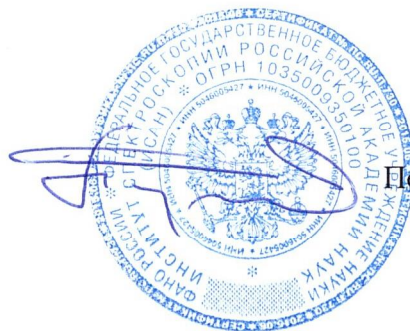
утвержденном постановлением № 842 Правительства Российской Федерации от «24» сентября 2013 г., а автор работы безусловно заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 лазерная физика.

Отзыв составлен старшим научным сотрудником отдела лазерной спектроскопии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института спектроскопии Российской академии наук (ИСАН), Афанасьевым Антоном Евгеньевичем.

К.ф.-м.н., с.н.с, отдел лазерной спектроскопии,
лаборатория лазерной спектроскопии ИСАН
108840 г. Москва, г.Троицк
ул. Физическая, 5
Телефон 8(495)851-02-33
e-mail: afanasiev@isan.troitsk.ru

Афанасьев А.Е.

Ученый секретарь ИСАН,
к.ф.-м.н.
108840 г. Москва, г.Троицк
ул. Физическая, 5
Телефон: 8(495)851-02-21
e-mail: perminov@isan.troitsk.ru



Перминов Е.Б.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт спектроскопии
Российской академии наук (ИСАН)
142190 г. Москва, г.Троицк, ул. Физическая, 5
8(495)851-02-21, isan@isan.troitsk.ru

«28» февраля 2017 г.

Список основных научных публикаций ведущей организации Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН) 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. A. E. Afanasiev, P. N. Melentiev, A. A. Kuzin, A. Yu. Kalatskiy, V. I. Balykin, “Photon transport through a nanohole by a moving atom”, *New J. Phys.* – 2016 – 18 – 053015
2. Kamchatnov A. M., Kartashov Y. V., “Oblique Breathers Generated by a Flow of Two-Component Bose-Einstein Condensates Past a Polarized Obstacle”, *Physical Review Letters* – 2013 – 111 – 140402
3. Kamchatnov A. M., “Periodic waves in two-component Bose-Einstein condensates with repulsive”, *EPL (Europhysics Letters)*. – 2013. – Т. 103. – №. 6. – С. 60003
4. Kartashov Y. V., Konotop V. V., Abdullaev F. K., “Gap solitons in a spin-orbit-coupled Bose-Einstein condensate”, *Physical Review Letters*. – 2013. – Т. 111. – №. 6. – С. 060402
5. Yanyshev D. N., Balykin V. I., Vladimirova Y. V., Zadkov V. N., “Modeling dynamics of atoms in a femtosecond optical dipole trap”, *Physical Review A*. – 2013. – Т. 87. – №. 3. – С. 033411
6. В. И. Балыкин, “Квантовое управление атомами и фотонами с помощью оптических нановолноводов”, *УФН* – 2014 – т.184 – №6 – с.656