

Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Физический институт им. Н.Н. Лебелева
Российской академии наук

На правах рукописи.

СУКАЧЁВ ДЕНИС ДМИТРИЕВИЧ

ЛАЗЕРНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ АТОМОВ ТУЛИЯ

Специальность 01.04.21 — Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук.

Научный руководитель: член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук
Колачевский Николай Николаевич
(ФИАН, гл.н.с.)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Пальчиков Виталий Геннадьевич
(ВНИИФТРИ, зам. директора)
доктор физико-математических наук,
Городецкий Михаил Леонидович
(МГУ им. М.В. Ломоносова, профессор)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт спектроско-
пии Российской академии наук (ИСАН)

Защита состоится «28» октября 2013 г. в 12 часов на заседании диссертаци-
онного совета Д 002.023.03 Физического института им. П.Н. Лебедева РАН
(ФИАН)

Адрес: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН по адресу:
119991 г. Москва, Ленинский проспект, д. 53

Автореферат разослан «____» _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.023.03
д.ф.-м.н.

А.С. Шиканов

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Лазерное охлаждение атомов и их захват в магнито-оптическую ловушку (МОЛ) являются на сегодняшний день одним из самых распространенных методов получения и исследования ансамблей атомов при температурах ниже 1мК [1]. Они находят свое применение в прецизионной лазерной спектроскопии [2], атомной интерферометрии [3], в изучении атомных взаимодействий при малых скоростях [4] и синтезе холодных молекул [5]. С использованием магнито-оптических ловушек получают бозе-эйнштейновские конденсаты атомов и вырожденные ферми газы [6]. Холодные атомы широко используются при решении фундаментальных задач, например, проверке основополагающих физических теорий [7] и измерении фундаментальных констант [8]. На основе методов лазерного охлаждения созданы атомные реперы частоты: от первого цезиевого фонтана [9] до оптических часов на Al^+ [10]. Относительная нестабильность лучших оптических часов достигла 10^{-18} , что открывает перспективы их использования в системах спутниковой навигации и в астрономических исследованиях.

Работа посвящена лазерному охлаждению, захвату в МОЛ и в магнитную ловушку (МЛ) атомов тулия (Tm), а также их субдоплеровскому охлаждению. Электронная структура основного состояния атомов тулия имеет вид $[Xe]4f^{13}6s^2$. Благодаря одной вакансии в $4f$ оболочке основное состояние тулия обладает большим магнитным $4\mu_B$ и угловым моментами. Такие системы интересны, например, с точки зрения изучения магнитных диполь-дипольных взаимодействий [11]. Тонкая структура основного состояния Tm $[Xe]4f^{13}6s^2(^2F^0)$ состоит из двух подуровней с полным электронным моментом $J = 7/2$ и $J = 5/2$. Узкий магнито-дипольный переход на длине волны 1,14мкм и со спектральной шириной $1,2 \pm 0,4$ Гц [12], связывающий эти под-

уровни, может быть использован в метрологических целях [13], в фундаментальных исследованиях [14] и в задачах квантовой информации [15].

Для лазерного охлаждения и захвата в МОЛ использовался сильный переход

$$\begin{aligned} 4f^{13}(^2F^0)6s^2(J = 7/2, F = 4) \rightarrow \\ 4f^{12}(^3H_5)5d_{3/2}6s^2(J = 9/2, F = 5) \end{aligned} \quad (1)$$

с длиной волны 410,6 нм. Естественная ширина перехода составляет $\gamma = \Gamma/2\pi = 10,5 \pm 0,2$ МГц [12], что соответствует доплеровскому пределу температуры $T_D = 240$ мкК.

Цели работы

Целями данной работы были:

1. Создание экспериментальной установки по лазерному охлаждению и захвату атомов тулия в МОЛ, работающую на переходе с длиной волны 410,6 нм.
2. Измерение числа захваченных в МОЛ атомов, их времени жизни и температуры в зависимости от параметров пучков МОЛ.
3. Исследование возможности работы МОЛ для атомов тулия без перекачивающего излучения. Измерение коэффициента ветвления охлаждающего перехода по верхнему уровню.
4. Разработка и реализация методов субдоплеровского лазерного охлаждения атомов тулия.
5. Исследование МЛ для атомов тулия. Оценка константы скорости переворота спина из-за магнитного диполь-дипольного взаимодействия атомов тулия в основном состоянии.

Научная новизна

1. Впервые осуществлено лазерное охлаждение редкоземельных атомов тулия и произведен их захват в МОЛ. Показано, что для лазерного охлаждения атомов тулия не требуется перекачивающее излучение. Впервые получено экспериментальное значение коэффициента ветвления охлаждающего перехода по верхнему уровню.
2. Установлено, что для атомов тулия имеет место эффективное субдоплеровское охлаждение атомов внутри МОЛ. Получено рекордное значение температуры облака атомов тулия, равное 25 мК, которое на порядок величины ниже доплеровского предела.
3. Исследован захват атомов тулия в МЛ, образованную квадрупольным магнитным полем МОЛ. Получено ограничение сверху на константу скорости переворота спина из-за магнитного диполь-дипольного взаимодействия атомов тулия в основном состоянии, согласующееся с предыдущими работами.

Практическая ценность

Разработана экспериментальная техника лазерного охлаждения атомов тулия. Ультрахолодные атомы тулия, помещенные в оптическую дипольную ловушку или в оптическую решетку, могут быть применены в задачах метрологии времени и частоты с использованием узкого магнито-дипольного перехода на длине волны 1,14 мкм. Лазерно-охлажденные атомы тулия планируется использовать для квантово-механического моделирования высокотемпературных сверхпроводников.

Сведения об апробации результатов работы

Результаты работы докладывались автором на следующих международных и российских научных конференциях и школах:

1. 3-я Высшая лазерная школа «Современные проблемы лазерной физики», 9–11 ноября 2009 г., пансионат Вятчи, Московская область. Премия за победу в конкурсе устных презентаций.
2. III Всероссийская молодёжная школа-семинар с международным участием «Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики», 25–30 октября 2009 г., Москва. Доклад «Лазерное охлаждение и пленение атомов тулия», опубликован в Трудах Школы, стр. 49.
3. 52-ая научная конференция МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук», 27–30 ноября 2009 г., Москва-Долгопрудный. Доклад «Лазерное охлаждение и пленение атомов тулия», опубликован в Трудах конференции, Часть II, стр. 75–77.
4. XIII Школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики» и IV Школа-семинар «Инновационные аспекты фундаментальных исследований», 14–19 ноября 2010 г., Звенигород–Москва. Доклад «Поляризационно-градиентное охлаждение атомов тулия в магнито-оптической ловушке».
5. International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO), 23–26 августа 2010 г., Казань. Доклад «Sub-Doppler Laser Cooling of Thulium Atoms».
6. Pre-doctoral school «Ultracold atoms, metrology and quantum optics», 12–24 сентября 2010 г., Les-Houches, Франция. Доклад «Sub-Doppler laser cooling of Tm atoms».
7. 53-ая научная конференция МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук», 24–29 ноября 2010 г., Москва-Долгопрудный. Доклад «Субдоплеровское лазерное охлаждение атомов тулия», опубликовано в Трудах конференции, Часть II, стр. 253–254.

8. 2nd German-French-Russian Laser Symposium, 14–17 апреля 2011 г., Goessweinstein, Германия. Доклад «Magneto-optical and magnetic traps for thulium atoms».
9. 4-ая Всероссийская молодежная конференция "Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики 14–16 ноября 2011 г., Москва. Доклад «Захват атомов тулия в магнитную ловушку».
10. 4-ая Всероссийская молодежная конференция «Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики», 14–16 ноября 2011 г., Москва. Доклад «Компактная полупроводниковая лазерная система на длину волны 410,6 нм».
11. 43rd Conference of the European Group for Atomic Systems (EGAS), 28 июня–2 июля, 2011 г., Fribourg, Швейцария. Доклад «Sub-Doppler laser cooling and trapping of thulium atoms», опубликован в трудах конференции, стр. 34.
12. XI Международные Чтения по Квантовой Оптике (IWQO-2011), 5–10 сентября 2011 г., Волгоград. Доклад «Субдоплеровское лазерное охлаждение атомов тулия в магнито-оптической ловушке и магнитное удержание атомов тулия в низкоградиентной магнитной ловушке». Диплом за успешное выступление.
13. The 23rd International Conference on Atomic Physics, 23–27 июля, 2012 г., Palaiseau, Франция. Доклад «Laser cooling of thulium atoms with Blue-Ray diodes», опубликовано в Трудах конференции, стр. 259.

Результаты работы опубликованы в пяти периодических изданиях, входящих в диссертационный перечень ВАК, ссылки на которые приведены в конце автореферата. За цикл работ автору были присуждены премия им. С.И.Вавилова УНК ФИАН за 2009 год и премия им. Н. Г. Басова ОКРФ ФИАН за 2010 г.

Личный вклад автора

Все изложенные в диссертации результаты получены лично автором, либо при его решающем участии.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и трех приложений. Список использованной литературы содержит 107 наименований. Объем диссертации составляет 107 страниц машинописного текста, включая 42 рисунка и 2 таблицы.

Защищаемые положения

1. Осуществлено лазерное охлаждение и захват атомов тулия в магнито-оптическую ловушку на переходе с длиной волны 410,6 нм. Экспериментально измерен коэффициент ветвления охлаждающего перехода по верхнему уровню. Его значение составляет $(22 \pm 6) \times 10^{-7}$, что обеспечивает возможность лазерного охлаждения без использования перекачивающего излучения.
2. Реализовано субдоплеровское охлаждение более 10^6 атомов тулия в магнито-оптической ловушке вплоть до температуры 25 мК. Субдоплеровское охлаждение эффективно работает в магнито-оптической ловушке благодаря совпадению факторов Ланде уровней охлаждающего перехода.
3. Осуществлен захват 10^4 охлажденных атомов тулия в магнитную квадрупольную ловушку при температуре 40 мК. Дано ограничение сверху на константу скорости переворота спина из-за магнитного диполь-дипольного взаимодействия атомов тулия в основном состоянии $10^{-11} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$.

II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы ее цели и задачи, кратко изложено содержание разделов диссертации.

В **Главе 1 «Магнито-оптическая ловушка для атомов тулия»** дано подробное описание экспериментальной установки по лазерному охлаждению атомов тулия и приведены результаты измерений времени жизни и числа атомов в МОЛ.

В п. 1.1 обсуждается вопрос получения паров тулия с давлением порядка 10^{-2} мбар, достаточным для работы МОЛ.

В п. 1.2 приводится описание основных узлов экспериментальной установки: лазерной системы, вакуумной части, оптической схемы, системы стабилизации частоты лазера, оптической схемы и системы регистрации.

В п. 1.3 приведены результаты измерения времени жизни и числа атомов в МОЛ.

В п. 1.3.2 по результатам измерений времени жизни атомов в МОЛ (см. рис. 1) получена оценка на константу скорости неупругих столкновений возбужденного и невозбужденного атомов тулия $(3 \pm 2) \times 10^{-10} \text{ см}^3\text{с}^{-1}$.

В п. 1.3.3 представлена зависимость обратного времени жизни атомов в МОЛ от интенсивности света в центре МОЛ (см. рис. 2). Наибольшее время жизни составило 1,9 с и ограничивалось столкновениями с атомами остаточных газов в вакуумной камере.

Из этих данных получено значение коэффициента ветвления охлаждающего перехода по верхнему уровню, равное $(3 \pm 1) \times 10^{-7}$. Столь малое значение коэффициента ветвления обуславливает эффективную работу тулиевой МОЛ без использования дополнительного излучения, которое будет «закрывать» каналы потерь, связанные с распадом верхнего уровня охлаждающего перехода на соседние уровни противоположной четности.

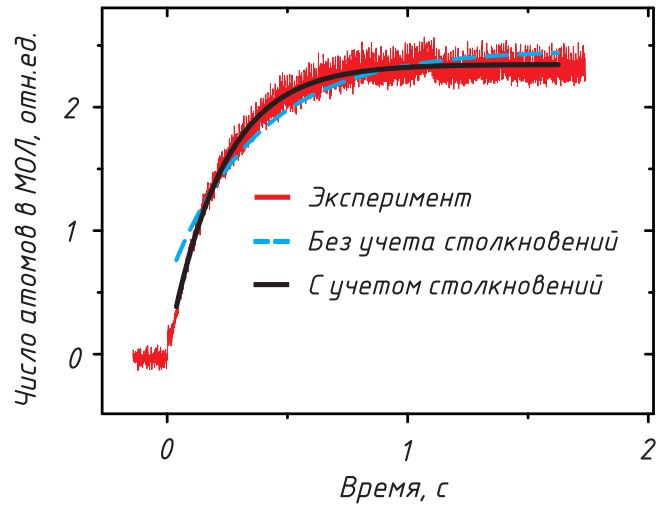


Рисунок 1 — Динамика загрузки МОЛ. Сплошная линия — аппроксимация теоретической зависимостью с учетом столкновений, пунктирная линия — аппроксимация теоретической зависимостью без учета столкновений (экспонента).

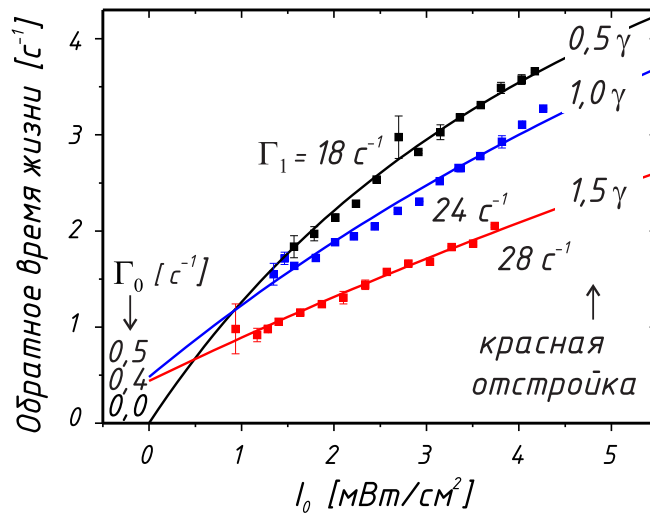


Рисунок 2 — Обратное время жизни атомов в МОЛ при различных интенсивностях и отстройках пучков МОЛ. Квадратики соответствуют экспериментальным данным. I_0 — интенсивность на оси каждого из 6-ти пучков МОЛ. Γ_0 и Γ_1 соответствуют параметрам теоретической модели, описанной в тексте диссертации.

В п. 1.3.4 приведены результаты измерений числа атомов тулия, захваченных в МОЛ, которые качественно согласуются с численными расчетами, приведенными в Приложении Б. Наибольшее число атомов в МОЛ составило 3×10^6 и ограничивалось потоком атомов в атомном пучке. Концентрация атомов в центре МОЛ была порядка 10^{12} см^{-3} и ограничивалась бинарными столкновениями атомов тулия в МОЛ.

В п. 1.3.5 показано, что благодаря особенностям сверхтонкой структуры уровней охлаждающего перехода для работы тулиевой МОЛ не нужно дополнительное перекачивающее излучение, выполняющее оптическую накачку с подуровня $F = 3$ на подуровень $F = 4$. Данную накачку выполняет само охлаждающее излучение.

В Главе 2 «Субдоплеровское охлаждение атомов тулия» описываются эксперименты по субдоплеровскому охлаждению атомов тулия в МОЛ.

В п. 2.1 кратко описан процесс градиентно-поляризационного субдоплеровского охлаждения атомов. Показано, что температура атомов T зависит от частотной остроты δ и интенсивности I пучков МОЛ следующим образом:

$$T \propto \frac{|\delta|}{I}. \quad (2)$$

В п. 2.2 обсуждается влияние магнитного поля на процесс субдоплеровского охлаждения. Показано, что при совпадении факторов Ланде уровней охлаждающего перехода магнитное поля практически не влияет на охлаждение атомов. Так как различие указанных факторов Ланде для атомов тулия меньше 3%, то должно наблюдаться эффективное субдоплеровское охлаждение атомов тулия в МОЛ без использования специального цикла субдоплеровского охлаждения.

В п. 2.3 описан метод измерения температуры атомов в МОЛ по баллистическому разлету облака холодных атомов. Он заключается в измерении зависимости радиуса облака атомов от времени, прошедшего с момента выключения лазерных пучков и квадрупольного магнитного поля. Если распределение по скоростям является максвелловским, а пространственная форма облака описывается гауссовским законом, то радиус облака w (по уровню $1/e^2$) будет изменяться по закону:

$$\omega_{1/e^2}(t) = \sqrt{\omega_0^2 + \frac{4k_B T}{m} t^2}, \quad (3)$$

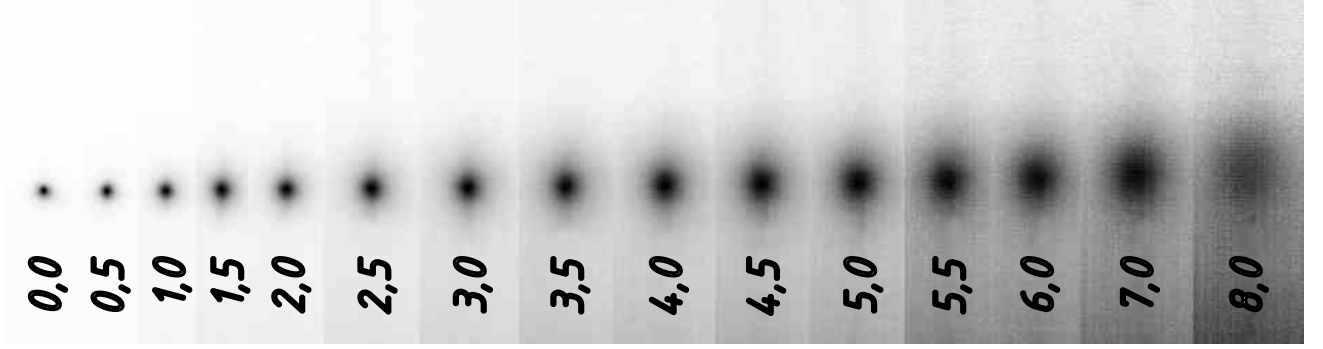


Рисунок 3 — Последовательные фотографии облака холодных атомов тулия после выключения световых и магнитных полей. Фотографии выполнены через интервалы времени $\Delta t = 0; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 5,5; 6; 7$ и 8 мс после начала разлета.

где T — температура атомов, t — время разлета, m — масса атома, ω_0 — начальный радиус облака, k_B — постоянная Больцмана.

В п. 2.4 приведены результаты измерений температуры атомов тулия в МОЛ. На рис. 3 представлены фотографии разлетающегося облака атомов.

На рис. 4 показаны результаты измерения зависимости температуры атомов в МОЛ от частотной отстройки и интенсивности пучков МОЛ. Полу-

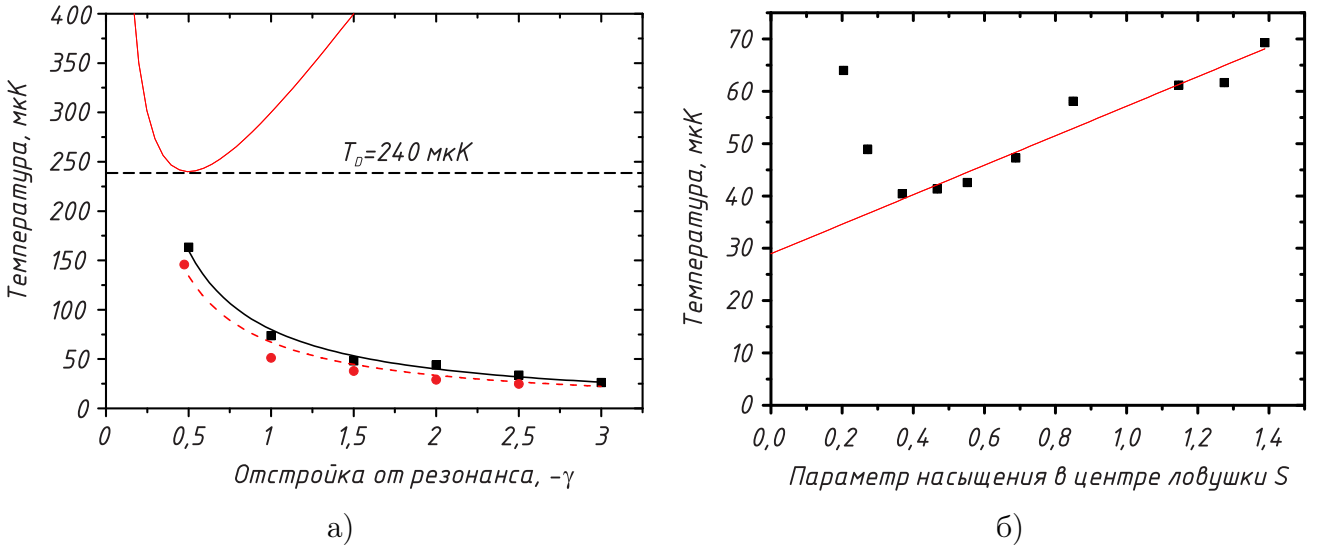


Рисунок 4 — Температура атомов тулия в МОЛ.

(а) Зависимость температуры атомов от отстройки пучков МОЛ при двух значениях параметра насыщения $S = I/I_{sat}$, где $I_{sat} = 18 \text{ мВт/см}^2$ — интенсивность насыщения. Квадратики — $S = 2$, кружочки — $S = 0,4$. Пунктирные линии соответствуют теоретической модели (2). Сверху изображена температура в доплеровской теории.

(б) Зависимость температуры атомов от интенсивности света в МОЛ. Частотная отстройка охлаждающего излучения -10 МГц . Прямая линия — теоретическая модель (2).

ченная монотонная зависимость температуры от частотной отстройки пучков МОЛ прекрасно согласуется с теоретической моделью (2) и подтверждает наличие эффективного субдоплеровского охлаждения атомов тулия в МОЛ. Наименьшая полученная температура составила 25 ± 5 мК, что на один порядок величины ниже доплеровского предела $T_D = 240$ мК для используемого охлаждающего перехода.

В Главе 3 «Магнитная ловушка для атомов тулия» проведено исследование атомов тулия, захваченных в квадрупольную магнитную ловушку (МЛ), образованную магнитным полем МОЛ.

В п. 3.1 описаны принципы действия квадрупольной МЛ. Показано, что в МЛ с вертикальным градиентом магнитного поля около 40 Гс/см могут захватываться только атомы тулия, находящиеся на магнитном подуровне с $m_F \geq 2$.

В п. 3.2 обсуждается вопрос наблюдения атомов тулия, захваченных в МЛ. На рис. 5 представлены фотографии разлетающегося облака атомов тулия в двух случаях: а) при выключенных лазерных пучках и выключенном квадрупольном магнитном поле, б) при выключенных лазерных пучках и включенном квадрупольном магнитном поле. Из сравнения двух серий можно заключить, что атомы тулия, первоначально захваченные в МОЛ, при выключении лазерных пучков перезахватываются в МЛ.

В п. 3.3–3.4 описан метод измерения температуры атомов в МЛ, основанный на анализе пространственного распределения концентрации атомов в МЛ. Показано, что интегральный вертикальный профиль концентрации имеет вид:

$$\begin{aligned}
 p_z(z) &= N_z \exp \left(-2 \frac{|z|}{\tilde{z}} - 2 \tilde{g} \frac{z}{\tilde{z}} \right) \left(1 + 2 \frac{|z|}{\tilde{z}} \right), \\
 \tilde{z} &= 2k_B T / (\bar{\mu} b_z), \tilde{g} = mg / (\bar{\mu} b_z), \\
 \tilde{x} &= 2k_B T / (\bar{\mu} b_x), \tilde{y} = 2k_B T / (\bar{\mu} b_y),
 \end{aligned} \tag{4}$$

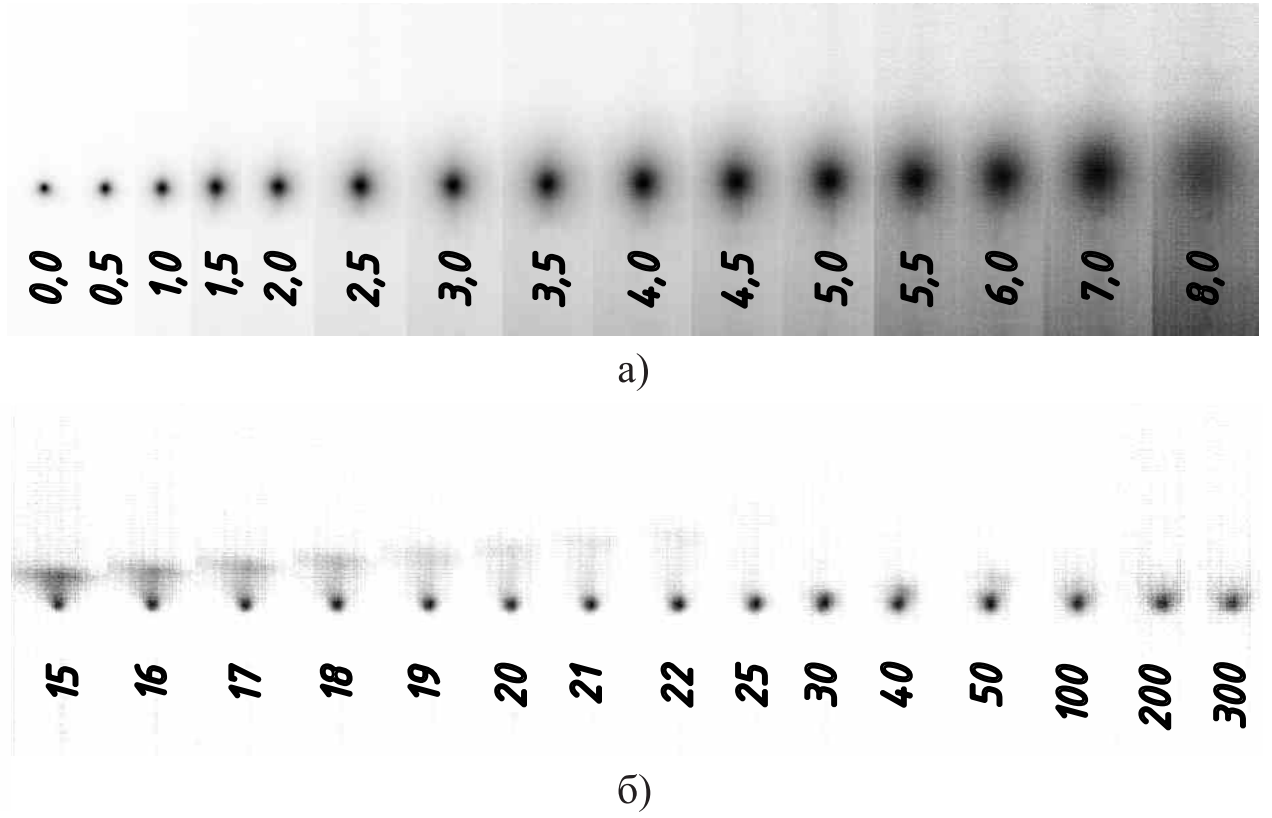


Рисунок 5 — Серии фотографий разлетающегося облака холодных атомов после выключения световых пучков. Цифры обозначают время в мс, прошедшее с момента выключения света.

(а) Разлет в случае отсутствия магнитного поля. Облако изотропно расширяется и падает в поле силы тяжести. Примерно через 10 мс после выключения лазерных пучков сигнал от разлетающегося облака становится неразличим на фоне шумов.

(б) Разлет в присутствии квадрупольного магнитного поля. Яркое неподвижное пятно в центре — атомы, захваченные в МЛ. Также видны атомы, не захваченные в МЛ и падающие под действием силы тяжести.

где N_z — нормировочный множитель, b_z — вертикальный градиент магнитного поля, $\bar{\mu}$ — эффективный магнитный момент атома, $\tilde{z}$ и $\tilde{g}$ — параметры распределения, T — температура атомов в МЛ. Из указанного выражения видно, что температура атомов равна:

$$T = \frac{mg}{2k_B} \frac{\tilde{z}}{\tilde{g}}. \quad (5)$$

На рис. 6 приведены фотография захваченных в МЛ атомов и вертикальный интегральный профиль концентрации. Для данного случая температура атомов в МЛ равна 40 ± 10 мК (исходная температура в МОЛ была 100 ± 10 мК).

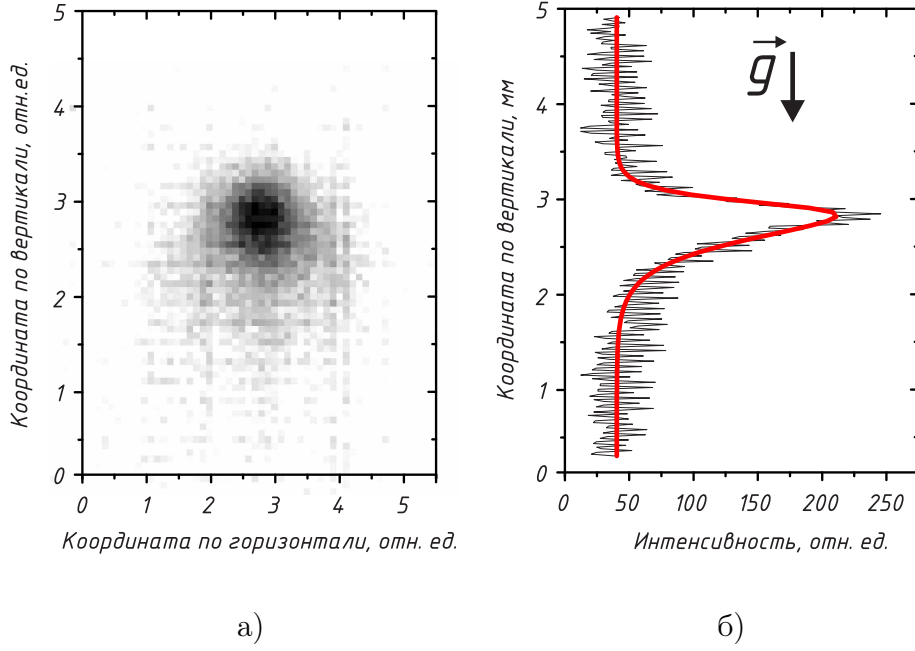


Рисунок 6 — а) Фотография облака атомов тулия, захваченных в МЛ. б) Вертикальный интегральный профиль магнитной ловушки и его аппроксимация формулой (4); $\tilde{z} = 203 \pm 15$ мкм, $\tilde{g} = 0,5 \pm 0,1$.

Было проведено исследование зависимости температуры атомов в МЛ от времени, прошедшего после выключения лазерных пучков. В пределах ошибки измерений температура была постоянна.

В п. 3.5 обсуждается вопрос о числе атомов, их времени жизни в МЛ и дается оценка константы скорости переворота спина в результате магнитных диполь-дипольных взаимодействий атомов тулия.

При типичных параметрах эксперимента в МЛ загружалось порядка 10% атомов из МОЛ, наибольшая концентрация атомов в МЛ составила 10^9 см^{-3} . Время жизни атомов в МЛ составило 0,5 с (см. рис. 7) и определялось майоровским переворотом спина при прохождении атома через ноль магнитного поля.

Из анализа полученных данных дана оценка константы скорости переворота спина в результате магнитного диполь-дипольного взаимодействия атомов тулия в основном состоянии $g_{\text{in}} < 10^{-11} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$.

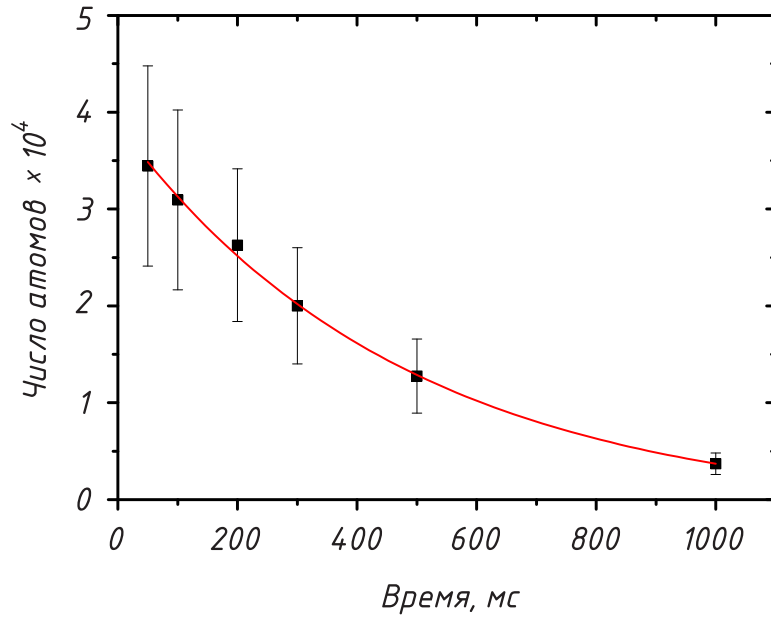


Рисунок 7 — Зависимость числа атомов в МЛ от времени. Аппроксимация экспонентой (сплошная кривая) соответствует времени жизни $0,5 \pm 0,1$ с.

В **Приложениях** подробно рассмотрены основные принципы лазерного охлаждения атомов (Приложение А), приведены результаты численного моделирования скорости захвата атомов тулия в МОЛ (Приложение Б) и даны параметры некоторых переходов в атоме тулия (Приложение В).

В **Заключении** обобщены основные результаты диссертации.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ниже перечислены основные научные результаты данной работы.

1. Впервые осуществлено лазерное охлаждение и захват более 10^6 атомов тулия в МОЛ, работающую на 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. Наибольшее время жизни атомов в МОЛ составило 1,9 с.

2. Измерен коэффициент ветвления охлаждающего перехода по верхнему уровню, который равен $(3 \pm 1) \times 10^{-7}$.
3. Показано, что при субдоплеровских температурах атомов в МОЛ перекачивающее излучение, осуществляющее оптическую накачку атомов с подуровня $F = 3$ на подуровень $F = 4$ основного состояния, не влияет на время жизни и число захваченных атомов в МОЛ.
4. Продемонстрировано субдоплеровское охлаждение атомов тулия в МОЛ вплоть до температуры 25 ± 5 мК. Столь низкие температуры обусловлены совпадением факторов Ланде уровней охлаждающего перехода.
5. Осуществлен захват охлажденных атомов тулия в МЛ, образованную квадрупольным магнитным полем МОЛ. Из анализа скорости потерь получена оценка на константу скорости диполь-дипольного взаимодействия между атомами в основном состоянии $g_{\text{in}} < 10^{-11} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$.

Публикации автора по теме диссертации

1. *Sukachev, D.* Magneto-optical trap for thulium atoms [Text] / D. Sukachev, A. Sokolov, K. Chebakov [et al.] // *Phys. Rev. A.* — 2010. — Vol. 82. — P. 011405.
2. *Сукачев, Д. Д.* Субдоплеровское охлаждение атомов тулия в магнито-оптической ловушке [Текст] / Д. Д. Сукачев, А. В. Соколов, К. А. Чебаков [и др.] // *Письма в ЖЭТФ.* — 2010. — Т. 92, № 92. — С. 772–776.
3. *Sukachev, D.* Laser cooling of thulium atoms [Text] / D. Sukachev, K. Chebakov, A. Sokolov [et al.] // *Optics and Spectroscopy.* — 2011. — Vol. 111, № 4. — P. 633–638.
4. *Сукачев, Д.Д.* Магнитная ловушка для атомов тулия [Текст] / Д.Д. Сукачев, А.В. Соколов, К.А. Чебаков [и др.] // *Квантовая Электроника.* — 2011. — Т. 41. — С. 765–768.

5. Сукачев, Д. Д. Субдоплеровское лазерное охлаждение атомов тулия в магнито-оптической ловушке и магнитное удержание атомов тулия в низкоградиентной магнитной ловушке [Текст] / Д. Д. Сукачев, А. В. Соколов, Н. Н. Колачевский [и др.] // *Наносистемы: физика, химия, математика*. — 2012. — Т. 3, № 1. — С. 125–131.

Список литературы, цитируемой в автореферате

- [1] *Phillips, W. D.* Nobel Lecture: Laser cooling and trapping of neutral atoms [Text] / W. D. Phillips // *Rev. Mod. Phys.* — 1998. — Jul. — Vol. 70. — P. 721–741.
- [2] *Риле, Ф.* Стандарты частоты. Принципы и приложения [Текст] / Ф. Риле. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2009. — 512 с.
- [3] *Peters, A.* Measurement of gravitational acceleration by dropping atoms [Text] / A. Peters, K. Y. Chung, S. Chu // *Nature*. — 1999. — Vol. 400, № 6747. — P. 849–852.
- [4] *Weiner, J.* Experiments and theory in cold and ultracold collisions [Text] / J. Weiner, V. S. Bagnato, S. Zilio, P. S. Julienne // *Rev. Mod. Phys.* — 1999. — Jan. — Vol. 71. — P. 1–85.
- [5] *Köhler, T.* Production of cold molecules via magnetically tunable feshbach resonances [Text] / T. Köhler, K. Góral, P. S. Julienne // *Rev. Mod. Phys.* — 2006. — Vol. 78. — P. 1311–1361.
- [6] *Ketterle, W.* Nobel lecture: When atoms behave as waves: Bose-Einstein condensation and the atom laser [Text] / W. Ketterle // *Rev. Mod. Phys.* — 2002. — Nov. — Vol. 74. — P. 1131–1151.
- [7] *Romalis, M. V.* New limit on the permanent electric dipole moment of ^{199}Hg [Text] / M. V. Romalis, W. C. Griffith, J. P. Jacobs, E. N. Fortson // *Phys. Rev. Lett.* — 2001. — Mar. — Vol. 86. — P. 2505–2508.

- [8] Колачевский, Н.Н. Прецизионная лазерная спектроскопия холодных атомов и поиск дрейфа постоянной тонкой структуры [Текст] / Н.Н. Колачевский // *УФН*. — 2008. — Т. 178. — С. 1225–1235.
- [9] Clairon, A. Ramsey resonance in a Zacharias fountain [Text] / A. Clairon, C. Salomon, S. Guellati, W. D. Phillips // *EPL (Europhysics Letters)*. — 1991. — Vol. 16, № 2. — P. 165.
- [10] Rosenband, T. Frequency ratio of Al^+ and Hg^+ single-ion optical clocks; Metrology at the 17th decimal place [Text] / T. Rosenband, D. B. Hume, P. O. Schmidt [et al.] // *Science*. — 2008. — Vol. 319, № 5871. — P. 1808–1812.
- [11] Baranov, M. Ultracold dipolar gases — a challenge for experiments and theory [Text] / M. Baranov, Ł. Dobrek, K. Góral [et al.] // *Physica Scripta*. — 2002. — Vol. 2002, № T102. — P. 74.
- [12] Kolachevsky, N. Blue laser cooling transitions in Tm I [Text] / N. Kolachevsky, A. Akimov, I. Tolstikhina [et al.] // *Applied Physics B: Lasers and Optics*. — 2007. — Vol. 89. — P. 589–594.
- [13] Александров, Е. Б. Неуширяемая столкновениями линия тулия 1,14 мкм. [Текст] / Е. Б. Александров, В. Н. Котылев, К. П. Василевский, В. Н. Кулясов // *Оптика и спектроскопия*. — 1983. — Т. 54, № 1. — С. 3–4.
- [14] Campbell, G. K. Imaging the Mott insulator shells by using atomic clock shifts [Text] / G. K. Campbell, J. Mun, M. Boyd [et al.] // *Science*. — 2006. — Vol. 313. — P. 649–652.
- [15] Choi, K. S. Mapping photonic entanglement into and out of a quantum memory [Text] / K. S. Choi, H. Deng, J. Laurat, H. J. Kimble // *Nature*. — 2008. — Vol. 452, № 7183. — P. 67–71.