

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

На правах рукописи

Вишнякова Гульнара Александровна

**Вторичное лазерное охлаждение атомов тулия**

Специальность 01.04.21 — Лазерная физика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2016

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

Научный руководитель:

член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук  
Колачевский Николай Николаевич (ФИАН)

Официальные оппоненты:

Пальчиков Виталий Геннадьевич, доктор физико-математических наук, заместитель начальника Главного метрологического центра Государственной службы времени и частоты НИО-7 Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ВНИИФТРИ);

Городецкий Михаил Леонидович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики колебаний физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова» (МГУ имени М. В. Ломоносова)

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН)

Защита состоится «20» марта 2017 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.023.03 при ФИАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН, а также на сайте института [www.lebedev.ru](http://www.lebedev.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_» января 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.023.03

доктор физико-математических наук

Золотько А. С.

# I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность проблемы

В современных исследованиях широко используются ансамбли холодных атомов. Понятие «холодные атомы» подразумевает под собой ансамбль частиц (от 1 до  $10^9$  атомов), как правило локализованных в пространстве на размерах порядка 0,5 мм и имеющих температуру ниже 1 мК. Время жизни таких ансамблей может достигать нескольких секунд, а характерные скорости атомов составляют 1 – 10 см/с. Лазерное охлаждение и захват в ловушки [1] – основной способ получения ансамблей холодных атомов и ионов, которые являются мощнейшим инструментом современных физических исследований. В частности, при получении бозе-эйнштейновского конденсата [2] и вырожденного ферми-газа [3], как правило, первым шагом является лазерное охлаждение. Другим важнейшим применением лазерноохлажденных ансамблей является использование их в современных стандартах частоты [4]: от микроволнового стандарта на цезиевом фонтане [5], с помощью которого формируются национальные шкалы времени, до оптических стандартов на одиночном ионе алюминия [6], ансамблях атомов стронция [7] и иттербия [8]. Холодные атомы используются в экспериментах по атомной интерферометрии [9], изучению холодных столкновений [10], синтезу холодных молекул [11]. Интересным применением являются квантовые симуляции [12], которые позволяют моделировать различные явления в твердых телах. Суть квантовых симуляций состоит в помещении холодных атомов в поле световых волн, формирующих гамильтониан, аналогичный гамильтониану в исследуемой системе. Холодные атомы так же применяются в квантовой информации и квантовых вычислениях для создания квантовых логических операций (гейтов) [13], в метрологических экспериментах по прецизионной лазерной спектроскопии [14] и измерению дрейфа фундаментальных констант [15], проверке основополагающих

физических теорий [16].

В последнее время в данной области возник большой интерес к охлаждению редкоземельных элементов. Отличительной особенностью большинства лантаноидов является незаполненная  $4f$ -оболочка, расположенная внутри заполненных  $5s^2$ - и  $6s^2$ -оболочек. Таким образом, переходы между тонкими компонентами основного состояния экранированы от внешних электрических полей и столкновений. Они являются запрещенными в электрическом дипольном приближении, что приводит к малой спектральной ширине переходов внутри оболочек, причем в ряде случаев переходы лежат в оптическом диапазоне. Перечисленные факторы делают такие переходы привлекательными для использования их в оптических стандартах частоты [17]. Большое орбитальное квантовое число и большое количество электронов в незаполненных  $f$ -оболочках приводят к большому значению магнитного момента в основном состоянии, что делает интересным исследование магнитного диполь-дипольного взаимодействия холодных атомов [18]. Диполь-дипольное взаимодействие имеет дальнедействующий и анизотропный характер, что позволяет моделировать некоторые квантовые эффекты физики магнитных веществ с помощью квантовых симуляторов на основе холодных ансамблей редкоземельных элементов. При этом управлять величиной и знаком взаимодействия атомов между собой возможно с помощью резонансов Фешбаха [19] – зависимости длины рассеяния от внешнего магнитного поля, которые также имеют отличительную особенность в магнитных атомах. Анизотропия взаимодействия приводит к тому, что резонансы Фешбаха имеют место уже при полях порядка 1 Гс [18, 20] в отличие от большинства других элементов, для которых изменение длины рассеяния требует полей порядка сотен и тысяч Гс [19]. Кроме того, диполь-дипольное взаимодействие открывает возможность исследования свойств вырожденных квантовых газов в режиме сильного взаимодействия [21, 22].

В 2010 году нашей группой в ФИАНе впервые в мире было продемонстри-

ровано лазерное охлаждение атомов тулия [23]. Тулий является редкоземельным элементом с внутренней незаполненной  $4f$ -оболочкой, основное состояние имеет конфигурацию  $[Xe]4f^{13}(^2F^o)6s^2$ . Внутренний магнито-дипольный переход между компонентами тонкой структуры основного состояния на длине волны  $\lambda = 1,14$  мкм предлагается использовать в качестве часового в репере частоты на основе ансамбля холодных атомов тулия. Большое значение магнитного момента  $\mu = 4\mu_B$  в основном состоянии позволяет исследовать широкий спектр явлений, обусловленных магнитным диполь-дипольным взаимодействием. Первая стадия охлаждения была реализована на сильном переходе  $4f^{13}(^2F^o)6s^2$  ( $J = 7/2, F = 4$ )  $\rightarrow$   $4f^{12}(^3H_5)5d_{3/2}6s^2$  ( $J' = 9/2, F' = 5$ ) с длиной волны  $\lambda = 410,6$  нм и естественной шириной  $\gamma = 10$  МГц. В рабочем режиме температура атомов составляет  $80 - 100$  мкК. Как для создания стандарта частоты, так и для исследования магнитных взаимодействий, необходимо перезагрузить атомы в оптическую дипольную ловушку или оптическую решетку [19, 24]. Однако указанная температура еще не достаточно низка для эффективной перезагрузки, поэтому необходимо дальнейшее понижение температуры, что являлось основной целью данной работы.

Диссертация посвящена вторичному лазерному охлаждению атомов тулия на спектрально-узком переходе  $4f^{13}(^2F^o)6s^2$  ( $J = 7/2, F = 4$ )  $\rightarrow$   $4f^{12}(^3H_6)5d_{5/2}6s^2$  ( $J' = 9/2, F' = 5$ ) с длиной волны  $\lambda = 530,7$  нм и естественной шириной  $\gamma = 350$  кГц и измерению сверхтонкого расщепления верхнего уровня  $4f^{12}(^3H_6)5d_{5/2}6s^2$  ( $J' = 9/2$ ) охлаждающего перехода.

## Цели и задачи работы

Целями работы являлись реализация метода доплеровского охлаждения атомов тулия на узком переходе, оптимизация процесса и исследование свойств облака холодных атомов.

Поставлены и решены следующие задачи:

1. Стабилизация частоты и сужение линии генерации лазерного источника на длине волны 530,7 нм для обеспечения эффективной работы вторичного охлаждения.
2. Исследование сверхтонкой структуры верхнего уровня  $4f^{12}(^3H_6)5d_{5/2}6s^2$  ( $J' = 9/2$ ) охлаждающего перехода.
3. Разработка методики и осуществление вторичного лазерного охлаждения атомов тулия на узком переходе  $4f^{13}(^2F^o)6s^2$  ( $J = 7/2, F = 4$ )  $\rightarrow$   $4f^{12}(^3H_6)5d_{5/2}6s^2$  ( $J' = 9/2, F' = 5$ ). Захват атомов в магнито-оптическую ловушку. Исследование зависимостей характеристик ансамбля от параметров охлаждающего излучения, сопоставление с существующими теориями.
4. Исследование анизотропии облака атомов тулия при температурах порядка 10 мкК, специфичной для охлаждения на узком переходе.

## Научная новизна

1. Исследована сверхтонкая структура уровня  $4f^{12}(^3H_6)5d_{5/2}6s^2$  ( $J' = 9/2$ ). Погрешность измерения частоты расщепления составила 0,008%, что на порядок величины меньше по сравнению с работой [25].
2. Впервые реализовано лазерное охлаждение атомов тулия на узком переходе шириной  $\gamma = 350$  кГц и захват во вторичную магнито-оптическую ловушку. Подтверждена цикличность перехода. Достигнуты минимальные температуры  $16 \pm 3$  мкК и  $8 \pm 2$  мкК по осям вдоль и поперек направления силы тяжести, соответственно.

3. Наблюдалось поведение облака атомов тулия при низких температурах, специфичное для охлаждения на узком переходе: смещение равновесного положения облака под действием силы тяжести и независимость температуры от отстройки в области больших отстроек. Продемонстрировано формирование кристаллов в импульсном пространстве при взаимодействии атомов с излучением, имеющим положительную отстройку.

### **Практическая ценность**

Достигнутые характеристики облака (концентрация атомов  $5 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$  при температурах порядка 20 мкК) позволят перезагрузить атомы тулия в оптическую дипольную ловушку и оптическую решетку с эффективностью близкой к 100%. Облако атомов в двумерной оптической решетке будет использоваться для создания оптического репера частоты на магнито-дипольном переходе с длиной волны  $\lambda = 1,14 \text{ мкм}$  и предполагаемой шириной  $\gamma = 1,6 \text{ Гц}$ , который должен обеспечить точность лучше  $10^{-17}$ , что соответствует мировому уровню.

Еще одним важным применением холодных атомов тулия, захваченных в оптическую решетку, являются квантовые симуляции явлений в магнитных веществах с использованием подстройки диполь-дипольного взаимодействия с помощью резонансов Фешбаха, исследование которых представляет самостоятельный интерес.

### **Сведения об апробации результатов работы**

Результаты работы докладывались автором на 5 международных и 3 российских научных конференциях и школах: ICONO/LAT:2013, Международная конференция по когерентной и нелинейной оптике и Конференция по лазерам, приложениям и технологиям, 18 – 22 июня 2013 г., Москва; Летняя научная школа Российского квантового центра, 15 – 18 июля 2013 г., Москва;

ISQT–2013, Вторая международная конференция по квантовым технологиям (приз за лучший стендовый доклад), 20–24 июля 2013 г., Москва; MPLP–2013, Шестой международный симпозиум по современным проблемам лазерной физики, 25 – 31 августа 2013 г., Новосибирск; Весенняя школа Российского квантового центра для студентов и молодых ученых, 17 – 20 марта 2014 г., Москва; XV Школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики», 16 – 20 ноября 2014 г., ФИАН, Москва; VI Всероссийская молодежная конференция по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики, 15 – 20 ноября 2015 г., ФИАН, Москва; 58-ая научная конференция МФТИ, 23–28 ноября 2015 г., Москва-Долгопрудный-Жуковский. Так же по теме диссертации были сделаны доклады на семинаре Отдела спектроскопии Отделения оптики ФИАН 22 июня 2016 года и на семинаре по лазерной физике, молекулярной физике и физике твердого тела и смежным областям кафедры профессора Теодора В. Хэнша института квантовой оптики общества Макса Планка 9 сентября 2016 года.

Основные результаты работы опубликованы в четырех статьях в рецензируемых научных журналах, входящих в базу данных *Web of Science*, а также в трудах конференций, ссылки на которые приведены на стр. 22.

Автор был удостоен стипендии Правительства Российской Федерации на 2015 – 2016 учебный год.

### **Личный вклад автора**

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



## Структура диссертации

Диссертация состоит из Введения, четырех Глав и Заключения. Список использованной литературы содержит 121 наименование. Объем диссертации составляет 134 страницы машинописного текста, включая 48 рисунков и 5 таблиц.

## Защищаемые положения

1. Измерено значение частоты сверхтонкого расщепления верхнего уровня  $4f^{12}(^3H_6)5d_{5/2}6s^2$  ( $J' = 9/2$ ) охлаждающего перехода, которое составило  $-2110,56 \pm 0,16$  МГц, с точностью 0,008 %. Точность измерения повышена более, чем на порядок в сравнении с [25]. Наибольший вклад в ошибку вносит сдвиг за счет кривизны волнового фронта.
2. Осуществлена стабилизация частоты и сужение линии генерации лазерного источника на длине волны 530,7 нм для вторичного охлаждения атомов тулия. Дрейф частоты составляет 600 Гц/час, ширина линии генерации не более 20 кГц.
3. Разработана методика перезахвата из первичной магнито-оптической ловушки и реализовано лазерное охлаждение атомов тулия на узком переходе  $4f^{13}(^2F^o)6s^2$  ( $J = 7/2, F = 4$ )  $\rightarrow$   $4f^{12}(^3H_6)5d_{5/2}6s^2$  ( $J' = 9/2, F' = 5$ ) с длиной волны  $\lambda = 530,7$  нм и шириной  $\gamma = 350$  кГц. Эффективность перезахвата во вторичную магнито-оптическую ловушку близка к 100% в широком диапазоне параметров охлаждающего излучения.
4. Минимально достигнутые температуры при числе атомов порядка  $10^6$  и концентрации на уровне  $10^{10}$  см $^{-3}$  составляют  $16 \pm 3$  мК по вертикальной (вдоль  $\vec{g}$ ) оси и  $8 \pm 2$  мК по горизонтальной (поперек  $\vec{g}$ ) оси и достигаются при параметрах насыщения  $s < 0,1$  и отстройках  $\delta < -7\gamma$ . Осуществлен режим, в котором температура не зависит от отстройки из-за смещения равновесного положения ловушки вниз в поле силы тяжести.

## II. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** сформулированы цели работы, обоснована актуальность задачи, в частности, перечислены основные области применений ансамблей холодных атомов, и кратко описана структура диссертации.

В **Главе 1 «Лазерное охлаждение и пленение нейтральных атомов»** описаны методы лазерного охлаждения и захвата нейтральных атомов в магнито-оптическую ловушку и приведена краткая историческая справка о возникновении идей и реализации лазерного охлаждения и локализации атомов.

В п. 1.1 описана доплеровская теория лазерного охлаждения и обосновано введение понятия температуры лазерно-охлажденного ансамбля частиц.

В п. 1.2 приводится описание магнито-оптической ловушки (МОЛ) для локализации атомов в пространстве.

В п. 1.3 обсуждаются скорость захвата атомов в МОЛ и предварительное зеемановское замедление.

В п. 1.4 рассмотрены различные методы получения температур ниже доплеровского предела. В частности, в п.п. 1.4.1–1.4.7 описаны такие методы, как градиентно-поляризационное охлаждение (в  $\sigma^+ - \sigma^-$  и  $lin \perp lin$  конфигурациях поляризаций), охлаждение за счет селективного по скоростям когерентного пленения населенности, рамановское охлаждение, охлаждение на узком переходе (вторичное охлаждение), охлаждение с помощью демона Максвелла, охлаждение с тушением возбуждения и охлаждение с перемешиванием магнитных подуровней. Многие из этих методов требуют специфической системы атомных уровней или, напротив, решают проблему отсутствия удобной системы.

В п. 1.5 отдельно рассмотрено лазерное охлаждение лантаноидов с незаполненной внутренней  $4f$ -оболочкой, к которым относится тулий. В п. 1.5.1 обоснована актуальность охлаждения редкоземельных элементов. В п. 1.5.2

приведены результаты мировых научных групп по получению облаков холодных лантаноидов. В п. 1.5.3 описано два подхода ко вторичному охлаждению – с использованием узкого и промежуточного переходов, а так же обсуждается специфика охлаждения и захвата в МОЛ, связанная с наличием магнитного момента в основном состоянии.

В Главе 2 «Первичное охлаждение тулия и источник излучения для вторичного охлаждения» приведено краткое описание первичной МОЛ для атомов тулия и стабилизации частоты и сужения линии генерации лазерного источника для вторичного охлаждения.

В п.п. 2.1 и 2.2 обоснована актуальность лазерного охлаждения атомов тулия и описана электронная структура атомных уровней, используемых в эксперименте. Также приведена характеристика двух охлаждающих переходов, на которых осуществляется, соответственно, первичное и вторичное лазерное охлаждение.

В п. 2.3 кратко описана первичная МОЛ для атомов тулия на сильном переходе  $4f^{13}(^2F^o)6s^2 (J = 7/2, F = 4) \rightarrow 4f^{12}(^3H_5)5d_{3/2}6s^2 (J' = 9/2, F' = 5)$  с длиной волны  $\lambda = 410,6$  нм и шириной  $\gamma = 10$  МГц. В рабочем режиме температура атомов составляет  $80 - 100$  мкК.

В п. 2.4 описан источник излучения, используемый для измерения сверхтонкого расщепления уровня  $4f^{12}(^3H_6)5d_{5/2}6s^2 (J' = 9/2)$  и вторичного охлаждения на переходе  $4f^{13}(^2F^o)6s^2 (J = 7/2, F = 4) \rightarrow 4f^{12}(^3H_6)5d_{5/2}6s^2 (J' = 9/2, F' = 5)$  с длиной волны  $\lambda = 530,7$  нм и шириной  $\gamma = 350$  кГц.

В п.п. 2.4.1–2.4.3 и 2.4.5 описан метод Паунда-Дривера-Холла стабилизации частоты излучения по высокочастотному резонатору Фабри-Перо и приведена оптическая схема для ее осуществления. Тело резонатора изготовлено из специального стекла марки УЛЕ, которое имеет нулевую точку (то есть температуру, при которой линейный коэффициент теплового расширения обращается в нуль) в диапазоне комнатных температур. В п. 2.4.4 описано измерение

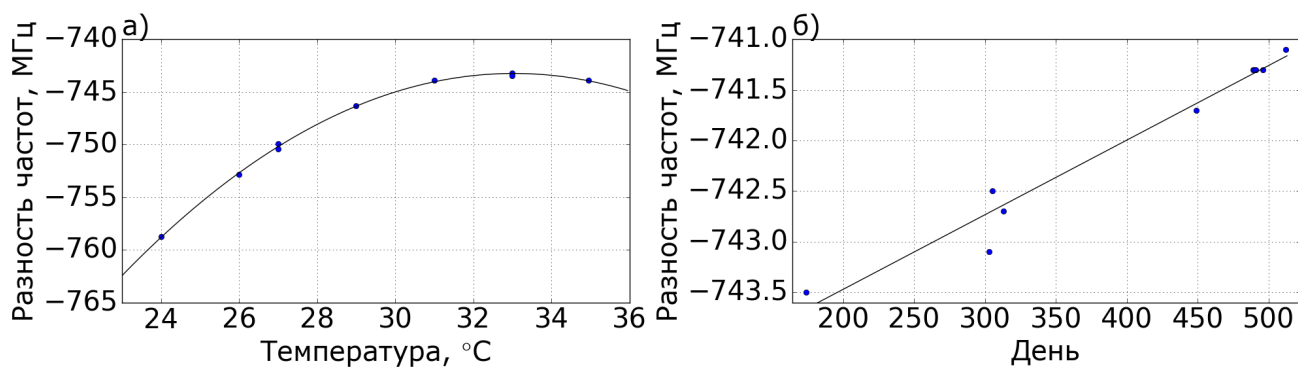


Рисунок 1 — Зависимость частоты моды  $TEM_{00}$  резонатора от (а) температуры тела резонатора и (б) времени. Точки – измеренное частотное расстояние, кривые – аппроксимация (а) квадратичной и (б) линейной зависимостями.

времени жизни фотона в резонаторе, составившее 12 мкс, что соответствует значениям резкости и добротности  $1,5 \cdot 10^5$  и  $4,5 \cdot 10^{10}$ , соответственно.

В п.п. 2.4.6–2.4.8 приведены измеренные значения нулевой точки резонатора и дрейфа на больших временах (см. рис. 1). Температура нулевого линейного расширения равна  $33,0 \pm 0,2^\circ\text{C}$ . Дрейф частоты лазерного излучения, стабилизированного по УЛЕ резонатору, составил 300 Гц/час. Ширина линии генерации лазера измерялась методом автогетеродинамирования с использованием оптоволокна длиной 1500 м и не превышает 10 кГц. С учетом удвоения частоты указанные характеристики излучения на длине волны 530,7 нм для вторичного лазерного охлаждения атомов тулия составляют, соответственно, 600 Гц/час и 20 кГц.

В **Главе 3 «Измерение сверхтонкого расщепления уровня  $4f^{12}(^3H_6)5d_{5/2}6s^2 (J' = 9/2)$ »** описано измерение значения константы  $A_J$  сверхтонкого расщепления верхнего уровня охлаждающего перехода. Измерение производилось методом частотно-модуляционной спектроскопии насыщения. Знак расщепления был независимо определен в облаке атомов, захваченных в первичную МОЛ.

В п. 3.1 дан обзор методов и погрешностей измерения сверхтонких расщеплений различных уровней тулия.

В п. 3.2 описано измерение знака расщепления с помощью спектроскопии

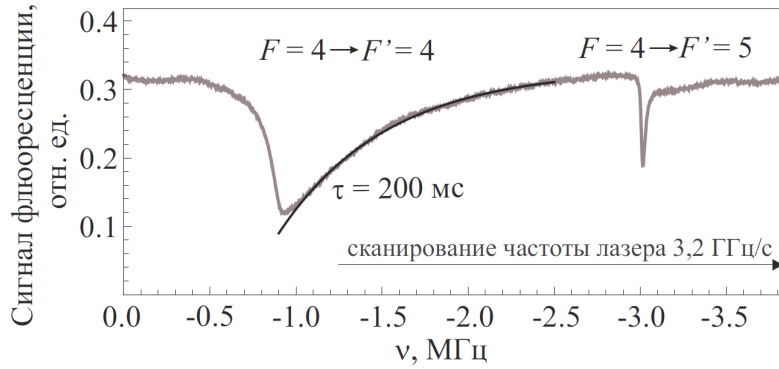


Рисунок 2 — Сигнал флюоресценции атомов на длине волны 410,6 нм при освещении 30 мВт зеленого излучения. Частота излучения на длине волны 530,7 нм непрерывно сканировалась, как показано на рисунке. Сплошной черной линией показан экспоненциальный фит данных.

атомов в МОЛ. Атомы, захваченные в первичную МОЛ, облучались пучком зеленого излучения, и с помощью фотоумножителя регистрировалась флюоресценция облака атомов. При сканировании частоты излучения наблюдалось два провала, соответствующих переходам  $F = 4 \rightarrow F' = 4$  и  $F = 4 \rightarrow F' = 5$  (см. рис. 2). Идентификация переходов проводилась по виду восстановления сигнала флюоресценции: при выходе из резонанса с переходом  $F = 4 \rightarrow F' = 4$  наблюдается экспоненциальное нарастание сигнала с постоянной времени, соответствующей времени жизни атомов в первичной МОЛ, тогда как после прохождения резонанса  $F = 4 \rightarrow F' = 5$  сигнал флюоресценции восстанавливается практически мгновенно. Объясняется это тем, что при возбуждении атомов на уровень  $F' = 4$  они в основном распадаются на подуровень  $F = 3$  основного состояния, перестают взаимодействовать с охлаждающим излучением и покидают ловушку. Переход же  $F = 4 \rightarrow F' = 5$  является циклическим и атомы после спонтанного распада на подуровень  $F = 4$  продолжают охлаждаться и остаются в МОЛ. Таким образом, переходу  $F = 4 \rightarrow F' = 5$  соответствует правый контур на рис. 2 и подуровень  $F' = 5$  лежит ниже подуровня  $F' = 4$ , то есть имеет меньшую энергию, и константа  $A_J < 0$ .

В п. 3.3 описаны метод измерения абсолютной величины расщепления и схема эксперимента. Величина расщепления определялась методом частотно-модуляционной спектроскопии насыщения в кювете с парами тулия, подо-

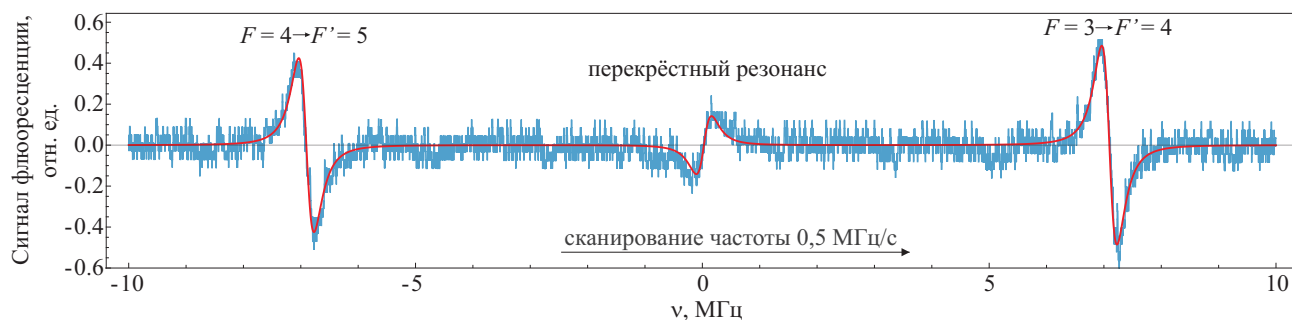


Рисунок 3 — Вид демодулированного сигнала насыщенного поглощения при сканировании частоты излучения, осуществляемом с помощью акусто-оптического модулятора. Показаны экспериментальные данные после вычитания остаточного вклада доплеровского контура и аппроксимация данных суммой трех дисперсионных контуров с независимыми положениями и амплитудами. Скорость сканирования частоты составляла 0,5 МГц/с.

греваемой до температуры  $720^{\circ}\text{C}$ , с помощью синхронного детектирования. На рис. 3 показан спектр, полученный при сканировании через резонансы  $F = 4 \rightarrow F' = 5$  и  $F = 3 \rightarrow F' = 4$  бихроматическим излучением, частоты компонент которого отличались на 600 МГц.

В п. 3.4 обоснован выбор дисперсионного контура для аппроксимации полученных данных в силу малых частоты и индекса модуляции.

В п. 3.5 рассмотрено влияние оптической накачки на относительную интенсивность переходов между сверхтонкими подуровнями. Оно приводит к тому, что регистрируемая интенсивность для перехода  $F = 4 \rightarrow F' = 5$  оказывается меньше, чем для перехода  $F = 3 \rightarrow F' = 4$ , несмотря на то, что силы переходов имеют обратное соотношение.

В п. 3.6 подробно рассмотрены механизмы, приводящие к уширению и сдвигу линий, такие как уширение мощностью, эффекты кривизны волнового фронта и неколлинеарности пучков, уширение за счет частотной модуляции, магнитные поля, столкновительные эффекты и эффект отдачи.

В п. 3.6.7 приведены суммарный бюджет уширений и сдвигов (см. табл. 1) и полученные результаты. Ширина регистрируемых контуров составила  $450 \pm 50$  кГц, что, с учетом рассмотренных механизмов уширений, согласуется со значением естественной ширины  $347 \pm 17$  кГц. Измеренное зна-

Таблица 1 — Бюджет ошибок измерения сверхтонкого расщепления.

Источник	Вклад, кГц
Статистика	20
Кривизна волнового фронта	150
Зеемановское расщепление	10
Столкновительные эффекты	20
Дрейф УЛЕ резонантора	80
Суммарная ошибка	160

чение сверхтонкого расщепления уровня  $4f^{12}(^3H_6)5d_{5/2}6s^2$  ( $J' = 9/2$ ) составило  $(E_{F'=5} - E_{F'=4})/h = -2110,56 \pm 0,16$  МГц, что соответствует константе сверхтонкого расщепления  $A_J = -422,112 \pm 0,032$  МГц. Абсолютное значение ошибки измерения, наибольший вклад в которое дает сдвиг за счет кривизны волнового фронта, составило 160 кГц, что соответствует относительной погрешности 0,008 %.

В Главе 4 «Лазерное охлаждение атомов тулия на узком переходе» описана экспериментальная реализация вторичного лазерного охлаждения атомов тулия на слабом переходе  $4f^{13}(^2F^o)6s^2$  ( $J = 7/2, F = 4$ )  $\rightarrow$   $4f^{12}(^3H_6)5d_{5/2}6s^2$  ( $J' = 9/2, F' = 5$ ) с длиной волны  $\lambda = 530,7$  нм и естественной шириной  $\gamma = 350$  кГц.

В п. 4.1 приведено описание экспериментальной установки и схемы эксперимента по перезахвату атомов из первичной МОЛ во вторичную. В течение 1 – 2 с несколько миллионов атомов загружаются в первичную МОЛ в присутствии излучения вторичного охлаждения и охлаждаются до температур порядка 80 – 100 мкК. Далее выключаются зеемановский и первичные охлаждающие пучки и атомы доохлаждаются во вторичной МОЛ.

В п. 4.2 подробно рассмотрено охлаждение атомов тулия на указанном переходе. В п.п. 4.2.1–4.2.2 описано влияние силы тяжести на вид потенциала ловушки и равновесное положение облака. Выделено два режима работы МОЛ, один из которых аналогичен охлаждению на широком переходе

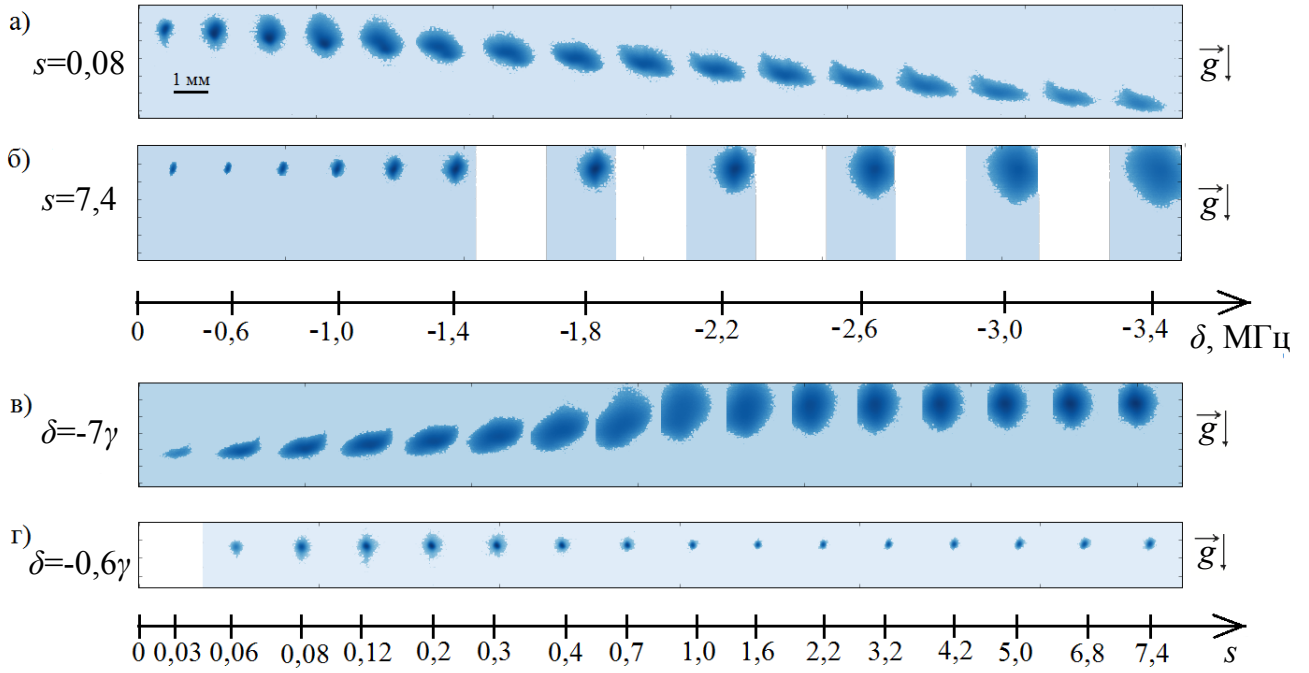


Рисунок 4 — Вид облака в зависимости от отстройки при параметрах насыщения (а)  $s = 0,08$  и (б)  $s = 7,4$  и от параметра насыщения при отстройках (в)  $\delta = -2,4$  МГц и (г)  $\delta = -0,2$  МГц.

(режим 1), а второй специфичен для работы на узком переходе и характеризуется тем, что положение минимума потенциала ловушки зависит от параметров охлаждающего излучения из-за влияния силы тяжести (режим 2).

На рис. 4 показана зависимость вида облака от отстройки при параметрах насыщения (а)  $s = 0,08$  и (б)  $s = 7,4$  и от параметра насыщения при отстройках (в)  $\delta = -2,4$  МГц и (г)  $\delta = -0,2$  МГц, где  $s = I/I_{sat}$ ,  $I$  — интенсивность на один охлаждающий пучок,  $I_{sat}$  — интенсивность насыщения охлаждающего перехода. При увеличении отстройки или уменьшении параметра насыщения облако смещается вниз в соответствии с видом потенциала. Зависимость вертикального положения от отстройки в режиме 2 (при  $s = 0,08$ ) имеет наклон  $dz_0/d\delta = 875 \pm 5$  мкм/МГц, что близко к теоретическому значению  $h/\mu_B B'_z = 950$  мкм/МГц при значении градиента магнитного поля  $B'_z = 7$  Гс/см, используемом в эксперименте.

В п. 4.2.3 обсуждается зависимость температуры облака от параметров эксперимента и метод ее измерения. Показано, что в режиме 2 температура не



зависит от отстройки охлаждающего излучения, так как при смещении равновесного положения облака вниз оно оказывается в ненулевом магнитном поле и наведенный зеемановский сдвиг, складываясь с отстройкой излучения, приводит к постоянной эффективной отстройке. Кроме того, это приводит к тому, что облако взаимодействует преимущественно с одним, распространяющимся снизу вверх, пучком.

На рис. 5 приведены экспериментальные зависимости горизонтальной (поперек  $\vec{g}$ ) и вертикальной (вдоль  $\vec{g}$ ) температур облака от отстройки охлаждающего излучения при параметрах насыщения  $s = 0,08$  и  $s = 7,4$  и от параметра насыщения при отстройках  $\delta = -7\gamma$  и  $\delta = -0,6\gamma$  и теоретические кривые для режимов 1 и 2. Хорошо видно, что для параметра насыщения  $s = 0,08$  температура практически не зависит от отстройки.

Минимально полученные значения температур составили  $16 \pm 3$  мкК и  $8 \pm 2$  мкК вдоль и поперек направления силы тяжести, соответственно. Температуры по разным осям различаются из-за влияния силы тяжести, которое приводит к разному характеру взаимодействия с вертикальными и горизонтальными охлаждающими пучками.

В п.п. 4.2.4–4.2.6 обсуждаются другие важные характеристики облака холодных атомов: время установления теплового равновесия в процессе взаимодействия с охлаждающим излучением, время жизни атомов в магнито-оптической ловушке, число, концентрация и фазовая плотность атомов в МОЛ. Для измерения времени жизни детектировалась зависимость числа атомов в МОЛ после выключения загрузки ловушки. На рис. 6 показана эта зависимость и ее аппроксимация экспоненциальным распадом. Измеренное время жизни не зависит от мощности охлаждающего излучения, что подтверждает цикличность перехода, составляет  $2,0 \pm 0,1$  с и определяется столкновениями с остаточным газом в вакуумной камере.

Максимальное число атомов в МОЛ составило  $5 \times 10^6$ . При минимальных

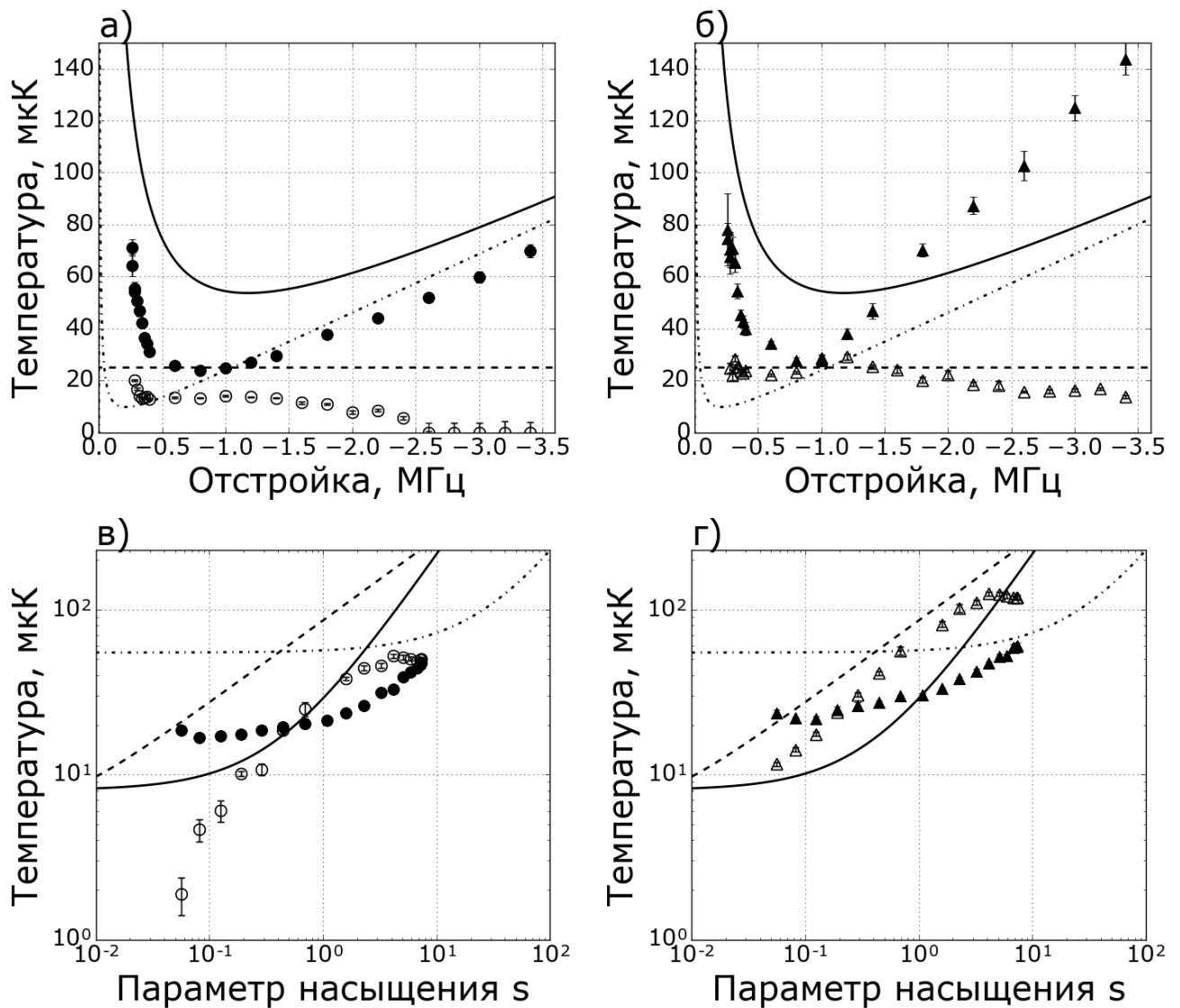


Рисунок 5 — (а, б) Зависимость горизонтальной (а) и вертикальной (б) температур от отстройки при параметрах насыщения  $s = 0,08$  (пустые кружки) и  $s = 7,4$  (заполненные кружки). Сплошные кривые показывают теоретическую зависимость в соответствии с доплеровской теорией для  $s = 7,4$  (режим 1), штрих-пунктирные – для  $s = 0,08$ . Пунктирные кривые построены для случая взаимодействия с одним пучком с  $s = 0,08$ , распространяющимся снизу вверх (режим 2). (в, г) Зависимость горизонтальной (в) и вертикальной (г) температур от параметра насыщения при отстройках  $\delta = -7\gamma$  (пустые кружки) и  $\delta = -0,6\gamma$  (заполненные кружки). Сплошные кривые показывают теоретическую зависимость в соответствии с доплеровской теорией для  $\delta = -0,6\gamma$  (режим 1), штрих-пунктирные – для  $\delta = -7\gamma$ . Пунктирные кривые построены для случая взаимодействия с одним пучком, распространяющимся снизу вверх (режим 2).

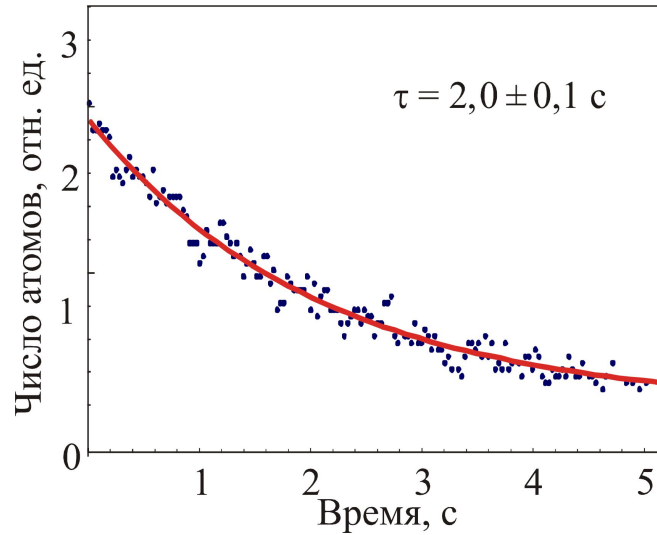


Рисунок 6 — Зависимость числа атомов в ловушке от времени после выключения притока атомов. Синие точки — экспериментальные данные, красная кривая — аппроксимация экспоненциальной зависимостью. Время жизни составило  $2,0 \pm 0,1$  с.

полученных температурах число атомов равно  $2 \times 10^6$ . Таким образом, осуществлен перезахватыв атомы из первичной МОЛ с эффективностью, близкой к 100%, в широком диапазоне параметров.

Максимальные концентрация и фазовая плотность достигают значений  $5 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$  и  $10^{-5}$ , соответственно, при параметрах  $\delta = -0,6\gamma$  и  $s = 0,3$ , которые являются оптимальными для перезагрузки в оптическую дипольную ловушку. При указанных параметрах температура составляет  $25 \pm 5$  мкК и  $20 \pm 4$  мкК вдоль и поперек  $\vec{g}$ , соответственно. При минимальных полученных температурах концентрация равна  $10^{10} \text{ см}^{-3}$ , фазовая плотность — порядка  $10^{-6}$ .

В п. 4.2.7 рассмотрено поведение облака атомов при взаимодействии с излучением, имеющим положительную отстройку, то есть противоположную по знаку по сравнению со случаем лазерного охлаждения. В этом случае атомы формируют так называемые кристаллы в импульсном пространстве, то есть образуют скоростные группы, что проявляется в пространственном разделении облака на 8 отдельных фрагментов, расположенных в вершинах куба. Для наблюдения таких кристаллов атомы тулия захватывались в первичную МОЛ

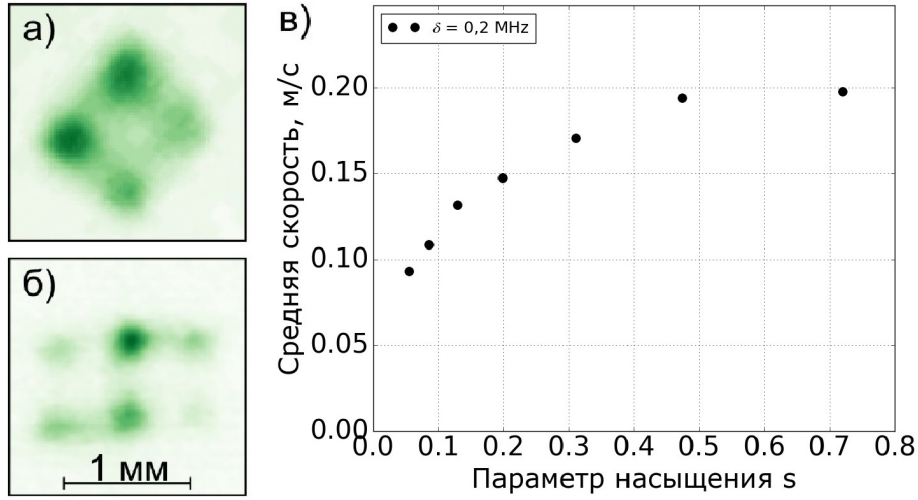


Рисунок 7 — Формирование кристаллов в импульсном пространстве. (а) — вид сверху через 2 мс после выключения охлаждающего излучения первичной МОЛ, (б) — вид сбоку в горизонтальной плоскости под углом  $45^\circ$  к охлаждающим пучкам, (в) — зависимость средней за 3 мс скорости группы от параметра насыщения при отстройке  $\delta = 0,2 \text{ МГц}$ .

и облучались зеленым излучением с положительной отстройкой. На рис. 7(а, б) показаны фотографии облака, сделанные через 2 мс после выключения синего излучения, а на рис. 7(в) приведена зависимость средней за 3 мс скорости группы от параметра насыщения при отстройке  $\delta = 0,2 \text{ МГц}$ .

### III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В **Заключении** диссертационной работы приведены основные научные результаты диссертации:

1. Измерено сверхтонкое расщепление верхнего уровня  $4f^{12}(^3H_6)5d_{5/2}6s^2$  ( $J' = 9/2$ ) охлаждающего перехода, которое составило  $-2110,56 \pm 0,16 \text{ МГц}$ , что соответствует константе  $A_J = -422,112 \pm 0,032 \text{ МГц}$ . Точность измерения повышена более, чем на порядок в сравнении с работой [25].
2. Осуществлено вторичное лазерное охлаждение атомов тулия на слабом переходе  $4f^{13}(^2F^o)6s^2$  ( $J = 7/2, F = 4$ )  $\rightarrow$   $4f^{12}(^3H_6)5d_{5/2}6s^2$  ( $J' = 9/2, F' = 5$ ). Стартуя с температуры 80 мкК в первичной магнито-оптической ловушке минимальные достигнутые температуры составили

$16 \pm 3$  мкК и  $8 \pm 2$  мкК по вертикальной (вдоль направления силы тяжести  $\vec{g}$ ) и горизонтальной (поперек  $\vec{g}$ ) осям, соответственно, при числе атомов на уровне  $10^6$ . Максимальная концентрация составила  $5 \times 10^{11}$  см $^{-3}$ . Наблюдается качественное соответствие измеренных данных и теоретических предсказаний зависимости температуры облака от параметра насыщения и отстройки.

3. В эксперименте наблюдались следующие особенности охлаждения атомов тулия на узком переходе:

- Равновесное положение облака в пространстве зависит от параметров охлаждающего излучения из-за влияния силы тяжести. При увеличении отстройки вертикальное положение меняется с коэффициентом  $dz_0/d\delta = 875 \pm 5$  мкм/МГц.
- В режиме больших отстроек температура не зависит от отстройки за счет зеемановского сдвига, индуцированного смещением облака в поле силы тяжести.
- При положительной отстройке охлаждающего излучения формируются кристаллы в импульсном пространстве, что проявляется в разделении облака на отдельные фрагменты, расположенные в вершинах куба.

## ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Научные журналы, входящие в базу данных *Web of Science*:

1. G. A. Vishnyakova, E. S. Kalganova, D. D. Sukachev, S. A. Fedorov, A. V. Sokolov, A. V. Akimov, N. N. Kolachevsky, V. N. Sorokin / Two-stage laser cooling and optical trapping of thulium atoms // *Laser Physics*. — 2014. — Vol. 24, № 7. — p. 074018.
2. Д. Д. Сукачѐв, Е. С. Калганова, А. В. Соколов, С. А. Фѐдоров, Г. А. Вишнякова, А. В. Акимов, Н. Н. Колачевский, В. Н. Сорокин / Вторичное лазерное охлаждение и удержание в ловушках атомов тулия // *Квантовая электроника*. — 2014. — Т. 44, № 6. — с. 515–520.
3. S. A. Fedorov, G. A. Vishnyakova, E. S. Kalganova, D. D. Sukachev, A. A. Golovizin, D. O. Tregubov, K. Yu. Khabarova, A. V. Akimov, N. N. Kolachevsky, V. N. Sorokin / Improved measurement of the hyperfine structure of the laser cooling level  $4f^{12}(^3H_6)5d_{5/2}6s^2$  ( $J' = 9/2$ ) in  $^{169}\text{Tm}$  // *Applied Physics B*. — 2015. — Vol. 121, № 3. — p. 275–282.
4. Г. А. Вишнякова, А. А. Головизин, Е. С. Калганова, В. Н. Сорокин, Д. Д. Сукачѐв, Д. О. Трегубов, К. Ю. Хабарова, Н. Н. Колачевский / Ультрахолодные лантаноиды: от оптических часов до квантовых симуляторов // *Успехи физических наук*. — 2016. — Т. 186, № 2. — с. 176–182.

### Тезисы докладов в сборниках трудов конференций:

1. G. Vishnyakova, D. Sukachev, E. Kalganova, A. Savchenkov, A. Sokolov, A. Akimov, N. Kolachevsky, V. Sorokin / Second Stage Laser Cooling and Optical Trapping of  $^{169}\text{Tm}$  Atoms // ICONO/LAT:2013, The International Conference on Coherent and Nonlinear Optics and The Lasers, Applications and Technologies Conference, Technical Digest on CD-ROM, ICONO-03 Quantum and Atom Optics — Moscow. — 2013.
2. G. Vishnyakova, D. Sukachev, E. Kalganova, A. Savchenkov, A. Sokolov, A. Akimov, N. Kolachevsky, V. Sorokin / Second Stage Laser Cooling and

- Optical Trapping of Tm Atoms // ICQT-2013, Second International Conference on Quantum Technologies, Program. — Moscow. — 2013. — p. 102.
3. G. Vishnyakova, D. Sukachev, E. Kalganova, A. Savchenkov, A. Sokolov, A. Akimov, N. Kolachevsky, V. Sorokin / Laser cooling on the weak transition and trapping in an optical dipole trap of Tm atoms // MPLP-2013, The VI International Symposium “Modern Problems of Laser Physics”, Technical Digest. — Novosibirsk. — 2013. — p. 189–190.
  4. Г. А. Вишнякова, Е. С. Калганова, С. А. Фёдоров, А. А. Головизин, Д. О. Трегубов, Д. Д. Сукачѐв, А. В. Акимов, Н. Н. Колачевский, В. Н. Сорокин / Магнито-оптическая и оптическая дипольная ловушки для атомов тулия // XV Школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики», Сб. тр. — М.: ФИАН. — 2014. — с. 82–83.
  5. Г. Вишнякова, Е. Калганова, А. Головизин, Д. Сукачѐв, Д. Трегубов, А. Акимов, Н. Колачевский, К. Хабарова, В. Сорокин / Лазерное охлаждение атомов тулия на узком переходе // VI Всероссийская молодежная конференция по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики, Сб. тр. — М.: ФИАН. — 2015. — с. 49.
  6. Г. А. Вишнякова / Лазерное охлаждения атомов тулия на узком переходе  $4f^{13}(^2F^o)6s^2 \rightarrow 4f^{12}(^3H_6)5d_{5/2}6s^2$  с длиной волны 530,7 нм и шириной линии 350 кГц // 58-ая научная конференция МФТИ с международным участием, Труды на сайте <http://conf58.mipt.ru>, Факультет общей и прикладной физики. — Москва. — 2015.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, ЦИТИРУЕМОЙ В АВТОРЕФЕРАТЕ

- [1] *Phillips, W. D.* Nobel lecture: Laser cooling and trapping of neutral atoms / W. D. Phillips // *Rev. Mod. Phys.* — 1998. — Jul. — Vol. 70. — P. 721–741.
- [2] *Anderson, M. H.* Observation of Bose-Einstein condensation in a dilute atomic vapor / M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Matthews [et al.] // *Science.* — 1995. — Vol. 269, № 5221. — P. 198–201.
- [3] *DeMarco, B.* Onset of Fermi degeneracy in a trapped atomic gas / B. DeMarco, D. S. Jin // *Science.* — 1999. — Vol. 285, № 5434. — P. 1703–1706.
- [4] *Риле, Ф.* Стандарты частоты. Принципы и приложения / Ф. Риле. — М. : Физматлит, 2009. — 512 с.
- [5] *Clairon, A.* Ramsey resonance in a Zacharias fountain / A. Clairon, C. Salomon, S. Guellati, W. D. Phillips // *EPL (Europhysics Letters).* — 1991. — Vol. 16, № 2. — P. 165.
- [6] *Chou, C. W.* Frequency comparison of two high-accuracy Al<sup>+</sup> optical clocks / C. W. Chou, D. B. Hume, J. C. J. Koelemeij [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* — 2010. — Feb. — Vol. 104. — P. 070802.
- [7] *Bloom, B. J.* An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10<sup>-18</sup> level / B. J. Bloom, T. L. Nicholson, J. R. Williams [et al.] // *Nature.* — 2014. — Feb. — Vol. 506, № 7486. — P. 71–75.
- [8] *Hinkley, N.* An atomic clock with 10<sup>-18</sup> instability / N. Hinkley, J. A. Sherman, N. B. Phillips [et al.] // *Science.* — 2013. — Vol. 341, № 6151. — P. 1215–1218.
- [9] *Peters, A.* Measurement of gravitational acceleration by dropping atoms / A. Peters, K. Y. Chung, S. Chu // *Nature.* — 1999. — Vol. 400, № 6747. — P. 849–852.
- [10] *Weiner, J.* Experiments and theory in cold and ultracold collisions / J. Weiner, V. S. Bagnato, S. Zilio, P. S. Julienne // *Rev. Mod. Phys.* — 1999. — Jan. — Vol. 71. — P. 1–85.



- [11] *Köhler, T.* Production of cold molecules via magnetically tunable Feshbach resonances / T. Köhler, K. Góral, P. S. Julienne // *Rev. Mod. Phys.* — 2006. — Vol. 78. — P. 1311–1361.
- [12] *Bloch, I.* Many-body physics with ultracold gases / I. Bloch, J. Dalibard, W. Zwerger // *Rev. Mod. Phys.* — 2008. — Jul. — Vol. 80. — P. 885–964.
- [13] *Jaksch, D.* Fast quantum gates for neutral atoms / D. Jaksch, J. I. Cirac, P. Zoller [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* — 2000. — Sep. — Vol. 85. — P. 2208–2211.
- [14] *Zhu, M.* Improved hyperfine measurements of the Na 5p excited state through frequency-controlled Dopplerless spectroscopy in a Zeeman magneto-optic laser trap / M. Zhu, C. W. Oates, J. L. Hall // *Opt. Lett.* — 1993. — Jul. — Vol. 18, № 14. — P. 1186–1188.
- [15] *Колачевский, Н. Н.* Прецизионная лазерная спектроскопия холодных атомов и поиск дрейфа постоянной тонкой структуры / Н. Н. Колачевский // *Усп. физ. наук.* — 2008. — Vol. 178, № 11. — P. 1225–1235.
- [16] *Romalis, M. V.* New limit on the permanent electric dipole moment of  $^{199}\text{Hg}$  / M. V. Romalis, W. C. Griffith, J. P. Jacobs, E. N. Fortson // *Phys. Rev. Lett.* — 2001. — Mar. — Vol. 86. — P. 2505–2508.
- [17] *Колачевский, Н. Н.* Лазерное охлаждение редкоземельных атомов и прецизионные измерения / Н. Н. Колачевский // *Усп. физ. наук.* — 2011. — Vol. 181, № 8. — P. 896–903.
- [18] *Petrov, A.* Anisotropy-induced Feshbach resonances in a quantum dipolar gas of highly magnetic atoms / A. Petrov, E. Tiesinga, S. Kotochigova // *Phys. Rev. Lett.* — 2012. — Sep. — Vol. 109. — P. 103002.
- [19] *Chin, C.* Feshbach resonances in ultracold gases / C. Chin, R. Grimm, P. Julienne, E. Tiesinga // *Rev. Mod. Phys.* — 2010. — Apr. — Vol. 82. — P. 1225–1286.
- [20] *Frisch, A.* Quantum chaos in ultracold collisions of gas-phase erbium atoms / A. Frisch, M. Mark, K. Aikawa [et al.] // *Nature.* — 2014. — Mar. — Vol.

507. — P. 475–479.

- [21] *Lu, M.* Strongly dipolar Bose-Einstein condensate of dysprosium / M. Lu, N. Q. Burdick, S. H. Youn, B. L. Lev // *Phys. Rev. Lett.* — 2011. — Oct. — Vol. 107. — P. 190401.
- [22] *Aikawa, K.* Reaching Fermi degeneracy via universal dipolar scattering / K. Aikawa, A. Frisch, M. Mark [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* — 2014. — Jan. — Vol. 112. — P. 010404.
- [23] *Sukachev, D.* Magneto-optical trap for thulium atoms / D. Sukachev, A. Sokolov, K. Chebakov [et al.] // *Phys. Rev. A.* — 2010. — Vol. 82. — P. 011405.
- [24] *Katori, H.* Optical lattice clocks and quantum metrology / H. Katori // *Nature Photonics.* — 2011. — Apr. — Vol. 5. — P. 203–210.
- [25] *Kuhl, J.* Hyperfeinstrukturuntersuchungen mit einem sphärischen Fabry-Perot-interferometer mit internem absorptionsatomstrahl im Tm I- und Eu I-spektrum / J. Kuhl // *Z. Phys.* — 1971. — Nov. — Vol. 242. — P. 66–85.

Подписано в печать 12.01.2017

Формат 60x84/16. Заказ № 1. Тираж 60 экз. П. л. 1,75

Отпечатано в РИИС ФИАН с оригинал-макета заказчика  
119991 Москва, Ленинский проспект, 53. Тел. 499 783 3640