

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

На правах рукописи

Федорова Елена Сергеевна

**Исследование ультрахолодных атомов тулия в оптической решетке
вблизи магической длины волны**

Специальность 01.04.21 — Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2019

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

Научный руководитель:

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

Официальные оппоненты:

Пальчиков Виталий Геннадьевич, доктор физико-математических наук, доцент, 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);

Турлапов Андрей Вадимович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, доцент, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией ультрахолодных квантовых систем Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН)

Ведущая организация:

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

Защита состоится «14» октября 2019 г. в 11.00 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

Автореферат разослан «___» июля 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.023.03

доктор физико-математических наук

А. С. Золотько

I. Общая характеристика работы

Диссертация посвящена изучению особенностей работы магнито-оптической ловушки (МОЛ) на спектрально-узком охлаждающем переходе и исследованию свойств атомов тулия в оптической решетке на длине волны вблизи 814.5 нм.

Актуальность проблемы

Развитие методов управления внешними и внутренними степенями свободы атомов и ионов, в том числе методов лазерного охлаждения [1, 2], оптической накачки [3], захвата в магнито-оптические [4] и дипольные ловушки [5], сделали возможным их использование в широком ряде задач, таких как создание стандартов частоты [6], гравиметров [7], оптических гироскопов [8], магнитометров [9], квантовых вычислителей [10] и пр. [11, 12]. Одним из активно развивающихся направлений, связанных с использованием ультрахолодных атомов и ионов, является создание стандартов частоты в оптическом диапазоне. Наиболее заметные результаты были получены в оптических часах с использованием ультрахолодных атомов стронция [13], атомов иттербия [14], иона алюминия [15] и иона иттербия [16]. По своим характеристикам, а именно по относительной нестабильности и систематической погрешности частоты, перечисленные оптические часы уже на два порядка превосходят лучшие микроволновые стандарты.

Высокая точность измерения частоты, которая достигается с помощью оптических часов, позволяет использовать их в фундаментальных задачах, например для измерения гравитационных сдвигов [17] и проверки Лоренц-инвариантности [18]. Исследование зависимости частоты часового перехода от времени позволяет наложить ограничения на дрейф фундаментальных констант [19], а создание распределенной сети оптических часов открывает возможности по поиску темной материи [20]. Для решения некоторых задач, например для измерения геопотенциала и построения точного геоида, стационарных оптических часов недостаточно, и возникает потребность в транспортируемых

системах. В настоящий момент уже продемонстрирована работа транспортируемых часов на основе атомов стронция [21] и на основе одиночного иона кальция [22]. Также ведется разработка транспортируемых оптических часов на основе одиночных ионов алюминия, стронция и иттербия [23]. При создании транспортируемых часов одним из существенных источников неточности становится сдвиг, вызванный тепловым излучением окружающей среды, поскольку применение криогенных технологий в этом случае оказывается затруднено. В связи с этим в мире ведется поиск новых часовых переходов в атомах и ионах, которые обладали бы низкой чувствительностью к статическим электрическим полям.

Слабой чувствительностью к тепловому излучению обладают переходы, происходящие в рамках одной электронной оболочки, например переходы внутри $4f$ -оболочки в многозарядных ионах [24] и лантаноидах [25, 26]. Кроме того, в лантаноидах за счет особенностей строения атомных оболочек возникает экранировка внутриоболочечных переходов, которая широко используется для создания на основе ионов лантаноидов лазеров и усилителей [27], в экспериментах по разработке твердотельной квантовой памяти [28] и при создании различных маркеров и сенсоров [29]. Внутриоболочечный переход на длине волны 1.14 мкм в атоме тулия, лантаноида с одной вакансией на внутренней $4f$ -оболочке, обладает низкой чувствительностью к статическим электрическим полям, малой естественной шириной (1.2 Гц) и является перспективным часовым переходом.

В ФИАНе ведется разработка репера частоты в оптическом диапазоне на основе атомов тулия, и по оценкам, достижимая относительная неточность такой системы может составлять 5×10^{-18} [26]. В 2010 году было впервые продемонстрировано лазерное охлаждение и захват атомов тулия в магнито-оптическую ловушку (МОЛ) [30]. В 2014 году было реализовано глубокое двухступенчатое охлаждение атомов тулия в МОЛ и их загрузка в дипольную ловушку на длине волны 532 нм [31]. В 2015 году впервые продемонстрировано прямое лазерное возбуждение внутриоболочечного перехода на длине волны 1.14 мкм в атомах тулия [32]. Лазерному охлаждению атомов тулия посвящены

диссертационные работы Сукачева Д.Д. [33] и Вишняковой Г.А. [34], спектроскопия часового перехода в атомах тулия описана в диссертационной работе Головизина А.А. [35].

Создание репера частоты требует контроля всех возможных источников уширений и сдвигов спектральной линии часового перехода. Одними из основных таких источников являются эффект Доплера первого порядка и эффект отдачи, которые в современных оптических часах подавляются за счет локализации атомов и ионов в пространстве на размерах меньше длины волны возбуждающего излучения (эффект Лэмба-Дике [36]). Необходимая степень локализации может быть достигнута с помощью захвата атомов в оптическую решетку [37], но при этом возникает необходимость контролировать вызванные излучением решетки сдвиги частоты часового перехода. Решением является использование для формирования оптической решетки излучения на так называемой магической длине волны (МДВ), то есть на такой длине волны, для которой сдвиги верхнего и нижнего уровней часового перехода совпадают [38].

Для часового перехода в атомах тулия положение магической длины волны оптической решетки было предсказано теоретически в диапазоне 806–815 нм [26]. Следующим необходимым шагом по созданию репера частоты на основе атомов тулия является ее экспериментальный поиск. Для этого требуется эффективный захват атомов в оптическую решетку с перестраиваемой длиной волны и глубиной, превышающей температуру атомов в несколько раз, а также исключение ряда уширений и сдвигов путем возбуждения перехода между центральными магнитными подуровнями часового перехода. Решению перечисленных вопросов – подготовке ультрахолодного ансамбля атомов тулия в оптической решетке для прецизионной спектроскопии вблизи магической длины волны – посвящена настоящая диссертационная работа.

Цели и задачи работы

Цель работы заключалась в загрузке с максимальной эффективностью ультрахолодных атомов тулия из магнито-оптической ловушки (МОЛ) в одномерную оптическую решетку на длине волны, близкой к магической, значение которой ожидается в районе 814 нм, и их подготовке в состоянии с заданной проекцией полного момента. В рамках работы решались следующие задачи:

1. Исследовать режимы работы МОЛ с целью оптимизации ее параметров для повышения доли атомов, захватываемых в одномерную оптическую решетку на длине волны, близкой к магической. Реализовать суб-доплеровское охлаждение атомов тулия на узком охлаждающем переходе ($\lambda = 530.7$ нм, $\gamma = 350$ кГц).
2. Увеличить глубину удерживающего потенциала оптической решетки на длине волны, близкой к магической, и стабилизировать пространственный профиль потенциала с помощью резонатора.
3. Измерить динамическую поляризуемость основного состояния атомов тулия на длине волны 814.5 нм и охарактеризовать удерживающий потенциал оптической решетки.
4. Реализовать оптическую накачку атомов тулия на центральный ($m_F = 0$) магнитный подуровень основного состояния.

Научная новизна

1. Впервые наблюдался двухтемпературный режим работы МОЛ на спектрально узком охлаждающем переходе ($\lambda = 530.7$ нм, $\gamma = 350$ кГц), вызванный конкуренцией доплеровского и суб-доплеровского механизмов охлаждения. Ранее суб-доплеровский механизм охлаждения лантаноидов в МОЛ на спектрально узких охлаждающих переходах не наблюдался, несмотря на близкие g -факторы Ланде задействованных уровней.
2. Экспериментально подтверждена справедливость теоретического подхода к описанию лазерного охлаждения атомов в МОЛ, учитывающего магнитное поле и эффект отдачи [39]. В том числе продемонстрировано убывание

температуры облака атомов в МОЛ с ростом интенсивности охлаждающего излучения.

3. В МОЛ на спектрально узком охлаждающем переходе ($\lambda = 530.7$ нм, $\gamma = 350$ кГц) продемонстрирована естественная оптическая накачка атомов тулия на крайний магнитный подуровень. Она обусловлена преимущественным взаимодействием облака атомов с вертикальным охлаждающим пучком в режиме низкого насыщения, когда положение равновесия облака атомов смещено вниз под действием силы тяжести.
4. С помощью линейно-поляризованного излучения, связывающего уровни с одинаковым значением полного момента, реализована оптическая накачка атомов тулия, удерживаемых в оптической решетке, на центральный магнитный подуровень.
5. Исследована деполяризация состояния с нулевой проекцией полного момента для атомов тулия в одномерной оптической решетке в присутствии магнитного поля.
6. По спектру частот параметрических резонансов атомов в оптической решетке определена динамическая поляризуемость основного состояния атомов тулия на длине волны 814.5 нм, равная 146 ± 44 а.е.

Практическая ценность

Загрузка атомов тулия в оптическую решетку на длине волны вблизи магической и подготовка их в состоянии с нулевой проекцией полного момента ($m_F = 0$) являются необходимыми шагами на пути к созданию оптического репера частоты на основе внутриоболочечного перехода с длиной волны 1.14 мкм в атомах тулия.

В рамках исследования режимов работы МОЛ на спектрально-узком охлаждающем переходе была экспериментально подтверждена справедливость теоретической модели описания динамики атомов в МОЛ, включающей эффекты отдачи и влияние магнитного поля [39].

Защищаемые положения

1. Для охлаждающего перехода в атоме тулия на длине волны 530.7 нм с естественной шириной 350 кГц при параметрах насыщения охлаждающего излучения $1.2 \times 10^{-2} < S < 0.6$ в МОЛ наблюдается двухтемпературный режим работы, обусловленный конкуренцией доплеровского и суб-доплеровского механизмов охлаждения.
2. В условиях эксперимента удалось увеличить глубину удерживающего потенциала для атомов тулия в пучностях одномерной оптической решетки с длиной волны $\lambda = 814.5$ нм до $U/k_B = 40$ мК с помощью резонатора. В этих условиях доля атомов, перезахватываемых из МОЛ в оптическую решетку, составила 60%. Измерена поляризуемость основного состояния атома тулия на длине волны 814.5 нм, которая составила 146 ± 44 а.е.
3. При возбуждении перехода между состояниями атома тулия с одинаковым полным моментом $F = F' = 4$ линейно-поляризованным излучением на длине волны 530.7 нм реализована оптическая накачка на центральный магнитный подуровень основного состояния ($m_F = 0$), при этом относительная населенность этого подуровня составила $\eta = 80\%$.
4. Населенность центрального магнитного подуровня атомов тулия в одномерной оптической решетке убывает за 1.2 с на 20% при концентрации атомов 10^{11} см⁻³ в однородном магнитном поле $B = 0.45$ Гс.

Личный вклад автора

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

Сведения об апробации результатов работы

Результаты работы докладывались автором на 5 международных и 1 российской научных конференциях: 13th European Conference on Atoms Molecules and Photons (ECAMP13), 8-12 апреля 2019 г., Флоренция, Италия; 4th Russian-German-French Laser Symposium, 23-27 апреля 2018 г., Казань, Россия; Физика

ультрахолодных атомов, 18-20 декабря 2017 г., Новосибирск, Россия; 651 WE-Heraeus-Seminar: Longrange interactions, 25-27 октября 2017 г., Бад Хоннеф, Германия; IV International Conference on Quantum Technologies (ICQT), 12-16 июля 2017 г., Москва, Россия; Third International Conference on Quantum Technologies (ICQT), 13-17 июля 2015 г., Москва, Россия; Всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2019), 15-19 апреля 2019 г., Санкт-Петербург, Россия.

Основные результаты работы опубликованы в трех статьях в рецензируемых научных журналах, входящих в базу данных *Web of Science*, а также в трудах конференций, ссылки на которые приведены на стр. 18.

II. Содержание работы

Во **Введении** приведено обоснование актуальности проводимых в рамках диссертационной работы исследований, в том числе краткий обзор использования ультрахолодных атомов и ионов в оптических реперах частоты. Сформулированы цель исследования, научная новизна и практическая значимость работы.

В **Главе 1** приведен обзор полученных ранее результатов по лазерному охлаждению атомов тулия и спектроскопии часового перехода. Формулируются задачи, решение которых необходимо для создания оптического репера частоты на основе атомов тулия и которым посвящена представленная работа. В п. 1.1 рассмотрены используемые для лазерного охлаждения атомов тулия переходы и описана работа первичной и вторичной МОЛ. В п. 1.2 обсуждается необходимость использования оптической решетки на магической длине волны для удержания атомов и возбуждения компоненты $m_F = 0 \rightarrow m'_F = 0$ часового перехода для подавления ряда источников сдвигов частоты.

В **Главе 2** рассмотрены особенности лазерного охлаждения на спектрально-узком переходе на примере вторичного охлаждающего перехода в атомах тулия с естественной шириной $\gamma = 350$ кГц. В частности, обсуждаются влияние на работу МОЛ силы тяжести и суб-доплеровского механизма

охлаждения.

В п. 2.1 рассматриваются доплеровский и суб-доплеровский механизмы лазерного охлаждения, а также принципы квазиклассического подхода к их описанию. В п. 2.2 описан механизм захвата и удержания атомов в МОЛ.

В п. 2.3 обсуждается специфика работы МОЛ на спектрально-узком охлаждающем переходе. В п. 2.3.1 рассматривается влияние силы тяжести на работу МОЛ и вводится граничное значение параметра насыщения $S_{b1} = 1/(\hbar k \Gamma / 2mg - 1)$, которое определяется из равенства силы светового давления и силы тяжести. При малых значениях параметра насыщения $S < S_{b1}$ равновесное положение облака атомов в МОЛ под действием силы тяжести смещается вниз в область ненулевого магнитного поля и приобретает характерную чечевичную форму (рис. 1а). В п. 2.3.2 обсуждаются условия работы суб-доплеровского механизма охлаждения. Вводится граничное значение параметра насыщения $S_{b2} = \hbar k^2 / 2m\Gamma$, определяемое из равенства ширины суб-доплеровского резонанса охлаждения в импульсном пространстве и импульса отдачи. При значениях параметра насыщения больше граничного $S > S_{b2}$ атомы испытывают суб-доплеровское охлаждение.

Естественная ширина вторичного охлаждающего перехода в атоме тулия $\gamma = 350$ кГц позволяет наблюдать три режима работы МОЛ в зависимости от величины параметра насыщения: (а) чечевичный режим при $S < S_{b1} = 0.002$, (б) доплеровский режим при $S_{b1} < S < S_{b2} = 0.01$ и (в) двухтемпературный режим при $S > S_{b2}$. Экспериментальное исследование перечисленных режимов описано в п. 2.4.

В п. 2.4.1 обсуждается чечевичный режим. Исследованы зависимости равновесного положения облака атомов и его температуры от параметра насыщения, а также продемонстрирована оптическая накачка атомов на крайний магнитный подуровень, возникающая в МОЛ за счет преимущественного взаимодействия с направленным вверх охлаждающим пучком. На рис. 2а приведены результаты эксперимента Штерна-Герлаха при двух значениях параметра насыщения, соответствующих чечевичному ($S = 0.001$) и двухтемпературному ($S = 0.02$) режимам. Из формы разлетающегося в присутствии градиента

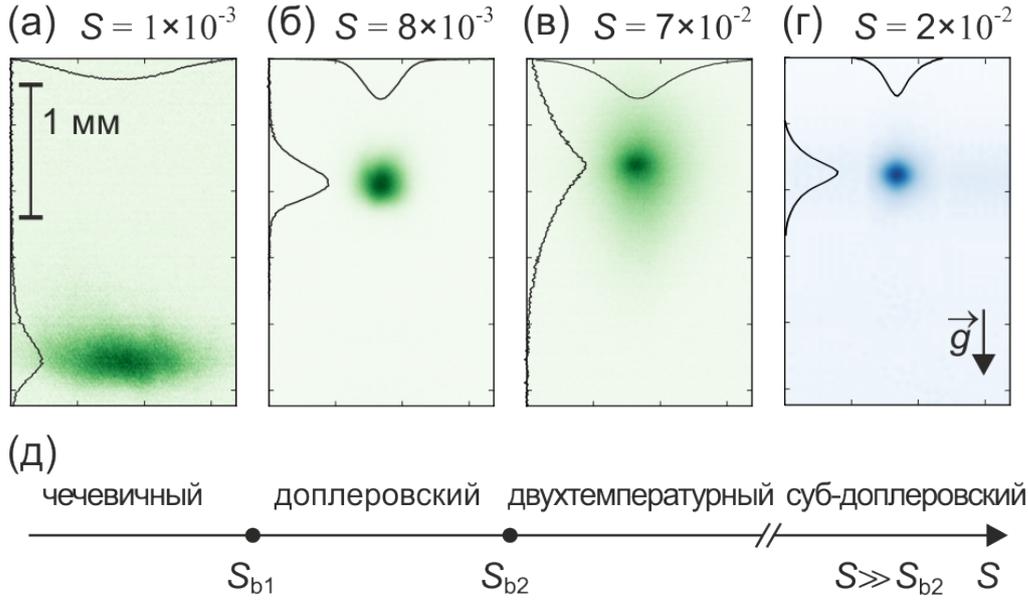


Рисунок 1 — а)-в) Характерные пространственный профиль плотности облака атомов для различных режимов работы МОЛ, работающей на узком охлаждающем переходе: а) чечевичный режим $S < S_{b1}$, б) доплеровский режим $S_{b1} < S < S_{b2}$, в) двухтемпературный режим $S > S_{b2}$. г) Характерные пространственный профиль плотности облака атомов в МОЛ, работающей на широком охлаждающем переходе, в режиме суб-доплеровского охлаждения. д) Режимы работы в зависимости от параметра насыщения S . Граничные значения параметра насыщения $S_{b1} = 2 \times 10^{-3}$, $S_{b2} = 10^{-2}$ для МОЛ, работающей на узком охлаждающем переходе (а-в); $S_{b1} = 5 \times 10^{-5}$, $S_{b2} = 7 \times 10^{-4}$ для МОЛ, работающей на широком охлаждающем переходе в атомах тулия (г). Вектор \vec{g} показывает направление силы тяжести.

магнитного поля облака видно, что в чечевичном режиме атомы в МОЛ находятся преимущественно на нижнем магнитном подуровне, в то время как в двухтемпературном режиме магнитные подуровни заселены практически равномерно.

П. 2.4.2 посвящен двухтемпературному режиму работы МОЛ. Для параметров насыщения, несущественно превышающих критическое значение S_{b2} , суб-доплеровское охлаждение действует с ограниченной эффективностью, что приводит к конкуренции доплеровского и суб-доплеровского механизмов охлаждения. В результате стационарное импульсное распределение приближенно описывается суммой двух максвелловских распределений с температурами, со-

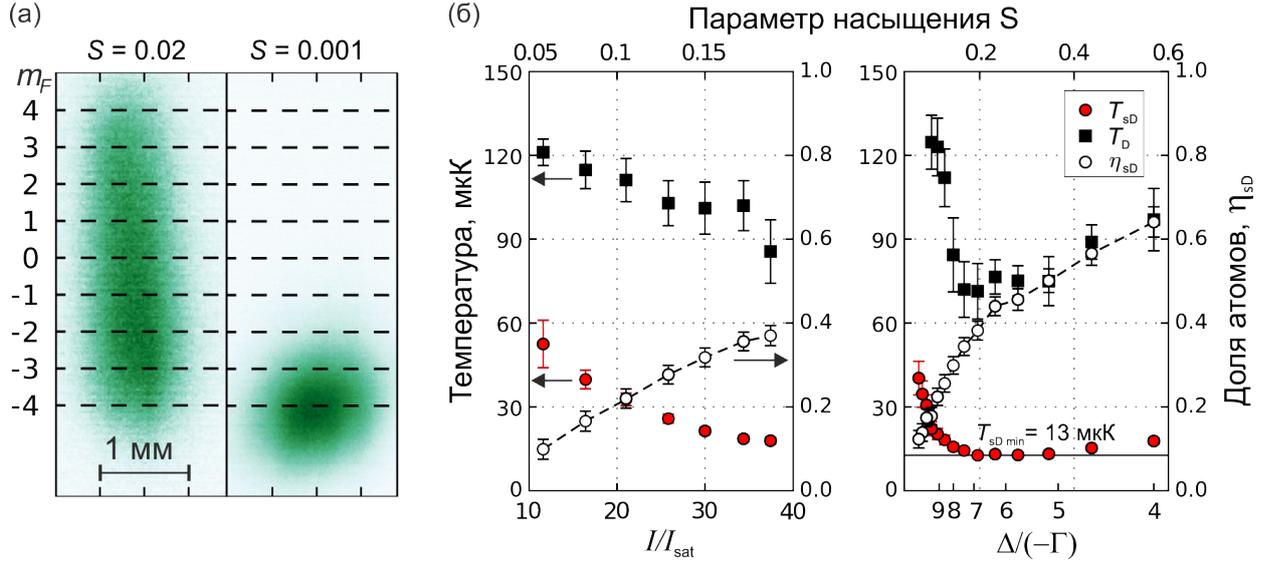


Рисунок 2 — а) Облако атомов спустя 6 мс разлета в эксперименте Штерна-Герлаха, выполненном при двух значениях параметра насыщения $S = 0.02$ (двухтемпературный режим, слева) и $S = 0.001$ (чечевичный режим, справа). В первом случае населенность атомов равномерно распределена по магнитным подуровням, в то время как во втором преимущественно населен крайний подуровень с $m_F = -4$. б) Зависимость температуры атомов в доплеровской и суб-доплеровской фракциях, а также доли атомов в суб-доплеровской фракции от интенсивности (в единицах интенсивности насыщения I_{sat}) и отстройки (в единицах естественной ширины Γ) охлаждающего излучения. Температура подансамблей и доля атомов определяются величиной параметра насыщения и ведут себя одинаково при соответствующих изменениях интенсивности и отстройки охлаждающего излучения.

ответствующими доплеровскому и суб-доплеровскому механизмам охлаждения. Двухкомпонентное распределение в импульсном пространстве в сочетании с гармоническим видом удерживающего потенциала приводит к двухкомпонентному профилю плотности облака атомов (рис. 1в). Центральная часть облака обладает меньшей температурой, являющейся результатом суб-доплеровского охлаждения, в то время как окружающее гало состоит из более горячих атомов. Зависимость температуры подансамблей и доли атомов в суб-доплеровской фракции от интенсивности и отстройки охлаждающего излучения приведены на рис. 2б. Минимальная достигнутая температура суб-доплеровского подансамбля составила $T = 13$ мК.

В п. 2.4.3 обсуждаются доплеровский и суб-доплеровский режимы работы

МОЛ. В промежуточном доплеровском режиме $S_{b1} < S < S_{b2}$ (рис. 1б) ни сила тяжести, ни суб-доплеровский механизм охлаждения практически не влияют на работу МОЛ. Суб-доплеровский режим $S \gg S_{b2}$, реализующийся в первичной МОЛ для атомов тулия (рис. 1г), для вторичного охлаждающего перехода в атоме тулия не был достигнут.

В п. 2.5 перечислены значения граничных параметров насыщения S_{b1} и S_{b2} для охлаждающих переходов в Tm, Er, Dy, Ho и Ca и параметры насыщения, используемые в экспериментах по лазерному охлаждению на этих переходах.

Основные представленные в Главе 2 результаты опубликованы в работе [40].

В **Главе 3** описана загрузка атомов в оптическую решетку на длине волны 814.5 нм (п. 3.1) и спектроскопия часового перехода в полученном облаке атомов (п. 3.2).

В п. 3.1.1 обсуждается возникновение удерживающего потенциала оптических дипольных ловушек, в п. 3.1.2 рассматривается оптическая решетка на длине волны 814.5 нм, близкой к магической длине волны для часового перехода в атоме тулия [26].

П. 3.1.3 посвящен описанию усиливающего резонатора, используемого для увеличения глубины удерживающего потенциала оптической решетки. Описана конструкция резонатора, методы его стабилизации, согласование мод и метод измерения интенсивности излучения в области ловушки. Максимальная достигнутая глубина удерживающего потенциала составила в единицах температуры $U/k_B = 40$ мкК, что позволило увеличить долю перезахватываемых из МОЛ атомов с 5% до 60%.

В п. 3.1.4 описано исследование спектра колебательных частот потенциала оптической решетки методом возбуждения параметрических резонансов (рис. 3). Для этого глубина потенциала решетки модулировалась, и определялась зависимость скорости потерь атомов от частоты модуляции. Приведена схема эксперимента и описаны полученные результаты для двух различных глубин оптической решетки. В приближении гармонического потенциала частоты параметрических резонансов выражаются через динамическую поляризуемость основного состояния атомов. Таким образом, из спектра параметрических

колебаний была определена динамическая поляризуемость атома тулия на длине волны 814.5 нм, которая составила $\alpha = 146 \pm 44$ а.е.

В п. 3.2.1 рассматривается влияние потенциала оптической решетки на спектр поглощения атомов. Обсуждается режим спектрально-разрешимых боковых колебательных частот, возникающий в случае, когда колебательные частоты удерживающего потенциала превышают естественную ширину линии перехода. Рассматривается режим Лэмба-Дике, реализующийся при локализации атомов в пространстве на размерах меньше длины волны возбуждающего излучения, в котором подавляются уширение линии часового перехода за счет эффекта Доплера первого порядка и сдвиг за счет эффекта отдачи. В п. 3.2.2 описана процедура возбуждения часового перехода, в п. 3.2.3 приведены результаты спектроскопии часового перехода в атомах тулия в оптической решетке в режиме Лэмба-Дике и в режиме спектрально-разрешимых боковых колебательных частот. Параметр Лэмба-Дике в эксперименте варьировался в диапазоне $\eta = (0.11 \div 0.14)$. Из аппроксимации формы линии боковых частот определены продольные колебательные частоты потенциала решетки и средняя населенность колебательных состояний при глубине потенциала $U/k_B = 29$ мК, равные $\nu_z = 60.5$ кГц и $\bar{n}_z = 1.2$. Из зависимости частоты ν_z от интенсивности излучения в пучностях решетки была определена поляризуемость основного состояния атома тулия на длине волны 814.5 нм, равная $\alpha = 136 \pm 7$ а.е., что согласуется с полученным в п. 3.1.4 значением.

В п. 3.2.4 экспериментально и теоретически рассматривается влияние средней населенности колебательных состояний на дефазировку осцилляций Раби.

Основные представленные в Главе 3 результаты опубликованы в работе [41].

Глава 4 посвящена подготовке атомов тулия в состоянии с нулевой проекцией полного момента ($m_F = 0$) с помощью оптической накачки линейно-поляризованным излучением, связывающим состояния с одинаковым значением полного момента $F = F' = 4$.

В п. 4.1 обсуждаются типы переходов, которые могут быть использованы для оптической накачки атомов тулия.

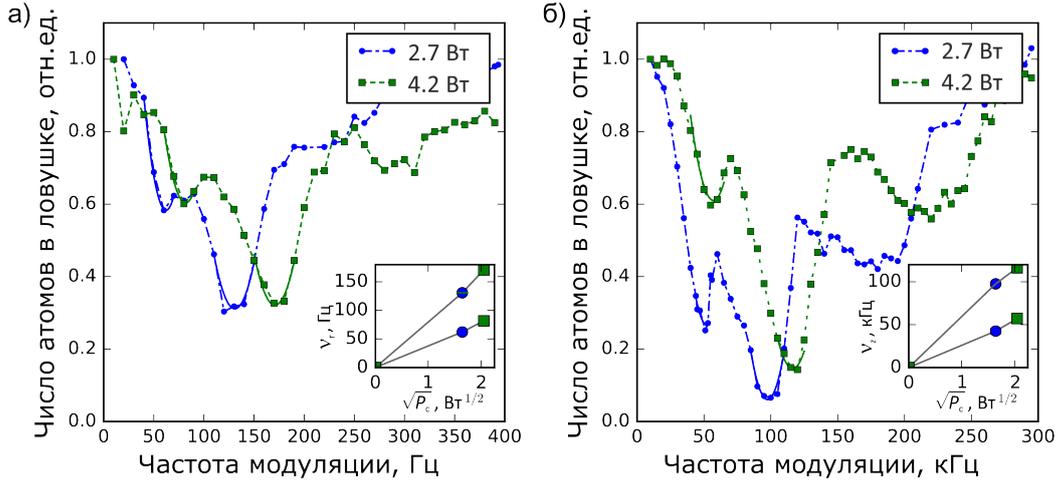


Рисунок 3 — Спектр низкочастотных (а) и высокочастотных (б) параметрических резонансов в оптической решетке на длине волны $\lambda = 814.5$ нм при двух значениях мощности в центре решетки. Резонансные частоты определялись аппроксимацией экспериментальных точек вблизи минимумов полиномами второй степени (сплошные кривые). На врезках показана зависимость резонансных частот от мощности излучения.

В п. 4.2 приведены результаты численного моделирования и экспериментальной реализации оптической накачки на переходе $|J = 7/2, F = 4\rangle \rightarrow |J' = 9/2, F' = 4\rangle$ с длиной волны $\lambda = 530.7$ нм, являющемся одной из сверхтонких компонент вторичного охлаждающего перехода. Такой переход не является циклическим, и атомы из возбужденного состояния с вероятностью 97% распадаются на сверхтонкий подуровень основного состояния с $F = 3$. Для их возврата в цикл накачки используется дополнительное перекачивающее излучение, возбуждающее переход $|J = 7/2, F = 3\rangle \rightarrow |J' = 9/2, F' = 4\rangle$. Максимальная достигнутая степень поляризации составила 80% (рис. 4а).

В п. 4.3 приведены результаты численного моделирования и экспериментальной реализации оптической накачки на переходе $|J = 7/2, F = 4\rangle \rightarrow |J' = 7/2, F' = 4\rangle$ с длиной волны $\lambda = 418.8$ нм, который является практически циклическим (вероятность распада в состояние с $F = 3$ составляет 3%). Достигнутая относительная населенность центрального магнитного подуровня основного состояния составила 41%.

В п. 4.4 исследован вопрос уменьшения со временем населенности цен-

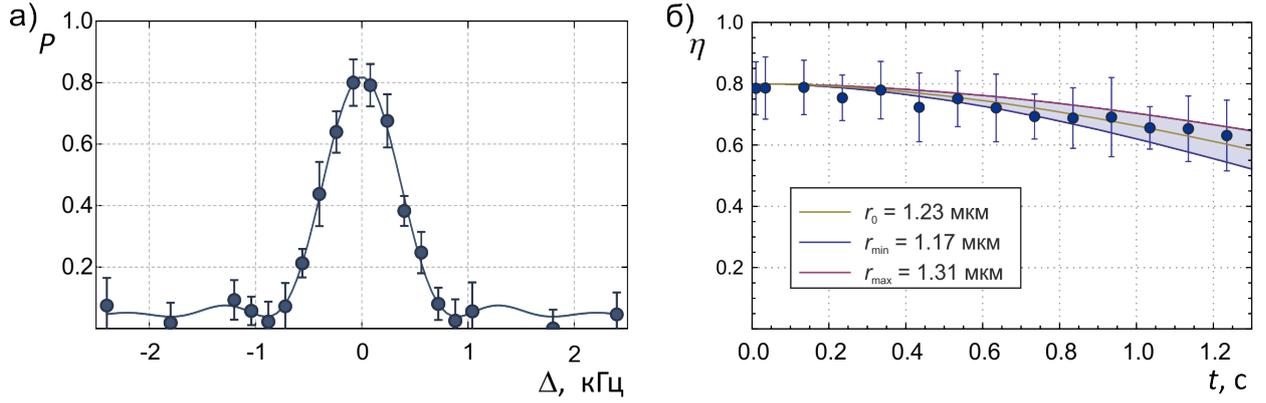


Рисунок 4 — а) Вероятность возбуждения часового перехода в зависимости от отстройки излучения $\lambda = 1.14$ мкм от резонанса. Интенсивность и длительность возбуждающего излучения соответствуют π -импульсу при нулевой отстройке. Вероятность возбуждения в центре резонанса соответствует нахождению 80% атомов на центральном магнитном подуровне с $m_F = 0$. б) Зависимость относительной населенности центрального магнитного подуровня в облаке атомов тулия в одномерной оптической решетке от времени. Точки - экспериментальные данные, кривые - численное решение задачи о магнитном диполь-дипольном взаимодействии для среднего расстояния между атомами $r = 1.17$ мкм (нижняя), $r = 1.23$ мкм (средняя), $r = 1.31$ мкм (верхняя).

центрального магнитного подуровня за счет магнитного диполь-дипольного взаимодействия. Скорость деполяризации атомов в оптической решетке на длине волны 813 нм с концентрацией $n \approx 10^{11}$ см⁻³ в присутствии внешнего магнитного поля $B_0 = 0.45$ Гс была измерена экспериментально, и было показано, что за время 1 с относительная населенность центрального магнитного подуровня уменьшается менее, чем на 20% (рис. 4б). Таким образом, уменьшение населенности центрального магнитного подуровня за счет магнитного диполь-дипольного взаимодействия не накладывает ограничение на длительность возбуждения часового перехода.

Основные представленные в Главе 4 результаты опубликованы в работе [42].

В **Заключении** приведены основные результаты работы, состоящие в следующем:

1. Наблюдались экспериментально и описаны теоретически три различных режима работы МОЛ на спектрально-узком переходе ($\gamma = 350$ кГц) вторичного охлаждения атомов тулия, определяющиеся значением параметра

насыщения охлаждающего излучения: (i) чечевичный при $S < S_{b1} = 0.002$, (ii) доплеровский при $S_{b1} < S < S_{b2} = 0.01$ и (iii) суб-доплеровский при $S > S_{b2}$.

2. Показано, что в чечевичном режиме работы МОЛ за счет преимущественного взаимодействия с одним из охлаждающих пучков происходит оптическая накачка атомов на крайний магнитный подуровень основного состояния.
3. Собран резонатор оптической решетки для атомов тулия, перестраиваемой по длине волны в диапазоне 780 – 855 нм. С его помощью глубина удерживающего потенциала была увеличена до $U/k_B = 40$ мкК. Максимальная эффективность перегрузки атомов из МОЛ в оптическую решетку с усиливающим резонатором составила 60%.
4. Исследован спектр параметрических резонансов атомов тулия в оптической решетке и из него определена динамическая поляризуемость основного состояния атомов тулия на длине волны $\lambda = 814.5$ нм вблизи магической.
5. Проведена спектроскопия часового перехода в оптической решетке в режиме Лэмба-Дике и в режиме спектрально-разрешимых боковых колебательных частот.
6. Реализована оптическая накачка атомов тулия на центральный магнитный подуровень основного состояния линейно-поляризованным излучением на двух переходах $|J = 7/2, F = 4\rangle \rightarrow |J' = 9/2, F' = 4\rangle$ с длиной волны $\lambda = 530.7$ нм и $|J = 7/2, F = 4\rangle \rightarrow |J' = 7/2, F' = 4\rangle$ с длиной волны $\lambda = 418.8$ нм. Максимальная достигнутая степень поляризации составила 80%.
7. Измерена зависимость населенности центрального магнитного подуровня атомов тулия в одномерной оптической решетке на длине волны $\lambda = 813$ нм от времени. Уменьшение населенности не превышает 20% за 1 с. Таким образом, было показано, что магнитное диполь-дипольное взаимодействие практически не ограничивает время опроса часового перехода в атомах тулия и, соответственно, минимальную достижимую ширину линии.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. E. Kalganova, O. Prudnikov, G. Vishnyakova, A. Golovizin, D. Tregubov, D. Sukachev, K. Khabarova, V. Sorokin, N. Kolachevsky / Two-temperature momentum distribution in a thulium magneto-optical trap // *Physical Review A*. – 2017 – Vol. 96, № 3. – P. 033418 1-6
DOI: 10.1103/PhysRevA.96.033418
2. Е. С. Калганова, А. А. Головизин, Д. О. Шевнин, Д. О. Трегубов, К. Ю. Хабарова, В. Н. Сорокин, Н. Н. Колачевский / Захват атомов тулия в оптическую решетку усиливающего резонатора вблизи магической длины волны 814.5 нм // *Квантовая электроника*. – 2018. – Т. 48, № 5. – С. 415-418.
Англ. версия. E. S. Kalganova, A. A. Golovizin, D. O. Shevnin, D. O. Tregubov, K. Yu. Khabarova, V. N. Sorokin, N. N. Kolachevsky / Trapping of thulium atoms in an optical lattice of an amplifying resonator near a magic wavelength of 814.5 nm // *Quantum Electronics*. – 2018. – Vol. 48, № 5. – P. 415-418.
DOI: 10.1070/QEL16656
3. Е. С. Федорова, Д. О. Трегубов, А. А. Головизин, Г. А. Вишнякова, Д. А. Мишин, Д. И. Проворченко, К. Ю. Хабарова, В. Н. Сорокин, Н. Н. Колачевский / Оптическая накачка ультрахолодных атомов тулия на нижний уровень часового перехода и исследование процесса их деполяризации // *Квантовая Электроника*. – 2019. – Т. 49., № 5., – С. 418-423.
Англ. версия. E. S. Fedorova, D. O. Tregubov, A. A. Golovizin, G. A. Vishnyakova, D. A. Mishin, D. I. Provorchenko, K. Yu. Khabarova, V. N. Sorokin, N. N. Kolachevsky / Optical pumping of ultracold thulium atoms to a lower level of the clock transition and study of their depolarisation // *Quantum Electronics*. – 2019. – Vol. 49., № 5. – P. 418-423.
DOI: 10.1070/QEL16998

Тезисы докладов в сборниках трудов конференций:

1. Е. С. Федорова, Д. О. Трегубов, А. А. Головизин, Д. А. Мишин, Д. И. Проворченко, К. Ю. Хабарова, В. Н. Сорокин, Н. Н. Колачевский / Разра-

- ботка оптических часов на основе ультрахолодных атомов тулия с низкой чувствительностью к тепловому излучению окружающей среды // КВНО-2019, Всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» . – Санкт-Петербург. – 2019. – С. 109.
2. E. Fedorova, A. Golovizin, D. Tregubov, D. Sukachev, K. Khabarova, V. Sorokin, N. Kolachevsky / Towards Optical Lattice Clock Based on Inner-Shell Transition in Tm // ECAMP13, 13th European Conference on Atoms Molecules and Photons – Флоренция, Италия – 2019. – С. 30.
 3. E. Kalganova, A. Golovizin, D. Tregubov, D. Shevnin, V. Bushmakin, D. Sukachev, K. Khabarova, V. Sorokin, N. Kolachevsky / Magic wavelength for 1.14 μm clock transition in Thulium // 4th Russian-German-French Laser Symposium – Казань. – 2018. – С. 55.
 4. E. Kalganova, G. Vishnyakova, A. Golovizin, D. Tregubov, D. Sukachev, K. Khabarova, V. Sorokin, O. Prudnikov, N. Kolachevsky / Two-temperature momentum distribution of thulium atoms in an intermediate-line MOT // 651 WE-Heraeus-Seminar: Longrange interactions. – Бад Хоннеф, Германия – 2017. – С. 53
 5. E. Kalganova, G. Vishnyakova, A. Golovizin, D. Tregubov, D. Sukachev, K. Khabarova, V. Sorokin, O. Prudnikov, N. Kolachevsky / Two-temperature momentum distribution of thulium atoms in a narrow-line MOT // ICQT-2017, IV International Conference on Quantum Technologies – Москва – 2017.
 6. E. Kalganova, G. Vishnyakova, A. Golovisin, D. Tregubov, D. Sukachev, S. Fedorov, K. Khabarova, A. Akimov, N. Kolachevsky, V. Sorokin / Laser cooling on the weak transition and optical trapping of thulium atoms // ICQT-2015, Third International Conference on Quantum Technologies – Москва – 2015. – С. 90.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, ЦИТИРУЕМОЙ В АВТОРЕФЕРАТЕ

- [1] *Hänsch, T. W.* Cooling of gases by radiation pressure / T. W. Hänsch, A. L. Schawlow // *Optics communications*. — 1975. — Vol. 13, № 1. — P. 68–69.
- [2] *Балыкин, В.И.* Охлаждение атомов Na резонансным лазерным излучением / В.И. Балыкин, В.С. Летохов, В.И. Мишин // *Письма в ЖЭТФ*. — 1979. — Vol. 29. — P. 614–618.
- [3] *Happer, W.* Optical pumping / W. Happer // *Reviews of Modern Physics*. — 1972. — Vol. 44, № 2. — P. 169–249.
- [4] *Metcalf, H. J.* Laser cooling and trapping of atoms / H. J. Metcalf, P. van der Straten // *Journal of the Optical Society of America B*. — 2003. — Vol. 20, № 5. — P. 887–908.
- [5] *Grimm, R.* Optical dipole trap for neutral atoms / R. Grimm, M. Weidemüller, Y. Ovchinnikov // *Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics*. — 2000. — Vol. 42. — P. 95–170.
- [6] *Ludlow, A. D.* Optical atomic clocks / A. D. Ludlow, M M. Boyd, J. Ye [et al.] // *Reviews of Modern Physics*. — 2015. — Vol. 87, № 2. — P. 637.
- [7] *Desruelle, B.* Gravity measurements below 1E-9 g with a transportable absolute quantum gravimeter / B. Desruelle, P. Bouyer, V. Ménotret [et al.] // *Scientific Reports*. — 2018. — Vol. 8, № 1. — P. 12300 1–11.
- [8] *Cronin, A. D.* Optics and interferometry with atoms and molecules / A. D. Cronin, J. Schmiedmayer, D. E. Pritchard // *Reviews of Modern Physics*. — 2009. — Vol. 81, № 3. — P. 1051–1129.
- [9] *Kitching, J.* Chip-scale atomic devices / J. Kitching // *Applied Physics Reviews*. — 2018. — Vol. 5. — P. 031302 1–38.
- [10] *Häffner, H.* Quantum computing with trapped ions / H. Häffner, C.F. Roos, R. Blatt // *Physics Reports*. — 2008. — Vol. 469, № 4. — P. 155–203.
- [11] *Dowling, J. P.* Quantum technology: The second quantum revolution / J. P. Dowling, G. J. Milburn // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. — 2003. — Vol. 361. — P. 1655–1674.

- [12] *Bussi eres, F.* Prospective applications of optical quantum memories / F. Bussi eres, N. Sangouard, M. Afzelius [et al.] // *Journal of Modern Optics*. — 2013. — Vol. 60, № 18. — P. 1519–1537.
- [13] *Bloom, B. J.* An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10-18 level / B. J. Bloom, T. L. Nicholson, J. R. Williams [et al.] // *Nature*. — 2014. — Vol. 506, № 7486. — P. 71–75.
- [14] *Schioppo, M.* Ultrastable optical clock with two cold-atom ensembles / M. Schioppo, R. C. Brown, W. F. McGrew [et al.] // *Nature Photonics*. — 2017. — Vol. 11. — P. 48–52.
- [15] *Chou, C. W.* Frequency comparison of two high-accuracy Al⁺ optical clocks / C. W. Chou, D. B. Hume, J. C. J. Koelemeij [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2010. — Vol. 104, № 7. — P. 070802 1–4.
- [16] *Huntemann, N.* Single-Ion Atomic Clock with 3E-18 Systematic Uncertainty / N. Huntemann, C. Sanner, B. Lipphardt [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2016. — Vol. 116, № 6. — P. 063001 1–5.
- [17] *Chou, C. W.* Optical clocks and relativity / C. W. Chou, D. B. Hume, T. Rosenband, D. J. Wineland // *Science*. — 2010. — Vol. 329, № 5999. — P. 1630–1633.
- [18] *Sanner, C.* Optical clock comparison for Lorentz symmetry testing / C. Sanner, N. Huntemann, R. Lange [et al.] // *Nature*. — 2018. — Vol. 567. — P. 204–208.
- [19] *Godun, R. M.* Frequency ratio of two optical clock transitions in Yb⁺ 171 and constraints on the time variation of fundamental constants / R. M. Godun, P. B.R. Nisbet-Jones, J. M. Jones [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2014. — Vol. 113. — P. 210801 1–5.
- [20] *Wcis o, P.* New bounds on dark matter coupling from a global network of optical atomic clocks / P. Wcis o, P. Ablewski, K. Beloy [et al.] // *Science Advances*. — 2018. — Vol. 4, № 12. — P. eaau4869 1–7.
- [21] *Koller, S. B.* Transportable Optical Lattice Clock with 7E-17 Uncertainty / S. B. Koller, J. Grotti, St. Vogt [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2017. — Vol. 118, № 7. — P. 073601 1–6.

- [22] *Cao, J.* A compact, transportable single-ion optical clock with 7.8E-17 systematic uncertainty / J. Cao, P. Zhang, J. Shang [et al.] // *Applied Physics B*. — 2017. — Vol. 123, № 4. — P. 112 1–9.
- [23] *Delehaye, M.* Single-ion, transportable optical atomic clocks / M. Delehaye, C. Lacroûte // *J. Mod. Opt.* — 2018. — Vol. 65, № 5-6. — P. 622–639.
- [24] *Derevianko, A.* Highly charged ions as a basis of optical atomic clockwork of exceptional accuracy / A. Derevianko, V. A. Dzuba, V. V. Flambaum // *Physical Review Letters*. — 2012. — Vol. 109, № 18. — P. 180801 1–5.
- [25] *Kozlov, A.* Prospects of building optical atomic clocks using Er I or Er III / A. Kozlov, V. A. Dzuba, V. V. Flambaum // *Physical Review A*. — 2013. — Vol. 88, № 3. — P. 032509 1–5.
- [26] *Sukachev, D.* Inner-shell magnetic dipole transition in Tm atoms: A candidate for optical lattice clocks / D. Sukachev, S. Fedorov, I. Tolstikhina [et al.] // *Physical Review A*. — 2016. — Vol. 94, № 2. — P. 022512 1–12.
- [27] *Dragic, P. D.* Materials for optical fiber lasers: A review / P. D. Dragic, M. Cavillon, J. Ballato // *Applied Physics Reviews*. — 2018. — Vol. 5, № 4. — P. 041301 1–35.
- [28] *Hedges, M. P.* Efficient quantum memory for light / M. P. Hedges, J. J. Longdell, Y. Li, M. J. Sellars // *Nature*. — 2010. — Vol. 465, № 7301. — P. 1052–1056.
- [29] *Bünzli, J. C. G.* Intriguing aspects of lanthanide luminescence / J. C. G. Bünzli, S. V. Eliseeva // *Chemical Science*. — 2013. — Vol. 4, № 5. — P. 1939–1949.
- [30] *Sukachev, D.* Magneto-optical trap for thulium atoms / D. Sukachev, A. Sokolov, K. Chebakov [et al.] // *Physical Review A*. — 2010. — Vol. 82, № 1. — P. 011405 1–4.
- [31] *Vishnyakova, G. A.* Two-stage laser cooling and optical trapping of thulium atoms / G. A. Vishnyakova, E. S. Kalganova, D. D. Sukachev [et al.] // *Laser Physics*. — 2014. — Vol. 24. — P. 074018 1–7.
- [32] *Golovizin, A. A.* Detection of the clock transition ($1.14 \mu\text{m}$) in ultra-cold thulium atoms / A. A. Golovizin, E. S. Kalganova, D. D. Sukachev [et al.] // *Quantum Electronics*. — 2015. — Vol. 45, № 5. — P. 482–485.

- [33] *Сукачев, Д. Д.* Лазерное охлаждение атомов тулия. Кандидатская диссертация. / Д. Д. Сукачев // *ФИАИИ*. — 2013.
- [34] *Вишнякова, Г. А.* Вторичное лазерное охлаждение атомов тулия. Кандидатская диссертация. / Г. А. Вишнякова // *ФИАИИ*. — 2017.
- [35] *Головизин, А. А.* Прямое лазерное возбуждение часового магнитодипольного перехода 1.14 мкм в ультрахолодных атомах тулия. Кандидатская диссертация. / А. А. Головизин // *ФИАИИ*. — 2017.
- [36] *Bergquist, J. C.* Recoilless optical absorption and Doppler sidebands of a single trapped ion / J. C. Bergquist, W. M. Itano, D. J. Wineland // *Physical Review A*. — 1987. — Vol. 36, № 1. — P. 428–430.
- [37] *Takamoto, M.* An optical lattice clock / M. Takamoto, F. L. Hong, R. Higashi, H. Katori // *Nature*. — 2005. — Vol. 435, № 7040. — P. 321–324.
- [38] *Katori, H.* Ultrastable optical clock with neutral atoms in an engineered light shift trap / H. Katori, M. Takamoto, V. G. Pal’chikov, V. D. Ovsiannikov // *Physical Review Letters*. — 2003. — Vol. 91, № 17. — P. 173005 1–4.
- [39] *Prudnikov, O. N.* New approaches in deep laser cooling of magnesium atoms for quantum metrology / O. N. Prudnikov, D. V. Brazhnikov, A. V. Taichenachev [et al.] // *Laser Physics*. — 2016. — Vol. 26. — P. 095503 1–9.
- [40] *Kalганова, Е.* Two-temperature momentum distribution in a Thulium magneto-optical trap / E. Kalганова, O. Prudnikov, A. Golovizin [et al.] // *Phys. Rev. A*. — 2017. — Vol. 96, № 3. — P. 033418 1–7.
- [41] *Kalганова, Е. S.* Trapping of thulium atoms in a cavity-enhanced optical lattice near a magic wavelength of 814.5 nm / E. S. Kalганова, A. A. Golovizin, D. O. Shevnin [et al.] // *Quantum Electronics*. — 2018. — Vol. 48, № 5. — P. 415–418.
- [42] *Fedorova, E. S.* Optical pumping of ultracold thulium atoms to the lower level of the clock transition and the study of the process of their dipole relaxation / E. S. Fedorova, D. O. Tregubov, A. A. Golovizin [et al.] // *Quantum Electronics*. — 2019. — Vol. 49, № 5. — P. 418–423.