

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

На правах рукописи

Трегубов Дмитрий Олегович

**Часовой переход в атоме тулия с низкой
чувствительностью к тепловому излучению**

Специальность 01.04.21 —
«Лазерная физика»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2020

Работа выполнена в Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Хабарова Ксения Юрьевна

Научный консультант: член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук
Колачевский Николай Николаевич

Официальные оппоненты: **Пальчиков Виталий Геннадьевич**,
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник Главного метрологического центра Государственной службы времени и частоты (ГМЦ ГСВЧ (НИО-7)) Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ»)

Зеленер Борис Борисович,
доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией №1.4 Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Объединенный институт высоких температур Российской академии наук» (ФГБУН ОИВТ РАН)

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

Защита состоится 18 мая 2020 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 002.023.03 на базе 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 «__» марта 2020 г..

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 002.023.03,
доктор физико-математических наук

А. С. Золотко

Общая характеристика работы

Диссертация посвящена исследованию часового перехода в атомах тулия, захваченных в оптическую решётку, определению поляризуемости перехода и основных источников систематических сдвигов частоты.

Актуальность темы. Самой точно измеряемой величиной на сегодняшний день является частота [1]. Для достижения наилучшей точности измерения какой-либо величины разумно свести эксперимент к измерению частоты. По этой причине в 1983 году было введено новое определение метра [2], а в 2019 — почти всех остальных величин системы СИ (Международная система единиц) [3], через секунду и фиксированные значения ряда физических констант. Секунда же остаётся базовой единицей системы СИ, определяемой из эксперимента по измерению частоты сверхтонкого перехода в атоме цезия.

Секунда реализуется в национальных метрологических институтах многих стран мира, в том числе и в России. Согласно определению, это делается с помощью цезиевого стандарта, при этом в качестве носителей частоты используются несколько десятков водородных мазеров. В настоящее время достигнутая относительная неточность воспроизведения стандартной секунды (само определение требует полной изолированности атома и является абсолютно точным) составляет $\sim 10^{-16}$ [4]. По работам последних лет в области оптических стандартов частоты становится понятно, что можно сделать другое определение секунды, практически реализуемое с заметно меньшей неточностью 10^{-18} , если использовать оптические переходы в атомах или ионах [5]. Уже исследовано несколько десятков различных подходящих атомов и ионов, с помощью которых демонстрируют точность воспроизведения частоты лучше, чем в случае перехода в цезии. В качестве передовых примеров можно выделить оптические переходы в атоме стронция, атоме или ионе иттербия, ионе алюминия [6–9]. Помимо определения секунды, оптические реперы частоты находят своё применение в фундаментальной науке: поиск дрейфа фундаментальных констант, проверка общей теории относительности, точные измерения [10; 11], а также в прикладной области: спутниковая навигация, карты гравитационного поля Земли [12–15].

При этом постоянно происходит поиск альтернативных оптических реперов частоты, которые потенциально могут оказаться предпочтительнее осуществлённых решений [16]. Одним из потенциальных кандидатов на эту роль является переход 1.14 мкм в атоме тулия [17], обладающий определёнными преимуществами в сравнении с другими реперами.

Часовой переход на длине волны 1.14 мкм происходит в 4*f*-оболочке, которая находится внутри заполненной *s*-оболочки, экранирующей оптический электрон от внешнего воздействия. Это делает переход интересным для оптических часов. Реализация оптических реперов частоты требует

охлаждения и удержания элемента, точного измерения частоты часового перехода, определения систематических сдвигов и ошибок в процессе измерения. В частности, в случае нейтральных атомов необходимо использовать оптическую решётку на магической длине волны, для которой дифференциальная поляризуемость часового перехода обращается в ноль, и знать статическую дифференциальную поляризуемость для оценки сдвигов частоты в результате взаимодействия с внешними полями.

Экспериментальная работа над созданием репера частоты на основе атомов тулия началась в 2008 году в ФИАН. На момент написания настоящей работы были успешно защищены четыре диссертационные работы. Диссертация Сукачёва Дениса была посвящена созданию магнито-оптической ловушки для захвата и охлаждения атомов тулия [18]. Вишнякова Гульнара исследовала методы глубокого охлаждения облака атомов с целью понижения температуры [19]. Работа Головизина Артёма была посвящена поиску и прямому возбуждению часового перехода $|4f^{13}(^2F^o)6s^2; J = 7/2, F = 4\rangle \rightarrow |4f^{13}(^2F^o)6s^2; J = 5/2, F = 3\rangle$ на длине волны 1.14 мкм [20]. Фёдорова Елена защитила диссертацию по перезахвату облака атомов тулия в оптическую решётку вблизи магической длины и подготовку их в определённом квантовом состоянии, которое обеспечивает лучшую стабильность часового перехода [21].

Целью данной работы является экспериментальное исследование спектральных характеристик часового перехода 1.14 мкм в атоме тулия в оптической решётке на магической длине волны и основных источников систематических сдвигов частоты.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. получить Фурье-ограниченный спектр линии поглощения часового перехода в атоме тулия с шириной менее 100 Гц;
2. исследовать спектр дифференциальных поляризуемостей часового перехода в атомах тулия и определить магическую длину волны для часового перехода 1.14 мкм в атоме тулия в оптической решётке;
3. определить сдвиг частоты часового перехода 1.14 мкм в атоме тулия за счёт теплового излучения внутри вакуумной камеры;
4. провести измерение частоты часового перехода 1.14 мкм в атоме тулия.

Научная новизна:

1. Измерен контур линии поглощения с Фурье-ограниченной шириной 10 Гц часового перехода на длине волны 1.14 мкм для атомов тулия, захваченных в оптическую решётку. Этот результат открывает возможность прецизионных измерений с использованием часового перехода в атоме тулия.

2. Экспериментально определена магическая длина волны оптической решётки для часового перехода в атоме тулия.
3. Получены спектры дифференциальных поляризуемостей часового перехода в атоме тулия в диапазоне длин волн 800 – 860 нм, а также измерены поляризуемости на длине волны 1064 нм. Это позволило определить статическую дифференциальную поляризуемость и оценить чувствительность частоты часового перехода в атоме тулия к тепловому излучению.
4. Определена вероятность дипольного перехода $|4f^{13}(^2F^o)6s^2; J = 5/2\rangle \rightarrow |4f^{12}(^3F_4)5d_{3/2}6s^2; J = 5/2\rangle$ в единицу времени.
5. Измерена частота часового перехода в атоме тулия с относительной погрешностью 10^{-14} .

Практическая значимость Измеренные спектральные характеристики часового перехода 1.14 мкм в атоме тулия демонстрируют возможность создания репера частоты на нейтральных атомах тулия, захваченных в оптическую решетку на магической длине волны, с уровнем относительной погрешности 5×10^{-18} , что находится на уровне мировых достижений. Проведённая работа является необходимым этапом на пути создания оптических часов на основе атомов тулия в оптической решётке.

Методология и методы исследования. Для получения представленных результатов производились исследования атомов тулия в магнито-оптической ловушке и в оптической решётке. Экспериментальные данные аппроксимировались теоретическими моделями для определения необходимых характеристик.

Положения, выносимые на защиту:

1. Для часового перехода на длине волны 1.14 мкм в атомах тулия, захваченных в оптическую решётку с глубиной потенциала более 20 мкК, реализуется режим Лэмба-Дике, при котором ширина на полувысоте контура линии поглощения составляет 10 Гц при времени возбуждения 80 мс.
2. Оптимальная магическая длина волны оптической решётки для создания оптического репера частоты на атомах тулия составляет 813.320(6) нм.
3. Относительный сдвиг частоты часового перехода 1.14 мкм вследствие теплового излучения при температуре окружения 300 К составляет $2.3(1.1) \times 10^{-18}$.
4. Частота часового перехода в невозмущённом атоме тулия равняется 262 954 938 269 213(30) Гц.

Достоверность полученных результатов подтверждается повторяемостью экспериментальных данных, а также согласованием результатов экспериментов с теоретическими предсказаниями. Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались автором лично на 5 международных научных конференциях:

1. “Stark and Zeeman shifts in thulium optical clock”, D. Tregubov, A. Golovizin, E. Fedorova, D. Sukachev, K. Khabarova, V. Sorokin, and N. Kolachevsky, International Conference on Ultrafast Optical Science (UltrafastLight-2019), 30 сентября – 4 октября 2019, Москва, Россия
https://ultrafastlight.ru/assets/files/bookofabstracts_ultrafastlight2019.pdf
2. “Progress report on a thulium optical clock”, D. Tregubov, A. Golovizin, E. Fedorova, D. Mishin, D. Provorchenko, D. Sukachev, K. Khabarova, V. Sorokin, and N. Kolachevsky, V International Conference on Quantum Technologies, 15 – 19 июля 2019, Москва, Россия
3. “Polarizabilities of the 1.14 μm clock transition in thulium”, D. Tregubov, A. Golovizin, E. Fedorova, D. Sukachev, K. Khabarova, V. Sorokin, and N. Kolachevsky, The Fifth MIPT – UEC – LPI International Workshop on Atomic, Molecular and Optical Physics, 1 – 3 октября 2018, Москва, Россия
4. “Magic wavelength 813.3 nm for thulium optical clocks”, D. Tregubov, A. Golovizin, E. Fedorova, D. Sukachev, K. Khabarova, V. Sorokin, and N. Kolachevsky, IX Международный симпозиум «Метрология времени и пространства», 12 – 14 сентября 2018, Зеленоград, Россия
5. “Measurement of magic wavelength for 1.14 μm clock transition in Tm atoms”, D. Tregubov, A. Golovizin, E. Kalganova, G. Vishnyakova, K. Khabarova, V. Sorokin, and N. Kolachevsky, The 26th International Conference on Atomic Physics, 22 – 27 июля 2018 года, Барселона, Испания
<http://icap2018.eu/book-of-abstracts/>

Основные результаты работы опубликованы в трёх статьях в рецензируемых научных журналах, входящих в базу данных *Web of Science*, а также в трудах конференций, ссылки на которые приведены на стр. 19.

Личный вклад. Все изложенные в диссертации результаты получены лично автором, либо при его непосредственном участии.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется научная проблема и место, которое в ней занимает диссертационная работа. Приводится краткая история изучаемой проблемы, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы. Далее в основных главах диссертации сначала описывается атом тулия и используемые методы лазерного охлаждения, а потом исследование часового перехода: получение контура линии поглощения в режиме Лэмба-Дике, определение дифференциальных динамической и статической поляризуемостей, магической длины волны, и измерение частоты перехода с учётом эффектов от всевозможных источников сдвигов частоты.

Первая глава посвящена описанию особенностей часового перехода в атоме тулия, экспериментальной установки и используемых методов лазерного охлаждения и спектроскопии.

В п. 1.1 и 1.2 приведены особенности часового перехода в атоме тулия на примере сравнения с другими часовыми переходами. Для переходов в нейтральных атомах характерна высокая чувствительность к тепловому излучению, что является основным источником погрешности оптических часов на нейтральных атомах [22; 23]. Свободные от этой проблемы оптические часы на одиночных ионах обладают меньшей стабильностью [24; 25]. Так, при сравнении двух часов на атомах стронция в работе [26] требуется всего лишь один час для достижения относительной неточности определения отношения частот 5.8×10^{-19} . За то же время для часов на ионах алюминия эта величина достигла бы всего лишь 1.2×10^{-17} . В литературе имеются свидетельства, что оптический переход на длине волны 1.14 мкм в нейтральном атоме тулия обладает низкой чувствительностью к электрическим полям [27; 28], а значит и к тепловому излучению.

В п. 1.3 описаны методы лазерного охлаждения и удержания атомов тулия, используемые в данной работе. Для получения достаточного потока атомов в область захвата металлический тулий нагревается до температуры ≈ 1000 К. Горячие атомы необходимо замедлить, для чего применяется зеэмановский замедлитель [29]. Замедленные атомы подвергаются первой стадии охлаждения на переходе 410.6 нм в магнито-оптической ловушке (МОЛ). Для формирования излучения используется лазер фирмы Zacher (лазерный диод с внешним резонатором и рупорным усилителем) на длине волны 821 нм с последующим удвоением частоты. Вторая стадия охлаждения позволяет понизить температуру облака атомов практически без потерь числа частиц. Для этого используется переход на длине волны 530.7 нм с шириной 350 кГц. Излучение формируется диодным лазером фирмы Topica с встроенным удвоителем частоты. Лазер стабилизируется

по высокочастотному резонатору методом Паунда-Драйвера-Холла [30]. В результате доплеровского охлаждения облако атомов имеет температуру 10 мкК и количество частиц порядка 10^6 .

Для длительного удержания атомов в их основном и возбуждённом состояниях часового перехода вместо МОЛ используется оптическая решётка [31] с глубиной потенциала до $500 E_{\text{гес}}$. Здесь $E_{\text{гес}} = h^2/2m\lambda^2 = h \times 1.8 \text{ кГц}$ — энергия, которую приобретает атом в случае поглощения фотона оптической решётки. Эффективность перезахвата атомов из МОЛ составляет от 10 до 50% в зависимости от глубины потенциала. Для формирования излучения оптической решётки используется непрерывный титан-сапфировый лазер, перестраиваемый в диапазоне длин волн 800 – 860 нм.

В п. 1.4 приведена теория, связанная со спектроскопией оптического перехода в различных потенциалах. Уширение Доплера и эффект отдачи, присущие свободному атому, можно подавить, если использовать удерживающий потенциал, локализуя атом на расстоянии, много меньшем длины волны исследуемого перехода. В этом случае реализуется режим Лэмба-Дике. Эффект Доплера второго порядка, связанный с релятивизмом, тем не менее остаётся.

В п. 1.5 описан эксперимент по спектроскопии часового перехода в атоме тулия в режиме Лэмба-Дике. В качестве удерживающего потенциала используется оптическая решётка. Начальное значение 807 нм длины волны оптической решётки было выбрано вблизи теоретически предсказанного ранее значения магической длины волны [17]. Поскольку в качестве часового перехода используется переход между подуровнями с нулевой проекцией полного момента, для увеличения сигнала используется оптическая накачка атомов на центральный магнитный подуровень. Последовательный подбор параметров оптической накачки, длины волны излучения оптической решётки, мощности и длительности излучения часового лазера позволил произвести возбуждение часового перехода достаточно длительным π -импульсом. Экспериментально удалось наблюдать Фурье-ограниченные контуры линии поглощения перехода, для которых ширина на полувысоте $\delta\nu$ зависит от длительности возбуждения τ согласно простому соотношению $\delta\nu \times \tau \approx 0.8$ (см. рис. 2). Например, при длительности $\tau = 80 \text{ мс}$ был получен контур линии поглощения шириной 10 Гц (см. рис. 1).

Вторая глава посвящена исследованию дифференциальной поляризуемости часового перехода в атоме тулия.

В п. 2.1 представлено теоретическое описание эффекта Штарка, введено понятие динамической скалярной и тензорной, а также дифференциальной поляризуемости. Приведены явные формулы расчёта этих величин.

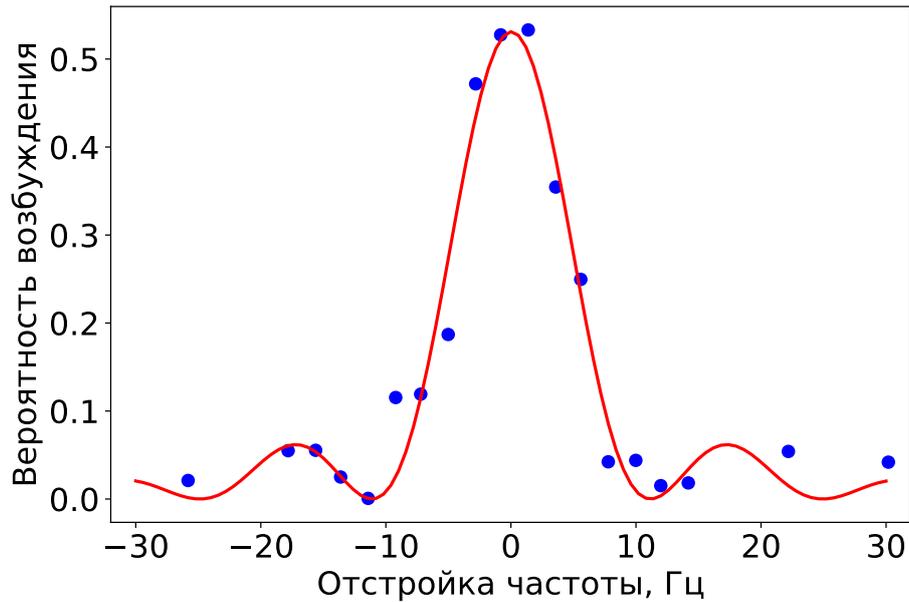


Рис. 1 — Вероятность возбуждения часового перехода в зависимости от отстройки частоты лазерного излучения от резонанса. Ширина на полувысоте составляет 10 Гц и определяется длительностью возбуждающего импульса 80 мс. Сплошная красная линия — теоретическая аппроксимация.

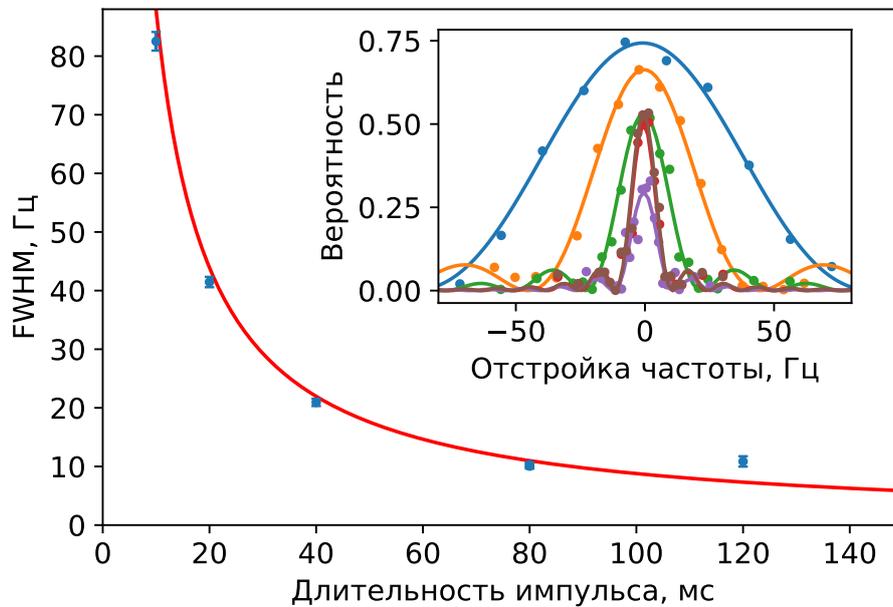


Рис. 2 — Ширина на полувысоте контура линии поглощения (спектры на вставке) в зависимости от длительности импульса излучения часового лазера в схеме Раби. Сплошная красная линия — теоретический расчёт исходя из времени жизни перехода и длительности импульса возбуждения.

В п. 2.2 введено понятие магической длины волны. Длина волны излучения называется магической для конкретного перехода в атоме, если дифференциальная динамическая поляризуемость этого перехода на этой длине волны равняется нулю, что означает нулевой сдвиг частоты при любой интенсивности излучения в первом приближении. В связи с этим оптическая решётка на магической длине волны является важным инструментом для оптических часов на нейтральных атомах. В реальности при использовании магической длины волны всё равно приходится учитывать эффекты сдвига частоты, связанные с оптической решёткой. Например, наличие ненулевой гиперполяризуемости приводит к дополнительному слагаемому в сдвиге частоты с квадратичной зависимостью от интенсивности. Флуктуации длины волны оптической решётки вблизи магической длины волны тоже могут приводить к сдвигу частоты часового перехода. Кроме того, дифференциальная поляризуемость чувствительна к углу поляризации оптической решётки по отношению к оси квантования.

В п. 2.3 представлен эксперимент по измерению дифференциальной поляризуемости часового перехода. Благодаря расчётному спектру поляризуемостей была выбрана область поиска магической длины волны 800 – 815 нм [17].

В присутствии излучения на некоторой длине волны в силу дифференциальной динамической поляризуемости перехода появляется сдвиг его частоты $\Delta\nu$ согласно формуле

$$\Delta\nu = -\frac{2\pi a_0^3}{hc} \Delta\alpha I, \quad (1)$$

где h — постоянная Планка, c — скорость света, a_0 — борковский радиус, $\Delta\alpha$ — динамическая дифференциальная поляризуемость в атомных единицах, а I — интенсивность излучения, вызывающего сдвиг частоты. Оптическая решётка помимо удержания облака атомов также вызывает сдвиг частоты часового перехода, и этот сдвиг линейно зависит от мощности формирующего её излучения. Линейный коэффициент этой зависимости непосредственно связан с дифференциальной поляризуемостью, как видно из формулы (1). Изменяя длину волны излучения, формирующего оптическую решётку, и измеряя сдвиг частоты, мы получили спектр дифференциальной поляризуемости (рис. 3).

В результате было обнаружено две магические длины волны. Для более детальных исследований была выбрана 813.3 нм, поскольку этой точке соответствует более пологий склон вблизи пересечения с нулём и она расположена дальше от резонансов на длинах волн 806.9 нм и 809.5 нм. Угол наклона определяет требуемую точность стабилизации частоты излучения оптической решетки к магической длине волны: ~ 3 МГц. В пределах этой отстройки сдвиг частоты часового перехода будет меньше 1 мГц, то есть на уровне единиц восемнадцатого знака.

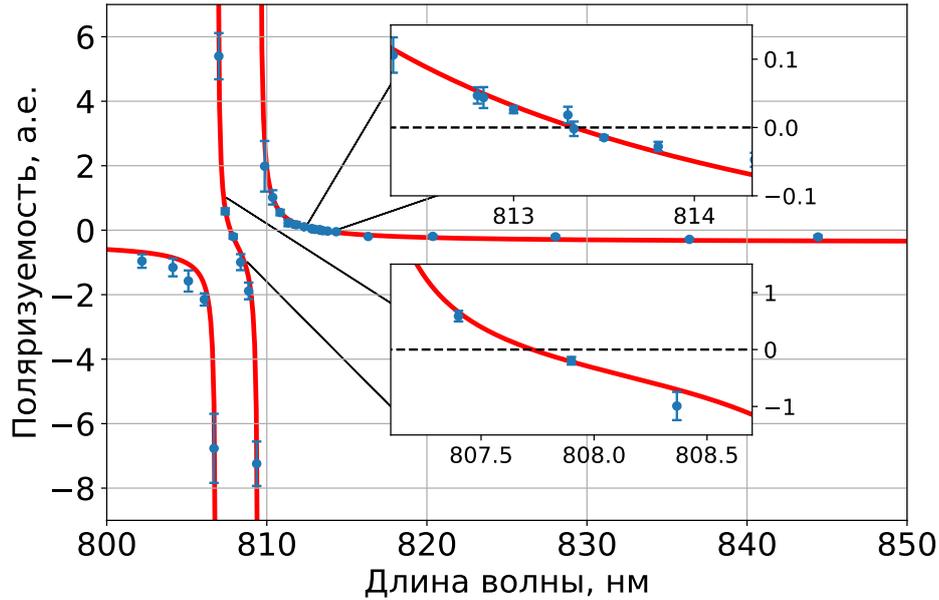


Рис. 3 — Спектр дифференциальной динамической поляризуемости часового перехода. Точками обозначены экспериментальные данные, сплошной линией — теоретическая аппроксимация. На вставках в большем масштабе представлены области вблизи магических длин волн.

Для более точных измерений поляризуемостей при каждом значении длины волны производились измерения при нескольких мощностях излучения оптической решётки (см. рис. 4). Погрешности измерения мощности оценивается в 10% на основе сравнения показаний трёх разных абсолютно откалиброванных измерителей мощности Thorlabs S121C с заявленной погрешностью 3%. Линейная аппроксимация данных (сплошные линии на рис. 4) позволяет определить поляризуемость перехода по формуле (1) с лучшей точностью, чем использование одного значения мощности, как это было сделано для первоначального поиска магических длин волн.

Каждая прямая на рис. 4 определяет точку на графике зависимости поляризуемости от длины волны (рис. 5). В результате получилось значение магической длины волны 813.320(6) нм. Сплошной кривой на рис. 5 представлены теоретические расчёты спектра поляризуемости исходя из экспериментальных данных о близлежащих переходах в атоме тулия с исследуемых уровней. Теоретическое оценка магической длины волны отличается от экспериментального значения на ≈ 2 нм.

Кроме того, представлен результат эксперимента по определению дифференциальных скалярной и тензорной поляризуемостей в более широкой области спектра 800 – 860 нм, дополнительно включая отдельную точку на длине волны 1064 нм (рис. 6). Эта точка была измерена в связи с необходимостью экстраполяции спектра в инфракрасную область и наличием лазера на эту длину волны.

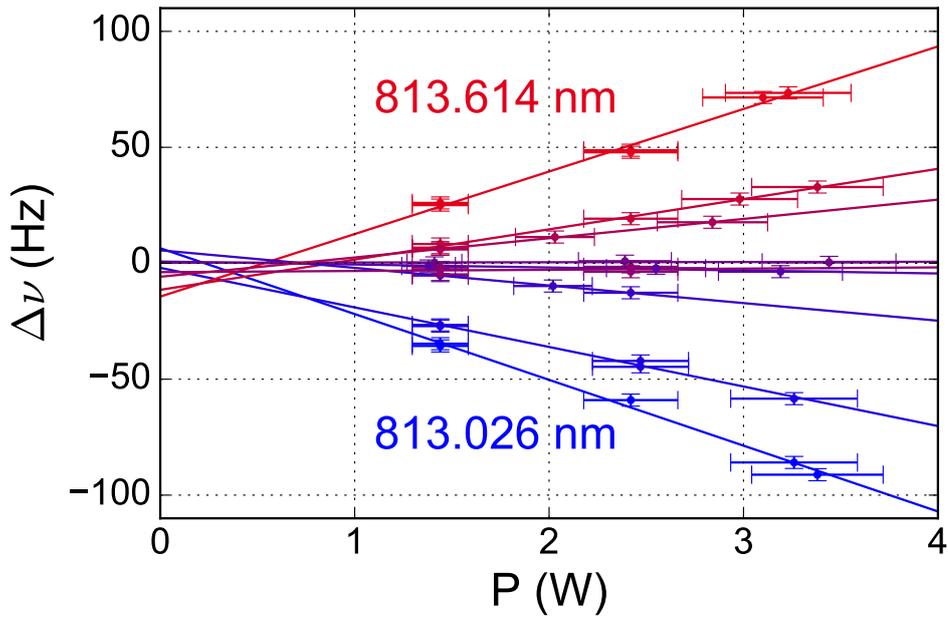


Рис. 4 — Измерение сдвига частоты $\Delta\nu$ часового перехода в зависимости от мощности P излучения оптической решётки и от её длины волны.

Сплошные линии представляют собой линейную аппроксимацию зависимости сдвига частоты от мощности. Погрешность измерения мощности связана с точностью калибровки фотодиода.

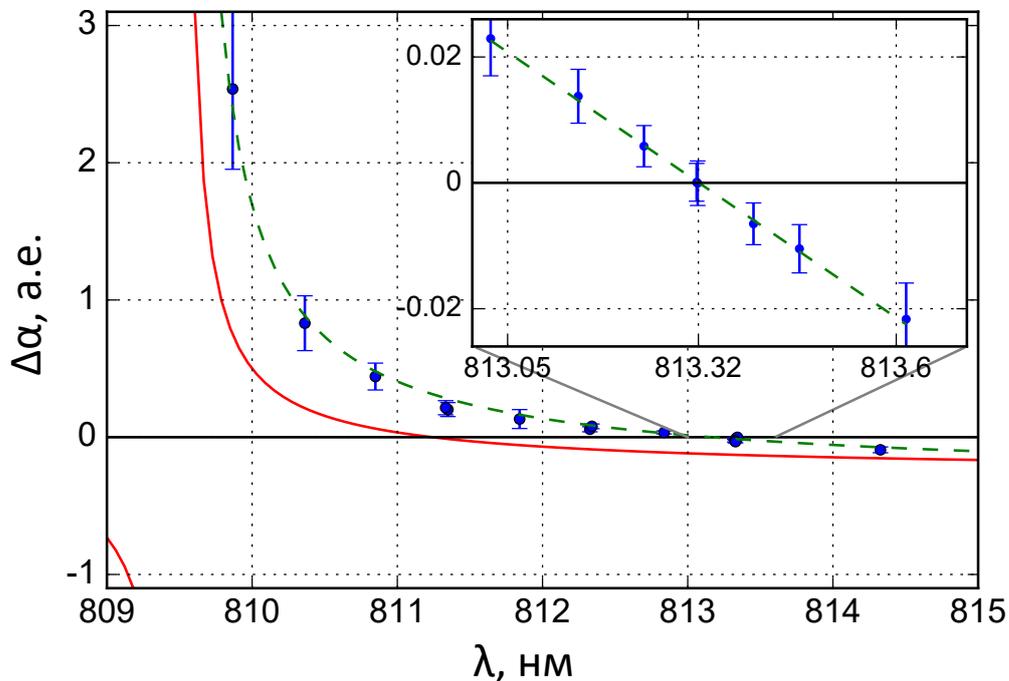


Рис. 5 — Спектр дифференциальной динамической поляризуемости часового перехода. Точками обозначены экспериментальные данные, пунктирной линией — теоретическая аппроксимация. Сплошной линией обозначена теоретическая оценка без свободных параметров. На вставке в большем масштабе представлена область вблизи магической длины волны.

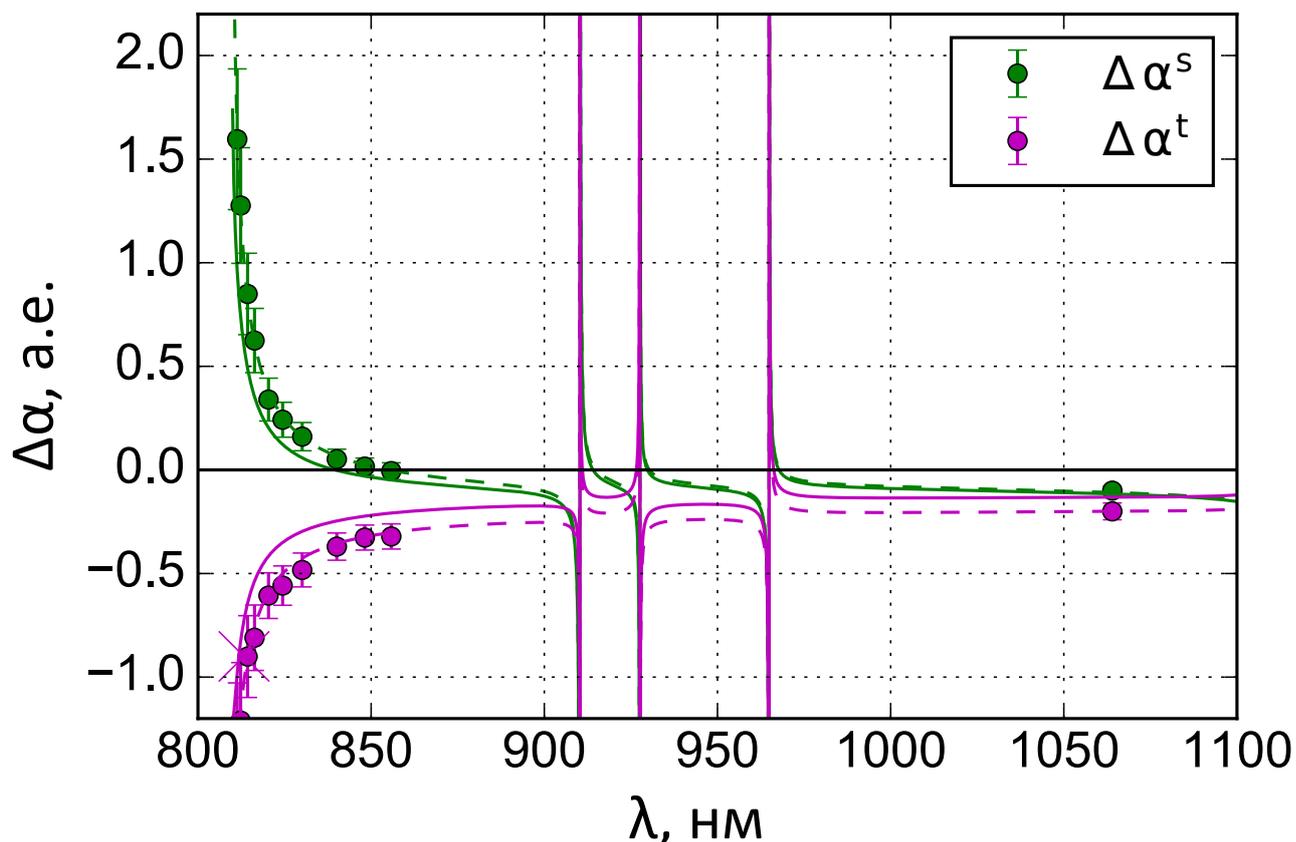


Рис. 6 — Спектры дифференциальных динамических скалярной и тензорной поляризуемостей в диапазоне 810 – 860 нм и 1064 нм. Точками обозначены экспериментальные данные, пунктирной линией — теоретическая аппроксимация. Сплошной линией обозначена теоретическая оценка без свободных параметров.

Измерения динамической поляризуемости с помощью теоретической модели были экстраполированы в инфракрасную область $\omega \rightarrow 0$, откуда получены значения статической скалярной $\Delta\alpha^s(0) = -0.063(30)$ а.е. и тензорной $\Delta\alpha^t(0) = -0.170(30)$ а.е. поляризуемостей перехода. Полученные значения использовались для оценки сдвига частоты, связанного с тепловым излучением. При комнатной температуре 300 К максимум спектра излучения чёрного тела приходится на ~ 10 мкм. В этой области скалярная поляризуемость перехода практически не изменяется и приближается к значению $\Delta\alpha^s(0)$.

В третьей главе приведено описание измерения частоты часового перехода, а также представлены доминирующие вклады в погрешность будущего репера частоты.

В п. 3.1 введено понятие отклонения Аллана и описана оптическая гребёнка частот, созданная для измерения частоты часового перехода. В основу схемы положен фемтосекундный титан-сапфировый лазер GigaJet 30S с длительностью импульсов 14.5 фс и частотой повторения ≈ 980 МГц, центральная длина волны 814 нм. Накачка осуществляется лазером Coherent Verdi V5 с мощностью ~ 5 Вт на длине волны 532 нм. Частота повторений стабилизирована по генератору Rohde&Schwarz SLM 03,

работа которого сверялась по пассивному водородному мазеру Время-Ч Ч1–1006. Мазер калибруется по системе ГЛОНАСС с относительной погрешностью 10^{-13} , что является доминирующим вкладом в погрешность определения частоты. Общий сдвиг фемтосекундной гребёнки частот стабилизировался с помощью схемы $f - 2f$ интерферометра.

С помощью оптической гребёнки частот было произведено определение частоты часового перехода. Часовой лазер, излучение которого используется для возбуждения часового перехода в атомах тулия, был стабилизирован по резонатору Фабри-Перо с высокой добротностью. Излучение этого лазера с помощью оптического волокна длиной 100 м доставлялось в соседнюю лабораторию, где располагалась фемтосекундная гребёнка частот. Интерференция лазера с гребёнкой регистрировалась на фотодиоде, и частота биений регистрировались с помощью счётчика. Кроме того, счётчик одновременно регистрировал частоты смещения и повторений гребёнки. Номер зуба гребёнки определялся методом небольших изменений частот смещения и повторений.

Измерения проводились в течение нескольких часов. В это время с помощью часового лазера происходил опрос атомов тулия в оптической решётке на магической длине волны. По контуру линии поглощения определялась центральная частота перехода. Измерения одного контура линии поглощения занимали около двух минут. Как показали измерения частоты лазера в течение длительного времени, длина резонатора Фабри-Перо изменялась так, что частота сдвигалась со скоростью 29 мГц/с. Данный эффект вносил незначительное влияние за время измерения одного контура ~ 100 с и не был доминирующим вкладом в погрешность. Тем не менее, в ходе эксперимента этот линейный дрейф компенсировался одним из акусто-оптических модуляторов.

В п. 3.2 рассматриваются основные источники сдвигов частоты. Рассмотрено влияние излучения оптической решётки, поляризуемости на частоте часового перехода, теплового излучения, гравитационного сдвига.

Самым значительным оказался сдвиг, связанный с квадратичным эффектом Зеемана. Экспериментально было проведено измерение этого эффекта (рис. 7), и получено значение $\beta = 258.3(3)$ Гц/Гс² для чувствительности к магнитному полю. Для калибровки магнитного поля использовались компоненты часового перехода $|F = 4, m_F = 0\rangle \rightarrow |F' = 3, m_{F'} = \pm 1\rangle$, которые в отличие от центральной компоненты подвержены линейному эффекту Зеемана. g -факторы основного и часового уровней известны из работ [32–34].

Для компенсации сдвига планируется использовать схему попеременного измерения частоты различных сверхтонких переходов с последующим усреднением — так называемая “синтетическая частота”. Дело в том, что для перехода $|F = 3, m_F = 0\rangle \rightarrow |F' = 2, m_{F'} = 0\rangle$ квадратичный эффект Зеемана имеет противоположный знак по сравнению с другой сверхтонкой

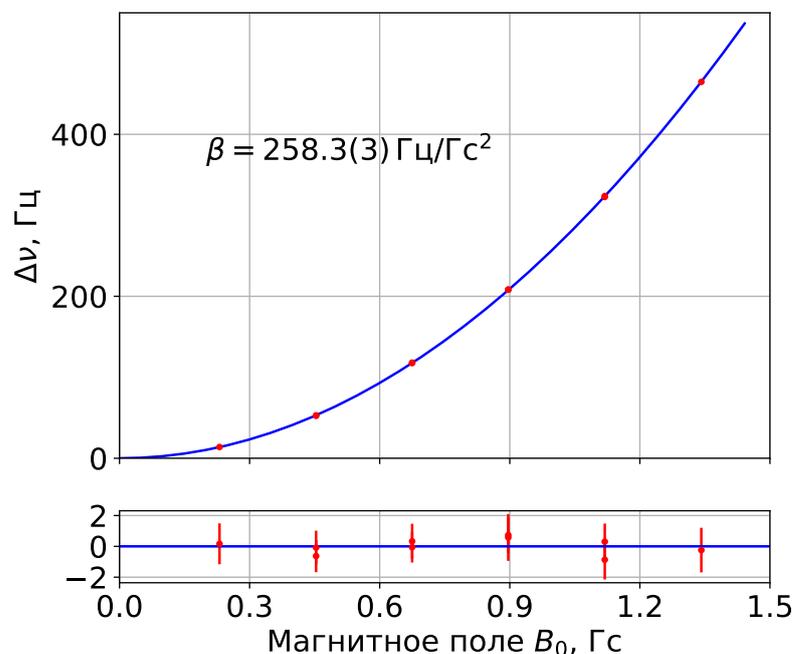


Рис. 7 — Измерение квадратичного эффекта Зеемана. Сдвиг частоты $\Delta\nu$ часового перехода в зависимости от магнитного поля (сверху), а также отклонения эксперимента от квадратичной аппроксимации $\Delta\nu = \beta B_0^2$ (снизу).

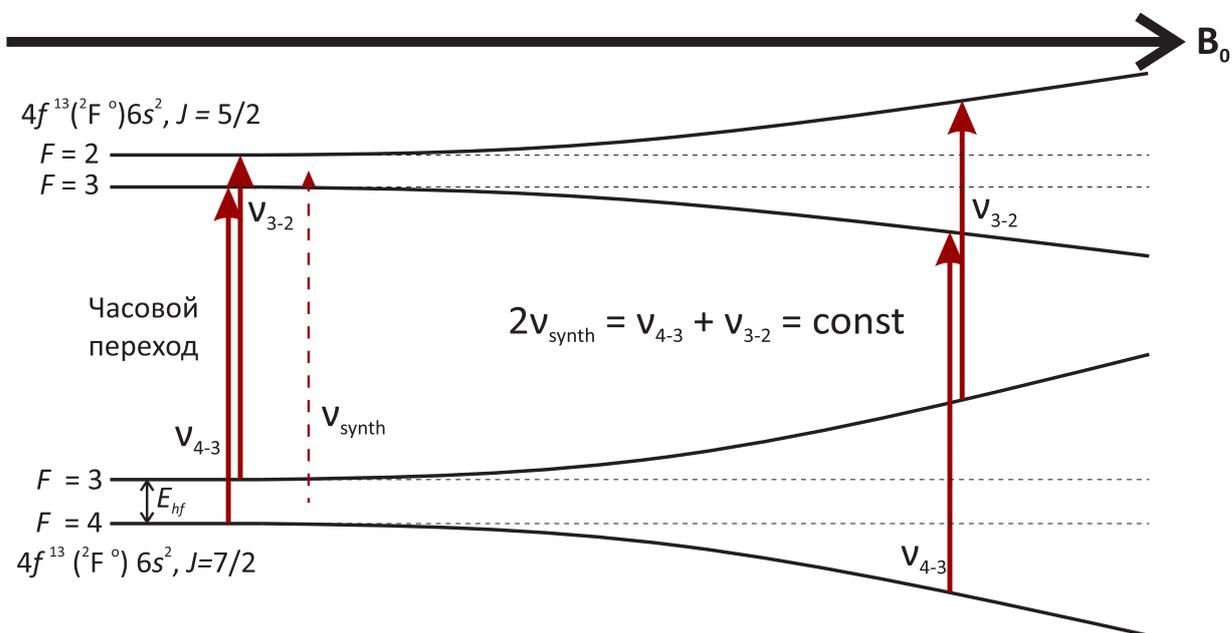


Рис. 8 — Поясняющая иллюстрация к использованию синтетической частоты для компенсации эффекта Зеемана при создании оптического репера частоты. Горизонтальная ось B_0 представляет собой величину магнитного поля, и ниже изображены соответствующие сдвиги энергий рассматриваемых уровней. Полусумма частот ν_{4-3} и ν_{3-2} не зависит от магнитного поля, в то время как их разность пропорциональна квадрату поля.

компонентой (рис. 8), поэтому сумма частот двух переходов не зависит от значения магнитного поля.

Для оценки влияния теплового излучения были использованы результаты главы 2 и формула:

$$\Delta\nu^{BBR} = -\Delta\alpha^s(0) \frac{a_0^3 \pi^2 k_B^4}{15c^3 \hbar^4} T^4 = 0.60(28) \text{ мГц}, \quad (2)$$

где значение приведено для температуры окружения $T = 300 \text{ К}$. Относительный сдвиг частоты составляет $2.3(1.1) \times 10^{-18}$, что на три порядка меньше, чем в лучших оптических реперах частоты на других нейтральных атомах. Сравнение с часовыми переходами в атомах и ионах приведено в таблице 1. Низкое значение сдвига частоты даже при комнатной температуре практически полностью снимает требования на стабилизацию температуры окружения.

| Элемент | $\Delta\nu^{BBR}, 10^{-17}$ |
|----------------------|-----------------------------|
| Tm | 0.23 |
| Sr [5] | -550 |
| Yb [5] | -270 |
| Hg [35] | -16 |
| Yb ⁺ [5] | -11 |
| Al ⁺ [5] | -0.4 |
| Lu ⁺ [36] | -0.14 |

Таблица 1 — Сдвиг частоты часовых переходов различных элементов в связи с тепловым излучением при температуре 300 К.

В результате измерений с помощью оптической гребёнки была определена частота лазера, а по спектру возбуждения — частота часового перехода. Проведённые оценки и измерения сдвигов частоты позволили определить частоту часового перехода в невозмущённом атоме тулия:

$$\nu_{4-3} = 262\,954\,938\,269\,213(30) \text{ Гц}, \quad (3)$$

где погрешность определяется калибровкой мазера.

После обсуждения основных источников сдвигов частоты приведен бюджет ошибок предлагаемых оптических часов (табл. 2).

Среди перечисленных в таблице условий на данный момент остаются нереализованными только требования к точному определению магической длины волны, магнитным полям и углу поляризации оптической решётки (который тоже связан с магнитными полями). Использование синтетической частоты перехода требует дальнейших исследований и может ослабить требования к магнитным полям.

| Источник | $\Delta\nu$, мГц | $\delta\nu$, мГц | условия |
|--|-------------------|-------------------|---|
| Длина волны оптической решётки | 0 | 1 | $ \Delta\nu < 3 \text{ мГц}$, $ \Delta U /U < 0.1$, $U = 100 E_{\text{rec}}$ |
| Поляризация оптической решётки | 0 | 1 | $ \Delta\Theta < 10^{-3}$, $U = 100 E_{\text{rec}}$ |
| Гиперполяризуемость | 0 | < 0.3 | $ \Delta U /U < 0.1$, $U = 100 E_{\text{rec}}$ |
| Тепловое излучение при 300 К | -0.6 | 0.3 | $T = 295 \pm 3 \text{ К}$, неточность из-за измерения $\Delta\alpha^s(0)$ |
| Квадратичный эффект Зеемана | -2572 | 1 | $B = 100 \pm 0.02 \text{ мГс}$, необходимо точное измерение чувствительности |
| Квадратичный эффект Зеемана, синтетическая частота | 0 | < 1 | $B = 100 \pm 0.02 \text{ мГс}$, неопределённость зависит от флуктуаций магнитного поля |

Таблица 2 — Бюджет ошибок предлагаемых оптических часов на переходе 1.14 мкм в атоме тулия. $\Delta\nu$ — сдвиг частоты, $\delta\nu$ — погрешность его определения. Жирным шрифтом выделены невыполненные на данный момент условия.

Реализация представленных условий позволит создать оптические часы с относительной погрешностью $< 5 \times 10^{-18}$. Для проверки их работы потребуется сравнение с другими часами, способными работать на таком же уровне.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Исследован контур линии часового перехода 1.14 мкм в атоме тулия в режиме Лэмба-Дике. Облако атомов было захвачено в оптическую решётку с глубиной потенциала 20 мКК и более. При этих параметрах для часового перехода параметр Лэмба-Дике не превышал 0.3, что позволило получить контуры линии поглощения часового перехода без уширения Доплера. Минимальная ширина на полувысоте полученного контура равнялась 10 Гц при длительности возбуждения 80 мс, что соответствует ограничению Фурье.
2. Измерены спектры разностных скалярных и тензорных поляризуемостей часового перехода 1.14 мкм в атоме тулия: длина волны оптической решётки варьировалась в диапазоне 800 – 860 нм, а также отдельно получены значения поляризуемостей для 1064 нм. Поляризуемости определялись по сдвигу частоты часового перехода вследствие эффекта Штарка.
3. Экспериментально найдено положение магической длины волны 813.320(6) нм. Оптическую решётку на этой длине волны можно

создать как с помощью титан-сапфирового, так и полупроводникового лазера. Разностная поляризуемость в зависимости от длины волны оптической решётки пересекает в этой точке нулевой уровень под малым углом $-0.075(17)$ а.е./нм, что накладывает достаточно мягкие условия на уровень стабильности этой длины волны — в пределах 10 МГц для обеспечения точности измерения частоты часового перехода лучше 10^{-17} .

4. В результате аппроксимации спектра поляризуемостей часового перехода была получена вероятность в единицу времени дипольного перехода с верхнего уровня часового перехода $|4f^{13}(^2F^{\circ})6s^2; J = 5/2\rangle$ на уровень $|4f^{12}(^3F_4)5d_{3/2}6s^2; J = 5/2\rangle$ $A_{809.5} = 460(70) \text{ с}^{-1}$. Основным источником погрешности — экспериментальное значение вероятности близлежащего перехода $A_{806.9} = 7.5(1.1) \times 10^3 \text{ с}^{-1}$.
5. В результате экстраполяции спектра поляризуемостей часового перехода в длинноволновую область был определён сдвиг частоты часового перехода 1.14 мкм вследствие теплового излучения при температуре окружения 300 К. При экстраполяции использовалась теоретическая модель расчета поляризуемостей, в которой варьировались параметры неизвестных переходов в атоме тулия. Была определена статическая скалярная дифференциальная поляризуемость перехода $\Delta\alpha^s(0) = -0.063(30)$ а.е.. Относительный сдвиг частоты, вызванный излучением чёрного тела, составил $2.3(1.1) \times 10^{-18}$. Это на два порядка величины меньше, чем соответствующий сдвиг в передовых реперах частоты на нейтральных атомах. Данный результат открывает возможность создания транспортируемого оптического стандарта частоты с высоким уровнем точности, поскольку требования к стабильности температуры окружения существенно снижены.
6. Произведено измерение частоты часового перехода 1.14 мкм в атоме тулия. Частота перехода составила $262\,954\,938\,269\,213(30)$ Гц. Измерение производилось с помощью оптической гребёнки частот, стабилизированной по водородному мазеру Время-Ч Ч1-1006. Указанная точность ограничена калибровкой мазера по системе ГЛОНАСС. При измерении был учтён квадратичный эффект Зеемана. Эффект Штарка даёт вклад, много меньший заявленной погрешности.

Атомы тулия в оптической решётке могут быть использованы для создания оптических часов с относительной погрешностью на уровне 5×10^{-18} .

Публикации автора по теме диссертации

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

1. A. Golovizin, E. Fedorova, D. Tregubov, D. Sukachev, K. Khabarova, V. Sorokin, N. Kolachevsky / Inner-shell clock transition in atomic thulium with a small blackbody radiation shift // *Nature Communications*, 10, 1724 (2019).
DOI: 10.1038/s41467-019-09706-9
2. Д.О. Трегубов, А.А. Головизин, Е.С. Федорова, К.Ю. Хабарова, В.Н. Сорокин, Н.Н. Колачевский / Магические длины волн в области 800 нм для прецизионной спектроскопии внутриоболочечного перехода в атоме тулия // *Квантовая Электроника*, 49(11), 1028–1031 (2019).
Перевод. D.O. Tregubov, A.A. Golovizin, E.S. Fedorova, K.Yu. Khabarova, V.N. Sorokin, N.N. Kolachevsky / Magic wavelengths near 800 nm for precision spectroscopy of an inner-shell transition in thulium atoms // *Quantum Electronics*, 49(11), 1028–1031 (2019).
DOI: 10.1070/QEL17134
3. A. Golovizin, V. Bushmakin, S. Fedorov, E. Fedorova, D. Tregubov, D. Sukachev, K. Khabarova, V. Sorokin, and N. Kolachevsky / An ultrastable laser system for spectroscopy of the 1.14 μm inner-shell clock transition in Tm and its absolute frequency measurement // *Journal of Russian Laser Research*, 40, 540–546 (2019).
DOI: 10.1007/S10946-019-09835-Y

Тезисы докладов в сборниках трудов конференций:

1. D. Tregubov, A. Golovizin, E. Fedorova, D. Sukachev, K. Khabarova, V. Sorokin, N. Kolachevsky / Measurement of magic wavelength for 1.14 μm clock transition in Tm atoms // *The 26th International Conference on Atomic Physic. – Барселона, Испания. – 2018. – С. 315.*
2. D. Tregubov, A. Golovizin, E. Fedorova, D. Sukachev, K. Khabarova, V. Sorokin, N. Kolachevsky / Stark and Zeeman shifts in thulium optical clock // *International Conference on Ultrafast Optical Science (UltrafastLight-2019). – Москва. – 2019. – С. 293.*
3. Д.О. Трегубов, А.А. Головизин, Е.С. Калганова, К.Ю. Хабарова, В.Н. Сорокин, Н.Н. Колачевский / Магическая длина волны 813.3 нм для тулиевого оптического стандарта частоты // *Метрология времени и пространства. Материалы IX Международного симпозиума. – Менделеево. – 2018. – С. 166–167.*
4. Д. Трегубов / Polarizabilities of the 1.14 μm clock transition in thulium // *The Fifth MIPT — UEC — LPI International Workshop on Atomic, Molecular and Optical Physics. – Москва. – 2018. – С. 14.*

Список литературы

1. *Riehle, F.* Frequency standards: basics and applications / F. Riehle. — John Wiley & Sons, 2006.
2. 17e CONFÉRENCE GÉNÉRALE DES POIDS ET MESURES. — 10/1983. — (17). — URL: <https://www.bipm.org/utils/common/pdf/CGPM/CGPM17.pdf>.
3. Convocation of the General Conference on Weights and Measures. — 11/2018. — (26). — URL: <https://www.bipm.org/utils/en/pdf/CGPM/Convocation-2018.pdf>.
4. Uncertainty evaluation of the caesium fountain clock PTB-CSF2 / V. Gerginov [и др.] // Metrologia. — 2009. — Т. 47, № 1. — С. 65.
5. Optical atomic clocks / A. D. Ludlow [и др.] // Reviews of Modern Physics. — 2015. — Т. 87, № 2. — С. 637. — URL: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.87.637>.
6. An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10- 18 level / B. Bloom [и др.] // Nature. — 2014. — Т. 506, № 7486. — С. 71.
7. An atomic clock with 10–18 instability / N. Hinkley [и др.] // Science. — 2013. — Т. 341, № 6151. — С. 1215–1218.
8. Frequency Ratio of Two Optical Clock Transitions in Yb+ 171 and Constraints on the Time Variation of Fundamental Constants / R. Godun [и др.] // Physical review letters. — 2014. — Т. 113, № 21. — С. 210801.
9. Frequency comparison of two high-accuracy Al+ optical clocks / C.-w. Chou [и др.] // Physical review letters. — 2010. — Т. 104, № 7. — С. 070802.
10. New limits on coupling of fundamental constants to gravity using Sr 87 optical lattice clocks / S. Blatt [и др.] // Physical Review Letters. — 2008. — Т. 100, № 14. — С. 140801.
11. Two clock transitions in neutral Yb for the highest sensitivity to variations of the fine-structure constant / M. S. Safronova [и др.] // Physical review letters. — 2018. — Т. 120, № 17. — С. 173001.
12. Geodesy and metrology with a transportable optical clock / J. Grotti [и др.] // Nature Physics. — 2018. — Т. 14, № 5. — С. 437.
13. A clock network for geodesy and fundamental science / C. Lisdat [и др.] // Nature communications. — 2016. — Т. 7, № 1. — С. 1–7.
14. *Delehaye, M.* Single-ion, transportable optical atomic clocks / M. Delehaye, C. Lacroûte // Journal of Modern Optics. — 2018. — Т. 65, № 5/6. — С. 622–639.

15. Compact Transportable Optical Standard Based on a Single 171 Yb^+ Ion (“YBIS” Project) / I. Semerikov [и др.] // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. — 2018. — Т. 45, № 11. — С. 337–340.
16. Direct detection of the 229 Th nuclear clock transition / L. von der Wense [и др.] // Nature. — 2016. — Т. 533, № 7601. — С. 47.
17. Inner-shell magnetic dipole transition in Tm atoms: A candidate for optical lattice clocks / D. Sukachev [и др.] // Physical Review A. — 2016. — Т. 94, № 2. — С. 022512. — URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.94.022512>.
18. *Сукачев, Д.* Лазерное охлаждение атомов тулия : дис. ... канд. / Сукачев ДД. — ФИАН, 2013.
19. *Вишнякова, Г.* Вторичное лазерное охлаждение атомов тулия : дис. ... канд. / Вишнякова ГА. — ФИАН, 2017.
20. *Головизин, А.* Прямое лазерное возбуждение часового магнитодипольного перехода 1.14 мкм в ультрахолодных атомах тулия : дис. ... канд. / Головизин АА. — ФИАН, 2017.
21. *Фёдорова, Е.* Исследование ультрахолодных атомов тулия в оптической решётке вблизи магической длины волны : дис. ... канд. / Фёдорова ЕС. — ФИАН, 2019.
22. Systematic evaluation of an atomic clock at 2×10^{-18} total uncertainty / T. Nicholson [и др.] // Nature communications. — 2015. — Т. 6. — С. 6896.
23. *Hinkley, N.* An Atomic Clock for 10^{-18} Timekeeping : дис. ... канд. / Hinkley Nathan. — University of Colorado, Boulder, 2016.
24. An $^{27}\text{Al}^+$ quantum-logic clock with systematic uncertainty below 10^{-18} / S. Brewer [и др.] // arXiv preprint arXiv:1902.07694. — 2019.
25. Single-ion atomic clock with 3×10^{-18} systematic uncertainty / N. Huntemann [и др.] // Physical review letters. — 2016. — Т. 116, № 6. — С. 063001.
26. Optical clock intercomparison with 6×10^{-19} precision in one hour / E. Oelker [и др.] // arXiv preprint arXiv:1902.02741. — 2019.
27. Неуширяемая столкновениями линия тулия 1.14 мкм / Е. Александров [и др.] // Оптика и спектроскопия. — 1983. — Т. 54, № 1. — С. 3–4.
28. Laser spectroscopy of thulium atoms implanted in liquid and solid 4 He / K. Ishikawa [и др.] // Physical Review B. — 1997. — Т. 56, № 2. — С. 780.
29. Zeeman slowing of thulium atoms / K. Chebakov [и др.] // Optics letters. — 2009. — Т. 34, № 19. — С. 2955–2957. — URL: <https://doi.org/10.1364/OL.34.002955>.

30. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator / R. Drever [и др.] // Applied Physics B. — 1983. — Т. 31, № 2. — С. 97—105.
31. Trapping of thulium atoms in a cavity-enhanced optical lattice near a magic wavelength of 814.5 nm / E. S. Kalganova [и др.] // Quantum Electronics. — 2018. — Т. 48, № 5. — С. 415. — URL: <https://doi.org/10.1070/QEL16656>.
32. *Giglberger, D.* Ground-state hyperfine structure and nuclear magnetic moment of thulium-169 / D. Giglberger, S. Penselin // Zeitschrift fuer Physik. — 1967. — Т. 199, № 2. — С. 244—255.
33. *Blaise, J.* PROGRES RECENTS DANS LETUDE DES SPECTRES DARC ET DETINCELLE DU THULIUM / J. Blaise, P. Camus // COMPTES RENDUS HEBDOMADAIRES DES SEANCES DE L ACADEMIE DES SCIENCES. — 1965. — Т. 260, № 18. — С. 4693.
34. *Van Leeuwen, K.* High resolution measurements of the hyperfine structure in 10 levels of Tm I / K. Van Leeuwen, E. Eliel, W. Hogervorst // Physics Letters A. — 1980. — Т. 78, № 1. — С. 54—56.
35. Comparing a mercury optical lattice clock with microwave and optical frequency standards / R. Tyumenev [и др.] // New Journal of Physics. — 2016. — Т. 18, № 11. — С. 113002.
36. Blackbody radiation shift assessment for a lutetium ion clock / K. J. Arnold [и др.] // Nature communications. — 2018. — Т. 9.