

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Институт
спектроскопии Российской академии наук
(ИСАН)

Доктор физ.-мат. наук, профессор

В.Н. Задков

2020 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Трегубова Дмитрия Олеговича

«Часовой переход в атоме тулия с низкой чувствительностью к тепловому излучению», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 лазерная физика

Диссертационная работа Трегубова Дмитрия Олеговича «Часовой переход в атоме тулия с низкой чувствительностью к тепловому излучению» посвящена исследованию магнито-дипольного перехода $4f^{13}(^2F^o)6s^2(J = 7/2, F = 4) \rightarrow 4f^{13}(^2F^o)6s^2(J = 5/2, F = 4)$ на длине волны 1,14 мкм в атоме тулия. Исследование данного перехода вызвана возможностью построения на его основе репера частоты в оптическом диапазоне.

Наиболее существенным вкладом в погрешность стандартов частоты оптического диапазона обладает возмущение, связанное с тепловым излучением. В связи с этим, в настоящее время активно проводятся работы по оптимизации существующих и поиску новых схем для создания оптических стандартов частоты с малым влиянием со стороны теплового излучения. Рассматриваемый в диссертационной работе оптический переход в атоме тулия вызван переворотом спина неспаренного 4f-электрона, который экранирован внешней заполненной оболочкой. По этой причине, для исследуемого перехода в атоме тулия, а также для ряда переходов в других лантаноидах, ожидается низкая чувствительность к тепловому излучению и статическим электрическим полям. В диссертационной работе представлено изучение поляризуемости перехода в атоме тулия на длине волны 1,14 мкм, которое экспериментально подтверждает, сделанные ранее теоретические оценки. Это позволило оценить величину сдвига частоты, вызванного тепловым излучением окружающей среды и определить параметры нестабильности перспективного репера частоты.

Оценка влияния теплового излучения на сдвиг частоты оптического перехода, который исследован в работе, стала возможной благодаря решению нескольких задач. Среди таковых необходимо отметить следующие: реализация в экспериментальной установке условий для детектирования Фурье-ограниченных спектров часового перехода, измерение дифференциальной динамической поляризуемости часового перехода в широком диапазоне длин волн, точное определение по экспериментальным данным магической длины волны оптической решётки и исследование влияния магнитного поля на сдвиг частоты. Работа представляет собой один из заключительных этапов в цикле экспериментов, проводимых в ФИАН, по созданию оптических часов на атомах тулия в оптической решётке.

В диссертационной работе были получены следующие основные результаты:

- 1) При локализации атомов в оптической решётке был достигнут режим Лэмба-Дике и продемонстрированы Фурье-ограниченные контуры линии часового перехода на длине волны 1,14 мкм. Минимальная измеренная ширина на полувысоте составила 10 Гц при длительности импульса возбуждения 80 мс.
- 2) В оптической решётке, сформированной лазерным излучением с длиной волны в диапазоне 800-860 нм и 1064 нм, измерены дифференциальные динамические поляризуемости часового перехода в атоме тулия.
- 3) Экстраполяцией экспериментальных данных определена статическая дифференциальная поляризуемость атома тулия.
- 4) Экспериментально определено значение двух магических длин волн, лежащих в диапазоне 800-860 нм. Обосновано, что для создания репера частоты в оптическом диапазоне на основе атома тулия наиболее подходящей магической длиной волны лазерного излучения для локализации атомов в оптической решётке является 813.320(6) нм.
- 5) В результате аппроксимации полученных результатов определена вероятность перехода на длине волны 809.5 нм с верхнего уровня $4f^{13}(^2F^o)6s^2(J = 5/2)$ часового перехода на уровень $4f^{12}(^3F_4)5d_{3/2}6s^2(J = 7/2)$.
- 6) Экспериментальные данные позволили произвести оценку относительного сдвига частоты часового перехода, вызванного тепловым излучением. Анализ показал, что вклад теплового излучения в погрешность перспективного репера частоты на атоме тулия составляет единицы восемнадцатого знака.
- 7) Использование фемтосекундной гребёнки частот, стабильность которой сверялась с пассивным водородным мазером, позволило измерить значение частоты часового перехода в атоме тулия.
- 8) Предложена схема частотного репера на атоме тулия с использованием измерения синтетической частоты, что в перспективе позволит компенсировать влияние эффекта Зеемана на точность часов.

Результаты работы прошли широкую апробацию на международных конференциях и симпозиумах и опубликованы в 3 статьях, входящих в базу данных *Web of Science*.

Структурно диссертация состоит из Введения, трёх Глав, Заключение, Списка литературы и Приложения. Объём диссертации составляет 126 страниц. Работа содержит 26 рисунков и 6 таблиц. Список литературы содержит 76 наименований.

Во **Введении** приведены основные применения стандартов частоты оптического диапазона, что стимулирует активное исследование различных схем их создания в ведущих международных лабораториях. Обоснован выбор атома тулия в качестве альтернативного репера частоты, который может обладать высокой точностью. Помимо этого, во Введении описана цель, новизна, практическая значимость и защищаемые положения научного исследования, а также приведены сведения об апробации результатов работы.

В **Главе 1** приведены особенности часового перехода в атоме тулия в сравнении с другими атомами, которые используются для создания оптических часов. В главе описана используемая в диссертационной работе экспериментальная установка и приведено теоретическое описание методов спектроскопии атомов, локализованных в оптических решётках. Помимо этого, приведены результаты экспериментального исследования ширины линии регистрируемого часового перехода в реализованных экспериментальных условиях. Показано, что в используемом экспериментальном подходе возможна регистрация Фурье-ограниченных контуров часового перехода в атомах тулия и представлен контур линии с шириной на полувысоте 10 Гц.

Глава 2 посвящена исследованию спектра динамической поляризуемости атома тулия и определения магической длины волны излучения оптической решётки. Представлены основные математические формулы, которые используются для теоретического расчёта и анализа экспериментального спектра дифференциальной динамической поляризуемости атома тулия. Результаты описанных экспериментальных исследований позволили определить с высокой точностью положение нескольких магических длин волн, ранее предсказанных на основе теоретических расчётов в диапазоне 800-860 нм. Помимо этого, получен спектр отдельно скалярной и тензорной составляющих поляризуемости. Из экстраполяции спектра произведена оценка статической дифференциальной поляризуемости.

Глава 3 посвящена измерению частоты часового перехода и учёту различных источников сдвигов частоты. Описан эксперимент по измерению частоты перехода с использованием фемтосекундной гребёнки частот и определению величины линейного дрейфа частоты лазера, стабилизированного по высокочастотному резонатору. Затем приведены оценки и экспериментальные данные о влиянии различных источников сдвигов частоты. На основе ранее измеренных значений дифференциальной динамической поляризуемости и вычисленной статической поляризуемости часового перехода, показано, что тепловое излучение вносит вклад в точность репера частоты на уровне единиц восемнадцатого знака. Проведённый анализ показывает, что доминирующим вкладом в определение частоты атомного

перехода обладает квадратичный эффект Зеемана. При этом представлен метод подавления погрешности, связанной с эффектом Зеемана, с использованием часового перехода между другими сверхтонкими компонентами уровней. В конце Главы приводится бюджет ошибок разрабатываемого репера частоты с учётом полученных в работе результатов.

В **Заключении** сформулированы основные научные результаты диссертации.

Полученные в диссертационной работе результаты указывают на возможность создания оптических часов на основе нейтральных атомов тулия, в том числе в компактном исполнении, и могут иметь применения в области стандартов частоты и метрологических измерениях.

Полученные результаты могут быть использованы в институтах, проводящих исследования по созданию и использованию стандартов частоты для прецизионных измерений, таких как: Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН (ИОФАН), Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ), Институт лазерной физики СО РАН (ИЛФ), Институт прикладной физики РАН (ИПФ) и других.

Диссертационная работа не лишена недостатков, которые перечислены ниже:

1. В диссертационной работе методика измерения спектра дифференциальной динамической поляризуемости описана недостаточно подробно. Наиболее полное представление о методе измерения и об используемых параметрах можно получить только в разделе 2.3.6, где приведены параметры усреднения, используемые в работе. При этом в других разделах, посвящённых измерению дифференциальной динамической поляризуемости, представлены отрывочные данные об используемом подходе. Фактически, для того чтобы понять методику измерения, которая была использована при экспериментальном исследовании спектра дифференциальной динамической поляризуемости, надо объединить сведения из нескольких разделов.

2. Выбор магической длины волны излучения 813.320(6) нм обусловлен малой чувствительностью дифференциальной динамической поляризуемости к изменению частоты лазерного излучения, формирующего оптическую решётку. Однако при описании экспериментальной системы отсутствуют подробности стабилизации частоты лазерного излучения, которое используется для формирования оптической решётки. Указано лишь, что для стабилизации используется внешний резонатор Фабри-Перо без описания метода стабилизации и основных параметров.

3. В бюджете ошибок указано, что вклад гиперполяризуемости в сдвиг частоты часового перехода составляет нулевое значение. Однако это не так. В соответствии с оценками, приведёнными в диссертационной работе А.А. Головизина, вклад гиперполяризуемости, на рассматриваемой магической длине волны, в сдвиг линии часового перехода составляет значение на уровне единиц мГц. Данное значение, конечно же, много меньше основных вкладов, но его обнуление в итоговой таблице бюджета ошибок вводит в заблуждение.

4. При описании метода компенсации сдвига линии часового перехода, вызванного эффектом Зеемана, с использованием синтетической частоты, автор утверждает, что поляризуемости уровней $|J, F=J\pm 1/2, m_F=0\rangle$ совпадают, ссылаясь на формулу (2.4). В силу этого должны совпадать и магические длины волн оптической решётки для двух частот, которые планируется использовать для построения синтетической частоты. Для большей наглядности, в работе не хватает приведённых расчётов, подтверждающих это утверждение, поскольку формула (2.4) не позволяет сделать это быстро.

5. При определении точного значения частоты часового оптического перехода производилось измерение сигнала биений часового лазера с фемтосекундной гребёнкой частот при прописывании контура поглощения часового перехода. Для полноты картины в диссертационной работе не хватает экспериментального графика, показывающего измеренные значения частоты биений и экспериментальных точек измерения контура поглощения часового перехода.

6. При описании стабилизации часового лазера по сигналу отражения от высокодобротного резонатора проводилась модуляция тока лазера. В диссертационной работе приведены не все подробности стабилизации. Например, какова была глубина модуляции тока лазера? Как правило, при такой модуляции изменяется спектр лазера. В работе правильно указано, что измерение контура линии поглощения с шириной 10 Гц указывает на то, что спектральная ширина лазера – меньше. Однако не достаёт независимых контрольных измерений. Учитывая, что стабилизация частоты часового лазера – один из основных пунктов работы, который позволил точно измерить частоты часового перехода и который будет использоваться в дальнейшей работе, такие дополнительные исследования спектрального состава излучения и его анализ были бы полезны.

7. Не все оси на графиках подписаны так, чтобы суть графика можно было быстро понять. Например, на рисунке 3.2 изображена кривая без подписи оси ординат и без упоминания её в подписи к рисунку и тексте диссертации. Повидимому, это экспериментальные точки, из которых вычтена параболическая зависимость, полученная в процессе аппроксимации.

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

Автореферат полностью соответствует содержанию и результатам диссертации.

Доклад по материалам диссертационной работы был представлен автором 23 июня 2020 года на семинаре №1105 отдела лазерной спектроскопии ИСАН (семинар проводился в формате онлайн с открытым доступом через информационно-телекоммуникационную сеть «Интернет»).

Диссертационная работа «Часовой переход в атоме тулия с низкой чувствительностью к тепловому излучению», представленная Трегубовым Дмитрием Олеговичем, является законченным научным исследованием, по своей тематике полностью соответствует заявленной специальности и

удовлетворяет условиям, установленным в Положении о присуждении учёных степеней, утверждённом постановлением № 842 Правительства Российской Федерации от «24» сентября 2013 г., а автор работы, безусловно, заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 лазерная физика.

Отзыв на диссертацию составлен старшим научным сотрудником отдела лазерной спектроскопии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института спектроскопии Российской Академии наук (ИСАН), Афанасьевым Антоном Евгеньевичем и одобрен на семинаре №1105 отдела лазерной спектроскопии ИСАН 23 июня 2020 г.

Старший научный сотрудник отдела лазерной спектроскопии лаборатории лазерной спектроскопии ИСАН, кандидат физико-математических наук

/Афанасьев Антон Евгеньевич/

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН),
108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, 5.
телефон: 8(495)851-02-33
e-mail: afanasiev@isan.troitsk.ru



Главный научный сотрудник и исполняющий обязанности заведующего отделом лазерной спектроскопии ИСАН, доктор физико-математических наук

/Рябов Евгений Артурович/

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН),
108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, 5.
телефон: 8(495)851-02-31
e-mail: ryabov@isan.troitsk.ru



Подписи сотрудников ИСАН А.Е. Афанасьева и Е.А. Рябова заверяю.

Учёный секретарь ИСАН, кандидат физико-математических наук

/Перминов Евгений Борисович/



Список основных работ сотрудников ведущей организации Института спектроскопии РАН по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Афанасьев А.Е., Машко А.М., Мейстерсон А.А., Балыкин В.И. Спектроскопия атомов рубидия в импульсной оптической дипольной ловушке фемтосекундной длительности. Письма в ЖЭТФ, т.111(11):757-62 (2020).
2. Afanasiev A.E., Meysterson A.A., Mashko A.M., Melentiev P.N., Balykin V.I. Atom femto trap: experimental realization. Applied Physics B. v. 126(2):1-7 (2020).
3. Remizov S.V., Zhukov A.A., Pogosov W.V., Lozovik Y. E. Radiation trapping effect versus superradiance in quantum simulation of light-matter interaction. Laser Physics Letters. v. 16(6):065205 (2019).
4. Ivanov S. K., Kamchatnov A.M., Simple waves in a two-component Bose-Einstein condensate. Physical Review E. v. 97(4):042208 (2018).
5. Афанасьев А.Е., Мелентьев П.Н., Кузин А.А., Калацкий А.Ю., Балыкин В.И. Квантовый транспорт единичного фотона через субволновое отверстие единичным атомом. Журнал экспериментальной и теоретической физики. т. 152(3):438-52 (2017).
6. Kalatskiy A.Y., Afanasiev A.E., Melentiev P.N., Balykin V.I. Frequency stabilization of a diode laser on the $5P \rightarrow 5D$ transition of the Rb atom. Laser Physics. v. 27(5):055703 (2017).
7. Bolshov M. A., Kuritsyn Y.A., Liger V.V., Mironenko V.R., Kolesnikov O.M. Measurements of parameters of transient gas flows by a diode laser absorption spectroscopy at elevated pressures and temperatures. Optics and Spectroscopy. v. 122(5):705-14 (2017).
8. Afanasiev A.E., Melentiev P.N., Kuzin A.A., Kalatskiy A.Y., Balykin V.I. Photon transport through a nanohole by a moving atom. New Journal of Physics. v. 18(5):053015 (2016).
9. Kartashov Y. V., Konotop V.V., Zezyulin D.A., Torner L. Bloch oscillations in optical and Zeeman lattices in the presence of spin-orbit coupling. Physical Review Letters. v. 117(21):215301 (2016).
10. Makarov A.A. Narrow dip inside a natural linewidth absorption profile in a system of two atoms. Physical Review A. v. 92(5):053840 (2015).