

УТВЕРЖДАЮ

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

д.ф.-м.н., проф.  
Задков Виктор Николаевич



«15» ноября 2017 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

*на диссертационную работу Головизина Артёма Алексеевича*

*«Прямое лазерное возбуждение часового магнитодипольного перехода 1.14 мкм*

*в ультрахолодных атомах тулия»,*

*представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.21 лазерная физика*

Диссертационная работа Головизина Артёма Алексеевича «Прямое лазерное возбуждение часового магнитодипольного перехода 1.14 мкм в ультрахолодных атомах тулия» посвящена спектроскопии часового перехода  $4f^{13}(^2F^o)6s^2 (J=7/2, F=4) \rightarrow 4f^{13}(^2F^o)6s^2 (J=5/2, F=3)$  атома тулия. Интерес к данному переходу (на длине волны 1,14 мкм) вызван перспективой его использования для построения стандарта частоты в оптическом диапазоне спектра. Атом тулия обладает одним неспаренным электроном на внутренней  $4f^{13}$  электронной оболочке. Исследуемый в диссертационной работе оптический переход на длине волны 1,14 мкм вызван переворотом спина данного электрона. Эффективная экранировка неспаренного электрона заполненной  $6s^2$  электронной оболочкой делает исследуемый оптический переход малочувствительным к внешним возмущениям. Это обстоятельство позволяет говорить о преимуществах использования атома тулия, по сравнению с другими кандидатами, для построения стандарта частоты в оптическом диапазоне спектра. В работе приведены как теоретические исследования характеристик данного перехода, так и результаты ряда экспериментов, подтверждающих возможность использования перехода на длине волны 1,14 мкм в качестве репера для оптического стандарта частоты.

В диссертации были получены следующие результаты:

1) Частота диодного лазера с внешним резонатором была стабилизирована с использованием высокодобротного ULE-резонатора, получена ширина линии генерации лазера не хуже 100 Гц и долговременная стабильность частоты порядка 1 МГц/день.

2) Впервые был зарегистрирован часовый переход в атомах тулия  $4f^{13}(^2F^o)6s^2 (J=7/2, F=4) \rightarrow 4f^{13}(^2F^o)6s^2 (J=5/2, F=3)$  в магнито-оптической ловушке (МОЛ) на длине волны 1,14 мкм, наблюдалась спектральная ширина контура линии порядка 1 МГц, обусловленная уширением излучением и градиентным магнитным полем МОЛ.

3) Выполнен перезахват атомов из МОЛ в оптические дипольные ловушки различных конфигураций с высокой эффективностью, достигающей 50%.

4) В оптической дипольной ловушке и оптической решетке проведены измерения динамической поляризуемости часовых уровней и времени жизни верхнего часового уровня, значение которого составило 112 мс.

5) Исследован спектральный профиль часового перехода на длине волны 1,14 мкм атомов, локализованных в оптической решетке на длине волны 532 нм. Измерена зависимость ширины и сдвига спектрального профиля от мощности лазерного излучения, формирующего оптическую решетку, а так же его расщепление в присутствии магнитного поля.

6) Выполнен теоретический расчёт спектра динамической поляризуемости часовых уровней атома тулия в диапазоне длин волн 400-1200 нм. Предсказано наличие магической длины волны дипольной ловушки вблизи 807 нм и малая дифференциальная статическая скалярная поляризуемость часовых уровней.

7) Проведен анализ возможных источников смещения и погрешности частоты часового перехода в ультрахолодных атомах тулия, суммарная погрешность составила не более  $5 \times 10^{-18}$  отн. ед.

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

Структурно диссертация состоит из Введения, четырёх Глав, Заключения, Списка литературы и Приложения. Объём диссертации составляет 131 страницу. Работа содержит 32 рисунка, 4 таблицы. Список литературы состоит из 164 наименований.

Во Введении А.А. Головизин обсуждает современные достижения в области оптических часов и актуальность создания оптического репера частоты на атомах тулия. Затем автор останавливается на целях исследования, новизне, практической значимости и сведениях об апробации результатов, защищаемых положениях.

В **Главе 1** представлена информация об энергетической структуре атома тулия, используемой в эксперименте. Автор подробно рассматривает тонкую структуру основного состояния атома тулия и приводит расчёты вероятности перехода между её подуровнями, а также обсуждает основные особенности этого перехода. В конце главы представлена схема лазерного охлаждения атомов тулия и оптической системы часового лазера.

**Глава 2** содержит результаты регистрации часового перехода в атомах тулия в МОЛ. Здесь представлены теоретические расчёты динамики числа атомов в МОЛ в присутствии резонансного излучения на длине волны 1,14 мкм, соответствующей линии перехода  $f^{13}(^2F^o)6s^2 (J = 7/2, F = 4) \rightarrow 4f^{13}(^2F^o)6s^2 (J = 5/2, F = 3)$ . Теоретически и экспериментально исследовано влияние интенсивности лазерного излучения на ширину контура линии перехода. Измеренная ширина линии составляет значение порядка 1 МГц и обусловлена существующими в МОЛ механизмами уширения.

В **Главе 3** описан процесс перегрузки атомов тулия из МОЛ в оптические дипольные ловушки различных конфигураций. Экспериментально измерено, что при локализации атомов в оптической решётке на длине волны 532 нм эффективность перезахвата достигает 50%. Измерены собственные колебательные частоты атомов тулия в дипольной ловушке и оптической решётке, из которых получена оценка значения скалярной поляризуемости

основного состояния атома тулия на длине волны 532 нм. Локализация атомов в оптической решётке позволила произвести измерения контура линии часового перехода на длине волны 1,14 мкм. По полученным экспериментальным данным определено значение скалярной поляризуемости верхнего часового уровня на длине волны 532 нм. Также путем регистрации скорости распада атомов с верхнего часового уровня на основной уровень определено время жизни верхнего часового уровня в оптической решетке на длине волны 532 нм, которое составило 112 мс, что хорошо совпадает со значением 100 мс, полученным в теоретических расчётах.

**Глава 4** посвящена исследованию возможных сдвигов частоты и уширений линии часового перехода и связанных с ними погрешностей. Приведены результаты расчёта динамической поляризуемости часовых уровней атома тулия в диапазоне длин волн 400-1200 нм. На основе этих расчётов были получены значения статических поляризуемостей часовых уровней, необходимые для вычисления сдвига частоты часового перехода вследствие взаимодействия атомов с тепловым излучением, и определена область 806-812 нм, в которой ожидается нахождение нескольких магических длин волн, необходимых для реализации предельных значений стабильности стандарта частоты в описываемой в диссертационной работе схеме. Подробно рассмотрено влияние взаимодействий атомов друг с другом и с внешним магнитным полем. Полная относительная систематическая погрешность частоты часового перехода 1,14 мкм в атомах тулия оценена как  $5 \times 10^{-18}$ , что говорит о перспективности разработки такого оптического стандарта частоты.

В Заключении сформулированы основные научные результаты диссертации.

Полученные в диссертационной работе результаты указывают на возможность создания высокоточных оптических часов на атомах тулия и имеют большую значимость в области перспективных оптических стандартов частоты и метрологических измерениях, в частности в экспериментах по поиску дрейфа постоянной тонкой структуры.

Полученные в работе результаты представляют несомненный интерес и могут быть рекомендованы для использования в организациях, работающих над созданием атомных стандартов частоты, таких как: ИОФАН, ВНИИФТРИ, ИЛФ.

Однако диссертационная работа не лишена следующих недостатков:

1. Во введении работы недостаточен акцент на том, что исследование атомов тулия производится с целью их последующего использования для построения стандарта частоты в оптическом диапазоне спектра. Из введения не до конца ясно, чем построение такого стандарта частоты лучше существующих стандартов в СВЧ диапазоне. Данный вопрос рассмотрен только в Приложении к диссертационной работе. Во введении следовало указать основные цифры, показывающие перспективу развития данных стандартов частоты.
2. Не на все рисунки есть ссылки в тексте диссертации (например, рис. 2.2 и 4.1).
3. Результаты, представленные на рисунке 2.2 в тексте диссертационной работы, описаны не достаточно подробно. Фактически сделаны основные выводы по итогам произведённого моделирования. Одним из результатов данного моделирования является тот факт, что «Время установления равновесных населённостей уровней составляет порядка 300 мс». В то же время из приведенного рисунка видно, что существует два времени установления равновесия в исследуемой системе: «быстрое» и «медленное». Указанное время

300 мс соответствует «медленному» установлению равновесия в системе. Возникает вопрос, чем это время обусловлено. По-видимому, оно обусловлено установлением равновесия между долгоживущим состоянием  $4f^{13}(^2F^o)6s^2$  ( $J = 5/2$ ,  $F = 3$ ) (соответствует уровню  $|3\rangle$  в приведённой модели), соответствующим возбужденному состоянию часового перехода, и основным состоянием атома тулия (состояние  $|1\rangle$ ). Помимо этого из рисунка видно, что в начальный момент времени происходит «быстрое» изменение количества атомов в возбужденном состоянии (распад с которого дает измеряемый сигнал флуоресценции). Причем изменение количества атомов в начальный момент времени гораздо больше, чем в течении последующего «медленного» установления равновесия: если в начальный момент времени на уровне  $|2\rangle$  в МОЛ находилось порядка  $5 \times 10^5$  атомов, что соответствует расчётам при отсутствии поля на длине волны 1,14 мкм, то в процессе «быстрой» релаксации количество атомов уменьшается в 2 раза (для параметра насыщения часового лазера  $S=10^7$ ). При этом в процессе последующей «медленной» релаксации количество атомов уменьшается только в 1,25 раза. Какова причина данной «быстрой» релаксации?

4. При экспериментальном измерении воздействия часового лазера на сигнал флуоресценции атомов в МОЛ (рис. 2.4) автор диссертационной работы делает некорректные выводы. Так по склону сигнала, представленного на рисунке 2.4а, делается вывод о скорости установления равновесия в МОЛ при попадании частоты часового лазера в резонанс с исследуемым переходом. Этого делать нельзя, поскольку в условиях эксперимента производилось ручное сканирование частоты часового лазера, что не позволяет точно контролировать его частоту. Из рисунка 2.4а можно делать только качественные выводы. Правильное измерение представлено на рисунке 2.4б. Скорость установления равновесия, полученная из представленных измерений, составляет 50 мс. Автор делает вывод, что оно совпадает с теоретически предсказанным (рис. 2.2). Из ранее указанных данных моделирования, это время должно составлять 300 мс. Чем объясняется разница в предсказанном и измеренном значении этой величины на порядок?
5. В части представления результатов экспериментальных исследований отсутствует единый стиль. Например, влияние часового лазера на флуоресценцию МОЛ представлено в виде пиков (рис. 2.4) и далее в виде провала (рис. 2.5). Помимо этого, трудно при прочтении работы, отслеживать, какая частота указана по оси абсцисс при исследовании спектрального контура часового перехода: в одних случаях это реальная отстройка частоты часового лазера, в других – отстройка акустооптического модулятора, которую требуется умножить (читателю) на два, чтобы получить частотную отстройку часового лазера.
6. В экспериментальной части работы отсутствует подробное описание техники и результатов стабилизации частоты лазерного излучения по модам УЛР-резонатора. В работе указаны реализованные значения стабильности частоты и ширины спектра стабилизированного лазерного излучения. Однако для полноты картины следовало бы привести характерные временные (кратковременные и долговременные) и спектральные измерения, иллюстрирующие приведенные значения.

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

Автореферат полностью соответствует содержанию и результатам диссертации.

Диссертационная работа «Прямое лазерное возбуждение часового магнитодипольного перехода 1.14 мкм в ультрахолодных атомах тулия», представленная Головизиним Артёмом Алексеевичем, является законченным научным исследованием, по своей тематике полностью соответствует заявленной специальности и удовлетворяет условиям, установленным в Положении о присуждении учёных степеней, утвержденном 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.

Доклад по материалам диссертации был представлен автором 01 ноября 2017 года на Семинаре №1071 отдела лазерной спектроскопии ИСАН.

Отзыв на диссертацию составлен старшим научным сотрудником отдела лазерной спектроскопии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН), Афанасьевым Антоном Евгеньевичем и одобрен на семинаре №1071 отдела лазерной спектроскопии ИСАН 01 ноября 2017 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](mailto: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](mailto:ryabov@isan.troitsk.ru)

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

Учёный секретарь ИСАН, кандидат физико-математических наук

/Дерминов Евгений Борисович/

