

УТВЕРЖДАЮ

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

Доктор физ.-мат. наук, профессор

В.Н. Задков

«04» сентября 2019 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Фёдоровой Елены Сергеевны

«Исследование ультрахолодных атомов тулия в оптической решётке вблизи магической длины волны», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 лазерная физика

Диссертационная работа Фёдоровой Елены Сергеевны «Исследование ультрахолодных атомов тулия в оптической решётке вблизи магической длины волны» посвящена вопросам подготовки ансамбля ультрахолодных атомов тулия для осуществления прецизионной спектроскопии внутриоболочечного магнитодипольного перехода на длине волны 1,14 мкм. Спектроскопия указанного перехода может быть использована для создания репера частоты в оптическом диапазоне.

Энергетические уровни, лежащие внутри заполненных внешних $5s^2$, $5p^6$ и $6s^2$ оболочек в лантаноидах, известны низкой чувствительностью к внешним статическим электрическим полям. Именно по этой причине атомы диспрозия, эрбия и гольмия рассматриваются в качестве одних из кандидатов для построения стандартов частоты оптического диапазона спектра. К этой группе атомов относится и рассматриваемый в диссертационной работе атом тулия, который обладает единственной вакансией на внутренней $4-f$ оболочке. Его подуровни тонкой структуры основного состояния связаны внутриоболочечным магнитодипольным переходом на длине волны 1,14 мкм с естественной шириной линии 1,2 Гц. Это позволяет говорить о перспективности использования атома тулия для создания оптического репера частоты.

Диссертационная работа Е.С. Фёдоровой является логическим продолжением цикла работ, проводимых в ФИАН, по созданию репера частоты оптического диапазона с использованием узкого магнитодипольного перехода в атоме тулия. В данной работе исследуются особенности работы магнито-оптической ловушки (МОЛ) на спектрально-узком охлаждающем переходе, загрузка и спектроскопия атомов тулия в оптической решётке вблизи магической длины волны, а так же их подготовка в состоянии с определённым значением проекции полного момента для дальнейшей прецизионной спектроскопии часового перехода.

В диссертации были получены следующие результаты:

1) Впервые экспериментально продемонстрирован двухтемпературный режим работы МОЛ, работающей на спектрально-узком переходе, связанный с конкуренцией доплеровского и суб-доплеровского механизмов охлаждения.

2) Продемонстрирована оптическая накачка атомов тулия в МОЛ на крайний магнитный подуровень основного состояния за счёт преимущественного взаимодействия с одним из охлаждающих пучков при малом параметре насыщения атомного перехода.

3) Выполнена загрузка атомов тулия в оптическую решётку, формируемую с помощью усиливающего резонатора, на длине волны вблизи магической ($\lambda=814,5$ нм) с эффективностью до 60 %.

4) По спектру параметрических резонансов атомов тулия в оптической решётке определена динамическая поляризуемость основного состояния атомов тулия на длине волны $\lambda=814,5$ нм.

5) Рассмотрен эффект дефазировки осцилляций Раби атомов тулия, локализованных в оптической решётке, при возбуждении на длине волны часового перехода.

6) Реализована оптическая накачка атомов тулия на магнитный подуровень основного состояния с нулевой проекцией момента на ось квантования ($m_F=0$) линейно-поляризованным излучением, при этом была достигнута относительная населённость 80%.

7) Измерена скорость деполаризации атомов тулия накаченных на магнитный подуровень с $m_F=0$ в одномерной оптической решётке, показано, что магнитное диполь-дипольное взаимодействие практически не ограничивает время опроса часового перехода в атомах тулия и, соответственно, минимальную достижимую ширину линии.

Результаты работы прошли широкую апробацию на российских и международных конференциях и симпозиумах и опубликованы в трёх статьях, входящих в перечень ВАК.

Структурно диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Объём диссертации составляет 121 страницу. Работа содержит 35 рисунков, 6 таблиц, список литературы состоит из 120 наименований.

Во **Введении** обсуждается актуальность работы и приведён обзор применений оптических реперов частоты. Помимо этого, во Введении сформулированы цели научного исследования, новизна, практическая значимость и защищаемые положения, а также приведены сведения об апробации результатов работы.

В **Главе 1** представлена информация о спектральных свойствах атома тулия и устройстве экспериментальной установки. Также в главе приведён краткий обзор полученных ранее результатов научной группы ФИАН по лазерному охлаждению атомов тулия и спектроскопии часового перехода. В заключении первой главы формулируются задачи, решение которых необходимо для создания оптического репера частоты на основе атомов тулия и которым посвящена работа.

Глава 2 посвящена исследованию особенностей работы МОЛ на узком охлаждающем переходе. В начале главы приведён анализ основных подходов охлаждения лантаноидов на узких спектральных линиях, а также рассмотрены особенности суб-доплеровского охлаждения атома тулия в существующей

экспериментальной установке. В результате проведённого анализа было предложено, что в существующих условиях возможно наблюдение трёх различных режимов работы МОЛ, в зависимости от значения параметра насыщения охлаждающего излучения. В режиме низкого насыщения ($S < S_{b1} = 0,002$), сила светового давления МОЛ конкурирует с силой тяжести. Экспериментально продемонстрированной особенностью такого режима является оптическая накачка атомов в МОЛ на крайний магнитный подуровень. В режиме высокого насыщения ($S > S_{b2} = 0,01$) наблюдается двухтемпературное распределение атомов в импульсном пространстве, возникающее в результате конкуренции доплеровского и суб-доплеровского механизмов охлаждения. Экспериментальные данные такого режима были сопоставлены с теоретическими расчётами, выполненными О.Н. Прудниковым, и показали хорошее согласование теории и эксперимента.

В Главе 3 описывается захват атомов тулия в оптическую решётку на длине волны близкой к магической и спектроскопия часового перехода в ней. Основным нововведением в экспериментальной части существующей установки стало добавление стабилизированного по длине оптического резонатора для излучения 814,5 нм. Это позволило увеличить глубину удерживающего потенциала до 40 мК. Продemonстрированная эффективность перезахвата атомов из МОЛ составила 60%. В созданной оптической решётке методом возбуждения параметрических резонансов была определена поляризуемость основного состояния атома тулия на длине волны 814,5 нм, а также проведена спектроскопия часового перехода в режиме спектрально разрешимых боковых колебательных частот. Помимо этого, рассмотрен эффект дефазировки осцилляций Раби, локализованных в оптической решётке атомов, и произведено сравнение экспериментальных данных с теоретическими расчётами.

В Главе 4 приведены результаты по подготовке атомов тулия в состоянии с нулевой проекцией полного момента на ось квантования. Были произведены численные расчёты динамики населённостей и анализ возможных режимов работы экспериментальной установки. Экспериментальные результаты были получены при проведении спектроскопии часового перехода. Исследовалось два варианта накачки атомов в основное состояние с $m_F = 0$ с использованием переходов с длинами волн $\lambda = 530,7$ нм и $\lambda = 418,8$ нм. В конце главы экспериментально и теоретически исследован вопрос о скорости деполяризации атомного ансамбля из состояния $m_F = 0$ и сделаны выводы о влиянии данного процесса на ширину линии часового перехода.

В **Заключении** сформулированы основные научные результаты диссертационной работы.

Полученные в диссертационной работе результаты представляют несомненный интерес и рекомендованы для использования в организациях, занимающихся лазерным охлаждением нейтральных атомов и разработкой оптических стандартов частоты на их основе, 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 следующих недостатков:

1. При описании схемы стабилизации оптического резонатора на длине волны 814,5 нм для увеличения глубины потенциала локализации отсутствует

исследование кратковременной стабильности и долговременных дрейфов системы. Метод стабилизации по склону резонанса, выбранный в качестве основного в диссертационной работе, особенно подвержен долговременным дрейфам, которые обусловлены дрейфом постоянной составляющей регистрирующей системы. Проведение долговременных исследований, в созданной экспериментальной установке, может быть подвержено дополнительной ошибке, приводящей к уширению линии часового перехода за счёт дрейфа частоты локализирующего потенциала.

2. Диссертационная работа посвящена исследованию атомов локализованных в оптической решётке на длине волны близкой к магической. Из приведённых результатов видно, что выбранная длина волны 814,5 нм не является магической. Однако в работе отсутствует анализ того, какую длину волны необходимо выбрать в последующих экспериментах для создания репера частоты.

3. В работе несколько раз встречается утверждение, что для возбуждения часового перехода использовалось излучение, интенсивность которого многократно превышала интенсивность π -импульса. Из этого делается вывод о стационарном состоянии населённостей (например, на стр. 72 в разделе 3.2.3 Боковые колебательные частоты). Данное утверждение неверно, поскольку установление стационарного значения населённостей зависит не от интенсивности возбуждающего излучения, а от параметров релаксации атомной системы, которые необходимо сравнивать с длительностью самого импульса возбуждения. Так, при исследовании боковых колебательных частот импульс возбуждения составлял всего 2 мс, что значительно меньше требуемого времени для установления стационарного значения населённостей для *свободного* атома тулия на рассматриваемых энергетических уровнях, соответствующих часовому переходу. Однако, в случае локализации атомов в оптической решётке, как показано в диссертационной работе за счёт дефазировки осцилляций Раби (рис. 3.12) выбор данного времени возбуждения оправдан. Но это происходит в первую очередь за счёт эффекта дефазировки, а не за счёт выбора правильной интенсивности.

4. В работе правильно указано, что эффект дефазировки осцилляций Раби будет приводить к уширению детектируемого спектра часового перехода. Из представленных результатов видно, что время дефазировки в эксперименте составляло несколько миллисекунд, что значительно меньше времени жизни возбуждённого состояния часового перехода. В связи с этим, в работе необходимо было привести оценки уширения детектируемой спектральной линии за счёт эффекта дефазировки осцилляций Раби, поскольку это необходимо для дальнейшего построения репера частоты.

5. При исследовании различных методов накачки атомов тулия в состоянии с нулевой проекцией полного момента на ось квантования (Глава 4) эффективность накачки определялась проведением спектральных измерений на длине волны часового перехода. При этом, из представленных результатов, видно, что ширина спектра возбуждения атомов, локализованных в оптической решётке, на порядок величины больше ширины спектра атомов, локализованных в скрещенной дипольной ловушке. Почему наблюдается такое значительное уширение в спектре поглощения атомов,

локализованных в оптической решётке? Не будет ли такое уширение влиять на точность создаваемого стандарта частоты?

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

Автореферат полностью соответствует содержанию и результатам диссертации.

Доклад по материалам диссертационной работы был представлен автором 4 сентября 2019 года на Семинаре №1093 отдела лазерной спектроскопии ИСАН.

Диссертационная работа «Исследование ультрахолодных атомов тулия в оптической решётке вблизи магической длины волны», представленная Фёдоровой Еленой Сергеевной, 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 №1093 отдела лазерной спектроскопии ИСАН 04 сентября 2019 г.

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

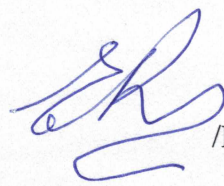
/Афанасьев Антон Евгеньевич/



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 ИСАН по теме диссертации Е.С. Федоровой в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Radiation trapping effect versus superradiance in quantum simulation of light-matter interaction, Remizov S. V., Zhukov A. A., Pogosov W. V, et al., *Laser Physics Letters*, 16(6), 065205 (2019)
2. Simple waves in a two-component Bose-Einstein condensate, Ivanov S. K., Kamchatnov A. M., *Physical Review E*, 97(4), 042208 (2018)
3. Квантовый транспорт единичного фотона через субволновое отверстие единичным атомом, А. Е. Афанасьев, П. Н. Мелентьев, А. А. Кузин, А. Ю. Калацкий, В. И. Балыкин, *ЖЭТФ*, 152, 1 (2017)
4. Frequency stabilization of a diode laser on the $5P \rightarrow 5D$ transition of the Rb atom, Kalatskiy A. Y. et al., *Laser Physics*, 27(5), 055703 (2017)
5. Measurements of parameters of transient gas flows by a diode laser absorption spectroscopy at elevated pressures and temperatures, Bolshov M. A., Kuritsyn Yu. A., Liger V. V. et al., *Optics and Spectroscopy*, 122(5), 705 (2017)
6. Photon transport through a nanohole by a moving atom, A. E. Afanasiev, P. N. Melentiev, A. A. Kuzin, A. Yu. Kalatskiy, V. I. Balykin, *New Journal of Physics*, 18, 053015 (2016)
7. Квантовое управление атомами и фотонами с помощью оптических нановолноводов, В. И. Балыкин, *УФН*, 184 (6), 656 (2014)
8. Bloch Oscillations in Optical and Zeeman Lattices in the Presence of Spin-Orbit Coupling, Kartashov Y. V., Konotop V. V., Zezyulin D. A., et al., *Physical Review Letters*, 117(21), 215301, (2016)
9. Narrow dip inside a natural linewidth absorption profile in a system of two atoms, Makarov, A. A., *Physical Review A*, 92(5), 053840 (2015)