

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук Зеленера Бориса Борисовича на диссертацию 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».

На сегодняшний день время и частота являются наиболее точно измеряемыми физическими величинами. Кроме того, использование сверхточных мобильных часов может быть полезным для регистрации гравитационных волн. Одними из самых перспективных с точки зрения точности и мобильности являются оптические часы на переходе $4f^{13}(^2F^o)6s^2 (J = 7/2, F = 4) \rightarrow 4f^{13}(^2F^o)6s^2 (J = 5/2, F = 3)$ в атомах тулия, поскольку часовой переход в тулии экранируется оптическим электроном от внешнего воздействия. Рецензируемая работа посвящена спектроскопии этого перехода, определению его частоты и её основных сдвигов.

Диссертация включает в себя Введение, три Главы, Заключение, Список литературы и два раздела приложения и изложена на 126 страницах машинописного текста.

Во Введении автор приводит краткий обзор области исследований и обосновывает актуальность рассматриваемой проблемы, перечисляет цели и задачи работы, научную новизну и практическую значимость, приводит сведения об апробации и публикации полученных результатов и формулирует защищаемые положения.

В первой главе автор описывает особенности исследуемого перехода в сравнении с часовыми переходами в некоторых других элементах и особенности спектроскопии спектрально узких переходов. Приводится описание экспериментальной установки и реализация эксперимента по регистрации Фурье-ограниченного спектра перехода.

Вторая глава посвящена дифференциальной поляризуемости исследуемого перехода. Сначала автор приводит теоретическое обоснование явления поляризуемости перехода и вводит понятие магической длины волны. Затем следует описание эксперимента по измерению динамической дифференциальной поляризуемости в широкой области спектра и поиску магических длин волн. Из экстраполяции полученных данных также получено значение статической дифференциальной поляризуемости.

Третья глава посвящена измерению частоты часового перехода в атомах тулия с учётом различных источников сдвигов частоты. Измерение производилось с использованием фемтосекундной гребёнки частот, стабилизированной по водородному мазеру. Автор рассматривает основные источники сдвигов частоты. Самым существенным из них оказался квадратичный эффект Зеемана, величина которого была определена из эксперимента. Для подавления этого сдвига было предложено использование второго часового перехода между другими сверхтонкими компонентами в атоме тулия. В конце автор приводит таблицу бюджета ошибок, из которой следует достижимость

погрешности на уровне 5×10^{-18} .

В Заключении автор перечисляет основные научные результаты работы.

В первом разделе приложения приведены основные свойства переходов в атоме тулия, используемые для охлаждения атомов и спектроскопии часового перехода. Во втором разделе приложения автор приводит результаты теоретического решения задачи двухуровневого атома под действием электромагнитного излучения с учётом расщепления на магнитные подуровни на примере часового перехода в атоме тулия.

Наиболее значимыми научными результатами диссертационной работы Д.О. Трегубова, представляющими практический и научный интерес, являются следующие:

1. Исследован контур линии часового перехода 1.14 мкм в атоме тулия в режиме Лэмба-Дике.
2. Измерены спектры разностных скалярных и тензорных поляризуемостей часового перехода 1.14 мкм в атоме тулия.
3. Экспериментально найдено положение магической длины волны 813.320(6) нм.
4. 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.
5. Произведено измерение частоты часового перехода 1.14 мкм в атоме тулия. Частота перехода составила 262 954 938 269 213(30) Гц.
6. На основании проведенных исследований был сделан вывод о том, что атомы тулия в оптической решётке могут быть использованы для создания оптических часов с относительной погрешностью на уровне 5×10^{-18} .

В качестве замечаний следует отметить отсутствие в обзоре литературы протоколов спинового сжатия использующих так называемые “одетые” состояния. Предполагаемое использование тулия в мобильных передвижных установках не подкреплено анализом существующих виброустойчивых лазеров на все используемые длины волн. В тексте диссертации не указано: контролировалось ли в ходе эксперимента количество атомов в минимумах потенциала оптической решетки, есть ли зависимость значений бюджета ошибок и точности часов от количества узлов решетки, была ли возможность охлаждения тулия на часовом переходе и на сколько это улучшит часы.

Однако перечисленные замечания отчасти имеют характер пожеланий для будущей работы и не могут существенно повлиять на положительную оценку представленной диссертации.

Диссертационная работа представляет собой законченное научное исследование и по содержанию соответствует специальности лазерная физика.

Все полученные результаты новые. Достоверность и обоснованность полученных результатов так же не вызывает сомнения, так как они были получены на современном

откалиброванном оборудовании и прошли широкую апробацию. Автореферат и опубликованные работы правильно отражают основное содержание диссертации.

Диссертация Трегубова Дмитрия Олеговича «Часовой переход в атоме тулия с низкой чувствительностью к тепловому излучению» полностью соответствует критериям Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013, а её автор заслуживает присвоения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук

Зеленер Борис Борисович,

заведующий лабораторией №1.4

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,

ул. Ижорская, д.13, стр. 2, г. Москва, 125412

тел.: 8(495)362-07-78

e-mail: bobozel@mail.ru

/Зеленер Борис Борисович/

26.08.2020

Подпись Зеленера Бориса Борисовича заверяю:

д.ф.-м.н. Амиров Равиль Хабибулович

Ученый секретарь

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,

ул. Ижорская, д.13, стр. 2, г. Москва, 125412

тел.: 8(495)485-90-09

e-mail: amirovravil@yandex.ru

/ Амиров Равиль Хабибулович/



26.08.2020

Список основных работ оппонента доктора физико-математических наук Б. Б. Зеленера по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Sautenkov V.A., Saakyan S. A., Bobrov A. A, Kudrinskiy D. A, Vilshanskaya E. V., Zelener B. B. Optical dipole trap for laser-cooled lithium-7 atoms. *Journal of Russian Laser Research*. v. 40(3): 230-6 (2019).
2. Sautenkov V. A., Saakyan S. A., Bobrov A. A., Vilshanskaya E. V., Zelener B. B., Zelener B.V. Differential two-photon spectroscopy for nondestructive temperature measurements of cold light atoms in a magneto-optical trap. *Journal of the Optical Society of America B: Optical physics*, v. 35(7):1546-51 (2018).
3. Sautenkov V.A., Saakyan S.A., Vilshanskaya E.V., Zelener B.B., Zelener B.V. Power broadening of two-photon coherent resonances on Rydberg atomic transitions in a magneto-optical trap. *Journal of Russian Laser Research* v. 38(1):91-5 (2017).
4. Sautenkov V.A, Saakyan S.A, Vilshanskaya E.V., Murashkin D. A, Zelener B.B, Zelener B.V. Quantum defects in Rydberg nD states of optically cooled Li-7 atoms. *Laser Physics* v. 26(11):115701 (2016).
5. Zelener B.B., Saakyan S.A., Sautenkov V.A., Manykin E.A., Zelener B.V., Fortov V.E. Forbidden $2P-nP$ and $2P-nF$ transitions in the energy spectrum of ultracold Rydberg lithium-7 atoms. *Journal of Experimental and Theoretical Physics* v. 122(4):645-9 (2016).
6. Zelener B.B., Saakyan S.A, Sautenkov V.A, Manykin E.A, Zelener B.V, Fortov V.E. Laser diagnostics of the energy spectrum of Rydberg states of the lithium-7 atom. *Journal of Experimental and Theoretical Physics* v. 121(6):950-4 (2015).
7. Saakyan S.A, Sautenkov V.A, Vilshanskaya E.V, Vasiliev V.V, Zelener B.B, Zelener B.V. Frequency control of tunable lasers using a frequency-calibrated λ -meter in an experiment on preparation of Rydberg atoms in a magneto-optical trap. *Quantum Electronics* v. 45(9):828 (2015).