

## ОТЗЫВ

*официального оппонента Пальчикова Виталия Геннадьевича на диссертацию Трегубова Дмитрия Олеговича «Часовой переход в атоме тулия с низкой чувствительностью к тепловому излучению», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика*

Диссертация Трегубова Д. О. посвящена решению актуальной научной проблемы – прецизионной спектроскопии спектрально-узкого перехода  $4f^{13}(^2F^o)6s^2 (J = 7/2, F = 4) \rightarrow 4f^{13}(^2F^o)6s^2 (J = 5/2, F = 3)$ , используемого в качестве «часового» перехода в стандарте частоты на атомах тулия. Важно отметить, что в отличие от детально исследованных атомарных рабочих сред для оптических стандартов частоты с применением щелочноземельных атомов (например, атомов стронция и иттербия), редкоземельный атом тулия характеризуется наличием больших магнитных моментов в основном состоянии, а также существованием узких запрещенных переходов, имеющих различную симметрию. Кроме того, относительный сдвиг частоты на часовом переходе, обусловленный влиянием эффектов излучения черного тела, как минимум на два порядка меньше, чем аналогичный сдвиг в оптических стандартах частоты на щелочноземельных атомах. Предварительные оценки бюджета неопределенностей стандарта частоты на атомах тулия, выполненные в ФИАНе, показали, что данный стандарт потенциально может воспроизводить единицы времени и частоты на уровне нескольких единиц восемнадцатого знака, что соответствует передовому мировому уровню. Таким образом, актуальность темы диссертационного исследования не вызывает сомнений, поскольку результаты, представленные в работе, могут быть использованы, например, в следующих важных областях:

-разработки высокоточных стандартов частоты нового поколения, основанные на применении современных технологий лазерного охлаждения, включая компактные и мобильные варианты оптических часов;

-фундаментальные исследования, включающие оценки вариаций фундаментальных констант во времени, а также разработки новых подходов к исследованию спектроскопических свойств атомов, ионов и молекул;

-создание пространственно-разнесенных высокостабильных источников временной синхронизации, используемых для навигационных систем, альтернативных спутниковым и т.д.

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и двух приложений. Полный объём диссертации составляет 126 страниц, включая 26 рисунков и 6 таблиц. Список литературы содержит 76 наименований.

Во введении обсуждается актуальность темы диссертации, формулируется цель и задачи работы, ее научная и практическая значимость. Там же обосновываются преимущества используемых автором диссертации подходов применительно к кругу проблем, рассматриваемых в диссертации.

Первая глава содержит детальное описание особенностей часового перехода  $4f^{13}(^2F^o)6s^2 (J = 7/2, F = 4) \rightarrow 4f^{13}(^2F^o)6s^2 (J = 5/2, F = 3)$  в атоме тулия в сравнении со спектрально-узкими переходами для других атомарных сред, например в щелочноземельных атомах. Подчеркивается низкая чувствительность часового перехода в тулии применительно к влиянию эффектов излучения черного тела. Наиболее подробно описаны механизмы первичного охлаждения атомов и вторичного охлаждения на узких переходах. В той же главе представлены основы теории, описывающей способы подавления эффекта Доплера и эффекта отдачи в условиях режима Лэмба-Дике. Там же приведены графики, описывающие контуры линии поглощения исследуемого перехода.

Вторая глава диссертации посвящена описанию результатов теоретического и экспериментального исследования для разностей поляризуемостей часового перехода в атоме тулия. В рамках теории возмущений второго порядка по взаимодействию с внешним электромагнитным полем представлены формулы для расчетов скалярных и тензорных компонент поляризуемостей рассматриваемых атомных состояний. Описан оригинальный подход к измерению «магической» длины волны электромагнитного поля, формирующей оптическую решетку, предусматривающий равенство динамических дипольных поляризуемостей начального и конечного уровней для часового перехода. В отличие от щелочноземельных атомов, в атоме тулия были обнаружены две «магические» длины волны, представляющие экспериментальный интерес. Представлены и проанализированы спектры для разностей динамических поляризуемостей в диапазоне длин волн от 800 нм до 850 нм и для диапазона 800 нм и 1100 нм. Применение разработанного автором подхода к измерению зависимостей поляризуемостей от различных значений интенсивностей лазерного поля решетки, позволило в работе провести измерение «магической» длины волны с весьма высокой степенью точности: - 813.320 (6) нм, что удовлетворительно согласуется с теоретическими оценками в пределах 2 нм. Статические поляризуемости для рассматриваемых состояний были получены методом экстраполяции динамических поляризуемостей на нулевой частоте электромагнитного поля.

Наконец, в третьей главе диссертации были представлены результаты измерений частоты часового перехода и произведены оценки бюджета неопределенностей стандарта

частоты на атомах тулия. В основу схемы измерений положен фемтосекундный титан-сапфировый лазер с длительностью импульсов 14.5 фс и частотой повторения 980 МГц. Определение частоты часового перехода было произведено с помощью оптической гребенки частот. Источник опорного сигнала (часовой лазер) был стабилизирован с применением резонатора Фабри-Перо с высокой добротностью. Поскольку в условиях эксперимента часовой лазер и фемтосекундный титан-сапфировый лазер были пространственно разнесены, то для связи между ними использовалось оптическое волокно.

Главными результатами этой Главы являются измеренные значения частоты лазера и частоты часового перехода. Частота лазера определялась с помощью оптической гребенки, а частота часового перехода – по спектру возбуждения. Хотя относительная неопределенность частоты часового перехода составила несколько единиц четырнадцатого знака, тем не менее этот результат является важным шагом в достижении предельных метрологических характеристик стандарта частоты на атомах тулия, обоснованных автором в Главе 3. В частности, им представлено новое значение для вклада поправок на излучение черного тела, которое, как минимум, на два порядка ниже, если сравнивать их с аналогичными вкладами в стандартах частоты при использовании щелочноземельных атомов в качестве рабочих сред. На основании анализа бюджета неопределенностей в Главе 3, автор делает вывод о возможности создания оптических часов на атомах тулия с относительной погрешностью порядка пяти единиц восемнадцатого знака.

В заключении суммируются основные выводы и итоги работы, а также приведён перечень основных результатов.

#### **Замечания по содержанию диссертационной работы:**

1. В главе 3 автор отмечает, что калибровка водородного мазера при использовании сигналов навигационной системы ГЛОНАСС вносит доминирующий вклад в погрешность измеряемой частоты часового перехода. Если в данном контексте под калибровкой подразумевается внесение поправок на линейный дрейф частоты мазера, то приведет ли применение более точной калибровки (например, при использовании цезиевого фонтана для этой цели) к автоматическому росту точности стандарта частоты на атомах тулия, причем сразу на несколько порядков?

2. Требуется пояснение утверждение автора о существовании нулевого сдвига частоты при любой интенсивности излучения в первом приближении (раздел 2.2 Главы 2 диссертации). Дело в том, что при росте интенсивности поля решетки становятся существенными нелинейно-оптические эффекты высшего порядка (ангармоничность

колебательного движения атомов в оптической решетки, вклад мультипольных поправок высшего порядка, гиперполяризуемости атомных состояний), которые вовсе не равны нулю при выборе магической длины волны в дипольном приближении. Разумеется, их относительный вклад в частоту часового перехода на несколько порядков меньше поправок дипольного приближения, однако их необходимо последовательно учитывать, если речь идет о точностях измерений частоты на уровне восемнадцатых знаков. По этой причине их следует внести в таблицу бюджета неопределенностей предлагаемых оптических часов (Глава 3) наряду с частотными поправками, обусловленными влиянием источника опорного сигнала (часового лазера).

3. Среди мелких замечаний отметим следующие. Вместо словосочетания «отклонение Аллана» в литературе обычно используется термин «девиация Аллана». Наряду с употреблением словосочетания «дифференциальные поляризуемости» в тексте диссертации используется также термин «разностные поляризуемости» (см., например, Главу 3 и стр. 18 автореферата). Имеются также замечания по поводу употребления терминов «ошибки», «неточность», «погрешность» и «неопределенность» (Глава 3, в частности, таблица 5).

Сделанные замечания носят, скорее, рекомендательный характер и не затрагивают основные положения диссертационной работы, а также общую положительную оценку диссертации.

Достоверность результатов диссертационной работы Трегубова Д. О. подкреплена согласованностью с данными других авторов, полученных в рамках независимых альтернативных подходов, а также с результатами теоретических расчетов. Полученные в работе результаты, основные положения и выводы являются обоснованными. Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертационной работы.

К достоинствам диссертации следует отнести четкость и ясность изложения представленных в ней результатов, а также наличие значительного числа ссылок на работы других авторов. Основные результаты автора докладывались на представительных конференциях и семинарах, своевременно опубликованы в отечественной и зарубежной печати.

### **Заключение**

Оценивая диссертационную работу Трегубова Дмитрия Олеговича в целом, можно сделать следующее заключение:

- тема диссертации актуальна, диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны положения, совокупность которых можно квалифицировать

как решение важной задачи в области прецизионной спектроскопии часового перехода 1:14 мкм в атоме тулия в оптической решётке на магической длине волны с оценкой основных источников систематических сдвигов частоты на этом переходе;

- результаты диссертации обладают научной новизной, практической значимостью, прошли апробацию, в достаточной степени представлены в научных трудах автора;

- результаты диссертационных исследований имеют перспективу использования при разработке стандартов частоты нового поколения при использовании нейтральных атомов тулия в качестве рабочей среды;

- диссертация соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.13 г, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Трегубов Дмитрий Олегович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

Официальный оппонент:

д.ф.-м.н. Пальчиков Виталий Геннадьевич,

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»),

Российская Федерация, 141570, Московская область, город Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево, промзона ФГУП «ВНИИФТРИ», корпус 28.

тел.: 8-495-660-57-24

e-mail: [vitpal@mail.ru](mailto:vitpal@mail.ru)

  
26.08.20

/Пальчиков Виталий Геннадьевич/

Подпись Пальчикова Виталия Геннадьевича удостоверяю:

Бойко Ирина Валентиновна,

ВРИО начальника отдела кадров Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ»),

Российская Федерация, 141570, Московская область, город Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево, промзона ФГУП «ВНИИФТРИ», корпус 45.

тел.: 8-495-660-57-24



/ Бойко Ирина Валентиновна. /

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

1. M.N. Skvortsov, S.M. Ignatovich, V.I. Vishnyakov, N. L. Kvashnin, I.S. Mesenzova, D.V. Brazhnikov, V.A. Vasil'ev, A. V. Taichenachev, V.I. Yudin, S.N. Bagayev, I.Y. Blinov, V.G. Pal'chikov, Yu. S. Samokhvalov, D.A. Parekhin, Miniature quantum frequency standard based on the phenomenon of coherent population trapping in vapours of Rb-87 atoms. *Quantum Electronics*. v. 50(6):576 (2020).
2. Операционная компенсация неопределенностей высших порядков в стандартах частоты на атомах магния и кальция в оптических решетках, В. Д. Овсянников, С. И. Мармо, С. Н. Мохненко, В. Г. Пальчиков, *Квантовая электроника*, т. 48(5), 419-424, 2018
3. Нелинейно-оптические эффекты высшего порядка в оптических решеточных часах, В. Д. Овсянников, С. И. Мармо, С. Н. Мохненко, В. Г. Пальчиков, *Квантовая электроника*, т. 47(5), 412–420, 2017
4. V.N.Baryshev, D.S. Kupalov, A.V. Novoselov, M.S. Aleinikov, A.I. Boiko, V.G. Pal'chikov, I.Y. Blinov, Compact Quantum Frequency Standard Using a Rubidium Vapor Cell With Pulsed Optical Pumping and Microwave Excitation Using the Ramsey Scheme. *Measurement Techniques*. v. 59(12):1286-90 (2017)
5. V.D. Ovsiannikov, S.I. Marmo, V.G. Palchikov, H. Katori, Higher-order effects on the precision of clocks of neutral atoms in optical lattices. *Physical Review A*. v. 93(4):043420 (2016)