

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук Пальчикова Виталия Геннадьевича на диссертацию Мишина Дениса Андреевича «Бихроматическое возбуждение часовых переходов в атомах тулия для компенсации квадратичного эффекта Зеемана», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика

Актуальность темы диссертационного исследования.

Диссертация Мишина Дениса Андреевича посвящена актуальной на сегодняшний день проблематике – созданию высокостабильных мобильных стандартов частоты с применением бихроматического возбуждения часовых переходов с целью компенсации квадратичного эффекта Зеемана, являющегося одним из основных источников неисключенной систематической погрешности измерений частоты. Помимо фундаментальной значимости, эти исследования важны и в метрологической практике – в частности, для реализации сличений пространственно удаленных стандартов частоты. В сравнении с промышленно выпускаемыми перевозимыми стандартами частоты на основе водородных мазеров (АО «Время-Ч», Нижний Новгород) вариант мобильного стандарта частоты на атомах тулия, обсуждаемый в диссертационной работе, обладает существенными преимуществами, среди которых следует особо выделить следующие:

- более высокое быстродействие при заданном интервале времени измерений;

- отсутствие линейного дрейфа частоты;

- более высокие характеристики нестабильности при малых и больших интервалах времени измерений;

Среди наиболее важных результатов диссертации следует отметить следующие:

- формулировка и экспериментальная реализация метода компенсации квадратичного эффекта Зеемана за счет формирования синтетической частоты часового перехода;

- проведение сличений и оценка метрологических характеристик стандартов частоты на основе холодных атомов тулия.

Данная тематика исследований традиционно находится в фокусе внимания ФИАН уже на протяжении многих лет. Часть достижений в этой области принадлежит лично автору и составляет предмет его диссертационной работы.

Общая характеристика диссертации.

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, 3-х глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 114 страниц текста, включая 39 рисунка и 2 таблиц. Список литературы включает 103 наименований.

Во вводной части диссертации обосновывается актуальность диссертационной работы; там же приведены формулировки цели и задачи диссертационного исследования, перечислены положения, выносимые на защиту.

В первой Главе диссертации изложен оригинальный подход автора для решения задачи компенсации квадратичного эффекта Зеемана в стандарте частоты на холодных атомах тулия. Автором предложено введение дополнительного возбуждения часового перехода между другими компонентами сверхтонкой структуры. В частности, предлагается синхронное возбуждение перехода 3-2 дополнительно к основному переходу 4-3 с формированием синтетической частоты, равной полусумме частот переходов 4-3 и 3-2. Экспериментальная реализация данного подхода основана на использовании оптической накачки излучения на длине волны 418.8 нм. Поскольку переход 3-2 обладает противоположной чувствительностью к эффекту Зеемана второго порядка, то в синтетической частоте перехода происходит полная компенсация данного эффекта. В этой Главе детально описаны особенности эксперимента, связанные с фиксацией эффективности оптической накачки, детектирования эффективности возбуждения двух часовых переходов за один цикл измерений и т.д.

Основное содержание второй Главы диссертации связано с описанием реализации метода компенсации квадратичного эффекта Зеемана на основе построения эффективной синтетической частоты часового перехода. В частности, описаны методы контроля магнитного поля с системой стабилизации направления магнитного поля. Самостоятельный интерес представляет анализ применяемых методов бихроматической спектроскопии для реализации оптических часов на холодных атома тулия, захваченных в движущуюся оптическую решетку.

Наконец, в третьей Главе диссертации в рамках техники бихроматического опроса проведено сличение двух стандартов частоты на холодных атомах тулия. Приведены результаты измерения дифференциальных частот для каждого стандарта частоты (лабораторный вариант и его мобильная модификация), а также девиации Аллана синтетической частоты между двумя системами. На основе результатов

сличений автор делает вывод о том, что уже на современном этапе оптический стандарт частоты на атомах тулия по ряду характеристик превосходит микроволновые стандарты частоты, что в свою очередь, доказывает эффективность применения мобильных стандартов частоты на атомах тулия.

В Заключение сформулированы основные научные результаты и выводы.

Новизна научных положений и результатов. Новизна научных результатов отражена в тексте диссертации, а также в автореферате, и сводится, в основном, к следующему:

В диссертации впервые в литературе предложен и реализован метод компенсации квадратичного эффекта Зеемана, что позволило существенно упростить и унифицировать процедуру формирования бюджета неопределенностей стандарта частоты на атомах тулия и повысить его метрологические характеристики. Впервые проведены сличения двух стандартов частоты на атомах тулия с оценкой характеристик этих сличений.

Теоретическая и практическая значимость результатов диссертационного исследования заключается в разработке и реализации достаточно универсальных методов расчета спектроскопических характеристик атомов тулия (эффекты Штарка и Зеемана). Результаты диссертационного исследования могут быть положены в основу создания перевозимого (мобильного) стандарта частоты на холодных атомах тулия.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивается постановкой задач диссертационного исследования, использованием современных методов математического моделирования и статистической обработки результатов исследований, проведением экспериментальных исследований на современной аппаратуре, проведением сопоставительного анализа с данными авторов, полученными в рамках других альтернативных подходов, а также с имеющимся экспериментом.

Замечания по диссертационной работе:

1. В таблице 1 (стр.15) диссертационной работы отсутствует поправка на гравитационный сдвиг частоты, хотя во вводной части диссертации отмечается важность этой поправки для решения задач релятивистской геодезии и ортометрического определения высоты.
2. В третьей Главе диссертации отсутствуют данные для вариации Аллана на суточном интервале времени измерений.

3. Из текста диссертации трудно понять применимость подхода автора в задачах компенсации квадратичного эффекта Земмана для других атомов и ионов. Например, в стандарте частоты на ионах стонция также используется формирование систематических частот часового перехода, однако полной компенсации квадратичного эффекта Земмана не наблюдается.
4. В диссертации встречаются устаревшие термины и определения, относящиеся к результатам обработки результатов измерений, например, «относительная ошибка измерений», «бюджет ошибок», стр.15 диссертации. Термины и определения, используемые в современной метрологии, представлены, например, в следующих изданиях: ГОСТ 34100.3-2017 «Международный стандарт. Неопределенность измерений. Часть 3.», ГОСТ 8.567-2014 «Измерения времени и частоты. Термины и определения»

Перечисленные замечания не снижают общую высокую положительную оценку диссертационной работы и носят, скорее, рекомендательный характер.

Результаты диссертационного исследования прошли необходимую апробацию, были представлены на представительных конференциях в России и за рубежом, своевременно опубликованы в журналах, рекомендованных для публикации результатов диссертационных работ.

Автореферат соответствует содержанию и структуре диссертации.

Судя по автореферату и тексту диссертации, следует отметить целостность подхода автора к решению поставленных задач. К достоинствам диссертационной работы следует также отнести грамотное и корректное изложение полученных результатов, а также глубину проведенного автором научного анализа.

Заключение по диссертационной работе. Диссертация Мишина Дениса Андреевича «Бихроматическое возбуждение часовых переходов в атомах тулия для компенсации квадратичного эффекта Земмана» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней,

утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 11.09.2021), а ее автор, Мишин Денис Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика,

Официальный оппонент:

д.ф.-м.н. , Пальчиков Виталий Геннадьевич,
главный научный сотрудник Главного метрологического центра Государственной службы времени и частоты (ГМЦ ГСВ(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: palchikov@vniiftri.ru

/ Пальчиков В.Г./

16.03.26

Подпись Пальчикова Виталия Геннадьевича заверяю:

Фролова Ирина Александровна,

Специалист по персоналу 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 11

Тел. 8-495-546-3021

e-mail: fia@vniiftri.ru

/ Фролова Ирина Александровна /

Список основных трудов официального оппонента доктора физико-математических наук В.Г. Пальчикова по тематике защищаемой диссертации за последние пять лет

1. Юдин, В. И., Тайченачев, А. В., Прудников, О. Н., Басалаев, М. Ю., Гончаров, А. Н., Чепуров, С. В., & Пальчиков, В. Г. (2025). Оптические часы, основанные на двухфотонной спектроскопии ядерного перехода в ионе ^{229}Th в монохроматическом поле. *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*, 121(5), 365-374.
2. Юдин, В. И., Прудников, О. Н., Тайченачев, А. В., Басалаев, М. Ю., Капуста, Д. Н., Гончаров, А. Н., Радченко М. Д., Пальчиков В. Г., Жу Л. & Жан, М. Ш. (2025). Сдвиг в атомных интерферометрах, вызванный асимметрией формы линии. *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*, 122(11), 732-737.
3. Юдин, В. И., Басалаев, М. Ю., Тайченачев, А. В., Прудников, О. Н., Радченко, М. Д., & Пальчиков, В. Г. (2025). Световые сдвиги резонансов когерентного пленения населенностей в периодически-модулированном лазерном излучении. *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*, 122(3), 139-146.
4. Yudin, V. I., Taichenachev, A. V., Basalaev, M. Y., Prudnikov, O. N., Pal'Chikov, V. G., Zanon-Willette, T., & Bagayev, S. N. (2024). Theory of nonlinear sub-Doppler spectroscopy taking into account atomic-motion-induced density-dependent effects in a gas. *Physical Review A*, 109(4), 043504.
5. Glukhov, I. L., Kamenski, A. A., Kornev, A. S., Manakov, N. L., Ovsiannikov, V. D., & Palchikov, V. G. (2024). Transitions between triplet Rydberg states of the alkaline-earth-metal atoms for precision measurements of microwave fields. *Journal of the Optical Society of America B*, 41(9), 1953-1959.
6. Каменский, А. А., Глухов, И. Л., Корнев, А. С., Манаков, Н. Л., Овсянников, В. Д., & Пальчиков, В. Г. (2023). СВЧ радиационные переходы между триплетными ридберговскими состояниями атомов щелочноземельно-подобных элементов группы IIb (Zn, Cd, Hg) и иттербия Yb. *ЖЭТФ*, 166, 490.