

## ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата физико-математических наук *Афанасьева Антона Евгеньевича* на диссертацию *Мишина Дениса Андреевича* «**Бихроматическое возбуждение часовых переходов в атомах тулия для компенсации квадратичного эффекта Зеемана**», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19-Лазерная физика

Диссертационная работа Мишина Д.А. посвящена исследованию магнито-дипольных часовых переходов на длине волны 1.14 мкм в атоме тулия. Отличительной особенностью данных переходов является низкая чувствительность частоты к тепловому излучению окружения — одному из наиболее трудных для контроля систематических эффектов. Это позволяет рассматривать использование атомов тулия в качестве платформы для создания транспортируемых оптических часов. Один из основных систематических сдвигов частоты часовых переходов в атоме тулия обусловлен квадратичным эффектом Зеемана. В диссертации представлено подробное исследование метода синтетической частоты, направленного на подавление влияния магнитного поля, и экспериментально подтверждена эффективность данного подхода.

Актуальность работы связана с развитием области оптических стандартов частоты и поиском новых перспективных квантовых систем, к числу которых относится атом тулия. Уникальные характеристики исследуемых часовых переходов обуславливают практическую значимость полученных результатов для разработки транспортируемых оптических часов, востребованных в задачах релятивистской геодезии и усовершенствования навигационных систем.

В диссертационной работе были получены следующие основные результаты:

- 1) Разработана схема монохроматической оптической накачки на центральные магнитные подуровни в структуре двух сверхтонких компонент основного состояния  $|F = 4, m_F = 0\rangle$  и  $|F = 3, m_F = 0\rangle$ , которые являются начальными для спектроскопии часовых переходов.

- 2) Измерены чувствительности частот часовых переходов и синтетической частоты к магнитному полю.
- 3) Реализована долговременная стабилизация частоты излучения к резонансам в атомах тулия в бихроматическом режиме опроса
- 4) Продемонстрирована эффективность метода синтетической частоты для подавления квадратичного эффекта Зеемана.
- 5) Проведено сличение двух тулиевых оптических часов в синхронном режиме с использованием разработанной техники синтетической частоты.
- 6) Рассмотрена схема непрерывных оптических часов на атомах тулия с использованием метода синтетической частоты.

Все основные результаты работы являются новыми, в частности, для атомов тулия впервые продемонстрирована бихроматическая спектроскопия двух часовых переходов и формирование синтетической частоты. Научные положения и выводы диссертационной работы научно обоснованы. Достоверность результатов подтверждается их воспроизводимостью и согласованностью, в том числе, с результатами других научных коллективов. Результаты прошли широкую апробацию на всероссийских и международных конференциях, и изложены в 5 публикациях в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus.

Диссертация состоит из Введения, трёх Глав, Заключение и Списка литературы. Объём диссертации составляет 114 страниц. Работа содержит 39 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 103 наименования.

Во **Введении** обсуждается развитие оптических стандартов частоты, описываются основные преимущества атомов тулия для данной области и формулируются цель, научная новизна, практическая значимость и положения, выносимые на защиту. Также приведены данные об апробации результатов работы и список публикаций.

**Глава 1** посвящена описанию экспериментальной установки, метода детектирования населённости атомов на двух подуровнях  $|F=4, m_F=0\rangle$  и  $|F=3, m_F=0\rangle$  сверхтонких компонент основного состояния, подготовке атомов тулия в начальных состояниях, а также характеристики метода измерения вероятностей возбуждения часовых переходов в эксперименте.

**Глава 2** описывает основные систематические эффекты, оказывающие влияние на частоты часовых переходов в эксперименте. Особое внимание уделено методике контроля магнитного поля в ходе эксперимента. Приводятся результаты измерения чувствительности частот часовых переходов и синтетической частоты к магнитному полю и демонстрируется эффективность метода синтетической частоты для подавления квадратичного эффекта Зеемана. Глава завершается предложением применения метода синтетической частоты в новой для области концепции оптических часов, работающих в непрерывном режиме, и приводятся расчёты, демонстрирующие преимущество такого подхода.

**Глава 3** посвящена сравнению двух тулиевых оптических часов в синхронном режиме измерений. В ней рассмотрены основные особенности экспериментальных установок, представлены результаты моделирования, а также приведены непосредственно экспериментальные данные.

В **Заключении** сформулированы основные научные результаты диссертации.

Работа не лишена ряда недостатков, которые перечислены ниже:

1. Диссертационная работа изобилует жаргонизмами, которые недопустимы в научном изложении результатов работы.
2. В диссертации для сравнения атомов тулия и стронция не достаёт характерного бюджета ошибок для атомов стронция, аналогичного Таблице 1, приведённой для атомов тулия. В первую очередь не достаёт значения чувствительности к квадратичному эффекту Зеемана.
3. Методика измерения вероятности возбуждения часовых переходов (Глава 1.5) предполагает сканирование частоты часового лазера. При взаимодействии атомов с часовым импульсом используется  $\pi$ -импульс. При этом в модели не учитывается зависимость обобщённой частоты Раби от отстройки от резонанса.
4. В диссертационной работе не хватает общей схемы системы цифровой стабилизации частоты, для более полного понимания её работы.
5. При исследовании системы цифровой стабилизации частоты производилось изменение магнитного поля (рис.15). Дрейф наблюдается только при параметрах, соответствующих магнитному полю 231 мГс.

При переключении магнитного поля в первоначальное значение, дрейф исчезает, но сохраняется “накопленная” разница частот. Объяснение данному эффекту в диссертационной работе не приведено.

6. Из диссертационной работы не до конца ясно, компенсировалось ли лабораторное магнитное поле? С одной стороны используется тонкая подстройка угла магнитного поля в процессе измерений, с другой, не указываются характерные лабораторные магнитные поля в области эксперимента и не исследована их динамика флуктуаций. Помимо этого, не приведены параметры компенсационных катушек, которые используются в эксперименте.
7. На рисунке 23 приведена зависимость сдвигов частоты от магнитного поля  $\Delta\nu_{43}$  и  $\Delta\nu_{32}$ . При нулевом магнитном поле, в соответствии с выражением (10), эти величины должны быть нулевыми. Однако, на графике видно иное. Более того, функции сдвига частоты от магнитного поля пересекают ось абсцисс. Существует ненулевое магнитное поле, при котором эти сдвиги меняют знак, что не соответствует выражению (10). Самое интересное, что величина магнитного поля, при котором сдвиги равны нулю, одинакова для  $\Delta\nu_{43}$  и  $\Delta\nu_{32}$ .
8. Из текста диссертационной работы не понятно, почему при осуществлении спектроскопии атомных переходов в движущейся оптической решётке возникает набор линий (рис.26).
9. При работе непрерывных атомных часов предполагается выбор симметричных рабочих точек на контурах возбуждения (рис.26). Однако, не до конца понятно, как это сделать в условиях реального эксперимента при наличии шума.
10. На Рис. 27 представлены расчёты нестабильности частоты для двух режимов заселённости оптической решётки. Данный расчёт в диссертационной работе описан недостаточно подробно.
11. В диссертационной работе не до конца ясно описан механизм того как флуктуации относительных фаз излучения часового лазера в области каждой из двух установок влияет на нестабильность относительной частоты.

Приведённые замечания не снижают научной ценности представленных результатов и общей положительной оценки диссертационной работы.

Автореферат соответствует содержанию диссертации и достаточно полно отражает её результаты.

Диссертационная работа «Бихроматическое возбуждение часовых переходов в атомах тулия для компенсации квадратичного эффекта Зеемана», представленная Мишиным Денисом Андреевичем, является завершённым научным исследованием, по своей тематике полностью соответствует заявленной специальности и удовлетворяет требованиям, 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 1.3.19-Лазерная физика.

**Официальный оппонент:**

к.ф.-м.н Афанасьев Антон Евгеньевич,

старший научный сотрудник Лаборатории лазерной спектроскопии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института спектроскопии Российской академии наук (ИСАН)

Российская Федерация, 108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, д. 5, Институт спектроскопии РАН

Тел.: +7(965) 376-99-78

e-mail: afanasiev@isan.troitsk.ru

А.Е. Афанасьев/

25.02.2026

**Подпись Афанасьева Антона Евгеньевича заверяю:**

Кильдиярова Римма Рифовна

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института спектроскопии Российской академии наук (ИСАН), к.ф.-м.н.

Российская Федерация, 108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, д. 5, Институт спектроскопии РАН

Тел.: +7 (495) 851-02-21

/Р.Р. Кильдиярова/

Список основных трудов официального оппонента кандидата физико-математических наук А.Е. Афанасьева по тематике защищаемой диссертации за последние пять лет

1. Афанасьев А. Е., Скакуненко П. И., Балыкин В. И., Атомный гравиметр на основе атомного фонтана и микроволнового перехода //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2024. – Т. 119. – №. 2. – С. 89-93.
2. А. П. Вялых, П. И. Скакуненко, М. В. Шишова, А. В. Семенко, А. Е. Афанасьев, Г. С. Белотелов, Д. В. Сутырин, В. И. Балыкин, Атомный чип и дифракционная решетка для лазерного охлаждения атомов иттербия //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2024. – Т. 119. – №. 4. – С. 273-282.
3. П. И. Скакуненко, Д. В. Быкова, А. Е. Афанасьев, В. И. Балыкин, Эффективная загрузка атомного чипа из низкоскоростного атомного пучка //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2024. – Т. 119. – №. 1. – С. 20-26.
4. А.Е. Афанасьев, П.И. Скакуненко, Д.В. Быкова, А.С. Калмыков, В.И. Балыкин, Атомный чип //Успехи физических наук. – 2024. – Т. 194. – №. 11. – С. 1146-1158.
5. P. Skakunenko, D. Vykova, A. Afanasiev, A. Kalmykov, R. Kirtaev, V. Balykin //Chinese Optics Letters. – 2024. – Т. 22. – №. 6. – С. 060201.
6. Быкова Д. В., Афанасьев А. Е., Балыкин В. И. Острая фокусировка атомного пучка с использованием доплеровского и суб-доплеровского механизмов лазерного охлаждения в двумерной магнито-оптической ловушке //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2023. – Т. 118. – №. 1. – С. 7-13.
7. A. E. Afanasiev, A. S. Kalmykov, R. V. Kirtaev, A. A. Kortel, P. I. Skakunenko, D. V. Negrov, V. I. Balykin, “Single-layer atom chip for continuous operation: Design, fabrication and performance”, Optics & Laser Technology, 148, 107698 (2022).
8. А. Е. Афанасьев, В. И. Балыкин, «Нулевой оптический сдвиг частоты возбуждения атома, локализованного в импульсном лазерном поле», Квантовая электроника, 51(3), 248–253 (2021).