

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Институт
лазерной физики Сибирского отделения
Российской академии наук
Доктор физ.-мат. наук

О.Н. Прудников

«18» февраля 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу 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 Дениса Андреевича «Бихроматическое возбуждение часовых переходов в атомах тулия для компенсации квадратичного эффекта Зеемана» посвящена исследованию магнито-дипольных переходов на длине волны 1.14 мкм в атоме тулия. Эти переходы планируется использовать для создания транспортируемого высокостабильного квантового стандарта частоты в оптическом диапазоне.

Одним из ключевых параметров квантовой системы для разработки транспортируемых оптических стандартов частоты (оптических часов) является её чувствительность к внешним возмущениям. Для часового перехода в атомах тулия предсказана и экспериментально подтверждена низкая чувствительность частоты перехода к тепловому излучению окружающей среды – одному из наиболее трудных для контроля и характеристики систематических эффектов. В то же время частота данного перехода подвержена сдвигу, вызванному взаимодействием с магнитным полем из-за квадратичного эффекта Зеемана. Этот сдвиг, однако, может быть

существенно подавлен для синтетической частоты, равной полусумме частот двух часовых переходов между различными компонентами сверхтонкой структуры. В диссертационной работе представлены эксперименты по реализации бихроматической спектроскопии с использованием метода синтетической частоты, которые подтверждают работоспособность подхода и позволяют подавить лидирующий систематический сдвиг в оптических часах на основе атомов тулия более чем на три порядка.

Помимо демонстрации высокой эффективности метода синтетической частоты, в работе представлены результаты первого в мире синхронного сличения двух оптических стандартов частоты на основе атомов тулия. Полученные в диссертации результаты позволяют перейти к анализу более тонких систематических эффектов в рамках характеристики тулиевых оптических часов.

Актуальность проведённых исследований обоснована стремительным развитием области оптических стандартов частоты, в частности планами по переопределению секунды в Международной системе единиц (СИ) на основе оптических часов. В рамках этого направления постоянно идёт поиск новых перспективных квантовых систем, и атомы тулия, исследованию которых посвящена диссертационная работа, являются одной из них. Ключевым преимуществом часовых переходов в атомах тулия является низкая чувствительность их частоты к тепловому излучению окружения - фактору, который особенно критичен при создании транспортируемых оптических часов. Возможность создания такого компактного высокостабильного оптического стандарта частоты востребована в широком круге как фундаментальных (проверки ОТО, поиск вариаций фундаментальных констант и др.), так и прикладных (навигация, гравитационное картирование, релятивистская геодезия и др.) задач, чем и обусловлена практическая значимость проводимых исследований.

В диссертационной работе были получены следующие основные научные результаты:

- 1) Продемонстрирована одновременная подготовка атомов тулия в двух начальных состояниях $m_F = 0$ с помощью метода монохроматической оптической накачки на длине волны 418.8 нм.
- 2) Разработан и охарактеризован метод измерения населённостей сверхтонких подуровней как основного, так и возбужденного состояний часовых переходов.

- 3) Продемонстрировано бихроматическое возбуждение исследуемых часовых переходов.
- 4) Продемонстрировано подавление чувствительности синтетической частоты к квадратичному эффекту Зеемана по сравнению с частотой каждого из часовых переходов в отдельности.
- 5) Схема формирования синтетической частоты адаптирована для концепции непрерывных оптических часов на основе атомов, захваченных в движущуюся оптическую решётку. Показано, что для синтетической частоты подавлены основные систематические сдвиги предлагаемой концепции.
- 6) Проведено синхронное сличение двух оптических часов на основе атомов тулия с использованием техники синтетической частоты.

Все научные результаты, представленные в работе, являются новыми. Их достоверность обеспечивается применением сертифицированного оборудования и отработанных методик исследования.

Результаты работы 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.

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

Во **Введении** Д.А. Мишин обсуждает статус развития стандартов частоты в мире, уделяя особое внимание перспективам создания транспортируемых оптических часов и обосновывая преимущества использования атомов тулия для решения этой задачи. Во введении также сформулированы цель, научная новизна, практическая значимость и положения, выносимые на защиту. Приведены данные об апробации результатов работы и список публикаций.

В **Главе 1** приведено описание состояния эксперимента на момент начала описываемых исследований и рассмотрены основные элементы экспериментальной установки. В главе также охарактеризована процедура считывания населённостей сверхтонких подуровней основного состояния и описан эксперимент по одновременной подготовке двух начальных состояний методом монохроматической оптической накачки. Глава

завершается описанием метода измерения вероятностей возбуждения исследуемых часовых переходов за один цикл измерений и демонстрацией бихроматической спектроскопии.

Глава 2 начинается с теоретического описания основных систематических эффектов, оказывающих влияние на частоты часовых переходов в атомах тулия, захваченных в оптическую решётку: эффекта Зеемана (обусловленного взаимодействием с магнитным полем, задающим ось квантования) и динамического эффекта Штарка (вызванного взаимодействием с излучением оптической решетки). Далее в главе приведены основные определения и введён формализм дисперсии Аллана, а также описана схема цифровой стабилизации частот, используемая для долговременного усреднения результатов эксперимента и проведения сравнительных измерений при различных значениях магнитного поля. Обоснована необходимость стабилизации направления магнитного поля и показана ее техническая реализация путем модификации системы цифровой стабилизации. В главе также представлены результаты эксперимента, подтвердившие низкую чувствительность синтетической частоты к эффекту Зеемана. Глава завершается адаптацией метода синтетической частоты для концепции непрерывных оптических часов на основе атомов, захваченных в движущуюся оптическую решётку.

Глава 3 посвящена сравнению двух тулиевых оптических часов с использованием техники синтетической частоты. В начале главы приведены основные характеристики второй разработанной «компактной» системы, а также описан усовершенствованный метод подготовки начальных состояний с использованием возбуждения микроволнового перехода между сверхтонкими подуровнями основного состояния. Далее приведены результаты численного моделирования сличения двух экспериментальных установок и анализ вклада различных источников шумов, после чего представлены результаты экспериментального сличения.

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

Полученные в диссертационной работе результаты указывают на возможность создания транспортируемых оптических часов на основе атомов тулия, и могут найти применение в области квантовых стандартов частоты и прецизионных метрологических измерений.

Полученные результаты также могут быть использованы в институтах и университетах, проводящих исследования в области квантовых стандартов

частоты и физики ультрахолодных атомов, таких как: Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ), Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЛФ СО РАН), Институт спектроскопии Российской академии Наук (ИСАН), Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (ИОФАН), Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук (ИФП СО РАН), Московский государственный университет (МГУ), Новосибирский государственный университет (НГУ).

По тексту диссертации и автореферата имеется ряд замечаний критического характера, которые перечислены ниже:

1. В четвертом защищаемом положении речь идет о сличении двух оптических часов на основе атомов тулия. Это утверждение представляется не вполне методически верным, поскольку из материалов диссертации следует, что при синхронном сличении двух тулиевых систем использовался один и тот же часовой лазер. Таким образом, не было проведено сличение двух полностью независимых тулиевых оптических стандартов частоты.
2. При оценке количества ультрахолодных атомов в различных состояниях по сигналам резонансной флуоресценции в диссертации использовалась формула для скорости спонтанного испускания фотонов невырожденной двухуровневой системой. При этом реальные уровни атома тулия задействованные в процессе резонансной флуоресценции вырождены по проекциям полного углового момента и находятся в ненулевом магнитном поле. В этих условиях, как известно, скорость спонтанного испускания будет зависеть от поляризации света и ориентации магнитного поля. В тексте диссертации не обсуждаются погрешности, которые возникают из-за пренебрежения этими факторами.

Приведённые замечания не снижают высокой научной ценности представленной работы и значимости её вклада для развития области квантовых стандартов частоты на ультрахолодных атомах.

Автореферат полностью соответствует содержанию и результатам диссертации.

Диссертационная работа «Бихроматическое возбуждение часовых переходов в атомах тулия для компенсации квадратичного эффекта Зеемана», представленная Мишиным Денисом Андреевичем, 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 1.3.19-Лазерная физика.

Доклад по материалам диссертационной работы был представлен автором 10 февраля 2026 года на открытом семинаре №2 Теоретической лаборатории ИЛФ СО РАН.

Отзыв на диссертацию составлен заведующим Теоретической лабораторией Отдела лазерной физики ИЛФ СО РАН, членом-корреспондентом РАН, доктором физико-математических наук Тайченачевым Алексеем Владимировичем и одобрен на открытом семинаре №2 Теоретической лаборатории ИЛФ СО РАН 10 февраля 2026 г.

Заведующий Теоретической Тайченачев Алексей Владимирович
лабораторией Отдела лазерной
физики ИЛФ СО РАН, член-
корреспондент РАН, доктор физико-
математических наук

Подпись заведующего Теоретической лабораторией ИЛФ СО РАН
Тайченачева Алексея Владимировича
удостоверяю

Ученый секретарь ИЛФ СО РАН
к.ф.-м.н. Покасов Павел Викторович

Сведения о ведущей организации

Полное наименование организации в соответствии с уставом: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук

Сокращённое наименование: ИЛФ СО РАН

Юридический адрес: 630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева 15Б

телефон: +7 (383) 330-61-10

электронная почта: info@laser.nsc.ru; web-сайт: <http://www.laser.nsc.ru>

Список основных трудов сотрудников ведущей организации Института лазерной физики СО РАН по тематике защищаемой диссертации за последние пять лет

1. Оптические часы, основанные на двухфотонной спектроскопии ядерного перехода в ионе ^{229}Th в монохроматическом поле / Юдин В.И., Тайченачев А.В., Прудников О.Н., Басалаев М.Ю., Гончаров А.Н., Чепуров С.В., Пальчиков В.Г. // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. - 2025. - Т.121, N 5-6. - С. 365-374. DOI: 10.31857/S0370274X25030069
2. Efficient bichromatic model for describing coherent population trapping resonances in a periodically modulated laser field / Yudin V.I., Basalaev M.Yu., Taichenachev A.V., Prudnikov O.N. // Physical Review Applied. - 2025. - V.24, N 4. - A.n. 044014. DOI: 10.1103/yjw4-9qq3
3. Quantum theory of magneto-optical trap / Prudnikov O.N.1, Taichenachev A.V., Yudin V.I., Zhou L., Zhan M.S. // Physical Review A. - 2025. - V.112, N 4. - A.n. 043112 (8 pp.). DOI: 10.1103/5v11-cwv2
4. Световые сдвиги резонансов когерентного пленения населенностей в периодически-модулированном лазерном излучении / Юдин В.И., Басалаев М.Ю., Тайченачев А.В., Прудников О.Н., Радченко М.Д., Пальчиков В.Г. // Письма в ЖЭТФ. - 2025. - Т.122, N 3. - С. 139-146. DOI: 10.31857/S0370274X25080032
5. Рамсеевская спектроскопия резонансов КПН на D1 линии атомов щелочных металлов в миниатюрных ячейках в поле встречных волн с противоположными круговыми поляризациями / Юдин В.И., Басалаев М.Ю., Раднатаров Д.А., Громов И.В., Радченко М.Д., Кобцев С.М., Тайченачев А.В. // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. - 2024. - Т.120, N 7. - С. 498-504. DOI: 10.31857/S0370274X24100033
6. Engineering quantum control with optical transitions induced by twisted light fields / Zanon-Willette T., Impens F., Arimondo E., Wilkowski D., Taichenachev A.V., Yudin V.I. // Physical Review A. - 2023. - V.108, N 4. - A.n. 043513. DOI: 10.1103/PhysRevA.108.043513
7. Deep macroscopic pure-optical potential for laser cooling and trapping of neutral atoms / Prudnikov O.N., Plenkov R.Ya., Taichenachev A.V., Yudin V.I., Bagaev S.N. // Physical Review A. - 2023. - V.108, N 4. - A.n. 043107. DOI: 10.1103/PhysRevA.108.043107
8. Влияние свободного движения атомов на эффекты, зависящие от плотности атомов, в нелинейной лазерной спектроскопии резонансных газовых сред / Юдин В.И., Тайченачев А.В., Басалаев М.Ю., Прудников О.Н., Пальчиков В.Г., Занон-Виллетт Т., Багаев С.Н. // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. - 2023. - Т.117, N 5-6(3). - С. 406-413. DOI: 10.31857/S1234567823060034
9. Ground-state electromagnetically-induced-transparency cooling of $^{171}\text{Yb}^+$ ions in a polychromatic field / Krysenko D.S., Prudnikov O.N., Taichenachev A.V., Yudin V.I.1, Chepurov S.V., Bagaev S.N. // Physical Review A. - 2023. - V.108, N 4. - A.n. 043114. DOI: 10.1103/PhysRevA.108.043114
10. Полевой сдвиг резонанса когерентного пленения населенностей с учетом пространственной неоднородности светового пучка / Коваленко Д.В., Юдин В.И., Басалаев М.Ю., Строкова Н.В., Тайченачев А.В., Прудников О.Н. // Журнал экспериментальной и теоретической физики. - 2023. - Т.164, N 2. - С. 255-261. DOI: 10.31857/S0044451023080126