# ОТЗЫВ

**официального оппонента д.ф.-м.н. Пальчикова Виталия Геннадьевича** на диссертацию Головизина Артема Алексеевича «Прямое лазерное возбуждение часового магнитодипольного перехода 1.14 мкм в ультрахолодных атомах тулия», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 «Лазерная физика».

Диссертационная работа Головизина Артема Алексеевича посвящена детальному исследованию характеристик часового перехода $4f^{13}(^2F^o)6s^2$ ($J = 7/2$, $F = 4$)→$4f^{13}(^2F^o)6s^2$ ($J = 5/2$, $F = 3$) в атоме тулия, используемого в разработке оптического стандарта времени и частоты.

Актуальность темы диссертации предопределяется рядом обстоятельств:

- во-первых, магнитодипольный переход между компонентами тонкой структуры основного состояния атома тулия $4f^{13}(^2F^o)6s^2$ ($J = 7/2$, $F = 4$)→$4f^{13}(^2F^o)6s^2$ ($J = 5/2$, $F = 3$) представляет значительный интерес вследствие его низкой чувствительности к внешнему тепловому излучению, являющемуся одним из основных источников неопределенностей в воспроизведении единиц времени и частоты оптическим стандартом данного типа;

во-вторых, длина волны часового перехода, равная 1.14 мкм, и время жизни верхнего возбужденного уровня порядка 100 мс, располагаются в области, доступной для проведения прецизионных измерений;

наконец, в –третьих, систематизированный и детальный анализ бюджета неопределенностей в измерениях частоты часового перехода является необходимым и весьма важных этапом создания оптического стандарта времени и частоты на атомах тулия, поскольку только на его основе определяются основные метрологические характеристики стандарта.

Основные результаты диссертационной работы Головизина А.А. вносят существенный вклад в решение этой проблемы.

Диссертация включает в себя Введение, четыре Главы, Заключение, Список литературы и приложение и изложена на 131 страницах машинописного текста. Список литературы включает 164 наименование.

Во Введении автор формулирует актуальность проблемы, цели и задачи исследования, научную новизну и практическую ценность полученных результатов, и перечисляет защищаемые положения. Приведены список опубликованных статей и список конференций, на которых автор лично представил результаты работы.

В первой главе автор описывает структуру уровней основного состояния атома тулия, величину тонкого и сверхтонкого расщеплений и вероятности магнитодипольного

и электроквадрупольного переходов на длине волны 1.14 мкм. Кратко описана схема лазерного охлаждения атомов тулия.

Вторая глава содержит результаты теоретического моделирования и проведенного эксперимента по регистрации часового перехода в атомах, захваченных в магнито-оптическую ловушку (МОЛ). Экспериментально зафиксировано значительное уменьшение числа атомов тулия в магнито-оптической ловушке при резонансной частоте часового лазера 1.14 мкм, получено значение ширины контура линии перехода порядка 1 МГц, что совпадает с уширением, вносимым МОЛ.

В третьей главе автор подробно рассматривает процесс перегрузки атомов тулия из МОЛ в оптическую дипольную ловушку и решетку. Получена высокая эффективность перегрузки 50% в оптическую решетку на длине волны 532 нм. По результатам измерения спектра параметрических резонансов возбуждения колебаний атомов в дипольной ловушке получена оценка поляризуемости основного состояния атома тулия на длине волны 532 нм равная 380 а.е., что соответствует расчетному значению. Проведена серия измерений контура линии часового перехода в зависимости от внешних параметров, из которой получена оценка поляризуемости верхнего часового уровня атома тулия на длине волны 532 нм равноя 295 а.е. Измеренное время жизни верхнего часового уровня t=112 мс подтверждает результат теоретических оценок.

В четвертой главе рассмотрены возможные сдвиги частоты часового перехода. Для оценки сдвига вследствие взаимодействия с излучением оптической решетки и тепловым излучением был рассчитан спектр динамической поляризуемости часовых уровней, что также позволило указать область вблизи 807 нм, где ожидается нахождение так называемой «магической» длины волны оптической решетки — необходимой составляющей для высокоточной спектроскопии ансамбля нейтральных атомов. Показано, что межатомное диполь-дипольное взаимодействие в предложенной в работе конфигурации эксперимента не будет приводить к сдвигу частоты часового перехода, однако его необходимо учитывать при выборе длительности опроса атомного ансамбля. Рассмотрено влияние зеемановского и ряда других сдвигов на стабильность частоты часового перехода. В конце главы приведена итоговая таблица бюджета систематических ошибок предлагаемого оптического стандарта частоты на магнитодипольном переходе 1.14 мкм в атомах тулия. Полученное значение полной погрешности $5 \times 10^{-18}$ соответствует высокому мировому уровню.

В Заключении автор перечисляет основные научные результаты работы.

В приложении выполнен краткий обзор развития стандартов частоты. Автор описывает наиболее значимые методы, используемые в работе оптических стандартов частоты, и приводит описание ряда оптических часов с лидирующими на данный момент показателями.

К достоинствам диссертационной работы следует отнести тщательность описания проводимых экспериментов, а также проведение сопоставительного анализа с результатами теоретических предсказаний, что несомненно подкрепляет достоверность основных результатов диссертационной работы. Большинство из результатов диссертации являются оригинальными, полученными впервые.

Остановимся на некоторых замечаниях по тексту диссертационной работы:

1. Требует пояснений утверждение автора о достаточности применения стабилизированных кварцевых осцилляторов для обеспечения синхронизации на уровне 1 нс при передачи данных (автореферат, стр.3);

2. Вклад нелинейно-оптических эффектов высшего порядка (Глава 4), обусловленных влиянием гиперполяризуемостей на сдвиги атомных уровней в оптичесой решетке, должен дополняться учетом пространственного распределения мультипольных моментов Е- и М-типов высшего порядка, поскольку их вклад в сдвиги уровней имеет сопоставимый порядок величины;

3. Во второй Главе и в автореферате на стр.9 отмечается невысокая точность эсперимента́льного определения частоты часового перехода (порядка 1 ГГц). Между тем, в Главе 4 анализируется бюджет неопределенностей для этой частоты с точностью до нескольких единиц восемнадцатого знака. В чем причина такого противоречия?

Перечисленные замечания носят рекомендательный характер и не могут существенно повлиять на общую положительную оценку диссертационной работы.

Диссертационная работа представляет собой законченное научное исследование и по содержанию соответствует специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

Автореферат и опубликованные работы полно и правильно отражают основное содержание диссертации.

Диссертация Головизина Артема Алексеевича «Прямое лазерное возбуждение часового магнитодипольного перехода 1.14 мкм в ультрахолодных атомах тулия» полностью соответствует Положению ВАК о присуждении ученых степеней, а ее автор заслуживает присвоения искомой степени 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»),
Пром.зона Менделеево, Солнечногорский р-н, Менделеево пгт., Московская обл., 141570
тел.: 8-495-660-57-24
e-mail: vitpal@mail.ru

/Пальчиков Виталий Геннадьевич/

20.11.2017

Подпись Пальчикова Виталия Геннадьевича заверяю:
Лобова Оксана Алексеевна
Начальник отдела кадров
Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ВНИИФТРИ),
Пром.зона Менделеево, Солнечногорский р-н, Менделеево пгт., Московская обл., 141570
тел.: 84955266328
e-mail: lobova@vniiftri.ru

/ Лобова Оксана Алексеевна

20.11.2017