

## ОТЗЫВ

*официального оппонента на диссертацию Федоровой Елены Сергеевны «Исследование ультрахолодных атомов тулия в оптической решетке вблизи магической длины волны», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 «Лазерная физика»*

Атомы групп IIa (Mg, Ca, Sr) и IIb (Zn, Cd, Hg) периодической системы элементов, а также редкоземельного элемента Yb рассматриваются в настоящее время как наиболее перспективные объекты для создания ультрапрецизионных стандартов частоты и времени нового поколения и как возможные кандидаты для переопределения единицы времени – секунды в системе единиц СИ. Внимание исследователей привлекает наличие у этих атомов метастабильного  $nsnp(^3P_0)$ -состояния, радиационный распад которого в основное  $ns^2(^1S_0)$ -состояние соответствует колебаниям осциллятора с экстремально высокой добротностью. Рекордная стабильность и точность воспроизведения периода этих колебаний на уровне 18 десятичных знаков стимулируют устойчивый интерес к изучению возможностей практического использования перечисленных атомов в качестве стандартов частоты и времени.

Атом тулия является перспективным кандидатом для создания высокоточных стандартов частоты, поскольку оценки потенциальной погрешности воспроизведения единиц времени и частоты также оцениваются восемнадцатыми десятичными знаками. С другой стороны, внутриоболочечный «часовой» переход на длине волны 1.14 мкм обладает весьма слабой чувствительностью к статическим полям и, следовательно, к эффектам излучения черного тела, являющимися для перечисленных выше атомов одним из основных источников погрешностей измеряемой частоты.

Диссертационная работа Федоровой Е. С. посвящена решению важной и актуальной задачи -изучению особенностей работы магнито-оптической ловушки (МОЛ) на спектрально-узком охлаждающем переходе, загрузке атомов тулия в оптическую решетку и подготовке их внутренних состояний. Решение этих вопросов применительно к атомам тулия связано с возможностью их использования для создания репера частоты в оптическом диапазоне.

Диссертация включает в себя Введение, четыре Главы, Заключение, Список литературы и изложена на 121 странице машинописного текста.

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 Главе 1 представлен обзор ранее полученных результатов по лазерному охлаждению атомов тулия и спектроскопии часового перехода. Также, в ней сформулированы и обоснованы основные задачи, которые были решены в рамках диссертационной работы, а именно исследование суб-доплеровского охлаждения на спектрально-узком охлаждающем переходе, загрузке атомов в оптическую решетку и оптической накачке.

Глава 2 посвящена исследованию режимов работы магнито-оптической ловушки (МОЛ) на спектрально-узком переходе вторичного этапа охлаждения атомов тулия. Относительно небольшая естественная ширина этого перехода позволяет наблюдать в рамках одного эксперимента в зависимости от величины параметра насыщения три различных режима работы. В режиме низкого насыщения на процесс лазерного охлаждения существенное влияние оказывает сила тяжести, смещающая положение равновесия облака, что приводит к преимущественному взаимодействию с одним из охлаждающих пучков МОЛ и оптической накачке. Такой режим ранее наблюдался в работах по лазерному охлаждению атомов стронция, диспрозия и эрбия.

В Главе 3 подробно описана оптическая решетка для атомов тулия, формируемая с помощью усиливающего резонатора. Максимальная достигнутая глубина удерживающего потенциала составила 42 мкК, при этом эффективность захвата атомов из МОЛ составила 60%. Из спектра параметрически-возбуждаемых потерь были определены колебательные частоты потенциала оптической решетки, и из них найдена скалярная поляризуемость основного состояния атомов тулия на длине волны 814.5 нм, которая составила  $146 \pm 44$  а.е. В оптической решетке была проведена спектроскопия часового перехода и подтвержден переход в режим Лэмба-Дике.

В Главе 4 рассматривается вопрос подготовки атомов в состоянии с нулевой проекцией полного момента. Для этого использовалась оптическая накачка линейно-поляризованным излучением, связывающим состояния с одинаковым значением полного момента  $F=F'=4$ . В атоме тулия существуют два типа таких переходов, происходящих с изменением и без изменения величины электронного момента  $J$ . Для обоих случаев процесс оптической накачки был промоделирован численно и реализован экспериментально. Достигнутая относительная населенность центрального магнитного подуровня составила 80%.

В Заключение автор перечисляет основные научные результаты работы.

Переходя к общей оценке результатов диссертации, следует отметить строгую обоснованность подхода автора к решению поставленных задач. В ряде случаев продемонстрирована согласованность результатов автора с экспериментальными данными, а также с данными, полученными в рамках других альтернативных подходов. Все научные положения и основные результаты автора своевременно опубликованы в отечественной и зарубежной печати. Текст диссертации изложен грамотно и корректно. Автореферат и опубликованные работы правильно отражают основное содержание диссертации. Большинство из результатов диссертации являются оригинальными, полученными впервые.

Принципиальных замечаний по тексту диссертации, влияющих на общую положительную оценку диссертационной работы, у меня нет.

Среди прочих других замечаний отмечу следующие:

1. Оценки потенциальной неопределенности измерений частоты в атоме тулия, приведенные в диссертации, весьма высоки – порядка  $5 \cdot 10^{-18}$ . А как они соотносятся с реальными измерениями абсолютного значения частоты в тулии, полученными до настоящего времени? В тексте диссертации их трудно увидеть.
2. Поскольку исследования, представленные в диссертационной работе, относятся к диапазону длин волн вблизи магической длины волны решеточного поля, были бы весьма уместными оценки для «операционной магической длины волны», аналогично тому, как было продемонстрировано в недавних работах Н. Katori с соавторами. Дело в том, что полного сокращения световых сдвигов решеточного поля в измеряемой частоте при выборе магической длины волны только в дипольном приближении, в общем случае, не происходит. При точностях измерений на уровне семнадцатых – восемнадцатых знаков становятся существенными нелинейно-оптические эффекты, приводящие к сужению областей изменения магической длины волны, зависящих от отстройки и интенсивности решеточного поля. Данное обстоятельство может иметь определенное значение для атомов тулия, поскольку область изменений магических длин волн занимает некоторый спектральный интервал.

Перечисленные замечания носят рекомендательный характер и не могут существенно повлиять на положительную оценку представленной диссертации.

Результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы в организациях РАН (ФИАН, ИОФАН, Институт лазерной физики и Институте ядерной физики СО РАН) в Госуниверситетах (МГУ, ВГУ, НГУ), а также в РИРВ и в других организациях.

**Заключение.** Подводя итоги, можно с полной уверенностью сказать, что представленная диссертация удовлетворяет всем требованиям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г, а ее автор, Федорова Елена Сергеевна, безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 «Лазерная физика».

Отзыв составил:

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 обл., Солнечногорский р-н, г. Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево, Пром.зона ФГУП «ВНИИФТРИ», корпус 28.

тел.: 8-495-660-57-24

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



/ Пальчиков Виталий Геннадьевич /

Подпись Пальчикова Виталия Геннадьевича заверяю:

Лобова Оксана Алексеевна,

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

Российская Федерация, 141570, Московская обл., Солнечногорский р-н, г. Солнечногорск, рабочий поселок Менделеево, Пром.зона ФГУП «ВНИИФТРИ», корпус 45.

тел.: 8-495-526-63-28



/ Лобова Оксана Алексеевна /

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

1. 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*, 48(5), 419-424, 2018
2. Нелинейно-оптические эффекты высшего порядка в оптических решеточных часах, В. Д. Овсянников, С. И. Мармо, С. Н. Мохненко, В. Г. Пальчиков, *Квантовая электроника*, 47(5), 412–420, 2017
3. Compact quantum frequency standard using a rubidium vapor cell with pulsed optical pumping and microwave excitation using the Ramsey scheme, *Measurement techniques*, 59 (12), 1286–1290, 2017
4. Higher-order effects on the precision of clocks of neutral atoms in optical lattices, V. D. Ovsiannikov, S. I. Marmo, V. G. Palchikov, H. Katori, *Phys. Rev. A* 93, 043420, 2016
5. Strategies for reducing the light shift in atomic clocks, H. Katori, V. D. Ovsiannikov, S. I. Marmo, V. G. Palchikov, *Phys. Rev. A* 91, 052503, 2015
6. Selective laser pumping of magnetic sublevels in the hyperfine structure of the cesium atom, A. I. Magunov, V. G. Palchikov, *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 118, 5, 687–700, 2014