

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. Городецкого Михаила Леонидовича 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»

Диссертация соискателя Головизина Артема Алексеевича посвящена регистрации и исследованию часового магнитодипольного перехода 1.14 мкм в ультрахолодных атомах тулия. Оптические атомные часы уже достигли погрешности единиц восемнадцатого знака, что открывает интересные возможности как для фундаментальных исследований, например поиска дрейфа физических постоянных или проверки КЭД, так и в практических применениях. В частности, практически неизбежным представляется переход к оптическим первичным стандартам частоты с переопределением секунды. Помимо дальнейшей разработки существующих стандартов, активно ведется поиск новых атомных систем для создания оптических часов, которые будут менее чувствительны к внешним возмущениям. В этом отношении атом тулия является интересным кандидатом в связи с тем, что часовой переход происходит вследствие переворота спина $4f$ электрона и поляризуемости часовых уровней близки, что ведет уменьшению на несколько порядков чувствительности частоты часового перехода к равновесному тепловому излучению. В работе А.А.Головизина часовой переход на длине волны 1.14 мкм впервые зарегистрирован в ансамбле ультрахолодных атомов, проведен ряд измерений его характеристик, в том числе время жизни верхнего часового уровня, и выполнен теоретический анализ потенциальных источников сдвига и погрешности частоты часового перехода.

Диссертационная работа изложена на 131 страницах и состоит из Введения, четырех Глав, Заключения, Списка литературы, содержащего 164 наименования, и Приложения.

Во Введении автор приводит краткий обзор области оптических часов и обосновывает актуальность рассматриваемой проблемы, перечисляет цели и задачи работы, научную новизну и практическую значимость проведенных исследований, приводит сведения об апробации и публикации полученных результатов и формулирует защищаемые положения.

В первой главе автор рассматривает энергетическую структуру атомов тулия, используемую в экспериментах, приводит значения тонкого и сверхтонкого расщеплений уровней основного состояния атомов тулия, вероятность перехода между подуровнями и чувствительность часового перехода к постоянной тонкой структуре. Затем приводится краткое описание экспериментальной установки, в частности схемы двухступенчатого лазерного охлаждения атомов тулия и оптической схемы часового лазера.

Во второй главе приведены результаты моделирования и эксперимента по регистрации часового перехода 1.14 мкм в атомах тулия, находящихся в магнито-оптической ловушке (МОЛ). Теоретический анализ возможности детектирования часового перехода непосредственно в МОЛ необходим в связи с тем, что естественная ширина линии перехода 1.14 мкм порядка 1 Гц, при этом доплеровское и зеемановское уширение в условиях МОЛ порядка 1 МГц. В эксперименте обнаружен резонанс перехода между сверхтонкими компонентами $F=4 \leftrightarrow F'=3$ уровней тонкой структуры основного состояния, ширина контура линии составила порядка 1 МГц и обусловлена уширением в МОЛ.

Третья глава посвящена рассмотрению загрузки атомов тулия в оптические дипольные ловушки и спектроскопии часового перехода в них. Рассмотрен принцип формирования удерживающего потенциала оптических дипольных ловушек, исследованы факторы,

влияющие на эффективность перегрузки атомов из МОЛ в оптические дипольные ловушки. Проведено измерение собственных колебательных частот атомов тулия в оптических дипольных ловушках путем параметрического возбуждения колебаний и определена скалярная поляризуемость основного состояния атома тулия на длине волны излучения ловушки 532 нм. Далее описывается ряд экспериментов по исследованию спектрального профиля часового перехода в зависимости от интенсивности оптической решетки и пробного излучения, а также при наличии внешнего магнитного поля. Произведено прямое измерение времени жизни верхнего часового уровня атомов тулия, захваченных в оптическую решетку на длине волны 532 нм, которое составило 112 мс.

В четвертой главе проведен подробный анализ потенциальных систематических сдвигов частоты часового перехода и связанных с ними погрешностей. Для этого, во-первых, рассчитан спектр динамических поляризуемостей часовых уровней атомов тулия в диапазоне длин волн 400-1200 нм, что позволило предсказать положение «магической» длины волны вблизи 807 нм, а также получены значения статических скалярных поляризуемостей верхнего и нижнего часовых уровней равные 148 а.е. и 146.5 а.е., которые, как и отмечалось в начале работы, оказались близки. Затем были проанализированы межатомные диполь-дипольные взаимодействия и влияние внешнего магнитного поля на частоту часового перехода, а также другие возможные сдвиги. В конце главы приведен бюджет ошибок предлагаемого оптического стандарта частоты на атомах тулия, где получен сдвиг частоты перехода - $24(5) \times 10^{-18}$ в относительных единицах, что подтверждает перспективность создания оптического стандарта частоты на атомах тулия.

В Заключение автор приводит основные результаты представленной работы.

В Приложении приведен краткий исторический обзор стандартов частоты. Изложены основные особенности работы оптических часов и перечислены наиболее разработанные на данный момент системы. В конце раздела обсуждается область и перспективы применения атомных оптических часов.

Основные результаты работы опубликованы в 3 статьях в ведущих научных журналах и представлены автором лично на российских и международных конференциях, что подтверждает достоверность и обоснованность результатов.

Исследование проведено на мировом уровне и носит самостоятельный, законченный характер. Диссертационная работа вносит важный вклад в понимание процессов лазерного охлаждения и открывает возможность дальнейших экспериментов с ультрахолодными атомами тулия на пути к созданию новых оптических часов. Измерение параметров часового перехода атомов тулия в магнито-оптической ловушке и оптической решетке было реализовано впервые, и новизна работы не вызывает сомнений. Диссертационная работа достаточно хорошо оформлена, написана четким и ясным языком, цветные схемы иллюстрируют изложенный материал. Автор продемонстрировал высокий уровень экспериментальной культуры и умение структурировано излагать свои мысли.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Основным замечанием к работе является недостаточное внимание, уделенное описанию экспериментальных установок – акцент перенесен на порядок экспериментов и экспериментальные результаты. В частности, в Заключении (с. 90) первый пункт сообщает о достижении в стабилизации полупроводникового лазера на квантовых точках с помощью ULE резонатора со стабильностью 1 МГц/день. Его подробное описание было бы интересно

рецензенту. К сожалению, в диссертации оно сводится к малоинформативному констатирующему абзацу (с. 20) с отсылкой к столь же лаконичному общему обзору в Приложении.

В разделе 3.2.1 (с. 43) описан эксперимент по перегрузке атомов в решетку с длине волны, близкой к магической. К сожалению, кроме подтверждения наличия атомов в решетке никаких экспериментальных результатов раздел не содержит, поэтому выглядит подвешенным в воздухе.

В Приложении, при обзоре стандартов частоты, где автор отдалается от области своей компетентности, содержится ряд неточностей. На с. 112 написано: “Специальные кварцевые и другие диэлектрические резонаторы [102,104] демонстрируют стабильность частоты на уровне 10^{-12} - 10^{-14} при 100 с усреднения.” На самом деле, по ссылкам кварцевые генераторы имеют стабильность почти на порядок хуже, а такую стабильность обеспечивают сапфировые диэлектрические резонаторы, работающие на другом принципе. Много астрономических и терминологических неточностей далее в разделе А.2: “1/86400 солнечного дня” вместо “1/86400 средних солнечных суток”; Рис. А.1а не имеет отношения к неоднородности вращения Земли, а показывает уравнивание времени – эффект, известный еще в античности Птолемею, связанный с наклоном земной оси и эллиптичностью орбиты; Основная проблема солнечного времени связана с неоднородностью вращения Земли вокруг своей оси (UTC), а не вокруг Солнца (ЕТ). Об этом как раз и говорит Рис. А.1б и эту неоднородность компенсируют секунды координации (не “проскальзывающие секунды”).

В работе встречаются опечатки.

Указанные недостатки носят несущественный для основного содержания характер и не умаляют общей высокой оценки проведенного исследования.

Считаю, что диссертационная работа «Прямое лазерное возбуждение часового магнитодипольного перехода 1.14 мкм в ультрахолодных атомах тулия» удовлетворяет требованиям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а Головизин Артем Алексеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 «Лазерная физика».

Официальный оппонент

Доктор физико-математических наук, профессор физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова, 119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1

Телефон: +7 (495) 939-39-03

e-mail: gorodetsky@physics.msu.ru



/Городецкий Михаил Леонидович/

23. 11. 2017

Подпись профессора М.Л.Городецкого заверяю

Декан физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова, 119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1

Телефон: +7(495)939-16-82

e-mail: dean@phys.msu.ru



/Сысоев Николай Николаевич/