

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук

Зеленера Бориса Борисовича

на диссертацию Хабаровой Ксении Юрьевны

Прецизионная спектроскопия однофотонных переходов с использованием ультрастабильных лазерных источников»,

представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.6 - Оптика

Открытие в двадцатом веке лазерных источников света и способов их стабилизации привело к появлению высокостабильных атомных часов, которые используются в системах спутниковой и наземной телекоммуникации, в том числе в базовых станциях мобильной связи, международными и национальными бюро стандартов и службами точного времени. Также высокостабильные лазеры является удобным и точным инструментом для проверки фундаментальных основ устройства мира, позволяют измерить и уточнить фундаментальные константы. Именно развитию этого *актуального* направлению посвящена данная диссертационная работа. В работе используется прецизионная спектроскопия однофотонных переходов для определения постоянной Ридберга и зарядового радиуса протона в атоме водорода, а также для создания высокоточных атомных часов на основе нейтральных атомов стронция и тулия. Лазерные источники в работе стабилизировались по внешнему высокодобротному оптическому резонатору Фабри-Перо на основе стекла ULE имеющего нулевую точку теплового расширения в области комнатных температур. Такая техника позволила добиться сужения спектральной ширины излучения лазера до значений около 1 Гц. Для прецизионной спектроскопии однофотонных переходов на узких атомарных переходах было необходимо использовать различные экспериментальные методы подавления физических механизмов уширения спектральных линий. При спектроскопии перехода $2S-4P$ в атомарном водороде был разработан и реализован метод компенсации эффекта Доплера первого порядка с использованием активного волоконного ретрорефлектора, проведено теоретическое и экспериментальное исследование эффекта квантовой интерференции, приводящего к искажению наблюдаемой формы линии. При спектроскопии переходов в атомах стронция и тулия использовалось лазерное охлаждение при помощи магнитооптических ловушек с дальнейшим захватом атомов в оптические решетки на магической длине волны.

Диссертация включает в себя Введение, шесть Глав, Заключение и Список литературы и изложена на 223 страницах.

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

В **Первой главе** автор описывает ультрастабильные лазерные системы, созданные и исследованные в рамках диссертационной работы. Приводится описание

высокодобротного оптического резонатора, метода стабилизации частоты лазеров по моде внешнего оптического резонатора, рассматриваются шумовые характеристики резонаторов, оказывающие влияние на итоговые характеристики стабильности частоты лазерных систем.

Вторая глава посвящена эксперименту по прецизионной спектроскопии перехода $2S-4P$ в атоме водорода. В главе представлена экспериментальная установка, включая систему компенсации эффекта Доплера первого порядка на основе активного волоконного ретрорефлектора, обеспечивающая антипараллельные гауссовы лазерные пучки с высокой идентичностью волновых фронтов. Описывается водородный спектрометр для прецизионной спектроскопии перехода $2S-4P$. Оценивается остаточный эффект Доплера первого порядка в эксперименте по прецизионной спектроскопии перехода $2S-4P$ в атоме водорода.

В **Третьей главе** рассматривается эффект квантовой интерференции. Приводится как классическая, так и квантовомеханическая модель описания данного эффекта, после чего приводятся экспериментальные данные наблюдения эффекта квантовой интерференции при спектроскопии перехода $2S-4P$ в атоме водорода. Сравниваются результаты аппроксимации экспериментальных данных симметричной аппроксимирующей функцией с последующей корректировкой результата при помощи численного моделирования и функцией Фано-Фойгта, включающей дисперсионный асимметричный параметр. Оценивается вклад в погрешность определения частоты перехода $2S-4P$ остаточного эффекта квантовой интерференции.

Четвертая глава посвящена получению нового значения постоянной Ридберга и значения зарядового радиуса протона. Представлены результаты по измерению абсолютного значения частоты перехода $2S-4P$ в атоме водорода. Оценивается вклад основных физических процессов, приводящих к сдвигу центра линии. Проводится анализ данных с использованием симметричной и специальной модели формы линии с последующим сравнением с результатами численного моделирования.

В **Пятой главе** приводятся результаты спектроскопии спектрально узких однофотонных переходов в атомах стронция. Описываются особенности лазерного охлаждения и подготовки ансамбля атомов стронция, приводится схема экспериментальной установки. Описываются эксперименты по спектроскопии интеркомбинационного перехода $^1S_0-^3P_1$ в ячейке и магнитооптической ловушке. Описывается реализация вторичного широкополосного и узкополосного охлаждения ансамбля атомов стронция на интеркомбинационном переходе $^1S_0-^3P_1$. Представлен эксперимент по магнито-индуцированной спектроскопии перехода $^1S_0-^3P_1$ в атомах ^{88}Sr .

Шестая глава посвящена исследованию часового магнито-дипольного перехода на длине волны 1,14 мкм в атомах тулия. Описываются особенности структуры электронных уровней тулия, реализация лазерного охлаждения атомов тулия, различные режимы работы магнитооптической ловушки на узком переходе. Описан метод расчета и экспериментального определения магической длины волны магнито-дипольного перехода на длине волны 1,14 мкм в атомах тулия. Представлены результаты эксперимента по спектроскопии часового перехода на длине волны 1,14 мкм в оптической решетке на магической длине волны 813 нм.

В **Заключении** автор перечисляет основные научные результаты работы.

Наиболее значимыми научными результатами диссертационной работы К.Ю. Хабаровой, представляющими практический и научный интерес, являются следующие: Разработан метод компенсации эффекта Доплера первого порядка при спектроскопии перехода $2S \rightarrow 4P$ в криогенном пучке метастабильных атомов водорода.

Разработана теоретическая модель эффекта квантовой интерференции при лазерной спектроскопии однофотонных переходов $2S - 4P_{1/2}$ и $2S - 4P_{3/2}$ в атоме водорода.

При помощи прецизионного измерения абсолютной частоты однофотонного перехода $2S \rightarrow 4P$ в криогенном пучке атомов водорода уточнено значение постоянной Ридберга и зарядового радиуса протона.

Реализована магнито-индуцированная спектроскопия перехода $^1S_0 \rightarrow ^3P_0$ в атомах Sr в оптической решетке со спектральным разрешением лучше 200 Гц.

Проведена спектроскопия однофотонного магнито-дипольного часового перехода на длине волны 1,14 мкм в атомах тулия в оптической решетке со спектральным разрешением 10 Гц.

Не смотря на общую положительную оценку работы, имеются следующие замечания:

1. В работе имеется ряд неточностей и опечаток. Например, на рис. 1.11, стр. 30 на осях графиков отсутствуют шкалы и величины измерений частоты и интенсивности. На рис. 1.15, стр. 34 частота в подписи на графике измеряется в МГц, однако исходя из отмеченной наблюдаемой ширины линии, частота должна измеряться в Гц. На стр. 159-160 приведен текст: «Моделирование в рамках квазиклассической (“квазиклассика, опт. патока”) и квантовой теорий (“кв. механика, опт. патока”) дают схожие значения для температуры субдоплеровской фракции облака атомов в диапазоне 0.5 – 5 мкК, которая увеличивается с ростом значения параметра насыщения. Эти температуры *существенно превышают* наблюдаемые в эксперименте (20 – 50 мкК)». Последнее предложение, видимо, должно быть написано, как: «Эти температуры *существенно меньше* наблюдаемых в эксперименте (20 – 50 мкК)».
2. В тексте диссертации не указано: контролировалось ли в ходе эксперимента с атомами стронция количество атомов в минимумах потенциала оптической решетки, есть ли зависимость значений бюджета ошибок и точности часов от количества атомов в минимумах потенциала.
3. В качестве замечания следует отметить отсутствие в обзоре литературы информации о возможности создания, так называемых, сверхизлучающих часов проект европейского консорциума iqClock [Norcia, M. A., Winchester, M. N., Superradiance on the millihertz linewidth strontium clock transition. Science advances, 2(10), e1601231].

Однако перечисленные замечания отчасти имеют характер пожеланий для будущей работы и не могут существенно повлиять на положительную оценку представленной диссертации.

Диссертационная работа представляет собой законченное научное исследование и по содержанию соответствует специальности 1.3.6–Оптика.

Все полученные результаты являются новыми. Достоверность и обоснованность полученных результатов так же не вызывает сомнения, так как они были получены на современном откалиброванном оборудовании и прошли широкую апробацию. Автореферат и опубликованные работы правильно отражают основное содержание диссертации.

Диссертация Хабаровой Ксении Юрьевны «Прецизионная спектроскопия однофотонных переходов с использованием ультрастабильных лазерных источников» полностью соответствует критериям Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013, а её автор заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.6. – Оптика.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук

Зеленер Борис Борисович,

заведующий лабораторией №1.4

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,

ул. Ижорская, д.13, стр. 2, г. Москва, 125412

тел.: 8(495)362-07-78

e-mail: boboze@mail.ru



Зеленер Борис Борисович/

26.08.2021

Подпись Зеленера Бориса Борисовича удостоверяю:

Иванова Нина Николаевна

Заместитель директора

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,

ул. Ижорская, д.13, стр. 2, г. Москва, 125412

тел.: 8(495)485-96-63

e-mail: ivanova-n@ihed.ras.ru



Иванова Нина Николаевна/

26.08.2021

Список основных публикаций Зеленера Бориса Борисовича по тематике диссертации К.Ю. Хабаровой в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет

1. Bronin S. Y., Zelener B. B., Zelener B. V., Refraction, absorption and reflectivity of radiation in strongly coupled plasma //Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2021. – Т. 268. – С. 107621.
2. Zelener B. B., Vilshanskaya E. V., Saakyan S. A., Sautenkov V. A., Zelener B. V., Fortov V. E., Diagnostics of a Diluted Ultracold Plasma Using the Autoionization Effect of Rydberg States of 40 Ca Atoms //JETP Letters. – 2021. – Т. 113. – №. 2. – С. 82-85.
3. Sautenkov V., Saakyan S., Zelener B. B. Spectral dependence of nonlinear radiation trapping in high density atomic vapor //Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2020. – Т. 256. – С. 107349.
4. Zelener B. B., Vilshanskaya E. V., Saakyan S. A., Arshinova I. D., Bobrov A. A., Sautenkov V. A., Zelener B. V., Differential two-photon spectroscopic measurements of cold atoms temperature with variable angle between probe beams //Laser Physics. – 2020. – Т. 30. – №. 2. – С. 025501.
5. Zelener B. B., Saakyan S. A., Sautenkov V. A., Vilshanskaya E. V., Zelener B. V., Fortov V. E., Measurements of the Rydberg Transition Energies for the $n1S0$ State and the Ionization Potential for 40Ca Atoms //JETP Letters. – 2019. – Т. 110. – №. 12.
6. Sautenkov V. A., Saakyan S. A., Kudrindkiy D.A., Vilshanskaya E. V., Zelener B. B., Optical dipole trap for laser-cooled lithium-7 atoms //Journal of Russian Laser Research. – 2019. – Т. 40. – №. 3. – С. 230-236.
7. Sautenkov V. A., Shneider M.N., Saakyan S. A., Vilshanskaya E. V., Murashkin D.A., Arshinova I.D., Zelener B. V., Zelener B. B., Self-focusing of CW laser beam with variable radius in rubidium atomic vapor //Optics Communications. – 2019. – Т. 431. – С. 131-135.
8. Sautenkov V. A., Saakyan S. A., Bobrov A.A., Vilshanskaya E. V., Zelener B. B., Zelener B. V., Differential two-photon spectroscopy for nondestructive temperature measurements of cold light atoms in a magneto-optical trap //JOSA B. – 2018. – Т. 35. – №. 7. – С. 1546-1551.
9. Zelener B. B., Arshinova I.D., Bobrov A.A., Vilshanskaya E. V., Saakyan S. A., Sautenkov V. A., Zelener B. V., Fortov V. E., Coherent Excitation of Rydberg States in the Gas of Cold 40 Ca Atoms //JETP Letters. – 2018. – Т. 108. – №. 12.