

ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора физико-математических наук Голованя Леонида Анатольевича
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

Сегодня методы прецизионной лазерной спектроскопии являются одним из важнейших инструментов исследования ультрахолодных атомов, открывая возможности развития для таких актуальных экспериментальных направлений как оптические стандарты частоты, квантовые вычисления, тесты фундаментальных теорий, поиск дрейфа и уточнение фундаментальных физических констант. Ключевым инструментом прецизионной лазерной спектроскопии является источник когерентного излучения с чрезвычайно узкой спектральной линией излучения и высокой стабильностью частоты. Рассматриваемая диссертация посвящена **актуальному** направлению исследований: развитию методов лазерной спектроскопии с применением ультрастабильных лазерных источников и повышению их точности для уточнения значений фундаментальных констант и создания оптических атомных часов на атомах стронция и тулия в оптической решетке.

Предпосылками для проведения исследования, представленного в диссертации, послужило несколько обстоятельств. Для решения возникшей в 2010 году загадки радиуса протона требовалось проведение экспериментов на новом уровне точности, поскольку повторный анализ ранее полученных данных не давал однозначного ответа о причине расхождения значения радиуса протона, получаемого из результатов спектроскопии мюонного и обыкновенного водорода. Спектроскопия однофотонных переходов в атоме водорода с применением лазерных источников со спектральной шириной около 1 Гц позволяла существенно повысить точность определения частоты перехода и внести вклад в решение загадки радиуса протона. Помимо этого, стремительно развивающееся в мире направление оптических атомных часов открывало возможности для решения как фундаментальных физических задач, например, поиска дрейфа фундаментальных констант и темной материи, так и прикладных – повышения точности навигации, развитие методов релятивистской геодезии и т.д. Таким образом, актуальность исследования, представленного в диссертации, не вызывает сомнений. Для достижения **цели** – уточнения значений постоянной Ридберга и зарядового радиуса протона, а также разработки оптических часов на нейтральных атомах стронция и тулия, в работе был успешно решен ряд задач: созданы и охарактеризованы лазерные системы со стабилизацией частоты по внешнему оптическому резонатору из стекла с ультранизким коэффициентом теплового расширения, разработан и исследован активный ретрорефлектор на основе оптического волокна для подавления эффекта Доплера первого порядка, исследован эффект квантовой интерференции, при спектроскопии атомов стронция и тулия осуществлено глубокое лазерное охлаждение

ансамбля атомов и загрузка в оптическую решетку на магической длине волны.

Диссертация включает в себя введение, шесть глав, заключение и список литературы из 186 наименований и изложена на 223 страницах.

Во **Введении** автор обосновывает актуальность рассматриваемой проблемы, формулирует цели и задачи работы, дает обоснование научной новизны и практической значимости достигнутых результатов, приводит сведения об апробации и публикации полученных результатов, лично вкладе и перечисляет защищаемые положения.

В **Первой главе** дается описание созданных и исследованных в работе ультрастабильных лазерных систем. Приводится описание внешнего оптического резонатора из стекла ULE, схемы и метода стабилизации частоты лазеров по моде внешнего оптического резонатора, описываются спектральные характеристики излучения лазерных систем, приводятся результаты измерения относительной нестабильности частоты их излучения.

Эксперименты по прецизионной спектроскопии перехода $2S-4P$ в атоме водорода описываются во второй, третьей и четвертой главах.

Во **Второй главе** приведено описание экспериментальной установки, в том числе подробно описана система компенсации эффекта Доплера первого порядка на основе активного волоконного ретрорефлектора. Приводится схема спектрометра, включая систему детектирования, для прецизионной спектроскопии перехода $2S-4P$. Описываются эксперименты по исследованию характеристик волоконного ретрорефлектора и оценивается остаточный эффект Доплера первого порядка.

Третья глава посвящена исследованию эффекта квантовой интерференции. Эффект описывается как в рамках квазиклассической модели, так и в рамках полного квантовомеханического описания с решением системы оптических уравнений Блоха. Далее приводятся экспериментальные данные по спектроскопии перехода $2S-4P$ в атоме водорода, подверженные эффекту квантовой интерференции. Проводится сравнение результатов аппроксимации экспериментальных данных симметричной аппроксимирующей функцией с последующей корректировкой результата при учете в численном моделировании эффекта квантовой интерференции и аппроксимирующей функцией Фано-Фойгта, включающей асимметричный дисперсионный член. Оценивается остаточный вклад в погрешность определения частоты перехода $2S-4P$ эффекта квантовой интерференции.

В **Четвертой главе** определяются новые значения постоянной Ридберга и зарядового радиуса протона из измеренного значения частоты центроида перехода $2S-4P$ в атоме водорода. Приводятся оценки вкладов основных систематических эффектов, приводящих к сдвигу центра линии перехода. В конце главы приводится бюджет ошибок при определении абсолютной частоты перехода $2S-4P$ в атоме водорода и итоговые значения постоянной Ридберга и зарядового радиуса протона.

Пятая глава посвящена исследованию спектрально узких однофотонных переходов в атомах стронция. Приводится схема экспериментальной установки и описание этапов лазерного охлаждения ансамбля атомов стронция, описываются эксперименты по спектроскопии интеркомбинационного перехода $^1S_0-^3P_1$ в парах

металла в ячейке и в магнитооптической ловушке. Описывается эксперимент по реализации вторичного широкополосного и узкополосного охлаждения ансамбля атомов стронция на интеркомбинационном переходе $^1S_0-^3P_1$. Представлены результаты эксперимента по магнито-индуцированной спектроскопии перехода $^1S_0-^3P_0$ в атомах четного изотопа стронция ^{88}Sr .

Шестая глава посвящена исследованию магнито-дипольного перехода на длине волны 1,14 мкм в атомах тулия. Описываются особенности этапов лазерного охлаждения атомов тулия, включая различные режимы работы магнитооптической ловушки на узком переходе на длине волны 530,7 нм. Описывается процедура поиска магической длины волны для часового перехода на длине волны 1,14 мкм расчетным методом с использованием известных результатов экспериментов. Далее приводятся результаты экспериментального определения магической длины волны часового перехода на длине волны 1,14 мкм в атомах тулия. Представлены результаты расчета чувствительности часового перехода 1,14 мкм к излучению черного тела при комнатной температуре.

В **Заключении** перечислены основные научные результаты работы.

Диссертация написана правильным языком, хорошо структурирована, легко читается. Полученные результаты представляют ценность для широкого научного сообщества. Разработанный метод компенсации эффекта Доплера первого порядка может применяться и в случае спектроскопии однофотонных переходов в других атомах. Модель формы линии с асимметричным параметром позволяет на высоком уровне точности контролировать обнаруженный и исследованный в работе эффект квантовой интерференции, приводящий в ряде случаев к искажению наблюдаемой формы атомного резонанса. Полученные новые значения постоянной Ридберга и зарядового радиуса протона внесли существенный вклад в решение загадки радиуса протона, что привело к пересмотру рекомендованных значений этих фундаментальных констант. Результаты исследований сильно запрещенных однофотонных переходов в атомах стронция и тулия существенным образом повлияли на развитие направления атомных оптических часов в России.

Весьма высоко оценивая диссертационную работу в целом, хотел бы, тем не менее, сделать ряд замечаний:

1) В третьей и четвертой главах проводится аппроксимация полученных в эксперименте спектров фотолюминесценции при переходах $2S - 4P$ с помощью функции Фано – Фойгта. Было бы полезно привести графики измеренных спектров при различных параметрах эксперимента и результаты аппроксимации, чтобы наглядно продемонстрировать совпадение расчетов с данными эксперимента.

2) В главе 5 показана необходимость использования излучения так называемых перекачивающих лазеров, однако причины этого обсуждаются весьма лаконично.

3) В работе имеется ряд опечаток, в том числе в формуле (1.7), и недочетов оформления, в частности отсутствует подрисовочная подпись к рисунку 3.11.

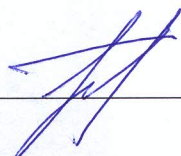
Перечисленные замечания никоим образом не уменьшают ценности диссертационной работы К.Ю. Хабаровой и не влияют на положительную оценку

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 не вызывает сомнения, так как они прошли широкую апробацию, получены на современном поверенном оборудовании и подтверждаются результатами, полученными позднее в других научных коллективах. Автореферат и опубликованные работы правильно отражают основное содержание диссертации.

Диссертационная работа Хабаровой Ксении Юрьевны «Прецизионная спектроскопия однофотонных переходов с использованием ультрастабильных лазерных источников» полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук согласно «Положению о порядке присуждения ученых степеней», утвержденному постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года №842 с дополнениями от 21 апреля 2106 года №335, а её автор заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.6. – Оптика.

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики и молекулярной электроники Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова



Головань Леонид Анатольевич

119991, ГСП-1, Москва

Ленинские горы, МГУ имени М.В.Ломоносова

Дом 1, строение 2, физический факультет

тел.: +7 (495) 939 46 57

e-mail: golovan@physics.msu.ru

15 сентября 2021

Подпись профессора физического факультета МГУ, доктора физико-математических наук Голованя Леонида Анатольевича удостоверяю



Декан физического факультета
МГУ имени М.В.Ломоносова
профессор



Н.Н. Сысов

Список публикаций Голованя Леонида Анатольевича по тематике диссертации К.Ю. Хабаровой в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет.

1. A. S. Ustinov, L. A. Osminkina, D. E. Presnov, L.A. Golovan, Third optical harmonic generation reveals circular anisotropy in tilted silicon nanowire array //Optics Letters. – 2021. – Т. 46. – №. 5. – С. 1189-1192.
2. Dmitrii Shuleiko, Mikhail Martyshov, Dmitrii Amasev, Denis Presnov, Stanislav Zobotnov, Leonid Golovan, Andrei Kazanskii, Pavel Kashkarov. Fabricating Femtosecond Laser-Induced Periodic Surface Structures with Electrophysical Anisotropy on Amorphous Silicon //Nanomaterials. – 2021. – Т. 11. – №. 1. – С. 42.
3. O.I. Sokolovskaya, S.V. Zobotnov, L.A. Golovan, P.K. Kashkarov, D.A. Kurakina, E.A. Sergeeva, M. Yu. Kirillin, Prospects for using silicon nanoparticles fabricated by laser ablation in hyperthermia of tumours //Quantum Electronics. – 2021. – Т. 51. – №. 1. – С. 64.
4. A.V. Kolchin, D.V. Shuleiko, S.V. Zobotnov, L.A. Golovan, D.E. Presnov, T.P. Kaminskaya, P.I. Lazarenko, S.A. Kozyukhin, P.K. Kashkarov, Formation of periodic surface structures in multilayer amorphous Ge₂Sb₂Te₅ thin films irradiated by femtosecond laser pulses //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – Т. 1686. – №. 1. – С. 012006.
5. S. V. Zobotnov, A. V. Skobelkina, E. A. Sergeeva, D. A. Kurakina, A.V. Khilov, F.V. Kashaev, T.P. Kaminskaya, D.E. Presnov, P.D. Agrba, D.V. Shuleiko, P.K. Kashkarov, L.A. Golovan, M.Yu. Kirillin, Nanoparticles Produced via Laser Ablation of Porous Silicon and Silicon Nanowires for Optical Bioimaging //Sensors. – 2020. – Т. 20. – №. 17. – С. 4874.
6. S.V. Zobotnov, A. V. Skobelkina, F. V. Kashaev, A. V. Kolchin, V. V. Popov, D. E. Presnov, E.A. Sergeeva, M. Yu. Kirillin, L. A. Golovan, Pulsed Laser Ablation of Silicon Nanowires in Water and Ethanol //Solid State Phenomena. –2020. – Т. 312. – С. 200-205.
7. S.V. Zobotnov, D.A. Kurakina, F.V. Kashaev, A.V. Skobelkina, A.V. Kolchin, T.P. Kaminskaya, A.V. Khilov, P. D. Agrba, E.A. Sergeeva, P.K. Kashkarov, M. Yu. Kirillin, L.A. Golovan, Structural and optical properties of nanoparticles formed by laser ablation of porous silicon in liquids: Perspectives in biophotonics //Quantum Electronics. – 2020. – Т. 50. – №. 1. – С. 69.
8. A.V. Kolchin, D.V. Shuleiko, A.V. Pavlikov, S.V. Zobotnov, L.A. Golovan, D.E. Presnov, V.A. Volodin, G.K. Krivyakin, A.A. Popov, P.K. Kashkarov. Femtosecond Laser Annealing of Multilayer Thin-Film Structures Based on Amorphous Germanium and Silicon //Technical Physics Letters. – 2020. – Т. 46. – №. 6. – С. 560-563.
9. S.V. Zobotnov, A.V. Kolchin, F.V. Kashaev, A.V. Skobelkina, V. Yu. Nesterov, D.E. Presnov, L.A. Golovan, P.K. Kashkarov. Structural analysis of nanoparticles formed via laser ablation of porous silicon and silicon microparticles in water //Technical Physics Letters. – 2019. – Т. 45. – №. 11. – С. 1085-1088.
10. L. A. Golovan, A.V. Elopov, V.B. Zaitsev, A. A. Ezhov, S. V. Zobotnov, D. M. Zhigunov, O.N. Karpov, G.A. Shandryuk, A. S. Merekalov, R. V. Talroze. Photoluminescence and Up-Conversion in CdSe and CdSe/ZnS Quantum Dots in Amorphous and Liquid-Crystal Polymer Matrices //Frontiers in Optics. – Optical Society of America, 2020. – paper. JTU1A.24.