

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Институт
спектроскопии Российской академии наук
(ИСАН)

Доктор физ.-мат. наук, профессор

В.Н. Задков

« 8 » 2021 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Хабаровой Ксении Юрьевны

«Прецизионная спектроскопия однофотонных переходов с использованием ультрастабильных лазерных источников», представленную на соискание учёной степени доктора наук по специальности 1.3.6. Оптика

Диссертационная работа Хабаровой Ксении Юрьевны «Прецизионная спектроскопия однофотонных переходов с использованием ультрастабильных лазерных источников» посвящена созданию и использованию лазерных систем с узкой шириной линии генерации для прецизионной спектроскопии.

Измерение любой физической величины требует наличия соответствующего инструмента. Точность измерения этой величины будет во многом определяться точностью измерительного прибора. Эти общие утверждения справедливы и в случае исследования спектральных линий поглощения, например, атомов. Точность определения центра линии и её ширины определяются рядом факторов: взаимодействием исследуемого атома с окружающими его электромагнитными полями, столкновениями с другими атомами и его поступательным движением относительно лабораторной системы отсчёта. Хорошо известно, что даже в случае полного контроля этих факторов, точность измерения спектральной линии поглощения атома будет определяться свойствами используемого для возбуждения атома источника излучения. В достаточно общем случае, положение и форма спектральной линии поглощения будет определяться свёрткой спектральной линии поглощения свободного атома и спектральной линии излучения источника. Из таких простых рассуждений становится понятно, что наиболее точное определение параметров спектральной линии поглощения исследуемого атома возможно только при использовании источника излучения со спектрально узкой линией излучения.

Только лазерное излучение может удовлетворять требуемым условиям в большинстве случаев исследования спектральных характеристик атомов. Это связано с тем фактом, что возможно создание лазерного источника непрерывного излучения, спектральная ширина которого меньше спектральных ширин линий

атомных переходов. В этом случае, в измерениях можно пренебречь вкладом спектральной ширины лазерного излучения в определяемую спектральную ширину атомной линии.

В последние десятилетия активно развивается прецизионная лазерная спектроскопия запрещённых в диполь-дипольном приближении переходов. Это связано с тем фактом, что исследование таких переходов является важной задачей для проверки квантово-механических моделей, уточнения фундаментальных констант и построения нового поколения приборов повышенного класса точности. В таких измерениях вопрос точности, используемого для исследования спектральных линий “инструмента”, является крайне актуальным. Это связано с тем фактом, что спектральная ширина стандартных лазерных источников составляет величину порядка нескольких сотен килогерц, в то время как ширины спектральных линий запрещённых переходов атомов могут лежать в герцовом и субгерцовом диапазоне значений. В этом случае, при использовании стандартных лазерных источников, измеряемая ширина спектральной линии будет определяться не шириной исследуемого атомного резонанса, а спектральной шириной лазерного источника, что и ограничивает точность измерений спектральных линий. Решением данной проблемы является создание ультрастабильных лазерных источников с узкими, вплоть до нескольких герц, ширинами линий излучения. Создание таких лазерных источников является сложной фундаментальной и технической задачей, решение которой требует многочисленных междисциплинарных исследований. Описанию методов решения данной задачи и примерам использования созданных уникальных лазерных систем посвящена рассматриваемая диссертационная работа.

В диссертационной работе были получены следующие основные результаты:

- 1) Развита методы ультрабыстрой стабилизации частоты лазерного излучения по пикам пропускания внешнего ультрастабильного резонатора. Достигнутые предельные ширины линий генерации созданных лазерных источников составляют значения единицы герц.
- 2) Разработана и создана система компенсации эффекта Доплера первого порядка на основе активного волоконного ретрорефлектора для проведения прецизионной лазерной спектроскопии переходов.
- 3) Теоретически рассмотрен и экспериментально исследован эффект квантовой интерференции и его влияние на точность определения частоты центроида спектральной линии при спектроскопии переходов $2S - 4P_{1/2}$ и $2S - 4P_{3/2}$ в атоме водорода.
- 4) Получены абсолютные значения частот переходов $2S_{1/2}^{F=0} \rightarrow 4P_{1/2}^{F=1}$ и $2S_{1/2}^{F=0} \rightarrow 4P_{3/2}^{F=1}$ в атоме водорода и значение частоты перехода между центроидом сверхтонкой структуры $2S$ состояния и тонкой структуры $4P$ состояния.
- 5) Установлены новые значения постоянной Ридберга R_∞ и зарядового радиуса протона r_p .

- 6) Создана экспериментальная установка для спектроскопии часового перехода $1S_0-3P_0$ атомов стронция. Для этого была развита техника первичного лазерного охлаждения атомов стронция, широкополосного и узкополосного вторичного охлаждения с последующей загрузкой охлаждённых атомов в оптическую решётку, сформированную излучением на “магической” длине волны. Это позволило осуществить магнито-индуцированную спектроскопию часового перехода $1S_0-3P_0$ в атомах ^{88}Sr . Ширина измеренной спектральной линии на полувысоте составила значение (130 ± 17) Гц.
- 7) Измерена дифференциальная поляризуемость уровней магнитодипольного перехода на длине волны 1,14 мкм атомов тулия и экспериментально определены значения “магических” длин волн для локализации атомов в оптической решётке. Это позволило провести спектроскопию часового перехода на длине волны 1,14 мкм в атоме тулия и зарегистрировать линию перехода спектральной шириной 10 Гц.
- 8) Рассчитана величина относительного сдвига частоты часового перехода в атоме тулия на длине волны 1,14 мкм за счет излучения черного тела. Показано, что данный сдвиг спектральной линии мал по сравнению с другими атомами, рассматриваемыми для создания стандартов частоты оптического диапазона спектра.

Результаты работы прошли широкую апробацию на международных конференциях и симпозиумах, число опубликованных статей в рецензируемых журналах базы данных Web of Science и Scopus - 22, и 16 материалов конференций.

Структурно диссертация состоит из Введения, шести Глав, Заключения и Списка литературы. Объём диссертации составляет 223 страницы. Работа содержит 91 рисунок и 9 таблиц. Список литературы содержит 186 наименований.

Во **Введении** рассмотрены основные этапы развития прецизионной спектроскопии на основе охлаждённых атомов для целей построения стандартов частоты оптического диапазона спектра и представлено краткое содержание глав диссертационной работы.

В **Главе 1** описываются созданные в рамках диссертационной работы ультрастабильные лазерные системы, которые в дальнейшем используются для прецизионной спектроскопии. 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. Приводятся спектральные характеристики созданных лазерных систем: спектральная ширина линии излучения и относительная нестабильность частоты в зависимости от времени усреднения.

Глава 2 посвящена описанию экспериментальной установки по прецизионной спектроскопии перехода $2S-4P$ в атоме водорода. Основным элементом для компенсации эффекта Доплера первого порядка и осуществления прецизионной спектроскопии является разработанный активный волоконный ретрорефлектор.

Описано исследование характеристик созданной системы и анализируются требования к используемым оптическим элементам. Оценивается остаточный эффект Доплера первого порядка в эксперименте по прецизионной спектроскопии перехода $2S-4P$ в атоме водорода.

Глава 3 посвящена рассмотрению эффекта квантовой интерференции, который вносит систематический сдвиг в линии при переходах $2S-4P$ в атоме водорода. Рассматривается как теоретическая модель, включая квантовомеханическое описание эффекта, так и анализ экспериментальных данных. Это позволило оценить остаточный вклад в погрешность определения частоты перехода $2S-4P$ из-за эффекта квантовой интерференции.

Глава 4 посвящена анализу экспериментальных данных по спектроскопии переходов $2S_{1/2}^{F=0} \rightarrow 4P_{1/2}^{F=1}$ и $2S_{1/2}^{F=0} \rightarrow 4P_{3/2}^{F=1}$. Полученное абсолютное значение частоты центроида перехода $2S-4P$, совместно со значением частоты перехода $1S-2S$ позволило получить новые значения постоянной Ридберга и зарядового радиуса протона, которые являются одними из наиболее точных. Приводятся оценки вклада основных физических процессов, приводящих к сдвигу центра линии перехода $2S-4P$. Полученные результаты в дальнейшем были подтверждены другими экспериментальными исследованиями.

Глава 5 посвящена спектроскопии спектрально узких однофотонных переходов в атомах стронция. Производится анализ возможностей лазерного охлаждения атомов стронция для их захвата в оптическую решётку на “магической” длине волны локализуемого излучения. Особенностью созданной установки является последовательное применение нескольких этапов охлаждения: первичного охлаждения на широком спектральном переходе, широкополосном вторичном охлаждении на узком спектральном переходе и узкополосном вторичном охлаждении. Описываются эксперименты по спектроскопии интеркомбинационного перехода $1S_0-3P_1$ в ячейке и магнито-оптической ловушке. Представлен эксперимент по магнито-индуцированной спектроскопии перехода $1S_0-3P_1$ в атомах ^{88}Sr . Измеренная ширина спектральной линии составила значение (130 ± 17) Гц.

Глава 6 посвящена исследованию часового магнито-дипольного перехода на длине волны 1,14 мкм в атомах тулия и поиску “магической” длины волны локализуемого излучения для построения перспективного стандарта частоты оптического диапазона спектра. Для этого описываются особенности структуры электронных уровней тулия, реализация лазерного охлаждения атомов тулия и проводится анализ различных режимов работы магнито-оптической ловушки при вторичном охлаждении на узком спектральном переходе. Представлен метод расчета “магической” длины волны и её экспериментальное определение в оптической решётке для осуществления спектроскопии магнитодипольного перехода на длине волны 1,14 мкм. “Магическая” длина волны излучения оптической решётки составила 813 нм. Определение “магической” длины волны позволило произвести спектроскопию часового перехода. Ширина Фурье-ограниченного контура спектральной линии составила значение 10 Гц. Представлены результаты оценок чувствительности часового перехода в атоме тулия к излучению черного тела

($T=300$ K). Рассмотрено магнитное взаимодействие атомов тулия и его влияние на результаты спектроскопических исследований.

В **Заключении** приводятся основные результаты работы, оценивается их новизна и практическая значимость.

Полученные в диссертационной работе результаты демонстрируют основные подходы в создании ультрастабильных источников лазерного излучения. Использование таких источников на примере прецизионной спектроскопии атомов водорода, стронция и тулия показывают потенциал таких систем как для фундаментальных исследований, так и для решения прикладных задач. К последним относится важное направление – создание ультрастабильных стандартов частоты оптического диапазона спектра.

Полученные результаты могут быть использованы в институтах, проводящих исследования по прецизионной спектроскопии, а так же по созданию и использованию стандартов частоты оптического диапазона спектра, таких как: Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН (ИОФАН), Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ), Институт лазерной физики СО РАН (ИЛФ), Институт прикладной физики РАН (ИПФ) и других.

Диссертационная работа не лишена ряда недостатков, которые перечислены ниже:

1. В основе диссертационной работы лежит создание и использование ультрастабильных лазерных систем на основе стабилизации частоты лазерного излучения по частоте пропускания внешнего ультрастабильного резонатора из стекла ULE. Однако в работе отсутствует анализ методов стабилизации частоты лазерных источников, основных физических процессов, приводящих к уширению спектральной линии генерации и, как следствие, обоснование выбранного подхода в стабилизации частоты излучения. Из представленного списка литературы только 13% относится к первой главе, в которой описан основной подход в создании лазерных систем, использование которых является основой экспериментальных исследований, приведённых в последующих главах.

2. Для подавления линейного эффекта Доплера в эксперименте по спектроскопии перехода $2S-4P$ в атоме водорода используется система компенсации на основе активного волоконного ретрорефлектора. Конструкция ретрорефлектора такова, что атомы водорода взаимодействуют не с плоской волной, а с криволинейным волновым фронтом. Изменение фазы лазерного излучения вдоль траектории пролёта атома в этом случае отлично от случая, когда атом пролетает через плоскую волну, что должно отражаться в изменении контура спектральной линии. Данный эффект не обсуждается в работе и не анализируется его вклад в сдвиг спектральной линии и погрешность измерения.

3. При локализации атомов стронция в магнито-оптической ловушке (МОЛ), сформированной излучением взаимодействующим с атомами на узком спектральном переходе (вторичное охлаждение) коэффициент перегрузки атомов из первичной

МОЛ (около 6% при оптимальных условиях) оказался меньше, чем приведённые коэффициенты других научных групп (10-40%). В работе отсутствует анализ данного расхождения. Так же отсутствует сравнение общего количества локализованных атомов в сравнении с другими научными коллективами, которые проводят исследования по охлаждению и локализации атомов стронция.

4. При описании цикла узкополосного вторичного охлаждения атомов стронция указано: “Дальнейшее охлаждение атомов осуществляется узкополосным лазерным излучением (лазер «привязан» к резонатору ULE, частотная модуляция отключается) с красной отстройкой частоты порядка $100\gamma_2$ от резонанса, что необходимо для уменьшения скорости рассеяния фотонов на интеркомбинационном переходе.” Необходимо отметить, что вторичное охлаждение производится именно на интеркомбинационном переходе. Сила лазерного давления пропорциональна количеству рассеянных на этом переходе фотонов. Выбирая высокую отстройку $100\gamma_2$ относительно точной частоты атомного перехода, действительно уменьшается количество рассеянных фотонов, но это должно приводить к уменьшению силы светового давления. В работе не обсуждается выбор такого режима. Ширина доплеровского контура после цикла широкополосного вторичного охлаждения составляет значение менее 100 кГц, ширина резонанса $\gamma_2=7,4$ кГц. Из общих соображений по физике магнито-оптических ловушек, трудно ожидать отстроек охлаждающего излучения более чем $(20-50)\gamma_2$.

5. Сканирование частоты лазерного излучения для спектроскопии атомов стронция осуществлялось акусто-оптическим модулятором (АОМ). Частота дифрагированного излучения определяется частотой высокочастотного генератора АОМ. В силу этого стабильность частоты при таком сканировании будет определяться стабильностью используемого генератора, которая в рамках диссертационной работы не обсуждается.

6. Получение Фурье-ограниченного контура линии поглощения в атоме тулия с шириной 10 Гц проводилось при времени взаимодействия атома с полем 80 мс. Ожидаемое время спиновой релаксации атомов в двумерной оптической решётке составляет значение порядка 30 мс для взаимодействия двух соседних атомов (рис.6.25). Этот эффект будет ограничивать доступные времена взаимодействия атомов с лазерным излучением. В диссертационной работе указано, что степень заполнения двумерной решётки будет отлична от единицы, что, по мнению автора, проводить спектроскопию. Однако измерения проводятся с усреднением по нескольким реализациям. Вероятность заселения двух соседних потенциальных ям отлична от нуля, что в условиях повторяющихся измерений будет вносить вклад в ошибку измерения. Данная ошибка никак не обсуждается в диссертационной работе.

Приведённые замечания не снижают высокой научной ценности представленной работы и значимости её вклада для развития данной области.

Автореферат полностью соответствует содержанию и результатам диссертации.

Диссертационная работа «Прецизионная спектроскопия однофотонных переходов с использованием ультрастабильных лазерных источников», представленная Хабаровой Ксенией Юрьевной, является законченным научным исследованием, по своей тематике, полностью соответствует заявленной специальности и удовлетворяет требованиям, установленным в Положении о присуждении учёных степеней, утверждённом постановлением № 842 Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г., а автор работы, безусловно, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика.

Доклад по материалам диссертационной работы был представлен автором 7 июля 2021 года на семинаре №1115 отдела лазерной спектроскопии ИСАН.

Отзыв на диссертацию составлен главным научным сотрудником отдела лазерной спектроскопии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института спектроскопии Российской Академии наук (ИСАН), Балыкиным Виктором Ивановичем и одобрен на семинаре №1115 отдела лазерной спектроскопии ИСАН 7 июля 2021 г.

Главный научный сотрудник, исполняющий обязанности заведующего Лабораторией лазерной спектроскопии Отдела лазерной спектроскопии ИСАН, доктор физико-математических наук, профессор

/Балыкин Виктор Иванович/

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН),
108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, 5.
телефон: 8(495)851-02-33
e-mail: balykin@isan.troitsk.ru

Главный научный сотрудник, исполняющий обязанности заведующего Отделом лазерной спектроскопии ИСАН, доктор физико-математических наук

/Рябов Евгений Артурович/

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН),
108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, 5.
телефон: 8(495)851-02-31
e-mail: ryabov@isan.troitsk.ru

Подписи сотрудников ИСАН В.И. Балыкина и Е.А. Рябова заверяю.

/Кильдиярова Римма Рифовна/

Учёный секретарь ИСАН, кандидат физико-математических наук



Список основных публикаций по тематике диссертации К.Ю. Хабаровой
работников ведущей организации в рецензируемых изданиях за последние 5
лет

1. Afanasiev A. E., Mashko A.M., Meysterson A.A., Balykin V.I., Spectroscopy of atoms in an optical dipole trap using spectrally selective heating by a probe laser field //Quantum Electronics. – 2020. – Т. 50. – №. 3. – С. 206.
2. Afanasiev A. E., Meysterson A.A., Mashko A.M., Melementiev P.N., Balykin V.I., Atom femto trap: experimental realization //Applied Physics B. – 2020. – Т. 126. – Номер статьи 26.
3. Mashko A. M., Meysterson A.A., Afanasiev A. E., Balykin V.I., Atom femtosecond optical trap based on spectrally filtered laser radiation //Quantum Electronics. – 2020. – Т. 50. – №. 6. – С. 530.
4. Afanasiev A. E., Mashko A.M., Meysterson A.A., Balykin V.I., Spectroscopy of Rubidium Atoms in a Femtosecond Pulsed Optical Dipole Trap //JETP Letters. – 2020. – Т. 111. – №. 11. – С. 608-612.
5. Afanasiev A. E., Melentiev P.N., Kuzin A.A., Kalatskiy A.Y., Quantum transport of a single photon through a subwavelength hole by a single atom //Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 2017. – Т. 125. – №. 3. – С. 372-383.
6. Kalatskiy A. Y., Afanasiev A. E., Melentiev P.N., Balykin V.I., Frequency stabilization of a diode laser on the $5P \rightarrow 5D$ transition of the Rb atom //Laser Physics. – 2017. – Т. 27. – №. 5. – С. 055703.
7. Afanasiev A. E., Melentiev P.N., Kuzin A.A., Kalatskiy A.Y., Balykin V.I., Photon transport through a nanohole by a moving atom //New Journal of Physics. – 2016. – Т. 18. – №. 5. – С. 053015.
8. Afanasiev A. E., Melentiev P.N., Kuzin A.A., Kalatskiy A.Y., Balykin V.I., Quantum transport of a single photon through a subwavelength hole by a single atom //Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 2017. – Т. 125. – №. 3. – С. 372-383.
9. Ivanov S. K., Kamchatnov A. M. Simple waves in a two-component Bose-Einstein condensate //Physical Review E. – 2018. – Т. 97. – №. 4. – С. 042208.
10. Kartashov Y. V. Konotop V.V., Zezyulin D.A., Torner L., Bloch oscillations in optical and Zeeman lattices in the presence of spin-orbit coupling //Physical Review Letters. – 2016. – Т. 117. – №. 21. – С. 215301.