

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.070.01 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
НАУКИ ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 29.03.2024 г. № 2

О присуждении Месензовой Ирине Сергеевне, гражданке России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация **«Многочастотная лазерная спектроскопия атомов щелочных металлов в миниатюрных газовых ячейках»** по специальности «1.3.19 – Лазерная физика» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук принята к защите 19.01.2024 г., протокол № 2 диссертационным советом 24.1.070.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 15Б, приказ № 105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель Месензова Ирина Сергеевна, 1994 года рождения, в 2018 г. окончила магистратуру Новосибирского государственного технического университета с отличием по специальности «16.04.01 – Техническая физика». С 2018 г. по 2022 г. очно обучалась в аспирантуре ИЛФ СО РАН, работает научным сотрудником в Институте лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

Диссертация выполнена в группе 1.2 лазерной спектроскопии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ФГБУН ИЛФ СО РАН)

Научный руководитель – **Скворцов Михаил Николаевич**, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник группы 1.2 лазерной спектроскопии ИЛФ СО РАН.

Официальные оппоненты:

Каблуков Сергей Иванович - доктор физико-математических наук (специальность 01.04.05 – «оптика»), профессор РАН, главный научный сотрудник лаборатории оптических сенсорных систем (18) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (ФГБУН ИАИЭ СО РАН).

Раднатаров Даба Александрович - кандидат физико-математических наук (специальность 01.04.05 – «оптика»), старший научный сотрудник отдела лазерной физики и инновационных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Новосибирский национальный исследовательский государственный университет (ФГАОУВО НГУ).

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»), Санкт-Петербург дала положительный отзыв на диссертацию. Отзыв составлен и подписан д.ф.-м.н. Лиокумовичем Леонидом Борисовичем профессором Высшей школы прикладной физики и космических технологий и к.ф.-м.н. Баранцевым Константином Анатольевичем доцентом Высшей школы прикладной физики и космических технологий, утверждён проректором по научной работе Фоминым Юрием Владимировичем.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обоснован их компетентностью в области оптики, лазерной физики, спектроскопии атомов, когерентного пленения населенностей, стандартах частоты, известностью своими достижениями и публикациями в этих областях и способностью оценить научную и практическую ценность диссертации.

В своем положительном заключении ведущая организация указала, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, имеющую большую научную и практическую ценность, содержащую новые результаты, совокупность которых можно квалифицировать, как новое

научное достижение в области спектроскопии щелочных металлов (Rb и Cs) и стандартов частоты на их основе.

В отзыве ведущей организации присутствуют следующие замечания:

1. В Главе 1 имеются несколько избыточных абзацев, без которых текст диссертации выглядел бы более содержательным, ёмким.

2. В Главе 2 присутствуют повторы в техническом описании схем экспериментов, для лучшего восприятия информации лучше структурировать текст и убрать повторы.

3. Недостаточно подробно в Главе 2 описан новый метод модуляции, микроволновая модификация метода Паунда-Древера-Холла.

4. В диссертации в Главе 3 сравниваются два способа наблюдения резонанса КПН при модуляции на 3.4 ГГц, и 6.8 ГГц. При этом лазер возбуждающий КПН эффект необходимо настраивать на разные длины волн чтобы в случае 3.4 ГГц модуляции боковые полосы оказались в резонансе с переходами в парах щелочного металла, а в случае на 6.8 ГГц основное излучение + одна из боковых полос оказались в аналогичном резонансе. Оценки разницы характеристик лазера на этих длинах волн не приведено.

Замечания оппонента Каблукова С. И.:

1. В диссертации рассматривается создание модуляции оптического излучения на сверхвысоких частотах и оперируется величиной индекса модуляции (см., например, стр. 74). Считаю, что в диссертации следовало привести определение для индекса модуляции и описать метод его измерения.
2. При постановке задачи и обсуждении результатов в диссертации говорится про «регистрацию нелинейных резонансов по углу поворота линейной поляризации». Например, в заключительной части на стр. 115 написано: "была исследована поляриметрическая техника регистрации нелинейных резонансов по углу поворота линейной поляризации, происходящему из-за сильного линейного дихроизма, наведенного в среде лазерным полем." Странно, что в самом тексте диссертации не приведены значения углов поворота линейной поляризации наблюдаемых в экспериментах и связанных с сильным линейным дихроизмом.

3. При описании работы схемы экспериментальной установки с дифференциальным приемом сигналов на стр. 95, приведенной на Рис. 4.4, утверждается, что «с помощью призмы Волластона» пробная волна разбивается на две компоненты с разными поляризациями. Однако на Рис. 4.4 перед призмой Волластона изображен поляризационный кубик, который должен оставить только одну поляризационную компоненту в пробной волне. В связи с этим, не понятно, как может работать схема с дифференциальным фотоприемником?
4. В диссертации допущен ряд неточностей. Например, аппроксимация функцией Лоренца названа в подписи к Рис. 2.2 экстраполяцией, а вместо ссылки на свою работу в конце выводов к главе 3 (где сказано: «планируется серия экспериментов с нашим устройством. Результаты были опубликованы [164]») ошибочно приводится ссылка на чужую.

Замечания оппонента Раднатарова Д. А. :

- В пункте 2 Заключения на страницах 116-117, текст сформулирован таким образом, что создается впечатление проведения сравнения долговременной стабильности частоты при значениях индекса модуляции, соответствующих наименьшей чувствительности положения резонанса к вариациям полной оптической мощности и амплитуды СВЧ сигнала. Однако, согласно содержанию работы, сравнение производилось между индексами модуляции, обеспечивающими максимальный контраст КПН резонанса и наименьшую чувствительность к вариациям СВЧ сигнала.
- В работе не описаны методики и погрешности измерений стабильности параметров установки, приведенных в таблице 2.1 на странице 66, которые использовались для расчета бюджета сдвигов частоты КСЧ при двух индексах модуляции. Отсутствие этой информации затрудняет точности представленных данных.
- На странице 85, исходя из результатов, представленных на рисунке 3.9, автор делает вывод о том, что при использовании частоты модуляции 6.8 ГГц, сдвиг резонанса значительно меньше при стабилизации за линию поглощения с комбинацией несущей и низкочастотной боковой полосы по сравнению со

схемой с высокочастотной боковой полосой. Однако объяснение причин такого различия в работе не приводится.

- На странице 86 предложение о том, что различие от теоретического расчета для выигрыша в 4 раза можно объяснить дрейфом частоты генератора от температуры, оставляет вопросы относительно его точного значения и контекста.

- На странице 99 указано, что параметр качества Q рассчитывался как отношение амплитуды к ширине резонанса и к шуму, причем шумы лазера измерялись на аудиоанализаторе Stanford Research Systems SR1. Неясно, какая именно характеристика шума была использована для расчета параметра качества Q .

- В главе 4.5, в выводах на странице 115, утверждение о том, что "ожидаемый полученный результат находится на уровне развития мировой науки и пока не достигнут", требует уточнения. Следовало более четко определить, какие именно аспекты исследования соответствуют текущему уровню мировой науки, и какие результаты пока не достигнуты.

Так же отмечено, что эти замечания ни в коей мере не уменьшают ценности диссертации, которая представляет собой завершённое научное исследование на актуальную тему, выполненное на высоком научном уровне.

В положительных отзывах оппонентов и ведущей организации отмечается актуальность темы диссертационной работы для лазерной физики и высокий профессиональный уровень её выполнения, а также новизна, научная и практическая значимость результатов. Автореферат в полной мере соответствует диссертации и отражает её содержание, соискатель заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности «1.3.19 – Лазерная физика».

На диссертацию и автореферат поступило 6 отзывов:

от д.ф.-м.н. Картошкина В.А., д.ф.-м.н. Кобцева С.М., к. ф.-м. н. Магунова А.И., к.ф.-м.н. Афанасьева А.Е., к.ф.-м.н. Зиброва С.А., к.ф.-м.н., Кореля И.И. Все поступившие отзывы положительные. Отзывы содержат не критичные замечания, которые не влияют на высокий уровень оценки диссертации.

Соискатель имеет по теме диссертации 7 статей, зарегистрировано 3 патента. Два патента на полезную модель и один на изобретение. Наиболее значимые работы:

1. Сравнение полевых сдвигов в атомных часах на основе эффекта когерентного пленения населенностей в атомах 87Rb при модуляции тока накачки лазера на частотах 3.4 и 6.8 ГГц / С.М. Игнатович, М.Н. Скворцов, И.С. Месенцова [и др.] // Квантовая электроника. – 2022. – Т. 52. – № 4. – С. 386-390.

2. Nonlinear enhanced-absorption resonances in compact alkali-vapor cells for applications in quantum metrology / D.V. Brazhnikov, S.M. Ignatovich, I.S. Mesenzova [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – V. 1859. – P. 012019.

3. Двухчастотная субдоплеровская спектроскопия D1-линии атомов цезия в различных конфигурациях встречных лазерных пучков / Д.В. Бражников, С.М. Игнатович, И.С. Месенцова [и др.] // Квантовая электроника. – 2020. – Т. 50. – № 11. – С. 1015-1022.

4. Миниатюрный квантовый стандарт частоты на основе явления когерентного пленения населённости в парах атомов 87Rb / М.Н. Скворцов, С.М. Игнатович, В.И. Вишняков, Н.Л. Квашнин, И.С. Месенцова [и др.] // Квантовая электроника. – 2020. – Т. 50. – № 6. – С. 576-580.

5. Investigation of commercial 894.6 nm vertical-cavity surface-emitting lasers for applications in quantum metrology / A.O. Makarov, S.M. Ignatovich, V.I. Vishnyakov, I.S. Mesenzova [et al.] // AIP Conference Proceedings. – 2019. – V. 2098. – P. 020010.

6. Исследования параметров резонанса когерентного пленения населенностей и полевых сдвигов при регистрации сигнала из разных областей поперечного сечения взаимодействия лазерного излучения с атомами / С.М. Игнатович, М.Н. Скворцов, И.С. Месенцова, Н.Л. Квашнин, В.И. Вишняков, Д.В. Бражников, Д.Е. Тарасенко // ЖЭТФ – 2023. – Т.164. – вып. 2(8) – С. 214-222.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований показано:

- Удалось добиться высокой кратковременной стабильности, в частности,

за счет использования аналога метода Паунда-Древера-Холла при стабилизации частоты микроволнового генератора по реперным резонансам. Этот метод предполагает, что для формирования сигнала ошибки частота сканирования резонанса КПН значительно превышает ширину этого резонанса. Это позволяет повысить быстродействие системы стабилизации, а также повысить отношение сигнал/шум. В большинстве работ такой метод стабилизации не используется.

- Изучена зависимость сдвига частоты выходного сигнала КСЧ (10 МГц) от мощности генератора СВЧ, производящего модуляцию тока лазера. Полученная зависимость позволила определить оптимальную мощность генератора (индекс частотной модуляции излучения), при которой частота выходного сигнала КСЧ нечувствительна к малым вариациям этой мощности. Также оказалось, что при этой мощности частота сигнала КСЧ имеет слабую чувствительность к вариациям оптической мощности лазерного излучения. Эти исследования позволили получить высокую долговременную стабильность сигнала КСЧ.

- Измерен сравнительный бюджет сдвигов (от уровня мощности СВЧ модуляции, от изменения оптической мощности) для случаев модуляции тока лазера на частоте 3.4 ГГц и 6.8 ГГц. Проведённые исследования по сравнению параметров КПН резонанса в ^{87}Rb на линии D1 для случаев модуляции тока лазера на частоте 3.4 ГГц и 6.8 ГГц показали, что крутизна частотного дискриминатора, полученного на базе КПН резонанса при оптимальной мощности СВЧ, в обоих случаях одинакова.

- Исследования полевых сдвигов стандарта частоты на базе КПН резонансов показали, что в случае модуляции тока лазера на частоте 6.8 ГГц полевые сдвиги в 2÷4 раза меньше. Достигнутый результат по кратковременной нестабильности $3 \cdot 10^{-12}$ за 1 с. показал перспективность данного подхода для применения в миниатюрных атомных часах.

- Продемонстрирована возможность исключения ЭОМ из оптической схемы для наблюдения субдоплеровских резонансов с помощью прямой СВЧ модуляции тока накачки DBR-лазера.

- Для повышения контраста резонансов и улучшения отношения сигнал/шум была исследована поляриметрическая техника регистрации нелинейных резонансов по углу поворота линейной поляризации, происходящему из-за сильного линейного дихроизма, наведенного в среде лазерным полем. Этот метод показал хорошие перспективы для этой цели и, в частности, измерения отношения сигнал/шум показывают, что может быть достигнута кратковременная нестабильность на уровне 10^{-13} за 1 с усреднения.

- Измерены пространственные осцилляции амплитуды резонанса. Получилось, что на всём периоде амплитуда резонанса изменяется более, чем в два раза. Это является очень полезным результатом исследования, для максимизации контраста нелинейного резонанса и получения лучших метрологических характеристик.

Практическая значимость исследований заключается в том, что:

Разработан миниатюрный (≈ 60 см³) микроволновый квантовый стандарт частоты на основе резонансов КПН. При этом итоговая потребляемая мощность всего стандарта находится на уровне 300 мВт. Получены высокие метрологические характеристики: 9×10^{-12} за 1 с усреднения, 3×10^{-13} за 1000 с и 1.5×10^{-12} за 24 ч.

С точки зрения улучшения отношения сигнал/шум исследован режим, в котором частота сканирования существенно больше ширины резонанса. Такой «динамический» метод возбуждения резонансов КПН применяется впервые и аналогичен широко используемому методу Паунда-Древера-Холла (ПДХ) в оптической области спектра.

При изменении СВЧ мощности, модулирующей ток лазера, меняется индекс модуляции частоты лазера, что приводит к изменению полевого сдвига КПН резонанса. Правильный подбор величины модулирующей СВЧ мощности с учетом модуляционных характеристик конкретного ЛВР позволяет минимизировать данный сдвиг КПН резонанса.

Проведено исследование и измерение сдвиговых характеристик субдоплеровского резонанса в многочастотном поле накачки для оптического стандарта частоты и, учитывая шумы сигнала ошибки на выходе синхронного

детектора и параметр качества, получена расчётная кратковременная нестабильность за время усреднения 1 с. на уровне 10^{-13} .

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

Развитие методов наблюдения резонансов КПН, проведенное в настоящей работе, нацелено, в основном, на улучшение метрологических характеристик, разрабатываемых в ИЛФ СО РАН миниатюрных атомных часов. Некоторые результаты уже были внедрены в создание образца таких часов, другие – могут быть использованы в следующих версиях. Такие атомные часы, как уже было описано выше, крайне востребованы для развития многих технологий, таких, например, как спутниковая навигация, широкополосные коммуникации, высокостабильная связь, умные энергетические сети, зондирование ионосферы Земли и других.

Другое направление в области квантовой метрологии, затронутое настоящей диссертационной работой, является довольно молодым – это создание миниатюрных КСЧ в оптическом диапазоне. Такие устройства могут лечь в основу миниатюрных оптических атомных часов при использовании технологии микрорезонаторов для переноса стабильности из оптического в микроволновый диапазон. При этом, стабильность таких часов, как ожидается, будет в несколько раз выше, чем у существующих миниатюрных атомных часов на основе явления КПН. Помимо атомных часов, миниатюрные КСЧ оптического диапазона могут использоваться в создании компактных версий атомно-интерферометрических сенсоров (гравиметров, акселерометров, гироскопов) в качестве высокостабильных источников излучения. Научный интерес к таким сенсорам в настоящее время очень высок в связи с тем, что они способны решать, как задачи из области фундаментальной физики (проверка теоретических гипотез, поиск «новой» физики), так и сложные технические задачи, требующие высокопрецизионных измерений на Земле и в космосе.

Оценка достоверности результатов исследования

Полученные результаты обладают воспроизводимостью, не противоречат теоретическим представлениям о наблюдаемых эффектах; они обсуждались на

международных конференциях с коллегами – специалистами в области лазерной спектроскопии атомов, а также прошли рецензирование со стороны экспертов при опубликовании в научной печати. Некоторые результаты уже были воплощены на практике при разработке миниатюрных атомных часов. Все это говорит в пользу достоверности полученных результатов и выводов.

Личный вклад соискателя

Диссертационная работа выполнена в ИЛФ СО РАН Месензовой И.С. Соискатель участвовал в постановке задач, осуществлял обзор литературы по теме работы, разрабатывал и создавал экспериментальные стенды и проводил соответствующие эксперименты. Рассчитывал теоретические модели экспериментов. Самостоятельно проводил анализ экспериментальных данных, их обработку для представления на конференциях и публикации в научной печати.

Из 21 человек, входящих в состав диссертационного совета, на защите присутствовали, очно и в удаленном интерактивном режимах, 19 человек, из них 12 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации. Дополнительно введенных членов на разовую защиту не было.

При проведении тайного голосования с использованием информационных технологий проголосовали: За - 19, против - нет. Диссертационный совет утвердил протокол о результатах голосования.

На заседании 29.03.2024 г. диссертационный совет принял решение присудить Месензовой Ирине Сергеевне ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности «1.3.19. – Лазерная физика».

Председатель диссертационного совета,
академик РАН

Багаев Сергей Николаевич

Ученый секретарь диссертационного совета,
д.ф.-м.н.

Прудников Олег Николаевич

29 марта 2024 г.

