

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Месензовой Ирины Сергеевны

«Многочастотная лазерная спектроскопия атомов щелочных металлов в миниатюрных газовых ячейках»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика

Актуальность темы диссертации.

Методы прецизионной лазерной спектроскопии атомарных паров щелочных металлов заключенных в оптическую ячейку являются ключевыми для множества лазерных технологий, используемых как в прикладных, так и в фундаментальных исследованиях в физике. Эти методы обеспечивают основу для разработки высокостабильных миниатюрных атомных часов, отвечающих требованиям как наземных, так и космических технологий. Актуальность темы диссертации обусловлена необходимостью дальнейшего развития технологий, основанных на когерентном пленении населенностей (КПН), для улучшения стабильности квантовых стандартов частоты. В частности, внимание уделяется развитию двухчастотной субдоплеровской спектроскопии, позволяющей достигать высококонтрастных нелинейных резонансов с использованием микроячеек. Такие исследования открывают новые перспективы для создания миниатюрных оптических стандартов частоты с улучшенными метрологическими характеристиками, что подчеркивает значимость и актуальность изучаемой проблематики.

Содержание работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка цитируемой литературы (167 наименований). Работа изложена на 140 страницах текста, включая 42 рисунка и 2 таблицы.

Во **Введении** обосновывается актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, представлены основные защищаемые положения, аргументируется научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены данные по апробации работы, личному вкладу диссертанта объему и структуре диссертации.

В **первой главе** дан обзор научной литературы по теме диссертации и представлено состояние проблемы исследований. Глава содержит краткий очерк основных теоретических положений и необходимых сведений, касающихся эффекта когерентного пленения населенностей. Анализируются полученные ранее ключевые результаты в области исследований, которой посвящена данная работы.

Во **второй главе** описывается разработка миниатюрного микроволнового квантового стандарта частоты на основе эффекта когерентного пленения населенностей (КПН) с объемом около 60 см^3 . Достигнуты выдающиеся метрологические характеристики, значительно превосходящие показатели некоторых коммерческих аналогов, включая стабильность 9×10^{-12} за 1 с, 3×10^{-13} за 1000 с и 1.5×10^{-12} за 24 ч. Улучшение кратковременной стабильности было достигнуто благодаря применению метода, похожего на методику Паунда-Древера-Холла, что обеспечило высокое быстродействие системы стабилизации и улучшенное отношение сигнал/шум. Также была исследована долговременная стабильность частоты при различных уровнях мощности СВЧ модуляции, продемонстрировано, что выбор оптимального индекса модуляции, делающий частоту часового перехода малочувствительной к вариациям мощности СВЧ сигнала и оптической мощности, существенно улучшает долговременную стабильность. Исследования сдвиговых характеристик КПН резонанса от различных факторов подтвердили эффективность выбранного подхода для улучшения долговременной стабильности стандарта.

В **третьей главе** исследуется метод уменьшения влияния световых сдвигов на частоту часового перехода через СВЧ модуляцию на частоте, соответствующей полной частоте сверхтонкого расщепления в основном состоянии атома ^{87}Rb (примерно 6.8 ГГц). Этот подход к возбуждению КПН резонансов, использующий как несущую частоту, так и одну из боковых полос, мало изучен в контексте миниатюрных атомных часов и демонстрирует меньшие световые сдвиги часового перехода по сравнению с традиционным методом. В работе приводятся результаты измерений для различных режимов модуляции тока лазера на частотах 3.4 и 6.8 ГГц, с фокусом на оптимальных условиях, выявленных в предыдущих исследованиях. Исследование включало шесть различных схем наблюдения КПН резонанса, основанных на комбинациях низко- и высокочастотных боковых полос с несущей.

Результаты показали, что модуляция на 6.8 ГГц приводит к значительно меньшим сдвигам частоты от изменений мощности СВЧ, особенно при использовании низкочастотной боковой полосы, что указывает на меньшую чувствительность к вариациям мощности лазера в этом режиме.

Дополнительно было изучено влияние обоих способов модуляции на функцию Аллана, показывающую улучшение долговременной стабильности при использовании 6.8 ГГц модуляции. Это улучшение демонстрирует значительный потенциал метода для повышения точности и надежности миниатюрных атомных часов.

Четвертая глава диссертации посвящена исследованию в области двухчастной спектроскопии щелочных металлов в контексте создания миниатюрных оптических квантовых стандартов частоты (КСЧ). Основное внимание уделено двухчастной спектроскопии атомов цезия и различным методам формирования лазерного поля для возбуждения, включая использование внешнего электрооптического модулятора (ЭОМ) и модуляции тока лазеров DBR и VCSEL.

Выявлены преимущества методов с прямой СВЧ модуляцией тока из-за меньших габаритов оптической схемы. Разработан новый метод атомной спектроскопии, аналогичный методу резонансов насыщенного поглощения с использованием двухчастотных лазерных пучков, который демонстрирует обещающие результаты для создания миниатюрного оптического КСЧ без необходимости использования габаритного внешнего ЭОМ.

Представлены экспериментальные зависимости качества оптических субдоплеровских резонансов от температуры ячейки для различных методов возбуждения, показывающие сравнимые параметры качества, что подтверждает перспективность этих подходов в создании миниатюрного оптического КСЧ. Особенно отмечается улучшение параметров качества резонанса в схеме с прямой модуляцией, что является обнадеживающим для устранения ЭОМ из оптической схемы. Приводятся результаты наблюдения эффекта пространственных осцилляций амплитуды резонанса в многочастотном лазерном поле, демонстрирующие возможность управления КПН эффектом через изменение фазы СВЧ модуляции, что может быть использовано для максимизации контраста нелинейного резонанса и улучшения результатов при создании оптического стандарта частоты.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, получены на основе апробированных экспериментальных методов. Защищаемые положения вытекают из представленных в диссертации и опубликованных в рецензируемых изданиях результатов исследования. Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с современными теоретическими представлениями в данной

области исследований. Таким образом, степень обоснованности достаточна для кандидатской диссертации.

Достоверность и апробация научных результатов.

Достоверность представленных в диссертационной работе результатов обеспечивается строгим обоснованием предложенных моделей, детально проведенным экспериментальным исследованием, сравнением полученных экспериментальных данных с опубликованными результатами других авторов.

Основные результаты работы опубликованы в 7 работах в ведущих рецензируемых журналах и изданиях, индексируемых системой WoS и определенных ВАК Министерства образования РФ.

Научная новизна и практическая значимость работы.

Научная новизна диссертационной работы выражается в нескольких ключевых аспектах, развивающих теоретические и практические аспекты в области миниатюрных оптических квантовых стандартов частоты и атомной спектроскопии. В первую очередь следует отметить исследование новых методов СВЧ модуляции на частоте сверхтонкого расщепления для уменьшения световых сдвигов. Также значимым является исследование двухчастотной спектроскопии атомов цезия с использованием различных способов формирования лазерного поля. Разработка метода лазерной спектроскопии, использующего двухчастотные лазерные пучки, открывает новые подходы к созданию миниатюрных оптических КСЧ.

Практическая значимость работы обусловлена разработкой и усовершенствованием миниатюрных оптических квантовых стандартов частоты, которые находят широкое применение в научных исследованиях, промышленности, навигации и связи. Улучшение долговременной стабильности атомных часов благодаря новым методам снижения световых сдвигов способствует повышению точности временных измерений и

улучшению систем глобального позиционирования и телекоммуникаций. Миниатюризация оптической схемы КСЧ без использования габаритных внешних электрооптических модуляторов снижает стоимость и сложность производства, делая оптические стандарты частоты более доступными для использования в различных приложениях. Также, разработка новых методов атомной спектроскопии открывает путь к созданию высокоточных измерительных устройств, что имеет важное значение для науки и техники.

Основные положения диссертации И.С. Месензовой, выносимые на защиту, обладают безусловной **научной новизной**.

Автореферат верно отражает содержание диссертации.

Тем не менее, диссертация не лишена некоторых, весьма незначительных, **недостатков**:

1. 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.
2. 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.
3. 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.

4. 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.
5. 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 .
6. 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.

Указанные недостатки ни в коей мере не уменьшают ценности диссертации, которая представляет собой завершенное научное исследование на актуальную тему, выполненное на высоком научном уровне с привлечением современных экспериментальных методик, и содержит ценные научные и практические результаты, способствующие развитию технологий квантовых стандартов частоты, и обещает значительное влияние на дальнейшие исследования и разработки в данной области.

Заключение.

Считаю, что диссертационная работа И.С. Месензовой является законченной научно-квалификационной работой по актуальной теме и вносит существенный вклад в понимание физических процессов лежащих в основе современных подходов к созданию миниатюрных атомных стандартов частоты. Достоверность результатов диссертации не вызывает сомнений, сформулированные выводы обоснованы, обладают научной новизной и представляют научную и практическую значимость. Работа полностью отвечает требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а ее автор Месензова Ирина Сергеевна, заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика.

Официальный оппонент
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Отдела лазерной физики и инновационных технологий
ФГАОУ ВО «Новосибирский национальный
исследовательский государственный университет»

11.03.2024 г.



Д.А. Раднатаров

Почтовый адрес: 630090, Новосибирская область, г. Новосибирск,
ул. Пирогова, д. 2
тел.: +79232200519, электронный адрес: d.radnatarov@gmail.com

Подпись к.ф.-м.н Д.А. Раднатарова заверяю:
Ученый секретарь ученого совета НГУ, к.х.н.

