На правах рукописи

Месензова Ирина Сергеевна

Многочастотная лазерная спектроскопия атомов щелочных металлов в миниатюрных газовых ячейках

Специальность 1.3.19 – «Лазерная физика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск -2024

Работа 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,
ФГБУН ИЛФ СО РАН

Официальные оппоненты: **Каблуков Сергей Иванович**
доктор физико-математических наук,
ФГБУН ИАИЭ СО РАН

Раднатаров Даба Александрович
кандидат физико-математических наук,
ФГАОУВО НГУ

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Защита состоится «29 марта» 2024 года в 15 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета 24.1.070.01, созданного на базе Института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук, по адресу: 630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева 15Б.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБУН Института лазерной физики СО РАН http://www.laser.nsc.ru/
Автореферат разослан «_____» 2024 года.

/

Ученый секретарь диссертационного совета
д.ф.-м.н. О.Н. Прудников

Актуальность работы

В настоящее время методы прецизионной лазерной спектроскопии атомов и молекул составляют основу многих лазерных технологий для решения как прикладных задач, так и задач из области фундаментальной физики, например, проверка постоянства мировых констант, поиск тёмной материи, поиск постоянных дипольных моментов у электрона и нейтрона, наблюдение и измерение лэмбовского сдвига, а также наблюдение многих других эффектов, предсказываемых общей теорией относительности и квантовой электродинамикой.

Большой интерес к разработке миниатюрных атомных часов продиктован увеличивающимся спросом на них со стороны различных как наземных, так и космических технологий. Таким образом, становится очевидна актуальность развития технологий, связанных с высокостабильными миниатюрными атомными часами на резонансах КПН (когерентного пленения населённостей). Такое развитие затрагивает не только чисто технических усовершенствования, но и требует новых решений со стороны физики: развитие методов лазерной спектроскопии атомов для решения задач, связанных с улучшением кратковременной и долговременной стабильности квантового стандарта частоты (КСЧ), с понижением рабочей температуры ячейки с парами атомов щелочного металла и другие задачи.

Наиболее компактные КСЧ до недавнего времени существовали лишь в микроволновом диапазоне (атомные часы на основе двойного радиооптического резонанса (ДРОР) и КПН. В оптической области спектра долгое время не удавалось добиться того же сочетания высокой степени миниатюризации устройства и приемлемых метрологических характеристик. Миниатюрные варианты микроволновых КСЧ-КПН используют газовые ячейки с объемом $V < 1$ см^3. Первые попытки создать оптический КСЧ с ячейкой такого же масштаба были предприняты в работе [1]. В этой работе использовалась микроячейка, созданная по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС), наполненная парами рубидия. В качестве реперного сигнала использовался резонанс насыщенного поглощения (РНП) в поле встречных световых волн. Однако эти исследования так и не были доведены до измерения стабильности оптической частоты.

Другое направление развивается в группе исследователей, объединяющей сотрудников FEMTO-ST (г. Безансон) и ИЛФ СО РАН (г. Новосибирск). Ими была предложена схема двухчастотной субдоплеровской спектроскопии (ДСС) атомов цезия [2], в которой наблюдались высококонтрастные однородно уширенные нелинейные резонансы с использованием микроячейки с объемом спектроскопии всего ≈ 4.5 мм^3. Последние результаты по измерению стабильности оптической частоты излучения диодного DFB-лазера, стабилизированной с использованием ДСС, дают значение $\sigma_y \approx 1\times10^{-12}\ \tau^{-1/2}$ [3]. Предложенная техника спектроскопии, по сути, является развитием хорошо зарекомендовавшей себя одночастотной техники субдоплеровской спектроскопии, в которой наблюдаются резонансы насыщенного поглощения. Однако в двухчастотном варианте контраст резонансов был существенно выше, чем в одночастотном. Объяснению этому эффекту посвящены численные [2] и аналитические [4] расчеты, демонстрирующие ключевую роль явления КПН.

С точки зрения создания миниатюрных оптических КСЧ метод двухчастотной спектроскопии [2] обладает рядом преимуществ как физического, так и технического характера перед методом двухфотонной спектроскопии, использованном в [5]. Например, в методе ДСС не требуется нанесение специального многослойного покрытия на окна микроячейки, как это требуется КСЧ на основе двухфотонной спектроскопии [6].

В методе ДСС требования к спектральной ширине лазера занижены в виду того, что ширина самого резонанса больше примерно на порядок: ≈ 1 МГц в методе двухфотонной спектроскопии рубидия [6] против типовых 10 МГц в методе ДСС в парах атомов цезия [3]. Еще одно важное обстоятельство, касающееся долговременной стабильности КСЧ, заключается в следующем. В методе двухфотонной спектроскопии световой сдвиг резонанса – один из основных источников ухудшения долговременной стабильности частоты – линейным образом зависит от оптической мощности в ячейке [7], что требует использования контроля и активной стабилизации мощности излучения лазера. В случае же ДСС, как демонстрируют предварительные эксперименты, выполненные в ИЛФ СО РАН [8], световой (динамический штарковский) сдвиг положения резонанса ведет себя

существенно нелинейным образом. Это позволяет выбрать такой оптимальный режим по оптической мощности и температуре паров, при котором положение реперного резонанса не чувствительно (в линейном приближении) к флуктуациям мощности излучения, что должно привести к улучшению долговременной стабильности КСЧ. Дальнейшему развитию данного перспективного метода лазерной спектроскопии и посвящена одна из глав настоящей работы.

Цель диссертационной работы заключается в развитии методов лазерной спектроскопии атомов щелочных металлов (^{87}Rb, ^{133}Cs) в поле многочастотного лазерного излучения, а именно, исследование новых методов наблюдения резонансов КПН для улучшения отношения сигнал/шум и методов уменьшения светового сдвига этих резонансов для разработки миниатюрных атомных часов нового поколения с улучшенной кратковременной и долговременной стабильностью частоты.

Основные задачи диссертационной работы:

1. Анализ влияния изменения оптической мощности излучения лазера, девиации мощности СВЧ модулирующего сигнала на ~ 3.4 ГГц, температуры поглощающей ячейки, изменения магнитного поля колец Гельмгольца на сдвиг частоты миниатюрного квантового стандарта частоты и поиск оптимальных режимов работы стандарта для получения высоких показателей кратковременной и долговременной нестабильности

2. Исследование зависимости сдвига частоты резонанса КПН в атомах ^{87}Rb от основных рабочих параметров (интенсивность света, оптическая частотная отстройка, температура ячейки) при модуляции тока накачки лазера с вертикальным резонатором (ЛВР) на полной частоте сверхтонкого расщепления основного состояния (≈ 6.8 ГГц) и сравнение с аналогичными зависимостями при модуляции на половинной частоте (≈ 3.4 ГГц).

3. Измерение относительной нестабильности микроволновой частоты (девиации Аллана) при модуляции тока накачки ЛВР на полной и на половинной частоте сверхтонкого расщепления; определение перспектив модуляции тока на полной частоте в разработке миниатюрного КСЧ-КПН.

4. Исследование резонансного отклика атомов ^{87}Rb при сканировании резонанса КПН с частотой, существенно превышающей ширину резонанса, и стабилизация частоты микроволнового генератора (≈ 3.4 ГГц) по этому отклику.

5. Исследование возможности наблюдения высококонтрастных субдоплеровских резонансов в парах атомов цезия в поле встречных линейно поляризованных лазерных пучков при прямой модуляции тока накачки диодного DBR (distributed Bragg reflector) лазера на частоте ≈ 4.6 ГГц.

6. Сравнительное исследование двух схем наблюдения субдоплеровских резонансов в парах атомов цезия в поле встречных лазерных пучков при прямой модуляции тока накачки диодного DBR-лазера:

(а) Линейные поляризации встречных волн взаимно ортогональны, исследуется полное поглощение одного из пучков в атомной ячейке;

(б) Линейные поляризации встречных волн ориентированы под углом 45°, исследуется субдоплеровский резонанс в угле поворота линейной поляризации одного из пучков (поляриметрическая техника регистрации).

7. Исследование частотного сдвига субдоплеровского резонанса от интенсивности многочастотного поля накачки DBR-лазера для оптического стандарта частоты.

Научная новизна работы

В подавляющем большинстве работ, посвященных разработке атомных часов на основе явления КПН, лазерное излучение модулируется на частоте f_m, равной половине от той частоты f_{hfs}, что разделяет сверхтонкие компоненты в основном состоянии атома (см., например, [9]). В частности, f_{hfs} ≈ 6.8 ГГц для ^{87}Rb и f_{hfs} ≈ 9.2 ГГц для ^{133}Cs. В настоящей диссертационной работе в значительной степени устранен пробел в этом направлении, а именно, изучены параметры и световые сдвиги резонансов КПН, наблюдаемых в пара́х атомов ^{87}Rb при частоте модуляции $f_m = f_{hfs} \approx$ 6.8 ГГц, и проведено сравнение с результатами, полученными в традиционном режиме возбуждения при $f_m \approx$ 3.4 ГГц. Также выполнена стабилизация частоты микроволнового генератора по наблюдаемым

резонансам и измерена девиация Аллана. С точки зрения улучшения отношения сигнал/шум, представляется интересным исследовать режим, в котором частота сканирования существенно больше ширины резонанса. Такой «динамический» метод возбуждения резонансов КПН аналогичен широко используемому методу Паунда-Древера-Холла (ПДХ) в оптической области спектра [10]. Кроме того, при динамическом режиме возбуждения проведено сравнение двух измерений девиации Аллана, в которых оптимальный индекс частотной СВЧ модуляции выбирался из расчета подавления чувствительности положения резонанса либо к вариациям полной оптической мощности, либо к вариациям мощности СВЧ сигнала от генератора. Такая комплексная задача (динамический режим возбуждения при различных оптимальных индексах) рассматривается впервые.

В части субдоплеровской спектроскопии паров цезия настоящая работа также обладает новизной. Действительно, впервые эффект высококонтрастных однородно уширенных резонансов в поле встречных двухчастотных пучков был обнаружен в экспериментах французских коллег [11]. Было показано, что в D_1 линии атомов цезия в условиях, когда разность частотных компонент лазерного поля совпадает с частотой сверхтонкого расщепления в основном состоянии (≈ 9.2 ГГц), при сканировании оптической частоты лазера возможно наблюдение субдоплеровских резонансов с амплитудой, превосходящей амплитуду доплеровского контура. Физические основы этого эффекта были исследованы в последующих работах коллег из ИЛФ СО РАН [2, 4], а также в работе [12].

В настоящей работе исследуется способ наблюдения субдоплеровских резонансов без использования внешнего электрооптического модулятора (ЭОМ). Для получения резонансных оптических частот ток накачки DBR-лазера модулируется напрямую от СВЧ генератора. Переход от использования амплитудного ЭОМ, на выходе которого лазерное поле состоит только из двух спектральных составляющих (это боковые полосы +1 и –1 порядков при существенно подавленной несущей частоте), к прямой модуляции DBR-лазера означает присутствие в спектре генерации паразитных спектральных составляющих. Эти компоненты не участвуют в формировании субдоплеровских резонансов, но ведут к появлению большой

подкладки в сигнале после прохождения ячейки, наблюдаемом на фотодетекторе, что приводит к ухудшению отношения сигнал/шум. Для преодоления этой трудности в настоящей работе экспериментально исследован поляриметрический способ регистрации субдоплеровских резонансов. Регистрация нелинейных резонансов при повороте линейной поляризации пробной волны на 45° относительно волны накачки, позволяет как избавиться от большой подкладки в проходящем сигнале, так и повысить отношение сигнал/шум в том случае, когда шум находится выше порога дробовых шумов излучения.

Защищаемые положения:

1. Для осуществления стабилизации частоты микроволнового генератора по резонансу КПН в парах щелочного металла предложена и реализована микроволновая модификация метода Паунда-Древера-Холла, когда частота фазовой модуляции пробного излучения значительно больше ширины резонанса. Показано, что это позволяет достичь полосы системы обратной связи больше ширины резонанса и высокого значения отношения сигнал/шум.

2. При возбуждении резонанса КПН в D_1 линии ^{87}Rb с использованием модуляции тока диодного лазера на частоте 6.8 ГГц по сравнению с модуляцией на частоте 3.4 ГГц световой сдвиг частоты резонанса в 2÷4 раза меньше при той же крутизне частотного дискриминатора, что позволяет увеличить стабильность КСЧ.

3. Отношение сигнал/шум для субдоплеровских резонансов в парах атомов цезия в поле встречных полихроматических линейно поляризованных волн улучшается более чем в два раза при использовании поляриметрической техники регистрации резонансов по сравнению с традиционной абсорбционной техникой.

4. При использовании прямой СВЧ модуляции тока диодного DBR-лазера и поляриметрической техники регистрации субдоплеровских резонансов в компактной газовой ячейке с парами атомов цезия параметр качества резонанса ограничивает снизу нестабильность частоты на уровне 10^{-13} за 1с усреднения.

Практическая значимость работы

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 [13], 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, высокозащищенная связь, умные энергетические сети, зондирование ионосферы Земли и других.

Другое направление – это создание миниатюрных КСЧ в оптическом диапазоне. Такие устройства могут лечь в основу миниатюрных оптических атомных часов для переноса стабильности из оптического в микроволновый диапазон (см., например, [6]). При этом стабильность таких часов, как ожидается, будет в разы 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 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, так и сложные технические задачи, требующие высокопрецизионных измерений на Земле и в космосе.

Объекты исследования – резонансы когерентного пленения населенностей и субдоплеровские резонансы в атомах щелочных металлов, их свойства и характеристики. А также их потенциал для использования в разработке миниатюрных квантовых стандартов частоты микроволнового и оптического диапазонов.

Достоверность полученных результатов и выводов

Полученные результаты обладают воспроизводимостью, не противоречат теоретическим представлениям о наблюдаемых эффектах; они обсуждались на международных конференциях с коллегами, 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 автора

Все результаты, представленные в работе, получены соискателем лично, либо в соавторстве при его непосредственном участии. Вклад соискателя заключается в участии в постановке задач исследований, осуществлении обзора литературы по теме работы, разработке и создании экспериментальных стендов, проведении соответствующих экспериментов, анализе экспериментальных данных, их обработке для представления на конференциях и публикации в научной печати.

Публикации и апробация работы.

Основной материал диссертации опубликован в 7 статьях в журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования РФ. По результатам диссертационной работы получены три патента: два патента на полезную модель, один патент на изобретение. Результаты работы неоднократно докладывались на международных и всероссийских конференциях и представлены в 14 печатных работах трудов конференций. В том числе MPLP 2021 ИЛФ СО РАН г. Новосибирск, ФУХА (2019, 2020, 2021) г. Новосибирск, Нелинейная фотоника (2021, 2022, 2023) НГУ г. Новосибирск, ICSQE 2020 Болгария, IEEE 2021 НГТУ г. Новосибирск, ФПО-2020 ИТМО г. Санкт-Петербург, ОИТ 2022 ИАИЭ СО РАН г. Новосибирск.

Объем и структура диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы, включающего 166 наименований. Объём работы – 140 страниц, в том числе две таблицы и 42 рисунка и 24 формулы.

Содержание диссертационной работы

В настоящей работе были выполнены экспериментальные исследования, направленные на развитие методов лазерной спектроскопии атомов щелочных металлов с целью их последующего применения к созданию малогабаритных квантовых стандартов частоты в микроволновом и оптическом диапазонах.

Во Введении к работе была обоснована актуальность предложенных исследований и отмечены достижения других исследовательских групп. В целом, ежегодно в обозначенном направлении публикуется множество теоретических и экспериментальных работ, что означает большой интерес к этой области исследований.

Первая глава является обзорной и посвящена анализу литературных данных по теме диссертационного исследования. В частности, описывается явление КПН и история его открытия, рассказывается про объект исследований – атомы щелочных металлов Rb и Cs, обосновывается выбор именно этих элементов, приводятся справочные материалы по структуре уровней. Приводятся данные по расчёту зависимости давления газа от его температуры. Рассказывается история первых цезиевых и рубидиевых атомных часов.

В Главе 2 была описана разработка миниатюрного (≈ 60 см^3) микроволнового квантового стандарта частоты (КСЧ) на основе резонансов КПН (рис. 1). При этом удалось добиться высоких метрологических характеристик: 9×10^{-12} за 1 с усреднения, 3×10^{-13} за 1000 с и 1.5×10^{-12} за 24 ч. Эти значения превосходят на один-два порядка некоторые коммерческие аналоги. Высокой кратковременной стабильности удалось добиться, в частности, за счет использования метода, аналогично стандартной методике 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, с одной стороны, позволяет повысить быстродействие системы стабилизации, а с другой – повысить отношение сигнал/шум. В подавляющем большинстве работ других авторов такой метод стабилизации не используется.

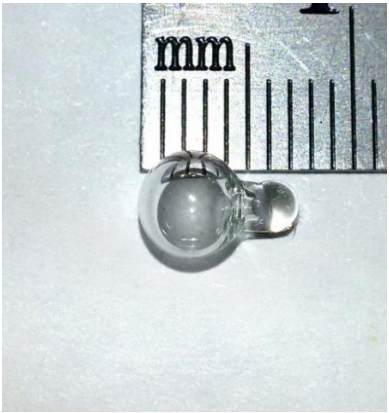

Рисунок 1. Поглощающая ячейка с парами атомов ^{87}Rb (слева) и миниатюрный КСЧ на основе явления КПН (справа).

Высокая долговременная стабильность (рис. 2) была достигнута применением некоторых новых как технических, так и физических решений. Например, для уменьшения влияния нагревательных элементов ячейки на положение резонанса (за счет паразитных магнитных полей) была испытана конструкция, в которой нагревательные элементы расположены за магнитным экраном. В части новых физических подходов была исследована долговременная стабильность частоты при разных выборах рабочей мощности сигнала СВЧ модуляции. Так, зачастую мощность (индекс) СВЧ модуляции выбирается так, чтобы частота часового («0–0») перехода была малочувствительна к вариациям полной оптической мощности излучения, которые, так или иначе, происходят при работе лазерной системы.

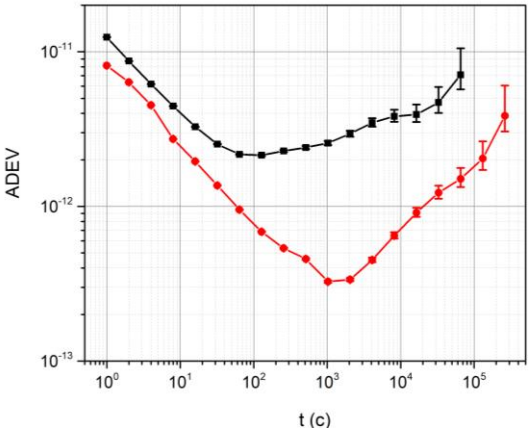

Рисунок 2. Девиация Аллана для разработанного миниатюрного КСЧ на основе резонанса КПН на D1 линии ^{87}Rb. График для режима измерения при максимальной амплитуде резонанса КПН представлен сплошной линией с квадратными символами, а в режиме минимальной чувствительности сдвига резонанса представлен сплошной линией с круглыми символами

В нашей работе было показано, что долговременная стабильность КСЧ повышается при выборе другого оптимального индекса, при котором положение реперного резонанса малочувствительно к вариациям мощности СВЧ сигнала, которые также имеют место быть из-за флуктуаций температуры генератора и других причин. Кроме того, при таком оптимальном индексе модуляции сдвиг частоты резонанса КПН от изменений полной оптической мощности также оказывается относительно небольшим, так что положение частоты часового перехода оказывается менее подвержено как изменению мощности сигнала СВЧ, так и к изменению оптической мощности.

Были исследованы сдвиговые характеристики КПН резонанса от различных факторов и составлен бюджет сдвигов, представленный в диссертации. При увеличении уровня мощности СВЧ сигнала вырастает индекс модуляции m, что приводит к падению интенсивности спектральных составляющих, формирующих резонанс КПН. Тем не менее, соотношение сигнал/шум изменяется не столь значительно, что приводит к малому различию девиации Аллана за 1 с. В то же время виден существенный выигрыш в

долговременной стабильности из-за малой чувствительности сдвига частоты резонанса КПН от вариаций мощности СВЧ генератора и оптической мощности лазера.

Сдвиги замерялись в двух различных режимах по мощности СВЧ генератора: в режиме максимальной амплитуды резонанса КПН и в режиме минимальной чувствительности сдвига резонанса от вариаций мощности СВЧ генератора.

В третьей главе был исследован еще один способ уменьшения влияния световых сдвигов на частоту часового перехода. Он заключается в использовании СВЧ модуляции на частоте, равной полной частоте сверхтонкого расщепления в основном состоянии атома (≈ 6.8 ГГц для ^{87}Rb). Этот способ возбуждения КПН-резонансов крайне слабо исследовался ранее применительно к миниатюрным атомным часам. При этом резонансы КПН возбуждаются не двумя боковыми полосами спектра первого порядка, как в традиционном способе, реализуемом в атомных КПН-часах, а компонентой поля с несущей частотой и одной из боковых полос первого порядка (–1 или +1). Нами было показано, что в таком случае световой сдвиг часового перехода значительно меньше, чем в традиционной схеме, что в будущем может быть использовано для повышения долговременной стабильности атомных часов.

Для случая модуляции тока ЛВР на частоте 3.4 ГГц измерения проводились только для тока лазера J=1.3 мА, так как этот режим был выбран как оптимальный в прошлых исследованиях. Для случая модуляции тока ЛВР на частоте 6.8 ГГц измерения выполнены для трёх значений тока лазера J=1.7 мА, J=1.5 мА и J=1.3 мА. Кроме того, λ схема наблюдения КПН резонанса для случая модуляции тока ЛВР на частоте 6.8 ГГц может быть построена по двум вариантам с использованием низкочастотной боковой полосы и центральной полосы генерации лазера и второй вариант с использованием высокочастотной боковой полосы и центральной полосы генерации лазера. Итого получается шесть различных вариантов.

Проведено исследование полевых сдвигов частоты стандарта для случая частоты модуляции 6.8 ГГц. Результаты измерений для всех шести случаев представлены на Рис.3.

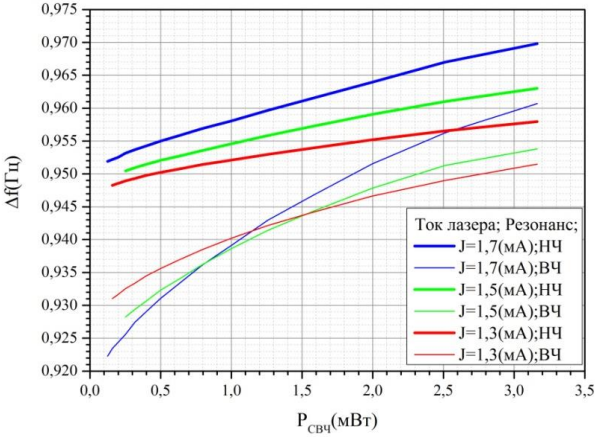

Рисунок 3. Полевые сдвиги частоты стандарта для случая частоты модуляции 6.8 ГГц в зависимости от мощности СВЧ для различных токов лазера. КПН резонанс получался из различных компонент спектра излучения: НЧ – несущая + низкочастотная боковая полоса, ВЧ - несущая + высокочастотная боковая полоса.

Из графиков видно, что сдвиги от изменения мощности СВЧ модуляции существенно меньше при стабилизации за линию поглощения комбинацией несущая + низкочастотная боковая полос (НЧ), а при использовании ВЧ режима наблюдается точка малой чувствительности к изменению тока лазера. В то же время стабильность источника тока достаточно хорошо контролируемый параметр, поэтому оптимальным был выбран НЧ режим наблюдения резонанса.

После выбора оптимальных параметров стабилизации был поставлен эксперимент по измерению функции Алана для обоих случаев модуляции (рисунок 4).

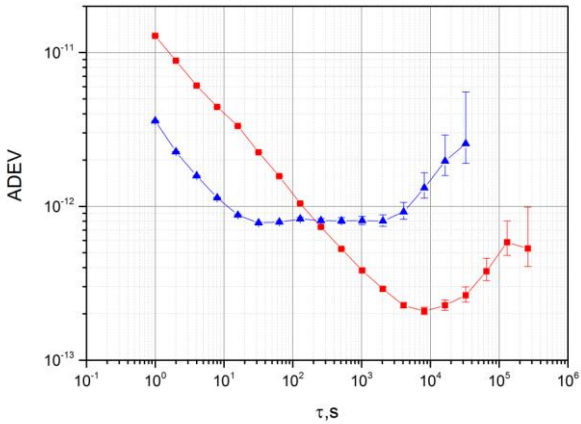

Рисунок 4. Результаты измерения функции Алана для случая модуляции тока лазера на частотах 3.4 (красные квадраты) и 6.8 ГГц (синие треугольники).

Из графиков видно, что для 6.8 ГГц было получено существенное улучшение за короткие времена $\sim 3\cdot10^{-12}\ \tau^{-1/2}$, выигрыш в пять раз по сравнению с модуляцией тока на 3.4 ГГц. Нестабильность за длительные времена объяснялась относительно высокой температурной чувствительностью СВЧ генератора Rohde&SchwarzSMA-100B.

Четвёртая глава диссертации была посвящена исследованиям в области миниатюрных оптических КСЧ. Это направление является достаточно молодым, активно развивающимся лишь в последние 5 лет. До этого миниатюрные КСЧ и атомные часы на их основе разрабатывались лишь для микроволнового диапазона. Это было связано не столько с проблемой миниатюризации всех оптических и оптомеханических элементов схемы, сколько с выбором правильного метода атомной спектроскопии, который позволил бы получить приемлемое отношение сигнал/шум при использовании миниатюрной газовой ячейки. Здесь следует отметить, что одним из первых методов лазерной спектроскопии, который стал активно развиваться с самого появления лазеров как таковых, является метод резонансов насыщенного поглощения (РНП) в поле встречных пучков. Традиционно для этих целей использовались одночастотные

лазерные пучки, резонансные какому-либо оптическому дипольному переходу в молекуле или атоме. Этот метод спектроскопии сыграл большую роль для развития оптической спектроскопии в целом, как и других разделов квантовой физики.

В главе исследуется двухчастотная спектроскопия атомов цезия с использованием трех разных способов формирования лазерного поля для их возбуждения: (1) с внешним электрооптическим модулятором (ЭОМ) и DBR-лазером, когда образуются только две частотные компоненты поля ω_1 и ω_2, (2) DBR-лазером с СВЧ модуляцией тока и (3) ЛВР с СВЧ модуляцией тока. В последних двух случаях спектр лазерного излучения помимо двух резонансных компонент ω_1 и ω_2 содержит также нерезонансные компоненты (несущую частоту и боковые полосы более высоких порядков). Отметим, что перспективными с точки зрения разработки миниатюрного оптического КСЧ являются способы возбуждения (2) и (3) из-за малых габаритов оптической схемы.

Был развит новый метод атомной спектроскопии, напоминающий традиционный метод РНП с одночастотными пучками. Ключевой особенностью является то, что в новом методе используются двухчастотные лазерные пучки с особой геометрией поля: линейно поляризованные встречные пучки с взаимным углом между поляризациями, равным 90 градусов, которые за счёт эффекта КПН, формируют резонанс со знаком обратным РНП. Перспективность данного метода для разработки миниатюрного КСЧ в оптическом диапазоне уже была продемонстрирована ранее [2]. Однако оставалась проблема в миниатюризации физического блока, связанная с необходимостью использования внешнего ЭОМ.

Экспериментальные зависимости параметров качества оптических субдоплеровских резонансов, в схеме с ЭОМ (рис. 5) и с прямой модуляцией DBR лазера на частоте ~ 4.6 ГГц. (рис. 6) для трёх температур ячейки, получились сравнимые по параметрам, что является перспективным в дальнейших исследованиях и создании миниатюрного оптического стандарта частоты. Параметр качества Q рассчитывался как отношение амплитуда/ширина резонанса к шуму. Шумы лазера снимались на Stanford research systems SR1 Audio Analyzer для каждого из значений оптической мощности, падающей в ячейку.

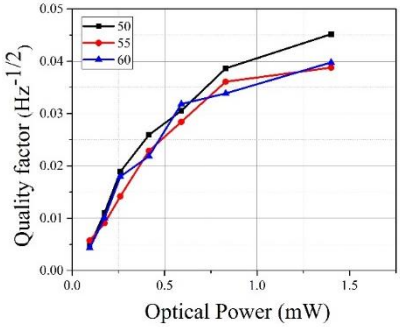

Рисунок 5. Зависимость параметра качества для схемы с ЭОМом для трёх температур ячейки при дифференциальной регистрации сигналов

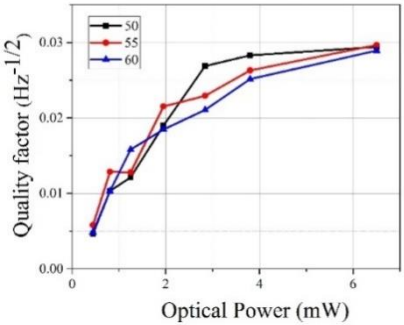

Рисунок 6 Зависимость параметра качества для трёх температур ячейки для схемы с прямой модуляцией при дифференциальной регистрации сигналов

Для схемы с дифференциальной регистрацией сигналов и прямой модуляцией параметр качества больше почти в два раза, этот результат является перспективным для создания миниатюрного оптического стандарта частоты и удаления габаритного ЭОМа из оптической схемы.

Проведено наблюдение эффекта пространственных осцилляций амплитуды резонанса в многочастотном лазерном поле. На рисунке 7 изображён график изменения амплитуды резонанса в зависимости от разности фаз СВЧ модуляции 9.2 ГГц для встречной и обратной волны. Изменения фазы получилось добиться с помощью зеркала, отражающего пучок обратно в ячейку. Резонанс в поглощении, обусловленный взаимодействием перемещающихся поперек луча атомов сразу с двумя встречными волнами, меняет амплитуду из-за изменения степени взаимного влияния КПН состояний в ортогональных поляризациях встречных волн. В результате, управляя фазой СВЧ модуляции с помощью координаты зеркала, можно уменьшить суммарный КПН эффект, увеличив таким образом амплитуду оптического резонанса.

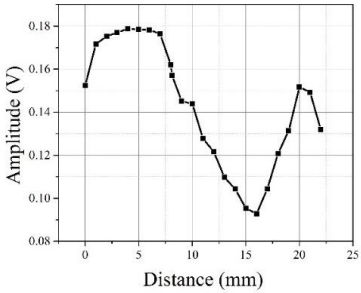

Рисунок 7. Изменение амплитуды резонанса DBR лазера с зависимости от положения зеркала

Видно, что на всём периоде амплитуда резонанса изменяется более, чем в два раза, что является очень полезным результатом исследования. Это важно, например, для максимизации контраста нелинейного резонанса, благодаря которому получится достичь лучших результатов по нестабильности при создании оптического стандарта частоты.

В **Заключении** приведены основные результаты проведенных исследований которые заключаются в следующем:

1) Разработан миниатюрный (≈ 60 см^3) 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.

2) 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, с одной стороны, позволяет повысить быстродействие системы стабилизации, а с другой – повысить отношение сигнал/шум. В большинстве работ такой метод стабилизации не используется.

3) 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.

4) 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.

5) 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 $3\cdot10^{-12}$ за 1 с. показал перспективность данного подхода для применения в миниатюрных атомных часах. Результаты были опубликованы [13].

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

7) 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.

8) 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}.

9) 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.

Публикации по теме диссертации

Статьи в рецензируемых научных журналах:

1. Игнатович С.М. 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. Месензова [и др.] // Квантовая электроника. – 2022. – Т. 52. – № 4. – С. 386-390.

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

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

5. Makarov A.O. 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. D. Brazhnikov. Shift of zero-field level-crossing resonance in the Cs D1 line and its use in vector magnetometry /D. Brazhnikov, S. Ignatovich, I. Mesenzova, A. Novokreshchenov, A. Goncharov //Opt. Lett., vol. 45, iss. 12, p. 3309–3312 (2020).

7. С. М. Игнатович. 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. Месензова,Н. Л. Квашнин, В. И. Вишняков, Д. В. Бражников, Д. Е. Тарасенко //ЖЭТФ – 2023. – Т. 164. –вып. 2 (8) – С. 214-222.

Патенты:

1. С.Н. Атутов, С.Н. Багаев, М.Ю. Басалаев, И.Ю. Блинов, Д.В. Бражников, В.А. Васильев, В.И. Вишняков, В.А. Гайслер, В.И. Денисов, С.И. Донченко, С.М. Игнатович, Н.Л. Квашнин, И.С. Месензова, В.Г. Пальчиков, Д.А. Парёхин, Ю.С. Самохвалов, М.Н. Скворцов, А.В. Тайченачев, В.И. Юдин,Пат. наполезнуюмодельRU 197054 U1 (H03L 7/26, H01S 1/06, H01S 3/137).Сверхминиатюрный квантовый стандарт частоты, // Бюл. № 9, опубл. 26.03.2020. Заявка № 2019141134 от 12.12.2019.

2. Самохвалов Ю.С., Парёхин Д.А., БлиновИ.Ю., Зотов Е.А., Месензова И.С., Васильев В.А., Квашнин Н.Л. Патент на полезную модель «Испытательный стенд для компонентов дискриминатора стандарта частоты на основе эффекта когерентного пленения населенностей» (правообладатели — ИЛФ СО РАН и ФГУП ВНИИФТРИ). Патент РФ № 2019141136/28(080424), 12.12.2019.

3. Игнатович С.М., Вишняков В.И., Скворцов М.Н., Ильенков Р.Я., Месензова И.С. Пат. на изобретение 2722858 C1. Система термостабилизации и магнитного экранирования поглощающей ячейки квантового дискриминатора / 04.06.2020. Заявка № 2019141135 от 12.12.2019.

Список литературных источников

[1] Knappe S. A. Microfabricated saturated absorption laser spectrometer / S. A. Knappe, H. G. Robinson, L. Hollberg // Optics express. – 2007. – V. 15. – №. 10. – P. 6293-6299.

[2] Brazhnikov D. Dual-frequency sub-Doppler spectroscopy: Extended theoretical model and microcell-based experiments / D. Brazhnikov, M. Petersen, G. Coget [et al.] // Physical Review A. – 2019. – V. 99. – P. 062508.

[3] Gusching A. Short-term stability of Cs microcell-stabilized lasers using dual-frequency sub-Doppler spectroscopy / Gusching A., M. Petersen, N. Passilly [et al.] // Journal of the Optical Society of America B. – 2021. – V. 38. – P. 3254.

[4] Михайлов А.М. Форма линии субдоплеровских резонансов в газе атомов щелочных металлов в поле встречных бихроматических лазерных пучков / А.М. Михайлов, Р. Будо, Д.В. Бражников // ЖЭТФ – 2021. – Т. 160. – №. 6. – С. 818-834.

[5] Maurice V. Miniaturized optical frequency reference for next-generation portable optical clocks / V. Maurice, Z. L. Newman, S. Dickerson [et al.] // Optics Express. – 2020. – V. 28. – №. 17. – P. 24708-24720.

[6] Newman Z. L. Architecture for the photonic integration of an optical atomic clock / Z. L. Newman, V. Maurice, T. Drake // Optica. – 2019. – V. 6. – №. 5. – P. 680-685.

[7] Martin K. W. Compact optical atomic clock based on a two-photon transition in rubidium / K. W. Martin, G. Phelps, N. D. Lemke [et al.] // Physical Review Applied. – 2018. – V. 9. – P. 014019.

[8] Mesenzova I. S. Towards a miniature optical frequency standard: Current status and new approaches in sub-Doppler spectroscopy of Cs vapors / I.S. Mesenzova, S.M. Ignatovich, A.M. Mikhailov [et al.] // The International Conference “Laser Physics 2021”, 21-24 September 2021, Ashtarak, Armenia.

[9] Deng K. Full hyperfine frequency modulation in the implementation of coherent population trapping atomic clocks / K. Deng, T. Guo, J. Su [et al.] // Physics Letters A. – 2009. – V. 373. – № 12-13. – P. 1130-1132.

[10] Drever R.W.P. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator / R.W.P. Drever, J.L. Hall, F.V. Kowalski [et al.] // Applied Physics B. – 1983. – V. 31. – P. 97-105.

[11] Abdel Hafiz M. Doppler-free spectroscopy on the Cs D1 line with a dual-frequency laser / M. Abdel Hafiz, G. Coget, E. De Clercq, R. Boudot // Optics Letters. – 2016. – V. 41. – P. 2982-2985.

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

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