



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279,
ОКПО 02068574

Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, 19525;
тел.: +7(812)297 2095, факс: +7(812)552 6080
office@spbstu.ru

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
Федерального государственного
автономного образовательного
учреждения высшего образования
«Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра
Великого» «СПбПУ»

Ю.В. Фомин



«11.03.2024» марта 2024 г.

11.03.2024 № 00-21-4-036

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» на диссертацию Месензовой Ирины Сергеевны «Многочастотная лазерная спектроскопия атомов щелочных металлов в миниатюрных газовых ячейках», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – «Лазерная физика»

Диссертационная работа Месензовой Ирины Сергеевны посвящена нелинейной спектроскопии паров атомов щелочных металлов (Cs и Rb) в поле многочастотного лазерного излучения. Атомы находились в миниатюрных оптических ячейках с буферным газом, в которых измерялось поглощение лазерного излучения и изучались узкие резонансы когерентного пленения населенностей (КПН) в различных условиях.

Актуальность темы

Актуальность исследований в данном направлении обусловлена необходимостью разработки и создания миниатюрных атомных часов для задач метрологии, спутниковой навигации и научных исследований, а также миниатюрных атомных сенсоров (магнитометров, акселерометров, гироскопов, гравиметров) для разнообразных применений, включая инерциальную навигацию, геофизику и медицину. Экспериментальная работа, выполненная И.С. Месензовой, вносит значительный вклад в указанное направление, так как многие измерения зависимостей формы и амплитуды резонансов КПН от различных параметров были выполнены впервые. Применение

методов лазерной спектроскопии свидетельствует о соответствии темы диссертации выбранной специальности 1.3.19 – Лазерная физика.

Структура и содержание диссертации

Диссертационная работа состоит из Оглавления, Введения, в котором указана актуальность темы исследования, целей и задач работы, научной новизны, степени достоверности и апробации результатов, четырёх глав с экспериментальными результатами с теоретическим введением и краткими выводами, Заключения, Списка сокращений и Списка цитируемой литературы, включающего 167 наименований. Объём работы – 140 страниц, в том числе две таблицы и 42 рисунков и 24 формулы.

Диссертационная работа И.С. Месензовой состоит из **Введения**, **Главы 1** с обзором литературы, **Главы 2-4**, посвященных экспериментальным исследованиям, **Заключения**, Списка сокращений и Списка использованной литературы со 161 источником. Во **Введении** обосновывается актуальность исследований.

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.

Глава 1 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** приведено описание разработанного и созданного квантового стандарта частоты на основе явления КПН. Для получения узкого резонанса КПН использовалась СВЧ-модуляция тока инжекции полупроводникового лазера (модуляция дает многочастотное излучение, используемое для наблюдения резонансов КПН). Выполнены систематические измерения зависимостей сдвига резонанса КПН от изменения температуры поглощающей ячейки и СВЧ-мощности. В частности, исследовалась зависимость долговременной стабильности атомных КПН-часов от выбора индекса СВЧ-модуляции путем подбора мощности СВЧ-излучения. Традиционно в миниатюрных атомных КПН-часах выбирается такая мощность СВЧ-модуляции, при которой положение резонанса нечувствительно к вариациям полной оптической мощности лазера. В проведенных экспериментах было показано, что более оптимальным является выбор

индекса модуляции таким образом, чтобы положение КПН-резонанса было нечувствительно к слабым вариациям мощности СВЧ-излучения, в результате чего итоговая долговременная стабильность атомных часов заметно улучшается.

В **Главе 3** исследованы методы подавления влияния световых сдвигов частоты часового магнитодипольного СВЧ-перехода в атомах Rb (сверхтонкое расщепление основного состояния на частоте 6,834 ГГц) на стабильность квантовых стандартов частоты на основе явления КПН. Световой сдвиг является одним из основных источников нестабильности частоты атомных часов на дневном масштабе времени усреднения. В проведенных экспериментах было показано, что световой сдвиг резонанса КПН заметно уменьшается при использовании излучения полупроводникового лазера с СВЧ-модуляцией его тока инжекции на полной частоте сверхтонкого расщепления по сравнению с часто используемым случаем модуляции на половинной частоте.

В **Главе 4** была проведена большая экспериментальная работа в области оптической спектроскопии атомов Cs с использованием модулированного лазерного излучения для разработки компактного квантового стандарта частоты в оптической области спектра. В настоящее время конкуренцию этому подходу составляет только метод, основанный на двухфотонной спектроскопии атомов Rb. Однако, с точки зрения перспективы достижения более высокой стабильности частоты, метод спектроскопии модулированным излучением выглядит предпочтительнее. В частности, была исследована возможность замены модуляции лазерного излучения внешним ЭОМ на прямую СВЧ-модуляцию тока накачки полупроводникового лазера с распределенной обратной связью. В поле его модулированного излучения были исследованы узкие субдоплеровские резонансы, а также предложена и реализована поляриметрическая техника их регистрации на основе светоиндуцированного линейного дихроизма. Это позволило существенно увеличить контраст субдоплеровских резонансов, что в перспективе может обеспечить более высокую стабильность создаваемого миниатюрного оптического стандарта частоты.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы и области их возможного применения.

Научная новизна результатов работы

– Случай, когда резонансы КПН возбуждаются волной с несущей частотой (ν_0) и волной, соответствующей одной из боковых полос (+1 или -1 порядков), до настоящего времени исследовался довольно слабо. Для получения этого режима возбуждения необходимо, чтобы частота модуляции излучения совпадала с частотой сверхтонкого расщепления в основном состоянии атома ($f_m = f_{\text{hfs}}$). В настоящей диссертационной работе в значительной степени устранен пробел в этом направлении, а именно, изучены параметры

и световые сдвиги резонансов КПН, наблюдаемых в парах атомов ^{87}Rb при частоте модуляции $f_m = f_{\text{hfs}} \approx 6.8$ 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.

– При стабилизации частоты по резонансам КПН в подавляющем большинстве научных работ, а также во всех известных нам образцах миниатюрных КСЧ-КПН, используется метод синхронного детектирования, в котором частота сканирования резонанса существенно меньше ширины резонанса (типичные значения FWHM в миниатюрных ячейках с буферным газом лежат в диапазоне $\approx 1 - 10$ кГц). Однако 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. В настоящей диссертационной работе метод динамического возбуждения применен к миниатюрному физическому блоку, разработанному в ИЛФ СО РАН, исследована нестабильность КСЧ-КПН

– Проведенные эксперименты, открыли путь для создания миниатюрного КСЧ в оптическом диапазоне с использованием прямой модуляции тока диодного DBR-лазера на СВЧ частоте.

– Регистрация нелинейных резонансов при повороте линейной поляризации пробной волны на 45° относительно волны накачки, позволяет как избавиться от большой подкладки в проходящем сигнале (так как нерезонансные компоненты поля слабо взаимодействуют со средой и просто вычитаются на балансном фотодетекторе), так и повысить отношение сигнал/шум в том случае, когда шум находится выше порога дробовых шумов излучения.

Научная и практическая значимость работы

Научная новизна и теоретическая значимость диссертации И.С. Месензовой заключаются в разработке и реализации новых методов наблюдения и регистрации узких и высококонтрастных резонансов КПН. При создании микроволнового КСЧ это достигалось подбором оптимальных значений индекса СВЧ-модуляции, оптической мощности и температуры ячейки для минимизации полевых сдвигов резонансов КПН. Были разработаны и опробованы новые методики наблюдения резонансов КПН при СВЧ-модуляции лазеров не на половинной частоте сверхтонкого расщепления основного состояния атомов, как это обычно делается, а на полной частоте. Для реализации КСЧ

применялось быстрое сканирование резонанса КПН с применением техники стабилизации частоты микроволнового генератора, аналогичной методу Паунда-Древера-Холла в оптической области спектра. Это позволило значительно улучшить характеристики разработанного КСЧ, превышающие мировые аналоги. При реализации оптического КСЧ применялась оригинальная поляризационная схема регистрации резонанса КПН во встречных лазерных пучках. Также для миниатюризации такого КСЧ применялась СВЧ-модуляция полупроводниковых лазеров вместо обычно используемого внешнего электрооптического модулятора (ЭОМ). В экспериментах была продемонстрирована возможность получения высококонтрастных резонансов КПН и достижения высокой стабильности частоты оптического излучения.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в применении полученных экспериментальных результатов для создания высокостабильных КСЧ микроволнового и оптического диапазонов. Они востребованы в метрологии, спутниковой навигации, широкополосных коммуникациях и других применениях. Также полученные результаты могут быть использованы при разработке и создании высокочувствительных миниатюрных атомных сенсоров (магнитометров, акселерометров, гироскопов, гравиметров) для разнообразных применений, включая инерциальную навигацию, геофизику и медицину.

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 приведены.

Заключение

Оценивая диссертационную работу И.С. Месензовой в целом, следует отметить актуальность поставленных задач, большой объем проведенных экспериментальных исследований, получение согласия с теоретическими представлениями, создание образцов высокостабильных миниатюрных квантовых стандартов частоты. Высокий научный уровень полученных результатов и квалификация И.С. Месензовой подтверждаются публикацией 7 научных статей по теме диссертационной работы в изданиях из списка ВАК и докладами на международных конференциях.

Тема исследования диссертационной работы И.С. Месензовой соответствует научной специальности 1.3.19 – Лазерная физика. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям Положения о порядке присуждения учёных степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – Месензова Ирина Сергеевна – заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19 – Лазерная физика.

Отзыв ведущей организации составлен на основе обсуждения диссертационной работы на научном семинаре Высшей школы прикладной физики и космических технологий.

Отзыв составили:

д.ф.-м.н., Лиюкумович Л.Б.

к.ф.-м.н., Баранцев К.А.

Сведения о составителе отзыва: Лиюкумович Леонид Борисович, доктор физико-математических наук, профессор Высшей школы прикладной физики и космических технологий, e-mail: Leonid@spbstu.ru, тел. 89112878700

Сведения о составителе отзыва: Баранцев Константин Анатольевич, кандидат физико-математических наук, доцент Высшей школы прикладной физики и космических технологий, e-mail: kostmann@yandex.ru, тел. 89219840590