

На правах рукописи

Раднатаров Даба Александрович

**СВОЙСТВА РЕЗОНАНСА КОГЕРЕНТНОГО
ПЛЕНЕНИЯ НАСЕЛЕННОСТЕЙ ПРИ
НЕСТАЦИОНАРНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ В ПАРАХ ⁸⁷Rb**

01.04.05 – Оптика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск, 2020

Работа выполнена в Отделе лазерной физики и инновационных технологий ФГАОУ ВО «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» (НГУ)

Научный руководитель: **Кобцев Сергей Михайлович**
доктор физико-математических наук, доцент,
заведующий Отделом лазерной физики и
инновационных технологий НГУ

Официальные оппоненты: **Литвинов Андрей Николаевич**
доктор физико-математических наук,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра
Великого», доцент высшей школы
прикладной физики и космических
технологий

Шерстов Иван Валерьевич
Ph.D. (Leibnitz Universität, Physics),
автономная некоммерческая образовательная
организация высшего образования
“Сколковский институт науки и технологий”,
заведующий лабораторией системных
исследований проблем измерения времени и
частоты

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное
предприятие "Всероссийский научно-
исследовательский институт физико-
технических и радиотехнических измерений"

Защита состоится «21» мая 2021 г. в __: __ часов на заседании
диссертационного совета Д 003.024.01 при Институте лазерной физики СО
РАН по адресу: 630090, просп. Академика Лаврентьева, 13/3, г. Новосибирск
90.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЛФ СО РАН.

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

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

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Эффект когерентного пленения населенностей (КПН) и связанная с ним электромагнитно-индуцированная прозрачность (ЭИП) имеют множество приложений, в том числе в метрологии. Эффект КПН заключается в возбуждении в трехуровневой квантовой Λ -системе, под воздействием бихроматического лазерного излучения, когерентного «темного» состояния, проявляющегося в виде узкого спектроскопического резонанса – резонанса КПН, наблюдаемого при изменении разности частот компонент излучения.

Большой научный и практический интерес представляет возможность возбуждения резонанса КПН в парах щелочных металлов благодаря сочетанию сразу нескольких факторов, которое позволяет создавать на основе эффекта КПН малогабаритные устройства: высокое давление насыщенных паров щелочных металлов позволяет создавать устройства с низким энергопотреблением, поскольку не требуется нагрев паров до высокой температуры; в атомах щелочных металлах структура уровней такова, что для возбуждения Λ -системы резонанса необходимо оптическое излучение ближнего ИК-диапазона с разностью частот компонент излучения менее 10 ГГц, для чего можно использовать существующие полупроводниковые лазеры, применив модуляцию тока инжекции. Резонанс КПН, возбуждаемый в парах щелочных металлов (Rb, Cs и др.), имеет высокое отношение частоты к ширине ($>10^7$), что позволяет использовать его в качестве репера для стабилизации или измерения частоты, например в атомных стандартах частоты, магнитометрах и других устройствах. Метрологические характеристики этих устройств (нестабильность частоты, чувствительность и пр.) в значительной степени определяются свойствами реперного резонанса КПН, на которые влияют условия его возбуждения. Относительно быстрое периодическое возбуждение атомной системы позволяет улучшить отношение сигнал/шум спектроскопического сигнала за счет снижения вклада низкочастотных технических шумов, однако при этом наблюдается зависимость свойств резонанса КПН от частоты возбуждения, т.е. реализуется нестационарный режим возбуждения, который представляет собой недостаточно изученное явление. В связи с этим важной задачей является детальное изучение нестационарных режимов формирования резонанса КПН. Понимание физических механизмов и особенностей формирования резонанса КПН при нестационарном возбуждении позволит разработать новые перспективные подходы для квантовой метрологии и существенно улучшить параметры квантовых стандартов частоты.

Целью данной работы являлось исследование свойств резонанса когерентного пленения населенностей при разных нестационарных режимах возбуждения в парах рубидия-87 и влияния параметров режимов возбуждения на стабильность атомного стандарта частоты на основе эффекта КПН.

Для достижения поставленной цели были решены **следующие задачи**:

- исследование зависимости свойств резонанса КПН от параметров его возбуждения и определение границ параметров возбуждения, при которых возникает зависимость спектроскопического сигнала от времени;
- исследование влияния параметров нестационарного возбуждения на стабильность атомного стандарта частоты на основе эффекта КПН;
- исследование влияния параметров многокомпонентного оптического излучения накачки на свойства резонанса КПН и стабильности атомного стандарта частоты на основе эффекта КПН;
- исследование методов увеличения контраста резонанса КПН при нестационарном возбуждении.

Научная новизна

1. Выявлено наличие зависимости от частоты возбуждения временной задержки формирования максимума ЭИП при нестационарном возбуждении резонанса КПН относительно момента, когда разность частот компонент бихроматического поля равна резонансной.

2. Впервые исследована зависимость крутизны дискриминационной кривой резонанса КПН, возбуждаемого в оптических ячейках без буферного газа, от параметров детектирования резонанса.

3. Впервые продемонстрировано увеличение контраста резонанса КПН в нестационарном режиме возбуждения при стабилизации уровня люминесценции паров ^{87}Rb путем модуляции мощности излучения накачки.

4. Разработан и апробирован новый метод увеличения контраста резонанса КПН на основе стабилизации линейной функции от мощности излучения накачки и мощности прошедшего через ячейку с парами ^{87}Rb путем модуляции мощности излучения накачки.

5. Впервые проведено систематическое исследование свойств резонанса КПН в парах ^{87}Rb при оптической накачке многочастотным лазерным излучением, формируемым при фазовой модуляции излучения одночастотного диодного лазера на субгармониках $(1/2-1/6)$ частоты сверхтонкого расщепления основного состояния.

6. Впервые продемонстрирована возможность использования компоненты сигнала резонанса КПН, наблюдаемого в парах ^{87}Rb при нестационарном возбуждении, для стабилизации длины волны излучения накачки.

Практическая значимость работы

1. Определены параметры нестационарного возбуждения резонанса КПН, при которых достигается наименьшая нестабильность атомного стандарта частоты на основе эффекта КПН.

2. Определены субгармоники резонансной частоты сверхтонкого расщепления основного состояния D_1 линии ^{87}Rb пригодные для фазовой модуляции излучения накачки в атомном стандарте частоты на основе эффекта КПН.

3. Реализован метод снижения энергопотребления СВЧ-тракта атомного стандарта частоты на основе эффекта КПН в парах ^{87}Rb за счет снижения рабочей частоты тракта.

4. Разработан и исследован метод стабилизации длины волны полупроводникового лазера накачки атомного стандарта частоты на основе эффекта КПН с использованием амплитудной демодуляции спектроскопического сигнала КПН.

5. Разработаны и исследованы эффективные методы активного увеличения амплитуды резонанса КПН, которые могут повысить точность определения спектрального положения резонанса КПН в стационарном и нестационарном режимах возбуждения.

Защищаемые положения

1. Форма резонанса когерентного пленения населенностей и величина фазовой задержки формирования его пика при нестационарном периодическом возбуждении в парах ^{87}Rb зависят от скорости изменения разности частот компонент бихроматического резонансного поля.

2. Свойства резонанса когерентного пленения населенностей при его синхронном детектировании в нестационарном режиме возбуждения в парах ^{87}Rb определяются соотношением между частотой сканирования и изменением разности частот компонент бихроматического резонансного поля.

3. Режим возбуждения резонанса когерентного пленения населенностей в парах ^{87}Rb , при котором уровень мощности излучения накачки подстраивается в процессе возбуждения таким образом, чтобы значение линейной функции от мощности излучения накачки и мощности прошедшего через ячейку излучения оставалось постоянным, позволяет увеличить контраст резонанса более чем на два порядка в стационарном режиме возбуждения и более чем на порядок – в нестационарном режиме.

4. При возбуждении резонанса когерентного пленения на D_1 линии ^{87}Rb в оптической ячейке с антирелаксационным покрытием многокомпонентным оптическим полем, формируемым при фазовой модуляции одночастотного

лазерного излучения, влияние интенсивности излучения на спектральное положение резонанса может быть устранено, при использовании для фазовой модуляции каждой из субгармоник частоты сверхтонкого расщепления основного состояния, на которой наблюдается резонанс.

5. Асимметрия резонанса когерентного пленения населенностей, возбуждаемого на D_1 линии поглощения ^{87}Rb в оптических ячейках с буферным газом, зависит от центральной длины волны излучения накачки и может быть характеризована в нестационарном режиме возбуждения методом амплитудной демодуляции сигнала пропускания.

Личный вклад соискателя

Все экспериментальные результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором лично либо при его непосредственном участии. Теоретический анализ и численное моделирование осуществлялись совместно с другими соавторами. Постановка задач, интерпретация полученных результатов и формулировка выводов исследований осуществлялись совместно с научным руководителем и другими соавторами публикаций.

Публикации

Основные результаты диссертации содержатся в 14 работах, 11 из которых опубликованы в ведущих рецензируемых журналах и изданиях, индексируемых системой WoS и определенных ВАК Министерства образования РФ, 3 – в тезисах докладов международных научных конференций.

Апробация

Основные результаты работы докладывались на международных конференциях SPIE Photonics West – 2015, 2016, 2017 и 2018 (Сан-Франциско, США), SPIE Photonics Asia – 2016, 2019 (Пекин, Китай), MPLP – 2016 (Новосибирск, Россия), IX Int. Symp. «Metrology of Time and Space», 2018 (Москва, Россия), RCWLP&P – 2015 (Новосибирск, Россия).

Объем и структура работы

Диссертация изложена на 125 страницах, включая список цитируемой литературы (81 наименование), список из 14 публикаций автора по теме диссертации, содержит 1 таблицу и 53 рисунка.

Во введении дается общая характеристика работы; в главе 1 приведен обзор литературных данных; главы 2–6 содержат описания проведенных исследований, описание результатов и их анализ; заключение содержит основные результаты и выводы работы.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируются цели, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость.

В **главе 1** проведен обзор литературных данных 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.

В **главе 2** приводятся результаты теоретического и экспериментального исследования переходных процессов, возникающих при нестационарном возбуждении резонанса КПН. Глава начинается с описания теоретической модели, использовавшейся для описания динамики формирования резонанса КПН в Λ -системе в бихроматическом поле на основе уравнений для атомной матрицы плотности, которые в резонансном приближении имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \rho_{21}}{\partial t} &= -[\Gamma_0 + i(\delta_2 - \delta_1)]\rho_{21} - i\Omega_1\rho_{23} - i\Omega_2^*\rho_{31}, \\
 \frac{\partial \rho_{31}}{\partial t} &= -(\gamma_{opt} - i\delta_1)\rho_{31} - i\Omega_1(\rho_{11} - \rho_{33}) + i\Omega_2\rho_{21}, \\
 \frac{\partial \rho_{32}}{\partial t} &= -(\gamma_{opt} - i\delta_2)\rho_{32} + i\Omega_2(\rho_{22} - \rho_{33}) + i\Omega_1\rho_{12}, \\
 \frac{\partial \rho_{11}}{\partial t} &= \frac{\gamma_{sp}}{2}\rho_{33} + \frac{\Gamma_0}{2}\text{Tr}[\hat{\rho}] - \Gamma_0\rho_{11} - i\Omega_1\rho_{13} + i\Omega_1^*\rho_{31}, \\
 \frac{\partial \rho_{22}}{\partial t} &= \frac{\gamma_{sp}}{2}\rho_{33} + \frac{\Gamma_0}{2}\text{Tr}[\hat{\rho}] - \Gamma_0\rho_{22} - i\Omega_2\rho_{23} + i\Omega_2^*\rho_{32}, \\
 \frac{\partial \rho_{33}}{\partial t} &= -(\gamma_{sp} + \Gamma_0)\rho_{33} + i\Omega_1\rho_{13} + i\Omega_2\rho_{23} - i\Omega_1^*\rho_{31} - i\Omega_2^*\rho_{32}, \\
 \rho_{12} &= \rho_{21}^*, \quad \rho_{13} = \rho_{31}^*, \quad \rho_{23} = \rho_{32}^*, \\
 \text{Tr}[\hat{\rho}] &= \rho_{11} + \rho_{22} + \rho_{33} = 1,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где введены обозначения: $\Omega_{1,2}$ – частоты Раби, γ_{sp} – скорость спонтанного распада верхнего уровня $|3\rangle$, γ_{opt} – общая скорость декогерентизации оптических переходов $|1\rangle \rightarrow |3\rangle$ и $|2\rangle \rightarrow |3\rangle$, Γ_0 – скорость релаксации на нижних энергетических уровнях $|1\rangle$ и $|2\rangle$ к равновесному изотропному состоянию $(|1\rangle\langle 1| + |2\rangle\langle 2|)/2$, $\delta_k = \omega_k - \omega_{3k}$ ($k = 1, 2$) – отстройка частоты k -го поля от частоты соответствующего резонансного перехода. Для решения системы уравнений (1) использовался метод, подробно описанный в работе [1], который позволяет рассчитать периодическое стационарное состояние без

рассмотрения задачи с начальными условиями и без использования Фурье-разложения.

Далее приводятся результаты численного моделирования формы резонансной кривой при разных частотах возбуждения (рис. 1, черные линии), из которых видно, что при увеличении частоты возбуждения существенно изменяются не только осцилляции на заднем фронте резонанса КПН, но изменяется и центральная часть резонанса КПН – с увеличением частоты возбуждения ее амплитуда падает, ширина растет, передний фронт резонанса становится более пологим по сравнению с его задним фронтом, а также наблюдается задержка формирования пика резонанса, нарастающая с увеличением частоты возбуждения. При периодическом возбуждении данную задержку можно рассматривать как фазовую (рис. 2).

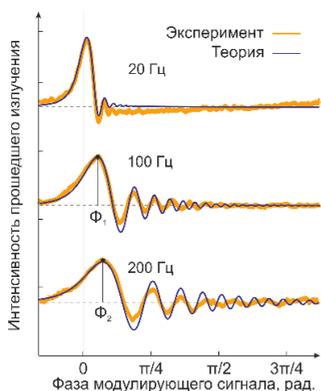


Рисунок 1 – Расчетные и экспериментальные зависимости интенсивности излучения, прошедшего через ячейку, от фазы сигнала модуляции двухфотонной отстройки при разных частотах возбуждения

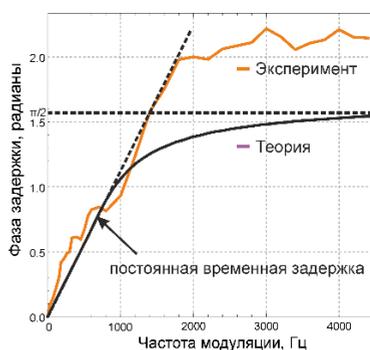


Рисунок 2 – Расчетная и экспериментальная зависимость фазовой задержки формирования пика резонанса КПН от частоты возбуждения

При малых частотах модуляции (единицы герц) форма резонанса описывается функцией Лоренца, что соответствует стационарному случаю [2]. В случае изменения разности частот бихроматического излучения накачки плавным образом по периодическому закону осцилляции интенсивности излучения, прошедшего через ячейку, имеют ангармонический характер, что согласуется с результатами работы [3].

Далее приводятся результаты экспериментального исследования переходных процессов при нестационарном возбуждении резонанса КПН, которые проводились на установке, схема которой приведена на рис. 3.

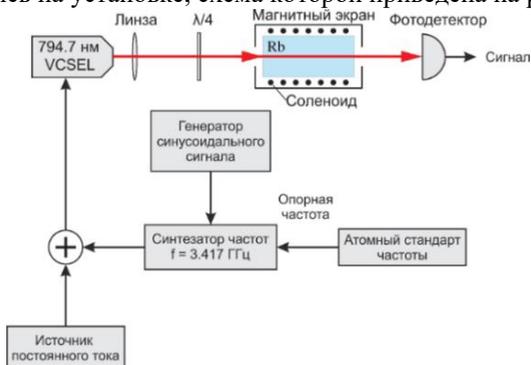


Рисунок 3 – Схема экспериментальной установки:
VCSEL – полупроводниковый поверхностно-излучающий лазер с вертикальным резонатором, $\lambda/4$ – четвертьволновая фазовая пластина

Показано, что изменение формы резонансной кривой коррелировало с расчетными кривыми (рис. 1, оранжевые линии). Приводятся результаты исследования эффекта задержки формирования резонанса КПН при его нестационарном возбуждении (рис. 2, оранжевые линии).

Проведенные исследования выявили характерный диапазон частот (10–20 Гц) модуляции разности частот бихроматического излучения накачки, в котором начинают возникать осцилляции интенсивности излучения на заднем фронте резонанса КПН. При дальнейшем увеличении частоты модуляции переходные процессы квантовой системы усиливаются, что проявляется, в том числе, в увеличении фазовой задержки формирования пика электромагнитно индуцированной прозрачности, что подтверждается результатами как численного моделирования, так и экспериментальными данными.

Глава 3 посвящена исследованию влияния параметров нестационарного возбуждения резонанса КПН в атомных стандартах частоты на их итоговую нестабильность. В начале главы дается общее описание схемы атомного стандарта частоты на основе эффекта КПН, а также метода характеристики стабильности частоты выходного сигнала стандартов частоты. Далее приводятся результаты экспериментального исследования влияния параметров нестационарного возбуждения резонанса КПН на характеристики лабораторного атомного стандарта частоты (рис. 4) при использовании ячейки с антирелаксационным покрытием внутренних стенок и без него.

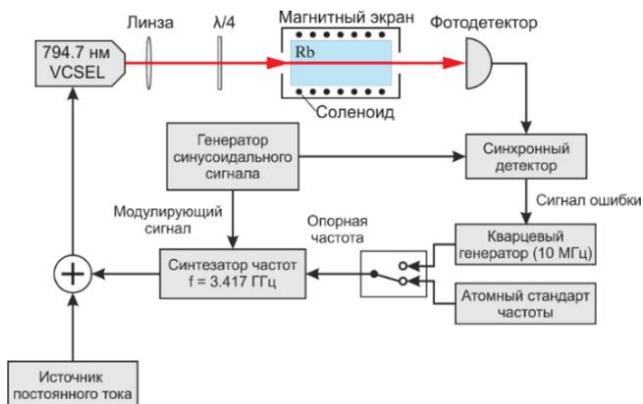


Рисунок 4 – Схема экспериментального атомного стандарта частоты на основе эффекта КПН

Для обеих ячеек был измерена зависимость наклона дисперсионной кривой сигнала ошибки формируемого при синхронном детектировании резонанса КПН и зависимость кратковременной стабильности (рис. 5) атомного стандарта частоты от параметров возбуждения резонанса КПН.

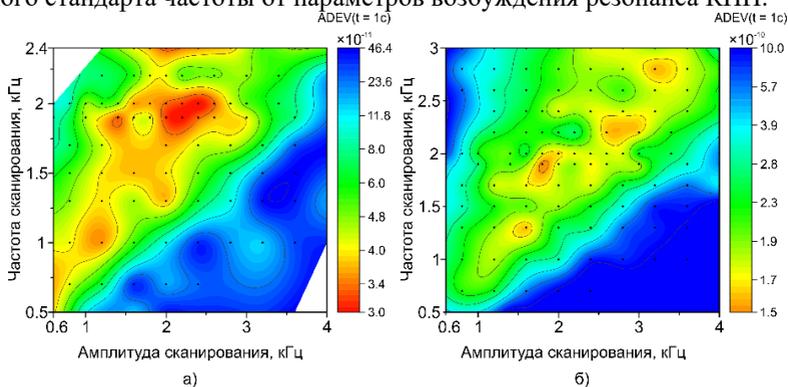


Рисунок 5 – Зависимость стабильности атомного стандарта частоты на основе эффекта КПН от параметров возбуждения реперного резонанса для ячеек двух типов длиной 1 см: а) ячейка с антирелаксационным покрытием, б) ячейка без покрытия

Показано, что наилучшая кратковременная нестабильность для ячейки с антирелаксационным покрытием, равная 3×10^{-11} , достигается при частоте и амплитуде сканирования 2 кГц и 2,4 кГц соответственно. Видно, что оптимальное соотношение частоты и амплитуды сканирования близко к 1 при любой частоте сканирования, что согласуется с результатами теоретической

работы [4]. Аналогичный оптимум для соотношения частота/амплитуда сканирования наблюдается для ячейки без покрытия стенок, однако в ячейке без покрытия стенок не наблюдается одного выраженного максимального значения стабильности, здесь наилучшие значения могут достигаться при разных частотах сканирования в диапазоне, при этом наименьшие значения нестабильности не превышают $1,5 \times 10^{-10}$.

Далее приводятся результаты измерения стабильности стандарта частоты на временах до 1000 секунд. Показано, что девиация Аллана частоты выходного сигнала убывает с ростом времени усреднения как $\sim 1/\sqrt{\tau}$, что характерно для пассивного стандарта частоты. Таким образом, делается вывод, что нестабильность атомного стандарта частоты на временах до 1000 секунд зависит от точности привязки частоты локального осциллятора к пику резонанса и определяется условиями нестационарного возбуждения.

Глава 4 посвящена исследованию свойств резонанса КПН при стационарном и нестационарном возбуждении в парах ^{87}Rb при его контрастировании активными методами с использованием дополнительной петли обратной связи, которая динамически меняет условия возбуждения резонанса, варьируя мощность бихроматического поля накачки. В первой части главы изложены результаты, полученные при использовании метода, описанного в работе [5], который позволяет увеличить контраст резонанса КПН с помощью петли обратной связи, стабилизирующей уровень люминесценции атомов рубидия, находящихся в оптической ячейке, путем изменения мощности накачки.

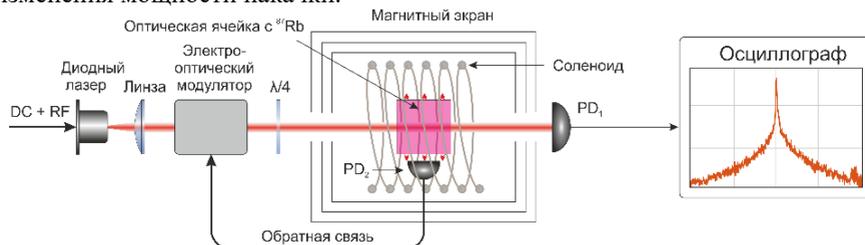


Рисунок 6 – Схема оптической части экспериментальной установки для исследования метода контрастирования резонанса путем стабилизации уровня люминесценции. PD₁ и PD₂ – фотодетекторы, регистрирующие прошедшее через ячейку излучение и излучение люминесценции

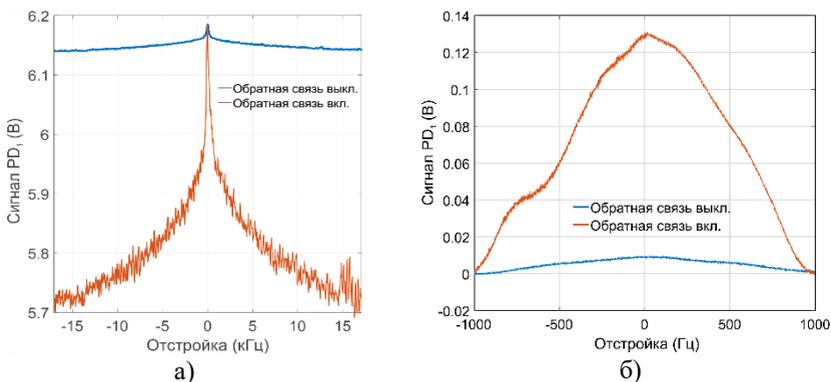


Рисунок 7 – Экспериментальные зависимости интенсивности излучения, прошедшего через оптическую ячейку с парами рубидия от величины двухфотонной отстройки бихроматического поля: а) при квазистационарном режиме возбуждения резонанса КПН; б) в нестационарном режиме возбуждения, без стабилизации уровня люминесценции (синие линии) и при включенной системе стабилизации уровня люминесценции (красные линии)

Показано, что включение системы обратной связи, стабилизирующей уровень люминесценции, привело к увеличению контраста резонанса до 8% т.е. более чем в 10 раз по сравнению с вариантом без обратной связи (рис. 7а). Необходимо отметить, что усиление резонансного контраста КПН, достигнутое в настоящей работе при квазистационарном возбуждении, оказалось заметно ниже, чем показатель, приведенный в работе [5], где использовался описанный метод обратной связи. Это связано со значительно меньшей удельной мощностью насосного поля, используемого в этой работе (13 мВт/см^2 по сравнению с 1000 мВт/см^2). Кроме того, в данном случае была реализована конфигурация накачки с круговой поляризацией излучения (circ||circ), в то время как использование линейной поляризации излучения (lin||lin) позволяет достичь более высокого резонансного контраста КПН при более высокой мощности излучения накачки [6–8].

При нестационарном возбуждении резонанса использование описанного метода позволило увеличить резонанс в нестационарном режиме возбуждения в 13 раз (рис. 7б), что превосходит результат, полученный в квазистационарном режиме.

Вторая часть главы посвящена новому обобщенному методу контрастирования резонанса КПН на основе параметрического управления поглощенной мощностью. Приводится описание данного метода, суть которого сводится к управлению мощностью излучения накачки таким образом, чтобы выполнялось условие:

$$P_{abs}(\delta, P_{pump}) + S \times P_{pump} = Const, \quad (2)$$

где P_{abs} – поглощенная в ячейке мощность, P_{pump} – мощность излучения накачки, S – свободно изменяемый параметр. Приводятся результаты численного моделирования по оптимизации значения величины S . Показано, что при оптимальном значении S контраст резонанса может быть увеличен до ~100%, и его величина не зависит от мощности излучения накачки.

Далее приводятся результаты экспериментального исследования предложенного метода, которое проводилось на установке, оптическая схема которой показана на рис. 8.

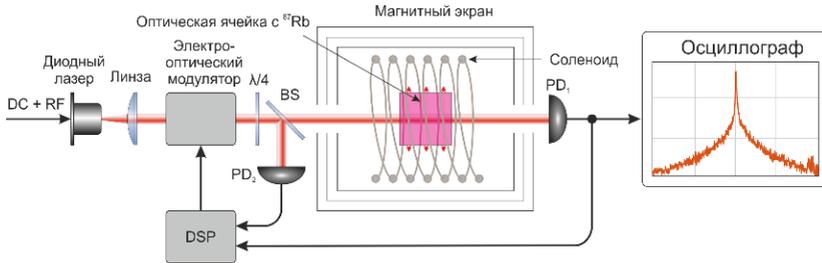
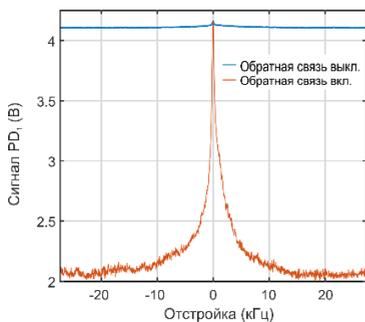
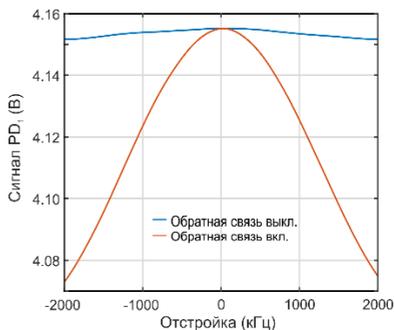


Рисунок 8 – Схема оптической части экспериментальной установки для исследования метода контрастирования резонанса КПН путем параметрической стабилизации поглощенной мощности. PD₁ – фотодетектор, регистрирующий прошедшее через оптическую ячейку излучение, PD₂ – фотодетектор, регистрирующий излучение до оптической ячейки, λ/4 – четвертьволновая фазовая пластина, BS – светоделительная пластина 50:50, DSP – приемно-передающий модуль цифровой обработки сигналов

Показано, что включение системы обратной связи, параметрически стабилизирующей уровень поглощения в ячейке, привело к увеличению контраста резонанса с 0,7% до 108%, т.е. более чем в 100 раз по сравнению с вариантом без обратной связи (рис. 9а), что с высокой точностью согласуется с результатом предварительной оценки. В нестационарном режиме возбуждения применение описанного метода контрастирования резонанса позволило увеличить контраст резонанса в 25 раз (с 0,07% до 1,8%, рис. 9б), что примерно в 4 раза меньше по сравнению с квазистационарным режимом возбуждения. Таким образом, было показано, что параметрическая стабилизация поглощенной мощности является более эффективным методом контрастирования резонанса КПН при малых мощностях излучения накачки.



а)



б)

Рисунок 9 – Экспериментальные зависимости интенсивности излучения, прошедшего через оптическую ячейку с парами рубидия от величины двухфотонной отстройки: а) при квазистационарном режиме возбуждения резонанса КПН; б) в нестационарном режиме возбуждения, при выключенной системе контрастирования (синие линии) и при включенной системе контрастирования (красные линии)

В главе 5 представлены результаты исследований свойств резонанса КПН при его возбуждении в парах рубидия многокомпонентным излучением, формируемым при фазовой модуляции одночастотного излучения на субгармониках f_0 – частоты сверхтонкого расщепления основного состояния атомов ^{87}Rb . В главе проведен анализ схем возбуждения резонанса КПН многочастотным излучением, формируемым при СВЧ модуляции тока инжекции диодного лазера накачки. Показано, что при возбуждении резонанса на D_1 линии в ^{87}Rb возможно использование субгармоник резонансной частоты в диапазоне от $f = f_0/2$ до $f = f_0/6$, что обусловлено структурой энергетических уровней вблизи рабочих переходов. Также показано, что для возбуждения резонанса наиболее эффективным является использование симметричных частотных компонент оптического излучения.

Было теоретически обосновано и экспериментально показано, что для возбуждения резонанса КПН на D_1 линии в ^{87}Rb можно использовать многочастотное излучение диодного лазера, ток инжекции которого модулируется на субгармониках частоты сверхтонкого расщепления основного состояния в диапазоне частот от $f_0/2$ до $f_0/5$. Было показано, что при постоянной мощности оптического излучения, уменьшение частоты модуляции вызывает снижение амплитуды резонанса КПН, ширина резонанса при этом почти не изменяется. Экспериментально была продемонстрирована возможность подавления полевого сдвига резонанса КПН при модуляции тока инжекции диода накачки на частотах в диапазоне от $f_0/2$ до $f_0/5$.

Основные результаты экспериментального исследования представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры атомного стандарта частоты при использовании разных частот СВЧ модуляции тока диодного лазера

Субгармоника	$f_0/2$	$f_0/3$	$f_0/4$	$f_0/5$
Частота (ГГц)	3,417	2,278	1,708	1,366
Спектральные компоненты	-1 & +1	-1 & +2	-2 & +2	-2 & +3
Контраст КПН (%)	1,3	0,9	0,6	0,3
Ширина резонанса (кГц)	1,64	1,59	1,44	1,40
Мощность СВЧ сигнала	0,32	0,16	0,13	0,11
Нестабильность $\sigma_y (\tau = 1 \text{ сек}) \times 10^{-11}$	4,3	4,8	7,1	10,5

Приводится оценка зависимости уровня энергопотребления СВЧ-тракта атомного стандарта частоты на основе эффекта КПН от используемой частоты модуляции. Показано, что, с точки зрения соотношения стабильности стандарта частоты и энергопотребления его СВЧ тракта, оптимальной частотой модуляции является частота $f_0/3$, при которой, по сравнению с частотой модуляции $f_0/2$, нестабильность стандарта частоты увеличивается незначительно (на 11%), тогда как энергопотребление СВЧ-синтезатора уменьшается в 1,5 раза.

Глава 6 посвящена результатам разработки и исследования метода стабилизации длины волны излучения полупроводникового лазера накачки атомного стандарта частоты на основе резонанса когерентного пленения населенностей в парах ^{87}Rb , основанного на использовании компоненты резонанса КПН [9–11], формируемого при нестационарном возбуждении. Приводится описание разработанного метода, позволяющего стабилизировать длину волны излучения лазера без модуляции длины волны и без какой-либо другой дополнительной модуляции за счет использования составляющей сигнала КПН, получаемой при синхронном детектировании резонанса в случае сдвига фазы опорного сигнала на 90° , относительно фазы используемой при синхронном детектировании для стабилизации частоты локального осциллятора. Показано, что при использовании ячеек с буферным газом зависимость выбранной составляющей сигнала КПН от отстройки длины волны от центра линии поглощения имеет характерный вид дисперсионной кривой, и данная составляющая может быть использована для стабилизации длины волны излучения накачки.

Было показано, что применение нового метода стабилизации длины волны диодного лазера позволяет получать как кратковременную ($\tau < 1000 \text{ с}$), так и долговременную ($\tau > 1000 \text{ с}$) нестабильность атомных часов не хуже, чем при использовании стандартного метода (рис. 10).

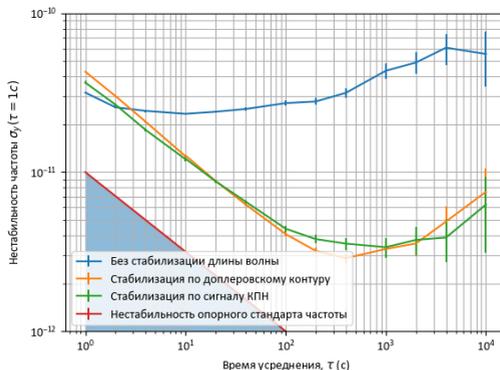


Рисунок 10 – Нестабильность атомного стандарта частоты без использования системы стабилизации длины волны лазерного диода (синяя линия), в случае использования системы стабилизации по доплеровскому контуру (оранжевая линия) и использовании КПН сигнала (зеленая линия), нестабильность опорного стандарта частоты, относительно которого производились измерения (красная линия)

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

1. Выявлен характерный диапазон частот (10-20 Гц) модуляции разности частот бихроматического излучения накачки, при котором происходит переход к нестационарному режиму возбуждения, что проявляется в возникновении осцилляции интенсивности излучения на заднем фронте резонанса КПН. Эти осцилляции приводят к увеличению крутизны заднего фронта резонанса по сравнению с передним фронтом и к уменьшению амплитуды резонанса КПН, что подтверждается результатами как численного моделирования, так и экспериментальными данными.

2. Исследован эффект задержки формирования резонанса КПН при нестационарном возбуждении. Показано, что величина фазовой задержки формирования пика резонанса не зависит от наличия или отсутствия у оптической ячейки антирелаксационного покрытия и определяется только частотой возбуждения резонанса. Что говорит о том, что фазовая задержка характеризуется только динамикой возбуждения резонансного состояния и не зависит от скорости его релаксации.

3. Показано, что для ячеек с антирелаксационным покрытием и без него при нестационарном возбуждении резонанса КПН отношение частоты и амплитуды сканирования, при которых достигается наилучшая стабильность

стандарта частоты на основе исследуемого резонанса КПН является постоянной величиной, которая близка к 1.

4. Исследованы методы активного увеличения контраста резонанса КПН, при его квазистационарном и нестационарном режимах возбуждения, с применением дополнительной петли обратной связи, которая управляла мощностью излучения накачки. Предложен и исследован новый метод контрастирования резонанса на основе параметрической стабилизации поглощенной мощности, который показал высокую эффективность контрастирования резонанса КПН при малых мощностях излучения накачки.

5. Теоретически обосновано и экспериментально показано, что для возбуждения резонанса КПН на D_1 линии в ^{87}Rb можно использовать многочастотное излучение диодного лазера ток инжекции которого модулируется на субгармониках частоты сверхтонкого расщепления основного состояния в диапазоне частот $f_0/2$ до $f_0/5$. Продемонстрирована возможность подавления полевого сдвига резонанса КПН, возбуждаемого в ячейках с антирелаксационным покрытием, при модуляции тока инжекции диода накачки на частотах в диапазоне от $f_0/2$ до $f_0/5$.

6. Разработан метод стабилизации длины волны излучения накачки на основе использования амплитудной демодуляции сигнала КПН резонанса, который позволяет отказаться от необходимости организации дополнительной модуляции длины волны излучения. Показано, что применение метода обеспечивает стабильность атомного стандарта частоты на временах от 1 до 10000 секунд не хуже, чем при использовании традиционных способов стабилизации длины волны диода.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

1. Khripunov S.A., Radnatarov D.A., Kobtsev S.M., Yudin V.I., Taichenachev A.V., Basalaev M.Yu., Balabas M.V., Andryushkov V.A., Popkov I.D. Transient processes under dynamic excitation of a coherent population trapping resonance // *Quantum Electron.* – 2016. – Т. 46. – № 7. – С. 668.

2. Radnatarov D., Kobtsev S., Andryushkov V., Khripunov S., Baklanov E., Yakovlev A. Properties of Rb CPT atomic clock at subharmonic microwave modulation frequencies // *IEEE Photonics J.* – 2019. – Т. 11. – № 4. – С. 1-11.

3. Kobtsev S. Radnatarov D., Khripunov S., Popkov I., Andryushkov V., Steshchenko T. Stability properties of an Rb CPT atomic clock with buffer-gas-free cells under dynamic excitation // *JOSA B.* – 2019. – Т. 36. – № 10. – С. 2700-2704.

4. Kobtsev S., Radnatarov D., Khripunov S., Popkov I., Andryushkov V., Steshchenko T., Lunin V., Zarudnev Y. Feedback-controlled and digitally processed

coherent population trapping resonance conversion in ^{87}Rb vapour to high-contrast resonant peak // *New J. Phys.* – 2017. – T. 19. – №. 4 – C. 043016.

5. Kobtsev S., Radnatarov D., Khripunov, S., Andryushkov V., Zarudnev Y. New method of wavelength stabilisation in CPT atomic clocks // *Proc. SPIE.* – 2019. – T. 11184. – C. 1118414.

6. Radnatarov D., Kobtsev S., Andryushkov V., Khripunov S. Features of a CPT-based atomic clock with pumping by different-order sidebands of a VCSEL's frequency // *Proc. SPIE.* – 2019. – T. 11195. – C. 111950Y.

7. Kobtsev S., Radnatarov D., Khripunov S., Popkov I., Andryushkov V., Steschenko T. Atomic clock stability under dynamic excitation of coherent population trapping resonance in cells without buffer gas // *Proc. SPIE.* – 2018. – T. 10548. – C. 1054820.

8. Khripunov S., Kobtsev S., Radnatarov D., Popkov I., Andryushkov V., Steschenko T., Lunin V., Zarudnev Y. New method for enhancement of contrast of coherent population trapping resonance in Rb vapour // *Proc. SPIE.* – 2017. – T. 10119. – C. 1011905.

9. Radnatarov D., Khripunov S., Kobtsev S., Taichenachev A., Yudin V., Basalaev M., Popkov I., Andryushkov V., Steschenko T. Feedback enhancement of the amplitude of dynamically excited coherent population trapping resonance in Rb vapour // *Proc. SPIE.* – 2016. – T. 10029. – C. 100291K.

10. Radnatarov D., Khripunov S., Kobtsev S., Taichenachev A., Yudin V., Basalaev M., Popkov I., Andryushkov V. Effect of electromagnetically induced transparency delay generated by dynamic coherent population trapping in Rb vapour // *Proc. SPIE.* – 2016. – T. 9763. – C. 97630A.

11. Khripunov S., Radnatarov D., Kobtsev S. Atomic clock based on a coherent population trapping resonance in ^{87}Rb with improved high-frequency modulation parameters // *Proc. SPIE.* – 2015. – T. 9378. – C. 93780A.

12. Andryushkov V.A., Kobtsev S.M., Radnatarov D.A., Khripunov S.A. Atomic clock based on coherent population trapping and using fractional frequencies of UHF modulation // IX International symposium «Metrology of Time and Space» – Москва, 2018. – C. 43-47.

13. Popkov. I., Khripunov S., Radnatarov D., Kobtsev S., Andryushkov V., Basalaev M., Balabas M. Effect of temporal delay in formation of coherent population trapping resonance in ^{87}Rb under dynamic excitation // *MPLP* – 2016. – Новосибирск, 2016. – C. 226.

14. Khripunov S., Radnatarov D., Kobtsev S., Yudin V., Taichenachev A., Basalaev M., Andryushkov V., Popkov I. Transient processes in fast excitation of a coherent population trapping resonance // *RCWLP&P* – 2015: tech. digest. – Новосибирск, 2015. – C. 23-24.

Список цитируемых работ

1. Yudin V.I., Taichenachev A. V., Basalaev M.Y. Dynamic steady state of periodically driven quantum systems // *Phys. Rev. A*. 2016. Vol. 93, № 1. P. 013820.
2. Кнаппе S., Hollberg L., Kitching J. Dark-line atomic resonances in submillimeter structures // *Opt. Lett.* 2004. Vol. 29, № 4. P. 388.
3. Shwa D., Katz N. Transient coherence of media under strong phase modulation exploiting electromagnetically induced transparency // *Phys. Rev. A*. 2014. Vol. 90, № 2. P. 023858.
4. Yudin V.I. et al. Dynamic regime of coherent population trapping and optimization of frequency modulation parameters in atomic clocks // *Opt. Express. IEEE*, 2017. Vol. 25, № 3. P. 2742.
5. Yudin V.I. et al. Feedback spectroscopy of atomic resonances // *Phys. Rev. A*. 2013. Vol. 87, № 6. P. 063806.
6. Taichenachev A. V. et al. On the unique possibility of significantly increasing the contrast of dark resonances on the D1 line of 87Rb // *J. Exp. Theor. Phys. Lett.* 2005. Vol. 82, № 7. P. 398–403.
7. Mikhailov E.E. et al. Performance of a prototype atomic clock based on linlin coherent population trapping resonances in Rb atomic vapor // *J. Opt. Soc. Am. B*. 2010. Vol. 27, № 3. P. 417.
8. Zibrov S.A. et al. Coherent-population-trapping resonances with linearly polarized light for all-optical miniature atomic clocks // *Phys. Rev. A*. 2010. Vol. 81, № 1. P. 013833.
9. Chuchelov D.S. et al. Modulation spectroscopy of coherent population trapping resonance and light shifts // *Phys. Scr.* IOP Publishing, 2018. Vol. 93, № 11.
10. Ignatovich S.M. et al. CPT atomic clock based on an antirelaxation-coated cell and quadrature-signal method of the light shift cancellation // 2018 European Frequency and Time Forum (EFTF). IEEE, 2018. № 17. P. 83–86.
11. McGuyer B.H., Jau Y.-Y., Happer W. Simple method of light-shift suppression in optical pumping systems // *Appl. Phys. Lett.* 2009. Vol. 94, № 25. P. 251110.