

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^а, М. Н. Скворцов^а, И. С. Месенцова^{а}, Н. Л. Квашинин^а,
В. И. Вишняков^а, Д. В. Бражников^{а,б}, Д. Е. Тарасенко^а*

^а *Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук
630090, Новосибирск, Россия*

^б *Новосибирский государственный университет
630090, Новосибирск, Россия*

Поступила в редакцию 13 марта 2023 г.,
после переработки 28 марта 2023 г.
Принята к публикации 28 марта 2023 г.

Представлены результаты экспериментального сравнения параметров резонанса когерентного пленения населенностей (КПН) для линии D_1 в ^{87}Rb и световых сдвигов при регистрации сигнала из разных областей поперечного сечения взаимодействия лазерного излучения с атомами. Предложен метод поиска рабочих условий с нулевым световым сдвигом и их автоматической стабилизацией, что позволит улучшить долговременную стабильность СВЧ-стандартов частоты на базе КПН-резонансов.

*Статья представлена в рамках публикации материалов конференции
«Физика ультрахолодных атомов» (ФУХА-2022), Новосибирск, декабрь 2022 г.*

DOI: 10.31857/S0044451023080072
EDN:IAIYOG

1. ВВЕДЕНИЕ

Резонанс когерентного пленения населенностей (КПН) в щелочных атомах рубидия и цезия широко используется для создания миниатюрных атомных часов [1–3]. Эта технология позволяет существенно уменьшить размер, необходимую мощность потребления и стоимость атомных часов [4–8]. Во многих КПН-часах применяется лазер с вертикальным резонатором (ЛВР, VCSEL) [9], ток накачки которого модулируется генератором с частотой, равной половине частоты сверхтонкого расщепления основного атомного состояния. Вследствие этой модуляции в одночастотном режиме генерации возникают дополнительные спектральные компоненты — боковые по-

лосы. Две боковые полосы первого порядка используются для возбуждения КПН-резонанса по двухфотонной Λ -схеме. Поскольку частота модуляции равна половине частоты сверхтонкого расщепления основного состояния атома, составляющей 6.8 ГГц для линии D_1 в ^{87}Rb , то модуляция нужна на частоте 3.4 ГГц. Указанную частоту модуляции использует большинство исследовательских групп. Кратковременная стабильность любых атомных часов обратно пропорциональна ширине резонанса и пропорциональна отношению сигнал/шум, определяемым контрастом резонанса и шумами оптического излучения. Долговременная стабильность определяется различными частотными сдвигами и поведением их во времени. Зависимость сдвигов частоты исследуется от таких рабочих параметров, как интенсивность света, мощность СВЧ-сигнала модуляции, отстройка оптической частоты от частоты дипольного перехода в атоме, температура поглощающей ячейки и давление буферного газа в ней, а также

* E-mail: stepan_i@mail.ru

внешнее магнитное поле. Световые сдвиги резонансов связаны с динамическим штарк-эффектом, что присуще многофотонному взаимодействию. Кроме того, метод получения многочастотного поля путем модуляции тока лазера дает целую гребенку оптических полей, каждое из которых участвует в световом сдвиге.

Полевой сдвиг частоты уровня атома одним полем определяется как

$$\delta\nu_i(\nu_L, \Omega_i) = \frac{1}{4} |\Omega_i|^2 \frac{(\nu_L - \nu_i)}{(\nu_L - \nu_i)^2 + \Gamma_i^2/4}. \quad (1)$$

Полевой сдвиг частоты уровня атома совокупностью полей для четырехуровневой схемы определяется как

$$\delta\nu_i(\nu_L, \Omega_{ik}) = \frac{1}{4} \sum_{k=3}^4 |\Omega_{ik}|^2 \frac{(\nu_L - \nu_i)}{(\nu_L - \nu_i)^2 + \Gamma_i^2/4}, \quad (2)$$

где i — индекс уровня основного состояния атома рубидия, k — индекс уровня возбужденного состояния атома рубидия, $\nu_L - \nu_{ik}$ — отстройка частоты излучения от частоты перехода, Γ_{ik} — ширина оптического перехода, Ω_i — частота Раби оптического перехода.

В гребенке оптических частот, образующихся в результате модуляции тока лазера, отдельные компоненты имеют различные знаки отстройки частоты излучения от частоты перехода и, как следствие, сдвиги частоты тоже имеют разные знаки. При определенном соотношении интенсивностей этих компонент суммарный полевой сдвиг может быть нулевым. Для нахождения условий, при которых это происходит, можно использовать пробное изменение мощности излучения лазера, как это делалось в работе [10] с помощью акустооптического модулятора и в работе [11] с помощью электрооптического модулятора. Для улучшения долговременной стабильности частоты мало найти условия, при которых суммарный полевой сдвиг обращается в нуль, необходимо найти способ автоматической настройки лазерной системы на этот режим. Интенсивность лазерного излучения имеет гауссовское распределение в поперечном сечении, и при регистрации сигнала из разных областей поперечного сечения можно наблюдать изменение полевого сдвига. Для увеличения времени когерентного взаимодействия при наблюдении резонансов КПН в парах щелочных металлов используются два вида поглощающих ячеек с антирелаксационным покрытием и поглощающие ячейки с буферным газом. В ячейках с антирелаксационным покрытием атомы паров щелочных металлов многократно пролетают через об-

ласть взаимодействия и поперечное распределение поля усредняется. В ячейках с буферным газом, где проявляется эффект Дикке, атомы совершают диффузионное движение на расстояние, соизмеримое с поперечным размером лазерного луча, и находятся в областях с различными интенсивностями оптического поля. Поэтому ячейки с буферным газом интересны для наблюдения полевого сдвига при регистрации сигнала из разных областей поперечного сечения лазерного луча.

В настоящей работе приведены результаты исследования параметров резонанса КПН в парах ^{87}Rb для линии D_1 и полевых сдвигов при регистрации сигнала из разных областей поперечного сечения лазерного луча. Отказ от использования модуляторов мощности лазерного излучения, как это делается в работах [10, 11], позволяет получить малые габариты и низкое потребление по питанию создаваемых стандартов частоты.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Схема экспериментальной установки (рис. 1) включает в себя ЛВР (использовалась модель VIX-795-000-BC06), работающий на длине волны 795 нм, соответствующей D_1 -линии ^{87}Rb . Лазер снабжен прецизионным источником тока и системой стабилизации температуры. Выходное излучение лазера линейно поляризовано и проходит через четвертьволновую пластинку для получения круговой поляризации. Градиентный нейтральный оптический фильтр используется для управления мощностью излучения. Он расположен под небольшим углом к выходному окну лазера для предотвращения обратных отражений в лазер. После пластинки излучение пропускается через поглощающую ячейку с парами рубидия и буферным газом. Для наблюдения поглощения в атомах щелочного металла осуществляется равномерный нагрев ячейки до температуры свыше 50°C . Из-за конструктивных особенностей окна ячейка находится при более низкой температуре. При этом на окнах происходит конденсация металла. Для решения данной проблемы температура ячейки T_c поддерживается большей на 5°C температуры отростка T_f , в котором содержится металлический рубидий. На корпусе ячейки расположены катушки Гельмгольца для создания однородного магнитного поля, направленного вдоль волновых векторов волн. Это поле расщепляет уровни энергии основного состояния и позволяет наблюдать

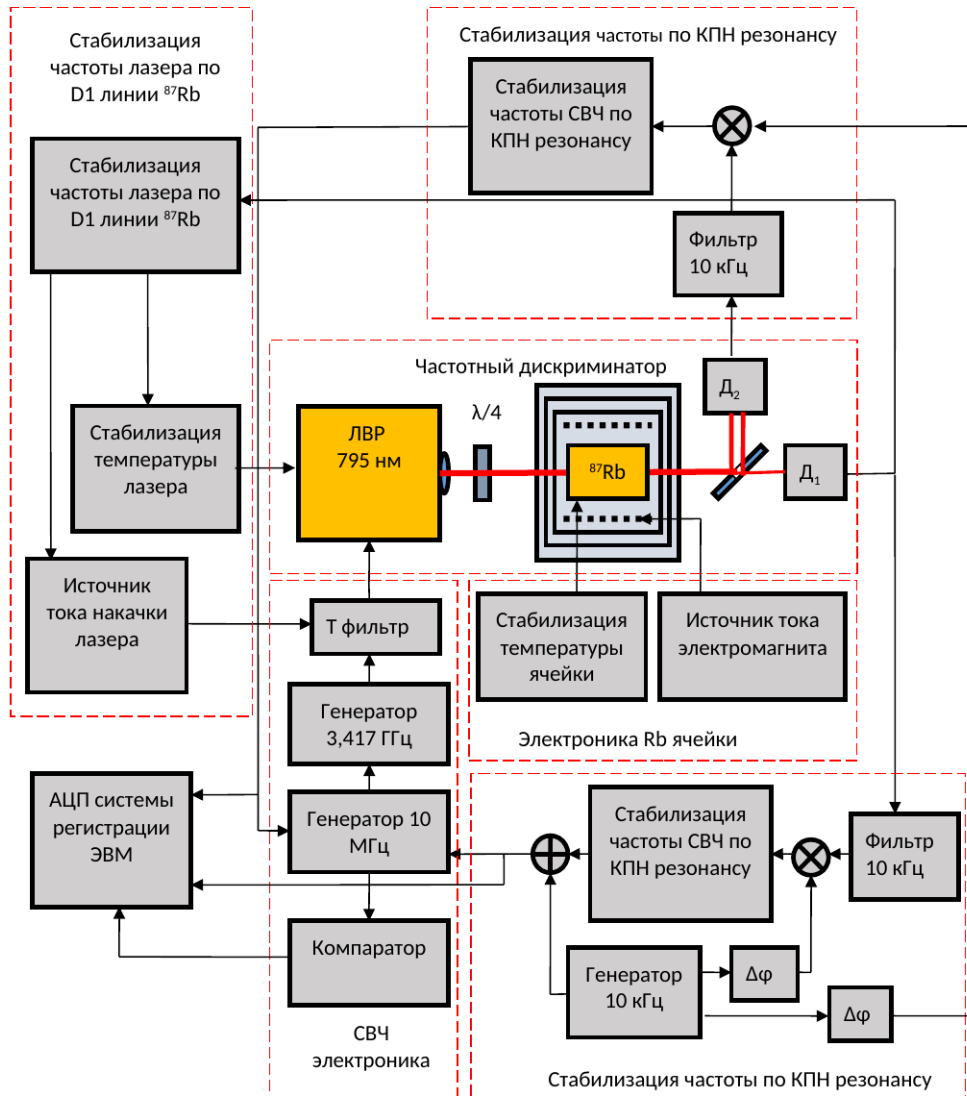


Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования КПН-резонансов в разных областях поперечного сечения взаимодействия

КПН-резонанс, связанный только с магнитными подуровнями с квантовыми числами $m_F = 0$, для которых отсутствует линейный эффект Зеемана. Вместе с тем, эти уровни претерпевают квадратичный по магнитному полю сдвиг, что приводит к соответствующему сдвигу резонанса КПН (частоты часового 0–0-перехода)

$$\delta\nu = k_0 B^2, \tag{3}$$

где B — индукция магнитного поля (в Гс). На основе формулы Брейта–Раби [12] можно показать, что для ^{87}Rb коэффициент пропорциональности $k_0 = 575.14 \text{ Гц/Гс}^2$. Величина магнитного поля в нашем случае составляла 100–150 мГс.

Для получения резонансных оптических частот для Λ -схемы двухфотонного взаимодействия в спек-

тре излучения лазера его ток накачки модулировался с частотами 3.417 ГГц. Для модуляции на частоте 3.417 ГГц нами использовался СВЧ-генератор собственной разработки, входящий в состав миниатюрных атомных часов. Резонансные оптические частоты являются боковыми частотами ± 1 -го порядков формируемого частотно-модулированного излучения лазера. При этом частота генератора синтезируется из частоты 10 МГц термокомпенсированного кварцевого осциллятора (ТСХО).

Система автоматического регулирования, работающая на частоте модуляции тока накачки лазера 15 кГц, стабилизирует оптическую частоту лазерной генерации по D_1 -линии поглощения ^{87}Rb . Для получения сигнала ошибки синхронно детектируется первая гармоника частоты модуляции опти-

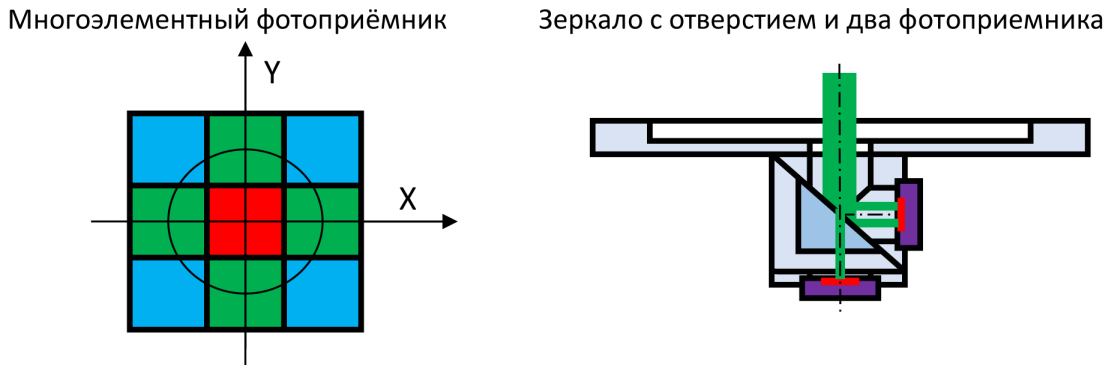


Рис. 2. Методы регистрации сигналов

ческой мощности пучка, прошедшего через рубидиевую ячейку. Рабочая частота пробной модуляции (15 кГц) выбрана из тех соображений, что на этой частоте как у лазера, так и у элементов электроники обычно отсутствует избыточный фликкер-шум. Управлять частотой генерации лазера можно, изменяя его ток накачки или температуру. При изменении тока быстродействие во много раз выше, чем при изменении температуры, но с изменением тока в гораздо большей степени меняется выходная мощность лазера, импеданс и модуляционные характеристики. С учетом этой особенности обработка сигнала ошибки системы автоматического регулирования осуществляется регулировкой температуры лазера, а пробная модуляция — через модуляцию тока лазера. При изменении тока лазера, несмотря на стабилизацию температуры в точке крепления термодатчика, температура лазера все равно меняется. Такой подход компенсирует погрешность измерения температуры лазера термодатчиком, связанную с их различным расположением в пространстве. Для стабилизации частоты СВЧ-генератора по КПН-резонансу применяется метод стабилизации, аналогичный методу Паунда – Древера – Холла, применяемому для стабилизации частоты лазеров в оптическом диапазоне [12]. В этом методе частота модуляции существенно превышает ширину резонанса. В нашем случае используется система автоматического регулирования с модуляционной частотой 10 кГц при полной ширине на полувысоте (FWHM) наблюдаемого резонанса КПН, равной 680 Гц. Данный метод имеет ряд достоинств, а именно, позволяет реализовать максимально возможное быстродействие обратной связи и выбрать высокую рабочую частоту для улучшения отношения сигнал/шум. Поглощающая ячейка изготовлена из кварцевого стекла, устойчивого к воздействию щелочных металлов и имеющего малую газопроницаемость (например, из стекла марки С51-1). Стеклоячейка содержит

чистый изотоп ^{87}Rb и буферный инертный газ — смесь аргона и неона (давление 100 Торр). В отсутствие буферного газа время когерентного взаимодействия атомов рубидия с лазерным полем существенно меньше и равно среднему времени пролета атомов через пучок, что приводит к существенному уширению резонансов КПН.

Для регистрации сигнала из разных областей поперечного сечения взаимодействия лазерного излучения с атомами использовалось два метода: первый метод — использование многоэлементного фотоприемника, второй метод — использование зеркала с отверстием, через которое проходит центральная часть луча и попадает на первый фотоприемник, область с периферии луча отражается на второй фотоприемник. Рисунок 2 иллюстрирует методы регистрации сигналов. В случае многоэлементного фотоприемника (использовался фотоприемник PIN-4×4D фирмы OSI Optoelectronics, 16 площадок, площадь каждой 1.96 мм²) луч настраивается на получение максимального сигнала на центральном элементе (красный цвет), меньшая интенсивность излучения на элементах, расположенных крестом (зеленый цвет), и еще меньшая интенсивность излучения на элементах, расположенных диагонально (синий цвет) (характерный размер луча показан кругом). В случае зеркала с отверстием и двух фотоприемников луч настраивается на получение максимального сигнала фотоприемника, принимающего прошедший луч, размер отверстия подбирается так, чтобы сигналы фотоприемников были примерно одинаковы (использовались фотоприемники BPW 34 S фирмы OSRAM, площадка 7 мм²). Сигналы, используемые для работы систем стабилизации по линии поглощения рубидия, использовались после прохождения центральной части сечения фотоприемника, а для стабилизации частоты СВЧ-генератора в зависимости от проводимых исследований — из любых фотоприемников.

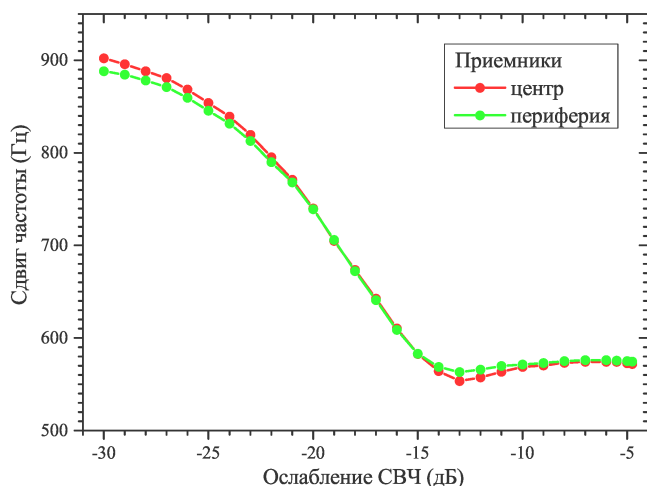


Рис. 3. Зависимость сдвига частоты от ослабления мощности СВЧ для случая ячеек, имеющих антирелаксационное покрытие стенок

Первые исследования были выполнены с поглощающей ячейкой, содержащей чистый изотоп ^{87}Rb и имеющей антирелаксационное покрытие стенок. Использовался многоэлементный фотоприемник. Частота лазера стабилизировалась по D_1 -линии ^{87}Rb . Частота СВЧ-генератора, осуществляющего модуляцию тока лазера, составляла 3.417 ГГц и стабилизировалась по наблюдаемому КПН-резонансу. Ее измерения проводились с помощью фазового компаратор-анализатора VCN-323 относительно водородного стандарта частоты и времени Ч1-1007. Мощность СВЧ-генератора составляла около 1 мВт и могла ослабляться регулируемым аттенуатором. Зависимости сдвига частоты от ослабления мощности СВЧ, пересчитанные на частоту сверхтонкого расщепления основного состояния ^{87}Rb , показана на рис. 3. Зависимость, показанная красным цветом, представлена для случая сигнала, полученного из центральной области взаимодействия. Зависимость, показанная зеленым цветом, приведена для случая сигнала из областей взаимодействия, расположенных крестом на периферии. Зависимости снимались неоднократно, хорошо воспроизводятся, но существенных различий не имеют. Как уже отмечалось, в ячейках с антирелаксационным покрытием атомы паров щелочных металлов многократно пролетают через область взаимодействия и поперечное распределение поля усредняется.

Следующие исследования были выполнены с поглощающей ячейкой, содержащей чистый изотоп ^{87}Rb и буферные газы из смеси аргона и неона (Ar — 35 Торр, Ne — 65 Торр). Использовался многоэлементный фотоприемник. Исследования проводились аналогичным образом, как в предыдущем

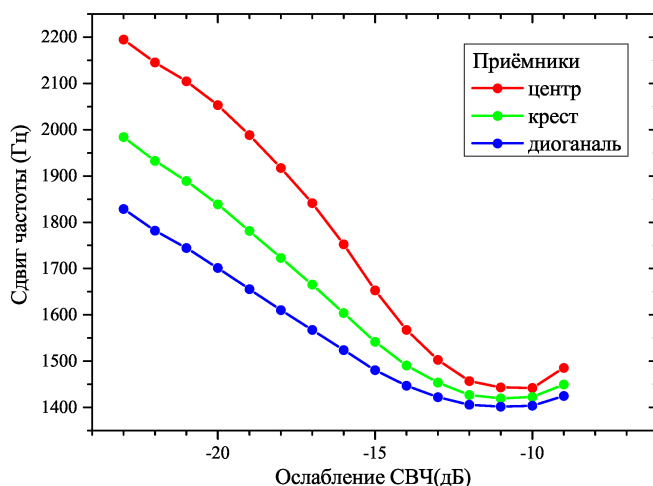


Рис. 4. Зависимость сдвига частоты от ослабления мощности СВЧ для случая ячеек с буферными газами из смеси аргона и неона (Ar — 35 Торр, Ne — 65 Торр)

случае. Зависимости сдвига частоты от ослабления мощности СВЧ, пересчитанные на частоту сверхтонкого расщепления основного состояния ^{87}Rb , показаны на рис. 4. Зависимость, показанная красным цветом, это сигнал после центральной области взаимодействия. Зависимость, показанная зеленым цветом, приводится для случая сигнала из областей взаимодействия, расположенных крестом на периферии. Зависимость, показанная синим цветом, представлена для случая сигнала из областей взаимодействия, расположенных диагонально на периферии. Как видно из результатов измерений, сдвиг частоты существенно зависит от регистрации сигнала из разных областей поперечного сечения взаимодействия лазерного излучения с атомами с различной интенсивностью излучения.

Полученный результат важен для понимания процесса формирования КПН-резонанса в поглощающей ячейке с буферными газами. Каждый атом рубидия в процессе взаимодействия с оптическими полями за время жизни его когерентности не выходит за пределы пространственной области, ограниченной его диффузией в буферных газах, которая меньше области взаимодействия с оптическими полями. Оптические поля существенно неоднородны в поперечном сечении (гауссовский пучок) и в продольном (поглощение рубидия), т. е. КПН-резонанс определяется результатом усреднения по всему объему взаимодействия, через который проходило регистрируемое излучение, и различен для лучей, проходящих через разные области поперечного сечения. Как уже говорилось, при определенном соотношении интенсивностей в гребенке оптических полей, образующихся в результате модуляции

тока лазера, суммарный полевой сдвиг может быть нулевым. К сожалению, распределение интенсивностей в гребенке сильно меняется от лазера к лазеру. Нам удалось найти такие условия эксперимента, когда полевой сдвиг нулевой для используемого нами лазера и нашей поглощающей ячейки. Эксперимент выполнен с поглощающей ячейкой, содержащей чистый изотоп ^{87}Rb и буферные газы из смеси аргона и неона ($\text{Ar} - 35 \text{ Торр}$, $\text{Ne} - 65 \text{ Торр}$). Использовался многоэлементный фотоприемник. Исследования проводились аналогичным образом, как в предыдущих случаях, только для образования двухфотонной Λ -схемы использовались -2 - и 0 -компоненты гребенки, а не -1 и $+1$, как это делалось обычно. Зависимости сдвига частоты от ослабления мощности СВЧ, пересчитанные на частоту сверхтонкого расщепления основного состояния ^{87}Rb , показана на рис. 5. Зависимость, отмеченная красным цветом, показана для случая сигнала из центральной области взаимодействия. Зависимость, отмеченная синим цветом, показана для случая сигнала из областей взаимодействия, расположенных крестом на периферии. Как видно из результатов измерений, сдвиг частоты существенно зависит от регистрации сигнала из разных областей поперечного сечения взаимодействия лазерного излучения с атомами с различной интенсивностью излучения, и полученные зависимости пересекаются. В точке пересечения полевой сдвиг для центральной области и периферии одинаковый, не зависящий от величины поля, т. е. полевой сдвиг в этой точке равен нулю (сложилось определенное соотношение интенсивностей в гребенке оптических полей, при котором суммарный сдвиг оказался равным нулю).

Обычно частота лазера стабилизировалась по D_1 -линии ^{87}Rb , и выбор рабочей точки осуществлялся изменением мощности СВЧ, модулирующей ток лазера для нахождения оптимального режима. При этом стабилизация частоты СВЧ может осуществляться с использованием сигнала из центральной области взаимодействия, а настройка мощности СВЧ по сигналу из периферийной области, так как в точке с нулевым сдвигом частоты оба сигнала после синхронного детектирования равны нулю. К сожалению, в точке пересечения амплитуда КПН-резонанса мала и поэтому получить высокую стабильность не представляется возможным. Была проведена серия экспериментов с зеркалом с отверстием и двумя фотоприемниками, что больше соответствовало осевой симметрии геометрии пучка для экспериментов и позволяло оптимизировать сигналы и получить более компактную конструкцию. Бы-

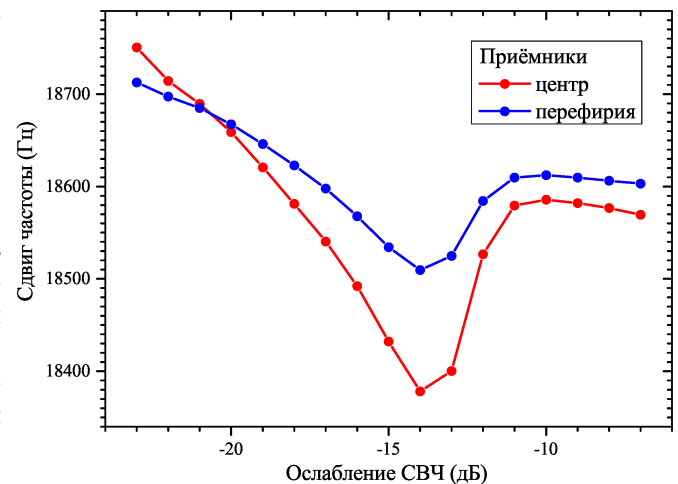


Рис. 5. Зависимость сдвига частоты от ослабления мощности СВЧ для случая ячеек с буферными газами из смеси аргона и неона ($\text{Ar} - 35 \text{ Торр}$, $\text{Ne} - 65 \text{ Торр}$) и использованием -2 - и 0 -компонент гребенки

ло решено не ограничивать поиск рабочей точки с полевым сдвигом равным нулю ситуацией привязки частоты лазера к центру линии поглощения. Для поиска рабочей точки лазер перестраивался относительно центра линии поглощения рубидия. Частота СВЧ модулирующего ток лазера стабилизировалась по КПН-резонансу, который наблюдается в пределах всей однородно уширенной линии поглощения.

Для перестройки частоты лазера относительно центра линии поглощения рубидия осуществлялась плавная регулировка температуры лазера. При этом с помощью многоканального АЦП и компьютера можно было проводить синхронную запись целого ряда сигналов: сигнал пилообразной перестройки температуры лазера, сигнал мощности излучения из центральной области взаимодействия, сигнал мощности излучения из периферийной области взаимодействия, сигнал первой гармоники после выхода синхронного детектора привязки к КПН-резонансу из центральной области взаимодействия, сигнал первой гармоники после выхода синхронного детектора привязки к КПН-резонансу из периферийной области взаимодействия, сигнал из синхронного детектора на вторую гармонику привязки к КПН-резонансу из центральной области, сигнал после выхода синхронного детектора на вторую гармонику привязки к КПН-резонансу из периферийной области. Сигналы на вторую гармонику привязки к КПН-резонансу характеризуют амплитуду КПН-резонансов. После записи с привязкой по одному фотоприемнику проводилась запись с привязкой по другому фотоприемнику.

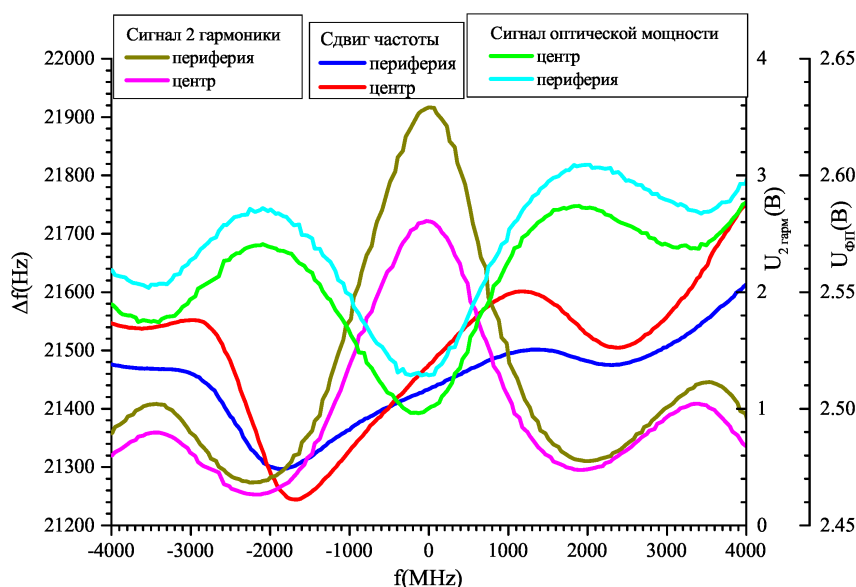


Рис. 6. Запись сигналов сдвига частоты КПН-резонанса для центральной и периферийной областей взаимодействия, сигналов синхронных детекторов на второй гармонике от модулирующей СВЧ-частоты 10 кГц и сигналов от прошедшей через ячейку мощности

На рис. 6 показана одна из записей сдвигов частоты КПН-резонанса для центральной (красный цвет) и периферийной (синий цвет) областей взаимодействия, сигналов после выхода синхронных детекторов на второй гармонике от модулирующей СВЧ-частоты (для центральной области пурпурный цвет для периферийной темно желтый цвет) 10 кГц, характеризующей амплитуду КПН-резонансов и сигналов от прошедшей через ячейку мощности для центральной (зеленый цвет) и периферийной (голубой цвет) областей взаимодействия. Величина СВЧ выбрана оптимальной для получения максимальной амплитуды КПН-резонанса. На рис. 6 видно, что сигнал, характеризующий величину КПН-резонанса, при перестройке в интервале порядка сверхтонкого расщепления основного состояния ^{87}Rb падал не более чем на порядок. Так же наблюдается точка пересечения зависимостей сдвигов частоты КПН-резонанса от частоты отстройки лазера для центральной и периферийной областей взаимодействия. Величины сдвигов частоты КПН-резонансов для центральной и периферийной областей взаимодействия совпадают в точке, отстоящей от центра линии поглощения многочастотного лазерного поля в низкочастотную область, что обусловлено влиянием сверхтонкого расщепления возбужденного уровня линии D_1 в ^{87}Rb , которое составляет 816.656 МГц. В линии поглощения многочастотного лазерного поля расщепление из-за большого рабочего давления буферного газа не разрешается, но на вид зависимостей сдвигов частоты КПН-резонанса

от частоты отстройки лазера влияет.

Как видно на рис. 6, амплитуда КПН-резонанса в точке совпадения сдвигов частоты КПН-резонансов для центральной и периферийной областей взаимодействия (точка нулевого полевого сдвига) на 10% меньше максимальной. Следует отметить, что полевые сдвиги меняются не только от световой мощности, но и от многих других параметров: от мощности СВЧ, от отстройки частоты лазера относительно линии поглощения. Кроме того, локальная температура в ячейке так же зависит от поглощенной световой мощности, и могут быть сдвиги от величины световой мощности, не связанные с динамическим штарк-эффектом. Световая мощность контролируется на выходе из поглощающей ячейки и может быть стабилизирована, например, с использованием электрооптического либо акустооптического модуляторов. Отстройка частоты лазера относительно линии поглощения тоже может быть стабилизирована с помощью дополнительной поглощающей ячейки и акустооптического модулятора. Хуже обстоит дело с СВЧ-мощностью: даже если генератор СВЧ выдает стабильную мощность, это не значит, что модуляция лазера стабильна, могут меняться параметры согласования выходного импеданса генератора с импедансом лазера, и модуляционные характеристики лазера так же зависят от тока и температуры. На рис. 7 показана одна из записей сдвигов частоты КПН-резонанса для центральной (красный цвет) и периферийной (синий цвет) областей взаимодействия, сигналов после выхода синхронных детек-

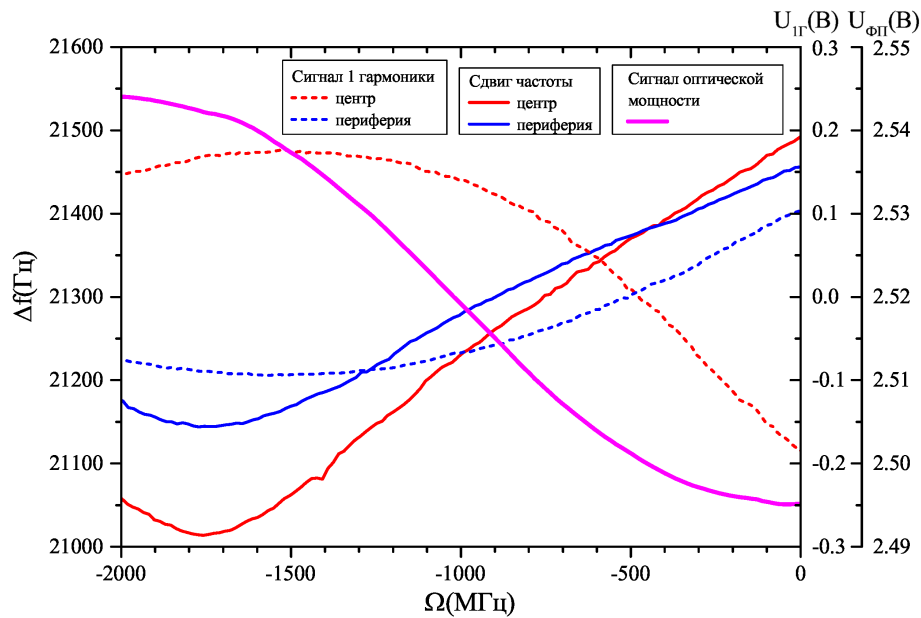


Рис. 7. Запись сигналов сдвига частоты КПН-резонанса для центральной и периферийной областей взаимодействия, сигналов синхронных детекторов на первой гармонике от модулирующей СВЧ-частоты 10 кГц и сигнала от прошедшей через ячейку мощности

торов на первой гармонике (штриховые линии для центральной области — красный цвет, для периферийной — синий цвет) от модулирующей СВЧ-частоты 10 кГц, характеризующей крутизну частотного дискриминатора на базе КПН-резонанса, и сигнала от прошедшей через ячейку мощности для периферийной области взаимодействия (пурпурный цвет). Когда стабилизация частоты СВЧ генератора осуществлялась по нулю первой производной от частоты модуляции 10 кГц из центральной области и записывался сдвиг частоты КПН-резонанса для центральной области, сигнал первой производной записывался из периферийной области. В следующей записи области менялись ролями. Величина СВЧ выбрана оптимальной для получения максимальной амплитуды КПН-резонанса.

Как видно на рис. 7, есть точка совпадения сдвигов частоты КПН-резонансов для центральной и периферийной областей взаимодействия, есть рабочие точки, где сигналы первой производной равны нулю в одном канале, когда есть захват в другом. Эти точки не совпадают, так как частота лазера кроме плавной перестройки путем изменения его температуры могла дрейфовать самостоятельно. Необходимо организовать более прецизионную перестройку частоты лазера. Отстройка частоты лазера относительно линии поглощения, как было сказано ранее, может быть стабилизирована с помощью дополнительной поглощающей ячейки и акустооптического модулятора, сдвигающего частоту лазера, поглоща-

ющей ячейки с подобранным буферным газом или поглощающей ячейки в магнитном поле. При построении стандарта частоты с использованием предлагаемого метода излучение одного из каналов регистрации может быть использовано для стабилизации частоты СВЧ, излучение другого — для подстройки уровня модулирующей мощности СВЧ, что может привести к автоматической настройке на режим работы с нулевым полевым сдвигом.

3. ВЫВОДЫ

В работе предложен метод поиска рабочих условий с нулевым световым сдвигом для резонанса когерентного пленения населенностей путем регистрации сигнала из разных областей поперечного сечения взаимодействия лазерного излучения с атомами. Представлены результаты экспериментальных исследований для случая регистрации КПН-резонансов на линии D_1 в ^{87}Rb . Использование предложенного метода позволит улучшить долговременную стабильность стандартов частоты СВЧ на базе КПН-резонансов.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках программы «Многочастотная лазерная спектроскопия атомов щелочных металлов и ее приложения к новому поколению миниатюрных атомных часов микроволнового и оптического диапазонов» (грант № 22-12-00279).

ЛИТЕРАТУРА

1. S. Knappe, R. Wynands, J. Kitching et al., *J. Opt. Soc. Am. B* **18**, 1545 (2001).
2. V. S. Letokhov and V. P. Chebotayev, *Optical Science, Nonlinear Laser Spectroscopy*, Springer-Verlag, Berlin (1977), Vol. 4.
3. J. Vanier, *Appl. Phys.* **81**, 421 (2005).
4. J. Kitching, *Appl. Phys. Rev.* **5**, 031302 (2018).
5. S. Knappe, P. D. D. Schwindt, V. Shah et al., *Opt. Express* **13**, 1249 (2005).
6. S. Knappe, V. Shah, P. Schwindt et al. *Appl. Phys. Lett.* **85**, 1460 (2004).
7. С. А. Зибров, В. Л. Величанский, А. С. Зибров и др., *Письма в ЖЭТФ* **82**, 534 (2005) [*JETP Lett.* **82**, 477 (2005)].
8. S. A. Zibrov, I. Novikova, D. F. Phillips et al. *Phys. Rev. A* **81**, 013833 (2010).
9. R. Michalzik, *VCSELs*, Springer, Berlin – Heidelberg (2013).
10. M. I. Vaskovskaya, E. A. Tsygankov, D. Chuchelov et al., *Opt. Express* **27**, 35856 (2019).
11. V. Shah, V. Gerginov, P. D. D. Schwindt et al., *Appl. Phys. Lett.* **89**, 151124 (2006).
12. R. W. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski et al. *Appl. Phys. B* **31**, 97 (1983).