

УДК 681.114-187.4

О НАБЛЮДЕНИИ КПН-ЭФФЕКТА В ПРИРОДНОМ РУБИДИИ

И.Ю. Блинов, А.Ф. Курчанов, В.В. Пьявкина, А.С. Сальников

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.

blinov@vniiftri.ru,
kurchanov@vniiftri.ru,
vvb@vniiftri.ru,
salnikov@vniiftri.ru

Экспериментально получены зависимости амплитуды дискриминатора КПН-эффекта от длины волны лазера, позволяющие выбрать оптимальную длину волны, соответствующую максимальной крутизне квантового дискриминатора как для ячеек на природной смеси изотопов рубидия (Rb), так и с изотопно чистым Rb^{87} . Обнаружено, что в ячейке с природным Rb выраженный максимум амплитуды дискриминатора соответствует длине волны лазера, которая не совпадает с пиком линии D_1 в спектре поглощения изотопа Rb^{87} (при наличии СВЧ-модуляции длины волны лазера). Выявлено, что длина волны лазера, соответствующая максимуму амплитуды дискриминатора, приблизительно совпадает с точкой перегиба в спектре поглощения в ячейке с природным Rb, что принципиально отличается от ячейки с Rb^{87} . Описаны особенности технологии изготовления ячеек с природным рубидием, обсуждается возможность создания малогабаритного квантового стандарта частоты на их основе, что может быть важным при массовом производстве.

Ключевые слова: когерентное пленение населённости, малогабаритная ячейка с природным рубидием, квантовый стандарт частоты.

ON OBSERVATION OF CPT-EFFECT IN NATURAL RUBIDIUM

I.Yu. Blinov, A.F. Kurchanov, V.V. Pyavkina, A.S. Salnikov

FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region

blinov@vniiftri.ru,
kurchanov@vniiftri.ru,
vvb@vniiftri.ru,
salnikov@vniiftri.ru

The dependences of the amplitude of the CPT effect discriminator on the laser wavelength were experimentally obtained, allowing choosing the optimal wavelength corresponding to the maximum steepness of the quantum discriminator both for cells with a natural mixture of rubidium (Rb) isotopes and with isotopically pure Rb^{87} . It was found that in a cell with natural Rb the expressed maximum of the discriminator amplitude corresponds to the laser wavelength, which does not coincide with the peak of the D_1 line in the absorption spectrum of the Rb^{87} isotope (in the presence of microwave modulation of the laser wavelength). It was revealed that the laser wavelength corresponding to the maximum of the discriminator amplitude approximately coincides with the inflection point in the absorption spectrum in the cell with natural Rb, which is fundamentally different from the cell with Rb^{87} . The features of the manufacturing technology of cells with natural rubidium are described, the possibility of creating a small-sized quantum frequency standard on that basis, which can be important in serial production, is discussed.

Key words: coherent population trapping, small-sized cell with natural rubidium, quantum frequency standard.

Введение

Малогабаритный квантовый стандарт частоты (МКСЧ) на эффекте когерентного пленения населённости (КПН) использует обычно [1] в квантовом дискриминаторе малогабаритную ячейку с парами Rb^{87} , однако изотопно чистый рубидий с высокой степенью очистки стоит дорого [2]. И даже при совершенно малом количестве рубидия в ячейке стоимость ячейки весьма высока [3]. Поэтому исследование возможности применения в квантовом стандарте на КПН-эффекте ячейки с недорогим (15 руб. за 3 мг) природным рубидием [4] без существенного ухудшения характеристик стандарта является актуальной задачей.

Известны квантовые стандарты на ячейках с природным рубидием с лампами накачки на Rb^{87} , разработанные ещё до 1978 года [5]. Такой стандарт [5] имел девиацию Аллана $1 \cdot 10^{-11} / \tau^{1/2}$ для диапазона $1 \text{ с} \leq \tau \leq 100 \text{ с}$ и нестабильность $1 \cdot 10^{-11}$ за 1 сутки. Но авторам не известно об исследованиях, направленных на разработку стандартов с ячейкой на природном рубидии на КПН-эффекте с лазерной накачкой. В настоящей работе рассматриваются подходы к методам исследования малогабаритных ячеек, в том числе с природным рубидием.

Схема эксперимента

Типовая схема эксперимента показана на рис. 1 и является обычной [1] при наблюдении КПН-эффекта в парах щелочных металлов. Лазер VCSEL поддерживается нагревателем при такой температуре, когда его длина волны (расщеплённая на две компоненты) совпадает с расщеплённой микроволновым переходом линией D_1 в спектре поглощения в парах щелочного металла, находящегося в ячейке. При этом луч фокусируется линзой и перед попаданием в ячейку проходит через четвертьволновую пластину, превращая линейную поляризацию лазера в круговую. Генератор, управляемый напряжением, модулирует своим СВЧ-сигналом с частотой 3,4 ГГц (для Rb) ток лазерного диода, расщепляя длину волны лазера на две компоненты, отстоящие по частоте на 6,8 ГГц. Этот генератор связан петлёй фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) с кварцевым генератором, создающим результирующий выходной сигнал стабильной частоты. Управляющая электроника модулирует по частоте СВЧ-генератор, например, с частотой 5 кГц, кроме того, она модулирует ток лазера, например, с частотой 10 кГц, модулируя, таким образом, его длины волн по длине волны (в малых пределах). Электроника, обрабатывая принятый фотодиодом сигнал, анализирует модуляцию длины волны лазера и подстраивает его длину волны так, чтобы она

соответствовала вершине пика поглощения в ячейке. В результате этого длина волны лазера стабилизируется. Кроме того, электроника, обрабатывая принятый фотодиодом сигнал, анализирует частотную модуляцию СВЧ-генератора и подстраивает связанный с ним кварцевый генератор по минимуму сигнала синхронного детектора, т.е. по максимуму пика КПН-эффекта. При этом электроника поддерживает стабильную температуру ячейки и задаёт в ячейке магнитное поле необходимой величины. Для этого ячейку помещают в магнитный экран, содержащий внутри задающие магнитное поле катушки.

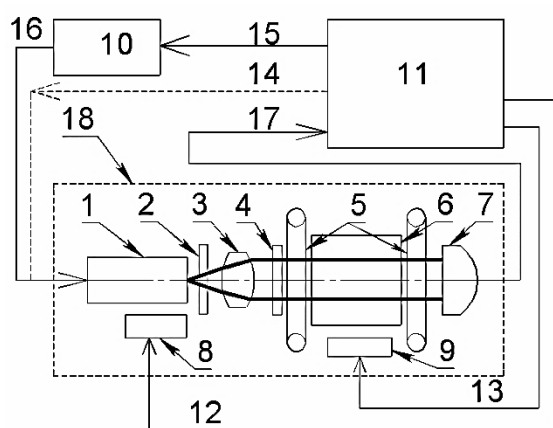


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — лазер VCSEL; 2 — светофильтр; 3 — линза; 4 — четвертьволновая пластина; 5 — катушки, создающие магнитное поле; 6 — ячейка с парами щелочного металла (Cs или Rb); 7 — фотоприёмник; 8 — элемент Пельтье лазера; 9 — нагреватель ячейки; 10 — генератор СВЧ-сигнала (3,417 ГГц для Rb или 4,596 ГГц для Cs); 11 — контроллер, управляющий температурой лазера (12), температурой ячейки (13), током лазера (14), частотой СВЧ-генератора (15), причём сигнал СВЧ-генератора (16) модулирует ток лазера совместно с низкочастотным сигналом (14), принятый фотоприёмником сигнал (17) принимается аналого-цифровым преобразователем (АЦП) контроллера 11; 18 — «физический блок»

Авторы проводили эксперимент именно так, как описано выше, за исключением того, что цепь обратной связи, подстраивающая длину волны лазера к пику поглощения, не замыкалась, что и позволило получить искомые результаты. Кроме того, перед ячейкой лазерный луч ослаблялся нейтральным светофильтром до необходимого уровня, о чем в большинстве опубликованных про КПН-эффект работ обычно не говорится. Плотность мощности лазерного излучения существенно влияет на получаемый в итоге квантовый дискриминатор частоты и на стабильность выходной частоты квантового стандарта.

На рис. 2 показан квантовый дискриминатор частоты для двух различных вариантов конструкции магнитного экрана с термостатом, содержащим

стеклянную сферическую ячейку с парами Rb^{87} , буферным газом и задающими магнитное поле катушками.

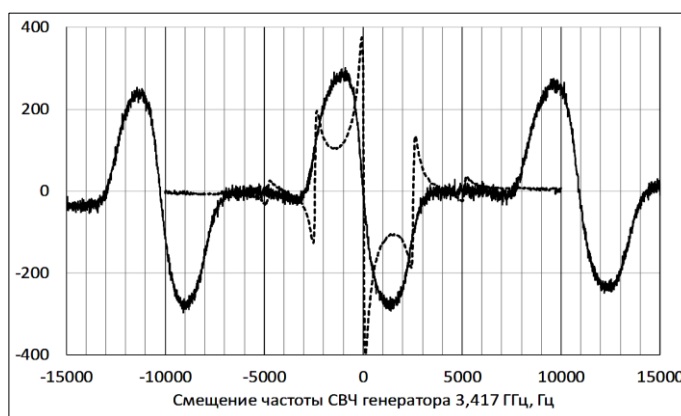


Рис. 2. Дискриминатор частоты:
сплошная линия — вариант с прямоугольным магнитным экраном;
пунктирная линия — вариант с цилиндрическим магнитным экраном

В обоих случаях частота СВЧ-генератора, модулирующего своим током лазер, модулировалась в свою очередь по частоте с частотой 5 кГц. Амплитуда такой частотной модуляции СВЧ-генератора подбиралась экспериментально. Результат синхронного детектирования этой частоты модуляции 5 кГц отображён по вертикальной оси (в условных единицах). Сплошной линией (дискриминатор № 1) показан вариант с прямоугольным магнитным экраном, причём магнитное поле катушек было выбрано небольшим. Поэтому кроме рабочего (часового) резонанса по центру графика видны смещённые влево и вправо магнитным полем нерабочие резонансы. Пунктирной линией (дискриминатор № 2) показан вариант с цилиндрическим магнитным экраном, при этом более сильное магнитное поле сместило нерабочие резонансы за пределы графика.

Графики дискриминаторов на рис. 2 имеют как отличия, так и сходство. Прежде всего, на них однозначно проявлена половина частоты модуляции 5 кГц в виде частот $\pm 2,5$ кГц, на которых график поднимается круто вверх. При этом крутое падение графика в центре с пересечением нуля как раз и позволяет стабилизировать среднюю частоту СВЧ-генератора и связанную с ней выходную частоту квантового стандарта.

Форма пунктирной линии соответствует известным теоретическим формулам для модулятора, имеющего частоту модуляции и амплитуду частотной модуляции существенно большими по сравнению с шириной исследуемого резонанса [6] (*Pound–Drever–Hall (PDH) technique*). Применительно к конструкции такая форма линии говорит о хорошей однородности магнитного поля в месте расположения ячейки.

Форма сплошной линии отличается (и имеет меньшую крутизну), так как в этом случае магнитный экран был не двойным, а одинарным, имел прямоугольную форму, малый размер и размещённые внутри экрана катушки квадратной формы. Тем не менее, несмотря на очевидные недостатки, такая конструкция позволяет существенно уменьшить размеры стандарта частоты.

Важным сходством графиков на рис. 2 является наличие экстремумов на участке между центральным падением графика и отстоящим от него на $\pm 2,5$ кГц ростом графика. Тип экстремума (максимум или минимум) в этих двух случаях отличается, но это не является существенным. При отстройке частоты СВЧ-генератора от КПН-резонанса на ± 1250 Гц величина графиков становится мало чувствительной к изменению точного положения КПН-резонанса. Поэтому при выборе таких точек отстройки частоты можно менять длину волны лазера с любой скоростью, даже очень медленно, и не опасаться при этом того, что КПН-резонанс изменит за это время своё положение. Разность значений в левой точке отстройки частоты и в правой точке отстройки даст при этом эффективную оценку амплитуды квантового дискриминатора в зависимости от частоты лазера.

Используемый в стандарте частоты кварцевый генератор без какой-либо подстройки на интервале времени от 0,3 до 6 секунд даёт относительную нестабильность частоты не хуже $4 \cdot 10^{-11}$, что соответствует изменению частоты СВЧ-генератора 3,417 ГГц на величину 0,14 Гц. Интервал участка падения кривой дискриминатора в лучшем случае имеет ширину порядка 200 Гц, а в худшем случае — порядка 1200 Гц. Поэтому возможное изменение положения КПН-резонанса за время изменения длины волны лазера при сканировании графика пренебрежимо мало по сравнению с шириной рабочего участка дискриминатора. По этой причине можно выбрать частоты отстройки с разнесом их от резонанса гораздо меньше, чем ± 1250 Гц, например, на ± 50 Гц. В этом случае разность измеренных значений будет уже оценивать не амплитуду квантового дискриминатора, а его крутизну как функцию длины волны лазера.

Зависимость амплитуды и крутизны квантового дискриминатора частоты от длины волны лазера важна, поскольку нельзя априори полагать, что максимум амплитуды или крутизны проявится при длине волны лазера, совпадающей в точности с наблюдаемым пиком поглощения. Речь идёт о наблюдаемом пике поглощения именно с учётом СВЧ-модуляции тока лазера. Проведённые эксперименты показали, что для ячеек с изотопно чистым Rb^{87} такое совпадение действительно в значительной степени имеет место. Однако для ячейки с природным Rb изменение длины волны лазера от точки пика поглощения до точки перегиба в спектре поглощения (рис. 3) позволяет увеличить амплитуду квантового дискриминатора на ячейке с природным Rb примерно в 5 раз (рис. 4).

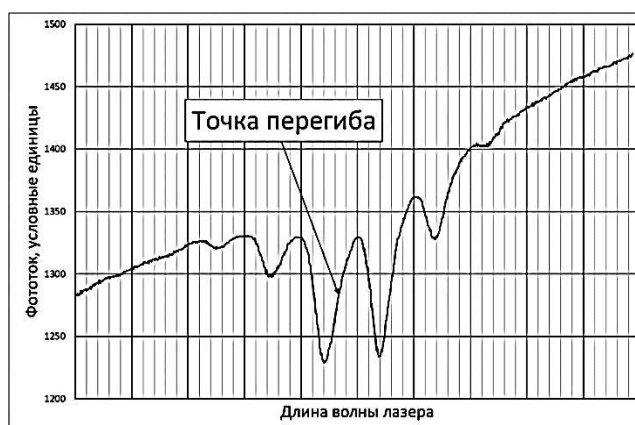


Рис. 3. Спектр поглощения ячейки с природным рубидием

На рис. 4 тонкой линией показан традиционный дискриминатор длины волны лазера, построенный как первая производная от спектра поглощения по длине волны. Такой дискриминатор строится путём выделения в фототоке частоты модуляции 10 кГц, модулирующей длину волны лазера путём модуляции его тока. Кривая этого дискриминатора пересекает ноль при длине волны λ_1 , при этом кривая условной амплитуды квантового дискриминатора на КПН-эффекте имеет значение «50». Условная амплитуда квантового дискриминатора возрастает в 5 раз (до значения «250») при длине волны λ_2 , примерно соответствующей экстремуму первой производной от спектра поглощения по длине волны, т.е. точке равенства нулю второй производной от спектра.

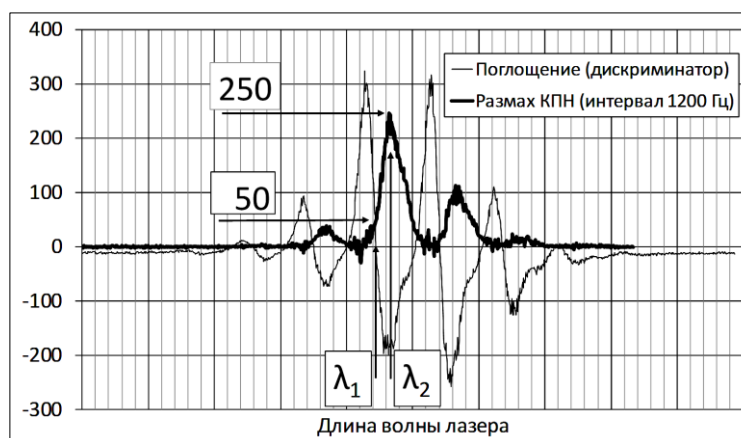


Рис. 4. Тонкой линией показан дискриминатор спектра поглощения ячейки с природным рубидием. Жирной линией показана разница дискриминатора частоты при отстройке частоты от точного значения на -600 Гц и на $+600$ Гц (интервал 1200 Гц)

В связи с тем, что синхронное детектирование обоих модулирующих частот (5 и 10 кГц) проводится цифровым способом после оцифровки сигнала фототока с помощью АЦП, при обработке может быть использована как первая производная сигнала по времени (а следовательно и по длине волны) с нужной фазой, так и вторая производная. При этом взвешенная сумма первой и второй производных спектра поглощения по длине волны позволяет построить модифицированный дискриминатор длины волны, пересекающий ноль в любой заранее заданной точке. В этом случае можно стабилизировать длину волны лазера в точке λ_2 , позволяющей увеличить амплитуду квантового дискриминатора примерно в 5 раз по сравнению с традиционной точкой стабилизации длины волны λ_1 .

Таким образом, разработан и опробован метод анализа амплитуды и крутизны квантового дискриминатора на КПН-эффекте, позволяющий оперативно оценивать свойства ячейки в интервале длин волн лазера. Полученная дополнительная информация может быть использована при настройке квантового стандарта частоты различными способами, обсуждение которых выходит за рамки настоящей статьи.

На рис. 5 показан квантовый дискриминатор частоты (дискриминатор № 3) для ячейки с природным Rb при использовании длины волны λ_2 (без её стабилизации).

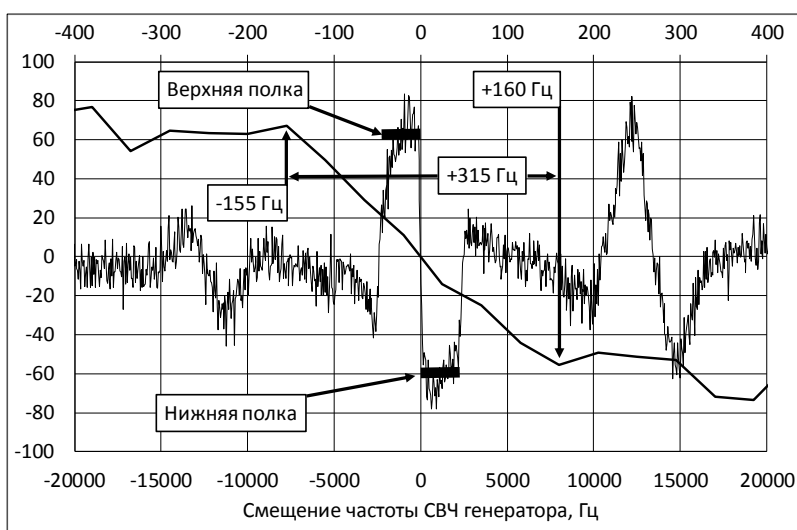


Рис. 5. Дискриминатор частоты. Длина волны лазера зафиксирована, но её автоподстройка отсутствует

Зона прямолинейного падающего участка кривой дискриминатора № 3 равна 315 Гц. Для дискриминаторов, показанных на рис. 2, зона такого участка равна 1200 Гц (дискриминатор № 1) и 200 Гц (дискриминатор № 2).

При этом сопоставление этих трёх дискриминаторов не будет вполне корректным, так как эксперименты выполнялись в разное время, в разных условиях и при разной плотности мощности лазерного луча. Для экранов и термостатов дискриминаторов № 1 и 3 авторы разрабатывали и изготавливали собственные оригинальные конструкции, кроме того, для дискриминатора № 3 авторы также самостоятельно изготавливали ячейку (с природным Rb). Ячейки в дискриминаторах № 1 и 2 (с Rb^{87}) были изготовлены в Нижнем Новгороде на предприятии ЗАО «Рукнар».

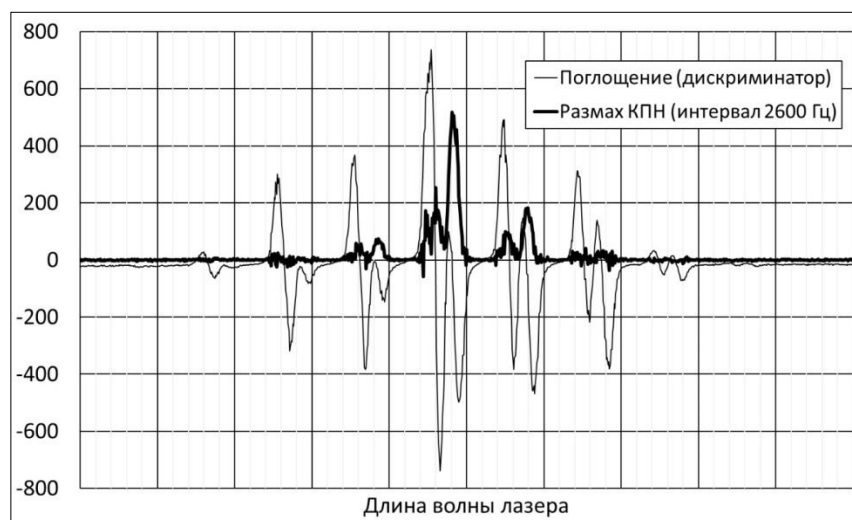


Рис. 6. Тонкой линией показан дискриминатор спектра поглощения ячейки с изотопно чистым рубидием Rb^{87} . Жирной линией показана разница дискриминатора частоты при отстройке частоты от точного значения на -1300 Гц и на $+1300$ Гц (интервал 2600 Гц)

Графики на рис. 6 аналогичны графиками рис. 4, но относятся не к ячейке с природным Rb, а к ячейке с изотопно чистым Rb^{87} . Оба рисунка показывают, что КПН-эффект останется отчётливо выраженным (с несколько меньшей амплитудой) и при изменении длины волны лазера соответствующим изменению его частоты на $3,417$ ГГц. В этом случае в КПН-эффекте будут участвовать не две компоненты спектра лазера, разнесённые от основной компоненты на $\pm 3,417$ ГГц, а основная компонента и компонента, разнесённая от основной на $6,83$ ГГц. Для такого режима работы свойства квантового стандарта и его оптимальные режимы работы будут, разумеется, отличаться и потребуют отдельного исследования.

Технология изготовления ячейки

Была изготовлена экспериментальная ячейка в виде стеклянной сферы диаметром $6,2$ мм, выдутой из стекла ХС-1 (капилляр — 90 мм, диаметр —

2 мм, выпускаемый серийно в больших количествах). Конец капилляра был вклеен в стеклянную трубку диаметром 4 мм. Основные элементы и приспособления при изготовлении ячейки приведены на рис. 7.

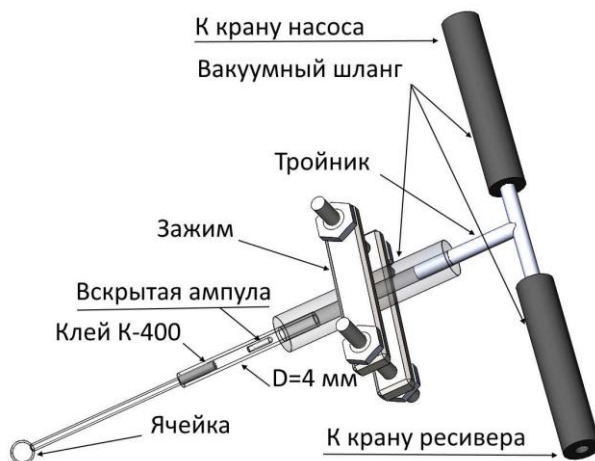


Рис. 7. Основные элементы и приспособления при изготовлении ячейки

В перчаточном боксе, заполненном аргоном, у миниатюрной стеклянной цилиндрической ампулы с природным рубидием был откушен кусачками край, обеспечив доступ к рубидию. Ампула вскрытым концом была положена в трубку. Затем стеклянная трубка диаметром 4 мм была герметично заглушена пережатым зажимом кусочком резиновой трубки и вместе с капилляром и тонкостенной сферой на его конце вынута из перчаточного бокса. Ампула в трубке была подогрета пламенем горелки так, чтобы рубидий стал жидким, затем трубку с ампулой встряхнули. Подогретая ампула, ударившись о край вклеенного капилляра, забросила в капилляр почти весь находящийся в ампуле рубидий (3 мг в ампуле). Далее заглушка была соединена с тройником, подключённым к вакуумному насосу и к ресиверу, заполненному аргоном при давлении 60 торр, при закрытом кране. После включения вакуумного насоса зажим заглушки был снят, и в сфере образовался вакуум. Затем кран вакуумного насоса был закрыт, а кран ресивера стал открытым.

После открывания крана ресивера давление буферного газа в ячейке установилось равным заданной величине (60 торр). Ячейка заполнялась (для простоты) чистым аргоном, а не его смесью с неоном. Расположив капилляр горизонтально, был проведён нагрев газовой горелкой того участка капилляра, где рубидий лежал максимально близко к сферической полости. При этом рубидий испарялся, и его пары летели как в сторону сферы, так и в противоположную. На поверхности сферы при этом проявились видимые глазом следы рубидия. После этого той же горелкой был отрезан капилляр

близко к сфере, причём для предотвращения отличия температуры сферы от комнатной на капилляр была надета пластина из тонкого металла с отверстием, равным диаметру капилляра, и с разрезом от края до этого отверстия. Указанный разрез позволил легко надеть такой отсекаТЕЛЬ пламени. После отрезки ячейки лишний участок стекла за точкой запайки капилляра был легко сошлифован на шлифовальной шкурке (две отливки из резины с полусферической впадиной были изготовлены и использованы для надёжной фиксации стеклянной сферы).

Окончательно почти готовая ячейка вставлялась своим коротким кусочком капилляра (штенделем) в отверстие, просверлённое в большом куске латуни и заполненное пластилином. Нагрев горелкой участков сферы испарял лежащий на них рубидий и заставлял его конденсироваться внутри холодного короткого капилляра, где и образовалась маленькая блестящая капелька рубидия. Ранее такой способ изготовления был отработан на экспериментальных ячейках с чистым природным Cs. При этом следует заметить, что цезий перегоняется огнём горелки с одного места на другое намного легче (и быстрее), чем рубидий.

Экспериментальные исследования

Изготовленная ячейка была помещена в двойной магнитный экран с термостатом и с заданным парой катушек внутри внутреннего экрана однородным магнитным полем. Испытания проводились при температуре ячейки 60°C в магнитном поле, достаточном для того, чтобы «часовой» (используемый в стандарте частоты) КПН-резонанс освободился от мешающих резонансов, частота которых зависит от поля линейно, в отличие от «часового» резонанса с квадратичной зависимостью частоты от поля. Эти мешающие резонансы видны левее и правее часового резонанса на рис. 2 и 5.

Луч лазерного диода VCSEL фокусировался линзой «на бесконечность», проходил через нейтральный ослабляющий светофильтр, через отверстие в термостате до ячейки, сквозь ячейку и принимался расположенным за термостатом фотодиодом.

Ток лазерного диода модулировался сигналом СВЧ-генератора, работающего на частоте 3,41 ГГц, а также модулировался низкочастотным сигналом с частотой 10 кГц. Частота СВЧ-генератора при этом подвергалась частотной модуляции с частотой 5 кГц и подобранной оптимальной амплитудой. Амплитуда модуляции лазера СВЧ-сигналом также подбиралась экспериментально.

Контроллер, управляющий макетом устройства, оцифровывал встроенным в него 12-разрядным АЦП фототок фотодиода на эквивалентном нагрузочном резисторе 1 МОм вместе с постоянной составляющей, а также усиленный сигнал фотодиода без постоянной составляющей. При этом АЦП

оцифровывал сигналы с частотой 120 кГц, т.е. 12 раз за период для частоты 10 кГц и 24 раза за период для частоты 5 кГц, что позволяло проводить синхронное детектирование обеих частот с различными фазами.

Управляемый контроллером 16-разрядный ЦАП обеспечивал необходимые регулировки, в том числе температуры лазера, температуры ячейки, частоты управляемого напряжением кварцевого генератора и постоянного тока лазера. При медленном сканировании постоянного тока лазера одновременно с мощностью лазера линейно изменялась и его длина волны. При этом температура лазерного кристалла, также влияющая на длину волны лазера, стабилизировалась путём управления током элемента Пельтье по сигналу расположенного внутри лазера терморезистора. Результаты такого сканирования длиной волны лазера показаны на рис. 4 и 6.

При этом сканирование длиной волны лазера проводилось дважды. Первый раз частота СВЧ-генератора была выбрана на 600 Гц ниже частоты, соответствующей пересечению нуля линейной частью квантового дискриминатора частоты на рис. 5. Второй раз частота СВЧ-генератора была выбрана на 600 Гц выше этой частоты. Из результата синхронного детектирования частоты частотной модуляции СВЧ-генератора 5 кГц при первом сканировании вычитался результат при втором сканировании. Именно эта разность и дана на рис. 4 в виде жирной линии.

На рис. 4 виден важный факт, а именно: если привязать длину волны лазера к одному из пиков поглощения и после этого пытаться реализовать КПН-эффект, то тогда амплитуда КПН-эффекта будет весьма малой и недостаточной для его практического использования в точных малогабаритных часах. Однако если привязать длину волны лазера к нужной точке, то тогда амплитуда КПН может многократно вырасти.

На рис. 5 ток лазера установлен в точке максимального КПН-эффекта согласно рис. 4. При этом автоподстройка тока отсутствует, но за время сканирования графика рис. 5 изменение положения точки максимума в результате дрейфа параметров макета не было существенным.

На рис. 5 мы видим квантовый дискриминатор частоты, полученный на ячейке с природным рубидием при использовании лазерного диода, предназначенного для ячеек с Rb⁸⁷. График дискриминатора показан одновременно в двух масштабах так, чтобы был виден его рабочий прямолинейный участок одновременно с отстоящими от часового неиспользуемыми резонансами, смещёнными магнитным полем катушек.

При построении рис. 5 не проводилась регулировка и стабилизация длины волны лазера. Однако если при синхронном детектировании модуляции тока лазера (при использовании синусоидальной модуляции) находить не только первую производную сигнала фототока с нужной фазой, но и вторую его производную (по длине волны), то тогда их взвешенная комбинация позволит привязать длину волны лазера к любой точке в спектре поглощения

и проводить автоматическое регулирование длины волны, поддерживая максимальную амплитуду квантового дискриминатора на КПН-эффекте.

Разумеется, выбор разноса частот на 1200 Гц на рис. 4 был проведён именно на основе вида дискриминатора частоты на рис. 5. В этом случае обе точки сканирования лежат на верхней и на нижней «полках» кривой дискриминатора. В том же случае, когда дискриминатор принимает другой вид (с острыми пиками в начале и в конце каждой полки, как для дискриминатора № 2), тогда точки разноса частот можно выбирать на экстремумах полки между этими пиками. Если же выбрать точки разноса частот ближе на прямолинейном участке пересечения кривой дискриминатора нуля, то тогда можно получить зависимость от длины волны не размаха КПН, а крутизны преобразования на КПН-эффекте. Таким образом, описанный выше метод анализа зависимости КПН от длины волны лазера может иметь несколько разновидностей.

Изложенная выше методика анализа зависимости эффекта КПН от длины волны опробовалась ранее на ячейках с изотопно чистым Rb^{87} . Выше на рис. 2 и 6 приведены графики, аналогичные графикам на рис. 3 и 5, но для ячейки с Rb^{87} и буферным газом в виде смеси Ne и Ar с давлением буферного газа 9 торр (дискриминатор № 1). При этом температура ячейки была равна 65°C .

На рис. 6 видно, что максимумы КПН-эффекта для ячейки с изотопно чистым Rb^{87} (дискриминатор № 1) достаточно точно совпадают по длине волны с пиками поглощения. При этом КПН-эффект более выражен именно на малом пике поглощения. Этот пик заметен на графиках потому, что давление буферного газа в ячейке мало, всего 9 торр. При увеличении давления малый пик сливается с соседним большим и перестаёт различаться. По этой причине для малогабаритных квантовых стандартов на КПН-эффекте обычно используют привязку длины волны к большему пику, что и было сделано для дискриминатора № 2, содержащего ячейку с давлением буферного газа 100 торр.

Выводы

Предложенный метод оценки зависимости амплитуды квантового дискриминатора частоты на КПН-эффекте от длины волны лазера работает как для ячеек с природным рубидием, так и для ячеек с изотопно чистым рубидием. Однако расположение максимумов крутизны квантового дискриминатора в этих двух случаях отличается принципиально. Поэтому алгоритм стабилизации длины волны лазера для ячейки с природным рубидием должен включать не только первую производную от поглощения в ячейке по длине волны, но и вторую производную.

Литература

1. Knappe Svenja. MEMS Atomic Clocks / National Institute of Standards and Technology (NIST), Boulder, CO, USA // Comprehensive Microsystems. 2007. V. 3. P. 571–612.
2. Rubidium-87 Rb solution [Электронный ресурс]. Merck. URL: <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sial/irmm618?lang=en®ion=RU>. Дата обращения: 27.11.2019.
3. GC19075-RB87 — Enhanced Rubidium 87 [87 Rb], Quartz Reference Cell, Ø19 mm × 75 mm. [Электронный ресурс]. ThorLabs. URL: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=GC19075-RB87>. Дата обращения: 27.11.2019.
4. Рубидий металлический [Электронный ресурс]. Особо чистые вещества: интернет-магазин. URL: <https://ochv.ru/rubidiy-metallicheskiy>. Дата обращения: 27.11.2019.
5. Frequency standard operation manual model PTB-100. [Электронный ресурс]. P. 3–13. Section 3.4.6.2. URL: http://w140.com/tekwiki/images/c/c2/Ball_efratom_ptb-100.pdf. Дата обращения: 10.01.2020.
6. Drever R.W.P., Hall J.L., Kowalski F.V., Hough J., Ford G. M., Munley A.J., Ward H. (June 1983). Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator // Applied Physics B. 31 (2): 97–105. Bibcode: 1983ApPhB..31...97D. DOI: 10.1007/BF00702605.