

УДК 681.114 + 539.17.07

ЗАВИСИМОСТЬ ЧАСТОТЫ КПП-РЕЗОНАНСА ЯЧЕЙКИ С ПАРАМИ ЦЕЗИЯ ОТ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ЛАЗЕРА

А.Ф. Курчанов, А.С. Сальников

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
kurchanov@vniiftri.ru,
salnikov@vniiftri.ru

Аннотация. Рассматриваются возможности: подбора суммарного давления буферных газов ячейке с парами Cs таким образом, чтобы резонансная частота КПП не зависела от длины волны лазера; смещения длины волны лазера от пика поглощения для достижения экстремума частоты стандарта как функции длины волны.

Экспериментально показано, что для ячеек с Cs и смесью Ne и Ar резонансная частота КПП уменьшается при увеличении длины волны лазера при давлении смеси 100 Торр и увеличивается при давлении смеси 120 Торр. Поэтому для ячейки с некоторым промежуточным давлением одновременно должны обратиться в нуль как первая, так и вторая производные зависимости резонансной частоты КПП от длины волны лазера на пике спектра пропускания. Такая ячейка при использовании в квантовых стандартах частоты позволит улучшить их точность. Найдены экстремумы частоты стандарта как функции длины волны лазера. Смещение рабочей длины волны лазера с пика спектра пропускания на такой экстремум и ее стабилизация по этому экстремуму позволяет улучшить точность стандарта.

Ключевые слова: резонанс КПП, ячейка с парами Cs, давление буферного газа, экстремумы.

DEPENDENCE OF THE CPT RESONANCE FREQUENCY OF A CELL WITH CESIUM VAPORS ON THE LASER WAVE LENGTH

A.F. Kurchanov, A.S. Salnikov

FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow region, Russia,
kurchanov@vniiftri.ru,
salnikov@vniiftri.ru

Annotation. The possibilities of selection of the total pressure of buffer gases in a cell with Cs vapors in such a way that the resonant CPT frequency does not depend on the laser wavelength and of shift of the laser wavelength from the absorption peak to reach the extremum of the standard frequency as a function of wavelength are considered.

It is shown experimentally that for cells with Cs and a mixture of Ne and Ar, the resonance CPT frequency decreases with increasing of laser wavelength at a mixture pressure of 100 Torr and increases at a mixture pressure of 120 Torr. Therefore, for a cell with a certain intermediate pressure, both the first and second derivatives of the dependence of the CPT resonance frequency

from the laser wavelength at the peak of the transmission spectrum should vanish simultaneously. Such a cell, when used in quantum frequency standards, will improve their accuracy. The extrema of the standard frequency as a function of the laser wavelength are found. The shift of the operating wavelength of the laser from the peak of the transmission spectrum to such an extremum and its stabilization at this extremum improves the accuracy of the standard.

Key words: CPT resonance, cell with Cs vapors, buffer gas pressure, extrema.

Введение

При использовании стандартов частоты в ряде применений важными параметрами оказываются его габариты и потребляемая мощность (при сохранении его приемлемой точности). Поэтому исследования возможных новых перспективных вариантов малогабаритных приборов и их метрологических и эксплуатационных характеристик являются актуальной задачей. В настоящей работе исследуется макет квантового стандарта частоты, спроектированный для работы в корпусе с объёмом 26 см^3 . Он исследовался при работе его электронных плат на «контакторах» и на «длинных проводах», что позволяло проводить его регулировку и настройку в экранирующем ящике удобного размера без неразборного монтажа составных частей в корпусе с объёмом 26 см^3 .

Существенного уменьшения размеров (и потребляемой мощности) стандарта частоты удаётся достигнуть за счёт использования эффекта когерентного пленения населённостей (КПН), наблюдаемого в парах щелочных металлов (Cs, Rb), к тому же такие приборы давно уже существуют [1]. При этом ток лазерного диода VCSEL (поверхностно излучающий лазер с вертикальным резонатором) модулируют частотой, вдвое меньшей частоты микроволнового перехода линий $D1$ или $D2$ щелочного металла. В результате излучение лазера расщепляется на несколько компонент. При прохождении такого излучения через ячейку с парами щелочного металла (Rb или Cs) возникает КПН-эффект, то есть уменьшение поглощения при совпадении удвоенной частоты модуляции с резонансной частотой микроволнового перехода в ячейке. Необходимость в громоздком СВЧ-резонаторе и заключающемся в нём многослойном магнитном экране с термостатированием находящейся в резонаторе ячейки при этом отпадает. При этом одновременно с уменьшением габаритов уменьшается и мощность термостата за счёт уменьшения его объёма. В случае выбора в качестве щелочного металла Rb использование изотопа Rb^{87} позволяет достигать лучшей точности стандарта.

Известно много различных конструкций квантовых стандартов частоты на КПН-эффекте. Обзор таких конструкций не является целью настоящей работы.

Малогобаритный стандарт частоты на КПН-эффекте должен обеспечивать приемлемую точность, заданную значениями СКДО (девиации Аллана) на различных интервалах, например на 1 секунде, 100 секундах и 1 сутках. Для этого элементы активного регулирования, обеспечивающие оптимальный режим работы стандарта, должны управляться согласно некоторому алгоритму на основе доступной для автоматической обработки информации. Некоторые регулировки могут быть обеспечены аналоговыми электронными схемами, в то время как другие регулировки подразумевают цифровое программное управление.

Активное регулирование параметров происходит намного проще и точнее в том случае, когда обеспечена пассивная стабильность, создаваемая выбором рабочих точек параметров вблизи экстремумов частоты стандарта, являющейся функцией этих параметров. Выбор рабочих значений параметров вблизи экстремумов позволяет существенно уменьшить линейную часть зависимости частоты от параметров и тем самым увеличить точность регулирования. Поэтому поиск и анализ новых, ранее не рассматриваемых экстремумов представляет собой актуальную задачу и цель настоящей работы. Алгоритм управления режимом работы при этом может быть изменён с целью полезного использования таких экстремумов.

В настоящей работе изучается зависимость частоты стандарта от длины волны (частоты) лазера. Найденные экстремумы (максимум и минимум) показаны на рис. 3 и 6, а результат их полезного применения показан на рис. 7.

Основные параметры, определяющие частоту КПН-резонанса, и предмет исследований

Значение частоты КПН-резонанса определяется температурой ячейки, выбором смеси буферных газов, уровнем мощности СВЧ-сигнала, подаваемого на лазерный диод, током лазерного диода, а также его температурой.

При выборе буферного газа ячейки в виде чистого Ne частота КПН-резонанса ячейки в диапазоне температур от 40 ° до 80 °C растёт с ростом температуры ячейки. При выборе буферного газа в виде чистого Ar частота падает с ростом температуры. Смесь Ne (65 %) Ar (35 %) позволяет получить экстремум (максимум) частоты КПН-резонанса ячейки при температуре примерно 60 °C для Rb⁸⁷, для экстремума в ячейке с Cs доля Ar требуется существенно меньше. Назовём этот экстремум частоты как функции от температуры, «экстремум № 1». Ниже в статье исследуются только ячейки с Cs на их линии поглощения D_1 .

При увеличении мощности СВЧ-генератора, подаваемой на лазерный диод, частота КПН-резонанса ячейки вначале уменьшается, достигает минимума, а затем увеличивается. Назовём этот экстремум «экстремум № 2».

Когда состав смеси газов и рабочая температура ячейки обеспечивают выполнение условий «экстремума № 1», а уровень СВЧ-модуляции лазерного диода обеспечивает выполнение условий «экстремума № 2», зависимость частоты КПН-резонанса ячейки от тока лазера может проявить «экстремум № 3», который отчасти взаимосвязан с «экстремумом № 2».

Таким образом, регулировки трёх параметров: «температура ячейки», «ток лазера», «уровень СВЧ-мощности», на первый взгляд однозначно определяются этими тремя экстремумами. Для регулировки температуры ячейки рядом с ней расположен датчик температуры (цифровой или аналоговый), ток лазера задаётся управляющим напряжением, задаваемым ЦАП на схему стабилизации тока, уровень СВЧ-мощности задаётся током в PIN-диодах аттенюатора.

При этом частота кварцевого генератора, управляемого напряжением (выходная частота стандарта), регулируется по «экстремуму № 4», а именно по КПН-эффекту в ячейке (по максимуму просветления ячейки, то есть максимуму тока фотодиода, как функции от средней частоты СВЧ-генератора). Для использования этого экстремума создают дискриминатор частоты путём синхронного детектирования частоты (10 кГц) частотного модулирования СВЧ-генератора в токе фотодиода. Выход такого дискриминатора показывает отличие удвоенной частоты СВЧ-генератора от резонансной частоты ячейки. Переход к частоте СВЧ-генератора (4596 МГц) от выходной частоты стандарта (10 МГц) производится делителями микросхемы ФАПЧ (фазовой автоподстройки частоты), подстраивающей частоту СВЧ-генератора по частоте управляемого напряжением кварцевого генератора (КГ). В свою очередь частота КГ управляется по алгоритму, использующему выходной сигнал дискриминатора частоты.

Ток подмагничивания ячейки, создающий рабочее магнитное поле, позволяет изменять в малых пределах частоту КПН-резонанса в ячейке и не является значимым для дальнейшего рассмотрения параметром.

Рабочую длину волны лазера устанавливают обычно по «экстремуму № 5», а именно по пику поглощения в ячейке, то есть пику зависимости тока фотодиода от длины волны лазера. При этом наблюдают спектр поглощения (пропускания) и регулируют рабочую температуру лазерного диода, управляя длиной волны, используя данные встроенного в лазер температурного датчика, а также используя дискриминатор длины волны. Дискриминатор длины волны создают путём модулирования тока лазера с частотой 12 кГц, приводящего к модулированию его длины волны, с последующим синхронным детектированием

тока фотодиода. В дискриминатор вносят поправку (смещение), учитывая зависимость мощности лазера от тока лазера. Однако, изменение длины волны лазера вблизи пика поглощения (обычно выбираемого в качестве рабочей точки) приводит к изменению частоты КПН-резонанса ячейки, причем линейная часть этой зависимости является существенной. Рассмотрение возможностей снизить влияние такой зависимости на точность стандарта и является предметом исследований настоящей статьи.

Дополнительные параметры, влияющие на частоту КПН-резонанса

Список перечисленных выше рабочих параметров является далеко не полным. Рассмотрим, например, управляющее напряжение кварцевого генератора $U = U_F + U_S$, где «быстрое» управление U_F производится по дискриминатору частоты ячейки, а «медленное» управление U_S производится за счёт поправки от датчика температуры под кожухом стандарта. Подобным образом каждый из управляющих параметров может быть разделён на несколько компонентов, каждый из которых регулируется по собственному алгоритму. Так, например, выходной сигнал даже одного дискриминатора (частоты или длины волны), пропущенный через набор разных частотных фильтров, превращается в набор сигналов, причём все они могут участвовать в управлении стандартом, но по-разному.

Достижением условного «экстремума № 6» (понимаемого как обращение в ноль коэффициента при линейной зависимости частоты от температуры окружающей среды) можно также считать учёт и программную коррекцию выходной частоты стандарта от температуры под кожухом стандарта и от скорости её изменения (два разных коэффициента).

Выше рассмотрены параметры, доступные для их быстрого изменения и подстройки электроникой и управляющей контроллером программой. Однако в стандарте частоты имеются и другие параметры, регулируемые только при изготовлении и настройке прибора.

При вращении волновой пластинки ($1/4$ волны) можно наблюдать «экстремум № 7» для амплитуды дискриминатора КПН-резонанса (не для частоты). Такой экстремум увеличивает стабильность работы стандарта.

Важным промежуточным параметром, влияющим на точность стандарта, является линейный коэффициент S в зависимости (вблизи рабочей точки совокупности всех параметров) частоты КПН-резонанса $F = F_0 + S \cdot \Delta W$ от быстрых изменений (флуктуаций) $\Delta W(t)$ мощности излучения лазера как функции времени t . При изменении суммарного давления буферного газа в ячейке можно наблюдать «экстремум № 8» для такой зависимости, то есть обратить коэффициент S в ноль.

Однако в известных опубликованных работах исследование зависимости частоты КПН-резонанса ячейки от длины волны лазера в достаточном диапазоне длин волн не проводилось. Оно не проводилось именно потому, что фиксация длины волны лазера на пике поглощения ячейки проводилась непременно, всегда, а потому окрестности этой «рабочей точки» исследователей и не интересовали.

Выполненное нами исследование на разных ячейках с парами Cs выявило наличие пары экстремумов частоты (минимум и максимум) на длинах волн лазера, смещённых относительно пика поглощения на 100–200 МГц (если перейти от длины волны лазера к его частоте). Напомним, что в настоящей статье исследования ведутся только для линии поглощения D_1 в Cs. Наличие таких, ранее не рассматривавшихся экстремумов, позволяет построить алгоритмы управления параметрами стандарта частоты совершенно иначе, сравнительно с описанными в литературе.

В настоящей работе изучается зависимость частоты КПН-резонанса от длины волны лазера при её значительном изменении в окрестности пика пропускания и именно в этом заключается, по мнению авторов, новизна настоящей работы.

Обычно исследуют зависимость пропускания ячейки как функции длины волны, а зависимости частоты КНП как функции длины волны не придают значения потому, что рабочую длину волны выбирают фиксированной, совпадающей с пиком пропускания, и не рассматривают возможность работы на другой, смещённой длине волны лазера. Ниже исследуются варианты повышения точности как для такого традиционного выбора рабочей длины волны, так и для смещения длины волны на максимум или на минимум «экстремума № 8».

Исследуются ячейки с парами Cs и давлением смеси газов 80, 100 и 120 торр для смеси с составом Ne (72 %) Ar (28 %). Линейная интерполяция графиков указывает на то, что при давлении 115,6 торр для этой смеси газов при температуре 60 °C ячейка будет обладать существенной зоной длин волн, на которой частота мало зависит от длины волны лазера. При этом для рабочей длины волны выбрана традиционная рабочая точка, совпадающая с пиком поглощения ячейки.

Исследуется также ячейка с парами Cs и давлением смеси газов 100 торр для смеси с составом Ne (87 %) Ar (13 %), изготовленная по другой технологии. Ниже на рис. 7 показано, что использование новых найденных экстремумов частоты как функции длины волны лазера позволяет получать стабильность лучше, чем $5 \cdot 10^{-12}$ на интервале 1 сутки.

При работе стандартов частоты на КПН-эффекте используются описанные выше дискриминаторы, а именно дискриминатор частоты и дискрими-

натор длины волны. Важно заметить, что для реализации новых алгоритмов управления стандартом частоты дополнительно введён и использован новый, «перекрёстный» дискриминатор, описанный ниже в разделе «Результаты».

Материалы и методы

Для исследований было выбрано 4 экземпляра ячеек, содержащих пары Cs, небольшую каплю Cs, а также буферный газ в виде смеси Ne и Ar.

При этом первые 3 ячейки были выполнены по традиционной технологии (далее — «технология № 1»), подразумевающей восстановление в вакууме CsCl до Cs нагреванием со стружками Ca, с последующим перегонем восстановленного Cs в сферическую полость заготовки ячейки и с последующим заполнением ячейки смесью буферных газов.

Четвёртая ячейка была изготовлена иначе (далее — «технология № 2»): с использованием готового, расфасованного в ампулы по 10 мг, металлического цезия.

Ячейки, выполненные по разным технологиям (и в разное время), показали тем не менее сходное поведение в части зависимости частоты КПН-резонанса от длины волны лазера вблизи рабочей длины волны.

Ячейки, произведённые по «технологии № 1»

В описываемом эксперименте исследовались сферические (диаметр — 5 мм) стеклянные (стекло марки С48-3) ячейки, содержащие металлический природный Cs и смесь буферных газов (Ne и Ar).

Эти ячейки произведены по общепринятой технологии, состав смеси был выбран Ne (72 %) Ar (28 %), а давления смеси — 80, 100 и 120 торр.

Ячейки испытывались в полуоткрытом латунном термостате, без экранировки магнитного поля Земли, установленном в макет квантового стандарта частоты так, что направление линий магнитного поля Земли отклонялось от направления луча лазера с круговой поляризацией примерно на 50°. В этом случае расщепление вершины КПН-резонанса магнитным полем Земли не проявлялось и не мешало исследованиям.

Выходная частота макета квантового стандарта сравнивалась анализатором фазовых шумов фирмы Symmetricom 5125A с выходным сигналом рубидиевого стандарта частоты FE5680A. Температура термостата ячейки определялась по сопротивлению терморезистора и автоматически регулировалась контроллером, входящим в состав макета.

Схема макета квантового стандарта частоты в целом совпадала с обычной [1], однако в проводимом эксперименте цепь регулирования длины волны лазера с её подстройкой к пику пропускания ячейки отключалась. Вместо этого контроллер обеспечивал медленное сканирование длиной волны лазера на том участке длин волн, где выражено проявляется КПН-резонанс.

Линза на лазер не устанавливалась, нейтральные ослабляющие светофильтры не использовались. Вместо этого использовалась диафрагма, диаметром 1 мм, расположенная перед ячейкой, а её освещённость регулировалась расстоянием лазера до этой диафрагмы. Схема эксперимента с расстояниями между элементами приведена на рис. 1.

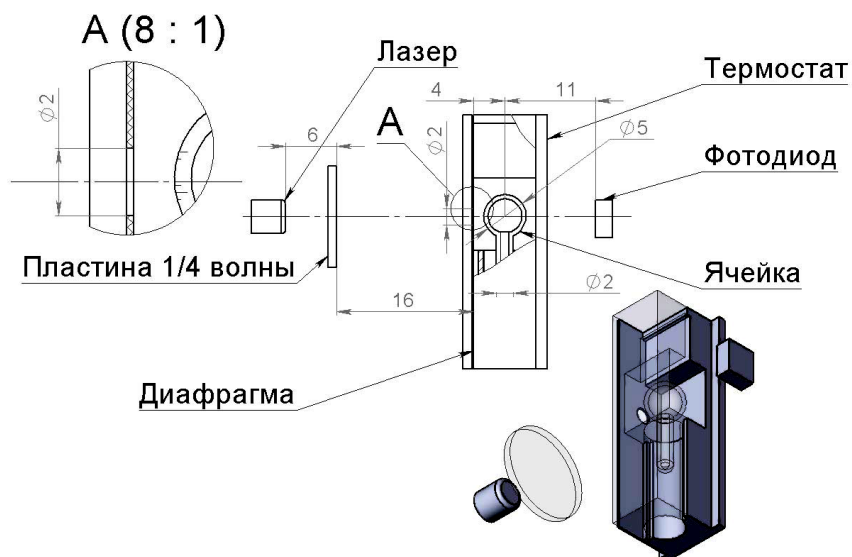


Рис. 1. Схема эксперимента

Ячейка, произведённая по «технологии № 2»

Во ФГУП «ВНИИФТРИ» имеются разные технологии производства квантовых ячеек, в том числе и традиционная технология, при производстве ячеек с парами Rb^{87} или Cs (восстановлением $RbCl$ до Rb , либо $CsCl$ до Cs металлическим кальцием в вакууме).

Для производства использованной в настоящем эксперименте экспериментальной ячейки с парами Cs использовалась иная технология.

Металлический цезий не восстанавливался кальцием в вакууме из хлористого цезия, вместо этого использовался готовый металлический Cs .

Маленькая цилиндрическая стеклянная ампула с дозой цезия (масса Cs 10 мг) вскрывалась одним своим концом прямо на воздухе с помощью шлифовальной шкурки, а потом быстро закидывалась в стеклянную трубку, в которой после этого создавался вакуум. Затем трубку продували несколько раз аргоном и снова создавали вакуум, ампулу подогревали, трубку встряхивали, жидкий металлический цезий высокой чистоты вылетал из ампулы и попадал в длинный капилляр заготовки ячейки.

После этого огнём горелки цезий перегоняли в заготовку ячейки, а длинный капилляр укорачивали. Такой (открытый для критики) способ был ранее опробован многократно, и изготовленные таким образом ячейки обычно давали удовлетворительные результаты (при незначительной доле брака).

Эксперименты проводились с ячейкой, изготовленной из капилляра стекла марки ХС-1, внешним диаметром 2 мм, длиной 90 мм, с выдутой на конце сферой диаметром 5 мм. В заготовку был помещён металлический Cs, и буферный газ составом Ne (87 %) Ar (13 %) с давлением 100 торр, причём Cs был отогнан в оставшийся от капилляра штендель длиной 10 мм.

При исследованиях был использован анализатор фазовых шумов Microchip 53100A, а опорная частота подавалась от водородного генератора.

Результаты

Ячейки, произведённые по «технологии № 1»

На рис. 2 показан спектр пропускания ячейки в зависимости от отклонения частоты лазера (МГц) от наблюдаемого пика поглощения. При этом, как обычно для стандартов частоты на эффекте квантового пленения населённостей (КПН), луч лазера модулировался СВЧ-сигналом с частотой 4,596 ГГц (половина частоты микроволнового перехода) и спектр лазера расщеплялся на несколько компонент. При этом, разумеется, изменялся и наблюдаемый спектр пропускания ячейки с Cs.

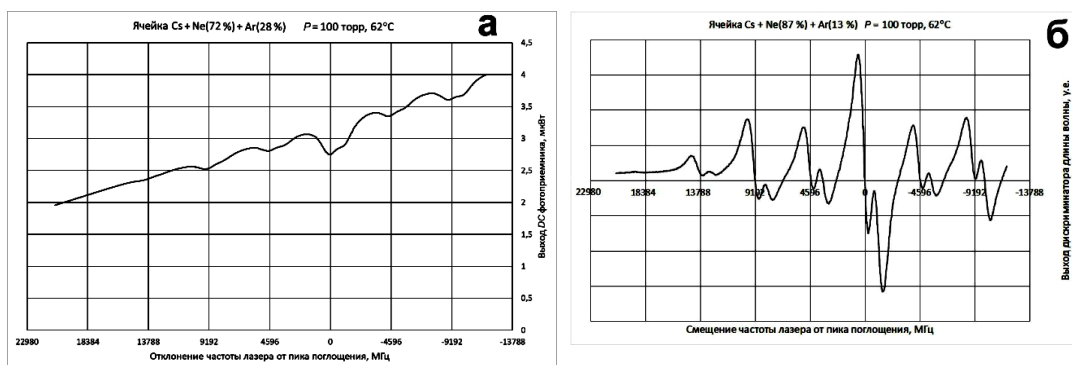


Рис. 2. Спектр пропускания ячейки в зависимости от отклонения частоты лазера (МГц) от наблюдаемого пика поглощения (а) и соответствующий спектру выход дискриминатора длины волны (б). По вертикальной оси (а) показана попадающая на фотодиод мощность

На рис. 3 для температуры ячейки 60° С дана зависимость выходной частоты стандарта от длины волны лазера (растущая вблизи рабочей точки для давления смеси газов 120 торр и падающая для давления 100 и 80 торр).

При этом под рабочей точкой (рабочей длиной волны) понимается длина волны, соответствующая пику в спектре пропускания ячейки и, соответственно, нулю дискриминатора длины волны. Дискриминатор длины волны вычислялся путём синхронного детектирования частоты 12 кГц, с которой (в малых пределах) модулировался ток лазера и в результате модулировалась длина волны. Дискриминатор частоты при этом был устроен аналогично, с частотой 10 кГц проводилась частотная модуляция СВЧ-генератора, сигнал которого преобразовывал спектр лазерного диода.

На графиках рис. 3 цепь обратной связи подстройки выходной частоты макета к КПН-резонансу ячейки была замкнута, но цепь подстройки длины волны лазера к пику поглощения была отключена. Это позволило найти зависимость относительного отклонения выходной частоты от длины волны при её медленном сканировании.

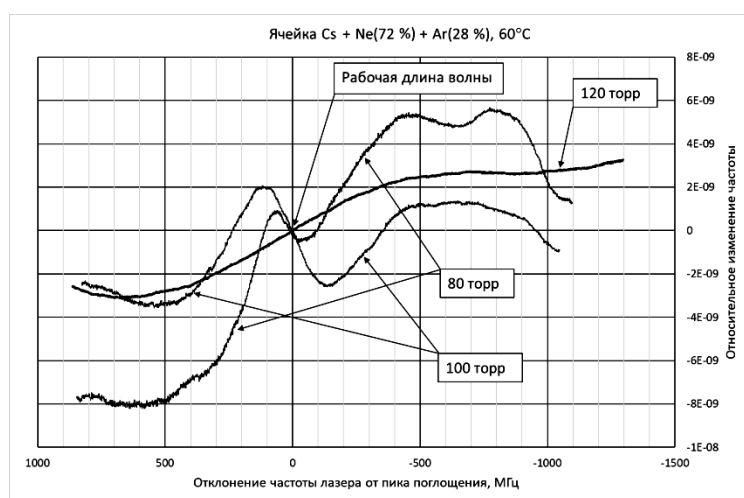


Рис. 3. Зависимость частоты макета от длины волны (частоты) лазера. Вблизи рабочей длины волны график частоты падающий для давления 100 торр и растущий для давления 120 торр

На рис. 4 приведена температурная зависимость относительного изменения частоты ячеек. Она не совсем соответствует «заказанному» составу смеси газов Ne (72 %) Ar (28 %) и более близка к поведению состава Ne (66,2 %) Ar (33,8 %). Для такого состава смеси экспериментальные данные соответствуют табличным параметрам для Ne и Ar с точностью не хуже 0,5 % при использовании табличных коэффициентов [2].

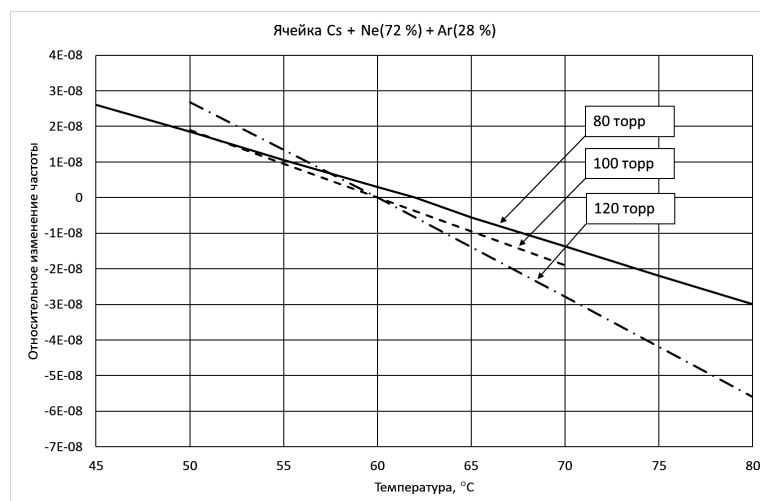


Рис. 4. Зависимость относительного изменения частоты от температуры ячейки

Сдвиг выходной частоты 10 МГц макета для этих трёх ячеек равнялся $0,352 \pm 0,005$ Гц/торр, что для частоты микроволнового перехода 9,2 ГГц соответствует 323 Гц/торр, а не 389 Гц/торр, и это указывает на то, что давления смеси газов в ячейках составляло 83 % от номинальных величин, указанных в их паспортах. Такое отличие реального давления смеси газов в ячейках от планируемого отмечают многие исследователи. Это происходит из-за нагрева газа при отпайке ячейки в случае, если ячейка недостаточно изолирована от горелки и отсутствует теплоотвод и стабилизация температуры стекла ячейки. При расчётах сдвига частоты буферным газом использовались данные таблиц [2].

Таким образом, вывод состоит в том, что для ячеек, произведённых по «технологии № 1», однородных с испытанными, с тем же составом смеси газов, должно существовать давление, большее, чем 100 торр, и меньшее, чем 120 торр, при котором вблизи рабочей длины волны зависимость выходной частоты стандарта от длины волны лазера существенно уменьшится. На рис. 5 показан модельный график, полученный путём линейной интерполяции между графиками для давлений 100 и 120 торр. Таким образом, предположительно, ячейка с такой смесью газов и давлением 115,6 торр покажет зону независимости выходной частоты стандарта от длины волны лазера, что может повысить точность работы стандарта.

Состав смеси газов в исследованных ячейках был выбран не совсем удачным (слишком много Ar) и для дальнейших экспериментов может быть откорректирован.

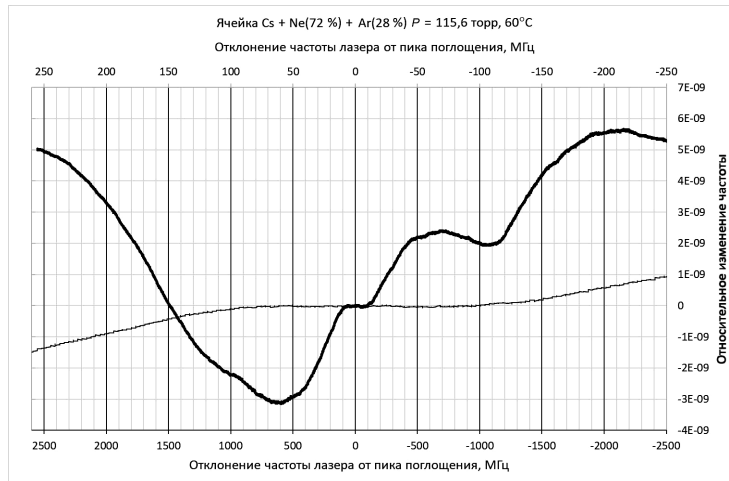


Рис. 5. Зависимость частоты макета от длины волны (частоты) лазера. Линейная интерполяция между графиками для ячеек с давлением 100 и 120 торр. Горизонтальная ось для жирной линии находится снизу, для тонкой — сверху

Ячейка, произведённая по «технологии № 2»

На графиках рис. 6 цепь обратной связи подстройки выходной частоты макета к КПН-резонансу ячейки была замкнута, а цепь подстройки длины волны лазера к пику поглощения была отключена, как и делалось ранее при исследовании ячеек, произведённых по «технологии № 1». Ячейка была помещена в термостат, одновременно являющийся двойным магнитным экраном, выполненным из пермаллоя и имеющим внутри катушки, задающие необходимое магнитное поле.

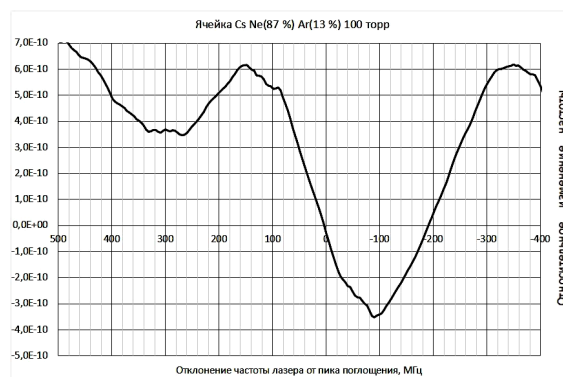


Рис. 6. Зависимость частоты макета от длины волны (частоты) лазера

В отличие от применяемых другими исследователями схем, ток лазера дополнительно изменялся с частотой 500 Гц, при этом в «нечётную» миллисекунду частота лазера отличалась от частоты «чётной» миллисекунды примерно на 120 МГц. Для этих пар миллисекундных интервалов определялось раздельно значение квантового дискриминатора частоты. Полусумма таких значений использовалась для подстройки частоты кварцевого генератора, а разность значений использовалась для смещения рабочей длины волны (примерно на -100 МГц). Разность этих значений и создавала новый «перекрёстный» дискриминатор, дающий дополнительную информацию для управления стандартом.

Практически рабочая длина волны стабилизировалась по «обычному» дискриминатору, вычисляемому при синхронном детектировании частоты модуляции тока лазера 12 кГц. Однако порог сравнения отличался он нуля на величину, вырабатываемую при усреднении синхронного детектирования частоты 500 Гц, как описано выше. Такая комбинация позволяет пренебречь шумами синхронного детектора с частотой 500 Гц за счёт возможности его фильтрации по частоте, так как положение пика (минимума) на рис. 6 вблизи смещения « -100 МГц» изменяется весьма медленно.

За счёт использования такого алгоритма получена долговременная стабильность при испытаниях макета в шкафу стабильных внешних условий, результат приведён на рис. 7.

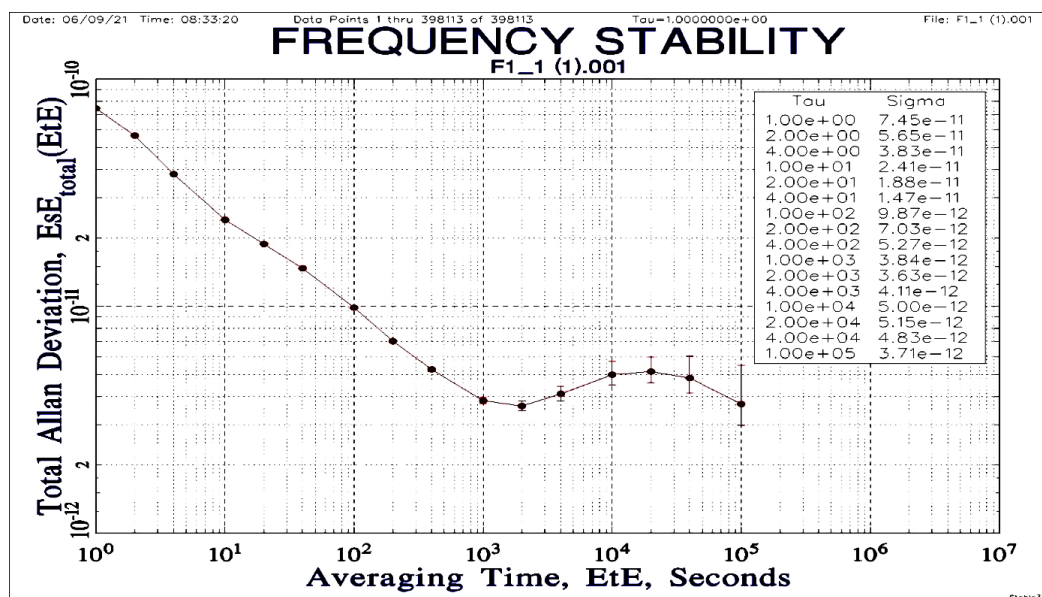


Рис. 7. Девиация Аллана (СКДО)

Обращаем внимание, что в этом эксперименте использована сферическая ячейка из стекла ХС-1 с Cs и смесью буферных газов Ne (87 %) Ar (13 %) с суммарным давлением 100 торр, произведённая во ФГУП «ВНИИФРИ» по вышеописанной оригинальной технологии.

Важно отметить, что как для стабилизации частоты, так и для стабилизации длины волны лазера при этом использовалась одна и та же фаза при синхронном детектировании частоты 10 кГц (модулирующей СВЧ-генератор).

Возможность стабилизации длины волны лазера на другом пике (на максимуме) частоты макета, показанном на рис. 6 при смещении частоты лазера примерно на + 150 МГц, также позволяет существенно улучшить стабильность работы макета квантового дискриминатора частоты с ячейкой, произведённой по «технологии № 2», особенно на интервале 100 секунд, но не даёт такую высокую долговременную стабильность.

Обсуждение

Представляется важной показанная выше возможность увеличения количества управляющих параметров в стандарте частоты путём представления параметра в виде суммы частей, каждая из которых управляется по своему собственному алгоритму. Это позволяет повысить точность настройки прибора. В частности, новый «перекрёстный» дискриминатор, рассмотренный выше, позволяет улучшить долговременную стабильность. Для сравнения отметим, что при обычном режиме работы на длине волны, совпадающей с пиком поглощения ячейки, девиация Аллана (СКДО) на интервалах времени, больших 15 000 секунд, превышала уровень $1 \cdot 10^{-11}$, показывала дальнейший дрейф.

Окончательный вывод по возможности изготовления ячеек с уменьшенной зависимостью частоты КПН-резонанса от длины волны лазера (согласно рис. 5) пока делать рано, однако графики на рис. 3, 5 и 6 представляются не только весьма важными, но и имеющими научную новизну.

Представляется интересным провести подобные исследования также для ячеек с антирелаксационным покрытием без буферного газа и с буферным газом.

Список литературы

1. Knappe Svenja MEMS Atomic Clocks // Comprehensive Microsystems / Yogesh B. Gianchandani, Osamu Tabata, Hans Zappe. — Elsevier Science, 2007. — V. 3. — P. 571–612.
2. Kozlova O., Guérandel S., de Clercq E. Temperature and pressure shift of the Cs clock transition in the presence of buffer gases: Ne, N₂, Ar // Physical review. — 2011. — A 83. — 062714. — P. 9.

Статья поступила в редакцию: 08.07.2021 г.

Статья прошла рецензирование: 09.07.2021 г.

Статья принята в работу: 12.07.2021 г.