

Принцип работы и устройство рубидиевого стандарта частоты

Начальник отдела ЗАО «РУКНАР», к.т.н. Пузанов С.Л.

Рубидиевый стандарт частоты (РСЧ) относится к квантовым стандартам частоты пассивного типа. Принцип действия РСЧ основан на стабилизации частоты кварцевого (КГ) генератора по узкой спектральной линии радиочастотного резонанса в оптически ориентированных атомах Rb^{87} . Схема стабилизации включает элемент, называемый квантовым дискриминатором (КД), который создает сигнал ошибки S , зависящий от отклонения $\delta\gamma = \gamma_s - \gamma_0$ частоты КГ γ_s от номинального значения частоты γ_0 . Этот сигнал S воздействует на управляющий элемент в КГ для изменения его частоты с целью минимизации отклонения $\delta\gamma$. Квантовым дискриминатором служит устройство, осуществляющее оптическую ориентацию атомов Rb^{87} и регистрацию резонансного (эталонного) перехода в них. В качестве эталонного перехода в РСЧ используется квантовый переход в сверхтонкой структуре атома Rb^{87} , а именно 0 - 0 переход между подуровнями сверхтонкой структуры основного состояния ($5^2S_{1/2}$ ($F=1, m_F=0$) \leftrightarrow $5^2S_{1/2}$ ($F=2, m_F=0$)), который не зависит от электрического поля и при слабых магнитных полях в первом приближении не зависит от магнитного поля.

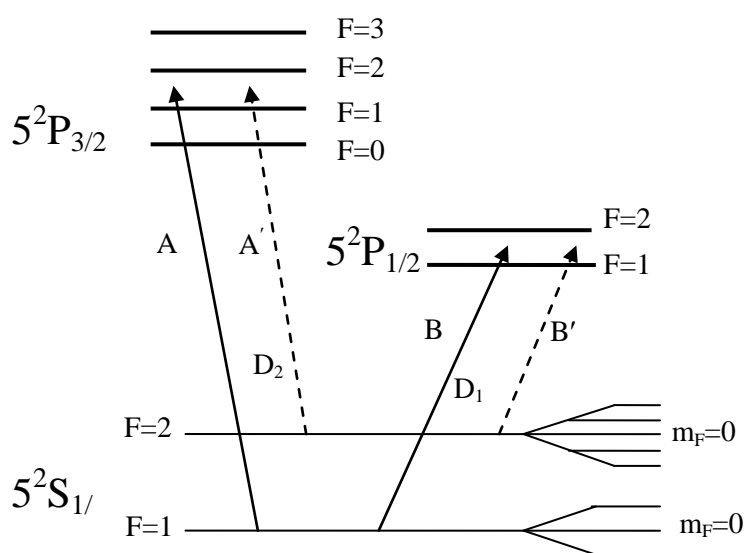


Рисунок 1 – Упрощенная схема уровней изотопа атома Rb^{87} .

На рис. 1 изображена сверхтонкая структура основного и первого возбужденного состояний изотопа атома Rb^{87} . Возбужденные состояния $5^2P_{1/2}$ и $5^2P_{3/2}$ связаны с расщепленным нижним уровнем разрешенными оптическими переходами, называемыми D1 ($\lambda=795$ нм) и D2 ($\lambda=780$ нм) резонансными линиями. Эти линии состоят из сверхтонких компонент A, A' и B, B', соответственно.

Работа КД, блок-схема которого приведена на рис. 2, основана на явлении оптической накачки и двойного радиооптического резонанса, впервые предложенных А. Кастлером и Д. Бросселем.

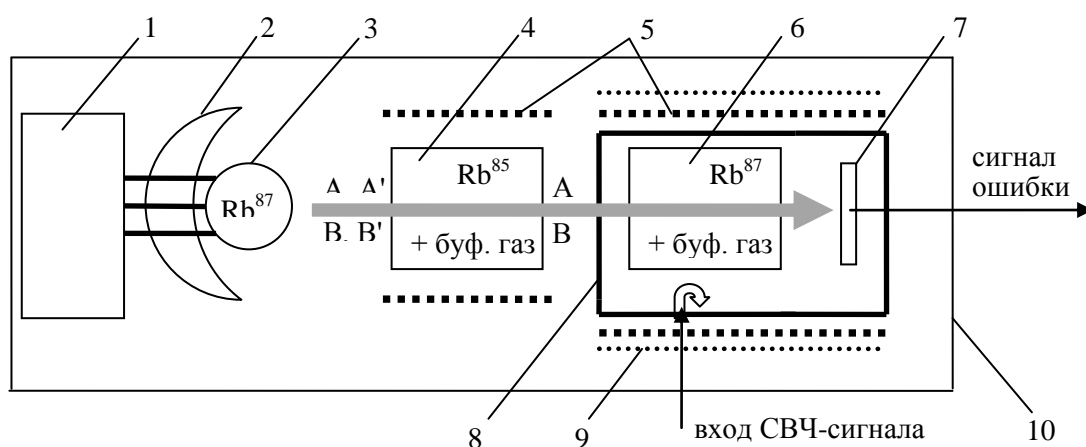


Рисунок 2 – Блок-схема рубидиевого квантового дискриминатора.

1 – ВЧ генератор, 2 – отражатель, 3 – спектральная лампа, 4 – ячейка-фильтр, 5 – система термостатирования, 6 – ячейка поглощения, 7 – фотопреобразователь, 8 – СВЧ резонатор, 9 – система подмагничивания, 10 – магнитный экран.

Принцип работы КД заключается в следующем. Атомы Rb^{87} , помещенные в поглощающую ячейку, облучаются отфильтрованным светом, содержащим в D2 и D1 линиях излучения только компоненты A и B, соответственно. В результате создается инверсная разность населенностей между подуровнями $F = 1$ и $F = 2$ основного состояния $5^2S_{1/2}$ – все атомы Rb^{87} оказываются накачены в состояние с $F = 2$, и поглощающая ячейка становится прозрачной для отфильтрованного света, мощность которого измеряется фотодетектором. Одновременно с оптическим излучением на атомы Rb^{87} воздействует микроволновое излучение (связанное по частоте с частотой КГ), при настройке частоты которого в резонанс с частотой эталонного перехода $F = 1, m_F = 0 \leftrightarrow F = 2, m_F = 0$ населенность подуровней $F = 1$ и $F = 2$ перераспределяется и возрастает поглощение проходящего света, что фиксируется фотодетектором. Таким образом, изменение поглощения проходящего света, фиксируемое фотодетектором, выступает как функция отстройки частоты микроволнового поля (умноженной частоты КГ) от частоты эталонного перехода. Система автоматической подстройки частоты (АПЧ) РСЧ использует это свойство для подстройки частоты КГ γ_s к номинальному значению частоты γ_0 .

Рассмотрим конструктивные особенности рубидиевого квантового дискриминатора. Спектральная лампа изготавливается из стекла, устойчивого к воздействию щелочных металлов (к которым принадлежит Rb), и содержит около 1 мг изотопа Rb^{87} или смеси

изотопов Rb^{87} и Rb^{85} и инертный газ (например, Kr или Ar) с давлением $\sim 10^2$ Па. Введение инертного газа необходимо для создания высокочастотного разряда Е- или Н- типа, в зависимости от модификации лампы. Разряд создается высокочастотным генератором мощностью $\sim 0,5$ Вт и частотой (50–100) МГц. Рабочая температура лампы выбирается в диапазоне от 120 до 140 °С.

Ячейка-фильтр наполняется изотопом Rb^{85} и инертным газом (например, Ar) при давлении $\sim 10^4$ Па. Инертный газ служит для согласования положения линии поглощения со спектром лампы накачки (для оптимальной фильтрации и минимизации светового сдвига).

Ячейка поглощения содержит изотоп Rb^{87} (~ 1 мг) и инертный газ ($\sim 10^3$ Па). Инертный газ необходим в силу ряда причин, главной из которых является улучшение эффективности оптической накачки. Процесс оптической накачки, в результате которого все атомы оказываются в возбужденном состоянии с $F=2$, может происходить только в случае отсутствия релаксации атомов на соседние магнитные подуровни. Однако в отсутствие инертного газа столкновения атомов между собой и со стенками ячейки приводит к быстрой релаксации атомов из данного состояния, в результате чего эффективность оптической накачки оказывается низкой. Инертный газ выполняет роль буфера между атомами Rb^{87} и стенками ячейки. Атомы инертных газов (в дальнейшем – буферных газов) диамагнитны, поэтому столкновения между атомами Rb^{87} и буферного газа не вызывает дезориентации магнитных моментов первых. Добавление буферного газа приводит к столкновениям атомов Rb^{87} с атомами и молекулами буферного газа, в результате чего частота столкновений атомов Rb^{87} со стенками ячейки уменьшается и тем самым увеличивается время релаксации.

Буферный газ не только увеличивает эффективность оптической накачки, но и смещает частоту эталонного перехода. Легкие газы (He , Ne , N_2) вызывают положительный сдвиг частоты, тяжелые (Ar , Kr , Xe) – отрицательный. Сдвиг частоты эталонного перехода зависит от давления и температуры буферного газа и растет с их увеличением. Для уменьшения температурных сдвигов частоты используют смесь газов, дающих смещение частоты разных знаков, например KrN_2 .

Ячейка поглощения размещается в цилиндрическом микроволновом резонаторе, работающем на TE_{011} или TE_{111} типах колебания, выбор которого определяет размеры КД и размеры РСЧ в целом. В торце резонатора имеется отверстие для пропускания сфокусированного отражателем света от спектральной лампы к фотопреобразователю.

Резонатор с ячейкой поглощения и ячейка-фильтр размещены в термостате, поддерживающем температуру оптических элементов (плотности паров Rb и температуры буферного газа) на уровне (70–75) °С с точностью $\sim 0,01$ °С.

С помощью обмотки подмагничивания создается слабое магнитное поле для отстройки эталонного перехода от остальных (рис.1). Ячейка поглощения экранируется от воздействия внешних магнитных полей магнитным экраном.

Упрощённая блок-схема, приведенная на рис. 3, поясняет принцип действия РСЧ. Сигнал кварцевого генератора частотой 10 МГц поступает в высокочастотную часть системы автоматической подстройки частоты, где происходит его низкочастотная фазовая модуляция, умножение до частоты 60 МГц и смешивание с сигналом синтезатора частоты $f_{\text{синт}}$.

Сигнал с частотой $(60 \text{ МГц} \pm f_{\text{синт}})$ поступает в квантовый дискриминатор, где происходит дальнейшее умножение частоты до значения $f_{\text{умн}}$, близкого к частоте f_0 линии резонансного перехода атомов Rb^{87} . При совпадении умноженной частоты кварцевого генератора $f_{\text{умн}}$ с частотой атомного перехода f_0 в дискриминаторе выделяется сигнал ошибки $U(t)$ с частотой, кратной частоте фазовой модуляции. Напряжение первой гармоники сигнала ошибки $U_{\Omega}(t)$ пропорционально величине расстройки частот $(f_{\text{умн}} - f_0)$, а фаза несет информацию о знаке разности $(f_{\text{умн}} - f_0)$.

Сигнал ошибки из квантового дискриминатора $U_{\Omega}(t)$ поступает в низкочастотную часть системы автоматической подстройки частоты, где формируется напряжение $U_{\text{упр}}$, управляющее частотой кварцевого генератора. В режиме подстройки частота кварцевого генератора такова, что $f_{\text{умн}} \approx f_0$, напряжение $U_{\Omega}(t)$ минимально, а напряжение второй гармоники сигнала ошибки $U_{2\Omega}(t)$ максимально.

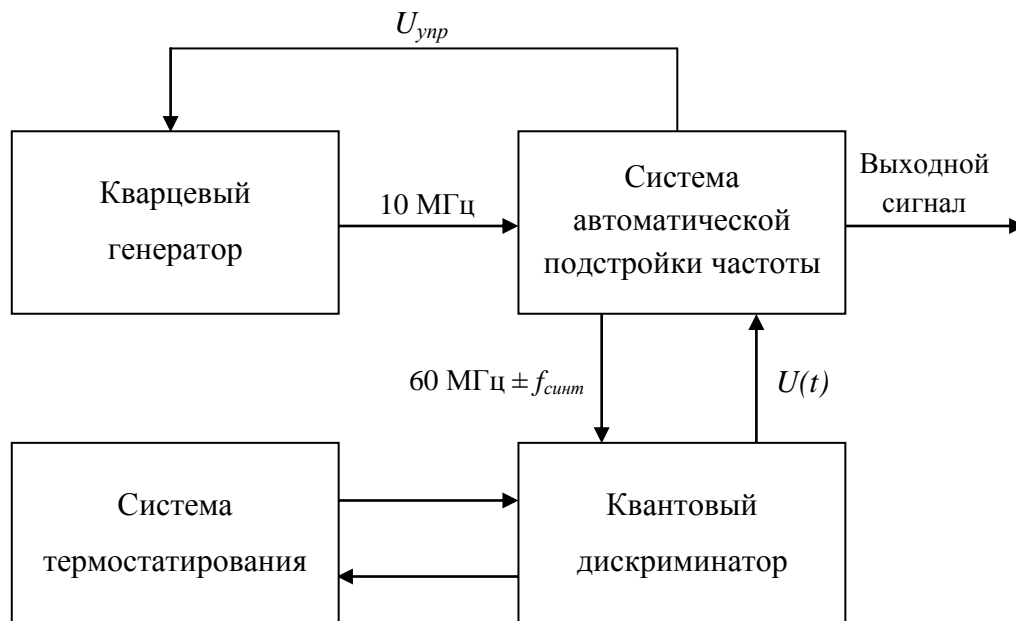


Рисунок 3 – Блок-схема рубидиевого стандарта частоты.

Основной характеристикой рубидиевого стандарта частоты является стабильность частоты выходного сигнала. Физические процессы, протекающие в РСЧ, в настоящее время достаточно изучены, следствием чего стало понимание причин, приводящих к нестабильности частоты выходного сигнала. Метрологические характеристики РСЧ в кратковременной области за времена усреднения $\tau \sim (1-100)$ с определяются величиной сигнала атомного резонанса, уровнем шума в системе регистрации сигнала и добротностью резонансной линии, в долговременной области при $\tau > 1000$ с – сдвигами частоты резонансной линии. Все перечисленные параметры зависят, в свою очередь, от состава и парциального давления компонентов наполнения (буферного газа и паров Rb) оптических элементов, а также от параметров микроволнового излучения. В предельном случае (в предположении, что основным шумовым процессом при регистрации сигнала двойного радиооптического резонанса является дробовой ток фотопреобразователя) за короткие времена (1 с – 1000 с) стабильность частоты выходного сигнала определяется отношением сигнал/шум к добротности резонансной линии. Теоретически подсчитано, что при оптимальных условиях формирования и регистрации сигнала атомного резонанса дисперсия Алана (параметр, характеризующий нестабильность частоты выходного сигнала за короткие времена) может достигать предельного значения $\sigma(\tau) \sim 1,4 \cdot 10^{-12} / \sqrt{\tau}$. Реальное значение нестабильности частоты РСЧ в зависимости от конкретной модификации прибора составляет $\sim (4 \cdot 10^{-12} - 3 \cdot 10^{-11}) / \sqrt{\tau}$ за времена усреднения $\tau = (1-1000)$ с.

Долговременная нестабильность частоты определяется дрейфом и уходами частоты эталонного перехода. В процессе работы РСЧ состав и парциальные давления компонентов наполнения оптических элементов медленно изменяются (диффузия внутри стенок ячеек, натекание газов извне и т.п.), что приводит (в том числе за счет изменения фильтрации излучения и через световой сдвиг) к сдвигу частоты эталонного перехода. Значения данных параметров могут изменяться под влиянием изменений температуры окружающей среды и атмосферного давления, что также приводит к периодическим уходам частоты эталонного перехода. В результате проявления описанных выше процессов в зависимости от конкретной модификации прибора может происходить относительное систематическое изменение частоты выходного сигнала РСЧ со скоростью $\sim 6 \cdot 10^{-12} - 5 \cdot 10^{-11}$ в месяц.