

ЧАСТОТНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДОБРОТНОСТИ ОБЪЕМНЫХ СВЧ-РЕЗОНАТОРОВ

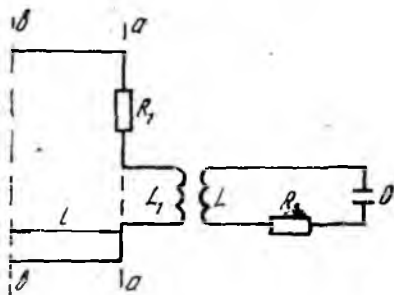
Среди методов измерения добротности СВЧ-резонаторов широкое распространение получили методы [1], основанные на измерении частотной зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению $K_{стВ}$. Они обладают достаточно высокой точностью, однако требуют больших затрат времени на проведение измерений с целью построения полной частотной зависимости $K_{стВ}$ и определения полосы пропускания на половинном уровне мощности. Кроме того, применение их неэффективно в случае температурной нестабильности резонаторов.

В работе предлагается модификация частотного метода измерения добротности $Q_{нен}$, учитывающая активные R_1 и реактивные X_1 потери в устройстве связи, позволяющая сократить число измерений, автоматизировать процесс обработки результатов. Определение добротности сводится к измерению коэффициентов стоячей волны на резонансной частоте и двух произвольных расстройках и к решению системы трех алгебраических трансцендентных уравнений относительно $Q_{нен}$, R_1 , X_1 .

Резонатор, связанный с передающей линией и включенный на отражение, представляется эквивалентной схемой (рисунок), L_1 представляет индуктивность элемента связи, а сопротивление R_1 характеризует его активные потери, при этом можно отвлечься от истинной причины потерь.

В произвольном сечении $a-a$ полное сопротивление передающей линии

$$\frac{Z_{aa}}{Z_0} = \frac{R_1 + iX_1}{Z_0} + \frac{\beta_1}{1 + i2Q_{нен}\delta_i}, \quad (1)$$



где $\beta_1 = \frac{\omega M}{R_S Z_0}$ — отношение вносимого активного сопротивления к активному сопротивлению резонатора; $\delta_i = \frac{\omega_i - \omega_0}{\omega_0}$ — относительная расстройка резонатора; $Q_{\text{нен}}$ — ненагруженная добротность; Z_0 — волновое сопротивление передающей линии.

Можно подобрать такую опорную плоскость $b - b$, в которой реактивное сопротивление всей системы равно нулю:

$$\frac{Z_{\text{вв}}}{Z_0} = (R_1 + Q_1)(B - A \operatorname{tg} \gamma l) / Z_n + i [AB - (R_1 + Q_1)^2 \operatorname{tg} \gamma l] / Z_n, \quad (2)$$

где γ — постоянная распространения в линии; l — расстояние между сечениями $a - a$ и $b - b$:

$$\begin{aligned} A &= X_1 - Q_2 + Z_0 \operatorname{tg} \gamma l; & Q_2 &= 2Q_{\text{нен}} \delta_i Q_1, & Q_1 &= \beta_1 Z_0 / Q; \\ B &= Z_0 - (X_1 - Q_2) \operatorname{tg} \gamma l; & Q &= 1 + 4Q_{\text{нен}}^2 \delta_i^2; \\ Z_n &= B^2 + (R_1 + Q_1)^2 \operatorname{tg}^2 \gamma l. \end{aligned}$$

Такой опорной плоскостью является положение узла при расстройке. Выражение (2) определяет полное сопротивление, справедливое для любой δ_i (частоты). Обращение в нуль реактивного сопротивления дает возможность найти $\operatorname{tg} \gamma l$ и исключить в явном виде зависимость активного сопротивления от γl , а следовательно, и освободиться от конкретного выбора точки отсчета.

$$\text{Уравнение} \quad AB - (R_1 + Q_1)^2 \operatorname{tg}^2 \gamma l = 0 \quad (3)$$

является квадратичным относительно $\operatorname{tg} \gamma l$,

$$(\operatorname{tg} \gamma l)_{1,2} = \frac{K}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{K}{2}\right)^2 - 1}, \quad (4)$$

$$\text{где} \quad K = \frac{Z_0^2 - (X_1 - Q_2)^2 - (R_1 + Q_1)^2}{(X_1 - Q_2)}.$$

Решение со знаком (+) удовлетворяет уравнению (3) при $\beta_1 = 1$. Это означает, что на резонансной частоте в передающей линии отсутствуют стоячие волны. Поэтому данное решение отбрасываем как несоответствующее физичности эксперимента.

С учетом (4) активное сопротивление в узле при расстройке может быть представлено в виде

$$Z_{\text{вв}} / Z_0 = a / C_0, \quad (5)$$

где $a = Q_R (1 + C^2)$; $Q_R = (R_1 + Q_1) / Z_0$;

$$C = \frac{K}{2} - \sqrt{(K/2)^2 - 1}; \quad C_0 = [1 + (X_1 Z_0 - Q_2) C]^2 + Q_R^2 C^2.$$

В точке минимума напряжения $Z_{\text{вв}} / Z_0$ связано с $K_{\text{ст}U}$ в передающей линии соотношением

$$a / C_0 = 1 / K_{\text{ст}U}, \quad (6)$$

которое и описывает частотную зависимость $K_{\text{ст}U}$ с добротностью резонатора, активным и реактивным сопротивлениями элемента связи.

Уравнение (6) содержит три неизвестных параметра $Q_{\text{нен}}$, R_1 и X_1 . Для их нахождения решается система трех нелинейных алгебраических уравнений вида (6), соответствующих трем произвольно измеренным точкам на частотной характеристике $K_{\text{стУ}}$ резонатора. Причем одна из них должна быть точкой резонанса. В этой точке экспериментально определяется коэффициент связи β резонатора с передающей линией

$$\beta_1 = \left(\beta - \frac{R_1}{Z_0} \right) \left[1 + \left(\frac{X_1}{Z_0} \right)^2 \right],$$

что исключает в уравнении (6) зависимость от β_1 . Если не учитывать реактивное сопротивление элемента связи, то полученная система нелинейных алгебраических уравнений трансформируется в уравнение, лежащее в основе трудоемкой методики определения добротности резонатора путем измерения полосы частот на половинном уровне мощности.

Результаты проведенных исследований приведены в таблице.

Расстройки выбранных точек	$\frac{R_1}{Z_0}$	$\frac{Y_1}{Z_0}$	$Q_{\text{нен}}$
$-1,853 \cdot 10^{-5}$ $1,547 \cdot 10^{-5}$ Половинный уровень мощности	—	—	29400
0 $0,437 \cdot 10^{-5}$ $0,967 \cdot 10^{-5}$	0,037	0,95	29820
0 $0,437 \cdot 10^{-5}$ $1,395 \cdot 10^{-5}$	0,0377	0,967	29800
0 $0,967 \cdot 10^{-5}$ $1,395 \cdot 10^{-5}$	0,038	0,97	29710
0 $0,547 \cdot 10^{-5}$ $1,701 \cdot 10^{-5}$	0,0384	0,981	29910
0 $0,437 \cdot 10^{-5}$ $-0,437 \cdot 10^{-5}$	0,036	0,946	29615
0 $-0,437 \cdot 10^{-5}$ $-0,967 \cdot 10^{-5}$	0,0375	0,96	29760
0 $-0,967 \cdot 10^{-5}$ $-1,812 \cdot 10^{-5}$	0,038	0,959	29860

Обработка результатов измерений проводилась на ЭВМ ЕС—1022 с использованием подпрограммы расчета системы нелинейных алгебраических уравнений [2]. Приводятся данные измерения добротности медного резонатора, возбужденного на колебаниях H_{011} в сантиметровом диапазоне длин волн.

Анализ полученных данных показывает, что стабильные параметры имеют место, когда две произвольно выбранные точки располагаются вблизи положения резонанса. При больших расстройках расхождение в результатах, по-видимому, объясняется зависимостью R_1 и X_1 от частоты.

Можно предположить, что погрешность измерения параметров объемных СВЧ-резонаторов указанным методом будет одного порядка с другими частотными методами.

Список литературы: 1. Гинзтон Э. Л. Измерения на сантиметровых волнах. М., 1960. 620 с. 2. Powell M. J. A FORTRAN subroutine for solving systems of non-linear algebraic equation // Numerical methods for non-linear algebraic equations. Gordon and Breach. 1970. P. 115—161.

Поступила в редколлегию 22.06.88

УДК 535.33.07/08

Н. Д. КОЛПАКОВ, д-р техн. наук, Д. К. СЕДЫХ,
Ю. А. ФЕСЕНКО, канд. техн. наук

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФОТОЭМИССИОННОГО СПЕКТРОМЕТРА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЛИНЕЙЧАТОГО СПЕКТРА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Эффективную диагностику возбужденной среды можно осуществить по рентгеновским спектрам излучения [1]. Важнейшая информация о среде может быть получена по измерению параметров линий излучения: интенсивности, положению на оси частот, полуширине. Среди известных приборов для измерения рентгеновского спектра излучения привлекает внимание фотоэлектронный спектрометр (ФЭС) [2], основанный на преобразовании спектра излучения $I(h\nu)$ в энергетическое распределение электронов $n(\epsilon)$, измерение этого распределения и вычисления $I(h\nu)$ по $n(\epsilon)$.

По сравнению с другими этот прибор имеет хорошее спектральное разрешение линий $\Delta h\nu_i$, малоинерционен и позволяет производить исследования в широком диапазоне частот, в том числе и в вакуумном ультрафиолете и мягком рентгене. Прибор удобен в эксплуатации, не требует глубокого охлаждения, легко согласуется с ЭВМ. Недостатком является неоднозначность между исследуемым спектром излучения и выходным сигналом ФЭС из-за специфики преобразования сигнала.

Произведен анализ преобразования сигнала в структурных звеньях измерительного тракта ФЭС и определены причины появления искажений и помех в выходном сигнале, выработаны рекомендации по методике измерения спектра и выделения полезного сигнала.