

УДК 538.574.6

**РАСЧЕТ ДОБРОТНОСТИ ОТКРЫТОГО РЕЗОНАТОРА  
С МНОГОСЛОЙНОЙ СТРУКТУРОЙ**

Ю. К. Алексеев, Д. Г. Афонин, А. И. Костиненко

(кафедра радиофизики СВЧ)

Использование открытого резонатора для диагностики веществ основано на зависимости спектра его резонансных частот и добротности от электрических и магнитных свойств исследуемого материала. В данной работе получено выражение для добротности открытого резонатора с плоскостной структурой, расположенной перпендикулярно его оси (см. рисунок). Для этой цели был использован метод суперпозиции волн [1].

Поле основной моды, бегущей вдоль оси  $z$ , запишем с учетом зависимости от времени в форме  $e^{-i\omega t}$  [2] в виде

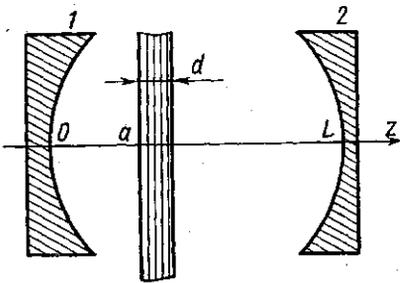
$$u(\rho, z) = A_0 a(\rho, z) \exp[ik(z+z_s) - i\psi(z)],$$

где

$$a(\rho, z) = [1 + \xi^2(z)]^{-1/2} \exp\left[-\rho^2 \left(\frac{1}{w^2(z)} - i \frac{k}{2R(z)}\right)\right],$$

$$\omega(z) = \omega_s [1 + \xi^2(z)]^{1/2}, R(z) = (z + z_s) \left[1 + \frac{1}{\xi^2(z)}\right],$$

$$\psi(z) = \arctg \xi(z), \xi(z) = \frac{2(z+z_s)}{kw_s^2},$$



$A_0$  — амплитуда волны,  $w(z)$  — полуширина пучка в сечении  $z$  или радиус его каустики,  $R(z)$  — радиус кривизны фронта в сечении  $z$ ,  $\omega_s$  — минимальный радиус каустики в сечении  $z = -z_s$ .

Поле в открытом резонаторе в области  $a+d < z < L$  есть суперпозиция волн, бегущих вдоль и против оси  $z$ . Волна, бегущая против оси  $z$ , описывается функцией  $u^*(\rho, z)$ .

Будем полагать, что для высокодобротных систем волны, бегущие вправо и влево в области  $a+d < z < L$ , вблизи резонанса имеют одну и ту же форму, т. е.  $z_s$  и  $\omega_s$  у них одинаковы. Сделанное предположение означает, что поверхность сферического зеркала совпадает с поверхностью равных фаз падающей на него волны и что при расчете добротности резонатора можно пренебрегать энергетическим вкладом волн высших типов, возникающих при отражении рабочей волны от многослойной структуры.

С учетом этих замечаний получаем следующие выражения для коэффициента отражения  $k_1(\rho, z)$  рабочей волны, падающей справа на систему зеркало 1 — слой воздуха толщиной  $a$  — многослойное тело толщиной  $d$  (система «1— $a$ — $d$ »), и для коэффициента отражения  $k_2(\rho, z)$  рабочей волны, падающей слева на зеркало 2:

$$k_1(\rho, z) = r \exp[2ik(z-a-d) + 2i\psi(a+d) - 2i\psi(z) + ik\rho^2/R(z)],$$

$$k_2(\rho, z) = R_2 \exp[2ik(L-z) + 2i\psi(z) - 2i\psi(L) - ik\rho^2/R(z)],$$

где  $r = k_1(0, a+d)$  — коэффициент отражения рабочей волны на оси симметрии в сечении  $z = a+d$ ,  $R_2 = k_2(0, L)$  — коэффициент отражения от 2-го зеркала на оси волны.

Для определенности предположим, что резонатор работает на проход и возбуждается отверстием связи в зеркале 1. В этом случае для слабрезонансной системы «1— $a+d$ » можно считать, что отверстие связи в зеркале 1 возбуждает в области  $a+d < z < L$  рабочую волну с амплитудой  $A_0$ , которая вблизи резонанса достаточно слабо зависит от частоты. Тогда суммарное поле в этой области

$$u(\rho, z) = \frac{A_0 a(\rho, z) \exp[ik(z+z_0) - i\psi(z)] (1 + k_2(\rho, z))}{1 - k_1(\rho, z) k_2(\rho, z)},$$

и выражение для добротности открытого резонатора с телом

$$Q_T = \frac{2\pi n + f_0 \frac{\partial \varphi}{\partial f} - \varphi + 2[\psi(L) - \psi(a+d)] + 2 \left[ \frac{1}{\xi(L) + \frac{1}{\xi(L)}} - \frac{1}{\xi(a+d) + \frac{1}{\xi(a+d)}} \right]}{1 - |r|^2 R_2^2}, \quad (1)$$

где  $\varphi = \arg(r)$ .

Учитывая, что

$$n \gg 1, \quad \psi(x) < \frac{\pi}{2}, \quad \frac{1}{\xi(x) + \frac{1}{\xi(x)}} < \frac{1}{2},$$

в числителе (1) можно пренебречь выражениями в квадратных скобках по сравнению с большой величиной  $2\pi n$ . Тогда выражение для добротности открытого резонатора с телом упрощается:

$$Q_T = \frac{2\pi n + f_0 \frac{\partial \varphi}{\partial f} - \varphi}{1 - |r|^2 R_2^2}. \quad (2)$$

В предельном случае, когда диэлектрические и магнитные проницаемости всех слоев стремятся к единице, (2) переходит в известное выражение для добротности пустого резонатора:

$$Q_0 = \frac{2\pi n}{1 - R_1^2 R_2^2},$$

где  $R_1$  — коэффициент отражения от зеркала 1.

Присутствие слагаемого  $f_0 \frac{\partial \varphi}{\partial f} - \varphi$  в числителе (2) обусловлено отличием энергии, запасенной в объеме  $0 < z < a+d$  открытого резонатора с телом, от энергии, запасенной в этом же объеме пустого резонатора. Коэффициент отражения  $|r|^2$ , входящий в выражение для добротности, учитывает дополнительные потери, вносимые в резонатор телом.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Казанцев Ю. Н. Расчет полых резонаторов методом суперпозиции электромагнитных волн.— Радиотехника и электроника, 1959, № 9, с. 1480—1484. [2] Kogelnik H., Li T. Laser beams and resonators.— Appl. Opt., 1966, 5, N 10, p. 1550—1567.

Поступила в редакцию  
22.01.81

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1981, Т. 22, № 6

УДК 621.385.633

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОМЕЖУТКА С ВИРТУАЛЬНЫМ КАТОДОМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОТКРЫТЫХ РЕЗОНАНСНЫХ СИСТЕМ С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

Д. Г. Афонин, А. И. Костиенко

(кафедра радиофизики СВЧ)

Одной из основных характеристик систем с периодическими структурами, формирующих замедленные электромагнитные волны и выполняющих функции систем взаимодействия электронного пучка с электромагнитным полем, является дисперсионная характеристика. Большинство из известных способов получения дисперсионных характеристик замедляющих систем основано на изучении распределения электромагнитного поля вблизи периодических структур и связано с введением в системы инородных механических тел-зондов и пробных тел.

На практике дисперсионные характеристики часто получают при помощи электронного зонда; этот способ основан на экспериментальном анализе взаимодействия электронного пучка, пропускаемого вблизи периодической структуры, с полем пространственных гармоник, и заключается в регистрации усиления (или его отсутствия) выходного высокочастотного сигнала [1]. Такой способ предполагает наличие приемно-анализирующей аппаратуры в исследуемом диапазоне длин волн, он неприемлем для получения дисперсионных характеристик систем, в которых не предусмотрен вывод высокочастотного сигнала.

В данной работе описывается метод получения дисперсионных характеристик систем с периодическими структурами, основанный на способности виртуального катода, созданного в межэлектродном промежутке за системой с периодической структурой, реагировать изменением проходящего на коллектор тока на возмущения, вносимые в электронный пучок электромагнитным полем.

Известно [2, 3], что в системах с периодическими структурами электронный пучок будет возмущаться наиболее эффективно и отклик виртуального катода на эти возмущения будет максимальным, когда скорость электронов в пучке близка к фазовой скорости одной из пространственных гармоник структуры.

Таким образом, для получения дисперсионных характеристик при использовании в качестве анализатора возмущений промежутка с виртуальным катодом необходимо определить ускоряющее электронное напряжение и вычислить скорость электронов, при которой изменение тока в цепи коллектора будет максимальным. Условия синхронизма при этом будут соблюдаться тем точнее, чем меньше плотность тока в пучке и параметры усиления. Оценки показывают, что