

УДК 621.372.812

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ

Афонин И.Л., Лащенко И.В., Саламатин В.В.

Севастопольский национальный технический университет, кафедра радиотехники
Студгородок Стрелецкая балка, г. Севастополь, 99053

E-mail: rt.sevgtu@stel.sebastopol.ua

Представлена методика определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь с помощью высокоточного широкополосного измерителя коэффициента отражения в СВЧ диапазоне.

Измерительно-вычислительный комплекс [1], разработанный на базе интерференционного четырехдетекторного СВЧ-преобразователя с мало зависящими от частоты фазовыми сдвигами между всеми сигналами, поступающими на детекторы, позволяет с высокой точностью в диапазоне частот волновода определять модуль и фазу комплексного коэффициента отражения СВЧ-устройств.

Разработанный комплекс можно применить для измерения отражений от образца исследуемого диэлектрика, расположенного на отрезке волновода и имеющего плоскую грань, перпендикулярную оси волновода. Другой конец образца, выполненный в виде экспоненциального скоса и хорошо согласованный с волноводом, не создает отраженных волн. К отрезку волновода с образцом диэлектрика подсоединяется согласованная поглощающая нагрузка.

Измерив с высокой точностью модуль и фазу коэффициента отражения от плоской границы раздела воздух-диэлектрик, по разработанному алгоритму вычисляют диэлектрическую проницаемость ϵ и тангенс угла

потерь $\text{tg}\delta$, которые однозначно связаны с измеряемыми параметрами. Определение ϵ и $\text{tg}\delta$ производится на всех дискретных частотах рабочей полосы. Результаты представляют на мониторе ЭВМ в числовом и графическом видах.

Поле в прямоугольном волноводе, как известно [2], можно представить суперпозицией плоских однородных волн, называемых парциальными, многократно отраженных от его граничных поверхностей. В общепринятой системе координат вектор Пойнтинга парциальной волны определяется направляющими косинусами $\cos\theta_{x1}$, $\cos\theta_{y1}$, $\cos\theta_{z1}$, сумма квадратов которых равна единице

$$\cos^2 \theta_{x1} + \cos^2 \theta_{y1} + \cos^2 \theta_{z1} = 1.$$

При распространении по волноводу волны типа H_{10} угол $\theta_{y1} = \pi/2$, а угол с осью z (осью волновода)

$$\theta_{z1} = 90^\circ - \theta_{x1}. \quad (1)$$

Волна H_{10} имеет три составляющие электромагнитного поля E_y , H_x , H_z . Вектор напряженности электрического поля перпендикулярен плоскости падения парциальной волны на границу раздела сред воздух-диэлектрик. Коэффициент отражения перпендикулярно поляризованной волны определяется выражением

$$\Gamma_x = \frac{Z_{02} \cos \theta_{z1} - Z_{01} \cos \theta_{z2}}{Z_{02} \cos \theta_{z1} + Z_{01} \cos \theta_{z2}}, \quad (2)$$

где $Z_{01} = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$; Z_{02} – волновое сопротивление диэлектрической среды, равное

$$Z_{02} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon\epsilon_0(1-i\text{tg}\delta)}};$$

θ_{z1} – угол преломления.

Угол падения θ_{z1} связан с углом θ_{x1} , который определяется из соотношения $k \cos \theta_{x1} = \frac{m\pi}{a}$, где $m = 0, 1, 2, \dots$; a – размер широкой стенки волновода.

Для волны H_{10} $m = 1$. Так как волновод заполнен воздухом, то $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ и $\cos \theta_{x1} = \frac{\lambda}{2a}$, где λ – длина волны в свободном пространстве.

В соответствии с (1) $\sin \theta_{z1} = \cos \theta_{x1} = \frac{\lambda}{2a}$, а $\cos \theta_{z1} = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}$.

Значение угла преломления определяется из закона Снеллиуса:

$$\sin \theta_{z2} = \frac{k}{\gamma} \sin \theta_{z1} = \frac{\omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}{\omega \sqrt{\epsilon \epsilon_0 \mu_0}} \cdot \frac{\sin \theta_{z1}}{\sqrt{1 - i \operatorname{tg} \delta}} = \frac{\sin \theta_{z1}}{\sqrt{\epsilon} \sqrt{1 - i \operatorname{tg} \delta}}.$$

Косинус угла преломления равен

$$\cos \theta_{z2} = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_{z2}} = \frac{\sqrt{\epsilon(1 - i \operatorname{tg} \delta) - \sin^2 \theta_{z1}}}{\sqrt{\epsilon(1 - i \operatorname{tg} \delta)}}.$$

Подставляя в (2) значения волновых сопротивлений Z_{02} и Z_{01} , косинусов углов падения и преломления $\cos \theta_{z1}$ и $\cos \theta_{z2}$, получаем

$$\Gamma_x = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} - \sqrt{\epsilon(1 - i \operatorname{tg} \delta) - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} + \sqrt{\epsilon(1 - i \operatorname{tg} \delta) - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}. \quad (3)$$

Преобразуем выражение (3) к виду

$$\frac{1 - \Gamma_x e^{i\varphi_x}}{1 + \Gamma_x e^{i\varphi_x}} = \sqrt{\left[\frac{\epsilon - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} \right]} - i \left[\frac{\epsilon \operatorname{tg} \delta}{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} \right].$$

Из полученного равенства найдем значения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь, приравнявая модули и аргументы комплексных величин левой и правой частей

$$\epsilon = \sqrt{\frac{B}{A^2 + 1}} + \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2; \quad (4)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{A \sqrt{\frac{B}{A^2 + 1}}}{\sqrt{\frac{B}{A^2 + 1} + \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}, \quad (5)$$

где A и B – вспомогательные величины, определяемые выражениями:

$$A = \operatorname{tg} \left[2 \left(\operatorname{arctg} \frac{\Gamma_x \sin \varphi_x}{1 - \Gamma_x \cos \varphi_x} + \operatorname{arctg} \frac{\Gamma_x \sin \varphi_x}{1 + \Gamma_x \cos \varphi_x} \right) \right],$$

$$B = \left[1 - \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right]^2 \left(\frac{1 + \Gamma_x^2 - 2\Gamma_x \cos \varphi_x}{1 + \Gamma_x^2 + 2\Gamma_x \cos \varphi_x} \right)^2.$$

Таким образом, измерив модуль Γ_x и фазу φ_x комплексного коэффициента отражения образца диэлектрика, по выражениям (4) и (5), можно рассчитать ϵ и $\operatorname{tg} \delta$.

Бібліографічний список

1. Афонін І.Л. Вимірювальний комплекс для визначення параметрів антенно-хвильовидного тракту / І.Л. Афонін, І.В. Лашенко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: Міжнар. наук.-техн. журн. — Хмельницький, 1999. — № 1. — С. 58–62.
2. Григорьев А.Д. Электродинамика и техника СВЧ: Учеб. для вузов по спец. “Электронные приборы и устройства” / А.Д. Григорьев. — М.: Высш. шк., 1990. — 335 с.

Поступила в редакцию 8.11.2001 г.