

ИЗМЕРЕНИЕ ДИСПЕРСИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛОСКОВЫХ
МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ

Для построения интегральных схем миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн можно использовать полосковый металлодиэлектрический волновод (ПМДВ) (рис. 1). Однако еще не имеется детального анализа его дисперсионных свойств

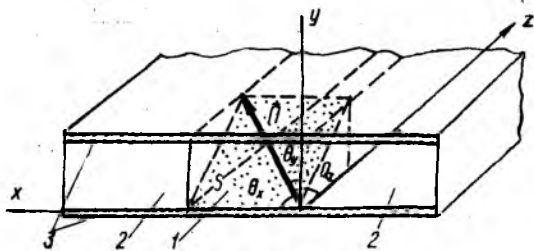


Рис. 1

Поле внутри волновода 1 можно представить как результат отражения от его стенок плоских парциальных волн, направления распространения которых Π характеризуются косинусами углов $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ с соответствующими осями координат [1]. В общем случае возможно существование двух типов волн: E_y^{mn} с составляющими поля E_y, E_z, H_x, H_y, H_z ($E_x=0$) и E_x^{mn} с составляющими поля E_x, E_y, E_z, H_y, H_z ($H_x=0$). Распределение любой из составляющих этих волн вдоль оси ox волновода определяется выражением [2]

$$k_c a \cos \theta_x = m\pi + \frac{\varphi_{x0}}{2} + \frac{\varphi_{xa}}{2},$$

а вдоль оси oy

$$k_c b \cos \theta_y = n\pi + \frac{\varphi_{y0}}{2} + \frac{\varphi_{yb}}{2}.$$

Здесь k_c — постоянная распространения волны в диэлектрике, из которого изготовлен волновод, $k_c = 2\pi/\lambda \sqrt{\epsilon_1 \mu_1}$; λ — длина волны генератора; a, b — поперечные размеры волновода по осям ox, oy ; m, n — число целых полуволн вдоль ox, oy ; ϵ_1, μ_1 — относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости материала волновода; $\varphi_{x0}, \varphi_{xa}$ — фазы коэффициентов отражения составляющей поля от боковых стенок волновода $x=0, x=a$; $\varphi_{y0}, \varphi_{yb}$ — фазы коэффициентов отражения составляющей поля от нижней $y=0$ и верхней $y=b$ стенок ПМДВ.

Значения Φ_{x0} , Φ_{xa} , Φ_{y0} , Φ_{yb} известны из работы [1]. Они различны для волн E_y^{mn} , E_x^{mn} . Поэтому дисперсионные уравнения имеют вид для волны E_y^{mn}

$$\frac{\lambda}{a} = \frac{2\pi \sqrt{\epsilon_1 \mu_1} \cos \theta_x}{m\pi + 2 \operatorname{arctg} \left[\frac{\mu_1}{\mu_2} \frac{\sqrt{\sin^2 \theta_x - \epsilon_2 \mu_2 / \epsilon_1 \mu_1}}{\cos \theta_x} \right]};$$

$$\frac{\lambda}{b} = \frac{2}{n} \sqrt{\epsilon_1 \mu_1} \cos \theta_y;$$

для волны E_x^{mn}

$$\frac{\lambda}{a} = \frac{2\pi \sqrt{\epsilon_1 \mu_1} \cos \theta_x}{m\pi + 2 \operatorname{arctg} \left[\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \frac{\sqrt{\sin^2 \theta_x - \epsilon_2 \mu_2 / \epsilon_1 \mu_1}}{\cos \theta_x} \right]};$$

$$\frac{\lambda}{b} = \frac{2}{n} \sqrt{\epsilon_1 \mu_1} \cos \theta_y,$$

где ϵ_2 , μ_2 — относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости материала подложки 2, для диэлектриков $\mu_1 = \mu_2 = 1$.

Волна E_y^{mn} нормально поляризована относительно боковых стенок ПМДВ $x = 0$, $x = a$, так как ее вектор напряженности электрического поля $\vec{E}_\perp = \vec{j}E_y + \vec{k}E_z$ параллелен боковым стенкам, а вектор напряженности магнитного поля $\vec{H}_\perp = \vec{i}H_x + \vec{j}H_y + \vec{k}H_z$ лежит в плоскости падения на боковую стенку — плоскость S . Волна E_x^{mn} — параллельно поляризованная относительно боковых стенок, поскольку ее вектор напряженности электрического поля $\vec{E}_\parallel = \vec{i}E_x + \vec{j}E_y + \vec{k}E_z$ лежит в плоскости S , а вектор напряженности магнитного поля $\vec{H}_\parallel = \vec{j}H_y + \vec{k}H_z$ параллелен боковым стенкам. После отражения от боковой стенки волновода каждая из волн E_y^{mn} , E_x^{mn} приобретает соответствующий фазовый сдвиг [1], а вид поляризации этих волн не меняется: волна E_y^{mn} остается нормально поляризованной, а волна E_x^{mn} — параллельно поляризованной относительно боковых стенок волновода.

По отношению к верхней и нижней стенкам $y = 0$, $y = b$ волны E_y^{mn} , E_x^{mn} поляризованы произвольно. Поэтому теперь каждая может быть представлена суммой двух волн — нормально и параллельно поляризованной относительно верхней и нижней стенок, каждая из которых отражается со своим фазовым сдвигом, а сумма пары отраженных волн дает результат отражения исходной волны E_y^{mn} или E_x^{mn} от этих стенок. Так как фазы коэффициентов отражения нормально и параллельно поляризованной волн от границы раздела «диэлектрик — идеальный проводник» отличаются на 180° , то после отражения от верхней или нижней стенки вид поляризации волн E_y^{mn} , E_x^{mn} также не изменится. Очевидно, если изменить граничные условия хотя бы на одной из границ «диэлектрик-проводник», то поляризация волн станет эллиптической за счет преобразования части энергии волны

E_y^{mn} в волну E_x^{mn} и наоборот при отражении от этой границы, т. е. волны станут гибридными. Поэтому поляризационную устойчивость основных типов колебаний E_y^{mn} , E_x^{mn} следует отнести к одному из главных достоинств ПМДВ [3].

Основной тип волны в ПМДВ — $E_y^{\circ\circ}$ ($m = 0$, $n = 0$) — имеет три составляющие поля E_y , H_x , H_z . Волна $E_y^{\circ\circ}$ распространяется в результате полного внутреннего отражения от боковых стенок волновода, т. е. $\cos \theta_y^{\circ\circ} = 0$, и ее дисперсионное уравнение будет иметь вид

$$\frac{\lambda}{a} = \pi \sqrt{\epsilon_1 \cos \theta_x} \left[\arctg \frac{\sqrt{\sin^2 \theta_x - \epsilon_2/\epsilon_1}}{\cos \theta_x} \right]^{-1}. \quad (1)$$

Длина волны в ПМДВ для основного типа колебания $\lambda_d = \lambda (\sqrt{\epsilon_1} \times \sin \theta_x)^{-1}$ (2); $\sin \theta_x$ находим из (1) для соответствующих значений λ , a .

По соотношениям (1), (2) рассчитали дисперсионные зависимости $\lambda_d = f(\lambda)$ для различных вариантов ПМДВ: 1 — волновод из фторопласта $\epsilon_1 = 2,08$ в воздушном окружении $\epsilon_2 = 1$, $a \times b = 4,1 \times 2,6$ мм; 2 — волновод из полиэтилена $\epsilon_1 = 2,24$ в воздушном окружении $\epsilon_2 = 1$, $a \times b = 4,8 \times 2,4$ мм; 3 — волновод из композиционного диэлектрика СТ-5 $\epsilon_1 = 4,95$ в воздухе $\epsilon_2 = 1$, $a \times b = 2,1 \times 1,5$ мм; 4 — волновод из диэлектрика СТ-5 в подложке из фторопласта, $a \times b = 2,1 \times 2,6$ мм.

Дисперсионные кривые для этих ПМДВ показаны на рис. 2 сплошными линиями.

Провели экспериментальное исследование длины волны в ПМДВ в восьмимиллиметровом диапазоне. Для измерения длины волны использовали принцип подвижного короткозамыкателя с неподвижным зондом. Так как для ПМДВ подвижного короткозамыкателя не имеется, применили подвижный короткозамыкатель на прямоугольном металлическом волноводе, а для извлечения информации о длине волны использовали три неподвижных детекторных зонда, разнесенных на некоторое расстояние вдоль оси ПМДВ. Схема измерительной установки показана на рис. 3.

Сигнал на квадратичном детекторе Д1 согласно [4] имеет вид

$$U_{д1} = k_d E_r^2 \left[1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos \left(\frac{4\pi L_1}{\lambda_d} + \frac{4\pi l_1}{\lambda_b} + \varphi \right) \right], \quad (3)$$

где k_d — коэффициент передачи детектора; E_r — амплитуда сигнала генератора; Γ , φ — модуль и фаза коэффициента отражения волны от короткозамыкателя 2; λ_b — длина волны в металлическом прямоугольном волноводе. Значение λ_b определяют экспериментально или

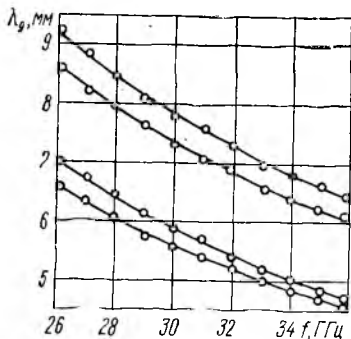


Рис. 2

расчетным путем по показанию частотомера. В нашем случае расхождение между экспериментальным и расчетным значениями $\lambda_{в}$ не превышало 1 %.

Минимальный сигнал на детекторе Д1 в соответствии с (3) получим при условии

$$\frac{4\pi L_1}{\lambda_{д}} + \frac{4\pi l_1}{\lambda_{в}} + \varphi = \pi(2k_1 + 1). \quad (4)$$

Здесь k_1 — число длин половеи стоячей волны от короткозамыкателя до Д1; l_1 — положение подвижного короткозамыкателя при минимальном сигнале на Д1.

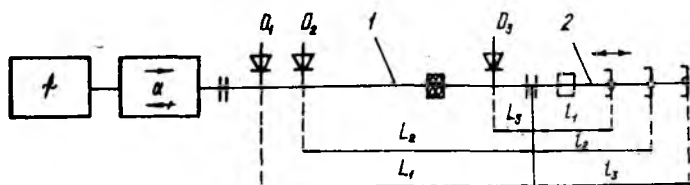


Рис. 3

Перемещая короткозамыкатель вправо, находим минимальный сигнал на детекторе Д2. При этом

$$\frac{4\pi L_2}{\lambda_{д}} + \frac{4\pi l_2}{\lambda_{в}} + \varphi = \pi(2k_2 + 1), \quad (5)$$

где l_2 — положение подвижного короткозамыкателя при минимальном сигнале на Д2.

Детекторные зонды Д1, Д2 расположены на расстоянии $L = (L_1 - L_2) < \frac{\lambda_{д}}{2}$, где $\lambda_{д}$ известна из теоретических расчетов. В тех случаях, когда теоретический расчет дает лишь приближенное значение $\lambda_{д}$, расстояние L необходимо выбирать меньше, чтобы между Д1 и Д2 не оказалось целой половеи.

Если короткозамыкатель сдвигать вправо до появления первого минимума на Д2, то $k_1 = k_2$, а из (4), (5) можно определить длину волны в ПМДВ $\lambda_{д} = \lambda_{в}(L_1 - L_2) / (l_2 - l_1)$ (6) с относительной погрешностью

$$(\delta\lambda_{д})_1 = \sqrt{\left(\frac{\Delta\lambda_{в}}{\lambda_{в}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(l_2 - l_1)}{l_2 - l_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(L_1 - L_2)}{L_1 - L_2}\right)^2}, \quad (7)$$

где $\Delta\lambda_{в}$, $\Delta(l_2 - l_1)$, $\Delta(L_1 - L_2)$ — абсолютные погрешности измерения соответствующих величин. Очевидно, чем меньше выбирается расстояние $L = L_1 - L_2$, тем больше погрешность измерения $(\delta\lambda_{д})_1$.

Для более точного измерения длины волны подвижный короткозамыкатель перемещали далее вправо до появления первого минимума

на детекторе ДЗ, который отстоял от Д2 на расстоянии в несколько длин волн. Тогда

$$\frac{4\pi L_3}{\lambda_d} + \frac{4\pi l_3}{\lambda_b} + \varphi = \pi(2k_3 + 1). \quad (8)$$

Если при перемещении минимума поля стоячей волны между детекторами Д1, Д2 общая электрическая длина тракта от детектора до плоскости короткозамыкателя оставалась неизменной (в тракте укладывалось одинаковое число длин полуволн $k_1 = k_2$), то электрическая длина тракта уменьшалась. Разность электрических длин тракта при измерениях на Д2, Д3 составляет целое число полуволн:

$$q = \frac{2(l_3 - l_2)}{\lambda_b} - \frac{2(L_2 - L_3)}{\lambda_d}. \quad (9)$$

Значение q можно определить из (9), подставляя вместо λ_d ее ориентировочное значение λ_{d-} из (6) и округляя результат до целого числа. Тогда определим длину волны ПМДВ

$$\lambda_d = (L_2 - L_3) \left(\frac{l_3 - l_2}{\lambda_b} - \frac{q}{2} \right)^{-1} \quad (10)$$

с. погрешностью

$$(\delta\lambda_d)_2 = \sqrt{\left(\frac{q\lambda_b}{2(l_3 - l_2)} - 1 \right)^{-2} \left[\left(\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} \right)^2 + \left(\frac{\Delta(l_3 - l_2)}{l_3 - l_2} \right)^2 \right] + \left(\frac{\Delta(L_2 - L_3)}{L_2 - L_3} \right)^2}. \quad (11)$$

Очевидно, $(\delta\lambda_d)_2 < (\delta\lambda_d)_1$ при любых $q > 1$.

Этим методом измерили дисперсионные зависимости для четырех перечисленных вариантов ПМДВ. Экспериментальные значения длины волны в ПМДВ в полосе частот 26,0 ÷ 36,0 ГГц представлены на рис. 2 точками. Расхождение между теоретическими и экспериментальными данными на всех частотах не превышает 1,5 %.

Список литературы: 1. Бондаренко И. К., Бура А. И., Саламатин В. В. Анализ диэлектрических волноводов на основе методов геометрической оптики / Электродинамические основы автоматизированного проектирования интегральных схем СВЧ. М., 1981. С. 159 — 173. 2. Анализ распределения поля в полосковом металлодиэлектрическом волноводе / Саламатин В. В., Мельников А. В., Кудрявченко И. В., Кондрашихин А. Б. К., 1986. 15 с. Деп. в УкрНИИТИ 14.07.86. № 1721. 3. О деполаризации волн в прямоугольных диэлектрических волноводах / Саламатин В. В., Кондрашихин А. Б. К., 1986. 14 с. Деп. в УкрНИИТИ 27.09.86. № 2312. 4. Силаев М. А., Брянцев С.Ф. Приложение матриц и графов к анализу СВЧ устройств. М., 1970. 248 с.

Поступила в редколлегию 20.04.87