

УДК 621.372

А. В. МЕЛЬНИКОВ, канд. техн. наук, *И. В. КУДРЯВЧЕНКО*

ИЗМЕРЕНИЕ ЗАТУХАНИЯ ПОЛОСКОВЫХ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЛИНИЙ

Одна из важных задач техники СВЧ — разработка интегральных схем (ИС) миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Успешное решение задачи во многом зависит от выбора типа линии передачи, на базе которой разрабатывается конкретное устройство. Наиболее перспективная линия для ИС СВЧ указанных диапазонов, отличающаяся надежностью, технологичностью, малыми потерями, — полосковый металлодиэлектрический волновод (ПМДВ) [1; 2]. Такой волновод представляет собой диэлектрический полосок прямоугольного сечения и металлодиэлектрическую подложку, причем $\epsilon_1 > \epsilon_2$, где ϵ_1 , ϵ_2 — относительные диэлектрические проницаемости полоска и подложки.

Рассмотрим результаты исследований по определению зависимости затухания от конструктивных параметров ПМДВ для основного типа волны E_y^{00} . Анализ потерь в ПМДВ проводился методом парциальных волн с учетом реальных параметров материалов, составляющих волноводную структуру [3]. Суммарные потери в ПМДВ складываются из двух компонент: погонного затухания, обусловленного потерями в диэлектрике α_d и погонного затухания, обусловленного потерями в металлических поверхностях α_m ,

$$\alpha_d = \alpha_{d1} + 0,5 \ln(1 + \eta) - 0,5 \ln[1 + \eta e^{2(\alpha_{d1} - \alpha_{d2})}]. \quad (1)$$

Здесь α_{d1}, α_{d2} — погонное затухание в материале полоска и подложки; η — коэффициент связи электромагнитной волны с диэлектрическим полоском,

$$\eta = \frac{\cos^2 \frac{\varphi_{x0}}{2}}{k_1 \sqrt{\sin^2 \theta_x - \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \left[\frac{a}{2} + \frac{\sin k_x a \cos(k_x a - \varphi_{x0})}{2k_x} \right]}}, \quad (2)$$

где θ_x — направляющий угол вектора Пойнтинга плоской волны, распространяющейся в волноводе; φ_{x0} — фаза коэффициента отражения на границе раздела диэлектриков; a — поперечный размер полоска; k_1 — волновое число, $k_1 = 2\pi \sqrt{\epsilon_1}/\lambda$, λ — длина волны в свободном пространстве; k_x — поперечное волновое число, $k_x = k_1 \cos \theta_x$. Значения φ_{x0}, θ_x находим в соответствии с работой [4]

$$\varphi_{x0} = \arctg \left[\frac{\sqrt{\sin^2 \theta_x - \epsilon_2/\epsilon_1}}{\cos \theta_x} \right],$$

причем θ_x определяется численным методом, например методом последовательных приближений, на ЭВМ из соотношения

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

Запишем затухание, обусловленное потерями в металлических поверхностях

$$\alpha_m = \sqrt{\frac{\epsilon_{a1}}{\mu_{a1}}} \frac{a + c_1 - c_2 \cos 2\theta_x}{4b(a + c_1 + c_2) \sin \theta_x}. \quad (3)$$

Здесь

$$c_1 = \frac{2 \cos^2 \frac{\varphi_{x0}}{2}}{k_1 \sqrt{\sin^2 \theta_x - \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}};$$

$c_2 = \frac{1}{k_x} \sin k_x a \cos(k_x a - \varphi_{x0})$; b — поперечный размер полоска; ϵ_{a1}, μ_{a1} — абсолютные диэлектрическая и магнитная проницаемости материала полоска.

Найдем значение суммарных погонных потерь в ПМДВ (дБ/м) $\alpha = 8,68(\alpha_d + \alpha_m)$ (4).

Проведенный анализ позволяет оптимизировать конструкцию устройств на ПМДВ с учетом значения погонного затухания линии, которое зависит от диэлектрической проницаемости, тангенса угла потерь диэлектриков, составляющих волноводную структуру, поверхностной проводимости металлических поверхностей, поперечных размеров полоска.

Затухание в ПМДВ определялось двухдетекторным методом (рис. 1), согласно которому потери в волноводе ищутся между двумя проводными детекторными головками Д1, Д2, слабо связанными с ним. Погрешность метода, обусловленная неидентичностью характеристик

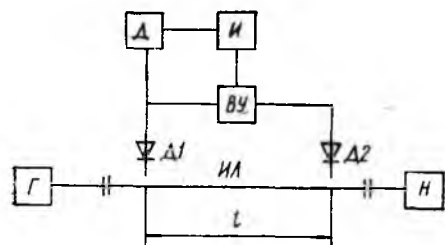


Рис. 1

[5]. Пренебрегая величинами второго порядка малости, получаем

$$U_{д1} \approx kE_{\Gamma}^2(1 + \Gamma_H^2 + 2\Gamma_H \cos \varphi_{H1}) \quad (5);$$

$$U_{д2} \approx kE_{\Gamma}^2\tau^2(1 + \Gamma_H^2 + 2\Gamma_H \cos \varphi_{H2}) \quad (6),$$

где k — коэффициент пропорциональности; E_{Γ} — амплитуда падающей волны; τ^2 — модуль коэффициента передачи по мощности; φ_{H1} , φ_{H2} — удвоенные электрические длины линий от нагрузки до детекторов Д1; Д2.

Тогда отношение этих сигналов дает измеренное значение модуля коэффициента передачи по мощности

$$\tau_{изм}^2 \approx \tau^2 \frac{1 + \Gamma_H^2 + 2\Gamma_H \cos \varphi_{H2}}{1 + \Gamma_H^2 + 2\Gamma_H \cos \varphi_{H1}} \quad (7)$$

Если бы линия передачи ИА была идеально согласована с нагрузкой Н, т. е. $\Gamma_H = 0$, то отношение сигналов с детекторов соответствовало бы истинному значению измеряемой величины. Однако в действительности это не происходит, и $\tau_{изм}^2 \neq \tau^2$. Погрешность из-за неидеального согласования линии передачи с нагрузкой будет максимальной, когда $\cos \varphi_{H1} = \pm 1$, а $\cos \varphi_{H2} = \mp 1$. В этом случае $(\tau_{изм}^2)_{макс} \approx \tau^2(1 \pm \Gamma_H)$. Следовательно, максимальная относительная погрешность $(\delta\tau^2)_{макс} = \pm 4\Gamma_H$. Например, при $\Gamma_H = 0,03$ погрешность неидеального согласования линии передачи с нагрузкой составит 12 % от истинного значения измеряемой величины.

Для устранения погрешности, обусловленной неидеальным согласованием линии передачи с нагрузкой, измерение затухания проводилось на частотах, при которых расстояние между детекторами l кратно целому числу полуволн. При этом $\cos \varphi_{H1} = \cos \varphi_{H2}$, а из (7) следует, что $\tau_{изм}^2 = \tau^2$.

Чтобы определить частоты измерения, проводилась калибровка схемы измерителя затухания ПМДВ, которая заключается в следующем. Измеряемая линия передачи нагружается короткозамыкателем. При этом увеличивается крутизна разностного сигнала, снимаемого с выхода вычитающего устройства ВУ. Его значение определяется из выражений (5), (6) в предположении, что $\tau^2 \approx 1$, $\Gamma_H = 1$

$$U_{ВУ} = U_{д1} - U_{д2} = kE_{\Gamma}^2 \sin(\varphi_{H1} + \varphi_{H2} + \varphi_k) \sin(\varphi_{H1} - \varphi_{H2}).$$

Здесь φ_k — фаза коэффициента отражения короткозамыкателя. Огибающая разностного сигнала принимает нулевые значения при выполнении равенства $\sin(\varphi_{H1} - \varphi_{H2}) = 0$, (8), причем

$$\varphi_{H1} - \varphi_{H2} = \frac{2\pi}{\lambda_{вi}} l, \quad (9)$$

где l — расстояние между детекторными головками в линии передачи; $\lambda_{вi}$ — длина волны в волноводе, соответствующая i -му нулевому значению огибающей разностного сигнала. Тогда из выражения (8) с учетом (9) следует

$l = n \frac{\lambda_{вi}}{2}$, где n — целое число. Частоты измерения f_i , соответствующие длинам волн в линии передачи $\lambda_{вi}$, определяются по осциллограмме на экране панорамного индикатора КСВНИ и ослаблений с помощью частотной метки.

Исследование влияния конструктивных параметров ПМДВ на затухание проводилось в миллиметровом диапазоне. На рис. 2 представлены результаты теоретического и

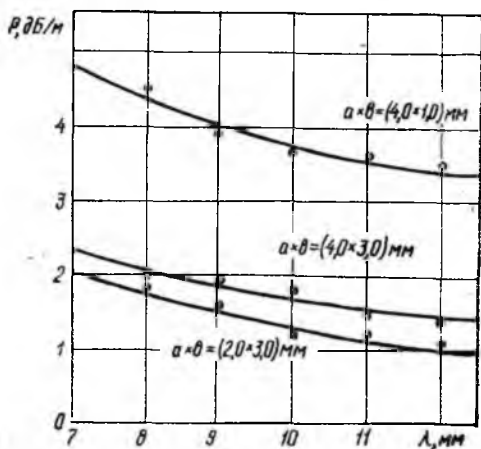


Рис. 2

экспериментального исследования ПМДВ, отличающихся размерами поперечного сечения. Для исследования использовался ПМДВ, образованный фторопластовым полоском ($\epsilon_1 = 2,08$; $\text{tg} \delta = 2 \cdot 10^{-4}$) в воздухе ($\epsilon_2 = 1$). Металлические пластины изготовлялись из латуни, затем их поверхности полировались. Из рис. 2 видно, что погонные потери в ПМДВ находятся в пределах 1,5 — 2,0 дБ/м при оптимальных размерах a , δ . Увеличивая размер полоска δ или уменьшая размер a , потери можно уменьшить, однако необходимо помнить, что при этом

ПМДВ может стать многомодовым либо связь волны с направляющей структурой уменьшится.

Полученные результаты подтверждают возможность выбора ПМДВ по значению затухания, технологичности и другим параметрам в качестве линии передачи для ИС СВЧ миллиметрового и субмиллиметрового диапазона волн.

Список литературы: 1. *Benson F. A., Tischer F. J.* Some guiding structures for millimetre waves // IEE Proceedings. 1984. A 131. № 7. P. 429—449. 2. *Саламатин В. В., Мельников А. В., Кондрашихин А. Б., Кудрявченко И. В.* Расчет параметров металлодиэлектрического волновода // Приборостроение. 1987. Вып. 40. С. 84—87. 3. *Бондаренко И. К., Буря А. И., Саламатин В. В.* Электродинамические основы автоматизированного проектирования интегральных схем СВЧ. М., 1981. С. 159—173. 4. *Анализ распределения поля в полосковом металлодиэлектрическом волноводе / В. В. Саламатин., А. В. Мельников., И. В. Кудрявченко., А. Б. Кондрашихин.* Севастополь, 1986. 15 с. Деп. в УкрНИИИТИ 14.07.86. № 1721. 5. *Силаев М. А., Брянцев С. Ф.* Приложение матриц и графов к анализу СВЧ устройств. М., 1970. 248 с.

Поступила в редколлегию 30.03.87