

I

УДК 621.372

*И. В. КУДРЯВЧЕНКО, А. В. МЕЛЬНИКОВ*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОСТИ НЕИЗЛУЧАЮЩЕГО  
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА**

---

В настоящее время значительно возрос интерес к различным модификациям диэлектрических волноводов, рассматриваемых в качестве перспективных линий передачи для интегральных схем миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн [1]. Большое число публикаций посвящено неизлучающему диэлектрическому

волноводу (НДВ) [2; 3], который отличается технологичностью изготовления и малым значением погонного затухания. Однако широкополосность одномодового режима работы НДВ — одна из важнейших характеристик линии передачи, еще недостаточно изучена. В работе исследована зависимость широкополосности одномодового режима работы НДВ от его поперечных размеров и параметров материалов, образующих волноводную структуру.

НДВ (рис. 1) представляет собой диэлектрический полосок 1 прямоугольного сечения, расположенный в диэлектрической подложке 2 между двумя параллельными металлическими пластинами 3, причем  $\epsilon_1 > \epsilon_2$ , где  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  — относительные диэлектрические проницаемости полоска и подложки соответственно. Вектор электрического поля рабочего типа волн  $E_x^{01}$  параллелен металлическим пластинам 1.

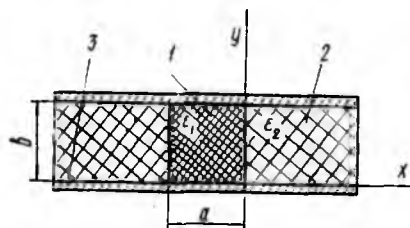


Рис. 1

С помощью метода частичных волн [4] получаем выражения для амплитуд составляющих поля волн  $E_x^{mn}$  в плоскости поперечного сечения диэлектрического полоска:

$$\begin{aligned}
 E_x &= E_{xm} \cos\left(k_x x - \frac{\varphi_{x0}}{2}\right) \cos(k_y y) \cos\left(\omega t - k_z z + \frac{\varphi_{x0}}{2}\right); \\
 E_y &= -E_{xm} \frac{\cos \theta_x \cos \theta_z}{\sin^2 \theta_x} \sin\left(k_x x - \frac{\varphi_{x0}}{2}\right) \sin(k_y y) \cos \times \\
 &\quad \times \left(\omega t - k_z z + \frac{\varphi_{x0}}{2}\right), \\
 E_z &= -E_{xm} \frac{\cos \theta_x \cos \theta_z}{\sin^2 \theta_x} \sin\left(k_x x - \frac{\varphi_{x0}}{2}\right) \cos(k_y y) \sin \times \\
 &\quad \times \left(\omega t - k_z z + \frac{\varphi_{x0}}{2}\right); \\
 H_x &= 0; \quad H_y = E_{xm} \sqrt{\frac{\epsilon_{a1}}{\mu_{a1}}} \frac{\cos \theta_z}{\sin^2 \theta_x} \cos\left(k_x x - \frac{\varphi_{x0}}{2}\right) \cos(k_y y) \cos \times \\
 &\quad \times \left(\omega t - k_z z + \frac{\varphi_{x0}}{2}\right); \\
 H_z &= -E_{xm} \sqrt{\frac{\epsilon_{a1}}{\mu_{a1}}} \frac{\cos \theta_y}{\sin^2 \theta_x} \cos\left(k_x x - \frac{\varphi_{x0}}{2}\right) \sin(k_y y) \sin \times \\
 &\quad \times \left(\omega t - k_z z + \frac{\varphi_{x0}}{2}\right), \tag{1}
 \end{aligned}$$

причем

$$\frac{\varphi_{x0}}{2} = \operatorname{arctg} \left[ \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \sqrt{\frac{\sin^2 \theta_x - \frac{\epsilon_2 \mu_2}{\epsilon_1 \mu_1}}{\cos \theta_x}} \right], \tag{2}$$

где  $E_{xm}$  — амплитуда электрической составляющей поля в центре НДВ;  $\epsilon_{a1}$ ,  $\mu_{a1}$  — абсолютные диэлектрическая и магнитная прони-

цаемости материала полоска;  $\epsilon_1, \mu_1, \epsilon_2, \mu_2$  — относительные диэлектрические и магнитные проницаемости материалов полоска и подложки;  $\theta_x, \theta_y, \theta_z$  — направляющие углы вектора Пойнтинга плоских парциальных волн в волноводе;  $\varphi_{x0}$  — фаза коэффициента отражения на границе раздела диэлектриков;  $k_x = k_1 \cos \theta_x$ ;  $k_y = k_1 \cos \theta_y$ ;  $k_z = k_1 \cos \theta_z$  — проекции волнового вектора на координатные оси. Значение волнового числа  $k_1$  определяется из выражения  $k_1 = 2\pi\sqrt{\epsilon_1}/\lambda$ , где  $\lambda$  — длина волны в свободном пространстве.

Для определения широкополосности одномодового режима НДВ необходимо вывести выражение критического режима для различных типов волн, распространяющихся в НДВ. Его можно получить из дисперсионных уравнений [5], если угол  $\theta_z$  равен  $90^\circ$ . В критическом режиме излучение энергии из боковых граней отсутствует. Такие типы волн называют неизлучающими.

В общем случае соотношение для критического режима имеет вид

$$\frac{\lambda_{кр}}{a} = \frac{2\pi \sqrt{\epsilon_1 - \left(\frac{n}{2}\right)^2 \left(\frac{\lambda_{кр}}{b}\right)^2}}{m\pi + 2\text{arctg} \left[ \frac{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \sqrt{\left(\frac{n}{2}\right)^2 \left(\frac{\lambda_{кр}}{b}\right)^2 - \epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1 - \left(\frac{n}{2}\right)^2 \left(\frac{\lambda_{кр}}{b}\right)^2}} \right]} \quad (3)$$

Здесь  $a$  — ширина диэлектрического полоска, а  $b$  — его высота;  $m$  и  $n$  — количество целых полувольт электрической или магнитной составляющих поля, укладываемых на размере  $a$  или  $b$  волновода соответственно ( $m, n = 0, 1, 2, \dots$ ). Из (3) следует, что для существования неизлучаемых колебаний при изменении в широких пределах размера полоска  $a$  размер  $b$  для различных типов колебаний изменяется в пределах

$$\frac{n\lambda_{кр}}{2\sqrt{\epsilon_1}} < b < \frac{n\lambda_{кр}}{\sqrt{\epsilon_2}} \quad (4)$$

При  $n = 0$  угол  $\theta_z$  достигает  $90^\circ$  при  $\lambda_{кр} \rightarrow \infty$ . Наряду с неизлучаемыми типами волн в НДВ могут существовать излучаемые моды, имеющие критические длины волн, определяемые в соответствии с соотношением  $\lambda_{кр} = 2a\sqrt{\epsilon_1 - \epsilon_2}/m$  (5), которое также выводится из дисперсионных уравнений. Если  $m = 0$ , излучение из боковых граней начнется при значении критической длины волны  $\lambda_{кр} \rightarrow \infty$ , т. е. типы волн с нулевым индексом  $m$  являются неизлучающими.

Подставляя в уравнение (3) соответствующие индексы  $m$  и  $n$  и решая его с учетом (4) и (5) одним из численных методов на ЦВМ (например, методом последовательных приближений) с заданными значениями  $\epsilon_1, \epsilon_2$ , получают зависимости критического режима волны  $E_x^{01}$  и ближайших высших типов волн  $E_x^{02}$  и  $E_x^{11}$ . На рис. 2 представлены зависимости  $b/\lambda_{кр} = f(a/\lambda_{кр})$  для волн  $E_x^{01}, E_x^{02}$

и  $E_x^{11}$  при  $\epsilon_1 = 2,08$  (фторопласт);  $\epsilon_2 = 1$  (воздух). На рис. 3 — то же, при  $\epsilon_1 = 11,7$  (высокоомный кремний);  $\epsilon_2 = 1$ . Области однододового режима работы НДВ на рис. 2, 3, обозначенные цифрами I и II, заштрихованы. Существование областей I и II связано с выбором высоты диэлектрического полоска  $b$  из (4), тогда как для НДВ, у которого размер  $b$  выбирается из условия  $b < \lambda/2$  [2], характерна только рабочая область II. Согласно рис. 2, 3 угол  $\alpha$  наклона прямой, проходящей через начало координат, однозначно определяется из соотношения размеров диэлектрического полоска в соответствии с выражением  $\text{tg}\alpha = b/a$ . Сектор разрыва между областями I и II ограничен прямыми, проходящими из начала координат через точки пересечения прямой  $a/\lambda_{кр} = 0,5/\sqrt{\epsilon_1 - \epsilon_2}$  с графиком моды  $E_x^{02}$

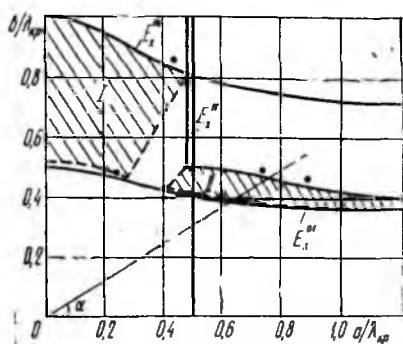


Рис. 2

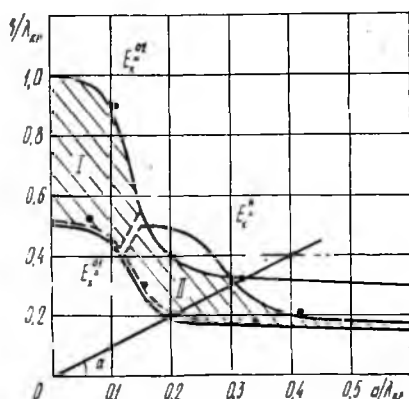


Рис. 3

и прямой  $b/\lambda_{кр} = 0,5/\sqrt{\epsilon_2}$ , координаты которых находят из совместного решения выражений (3) и (5). Таким образом, в случае неправильного выбора поперечных размеров волноводной структуры в НДВ могут возникать условия для излучения энергии из боковых граней. Широкополосность однододового режима работы НДВ при фиксированных величинах  $a$  и  $b$  определяют по отношению максимального и минимального значений координат точек пересечения с рабочей областью I или II прямой, наклон которой задается выражением (5). При этом  $k_{\text{макс}}/k_{\text{мин}} = f_{\text{макс}}/f_{\text{мин}}$ , где  $k$  — координата  $a/\lambda_{кр}$  или  $b/\lambda_{кр}$ ;  $f_{\text{макс}}$  и  $f_{\text{мин}}$  — граничные значения рабочего диапазона частот НДВ.

На рис. 4 представлена зависимость широкополосности от поперечных размеров НДВ;  $\delta f = \varphi(b/a)$ , полученная для различных параметров диэлектриков, составляющих волноводную структуру. Здесь обозначено: 1, 3, 5 — широкополосность НДВ при  $\epsilon_1 = 2,08$ ;  $\epsilon_2 = 1$ , 2, 4, 6 при  $\epsilon_1 = 11,7$ ;  $\epsilon_2 = 1$ . Участки 1, 4 соответствуют рабочим областям I на рис. 2, 3, а участки 3, 6 — рабочим областям II.

Отрезки штриховых линий 2 и 5 приведены для случая неправильного выбора поперечных размеров НДВ. Согласно рис. 4 широкополосность одномодового режима работы НДВ на волне  $E_x^{01}$  зависит от его поперечных размеров и параметров материалов волноводной структуры, причем для НДВ, работающих в областях I (рис. 2, 3), можно существенно выиграть в увеличении широкополосности по сравнению с НДВ, имеющих высоту полоска  $b$  меньше половины длины волны, который возрастает при невысоких диэлектрических проницаемостях материалов, образующих волноводную структуру.

Точками на рис. 2, 3, 4 отмечены результаты эксперимента. Проверка полученных результатов проводилась в миллиметровом диапазоне волн для НДВ, образованных фторопластовым полоском ( $\epsilon_1 = 2,08$ ) в воздухе ( $\epsilon_2 = 1$ ) и НДВ, образованных полоском из высокоомного кремния ( $\epsilon_1 = 11,7$ ) в воздухе. Металлические пластины изготавливались из латуни. Критические длины волн высших типов определялись по результатам исследования структуры поля в поперечном сечении НДВ на установке, описанной в работе [6]. В пределах погрешности получено хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных.

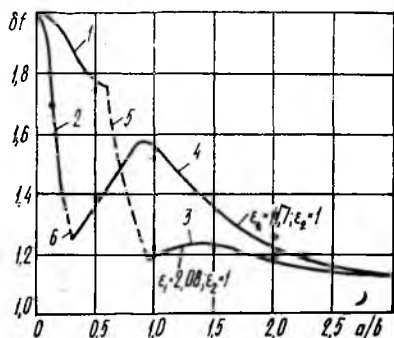


Рис. 4

Список литературы: 1. Benson F. A., Tischer E. J. Some guiding structure for millimetre waves // IEE Proceedings. 1984. N 7. P. 429—449. 2. Yoneyama T., Yamaguchi M., Nishida S. Bends in nonradiative dielectric waveguides // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techn. 1982. Vol. MTT-30, N 12. P. 2146—2150. 3. Гутцайт Э. М. Типы волн в H-образном металлодиэлектрическом волноводе // Радиотехника и электрон. 1962. № 2. С. 310—320. 4. Бондаренко И. К., Бура А. И., Саламатич В. В. Анализ диэлектрических волноводов на основе геометрической оптики // Электродинамические основы автоматизированного проектирования интегральных схем СВЧ. М., 1981. С. 159—173. 5. Анализ распределения поля в полосковом металлодиэлектрическом волноводе В. В. Саламатин, А. В. Мельников, И. В. Кудрявченко. Севастополь. 1986. 120 с. Деп. в УкрНИИТИ 14.07.86, № 1721. 6. Экспериментальные исследования и сравнительный анализ характеристик диэлектрических полосковых линий миллиметрового диапазона с различной ориентацией волноводов в подложке / С. В. Аверин, А. В. Мельников, Б. А. Мурмушев и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1978. Т. 21, № 7. С. 1028—1036.

Поступила в редколлегию 30.03.87