

УДК 621.372.833.1

АНАЛИЗ ОТВЕТВИТЕЛЯ КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ НА ПОЛОСКОВОМ

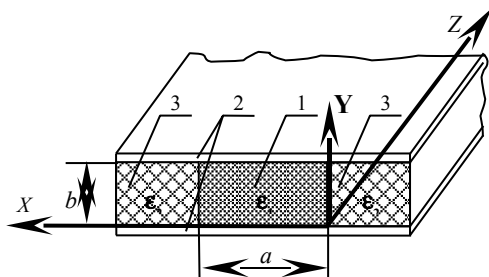


Рисунок 1 – Структура полоскового металлодиэлектрического волновода:

1 – диэлектрический полосок; 2 – металлические пластины; 3 – диэлектрическая подложка; a , b – размеры полоска; $\epsilon_{1,2}$ – диэлектрические проницаемости полоска и подложки соответственно (ϵ_1, ϵ_2); X, Y, Z – декартовы координаты

МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ

Саламатин В.В., Афонин И.Л., Цыцур С.В.

Представлены результаты анализа ответвителя круговой поляризации на полосковом металлодиэлектрическом волноводе, предназначенного для построения поляризационного измерителя КСВ и фазы коэффициента отражения КВЧ устройств.

Основным узлом поляризационных измерителей параметров волноводных трактов (коэффициента стоячей волны, фазы коэффициента отражения, полного сопротивления) является ответвитель круговой поляризации (ОКП).

В коротковолновой части сантиметрового и в миллиметровом диапазонах длин волн более предпочтительным для канализа-ции электромагнитной энергии является полосковый металлодиэлектрический волновод. Построение ОКП на полосковом металлодиэлектрическом волноводе (ПМДВ), используемом в КВЧ диапазоне и рассмотренном в публикациях [1,2],

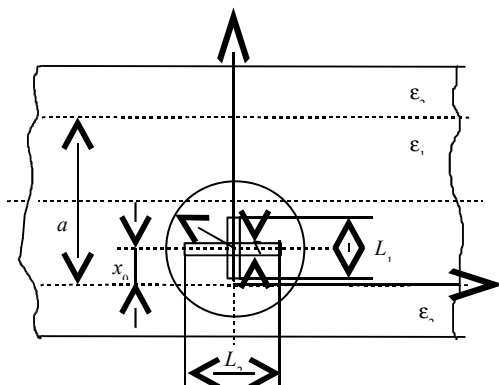


Рисунок 2 - Ответвитель круговой поляризации, выполненный на полосковом металлодиэлектрическом волноводе:

$L_{1,2}$ - длина поперечной и продольной щелей соответственно ($L_1 < L_2$); S - ширина щелей; x_0 - координата центра поперечной щели; b - ширина

несколько отличается от известных конструктивных решений. Это вызвано тем обстоятельством, что в отличие от металлического прямоугольного волновода в ПМДВ отсутствуют плоскости, в которых выполняются условия круговой поляризации магнитного поля. Структура полоскового металлодиэлектрического волновода и схематическое изображение ответвителя круговой поляризации изображены на рисунках 1, 2 соответственно.

Как известно, для излучения из волновода волны круговой поляризации может быть использовано крестообразное отверстие, ортогональные щели которого излучают линейно поляризованные волны одинаковой амплитуды и с временным и пространственным сдвигами, равными $\pi/2$.

При этом при определении амплитуд волн необходимо учитывать протяженность щелей. Амплитуда продольной составляющей магнитного поля H_{zm} существенно меньше амплитуды поперечной составляющей H_{xm} . Для выравнивания амплитуд продольная щель крестообразного отверстия связи ПМДВ с отрезком круглого волновода, установленного торцом на первичный волновод, должна иметь большую длину по сравнению с поперечной щелью.

Щели крестообразного отверстия связи возбуждают в круглом волноводе ортогональные линейно поляризованные волны. Ось круглого волновода совпадает с центром креста. Для случая, когда длина щели значительно больше ее ширины ($L_{1,2} \gg S$), амплитуда возбужденной волны типа H_{11} в круглом волноводе может быть определена следующим образом [3]

$$U_{1,2} = - \frac{i\omega \mu_a}{2P_H} V_{m1,2} H_{x,z} H_{r1,2}, \quad (1)$$

где U_1 , U_2 – нормированные амплитуды волн, возбуждаемых соответственно поперечной – 1 и продольной – 2 щелями креста; P_H – единичная нормированная мощность; $V_{m1,2}$ – магнитная поляризуемость щелевых отверстий, равная

$$V_{m1,2} = \frac{\pi L_{1,2}^3}{24 \left[\ln \left(\frac{4L_{1,2}}{S} \right) - 1 \right]};$$

H_x и H_z – поперечная и продольная составляющие напряженности магнитного поля ПМДВ, описываемые выражениями

$$H_x = E_{ym} \sqrt{\frac{\epsilon_{a1}}{\mu_{a1}}} \cdot \frac{\sin^2 \theta_x}{\cos \theta_z} \cdot \cos \left(k_x \cdot x - \frac{\Phi_{x0}}{2} \right) \cdot \cos(k_y \cdot y) \cdot \cos \left(\omega \cdot t - k_z \cdot z + \frac{\Phi_{x0}}{2} \right); \quad (2)$$

$$H_z = - E_{ym} \sqrt{\frac{\epsilon_{a1}}{\mu_{a1}}} \cdot \cos \theta_x \cdot \sin \left(k_x \cdot x - \frac{\Phi_{x0}}{2} \right) \cdot \cos(k_y \cdot y) \cdot \sin \left(\omega \cdot t - k_z \cdot z + \frac{\Phi_{x0}}{2} \right); \quad (3)$$

$H_{r1,2}$ – радиальные составляющие напряженности магнитного поля волны H_{11} в круглом волноводе, соответствующие поперечной щели – 1 с длиной L_1 и продольной щели – 2 с длиной L_2 , ширина щелей S

$$H_r = -i\beta \frac{R}{1,841} H_{0z} \cdot e^{-i\beta \cdot z'} \cdot J_1' \left(\frac{1,841 \cdot r}{R} \right) \cos \varphi, \quad (4)$$

где β – фазовая постоянная в круглом волноводе; z' , r , φ – продольная, радиальная и угловая цилиндрические координаты; R – радиус круглого волновода; J_1' – производная функции Бесселя 1-го порядка; E_{ym} , H_{0z} – постоянные; $\epsilon_{a1} = \epsilon_1 \cdot \epsilon_0$; $\mu_{a1} = \mu_1 \cdot \mu_0$ – диэлектрическая и магнитная проницаемости материала полоска ПМДВ;

$$k_x = \frac{2\pi \cdot \sqrt{\epsilon_1 \cdot \mu_1}}{\lambda} \cdot \cos \theta_x, k_y = \frac{2\pi \cdot \sqrt{\epsilon_1 \cdot \mu_1}}{\lambda} \cdot \cos \theta_y, k_z = \frac{2\pi \cdot \sqrt{\epsilon_1 \cdot \mu_1}}{\lambda} \cdot \cos \theta_z -$$

проекции волнового вектора на оси координат; $\cos \theta_x$, $\cos \theta_y$, $\cos \theta_z$ – направляющие косинусы вектора Пойнтинга плоских однородных волн, результат сложения которых образует поле в ПМДВ; φ_{x0} – фаза коэффициента отражения волны на границе двух диэлектриков (полоска и подложки) при полном внутреннем отражении

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

ϵ_1 , μ_1 , ϵ_2 , μ_2 – относительные диэлектрические проницаемости материала полоска и подложки; λ – длина волны в свободном пространстве.

Основной волной в ПМДВ является E_y^{00} , для которой $\theta_y = 90^\circ$, $\theta_z = 90^\circ - \theta_y$ и связь нормированной длины волны $\lambda_n = \lambda/a$ с углом θ_x определяется выражением

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{a} = \frac{\pi \cdot \sqrt{\epsilon_1 \cdot \mu_1} \cdot \cos(\theta_x)}{\arctg \left(\frac{\mu_1}{\mu_2} \cdot \frac{\sqrt{\sin^2(\theta_x) - \epsilon_2 \cdot \mu_2 / \epsilon_1 \cdot \mu_1}}{\cos(\theta_x)} \right)}, \quad (5)$$

где a – размер широкой стенки полоска.

Усредненное магнитное поле по длине щели отличается от его значения в центре щели [4]. Для учета влияния протяженности щели на амплитуду волны необходимо проинтегрировать напряженность магнитного поля вдоль щели. Определение амплитуд волн осуществляется в соответствии с (1). С учетом усреднения напряженности магнитного поля по длинам щелей находим

$$U_1 = U_0 V_{m1} \sin \theta_x \frac{1}{L_1} \int_{x_0 - \frac{L_1}{2}}^{x_0 + \frac{L_1}{2}} \cos \left(k_x x - \frac{\varphi_{x_0}}{2} \right) dx \frac{1}{L_1} \int_{-\frac{L_1}{2}}^{\frac{L_1}{2}} J_1' \left(\frac{1,841r}{R} \right) dr, \quad (6)$$

$$U_2 = U_0 V_{m2} \cos \theta_x \frac{1}{L_2} \int_{-\frac{L_2}{2}}^{\frac{L_2}{2}} e^{-i k_z \cdot z} dz \frac{1}{L_2} \int_{-\frac{L_2}{2}}^{\frac{L_2}{2}} J_1' \left(\frac{1,841r}{R} \right) dr \quad (7)$$

где $U_0 = \frac{\omega \cdot \mu_a}{2 \cdot P_H} \cdot E_{ym} \cdot H_{0z} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_{a1}}{\mu_{a1}}} \cdot \beta \cdot \frac{R}{1,841} \cdot \cos \varphi$;

x_0 – поперечная координата центра щели связи.

Решая уравнения (6) и (7), получаем выражение для отношения U_1/U_2 :

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{V_{m1} \sin \theta_x \cos \left(k_x x_0 - \frac{\varphi_{x_0}}{2} \right) \frac{\sin(k_x L_1/2)}{k_x L_1/2}}{V_{m2} \cos \theta_x \sin \left(k_x x_0 - \frac{\varphi_{x_0}}{2} \right) \frac{\sin(k_z L_2/2)}{k_z L_2/2}} \cdot \frac{J_1(1,841 L_1/(2R))/(1,841 L_1/(2R))}{J_1(1,841 L_2/(2R))/(1,841 L_2/(2R))}. \quad (8)$$

При равенстве $U_1/U_2 = 1$ в круглом волноводе распространяется волна с круговой поляризацией, так как составляющие ее линейно поляризованные волны ортогональны в пространстве, имеют временной сдвиг, равный 90° , и их амплитуды равны. Однако с изменением частоты соотношение U_1/U_2 изменяется, и распространяемая волна имеет эллиптическую поляризацию. Для уменьшения эллиптичности волны в заданной полосе частот нужно найти такие геометрические параметры щелей связи (L_1, L_2, x_0, S), при которых отличие U_1/U_2 от единицы минимально.

Подстановка в уравнение (8) значений поляризуемостей V_{m1} и V_{m2} , а также нормировка всех параметров дает следующий результат:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{L_{1H} \left[\ln \left(\frac{4L_{2H}}{S_H} \right) - 1 \right] \operatorname{tg}^2 \theta_x \sin(k_{xH} L_{1H}/2)}{L_{2H} \left[\ln \left(\frac{4L_{1H}}{S_H} \right) - 1 \right] \operatorname{tg} \left[k_{xH} \left(x_{0H} - \frac{1}{2} \right) \right] \sin(k_{zH} L_{2H}/2)} \cdot \frac{J_1(1,841 L_{1H}/(2R_H))}{J_1(1,841 L_{2H}/(2R_H))}. \quad (9)$$

Нормировка произведена относительно размера a полоска ПМДВ, при этом: $L_{1H} = L_1/a$; $L_{2H} = L_2/a$; $S_H = S/a$; $R_H = R/a$; $x_{0H} = x/a$; $\lambda_{Hn} = \lambda/a$;

$$k_{xH} = \frac{2\pi \cdot \sqrt{\varepsilon_1}}{\lambda_H} \cdot \cos \theta_x; \quad k_{zH} = \frac{2\pi \cdot \sqrt{\varepsilon_1}}{\lambda_H} \cdot \sin \theta_x.$$

Для получения одноволнового режима работы ПМДВ должно выполняться условие [3]

$$\frac{\lambda_{\kappa}}{a} = \lambda_{\kappa n} = 2\sqrt{\varepsilon_1 - \varepsilon_2},$$

где λ_{κ} – минимальная длина волны рабочего диапазона. Если ограничиться 20%-ной полосой рабочих частот, то максимальная нормированная длина волны определяется выражением

$$\lambda_{\partial л.н} = \frac{\lambda_{\partial л}}{a} = 2,5\sqrt{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}.$$

Условие одноволнового режима работы круглого волновода определяется неравенством [3]

$$2,61 \cdot R < \lambda_n < 3,41 \cdot R,$$

поэтому радиус волновода целесообразно выбрать равным $R = \lambda_{ср}/3$ ($\lambda_{ср}$ – средняя длина волны).

При заданных значениях ε_1 и ε_2 , изменяя угол θ_x в пределах от $\theta_{хк}$ до $\theta_{хдл}$, найденных из выражения (5) для нормированных длин волн $\lambda_{\kappa n}$ и $\lambda_{\partial л.н}$, получаем зависимость отношения U_1/U_2 от λ_n в рабочем диапазоне длин волн. Минимизация отклонения отношения U_1/U_2 от единицы связана с правильным выбором параметров x_{0n} , L_{1n} , L_{2n} , S_n . Варьируя значения этих параметров, можно добиться оптимальной зависимости $U_1/U_2 = f(\lambda_n)$. При этом нормированный радиус круглого волновода $R_n \approx 0,75 \cdot \sqrt{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}$.

Численные расчеты параметров щелей связи ОКП для заданных $\varepsilon_1 = 2,08$; $\varepsilon_2 = 1$ дают следующий результат: $L_{1n} = 0,25$; $L_{2n} = 0,36$; $S_n = 0,025$; $R_n = 0,78$; $x_{0n} = 0,125$.

Отношение амплитуд волн U_1/U_2 в диапазоне длин волн от $\lambda_{\kappa n}$ до $\lambda_{\partial л.н}$ монотонно изменяется в пределах от 1,024 до 0,988.

Таким образом, неидеальность возбуждения поля круговой поляризации в ОКП на ПМДВ в 20%-ной полосе частот примерно равна соответствующему параметру в ответвителях круговой поляризации, реализованных на прямоугольных металлических волноводах, работающих в диапазоне частот волновода. Следовательно, и погрешность создаваемого поляризационного измерителя на ПМДВ будет одного порядка с существующими, хотя и в меньшем диапазоне частот.

Библиография

1 Бондаренко И.К. Исследование и разработка оптимальной линии передачи КВЧ диапазона / И.К. Бондаренко, В.В. Саламатин, А.Д. Плоткин // СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии: Сб. тр. / 7-я Междунар. Крым. конф., Севастополь, сент. 1997 г. — Севастополь, 1997. — С. 138–139.

2 Афонин И.Л. Анализ полоскового металлodieлектрического волновода / И.Л. Афонин, В.В. Саламатин, С.В. Цыцура // СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии: Сб. тр. / 9-я Междунар. Крым. конф., Севастополь, сент. 1999 г. — Севастополь, 1999. — С. 256–257.

3 Каценеленбаум Б.З. Высокочастотная электродинамика / Б.З. Каценеленбаум. — М.: Наука, 1966. — 408 с.

4 Афонин И.Л. Синтез и анализ целевых элементов связи / И.Л. Афонин, И.В. Лашенко // СВЧ–техника и телекоммуникационные технологии: Сб. тр. / 9-я Междунар. Крым. конф., Севастополь, сент. 1999 г. — Севастополь, 1999. — С. 140–141.

Поступила в редакцию 28.09.2000 г.