

Stripline e Microfita

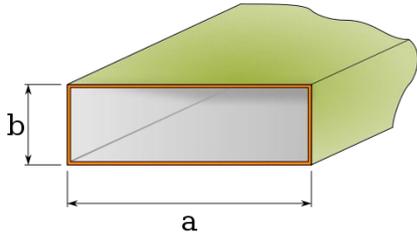
Linhas especiais

SEL 369 Micro-ondas

Tania Regina Tronco
Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação
EESC-USP

- ✓ Há várias tecnologias de linhas de transmissão para construção de dispositivos. São exemplos
 - cabo coaxial, guia de onda metálico, microfita, stripline, guia coplanar
- ✓ A escolha do tipo depende de fatores como faixa de frequências, impedância característica, facilidade de conexão com transistores

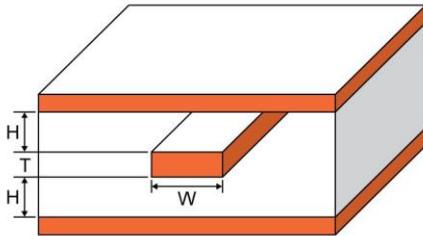
Tipos de condutores (guias)



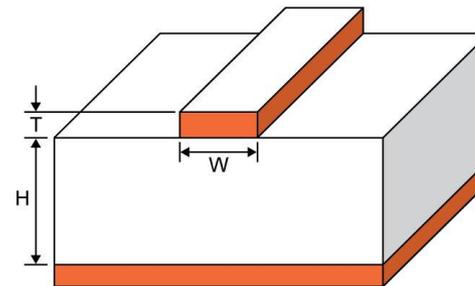
metálico retangular



coaxial



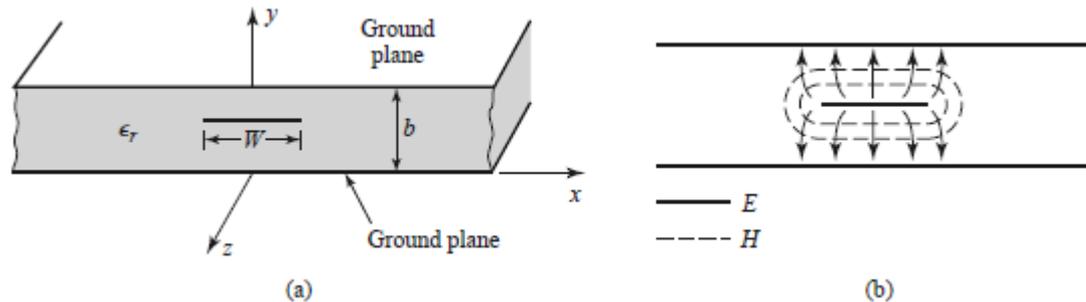
stripline



microfita

Striplines

- ✓ É uma linha de transmissão planar utilizada em circuitos de micro-ondas integrados, miniaturização e fabricação via fotolitografia;



- ✓ Devido à stripline possuir dois condutores e um meio dielétrico homogêneo, ela suporta o modo TEM;
- ✓ Striplines podem ser comparadas a cabos coaxiais achatados.

Fórmulas – Modo TEM

- ✓ Velocidade de Fase – Modo TEM

$$v_p = 1 / \sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r} = c / \sqrt{\epsilon_r}$$

- ✓ Constante de propagação

$$\beta = \frac{\omega}{v_p} = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r} = \sqrt{\epsilon_r} k_0.$$

- ✓ Impedância Característica

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{\omega \sqrt{LC}} \quad v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\sqrt{LC}}{C} = \frac{1}{v_p C}$$

- ✓ onde L e C são a indutância e a capacitância por unidade de comprimento da linha

Solução para as Striplines

- ✓ A resolução da equação de onda pode ser utilizada para encontrar o valor de C e consequentemente Z_0 mas a solução é complicada;
- ✓ Então, fórmulas mais simples que se aproximam da solução exata tem sido desenvolvidas para encontrar Z_0 , tais como:

$$Z_0 = \frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{b}{W_e + 0.441b}$$

Impedância característica

$$Z_0 = \frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{b}{W_e + 0.441b}$$

- ✓ onde W_e é a largura efetiva do condutor central e é dada por:

$$\frac{W_e}{b} = \frac{W}{b} - \begin{cases} 0 & \text{for } \frac{W}{b} > 0.35 \\ (0.35 - W/b)^2 & \text{for } \frac{W}{b} < 0.35. \end{cases}$$

- ✓ Assume-se que a espessura do condutor central é praticamente zero;
- ✓ Então a impedância característica diminui à medida que W aumenta.

Projeto de Striplines

- ✓ Quando projetamos circuitos em stripline, precisamos encontrar a largura (W), dada uma impedância característica, o qual requer a fórmula inversa:

$$\frac{W}{b} = \begin{cases} x & \text{for } \sqrt{\epsilon_r} Z_0 < 120 \Omega \\ 0.85 - \sqrt{0.6 - x} & \text{for } \sqrt{\epsilon_r} Z_0 > 120 \Omega, \end{cases}$$

onde x é dado por:

$$x = \frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_r} Z_0} - 0.441$$

Atenuação em Striplines

- ✓ Desde que a stripline obedece o modo TEM, a atenuação devido às perdas no dielétrico é dada por:

$$\alpha_d = \frac{k \tan \delta}{2} \text{Np/m (TEM waves)}$$

- ✓ A atenuação por perdas no condutor é dada por

$$\alpha_c = \begin{cases} \frac{2.7 \times 10^{-3} R_s \epsilon_r Z_0}{30\pi(b-t)} A & \text{for } \sqrt{\epsilon_r} Z_0 < 120 \Omega \\ \frac{0.16 R_s}{Z_0 b} B & \text{for } \sqrt{\epsilon_r} Z_0 > 120 \Omega \end{cases} \quad \text{Np/m,}$$

with

$$A = 1 + \frac{2W}{b-t} + \frac{1}{\pi} \frac{b+t}{b-t} \ln \left(\frac{2b-t}{t} \right),$$

$$B = 1 + \frac{b}{(0.5W + 0.7t)} \left(0.5 + \frac{0.414t}{W} + \frac{1}{2\pi} \ln \frac{4\pi W}{t} \right),$$

where t is the thickness of the strip.

Exemplo de projeto

Find the width for a 50Ω copper stripline conductor with $b = 0.32$ cm and $\epsilon_r = 2.20$. If the dielectric loss tangent is 0.001 and the operating frequency is 10 GHz, calculate the attenuation in dB/ λ . Assume a conductor thickness of $t = 0.01$ mm.

Solution

Because $\sqrt{\epsilon_r} Z_0 = \sqrt{2.2}(50) = 74.2 < 120$ and $x = 30\pi/(\sqrt{\epsilon_r} Z_0) - 0.441 = 0.830$, (3.180) gives the strip width as $W = bx = (0.32)(0.830) = 0.266$ cm.

At 10 GHz, the wave number is

$$k = \frac{2\pi f \sqrt{\epsilon_r}}{c} = 310.6 \text{ m}^{-1}$$

From (3.30) the dielectric attenuation is

$$\alpha_d = \frac{k \tan \delta}{2} = \frac{(310.6)(0.001)}{2} = 0.155 \text{ Np/m.}$$

Exemplo de projeto (2)

The surface resistance of copper at 10 GHz is $R_s = 0.026 \Omega$. The conductor attenuation is

$$R_s = \sqrt{\omega\mu_0/2\sigma}$$
$$\alpha_c = \frac{2.7 \times 10^{-3} R_s \epsilon_r Z_0 A}{30\pi(b-t)} = 0.122 \text{ Np/m},$$

since $A = 4.74$. The total attenuation constant is

$$\alpha = \alpha_d + \alpha_c = 0.277 \text{ Np/m}.$$

In dB,

$$\alpha(\text{dB}) = 20 \log e^\alpha = 2.41 \text{ dB/m}.$$

At 10 GHz, the wavelength on the stripline is

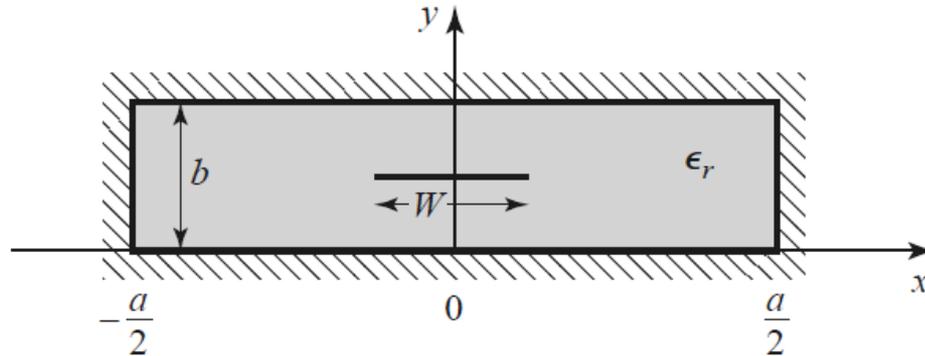
$$\lambda = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r} f} = 2.02 \text{ cm},$$

so in terms of wavelength the attenuation is

$$\alpha(\text{dB}) = (2.41)(0.0202) = 0.049 \text{ dB}/\lambda.$$

Solução Exata

- ✓ Solução da equação de onda para o modo TEM



$$\nabla_t^2 \Phi(x, y) = 0 \quad \text{for } |x| \leq a/2, 0 \leq y \leq b,$$

with the boundary conditions

$$\Phi(x, y) = 0, \quad \text{at } x = \pm a/2,$$

$$\Phi(x, y) = 0, \quad \text{at } y = 0, b.$$

$$\Phi(x, y) = \begin{cases} \sum_{\substack{n=1 \\ \text{odd}}}^{\infty} A_n \cos \frac{n\pi x}{a} \sinh \frac{n\pi y}{a} & \text{for } 0 \leq y \leq b/2 \\ \sum_{\substack{n=1 \\ \text{odd}}}^{\infty} B_n \cos \frac{n\pi x}{a} \sinh \frac{n\pi}{a} (b - y) & \text{for } b/2 \leq y \leq b. \end{cases} \quad (3.184)$$

Only the odd- n terms are needed in (3.184) because the solution is an even function of x

$$E_y = \begin{cases} -\sum_{\substack{n=1 \\ \text{odd}}}^{\infty} A_n \left(\frac{n\pi}{a} \right) \cos \frac{n\pi x}{a} \cosh \frac{n\pi y}{a} & \text{for } 0 \leq y \leq b/2 \\ \sum_{\substack{n=1 \\ \text{odd}}}^{\infty} A_n \left(\frac{n\pi}{a} \right) \cos \frac{n\pi x}{a} \cosh \frac{n\pi}{a} (b - y) & \text{for } b/2 \leq y \leq b. \end{cases}$$

The surface charge density on the strip at $y = b/2$ is

$$\begin{aligned}\rho_s &= D_y(x, y = b/2^+) - D_y(x, y = b/2^-) \\ &= \epsilon_0 \epsilon_r [E_y(x, y = b/2^+) - E_y(x, y = b/2^-)] \\ &= 2\epsilon_0 \epsilon_r \sum_{\substack{n=1 \\ \text{odd}}}^{\infty} A_n \left(\frac{n\pi}{a}\right) \cos \frac{n\pi x}{a} \cosh \frac{n\pi b}{2a},\end{aligned}\tag{3.187}$$

which is seen to be a Fourier series in x for the surface charge density, ρ_s , on the strip at $y = b/2$. If we know the surface charge density we could easily find the unknown constants, A_n , and then the capacitance. We do not know the exact surface charge density, but we can make a good guess by approximating it as a constant over the width of the strip,

$$\rho_s(x) = \begin{cases} 1 & \text{for } |x| < W/2 \\ 0 & \text{for } |x| > W/2. \end{cases}\tag{3.188}$$

The voltage of the strip conductor relative to the bottom conductor can be found by integrating the vertical electric field from $y = 0$ to $b/2$. Because the solution is approximate, this voltage is not constant over the width of the strip but varies with position, x . Rather than choosing the voltage at an arbitrary position, we can obtain an improved result by averaging the voltage over the width of the strip:

$$V_{\text{avg}} = \frac{1}{W} \int_{-W/2}^{W/2} \int_0^{b/2} E_y(x, y) dy dx = \sum_{\substack{n=1 \\ \text{odd}}}^{\infty} A_n \left(\frac{2a}{n\pi W} \right) \sin \frac{n\pi W}{2a} \sinh \frac{n\pi b}{2a}. \quad (3.190)$$

The total charge per unit length on the center conductor is

$$Q = \int_{-W/2}^{W/2} \rho_s(x) dx = W \text{ Coul/m}, \quad (3.191)$$

so the capacitance per unit length of the stripline is

$$C = \frac{Q}{V_{\text{avg}}} = \frac{W}{\sum_{\substack{n=1 \\ \text{odd}}}^{\infty} A_n \left(\frac{2a}{n\pi W} \right) \sin \frac{n\pi W}{2a} \sinh \frac{n\pi b}{2a}} \text{ F/m}. \quad (3.192)$$

Finally, the characteristic impedance is given by

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\sqrt{LC}}{C} = \frac{1}{v_p C} = \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{cC},$$

where $c = 3 \times 10^8$ m/sec.

EXAMPLE 3.6 NUMERICAL CALCULATION OF STRIPLINE IMPEDANCE

Evaluate the above expressions for a stripline having $\epsilon_r = 2.55$ and $a = 100b$ to find the characteristic impedance for $W/b = 0.25$ to 5.0. Compare with the results from (3.179).

Solution

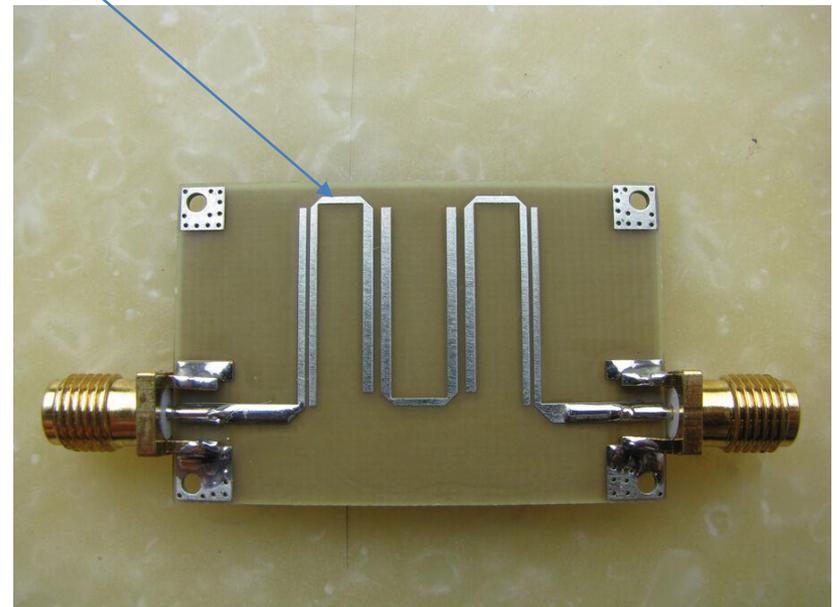
A computer program was written to evaluate (3.192). The series was truncated after 500 terms, and the results for Z_0 are as follows.

W/b	Z_0, Ω		
	Numerical, Eq. (3.192)	Formula, Eq. (3.179)	Commercial CAD
0.25	90.9	86.6	85.3
0.50	66.4	62.7	61.7
1.0	43.6	41.0	40.2
2.0	25.5	24.2	24.4
5.0	11.1	10.8	11.9

- ✓ A **microfita** é uma das tecnologias mais conhecidas por causa de seu desempenho em ampla faixa de frequências, facilidade de fabricação, reprodutibilidade, integração com dispositivos como transistores e diodos
- ✓ Utiliza técnicas de construção de circuito impresso em baixa frequências
- ✓ Os substratos utilizados são apropriados para altas frequências, como teflon, alumina, quartzo
- ✓ O projetos de linha isolada e de linha acoplada (acoplador direcional) são feitos por meio de softwares

Exemplos de circuitos com microfita

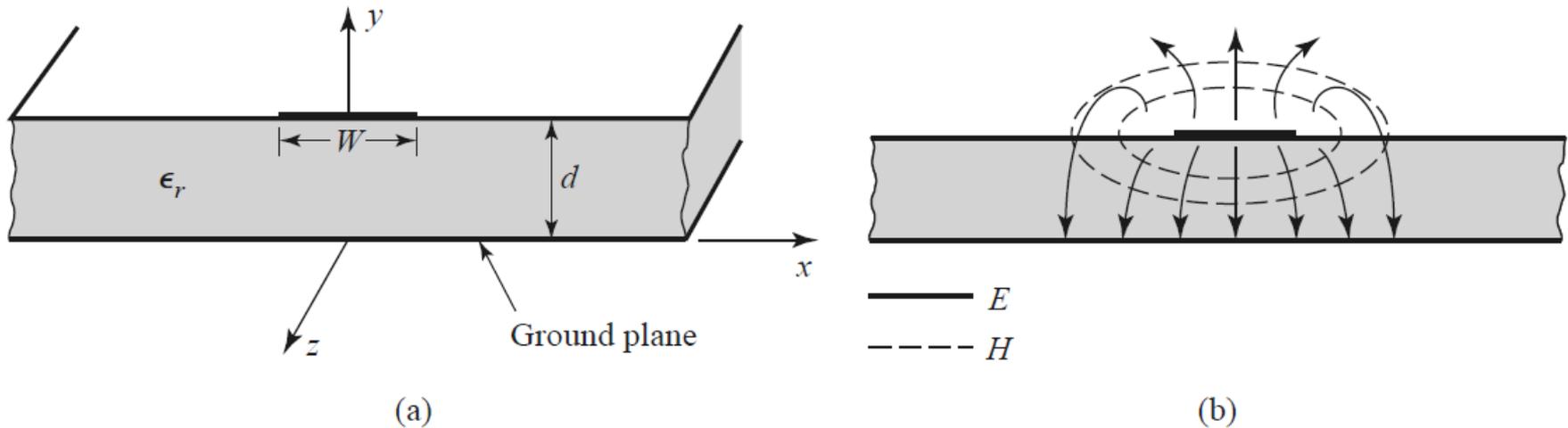
microfita



Microwave frequency circuit board from a satellite receiver dish feed horn LNB
(Image ID: AH5ARA)

Filtro combine

Layout das Microfitas



✓ Modo híbrido TM-TE

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_e}},$$

$$\beta = k_0 \sqrt{\epsilon_e},$$

$$1 < \epsilon_e < \epsilon_r$$

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12d/W}}.$$

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_e}} \ln \left(\frac{8d}{W} + \frac{W}{4d} \right) & \text{for } W/d \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_e} [W/d + 1.393 + 0.667 \ln(W/d + 1.444)]} & \text{for } W/d \geq 1. \end{cases}$$

$$\frac{W}{d} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} & \text{for } W/d < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] & \text{for } W/d > 2, \end{cases}$$

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}}.$$

✓ Atenuação por perda no dielétrico

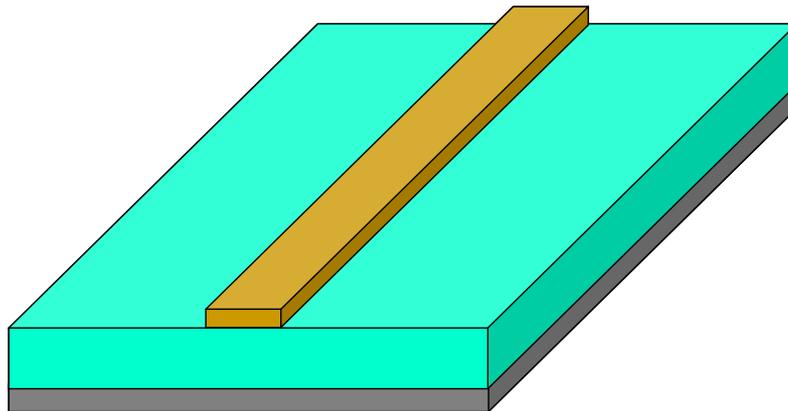
$$\alpha_d = \frac{k_0 \epsilon_r (\epsilon_e - 1) \tan \delta}{2 \sqrt{\epsilon_e} (\epsilon_r - 1)} \text{ Np/m,}$$

✓ Atenuação por perdas no condutor

$$\alpha_c = \frac{R_s}{Z_0 W} \text{ Np/m,}$$

Microfita-3

- ✓ No projeto de microfita determinam-se
 - W : largura da microfita para Z_0
 - l : comprimento da microfita
- ✓ A síntese fornece
 - W/h , na qual h é a espessura do dielétrico
- ✓ ϵ_{eff} : permissividade efetiva



EXAMPLE 3.7 MICROSTRIP LINE DESIGN

Design a microstrip line on a 0.5 mm alumina substrate ($\epsilon_r = 9.9$, $\tan \delta = 0.001$) for a 50Ω characteristic impedance. Find the length of this line required to produce a phase delay of 270° at 10 GHz, and compute the total loss on this line, assuming copper conductors. Compare the results obtained from the approximate formulas of (3.195)–(3.199) with those from a microwave CAD package.

Solution

First find W/d for $Z_0 = 50 \Omega$, and initially guess that $W/d < 2$. From (3.197),

$$A = 2.142, \quad W/d = 0.9654.$$

So the condition that $W/d < 2$ is satisfied; otherwise we would use the expression for $W/d > 2$. Then the required line width is $W = 0.9654d = 0.483$ mm. From (3.195) the effective dielectric constant is $\epsilon_e = 6.665$. The line length, ℓ , for a 270° phase shift is found as

$$\phi = 270^\circ = \beta \ell = \sqrt{\epsilon_e} k_0 \ell,$$

$$k_0 = \frac{2\pi f}{c} = 209.4 \text{ m}^{-1},$$

$$\ell = \frac{270^\circ (\pi/180^\circ)}{\sqrt{\epsilon_e} k_0} = 8.72 \text{ mm}.$$

Attenuation due to dielectric loss is found from (3.198) as $\alpha_d = 0.255 \text{ Np/m} = 0.022 \text{ dB/cm}$. The surface resistivity for copper at 10 GHz is $0.026 \ \Omega$, and the attenuation due to conductor loss is, from (3.199), $\alpha_c = 0.0108 \text{ Np/cm} = 0.094 \text{ dB/cm}$. The total loss on the line is then 0.101 dB.

A commercial microwave CAD package gives the following results: $W = 0.478 \text{ mm}$, $\epsilon_e = 6.83$, $\ell = 8.61 \text{ mm}$, $\alpha_d = 0.022 \text{ dB/cm}$, and $\alpha_c = 0.054 \text{ dB/cm}$. The approximate formulas give results that are within a few percent of the CAD data for linewidth, effective dielectric constant, line length, and dielectric attenuation. The greatest discrepancy occurs for the attenuation constant for conductor loss. ■

Microfita e substratos

- ✓ Tipo de linha muito utilizado em micro-ondas
 - fabricação fácil e bom desempenho
- ✓ Aplicação
 - amplificadores de micro-ondas e circuitos integrados de micro-ondas

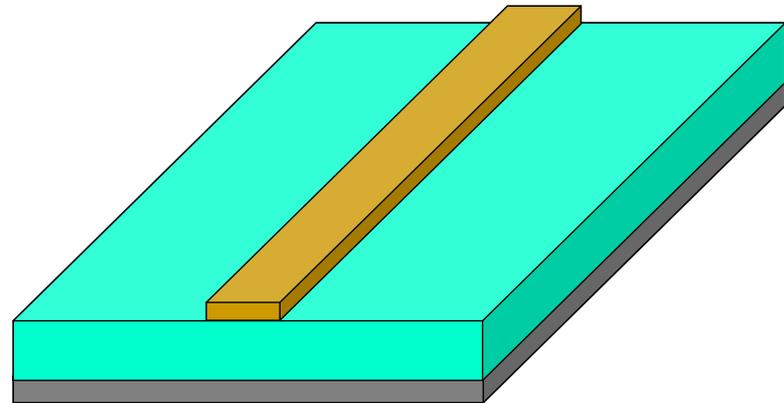
substratos dielétricos típicos

Duroid : $\epsilon_r = 2,56$

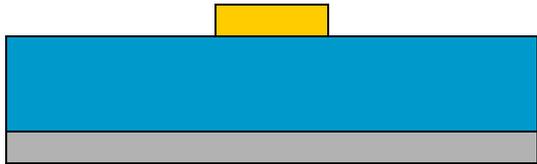
Quartzo: $\epsilon_r = 3,78$

Alumina: $\epsilon_r = 9,7$

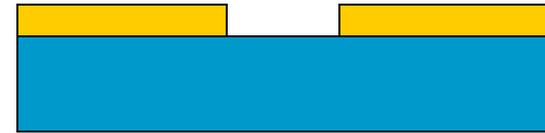
Silício: $\epsilon_r = 11,7$



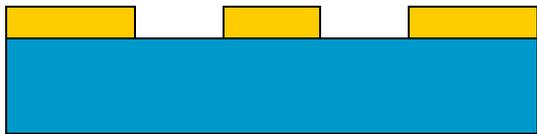
Alguns tipos de linhas especiais (1)



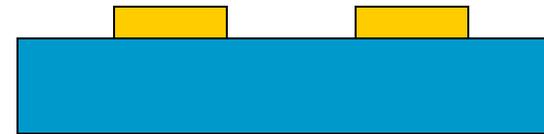
Microfita



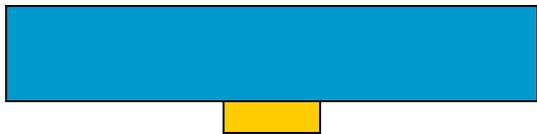
Linha de fenda



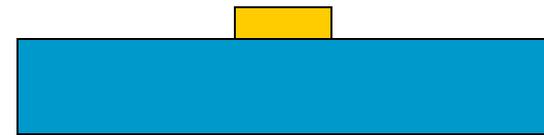
Guia coplanar



Linhas coplanares



Microfita invertida

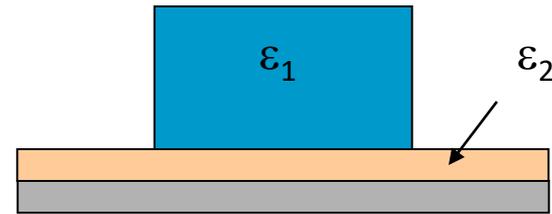


Microfita suspensa

Alguns tipos de linhas especiais (2)



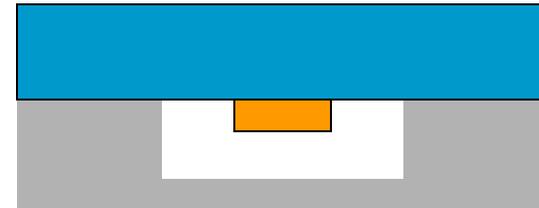
Guia imagem



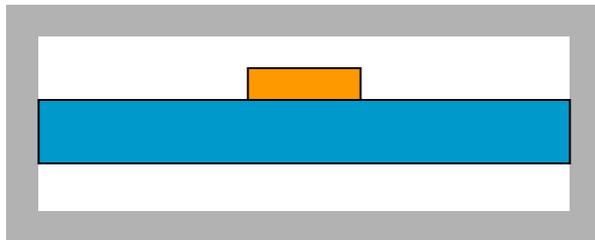
Guia imagem isolado



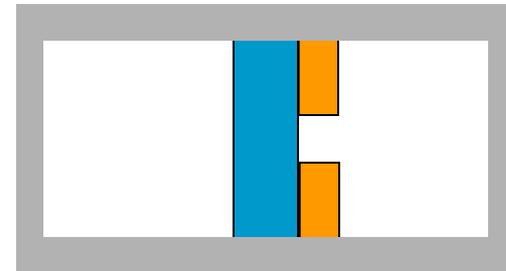
Guia imagem aprisionado



Microfita invertida aprisionada

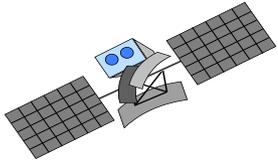


Microfita suspensa



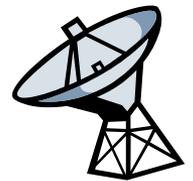
finline

Faixas de frequências de micro-ondas (IEEE)

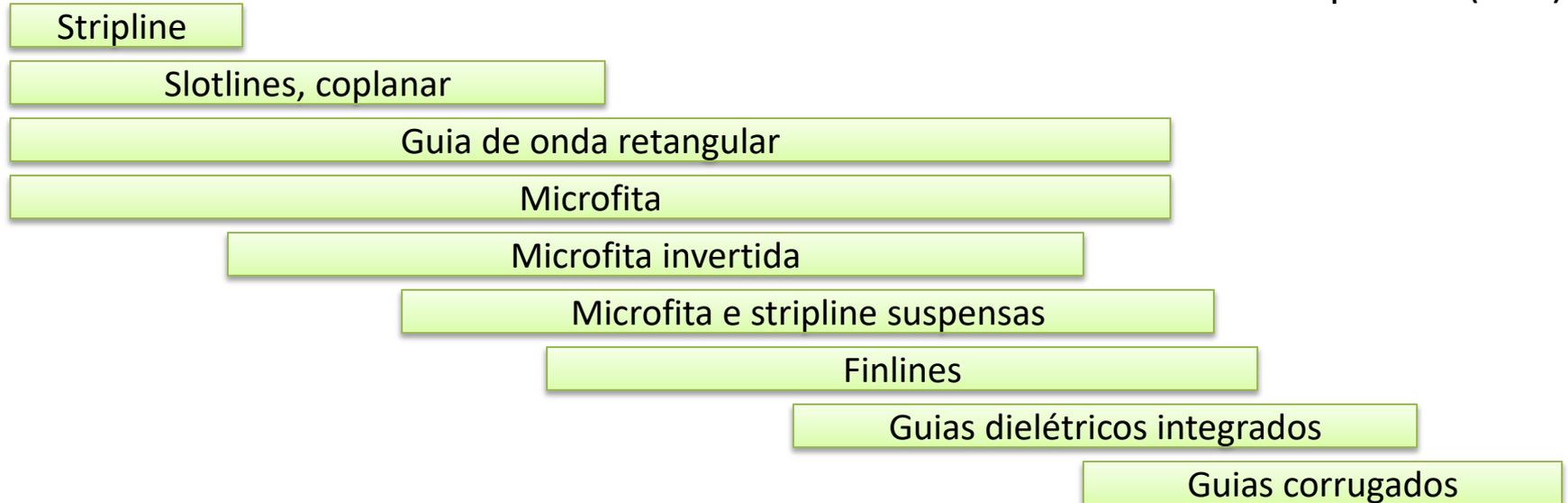
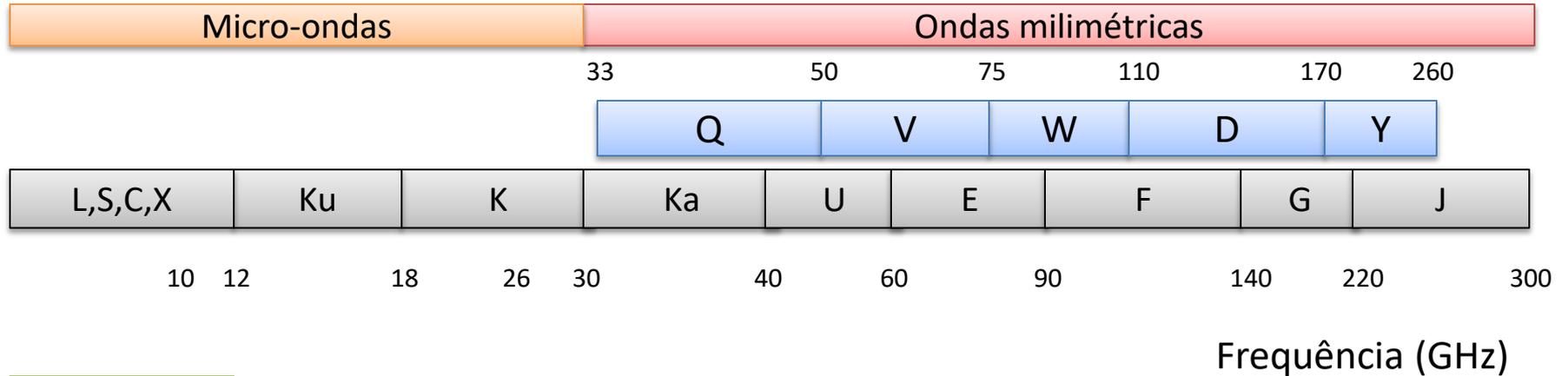


Designação	Faixa (GHz)
HF	0,003 - 0,03
VHF	0,03 - 0,3
UHF	0,3 - 1,0
banda L	1,0 - 2,0
banda S	2,0 - 4,0
banda C	4,0 - 8,0
banda X	8,0 - 12,0
banda Ku	12,0 - 18,0
banda K	18,0 - 27,0
banda Ka	27,0 - 40,0
milimétrica	40,0 - 300,0
sub-milimétrica	> 300,0

1 GHz
corresponde
a 10^9 Hz



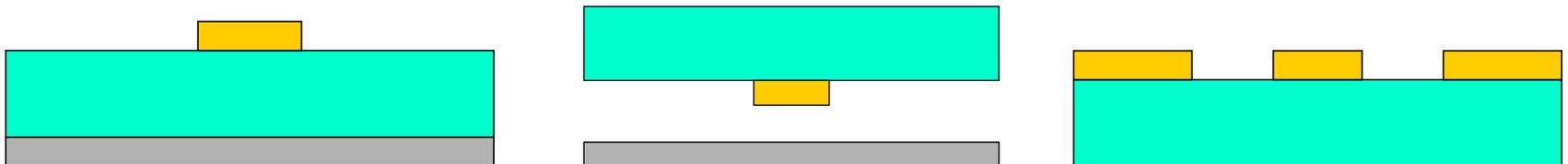
Faixa de operação de algumas linhas



Fonte: B. Bhat e S. K. Koul, Analysis, design and applications of fin lines, Norwood: Artech House, p. 43, 1987

Linhas e impedância característica

Estrutura	Impedância (ohms)
Microfita	20-125
Microfita invertida	25-130
Microfita invertida aprisionada (TIM)	30-140
Stripline suspensa	40-150
Guia coplanar (CPW)	40-150
Slotline	60-120
Finline	10-400
Guia imagem (imageline)	≈ 26



Fonte: T.C. Edwards, Foundations for microstrip circuit design, New York: Wiley, p. 233, 1981

Linhas e características

Estrutura	Perda por radiação	Dispersão	Característica
Stripline	Nula	Desprezível	Excelente para componentes passivos; Inconveniente para chips
Microfita	Baixa	Pequena	Muito usada em MIC e MMIC
Slotline	Alta	Grande	Adequada para montagem shunt de dispositivos em chip e fabricação de dispositivos não-recíprocos
Stripline suspensa	nula	Pequena	Adequada para dispositivos passivos de alto Q; Operação até faixa milimétrica
Microfita suspensa	Baixa	Pequena	Adequada para faixa alta de microondas e ondas milimétricas
Microfita invertida	Baixa	Pequena	Adequada para dispositivos passivos de alto Q; Inconveniente para montagens de dispositivos ativos
Guia coplanar (CPW)	Média	Média	Fácil conexão de elementos em série ou shunt; Adequado para MMIC e componentes não-recíprocos com ferrita

Fonte: B. Bhat e S. K. Koul, Analysis, design and applications of fin lines, Norwood: Artech House, p. 22, 1987

Características para seleção de linhas

- ✓ Perdas reduzidas
- ✓ Dispersão baixa
- ✓ Largura de faixa ampla
- ✓ Facilidade para montagem de dispositivos ativos
- ✓ Facilidade para integração
- ✓ Valor adequado de potência máxima suportada
- ✓ Facilidade de fabricação e baixo custo

Linhas de transmissão mais utilizadas

- ✓ Microfita
 - Versatilidade é a maior vantagem sobre outros tipos
- ✓ Linha de fenda (slotline)
- ✓ Guia coplanar (CPW)
- ✓ Combinação de tipos pode resultar em desempenho superior

Substratos mais utilizados

- ✓ **Teflon** reforçado com fibra de vidro
 - Para striplines e microfitas em geral
- ✓ **Alumina**
 - Pureza elevada para microfitas, slotlines e suas versões
- ✓ **Quartzo**
 - Utilização na faixa de ondas milimétricas
- ✓ **Ferritas**
 - Para dispositivos não-recíprocos

Características de substratos

Material	ϵ_r	Perdas dielétricas $\tan\delta \times 10^4$ (10 GHz)	Rugosidade superficial (rms, μm)	Características / aplicações
RT-Duroid 5880	2,16–2,24	5-15	0,75–1,0	Flexível/ stripline
RT-Duroid 6010	10,2-10,7	10-60	0,75-1,0	Flexível / microfita / stripline
Epsilam-10	10-13	20	-	Flexível / microfita / stripline
Alumina (99,5%)	9,6-10,4	0,5-3,0	0,05-0,25	Placa / microfita / slotline e variantes
Quartzo (99,9%)	3,75	1	0,006-0,025	Acabamento óptico / microfita
Ferrita	13-16	2	0,25	Porosa / dispositivos não-recíprocos/ microfita / slotline / linha coplanar
safira	$\epsilon_{r\perp}=9,4;$ $\epsilon_{r\parallel}=11,6$	-	-	Anisotropia / microfita/ microfita suspensa

Fonte: B. Bhat e S. K. Koul, Analysis, design and applications of fin lines, Norwood: Artech House, p. 7, 1987

Referências

- ✓ A tecnologia de microfita é consagrada e há grande quantidade de textos na web. Seguem alguns:
- ✓ Matlab: Microstrip Transmission Line
 - <https://www.mathworks.com/help/simrf/ref/microstriptransmissionline.html>
- ✓ Microwaves101.com
 - Textos concisos e formulário para aplicações
 - <https://www.microwaves101.com/encyclopedias/microstrip>
- ✓ Microstrip and Stripline Design
 - <https://www.analog.com/media/en/training-seminars/tutorials/MT-094.pdf>
- ✓ Microfita
 - <https://www.eeweb.com/tools/microstrip-impedance>
- ✓ Symmetric Stripline Impedance
 - <https://www.eeweb.com/tools/symmetric-stripline-impedance>

Alguns softwares para projetos de microfitas

- ✓ Ansoft Designer
- ✓ <https://www.allaboutcircuits.com/tools/microstrip-impedance-calculator/>
- ✓ <https://www.allaboutcircuits.com/tools/microstrip-wavelength-calculator/>
- ✓ <http://www.emtalk.com/mscalc.php>
- ✓ <https://www.pasternack.com/t-calculator-microstrip.aspx>
- ✓ <https://www.microwaves101.com/calculators/1201-microstrip-calculator>
- ✓ <http://blog.rogerscorp.com/2018/07/12/calculate-microwave-impedance-with-transmission-line-modeling-tool/> (texto)
- ✓ <http://blog.rogerscorp.com/2015/09/28/new-online-microwave-impedance-calculator/> (texto)
- ✓ shorturl.at/bips4
 - acesso às calculadoras da Rogers Corp., fabricante de substratos para altas frequências, incluindo microfita, stripline, guia coplanar; muito bom
 - Há manual de instruções de uso