

# Microfita

SEL 369 Micro-ondas/SEL5900 Circuitos de Alta  
Frequência

Amílcar Careli César  
Departamento de Engenharia Elétrica da EESC-USP

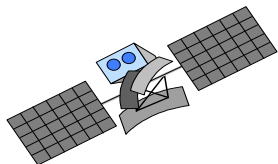
# Atenção!

---



- ✓ Este material didático é planejado para servir de apoio às aulas de **SEL-369 Micro-ondas**, oferecida aos alunos regularmente matriculados no curso de engenharia elétrica/eletrônica e **SEL-5900 Circuitos de Alta Frequência**, oferecida aos alunos regularmente matriculados no curso de pós-graduação em engenharia elétrica.
- ✓ Não são permitidas a reprodução e/ou comercialização do material.
- ✓ solicitar autorização ao docente para qualquer tipo de uso distinto daquele para o qual foi planejado.

# 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

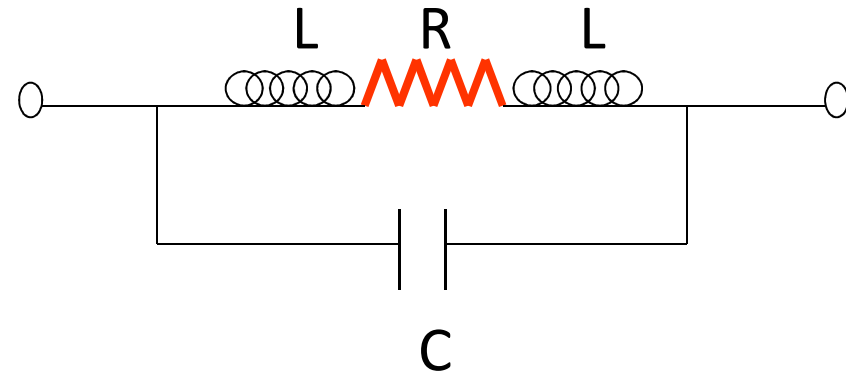
1 GHz  
corresponde  
a  $10^9$  Hz



# Componentes básicos

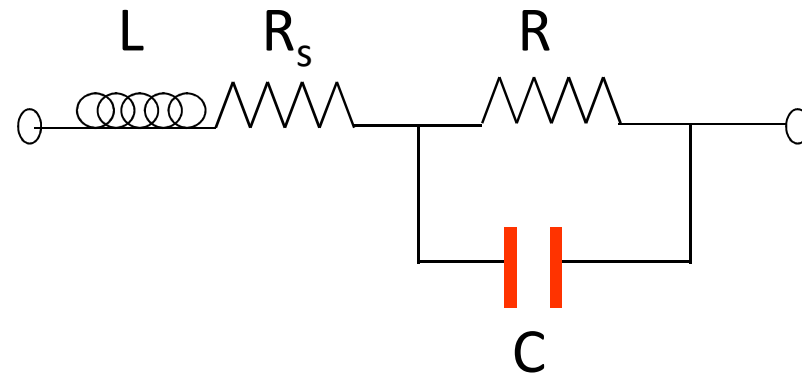
## ✓ Resistor

- filme metálico sobre substrato de alumina ou Berílio
- reatância parasita reduzida até 2 GHz



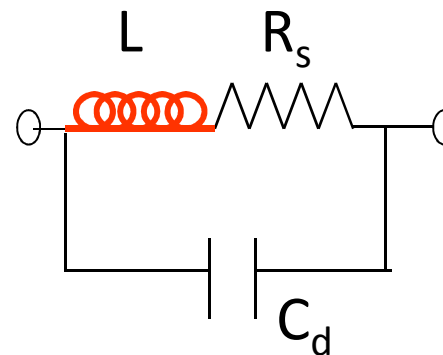
## ✓ Capacitor

- filme metalizado sobre polistireno
- teflon
- policarbonato



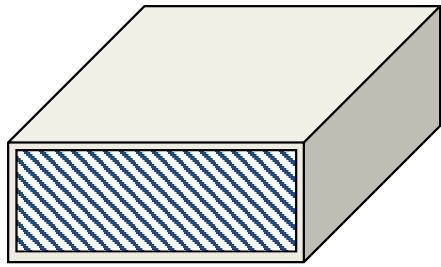
## ✓ Indutor

- planar ou fio

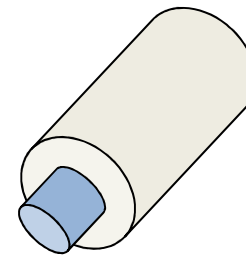


# Tipos de condutores (guias)

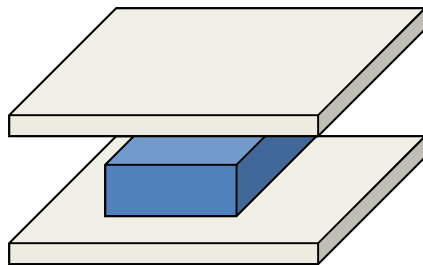
---



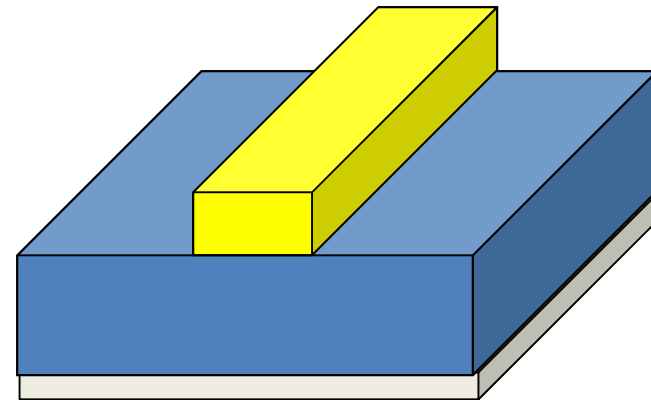
metálico retangular



coaxial



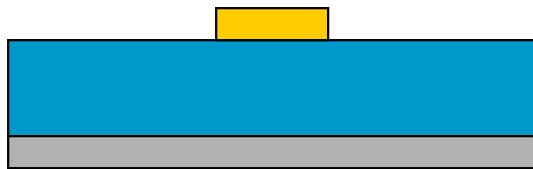
linha de fita



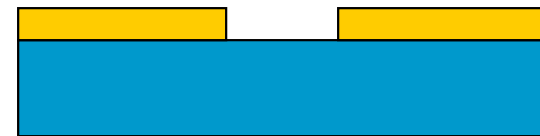
microfita

# Alguns tipos de linhas-1

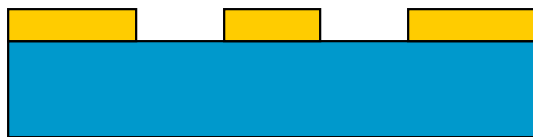
---



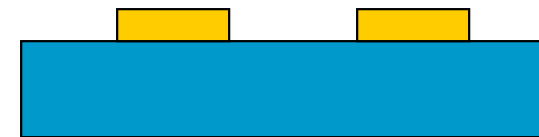
Microfita



Linha de fenda



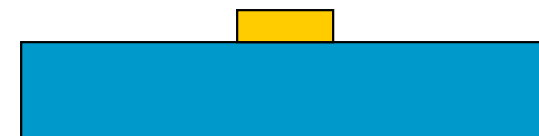
Guia coplanar



Linhas coplanares

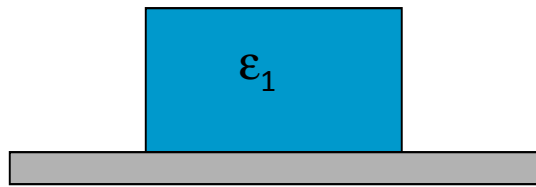


Microfita invertida

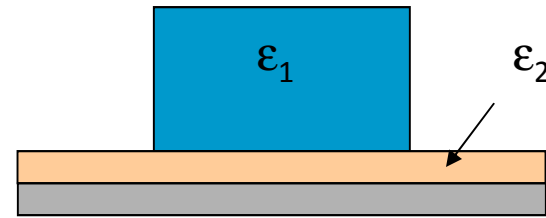


Microfita suspensa

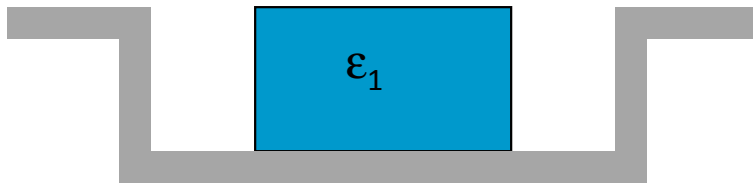
# Alguns tipos de linhas-2



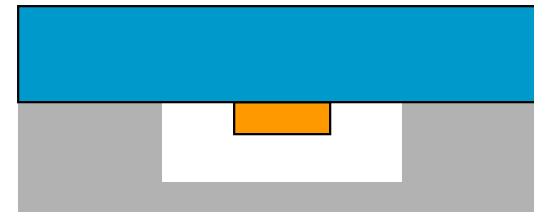
Guia imagem



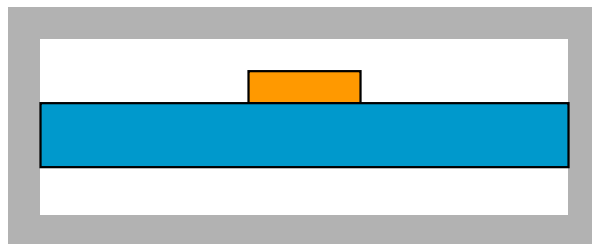
Guia imagem isolado



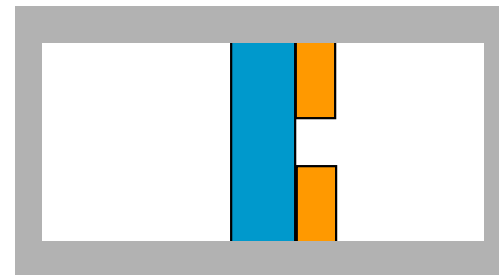
Guia imagem aprisionado



Microfita invertida aprisionada

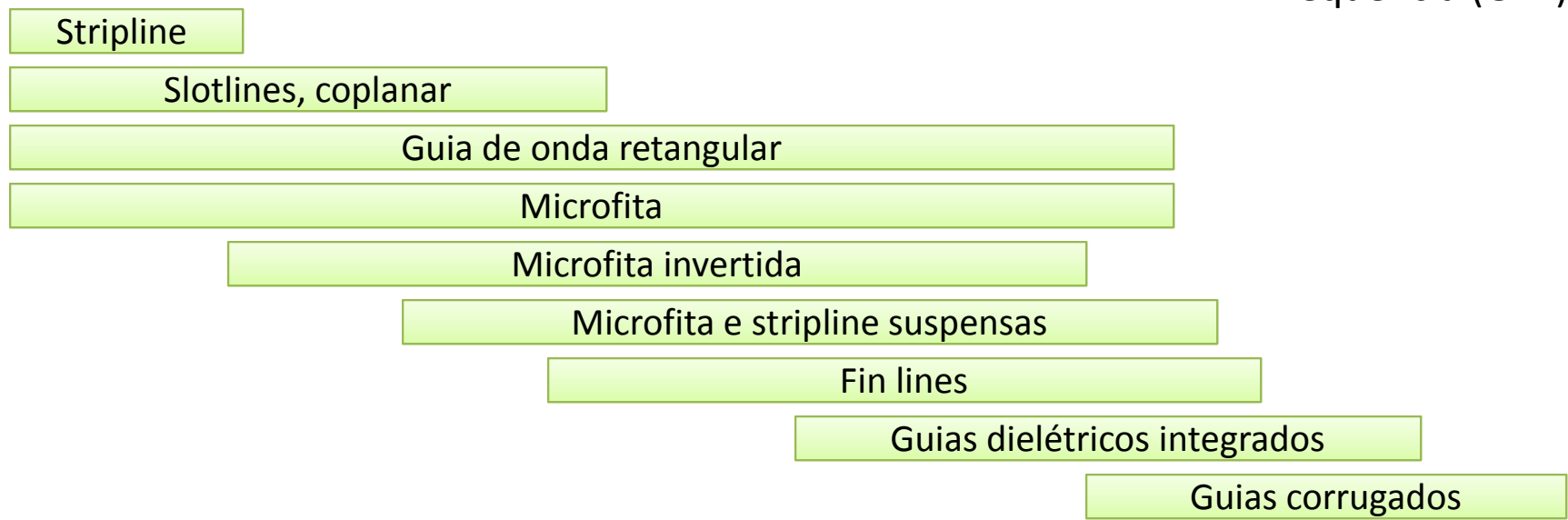
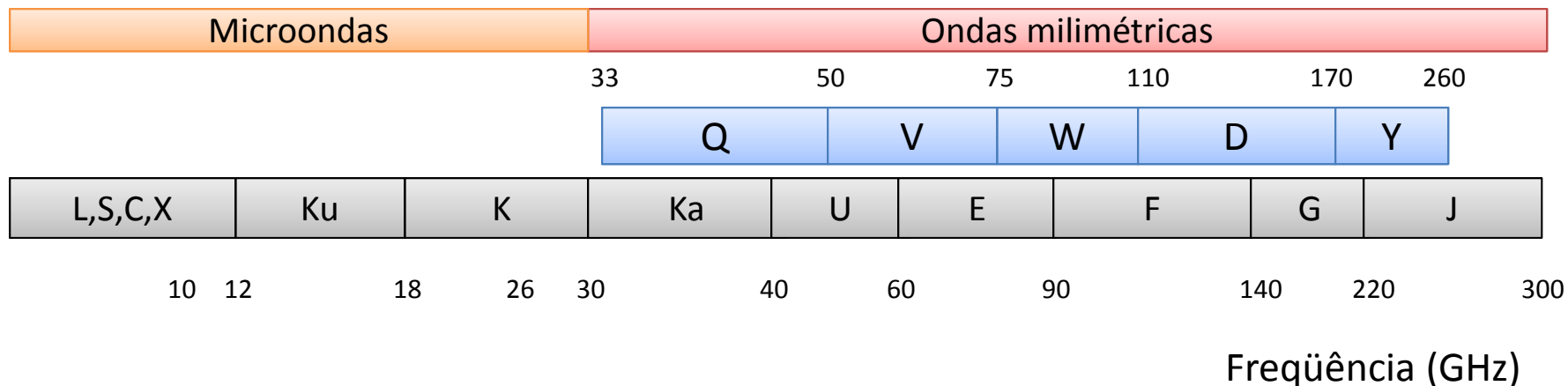


Microfita suspensa



finline

# Faixa de operação de algumas linhas



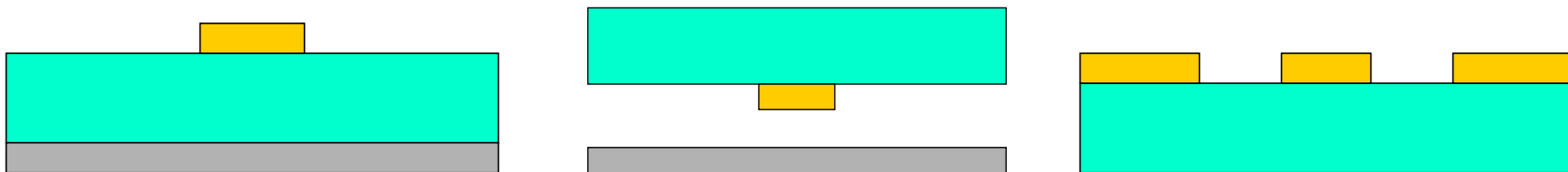
Fonte: B. Bhat e S. K. Koul, *Analysis, design and applications of fin lines*, Norwood: Artech House, p. 43, 1987



# 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)	$\approx 26$



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

# Linhas e características

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

---

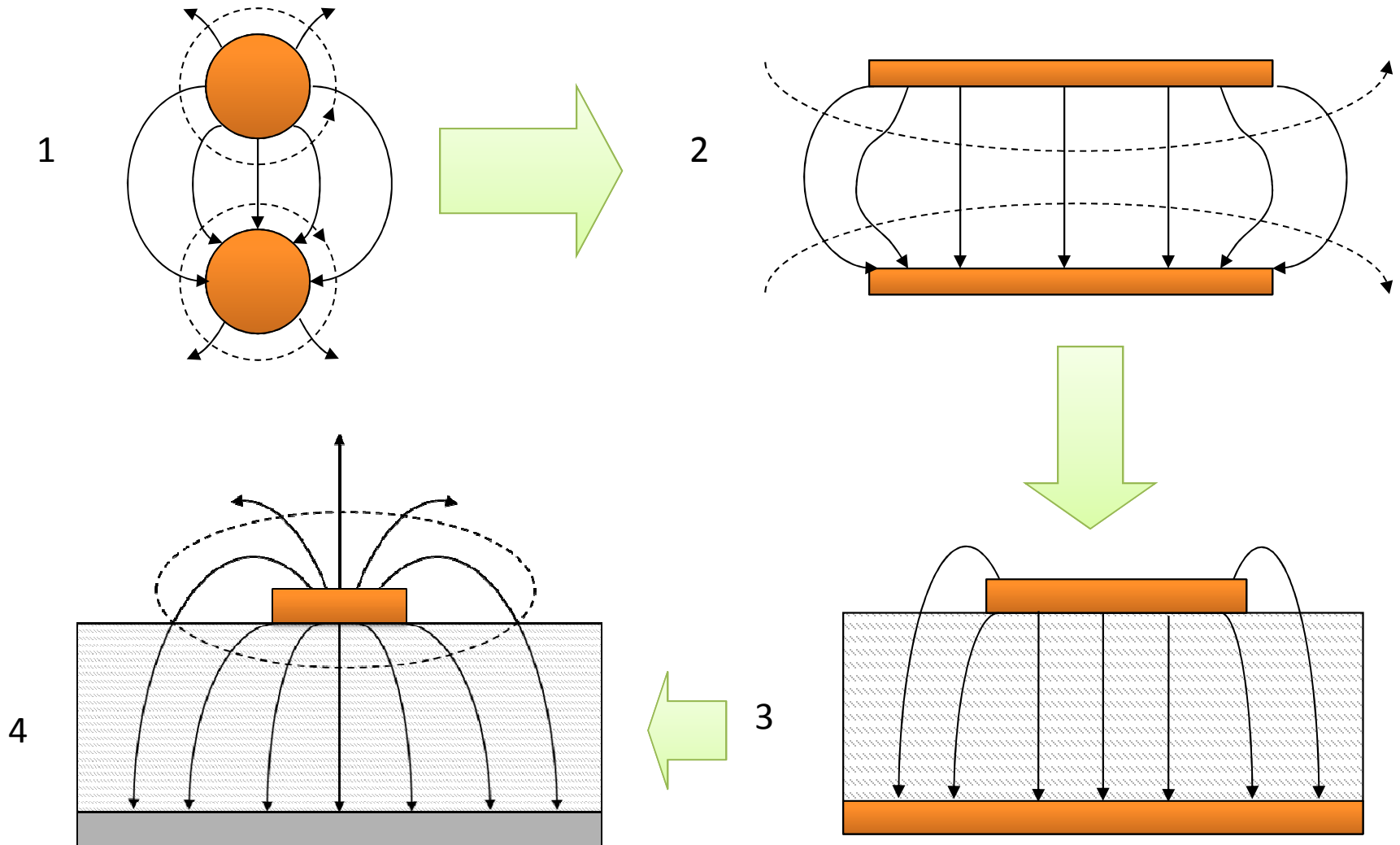
- ✓ **TEFLON reforçado com fibra de vidro**
  - Para striplines e microfitas em geral
- ✓ **ALUMINA**
  - Pureza elevada para microfitas, slotlines e suas versões
- ✓ **QUARTZO**
  - Utilização na faixa de ondas milimétricas
- ✓ **FERRITAS**
  - Para dispositivos não-recíprocos

# Características de substratos

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

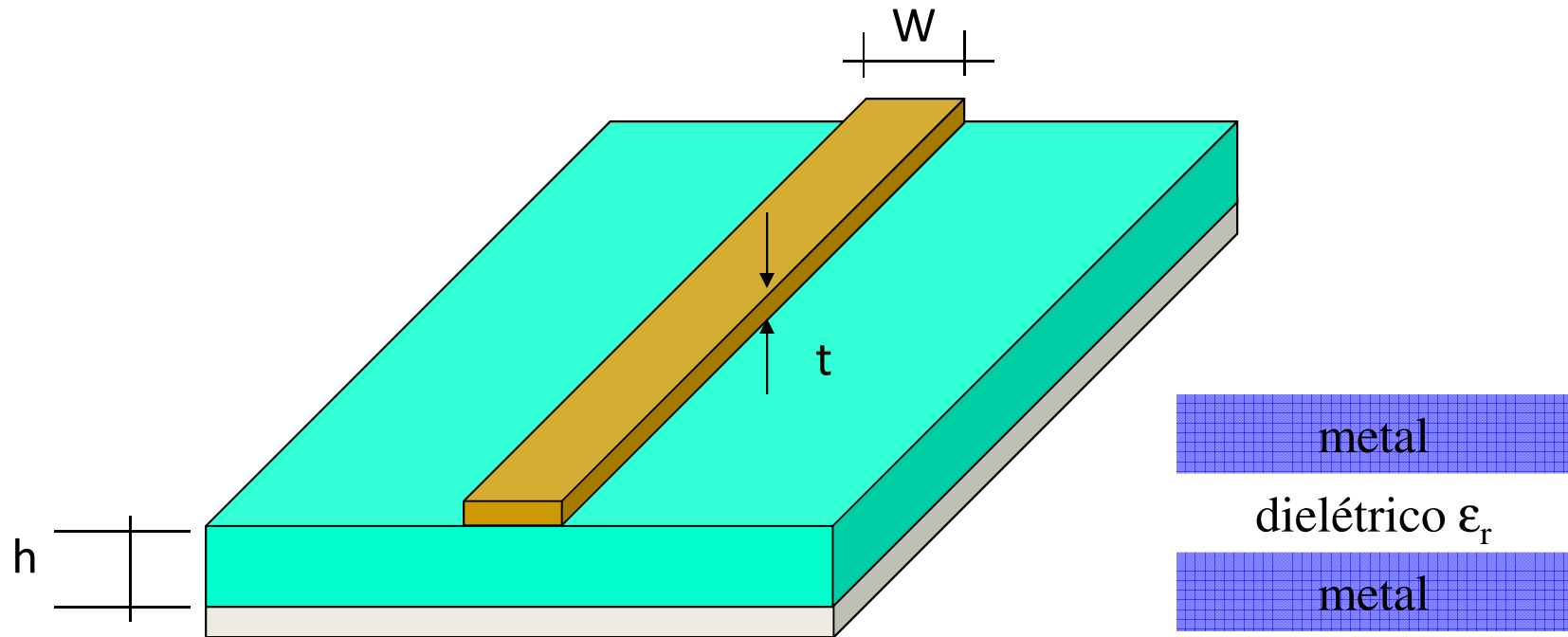
Fonte: B. Bhat e S. K. Koul, Analysis, design and applications of fin lines, Norwood: Artech House, p. 7, 1987

# Da linha de 2 fios à microfita



# Layout da microfita

---

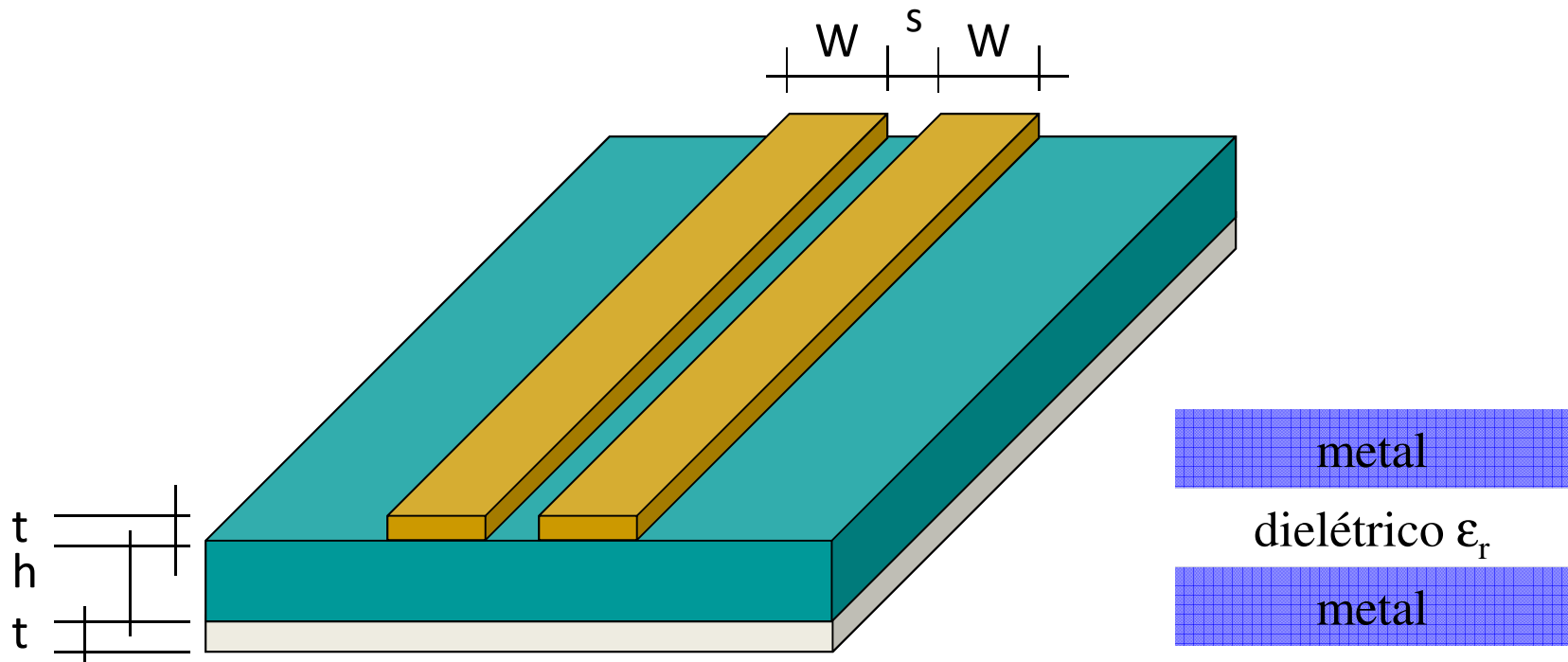


A microfita é fabricada usando técnicas de confecção de circuito impresso-“etching” (gravação)



# Layout da microfita acoplada

---



As linhas de campo eletromagnético acoplam-se de uma linha de transmissão para outra

# Microfita-1

---

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

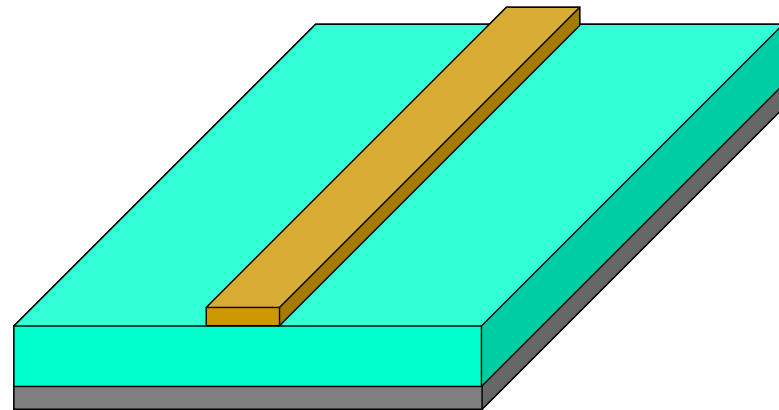
substratos dielétricos típicos

Duroid :  $\epsilon_r = 2,56$

Quartzo:  $\epsilon_r = 3,78$

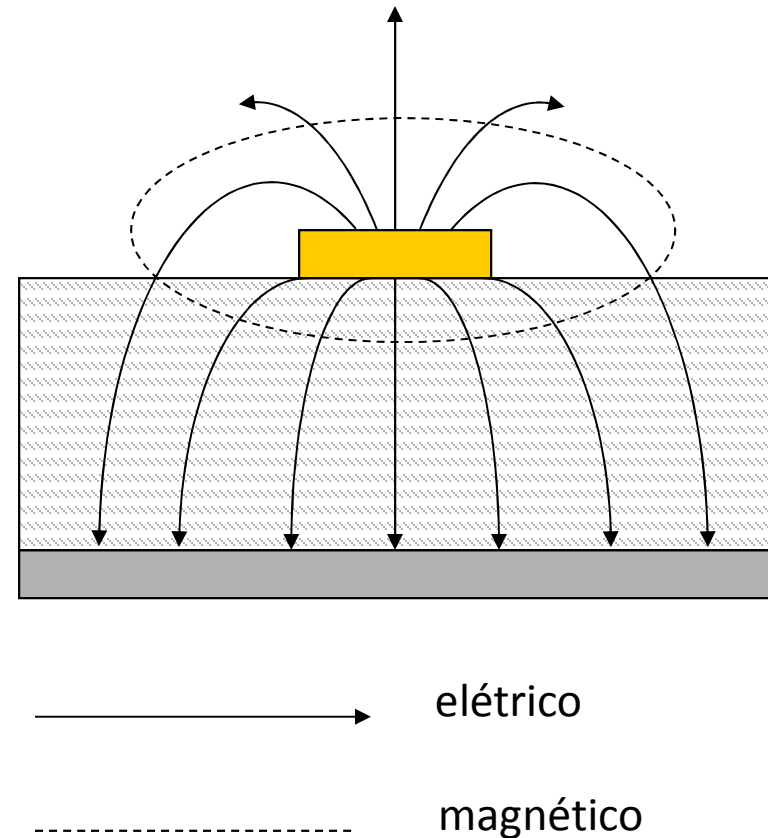
Alumina:  $\epsilon_r = 9,7$

Silício:  $\epsilon_r = 11,7$



# Distribuição de campo eletromagnético

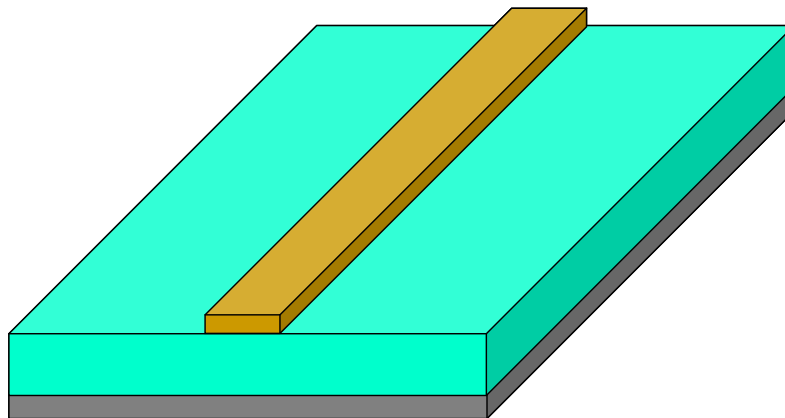
- ✓ Linhas de campo eletromagnético não estão totalmente contidas na região do substrato
  - O modo de propagação não é um modo puro TEM mas sim um modo quase-TEM
    - há componente de campo na direção de propagação



# Microfita-3

---

- ✓ No projeto de microfita determina-se
  - $W$  : largura da microfita para um determinado  $Z_0$
  - $l$  : comprimento da microfita
- ✓ A síntese fornece
  - $W/h$  , na qual  $h$  é a espessura do dielétrico
- ✓  $\epsilon_{\text{eff}}$  : permissividade efetiva



# Velocidade de fase

---

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{eff}}}$$

$c$  : velocidade da luz no vácuo ,  $3 \times 10^8$  m/s

$\epsilon_{eff}$  : cte. dielétrica (relativa) efetiva

A velocidade de fase é a velocidade com que uma onda do tipo TEM propaga-se no material, cuja constante dielétrica relativa é, para todos os efeitos, dada efetivamente por  $\epsilon_{eff}$

# Comprimento de onda

---

$$\lambda_m = \frac{v_p}{f} = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_{eff}}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}}$$

$\lambda_m$ : comprimento de onda na microfita

$f$ : frequência de operação

$\epsilon_{eff}$ : constante dielétrica efetiva

A operação dos dispositivos depende de suas dimensões

As dimensões são proporcionais a  $\lambda$

# Impedância característica-1

---

$$Z_0 = \frac{1}{(v_p C)}$$

C: capacitância/unidade de comprimento

- ✓ Para determinar  $v_p$ ,  $Z_0$  e  $\lambda_m$  é preciso determinar C e  $\epsilon_{\text{eff}}$
- ✓ Há vários métodos para se determinar C e  $\epsilon_{\text{eff}}$ 
  - baixas frequências : método modo quase - TEM é bom
  - frequências elevadas : componentes na direção longitudinal são significativos : método quase- TEM não é muito válido

# Fórmulas para análise-1

---

Fórmulas propostas por I.J. Bahl e D.K. Trivedi

A espessura da camada de cobre é desprezível ( $t/h < 0,005$ )

Caso 1:  $w/h \leq 1$

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln \left( 8 \frac{h}{w} + 0,25 \frac{w}{h} \right)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ \left( 1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-\frac{1}{2}} + 0,04 \left( 1 - \frac{w}{h} \right)^2 \right]$$

$\epsilon_{eff}$ : constante dielétrica efetiva;  $\epsilon_r$ : constante dielétrica

$h$ : espessura do dielétrico;  $w$ : largura da linha



# Fórmulas para análise-2

---

Caso 2:  $w/h \geq 1$

$$Z_0 = \left( \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \right) / \left[ \frac{w}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left( \frac{w}{h} + 1,444 \right) \right]$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( 1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

$\epsilon_{eff}$ : constante dielétrica efetiva;  $\epsilon_r$ : constante dielétrica  
h: espessura do dielétrico; w: largura da linha

# Fórmulas para análise-3

---

Para  $w/h \geq 0,6$

$$\lambda_m = \left( \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \right) \sqrt{\frac{\epsilon_r}{1 + 0,63 (\epsilon_r - 1) \left( \frac{w}{h} \right)^{0,1255}}}$$

$\lambda_m$ : comprimento de onda na microfita

$\lambda_0$ : comprimento de onda no vácuo

$\epsilon_r$ : constante dielétrica

$h$ : espessura do dielétrico;  $w$ : largura da linha

# Fórmulas para análise-4

---

Para  $w/h < 0,6$

$$\lambda_m = \left( \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \right) \sqrt{\frac{\epsilon_r}{1 + 0,6(\epsilon_r - 1) \left( \frac{w}{h} \right)^{0,0297}}}$$

$\lambda_m$ : comprimento de onda na microfita

$\lambda_0$ : comprimento de onda no vácuo

$\epsilon_r$ : constante dielétrica

$h$ : espessura do dielétrico;  $w$ : largura da linha

# Fórmulas para projetos

---

Fórmulas válidas para  $t/h \leq 0,005$

Caso 1:  $w/h \leq 2$

$$\frac{w}{h} = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2}$$

Caso 2:  $w/h > 2$

$$\frac{w}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[ \ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right] \right\}$$

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left( 0,23 + \frac{0,11}{\epsilon_r} \right) \quad B = \frac{377\pi}{2Z_0 \sqrt{\epsilon_r}}$$

# Inclusão da espessura do cobre (t)

---

efeito de  $t$  : aumentar a capacitância

correção : substituir  $W$  por  $W_{eff}$

para  $t < h$  e  $t < W/2$  ( sempre satisfeita para substratos comerciais )

$$\text{Para } \frac{w}{h} \geq \frac{1}{2\pi} \quad \frac{W_{eff}}{h} = \frac{w}{h} + \frac{t}{\pi h} \left( 1 + \ln \frac{2h}{t} \right)$$

$$\text{Para } \frac{w}{h} \leq \frac{1}{2\pi} \quad \frac{W_{eff}}{h} = \frac{w}{h} + \frac{t}{\pi h} \left( 1 + \ln \frac{4\pi w}{t} \right)$$

# Efeito da dispersão-1

---

Quando o modelo quase-**TEM** não é válido,  $Z_0$  e  $\epsilon_{eff}$  variam com a frequência e a linha é dita dispersiva

$f_0$  : frequência abaixo da qual a dispersão é desprezível

$$f_0 \left( em \text{ GHz} \right) = 0,3 \left[ \frac{Z_0}{h \sqrt{\epsilon_r - 1}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$h$  é dado em cm e  $Z_0$  em ohms

# Efeito da dispersão-2

---

O efeito da dispersão sobre  $\epsilon_{eff}$  é avaliado por meio de:

$$\epsilon_{eff}(f) = \epsilon_r - \frac{(\epsilon_r - \epsilon_{eff})}{1 + G \left(\frac{f}{f_p}\right)^2} \quad f \text{ e } f_p \text{ em GHz}$$

onde  $f_p = \frac{Z_0}{8\pi h}$  e  $G = 0,6 + 0,009Z_0$  h em cm

para  $f_p \gg f, \epsilon_{eff}(f) \approx \epsilon_{eff}$

As linhas de alta impedância em substratos finos são menos dispersivas

---

# Efeito da dispersão-3

---

Cálculo da impedância característica

$$Z_0(f) = \frac{377h}{W_{eff}(f) \sqrt{\epsilon_{eff}(f)}}$$

Na qual

$$W_{eff}(f) = W + \frac{[W_{eff}(0) - W]}{1 + \left(\frac{f}{f_p}\right)^2} \quad e \quad W_{eff}(0) = \frac{377h}{Z_0(0) \sqrt{\epsilon_{eff}(0)}}$$



# Atenuação em microfita-1

---

$\alpha$  : fator de atenuação  $\alpha_d$  : perda dielétrica;  $\alpha_c$  : perda por condução

$$\alpha = \alpha_d + \alpha_c$$

Para dielétrico com baixas perdas:

$$\alpha_d = 27,3 \left( \frac{\epsilon_r}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \right) \left[ \frac{(\epsilon_{eff} - 1)}{(\epsilon_r - 1)} \right] \left( \frac{tg \delta}{\lambda_0} \right), \frac{dB}{cm}$$

onde  $tg \delta = \frac{\sigma}{\omega \epsilon}$  : tangente de perdas do material (adimensional)

$\sigma$  : condutividade do dielétrico;  $\epsilon$ : cte. dielétrica;  
 $\omega$ : frequência angular

---

# Atenuação em microfita-2

---

Para dielétricos com  $\sigma \neq 0$ , a perda causada pelo dielétrico pode ser calculada por:

$$\alpha_d = 4,34 \left( \frac{\epsilon_{eff} - 1}{\sqrt{\epsilon_{eff}} (\epsilon_r - 1)} \right) \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \sigma, \quad \frac{dB}{cm}$$

na qual

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}, \frac{F}{m} \quad \text{e} \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}, \frac{H}{m}$$

# Atenuação em microfita-3

---

Cálculo de  $\alpha_c$

Caso 1:  $W/h \rightarrow \infty$

$$\alpha_c = \left( \frac{8,68}{Z_0 W} \right) R_s \quad \text{onde} \quad R_s = \sqrt{\frac{\pi f \mu_0}{\sigma}}$$

Caso 2:  $W/h \leq 1/2\pi$

$$\alpha_c = \left( \frac{8,68 R_s P}{2 \pi Z_0 h} \right) \left[ 1 + \left( \frac{h}{W_{eff}} \right) + \left( \frac{h}{\pi W_{eff}} \right) \left( \ln \frac{4\pi W}{t} + \frac{t}{W} \right) \right]$$

# Atenuação em microfita-4

---

Caso 3:  $1/2\pi < W/h \leq 2$

$$\alpha_c = \frac{8,68 R_s P Q}{2\pi Z_0 h}$$

na qual

$$P = 1 - \left( \frac{W_{eff}}{4\pi} \right)^2$$

$$Q = 1 + \frac{h}{W_{eff}} + \left( \frac{h}{\pi W_{eff}} \right) \left( \ln \frac{2h}{t} - \frac{t}{h} \right)$$

# Atenuação em microfita-5

---

Caso 4:  $W/h \geq 2$

$$\alpha_c = \left( \frac{8,68 R_s Q}{Z_0 h} \right) \left\{ \frac{W_{eff}}{h} + \left( \frac{2}{\pi} \right) \ln \left[ 2\pi \exp \left( \frac{W_{eff}}{2h} + 0,94 \right) \right] \right\}^{-2} \left[ \frac{W_{eff}}{h} + \frac{\frac{W_{eff}}{\pi h}}{\frac{W_{eff}}{2h} + 0,94} \right]$$

na qual  $R_s = \sqrt{\frac{\pi f \mu_0}{\sigma}}$  e  $Q = 1 + \frac{h}{W_{eff}} + \left( \frac{h}{\pi W_{eff}} \right) \left( \ln \frac{2h}{t} - \frac{t}{h} \right)$

Em geral,  $\alpha_d \geq \alpha_c$  em substratos dielétricos

$\alpha_d \cong \alpha_c$ , em substratos de sílcio

# Fator de qualidade

---

O fator de qualidade é:  $Q = \frac{\beta}{2\alpha}$

como  $\beta = \frac{2\pi}{\lambda_m}$  então  $Q = \frac{\pi}{\alpha\lambda_m}$

ou  $Q = \frac{8,686\pi}{\alpha\lambda_m} \text{ dB}$

ou  $Q = \frac{27,3}{\alpha} \text{ dB} / \lambda_m$  1 dB corresponde a 8,686 nepers

$\alpha$ : fator de perdas;  $\lambda_m$ : comprimento de onda na microfita

# Perda por radiação-1

---

É especificada pelo fator de qualidade de radiação

$$Q_r = \frac{Z_0}{480\pi \left( \frac{h}{\lambda_0} \right) F}$$

Onde F é o fator de radiação,

$$F = \frac{\varepsilon_{eff}(f) + 1}{\varepsilon_{eff}(f)} - \frac{(\varepsilon_{eff}(f) - 1)^2}{2(\varepsilon_{eff}(f))^{\frac{3}{2}}} \ln \left[ \frac{\sqrt{\varepsilon_{eff}(f) + 1}}{\sqrt{\varepsilon_{eff}(f) - 1}} \right]$$

# Perda por radiação-2

---

O fator de qualidade total é dado por

$$\frac{1}{Q_T} = \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_r}$$

onde

$$Q_c = \frac{\pi}{\alpha_c \lambda_m} \quad \text{e} \quad Q_d = \frac{\pi}{\alpha_d \lambda_m}$$

$Q_c$ : devido às perdas no condutor

$Q_d$ : devido às perdas no dielétrico

$Q_r$ : devido às perdas por radiação