

# LINHAS DE TRANSMISSÃO PLANARES

---

**PSI 3483**

Ondas Eletromagnéticas em Meios Guiados

Profa. Dra. Fatima Salete Correra

# Sumário

- Introdução – Estruturas Planares
  - PCB, MIC e MMIC
- Linhas de transmissão planares
  - STRIPLINE
  - MICROSTRIP LINE
  - CPW – COPLANAR WAVEGUIDE
  - SLOTLINE
  - LINHAS ACOPLADAS
- Microstrip line
- LineCalc/ADS
- Aplicações

# Introdução

## Linhas de transmissão planares

- Estruturas leves, discretas e conformáveis
- Aplicação
  - Circuitos planares de micro-ondas
    - Acopladores, atenuadores, divisores de potência, filtros, circuladores, isoladores, etc.
    - Osciladores, amplificadores, conversores de frequência, etc.
  - Antenas de micro-ondas
- Tecnologias de fabricação
  - **MIC** – Circuitos Integrados de Micro-ondas
  - **MMIC** – Circuitos Integrados Monolíticos de Micro-onda

# Tecnologias Planares

## MIC - Circuitos Integrados de Micro-ondas

*Microwave Integrated Circuit*

**Filmes Finos**  
**Substratos Cerâmicos**

**Filmes Espessos**  
**Substratos Cerâmicos**

**Circuito Impresso**  
**Substratos Flexíveis**

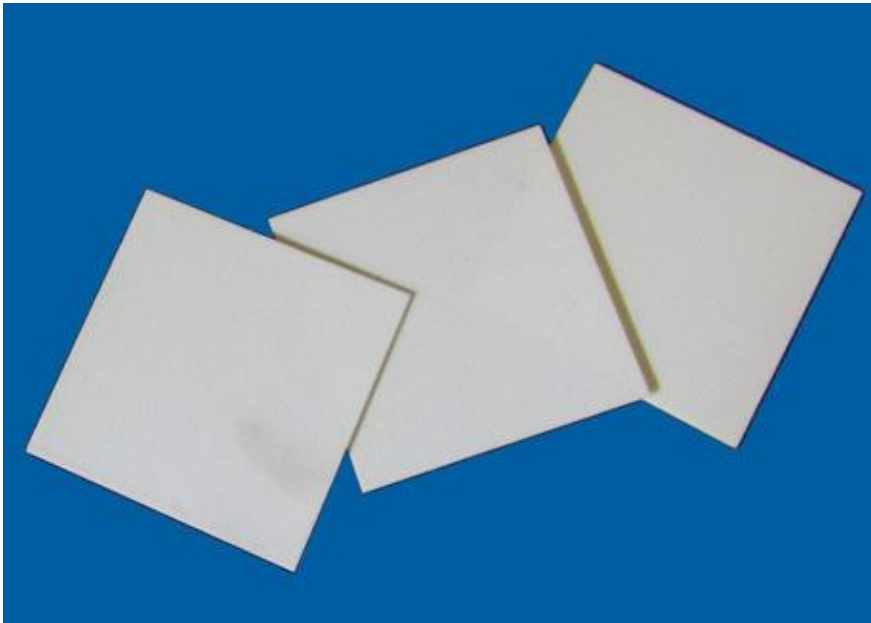
## MMIC - Circuitos Integrados Monolíticos de Micro-ondas

*Microwave Monolithic Integrated Circuit*

**Monolítica**  
**Substratos Semicondutores**

# Tecnologias Planares

Exemplo de substrato cerâmico de micro-ondas



HIGHTECH CERAMICS

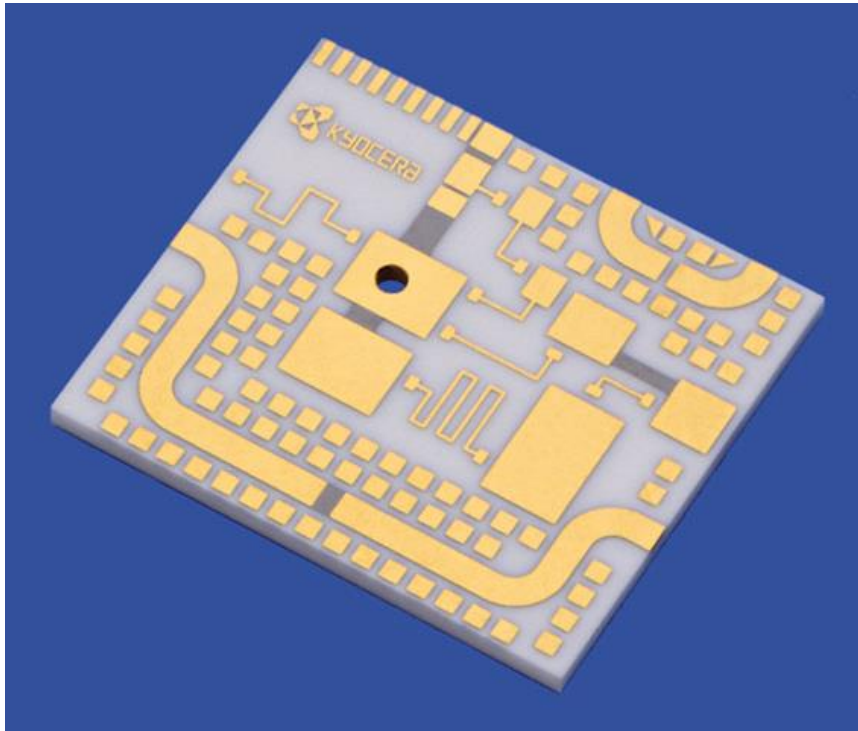
- Aplicações militares
- Aplicações espaciais

## Substrato de Alumina

- Lâminas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 
  - Alta pureza
  - Alta dureza
  - Boa dissipação térmica
- Metalização
  - Camadas de resistivas: NiCr
  - Camadas condutivas: Ouro
- Suporta
  - Faixa ampla de temperatura
  - Vibração e choque

# Tecnologias Planares

Exemplo de substrato cerâmico de micro-ondas



Lâmina com MIC fotogravada,  
da Kyocera

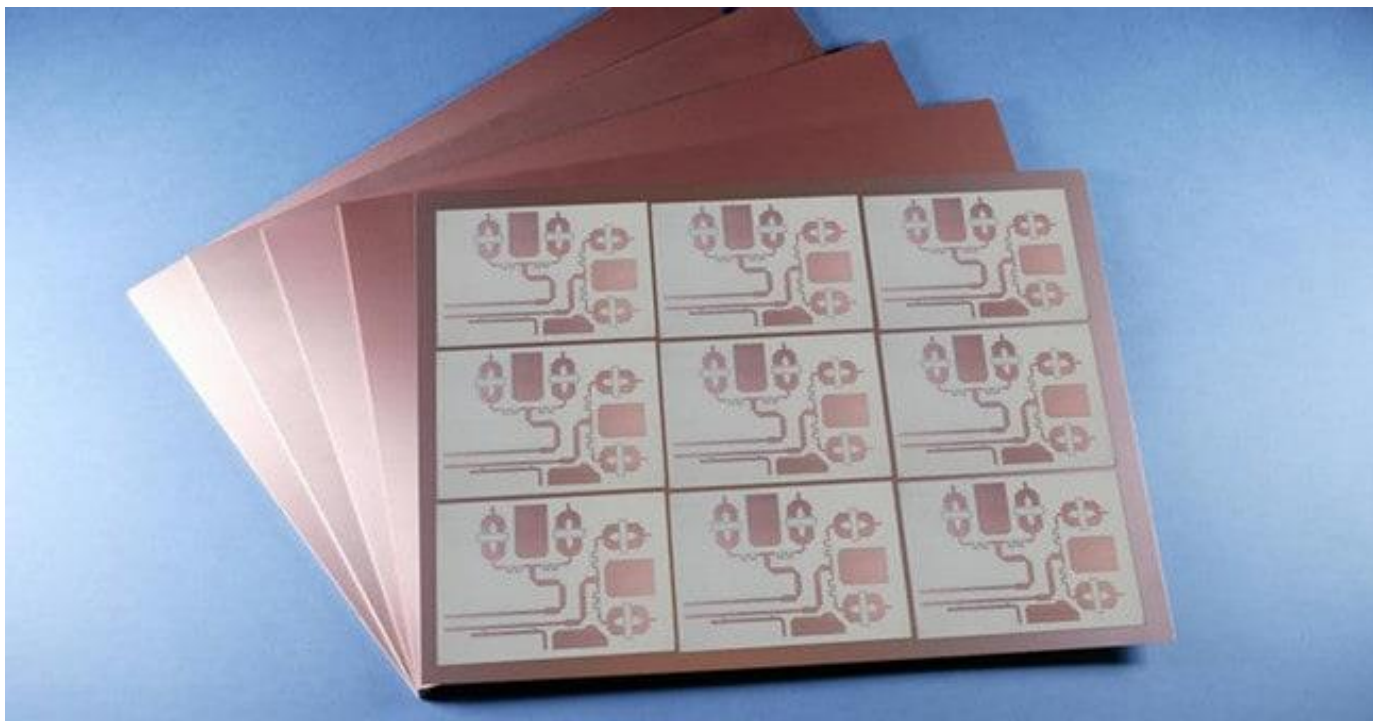
## Circuito Integrado de Micro-ondas (MIC)

Lâmina de teste de fabricação

- Pad's e linhas de transmissão planares
  - Camada condutiva de Ouro (cor dourado)
- Resistores integrados ao substrato
  - Camadas de resistivas: NiCr (cor cinza)

# Tecnologias Planares

Exemplo de substrato flexíveis de micro-ondas



“High-frequency laminates – Rogers Co.

Placas de material dielétricos

Recobertos por Cobre nas duas faces

# Tecnologias Planares

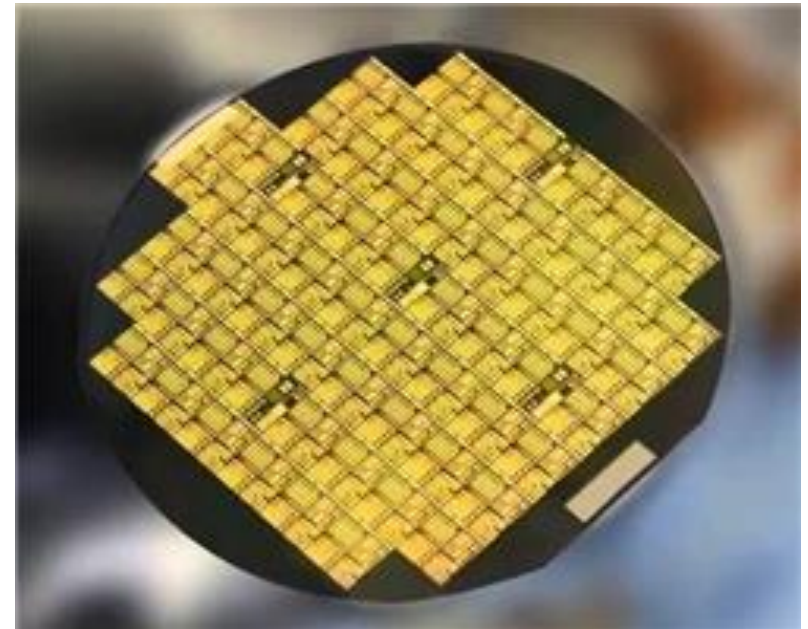
Exemplo de substrato semicondutor de micro-ondas



Lâminas de  
Arseneto de Gálio

## Circuitos Integrados Monolíticos de Micro-ondas - MMICS

- Substrato semi-isolante
- Tecnologia de microeletrônica





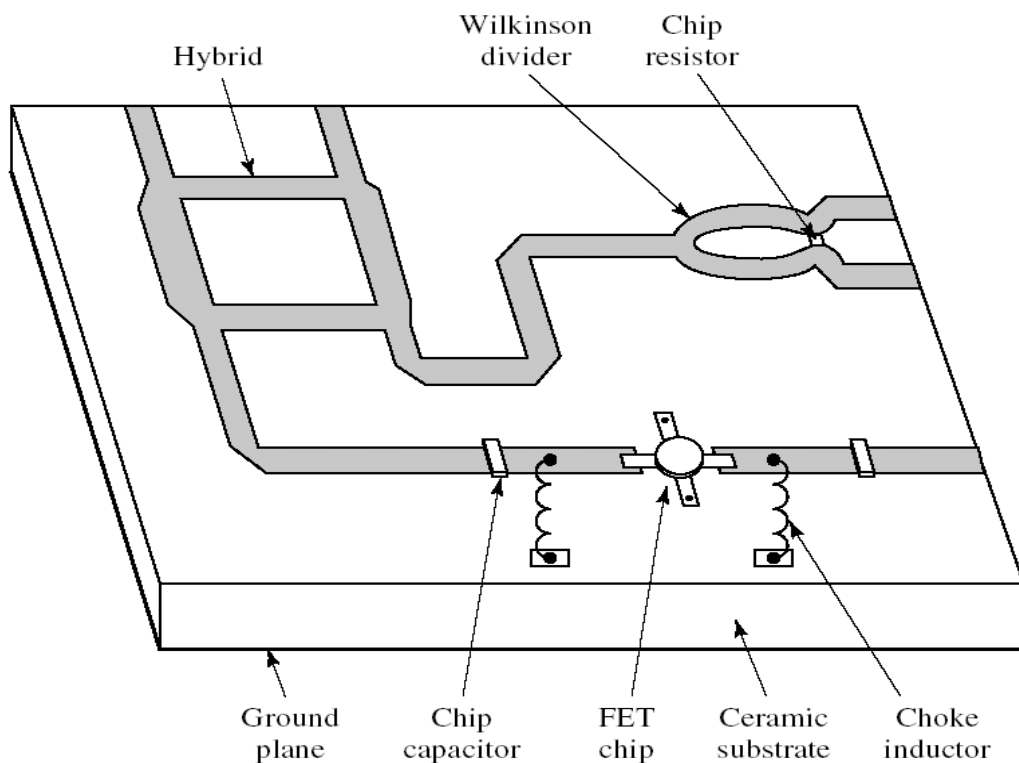
# Tecnologias Planares

- Exemplos de substratos típicos

Substrato	Tecnologia	$\epsilon_r$	Espessura do Substrato	Espessura do Metal
Alumina	MIC	9,8	0,254 e 0,625 mm	~ 5 $\mu\text{m}$
FR-4 Fibra de Vidro	PCB	4,4	0,762 e 1,524 mm	17 $\mu\text{m}$
RT-Duroid-5880	PCB	2,20	0,254 e 0,508 mm	17 $\mu\text{m}$
RT-Duroid-6010	PCB	10,2	0,254 e 0,635 mm	17 $\mu\text{m}$
Arseneto de Gálio	MMIC	12,9	100 a 400 $\mu\text{m}$	~ 5 $\mu\text{m}$

# Tecnologias Planares

- Exemplo de MIC – Circuito Integrado de Micro-ondas



## Substrato dielétrico

- Cerâmico – Ex.: Alumina
- Flexível – Ex. Duroid

## Estruturas metálicas

- Linhas de transmissão

## Componentes discretos soldados

- Transistores
- Capacitores
- Indutores
- Resistores

# Tecnologias Planares

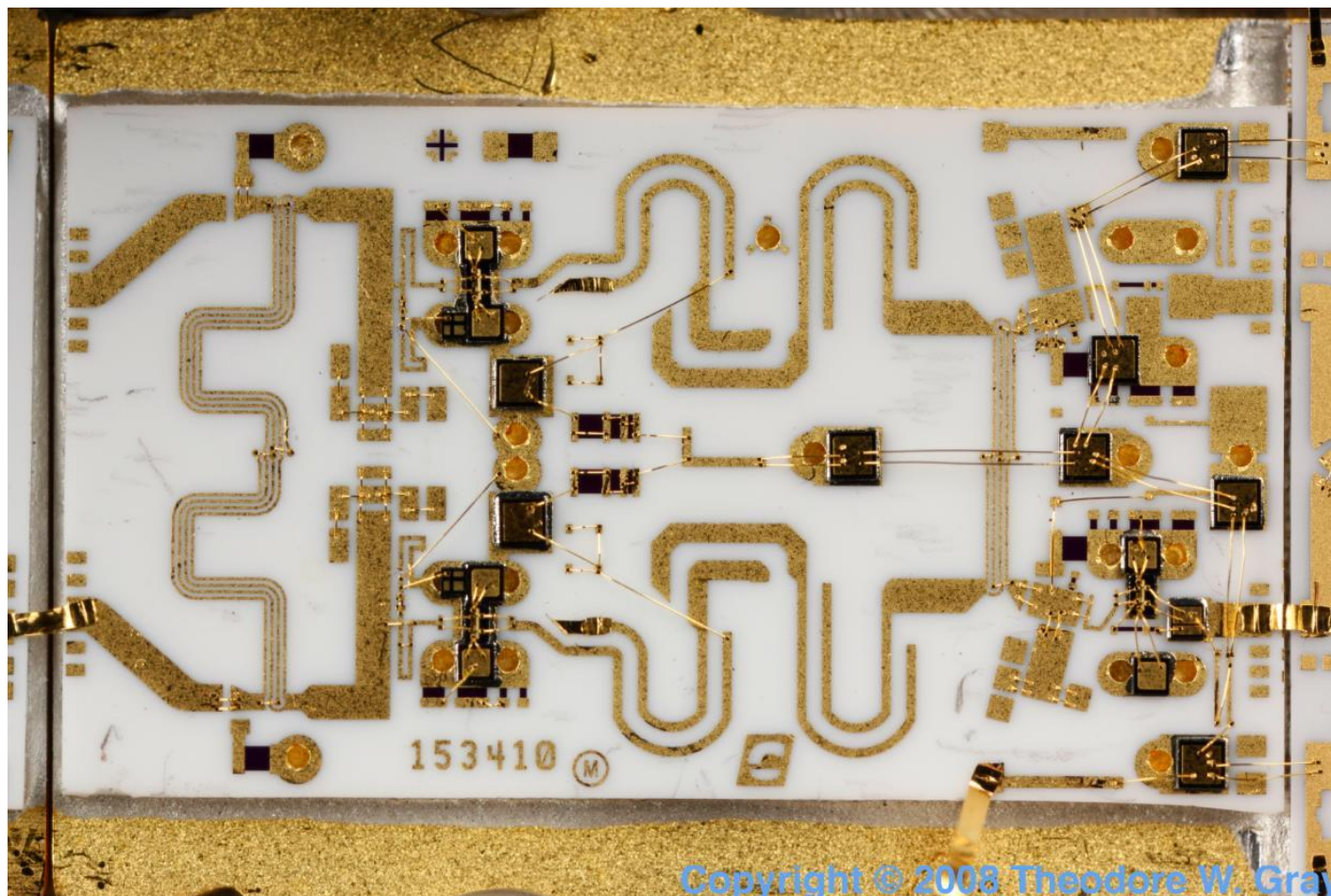
## Circuito Integrado de Micro-ondas em Substrato Flexível



Fonte: <http://theodoregray.com>

# Tecnologias Planares

Circuito Integrado de Micro-ondas em Substrato Cerâmico

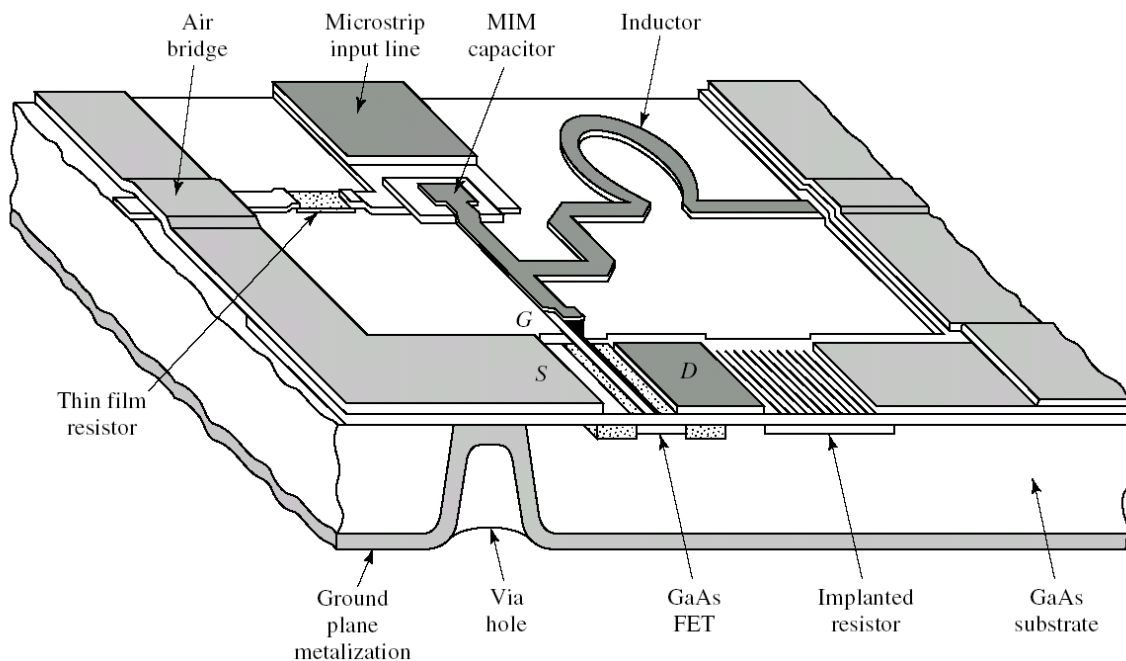


Copyright © 2008 Theodore W. Gray

Fonte: <http://theodoregray.com>

# Tecnologias Planares

- Exemplo de MMIC – Circuito Integrado Monolítico de Micro-ondas



## Estruturas integradas no substrato

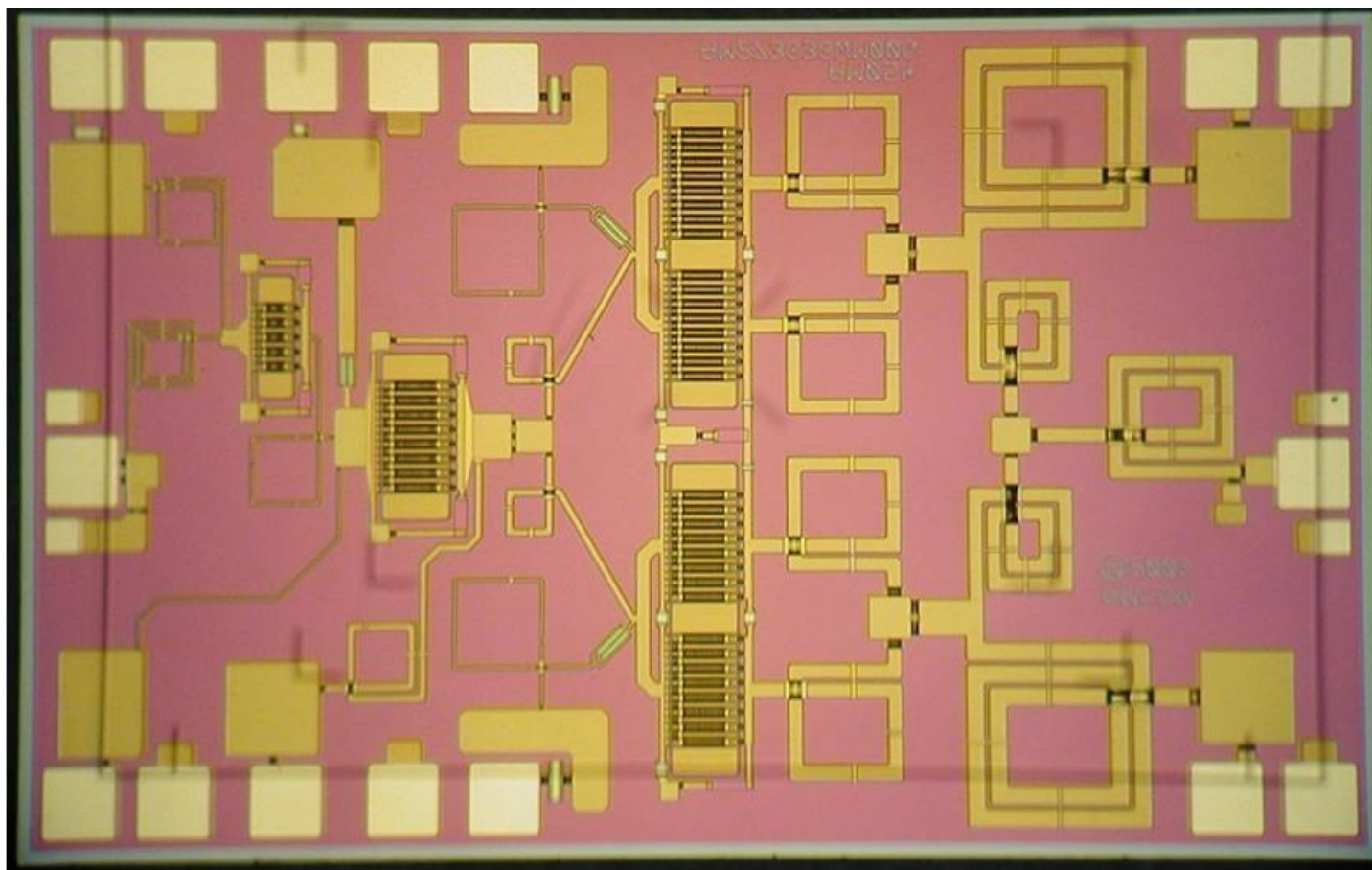
- Tecnologia de várias camadas
- Linhas de transmissão
- Transistores
- Capacitores (MIM e interdigital)
- Indutores espirais planares
- Resistores
- Via hole

## Substrato semiconductor

- Semi-isolante
- Ex.: GaAs – Arseneto de Gálio

# Tecnologias Planares

- Exemplo de MMIC – Circuito Integrado Monolítico de Micro-ondas



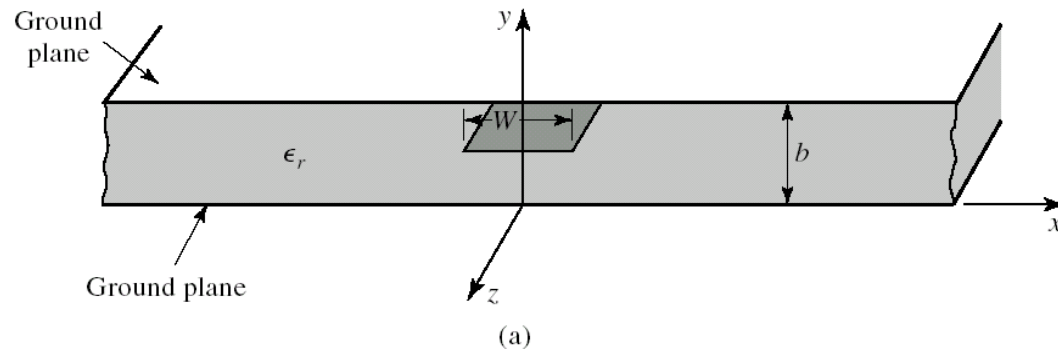
Fonte: <http://dehron.com/>

# Linhas de Transmissão Planares

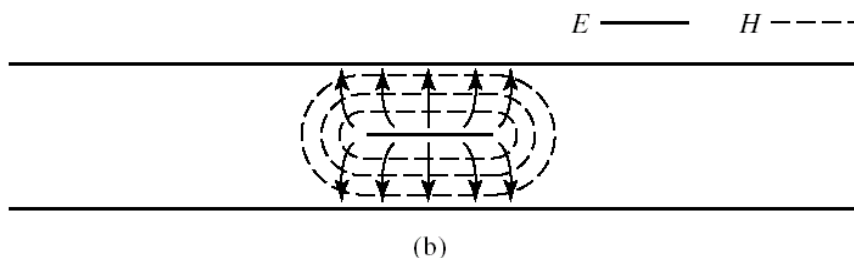
- Linhas de transmissão planares
  - Construídas em camadas metálicas
  - Sobre placas de dielétricos
  - Conduzem o Campo EM ao longo do substrato
- Principais tipos de linhas de transmissão planares
  - STRIPLINE – Linha triplaca
  - MICROSTRIP LINE – Linha de Microfita
  - CPW – COPLANAR WAVEGUIDE – guia de ondas coplanar
  - SLOTLINE – Linhas de fenda
  - COUPLED LINES – linhas acopladas

# Linhas de Transmissão Planares

## • STRIPLINE



- Linha triplaca
- Condutor central envolto pelo substrato
- Plano de terra superior e inferior
- Linhas de campo encerrados no substrato



(a) Estrutura física

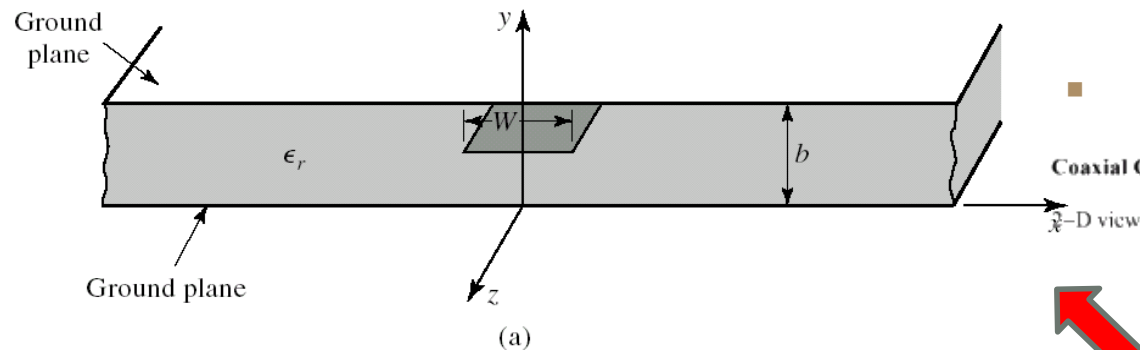
(b) Distribuição dos Campos EM



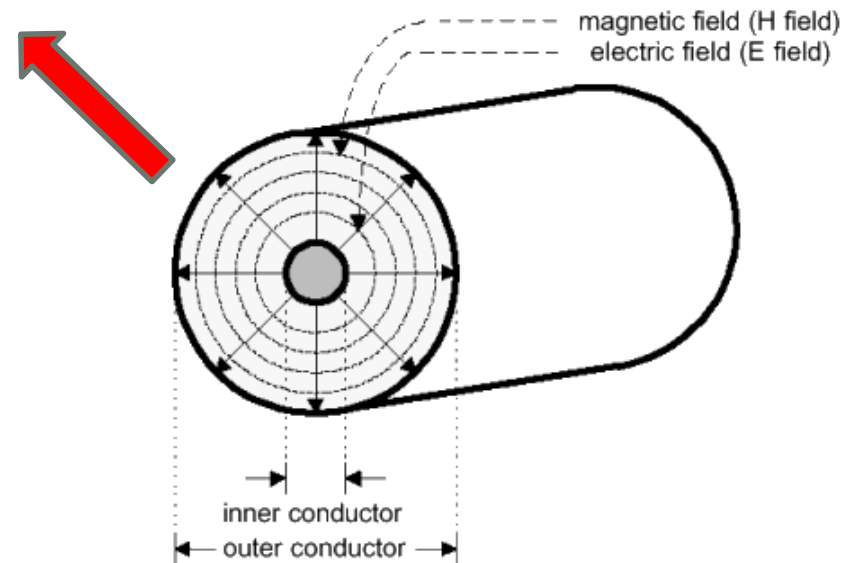
# Linhas de Transmissão Planares

## • STRIPLINE

- Linha triplaca
- Modo de propagação **TEM**
- Como linha coaxial “achatada”

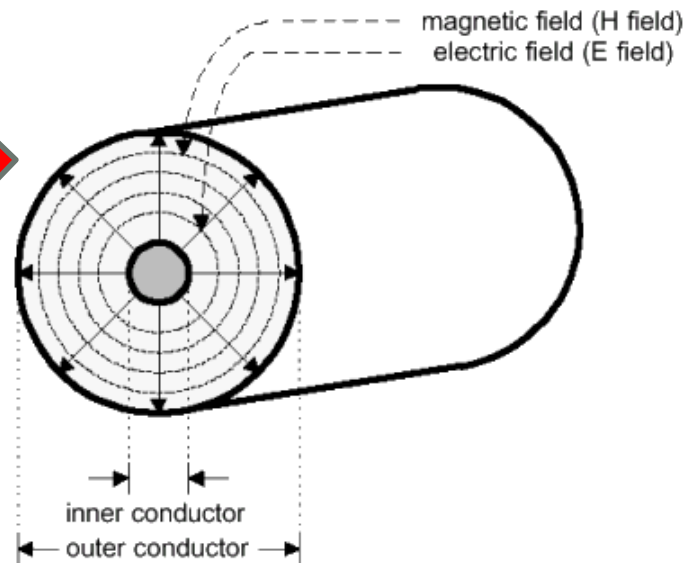


Coaxial Cable  
x-D view



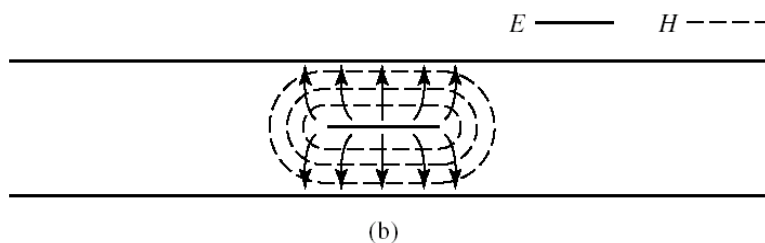
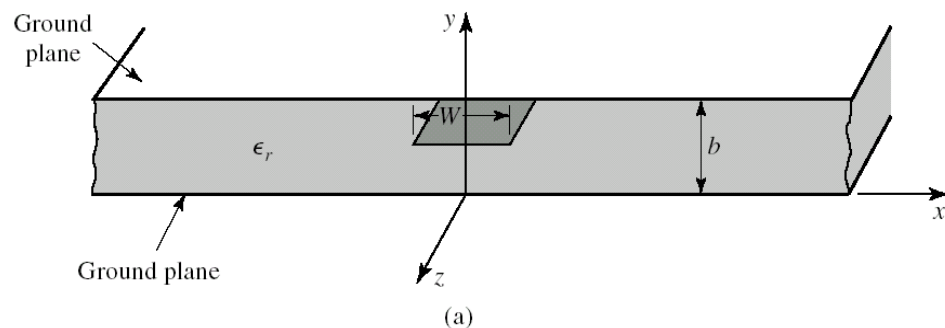
(a) Estrutura física

(b) Distribuição dos Campos EM



# Linhas de Transmissão Planares

## • STRIPLINE



(a) Estrutura física

(b) Distribuição dos Campos EM

### ■ Linha triplaca

### ■ **Vantagem**

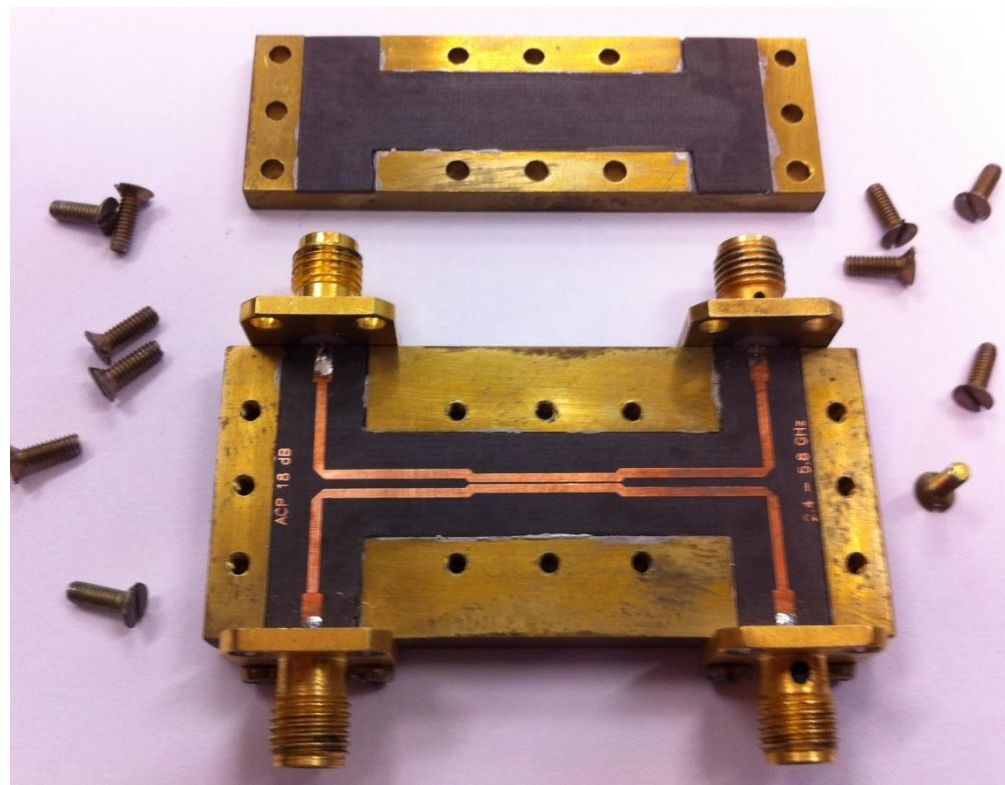
- Blindagem contra Interferências Eletromagnéticas
- Não tem dispersão ( $Z_0$  não varia com a frequência)

### ■ **Desvantagem**

- dificuldade em adicionar componentes

# Linhas de Transmissão Planares

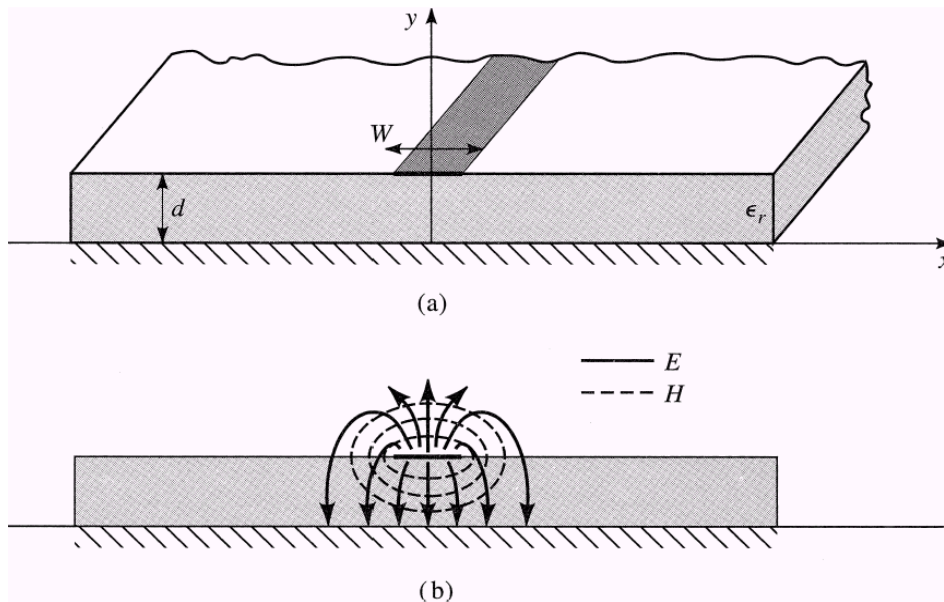
- STRIPLINE



Acoplador banda larga usando linhas acopladas STRIPLINE

# Linhas de Transmissão Planares

- MICROSTRIP LINE (aberta)



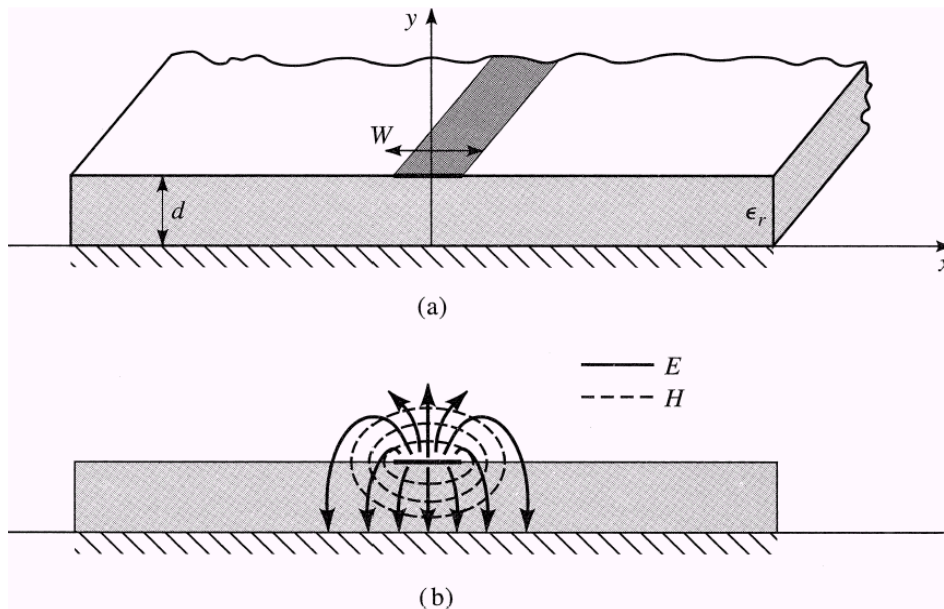
(a) Estrutura física

(b) Distribuição dos Campos EM

- Linha de microfita ou Microlinha de transmissão
- Condutor central aberto no lado superior  $\rightarrow$  ar
- Perdas por irradiação
- Plano de terra na face inferior
- Linhas de campo
  - parte no substrato
  - parte no ar

# Linhas de Transmissão Planares

- MICROSTRIP LINE (aberta)



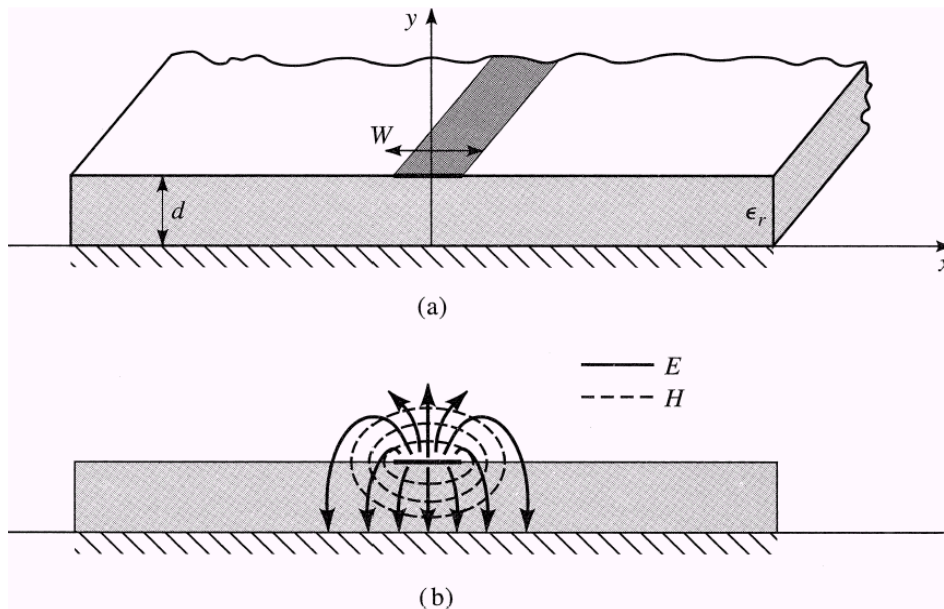
(a) Estrutura física

(b) Distribuição dos Campos EM

- Linha de microfita
- Propagação de campos EM
  - Meio híbrido: ar/dielétrico
  - Constante dielétrica efetiva que varia com a frequência
  - Impedância característica
 
$$Z_0 = Z_0(f) \rightarrow \text{dispersão}$$
- Modo de propagação
  - **Quase-TEM**

# Linhas de Transmissão Planares

- MICROSTRIP LINE (aberta)



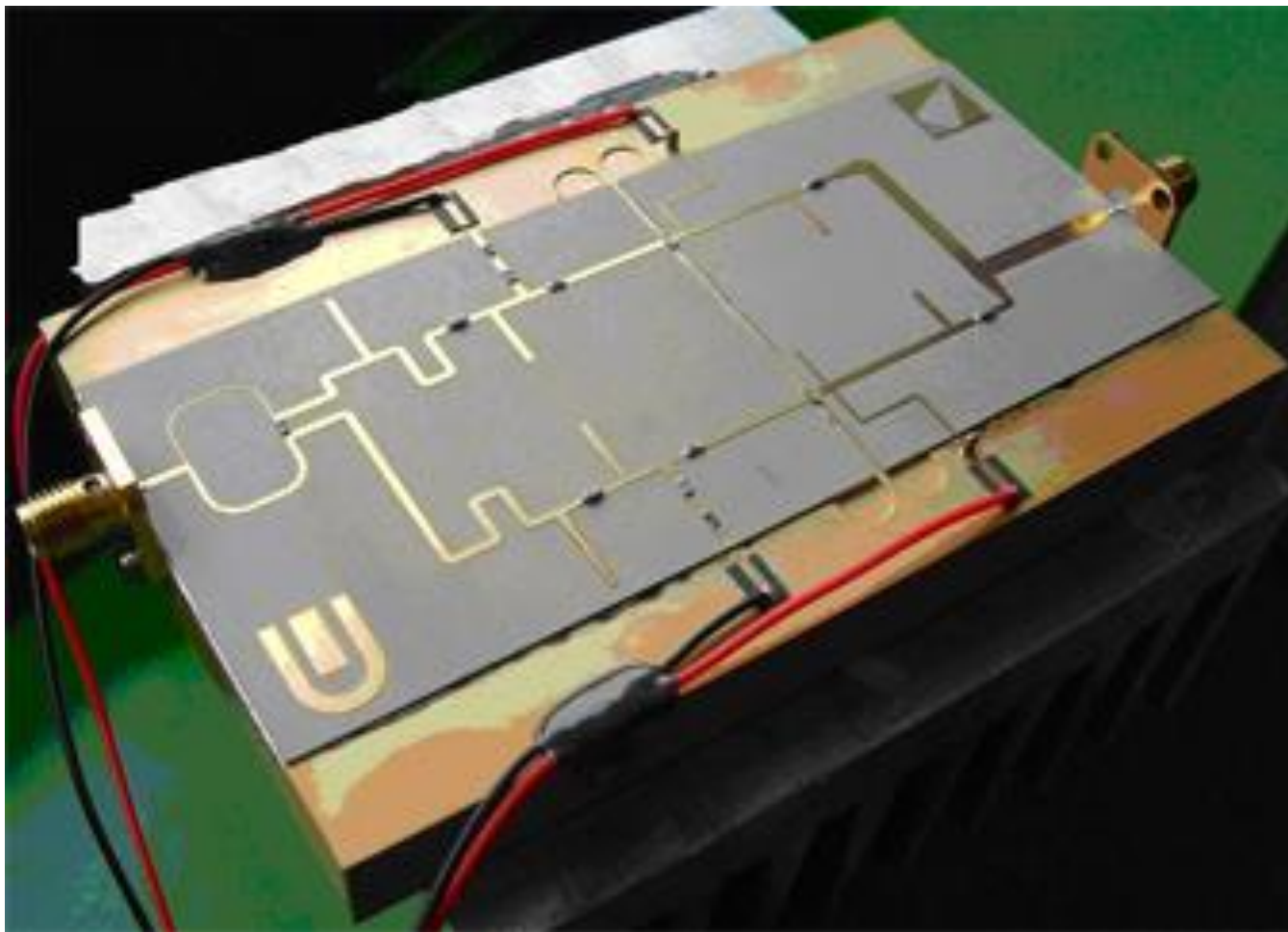
(a) Estrutura física

(b) Distribuição dos Campos EM

- Linha de microfita
- **Vantagem**
  - Facilidade em adicionar componentes
- **Desvantagem**
  - Sujeito a Interferências Eletromagnéticas

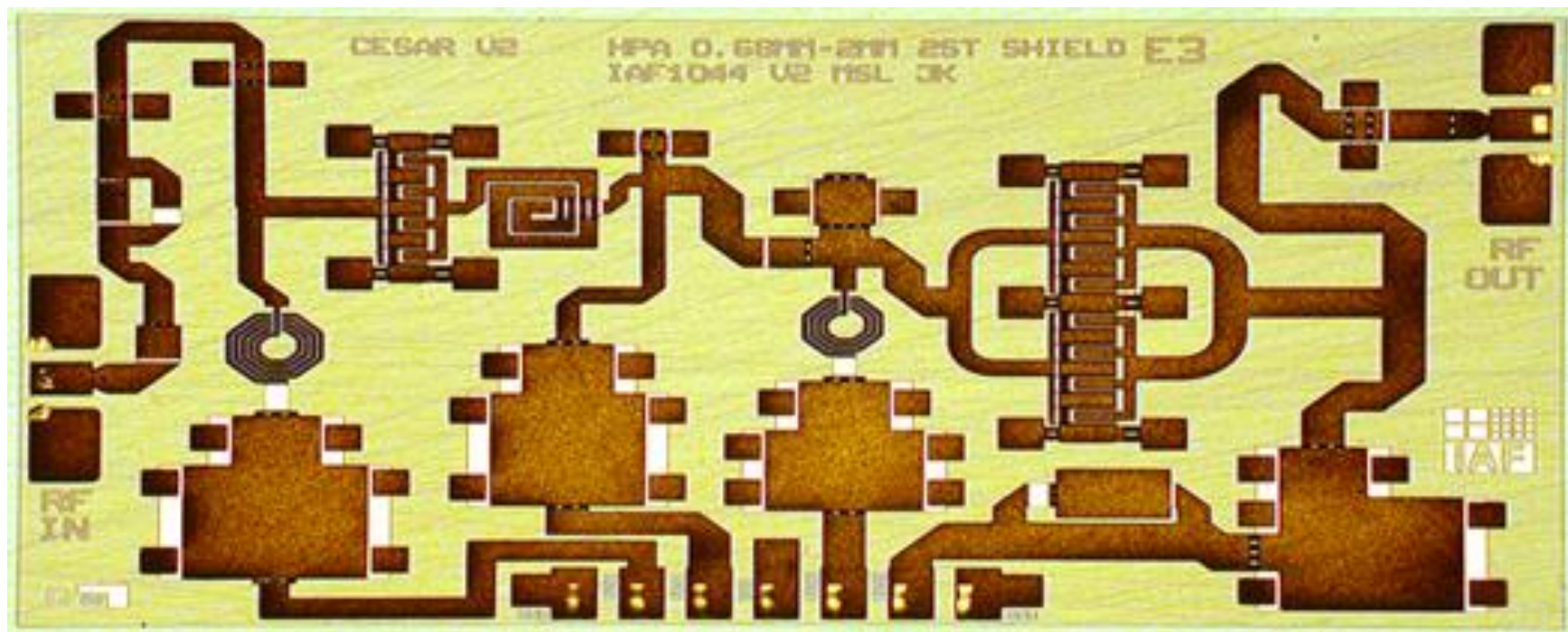
# Linhas de Transmissão Planares

Amplificador MIC em alumina, usando MICROSTRIP LINE



# Linhas de Transmissão Planares

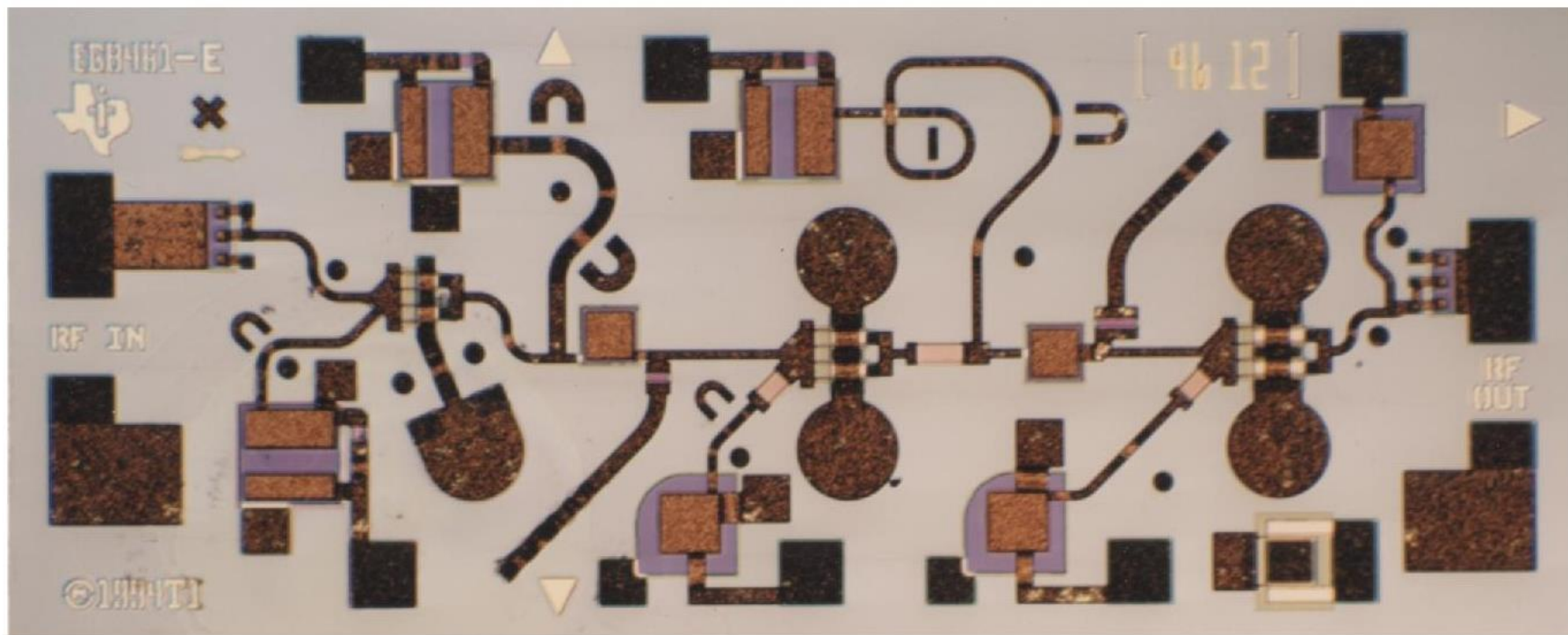
Amplificador MMIC usando MICROSTRIP LINE





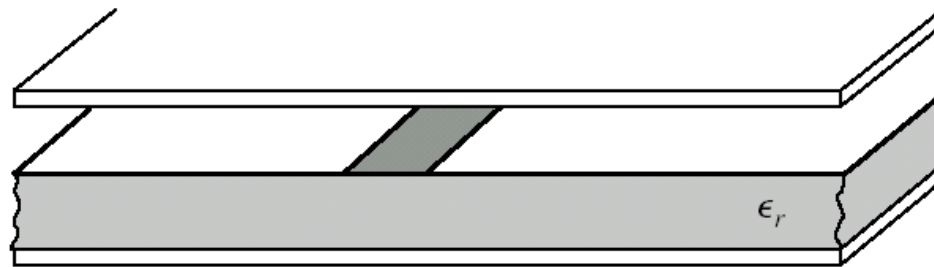
# Linhas de Transmissão Planares

Amplificador MMIC usando MICROSTRIP LINE



# Linhas de Transmissão Planares

- MICROSTRIP LINE (coberta)

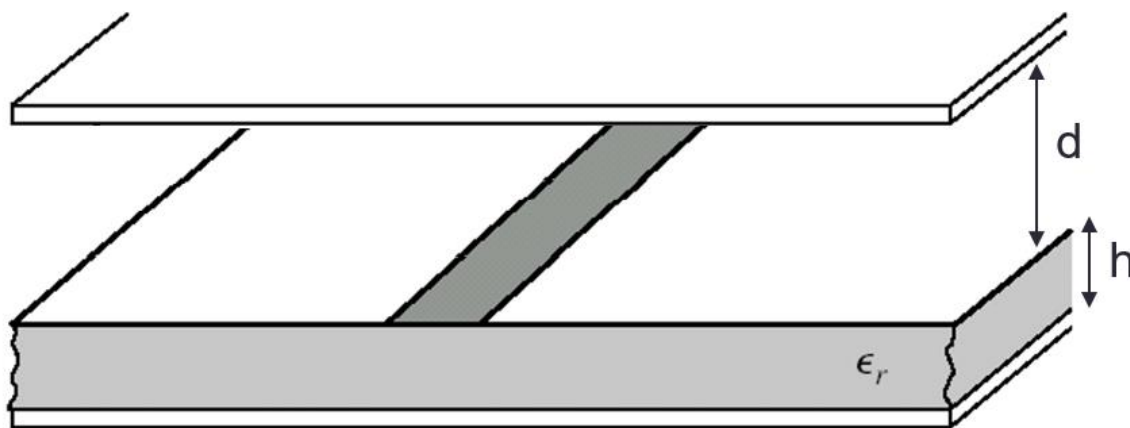


Estrutura física

- Na prática
  - Condutor central aberto no lado superior
  - MAS circuitos acondicionados em caixas metálicas blindadas
  - Tampa metálica gera “microlinha coberta”
    - Blindagem do campo radiado pelas estruturas planares
    - Evita interferências eletromagnética

# Linhas de Transmissão Planares

- MICROSTRIP LINE ou microlinha (coberta)



$d$  → distância entre a tampa e o substrato

$h$  → espessura do substrato

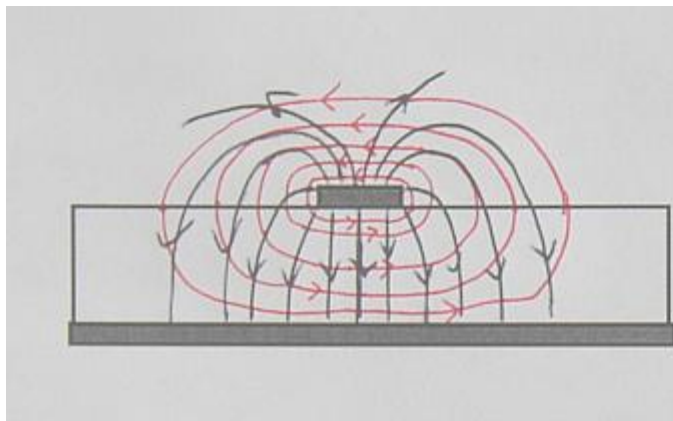
- **Efeito da tampa metálica**

- Altera a impedância característica da linha de transmissão se próxima do substrato, afetando as linhas de campo EM
- Efeito da tampa pode ser desprezado para distância entre substrato e tampa maior ou igual a 5 alturas do substrato

$$d \geq 5 \cdot h$$

# Linhas de Transmissão Planares

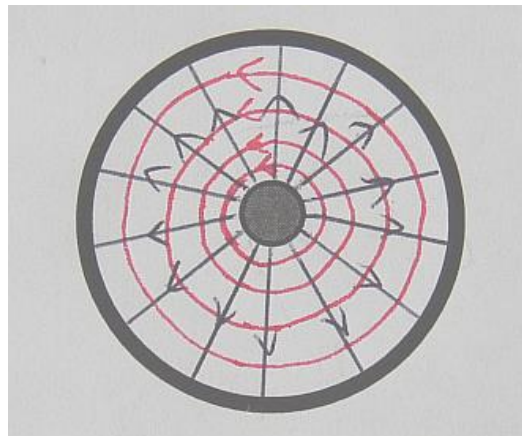
## Microstrip line



## Stripline



## Cabo coaxial

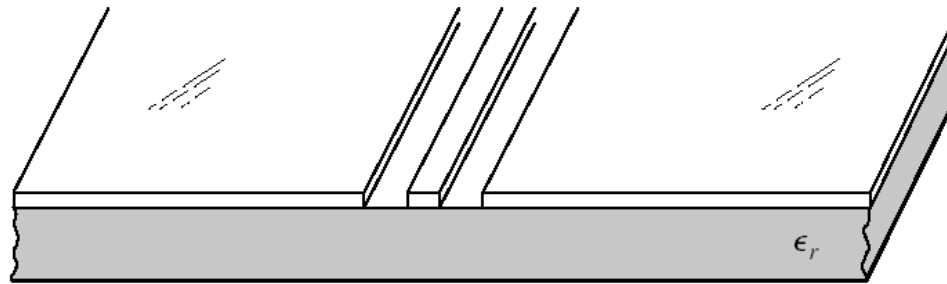


TEM or quasi-TEM mode

— E-field  
— H-field

# Linhas de Transmissão Planares

- CPW – COPLANAR WAVEGUIDE – guia de ondas coplanar

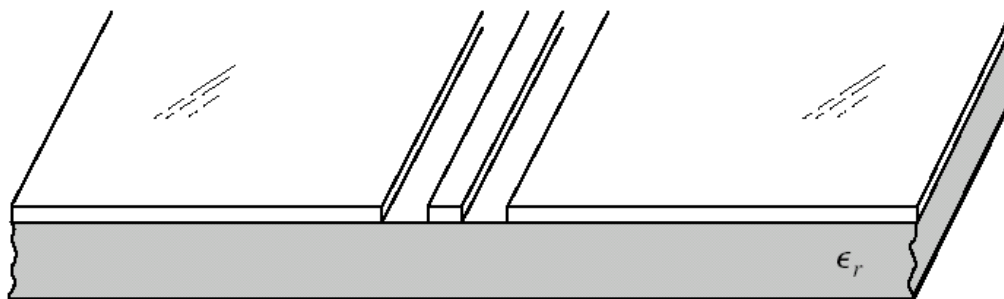


Estrutura física

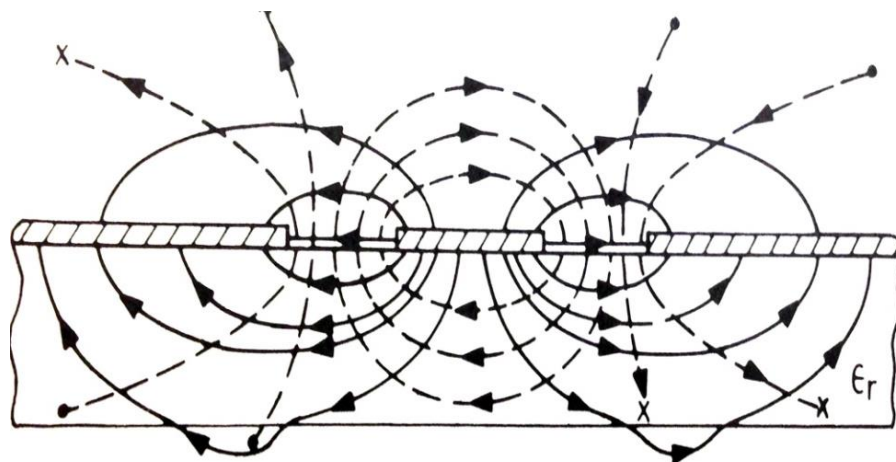
- Condutor central e o plano de terra na face superior do substrato
- Campo EM
  - Propaga-se entre o condutor central e os planos de terra na face superior
- Variação da CPW → CPW-G
  - Face inferior do substrato contém camada metálica de plano de terra.

# Linhas de Transmissão Planares

- CPW – COPLANAR WAVEGUIDE – guia de ondas coplanar



Estrutura física



Distribuição de campos EM

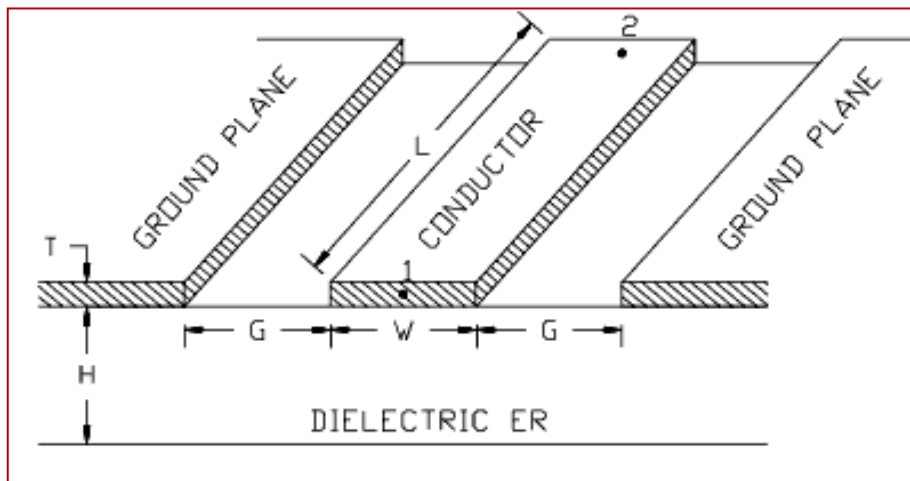
— E

--- H

Vazamento de campos EM

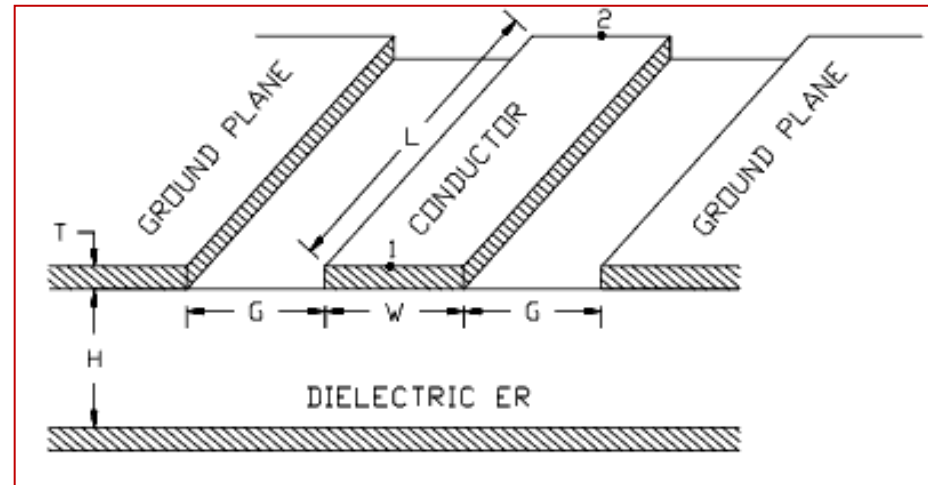
# Linhas de Transmissão Planares

- CPW – COPLANAR WAVEGUIDE – guia de ondas coplanar



CPW

Guia de ondas coplanar

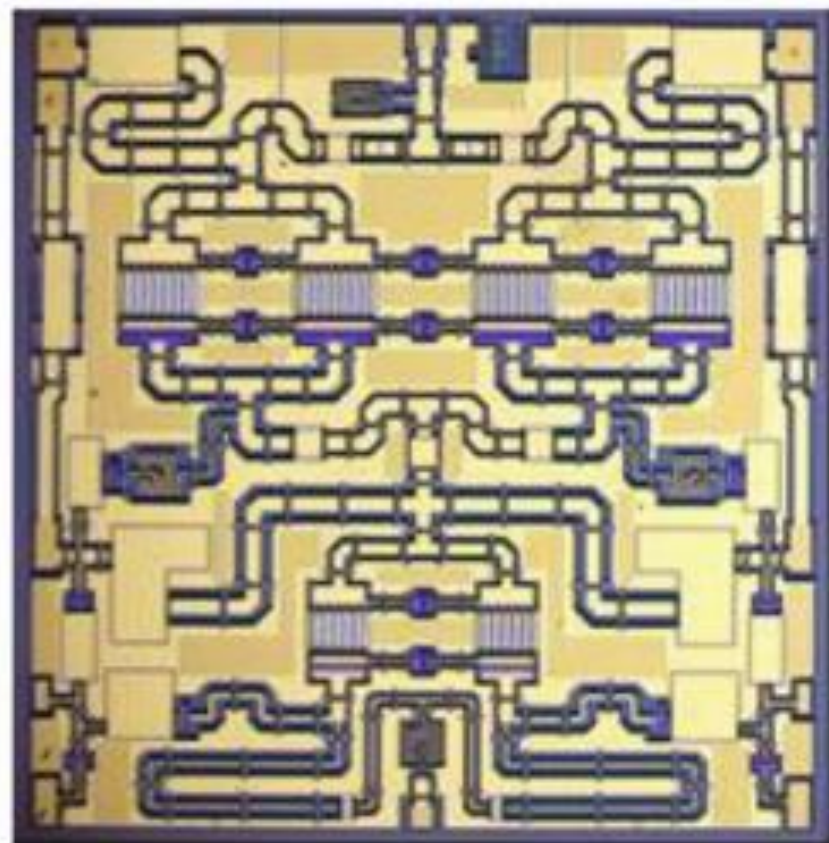
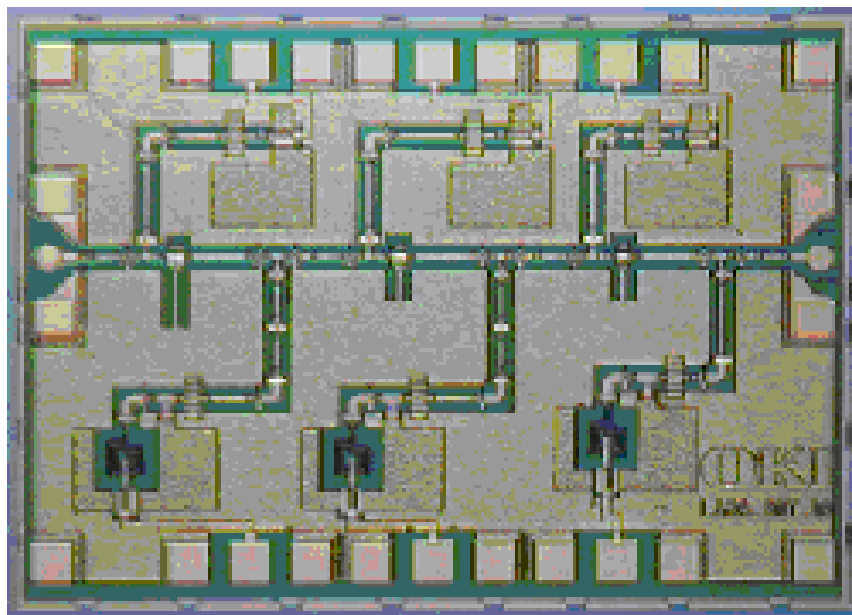


CPW-G

Guia de ondas coplanar com plano terra

# Linhas de Transmissão Planares

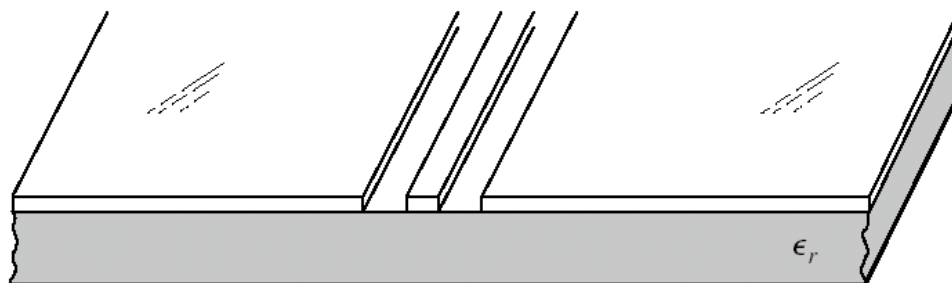
Amplificadores MMIC usando COPLANAR WAVEGUIDE





# Linhas de Transmissão Planares

- CPW – COPLANAR WAVEGUIDE – guia de ondas coplanar



Estrutura física

- **Vantagem**

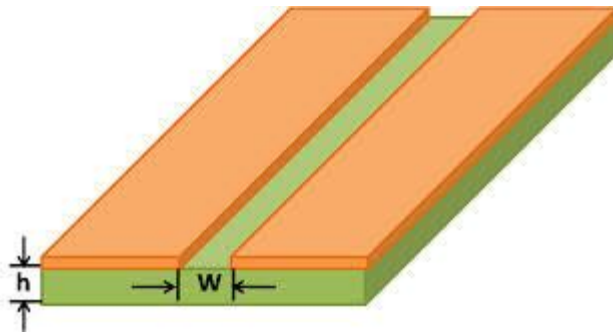
- Facilidade em montar componentes do condutor central para o plano de terra.

- **Desvantagem**

- Campos EM concentrados na borda dos condutores  $\Rightarrow$  maiores perdas condutivas

# Linhas de Transmissão Planares

- SLOTLINE – linha de fenda

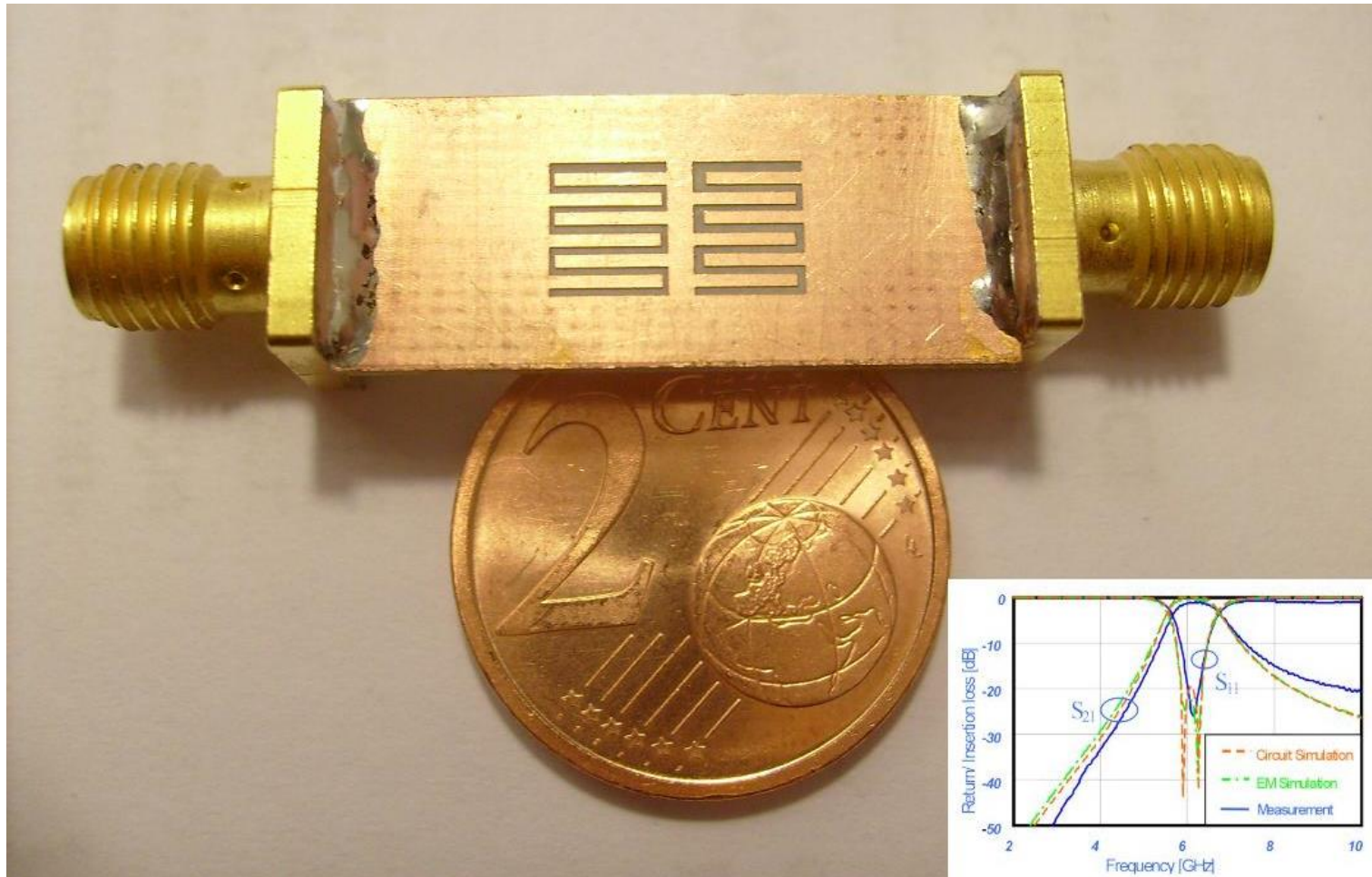


Estrutura física da slotline

- Onda eletromagnética se propaga na fenda entre duas superfícies metálicas na face superior do substrato dielétrico
- Usadas em antenas em que a fenda irradia
- Usadas em associação com microlinhas
- Desvantagem
  - Campos EM concentrados na borda dos condutores
  - Maiores perdas condutivas

# Linhas de Transmissão Planares

## Filtro passa-faixa usando SLOTLINE

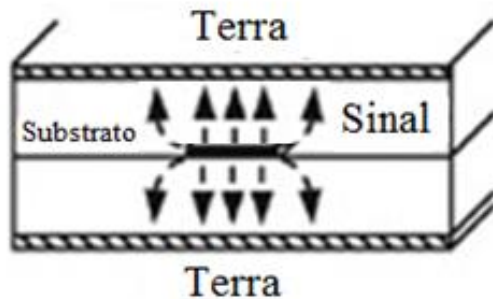


# Linhas de Transmissão Planares

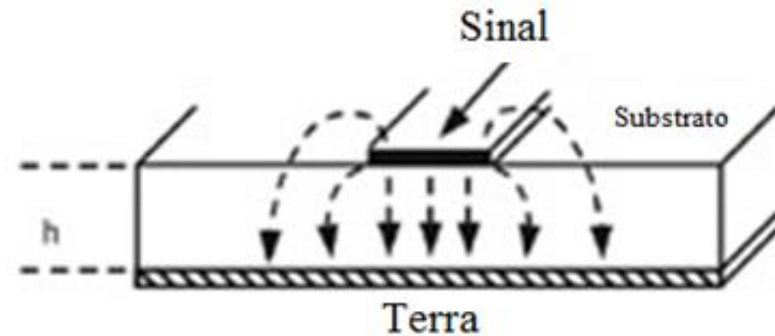
Antena usando SLOTLINE



# Linhas de Transmissão Planares



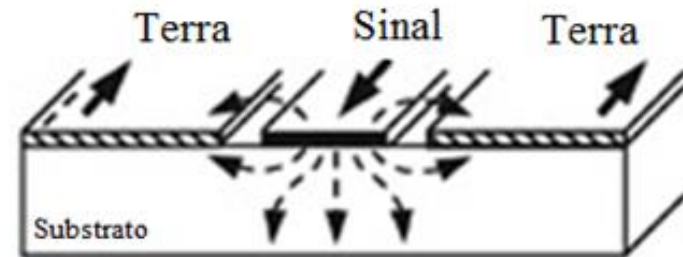
**STRIPLINE**  
Triplaca



**MICROSTRIPLINE**  
Linha de microfita



**SLOT LINE**  
Linha de fenda



**COPLANAR WAVEGUIDE**  
Guia de onda coplanar

# LINHAS ACOPLADAS

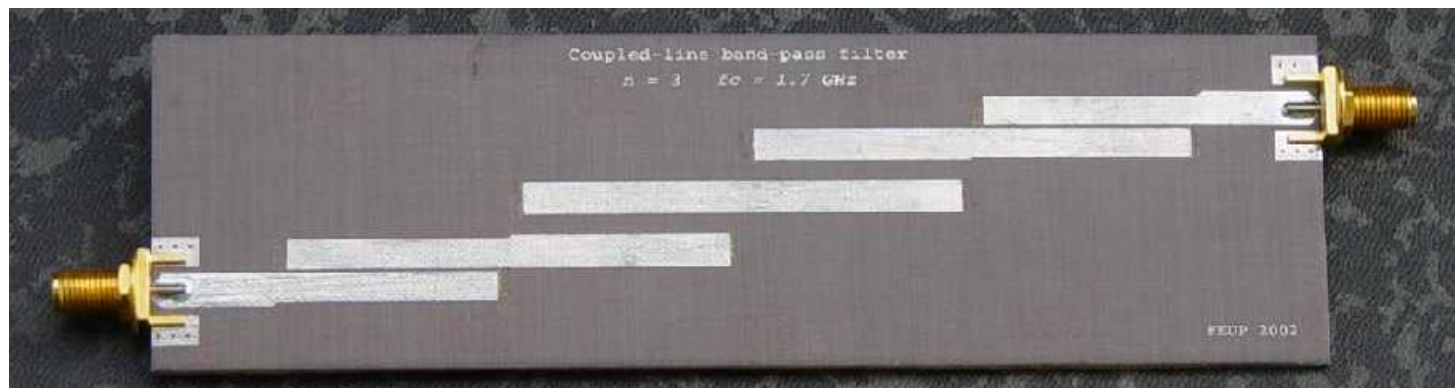
- Linhas de Transmissão (LTs) são “acopladas” quando
  - Duas ou mais linhas de transmissão não-blindadas
  - Próximas entre si, tal que
    - há interação entre campos EM das LTs
    - há acoplamento de potência entre as LTs

- Tecnologias de fabricação
  - Stripline
  - Microstrip line
  - Slotline
  - Guia de ondas coplanar

- Aplicações
  - Filtros
  - Acopladores

# LINHAS ACOPLADAS

Exemplo de aplicação - filtros passa-faixa usando linhas de microfita acopladas



Fonte: <https://paginas.fe.up.pt>

# Programa LineCalc do ADS

## Exercício 1

- Na janela de esquemático
- Barra superior → Tools → LineCalc → Start LineCalc
- Veja as linhas de transmissão e seus parâmetros
  - Type: MLIN – microstrip line
  - Type: CPW – coplanar wave guide
  - Type: CPWG – coplanar wave guide w/lower ground plane
- Utilize o “help” para ver a descrição de MLIN, CPW e CPWG



## Exercício 2

Verifique os tipos de linhas de transmissão planares disponíveis na janela de esquemático.

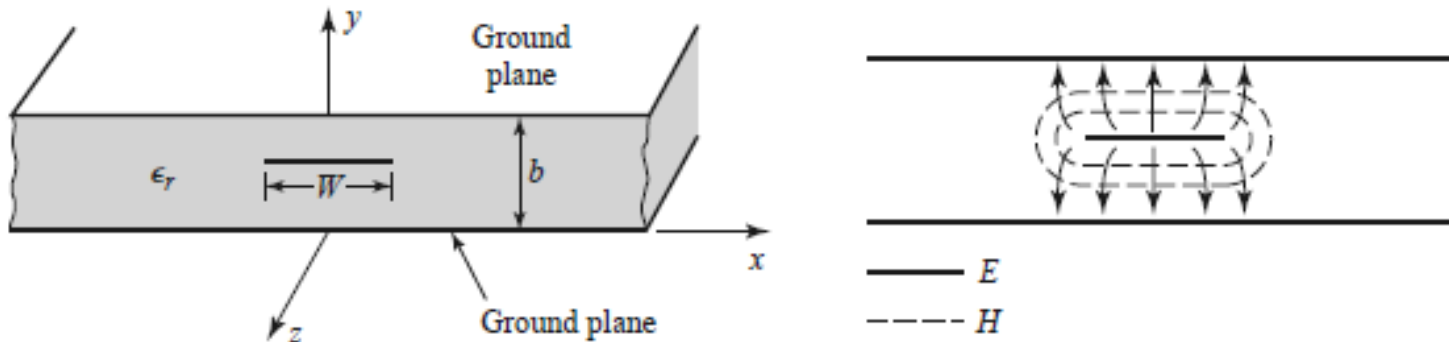
Tlines-Ideal

Tlines-Microstrip

Tlines-Stripline

Tlines-Waveguide

# STRIPLINE



## Parâmetros da Stripline ou Linha Triplaca

### Características do substrato dielétrico

- $\epsilon_r$  constante dielétrica relativa
- $\mu_r = 1$
- $\text{tg}(\delta)$  tangente de perdas
- $b$  espesura do substrato

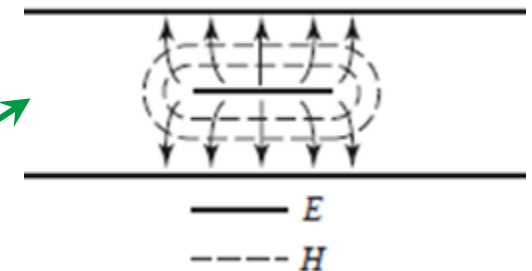
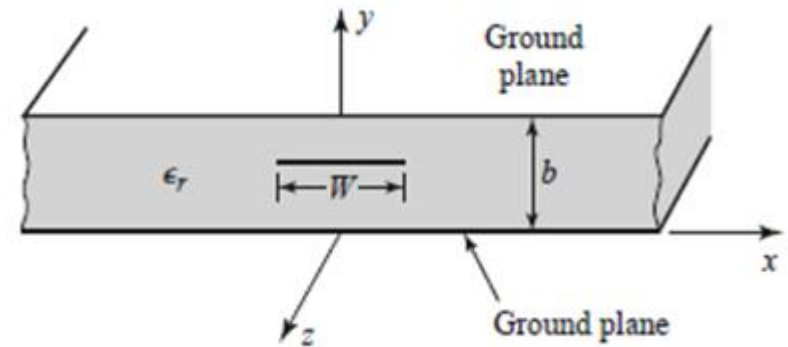
### Características do conductor

- $\sigma$  condutividade
- $t$  espesura do condutor

# STRIPLINE

## Modo de propagação

- Campo EM propaga-se
  - Entre 2 condutores
  - Em um único material dielétrico
  - Estrutura suporta modo TEM
- Possíveis modos de propagação
  - $b < \lambda_g/2 \rightarrow$  Modo TEM  $\rightarrow$  **desejado**
  - $b \geq \lambda_g/2 \rightarrow$  Modos TEM, TE e TM  $\rightarrow$  **indesejado**
- Operação:  $DC \leq f < f_c$  sendo  $f_c$  tal que  $\lambda_g/2 = b$



# STRIPLINE

- Velocidade de fase

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0\epsilon_r}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

- Comprimento de onda

$$\lambda_g = \frac{v_p}{f} = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

- Constante de propagação

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

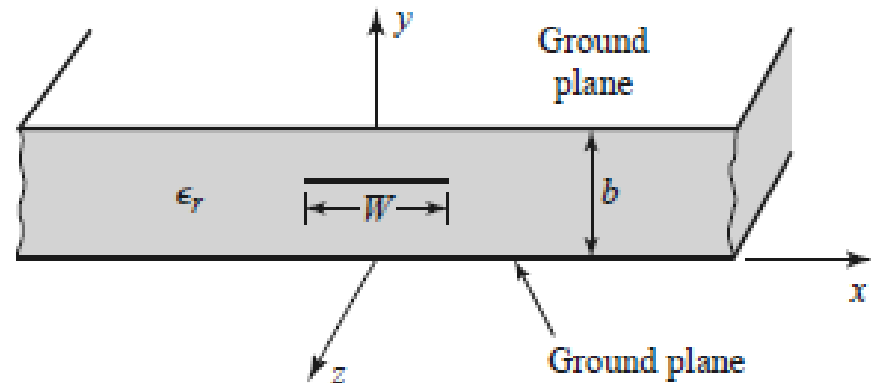
# STRIPLINE

Fórmulas simplificadas, com erro < 1 %

- Impedância característica

$$Z_0 = \frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{b}{W_e + 0,441b}$$

$$\frac{W_e}{b} = \frac{W}{b} - \begin{cases} 0 \\ (0,35 - W/b)^2 \end{cases}$$



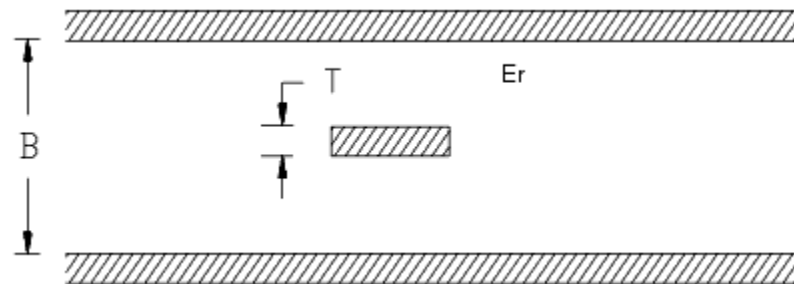
*para  $W/b \geq 0,35$*

*para  $W/b < 0,35$*

# STRIPLINE

## ADS

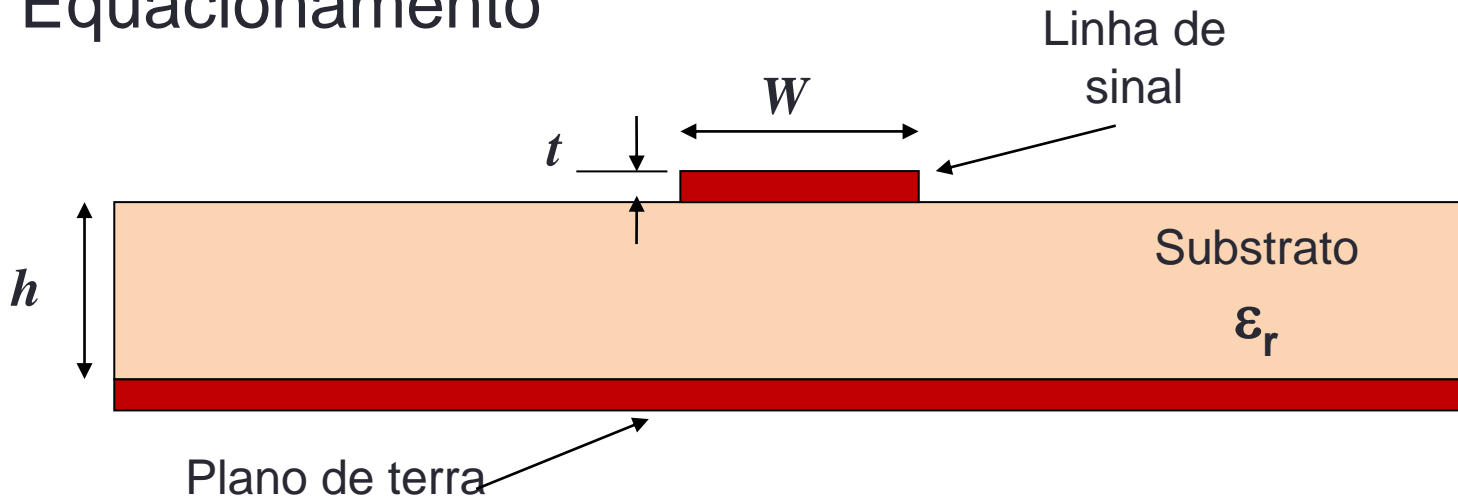
- Palheta **TLines** – **Stripline**
- Stripline simétrica com 1 condutor
  - Tira metálica centrada na altura do substrato
  - Substrato **SSUB**



- **SLIN** – stripline
- **SCLIN** – striplines acopladas

# MICROSTRIP LINE

- Equacionamento



- Parâmetros da microstrip line ou microlinha de transmissão

$h$	espessura do substrato
$\epsilon_r$	constante dielétrica relativa do substrato
$W$	largura da microfita
$t$	espessura do metal

# MICROSTRIP LINE

## Constante dielétrica efetiva

Propagação do campo EM

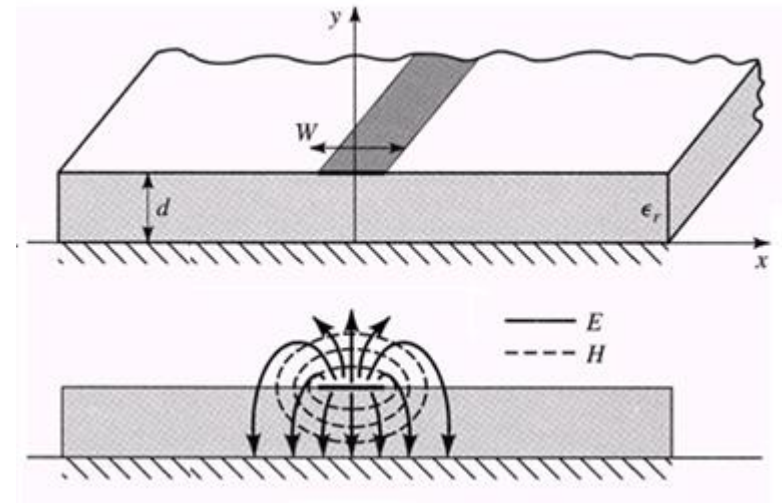
- Maior parte viaja pelo substrato

$$\epsilon_r > 1 \quad \text{e} \quad v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

- Um a parte menor viaja pelo ar

$$\epsilon_r = 1 \quad \text{e} \quad v = c$$

*c: velocidade da luz no espaço livre*



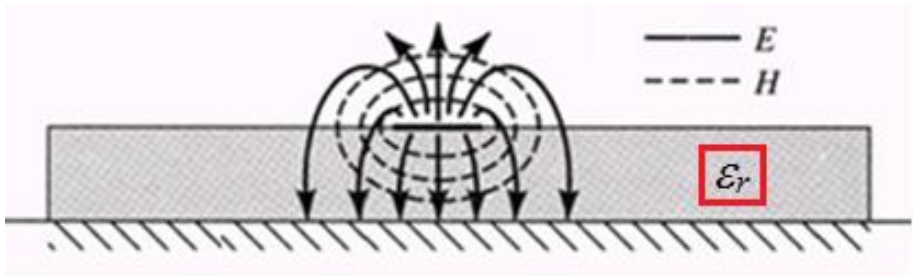
Define-se uma constante dielétrica efetiva  $\epsilon_{ef}$  da linha de microfita

$$1 < \epsilon_{ef} < \epsilon_r \quad \text{sendo} \quad \frac{\epsilon_r + 1}{2} < \epsilon_{ef} < \epsilon_r$$



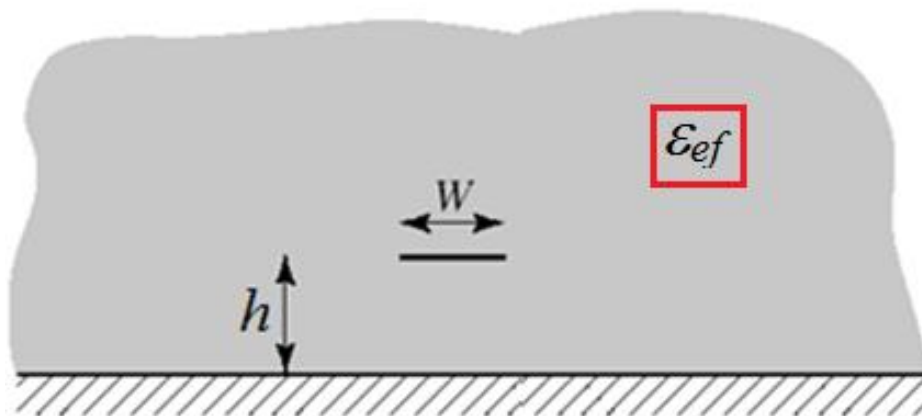
# MICROSTRIP LINE

Constante dielétrica efetiva da linha de microfita



→ Microfita coberta com ar, sobre substrato com

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$$



• Estrutura equivalente

Microfita envolvida por meio uniforme com

$$\epsilon = \epsilon_{ef} \cdot \epsilon_0$$

# MICROSTRIP LINE

## Modelo aproximado da linha de microfita

- Equações que aproximam as curvas teóricas

$$\epsilon_{ef} \times W/h \quad e \quad Z_0 \times W/h$$

- Válidas para

$$t/W \ll 1$$

$t$  – espessura do metal

$W$  = largura da tira da linha de microfita

- Não consideram efeitos de dispersão
  - Variação dos parâmetros da linha de microfita com a frequência de operação

# MICROSTRIP LINE

## Modelo aproximado da linha de microfita

- Constante dielétrica efetiva

$$\epsilon_{ef} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2 \cdot \sqrt{1 + 12 h/W}}$$

$h$  espessura do substrato

$\epsilon_r$  constante dielétrica  
relativa do substrato

$W$  largura da microfita

- Velocidade de propagação da onda

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{ef}}}$$

$c$ : velocidade da luz no espaço livre

- Comprimento de onda

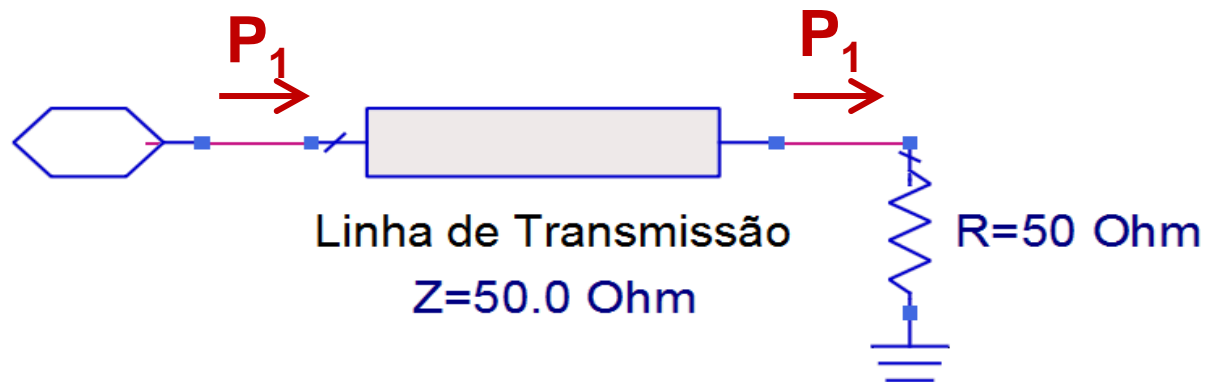
$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{ef}}}$$

$\lambda_0 = c/f \rightarrow$  comprimento de onda no espaço livre

# MICROSTRIP LINE

## Impedância característica de linhas de transmissão

- Linha de transmissão sem perdas infinita
  - A impedância característica é a relação entre tensão e corrente ao longo da linha de transmissão
- Linha de transmissão sem perdas de comprimento finito
  - A impedância característica tem o mesmo valor da resistência que deve terminar a linha para absorver todo o sinal que se propaga através da mesma



# MICROSTRIP LINE

Modelo aproximado da linha de microfita

## Impedância característica da linha de microfita

Para  $W/h \leq 1$  e  $t/W \ll 1$

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{ef}}} \cdot \ln \left( \frac{8h}{W} + \frac{W}{4h} \right) \quad (\Omega)$$

$h$  espessura do substrato

$\epsilon_r$  constante dielétrica relativa do substrato

$W$  largura da microfita

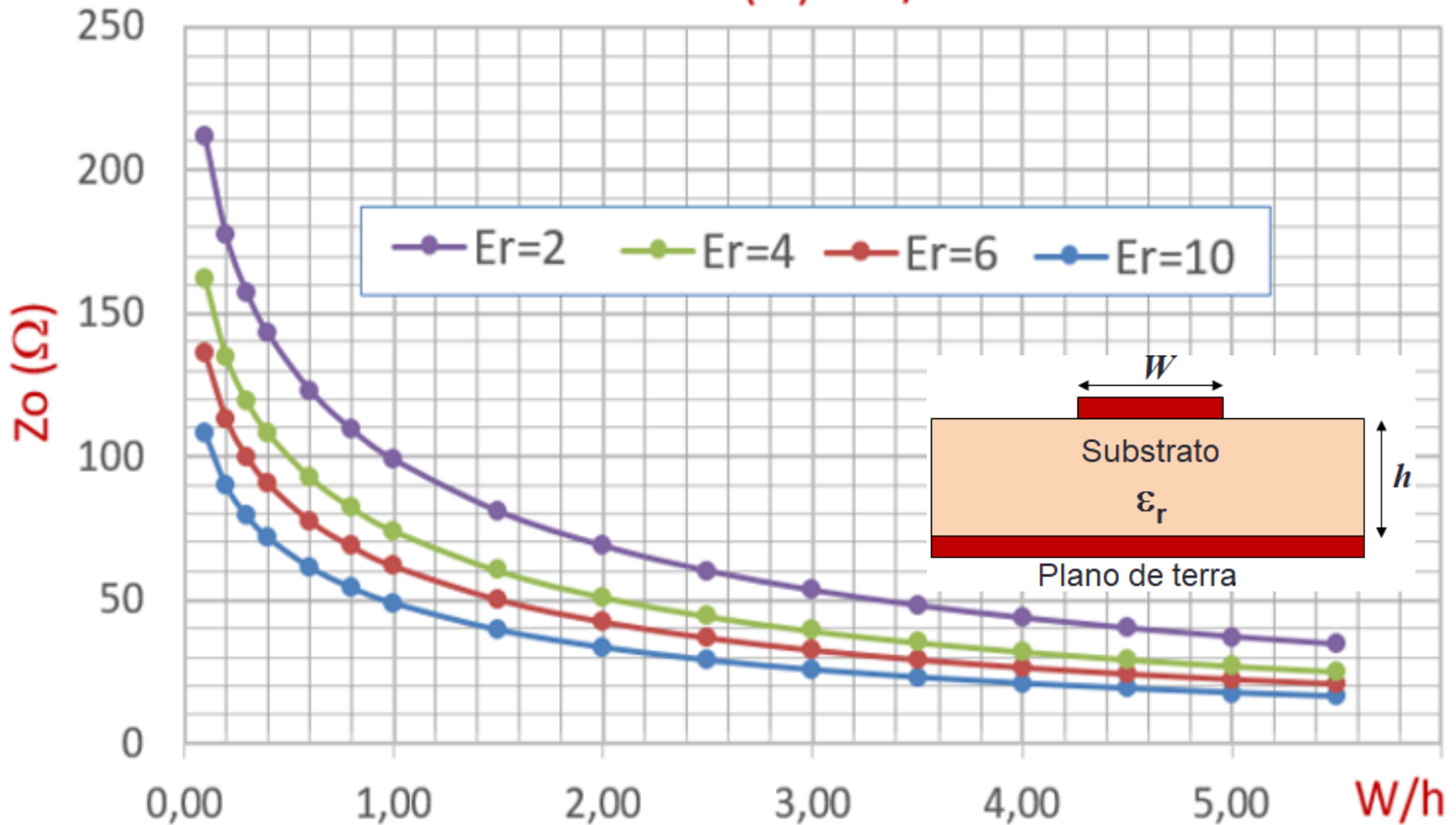
$t$  espessura do metal

Para  $W/h \geq 1$  e  $t/W \ll 1$

$$Z_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{ef}}} \cdot \frac{120\pi}{\frac{W}{h} + 1,393 + 0,667 \cdot \ln \left( \frac{W}{h} + 1,444 \right)} \quad (\Omega)$$

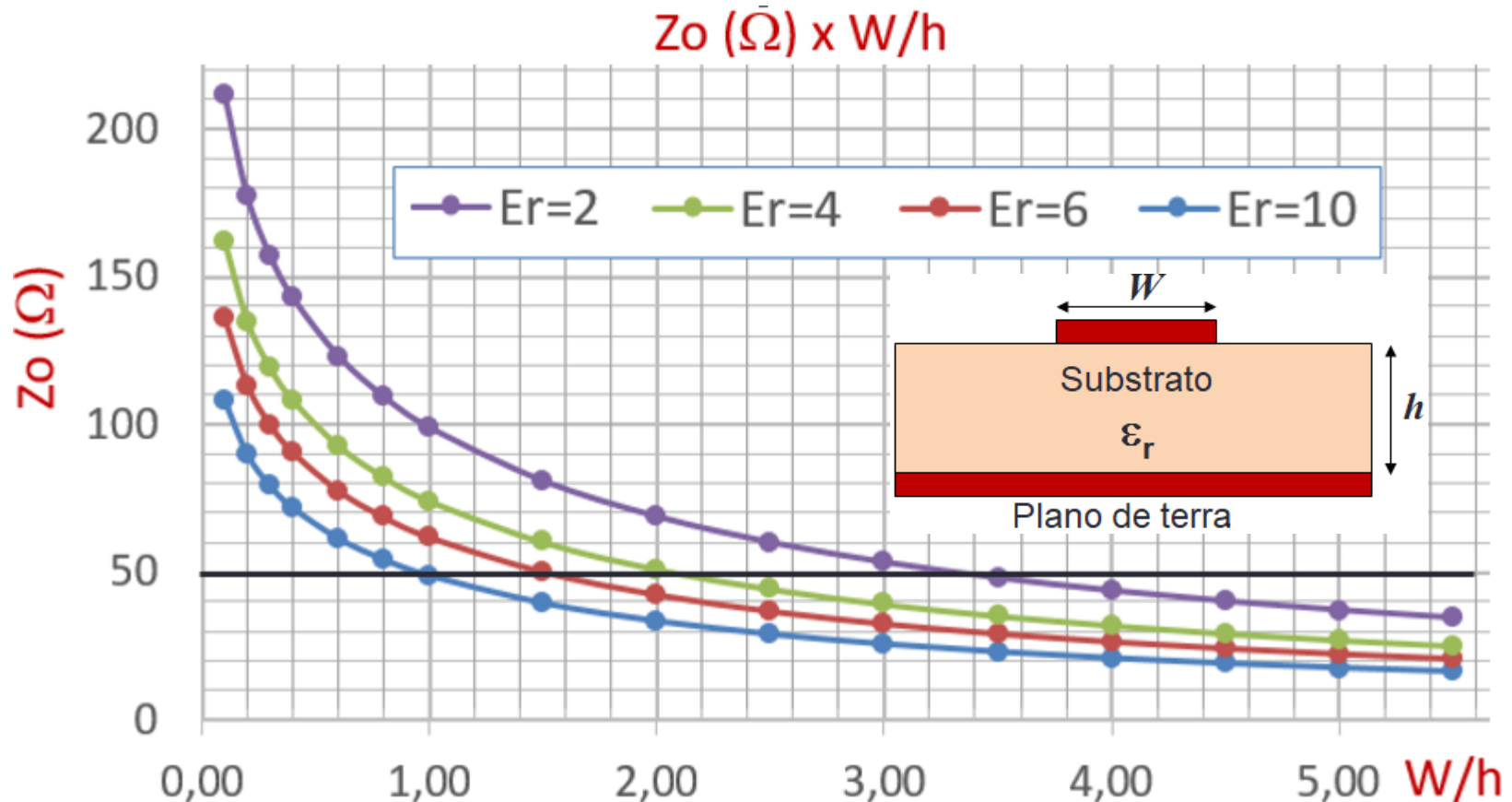
# Impedâncias característica da linha de microfita

$Z_0 (\Omega) \times W/h$



# Impedâncias característica da linha de microfita

$$Z_0 = 50 \Omega \left\{ \begin{array}{ll} \epsilon_r=2 \rightarrow W/h = 3,31 & \epsilon_r=4 \rightarrow W/h = 2,10 \\ \epsilon_r=6 \rightarrow W/h = 1,55 & \epsilon_r=10 \rightarrow W/h = 1,01 \end{array} \right.$$



# MICROSTRIP LINE

## Perdas e atenuação

- Atenuação devido a perdas no dielétrico

$$\alpha_d = \frac{k_0 \cdot \epsilon_r \cdot (\epsilon_{ef} - 1) \cdot \text{tg} \delta}{2 \cdot \sqrt{\epsilon_{ef}} \cdot (\epsilon_r - 1)} \quad \text{Np} / \text{m}$$

$$\text{tg} \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad \epsilon = \epsilon' - j \cdot \epsilon''$$

- $\text{tg} \delta$ : propriedade do substrato dielétrico

$$k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}$$



# MICROSTRIP LINE

## Perdas e atenuação

- Atenuação devido a perdas nos condutores

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

Sendo

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \sigma}} \quad \Omega / \text{m}^2$$

$\sigma \rightarrow$  condutividade do metal

- $R_s$  é função da frequência devido ao efeito pelicular

# MICROSTRIP LINE

- Efeito pelicular
  - Em bons condutores, em altas frequências
  - Campo concentra-se na superfície
- Amplitude de campo é atenuada exponencialmente

$$E = E_0 \cdot \exp(-z/\delta_s)$$

$\delta_s$  - profundidade de penetração

$$\delta_s = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}}$$

- Campos E e H desprezíveis para  $z \geq 5 \cdot \delta_s$ 
  - usa-se espessura do metal  $z \approx 5 \cdot \delta_s$

# MICROSTRIP LINE

Material	Condutividade (S/m)	Profundidade de penetração ( $\mu\text{m}$ ) @ 10 GHz
Alumínio*	3,813E+7	0,84
Cobre*	5,813E+7	0,66
Ouro*	4,098E+7	0,78
Prata*	6,137E+7	0,64

\*  $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Henry/m

$$\delta_s = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}}$$

$$t \approx 5 \cdot \delta_s$$

$$t \approx 5 \mu\text{m}$$

# MICROSTRIP LINE

## Faixa de operação da linha de microfita

- De DC até  $f_{\max}$
- Operação da linha de microfita é limitada por:
  - Perdas
  - Dispersão – variação com a frequência
  - Excitação de modos de propagação não-TEM.

$$f_{\max} = \frac{c}{4h\sqrt{\epsilon_r}}, \quad \text{para } W < 2h$$

# MICROSTRIP LINE

## Faixa de operação da linha de microfita

### Exemplo

- Substrato
  - $\epsilon_r = 10$
  - $h = 0,635$  mm
- $Z_0 = 50 \Omega \rightarrow W = 0,641$  mm  $< 2h$

$$f_{max} = \frac{c}{4h\sqrt{\epsilon_r}}, \text{ para } W < 2h \rightarrow f_{max} = 37,35 \text{ GHz}$$

# MICROSTRIP LINE

## Exercício usando as equações

- Dado um substrato com  $\epsilon_r = 10$  ,  $h = 0,5$  mm e  $\text{tg}\delta = 0,002$
- Metalizado com cobre,  $\sigma = 5,8 \times 10^7$  S/m
- Sobre o qual foi construída uma linha de microfita com largura  $W = 0,5$  mm
- Calcule para essa linha de microfita
  - A constante dielétrica efetiva
  - A impedância característica
  - O comprimento de onda na estrutura para um sinal de 1 GHz
  - A atenuação por metro devido a perdas condutivas
  - A atenuação por metro devido a perdas dielétricas

# MICROSTRIP LINE

## Simuladores de circuitos de micro-ondas

- Dados de entrada
  - Características do substrato dielétrico
    - $\epsilon_r$  - permissividade relativa
    - $h$  - espessura
    - $\text{tg}\delta$  - tangente de perdas
  - Características do metal que recobre o substrato
    - $\sigma$  - condutividade do metal
    - $t$  - espessura do metal
  - Tipo de linha de transmissão planar
    - Microstripline - Stripline, etc..
  - Frequência de operação
    - $f$  - frequência

# MICROSTRIP LINE

## Simuladores de circuitos de micro-ondas

### Dados de entrada

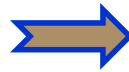
Parâmetros linha de transmissão

$Z_0$  – impedância característica

$\theta$  – comprimento elétrico

$\lambda$  – comprimento de onda

$$\theta = 360^\circ \rightarrow L = \lambda$$



### Dados de saída

Dimensões físicas e parâmetros da linha de transmissão

$W$  – largura da microfita

$L$  – comprimento da microfita

$\epsilon_{ef}$  – permissividade efetiva

$\alpha$  – atenuação em dB do trecho de comprimento  $L$

## Síntese



# MICROSTRIP LINE

## Simuladores de circuitos de micro-ondas

### Dados de entrada

Dimensões físicas da LT

$W$  – largura da microfita

$L$  – comprimento da microfita



### Dados de saída

Parâmetros linha de transmissão

$Z_0$  – impedância característica

$\theta$  – comprimento elétrico

$\epsilon_{ef}$  – permissividade efetiva

$\alpha$  – atenuação em dB/m

Análise

# MICROSTRIP LINE

## Simuladores de circuitos de micro-ondas

- Exemplo de cálculo de linha de microfita
  - ADS – Advanced Design System
    - Programa LineCalc
  - Dado um substrato com  $\epsilon_r = 10$  ,  $h = 0,5$  mm e  $\text{tg}\delta = 0,002$
  - Metalizado com cobre,  $\sigma = 5,8 \times 10^7$  S/m e espessura de  $17 \mu\text{m}$
  - Calcule - largura, comprimento, constante dielétrica relativa efetiva e atenuação da linha de microfita operando em 10 GHz
  - Para -  $Z_0 = 30, 50, 70$  e  $90 \Omega$  e  
comprimento L: 1 comprimento de onda ou  $360^\circ$

# MICROSTRIP LINE

## Simuladores de circuitos de micro-ondas

- Dado um substrato com  $\epsilon_r = 10$  ,  $h = 0,5$  mm e  $\text{tg}\delta = 0,002$
- Metalizado com cobre,  $\sigma = 5,8 \times 10^7$  S/m e espessura de  $17 \mu\text{m}$
- $f = 10$  GHz
- $Z_0 = 30, 50, 70$  e  $90 \Omega$        $L$ : 1 comprimento de onda ou  $360^\circ$

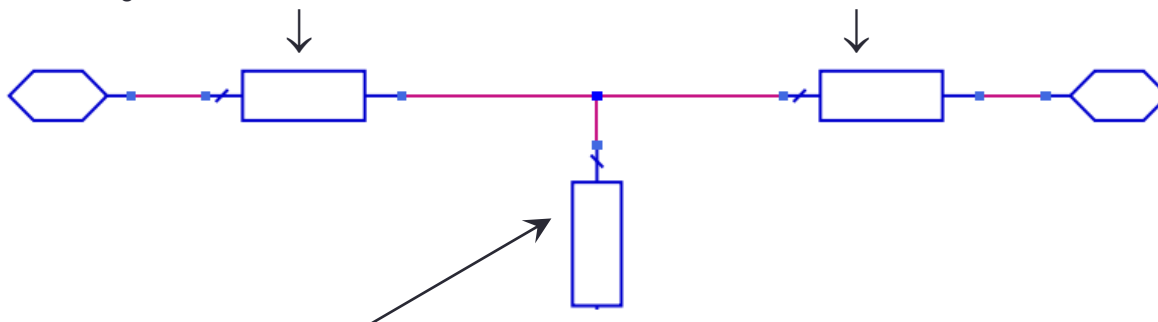
$Z_0 (\Omega)$	$W(\text{mm})$	$L (\text{mm})$	$E_{\text{ef}}$	$\alpha(\text{dB})$
30	1.17	10.87	7,59	0,085
50				
70				
90	0.082	12.37	5,87	0,213

# MICROSTRIP LINE

## Projeto de filtro rejeita faixa simples

Linhas de transmissão de acessos de entrada e saída

$Z_0 = 50 \Omega$  e comprimento determinado pelo layout



Linha de transmissão terminada em aberto (*open stub* ou *toco em aberto*)

- Impedância característica: a ser escolhida em função da largura de banda
- Comprimento:  $\lambda/4$  ou  $90^\circ$  na frequência central da banda de rejeição.

### Princípio de operação

- Na frequência central, o toco em aberto impõe um curto-circuito no ponto de conexão as linhas de transmissão dos acessos de entrada e de saída

# MICROSTRIP LINE

- Projeto de filtro rejeita faixa simples

## Especificações do filtro

- Frequência central da banda de rejeição: 6 GHz
- Tecnologia de fabricação: linhas de microfita (microstrip lines)
- Substrato: Dielétrico:  $\epsilon_r = 6$ ,  $H = 0,5$  mm e  $\tan\delta = 0.002$   
Metalização:  $\text{COND} = 5.8E+7$  S/m e  $T = 17$  micron

## Etapas do projeto no ADS

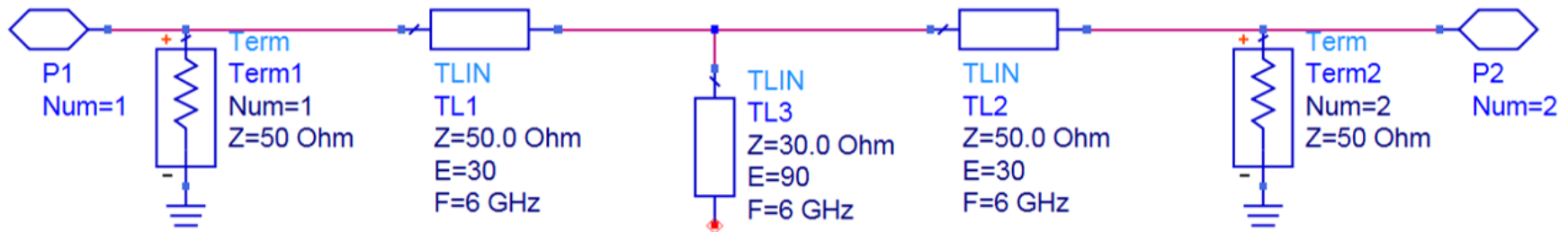
- Filtro usando linhas de transmissão ideais
- Filtro usando linhas de microfita no substrato especificado
- Leiaute do filtro
- Simulação do leiaute e ajustes finais, se necessário

# MICROSTRIP LINE

- Projeto de filtro rejeita faixa simples

## Etapas do projeto no ADS

- Filtro usando linhas de transmissão ideais (Tlines Ideal)



S\_Param  
SP1  
Start=1.0 GHz  
Stop=11 GHz  
Step=10 MHz

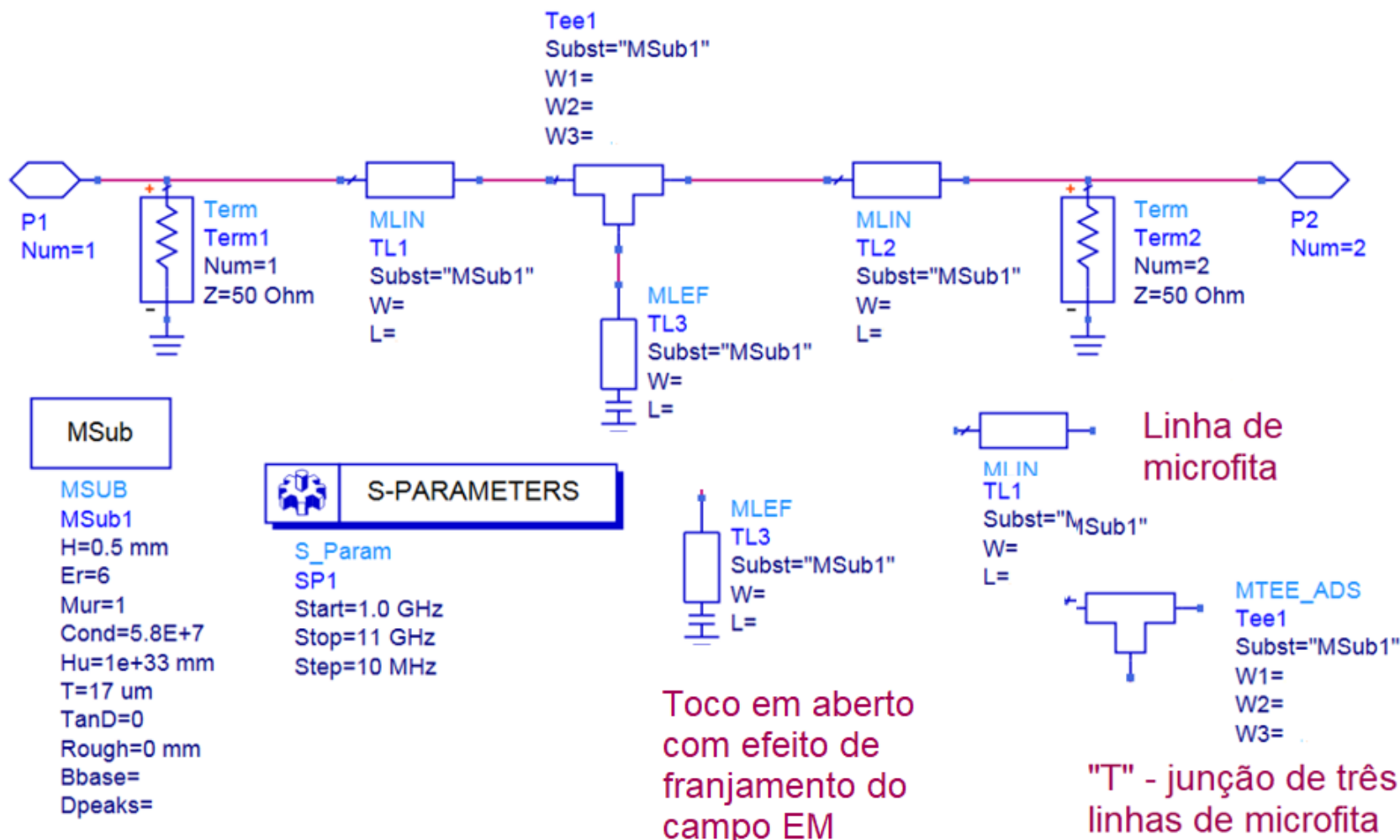


Linha de transmissão ideal

TLIN  
TL1  
Z=50.0 Ohm  $\Rightarrow$  Z: impedância carateristica  
E=30  $\Rightarrow$  E: comprimento elétrico na  
F=6 GHz frequência F

# MICROSTRIP LINE

- Filtro usando linhas de microfita (Tlines microstrip)



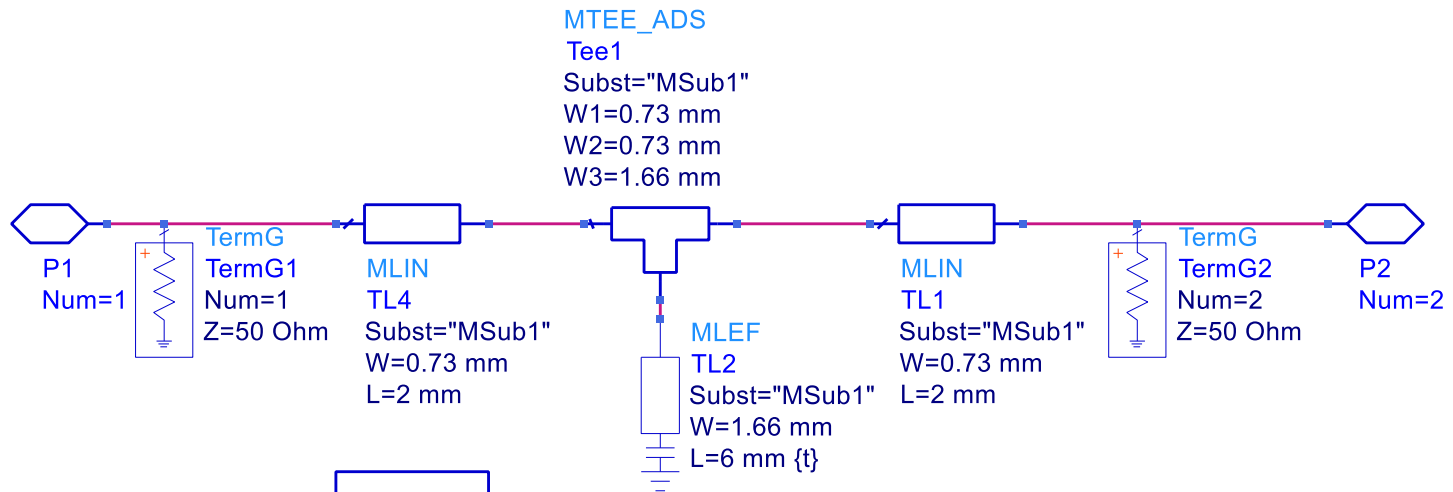
# MICROSTRIP LINE

- Dimensões das linhas de microfita
  - Calculadas usando LineCalc
  - Substrato especificado
  - Frequência central do filtro
- Linhas dos acessos de entrada e saída:
  - $Z_0 = 50 \Omega$              $W = 0,73 \text{ mm}$
  - $\Theta = 30^\circ$                  $L = 2 \text{ mm}$
- Toco em aberto
  - $Z_0 = 30 \Omega$              $W = 1,66 \text{ mm}$
  - $\Theta = 90^\circ$                  $L = 7,45 \text{ mm}$



# MICROSTRIP LINE

- Esquemático final do filtro



MSub

MSUB  
MSub1  
H=0.5 mm  
Er=6  
Mur=1  
Cond=5.8e7  
Hu=1e+33 mm  
T=17 um  
TanD=2E-3  
Rough=0 mm  
Bbase=  
Dpeaks=

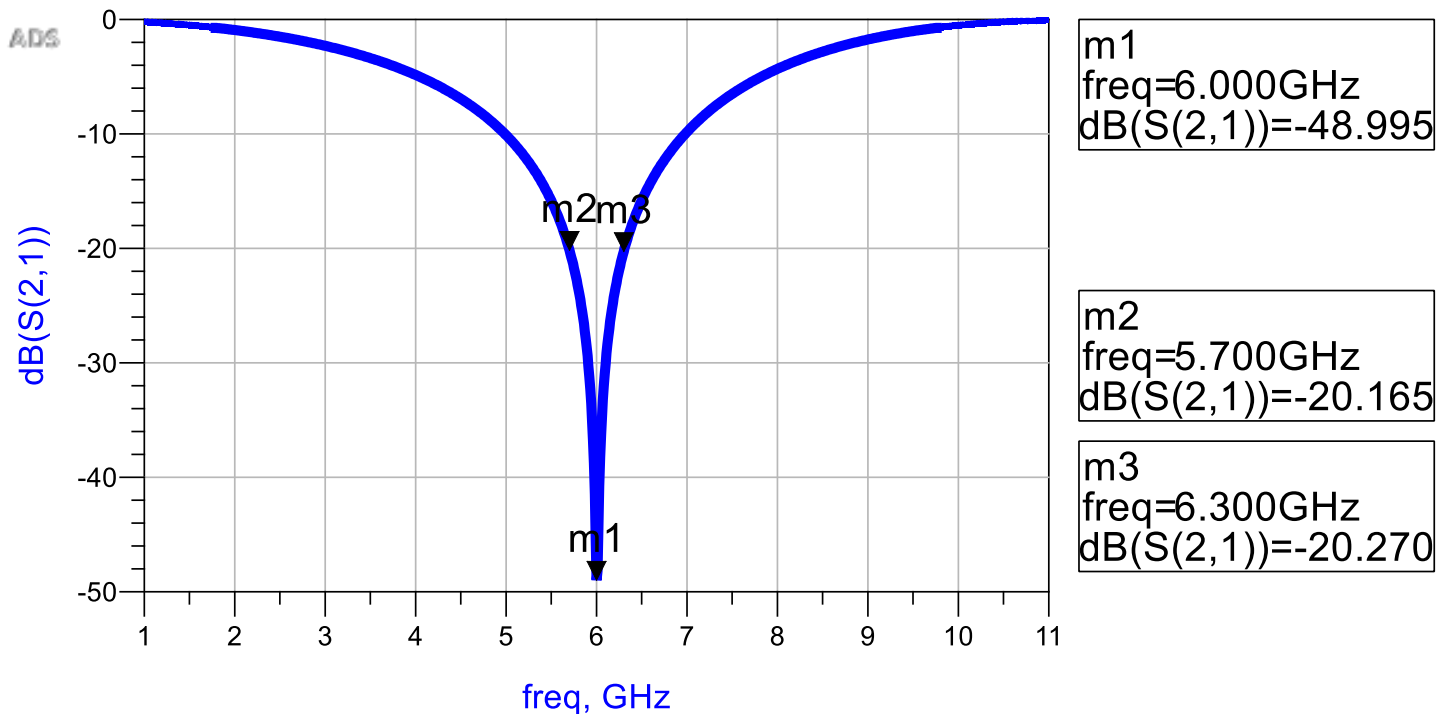


S-PARAMETERS

S\_Param  
SP1  
Start=1 GHz  
Stop=11 GHz  
Step=10 MHz

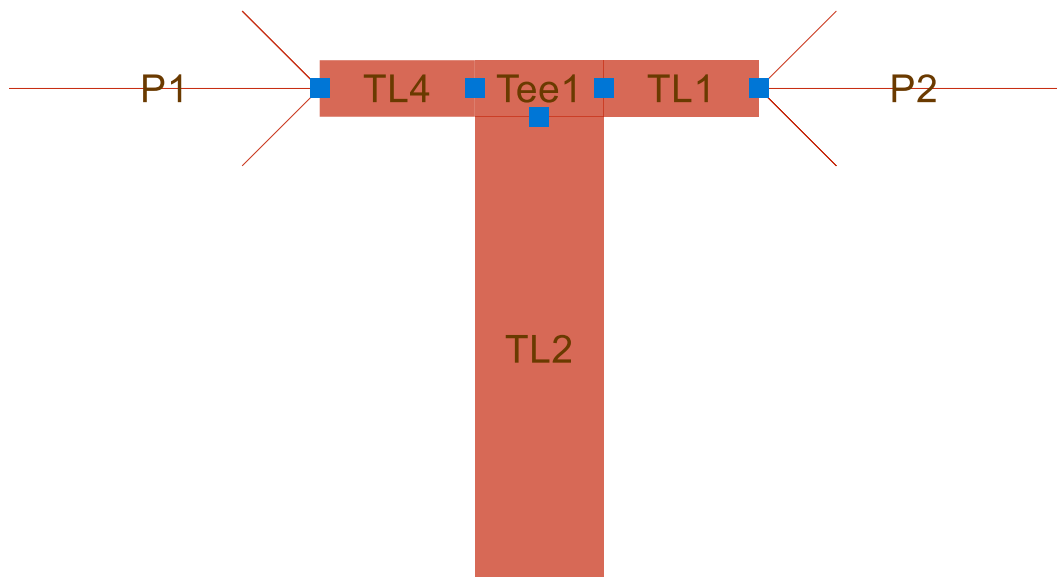
# MICROSTRIP LINE

- Simulação do esquemático do filtro
  - Rejeição em 6 GHz: -49 dB
  - Faixa com rejeição maior que 20 dB: 5,7 a 6,3 GHz



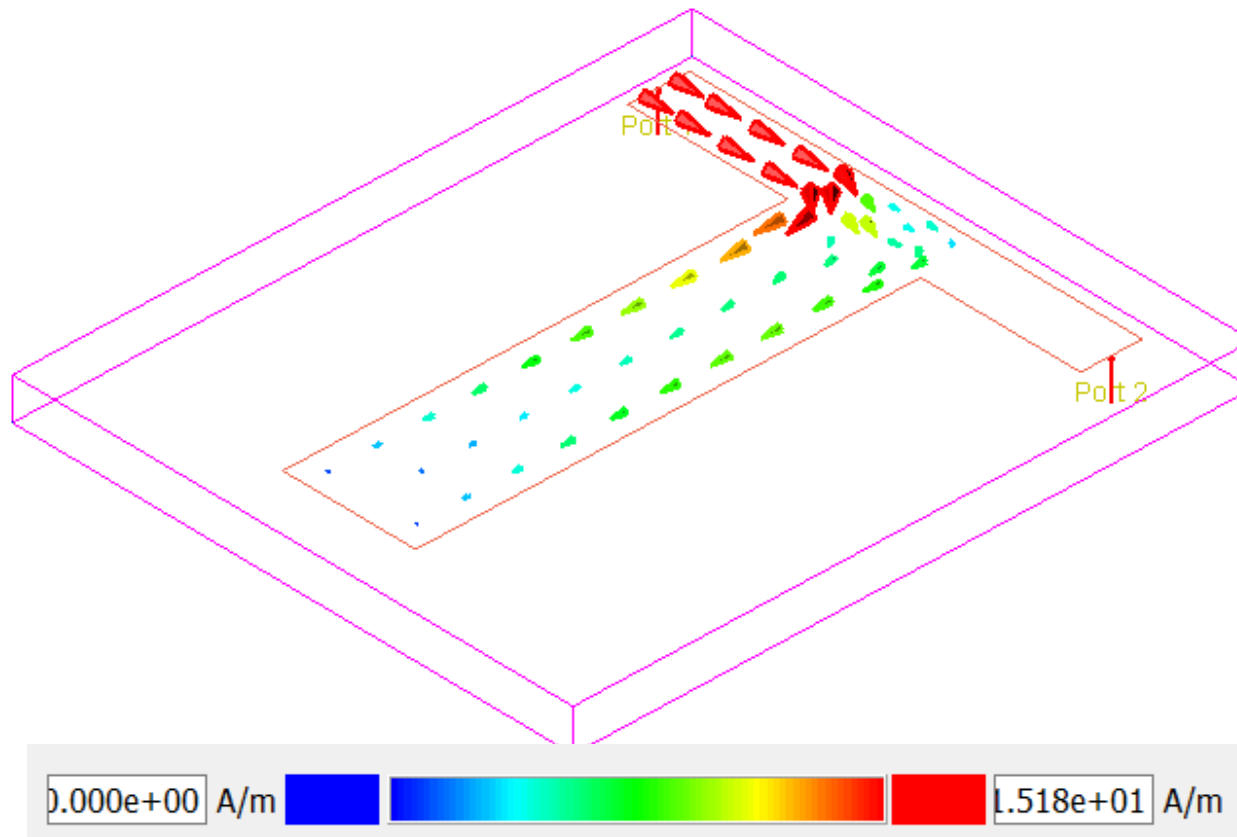
# MICROSTRIP LINE

- Leiaute do filtro
  - Vista da face superior do substrato



# MICROSTRIP LINE

- Leiaute do filtro
  - Densidade de corrente em 6 GHz (Simulação EM)

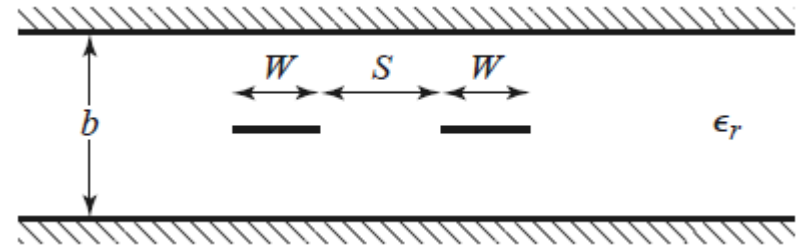


# LINHAS ACOPLADAS

## Exemplos de Linhas Acopladas

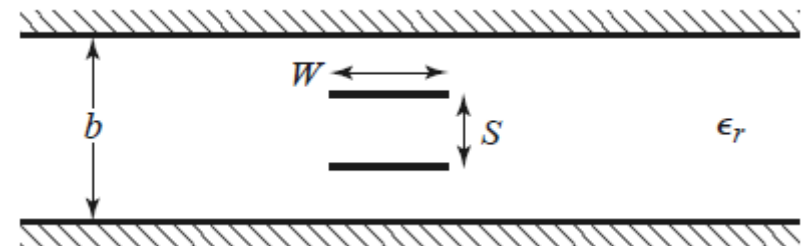
- *Striplines* acopladas

- Planar
- Acopladas pela **borda**

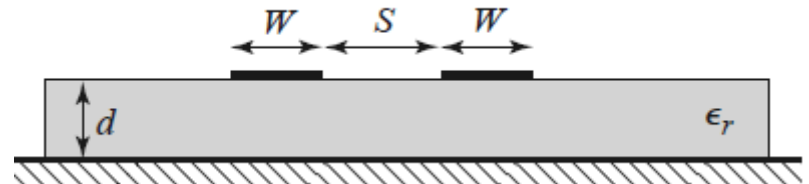


- *Striplines* acopladas

- Empilhadas
- Acopladas pelo **lado mais largo**



- *Microstrip lines* acopladas



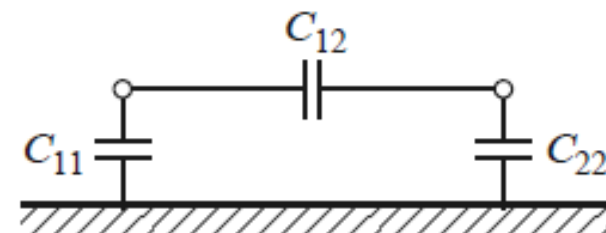
# LINHAS ACOPLADAS

- Linhas acopladas simétricas
  - Modelo de 3 fios
  - Circuito equivalente capacitivo
- Assumindo propagação no modo TEM
  - Características elétricas determinadas pelas capacitâncias
    - $C_{11}$  e  $C_{22}$  capacitâncias entre uma tira condutora e o plano de terra
    - $C_{12}$  capacitância entre as tiras condutoras

$C_{11}$ ,  $C_{22}$  e  $C_{12}$ : capacitâncias por unidade de comprimento



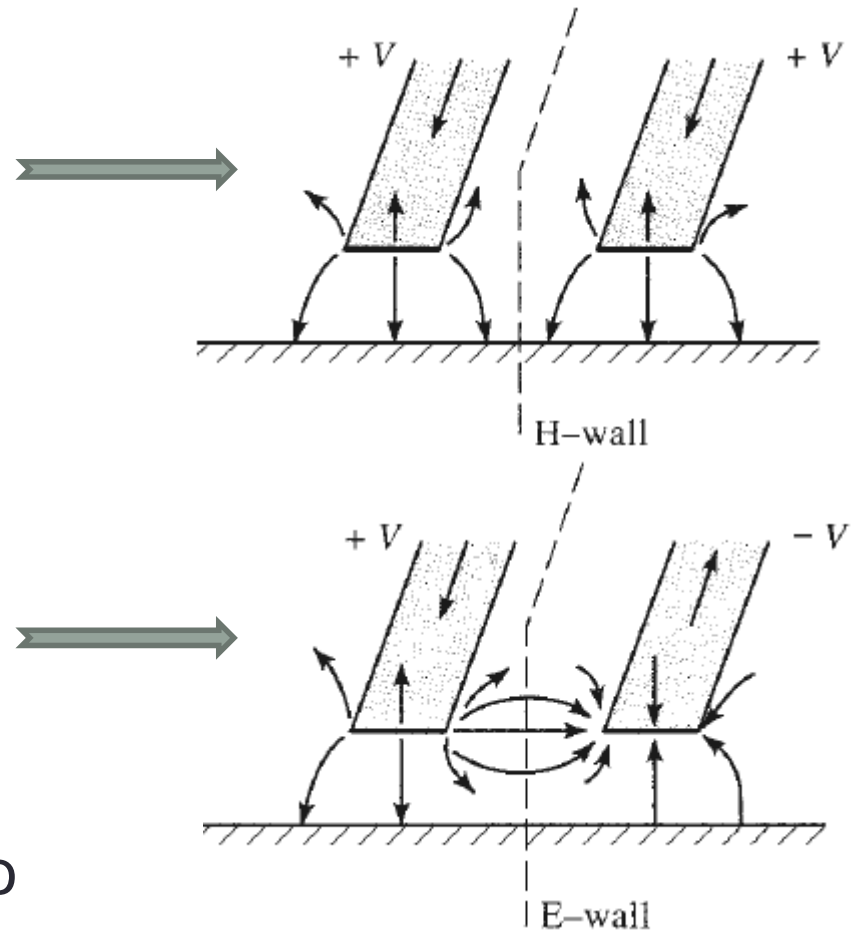
Modelo de três fios da  
LT acoplada



Circuito equivalente da  
LT acoplada

# LINHAS ACOPLADAS

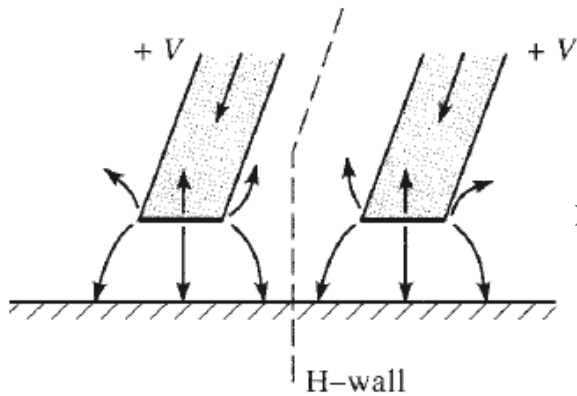
- Dois tipos de excitação
  - **Modo par (*even*)**
  - Correntes nas duas fitas
    - Mesma amplitude
    - Mesma direção
  - **Modo ímpar (*odd*)**
  - Correntes nas duas fitas
    - Mesma amplitude
    - Direções opostas
- Outros modos de excitação
  - Combinação dos modos par e ímpar



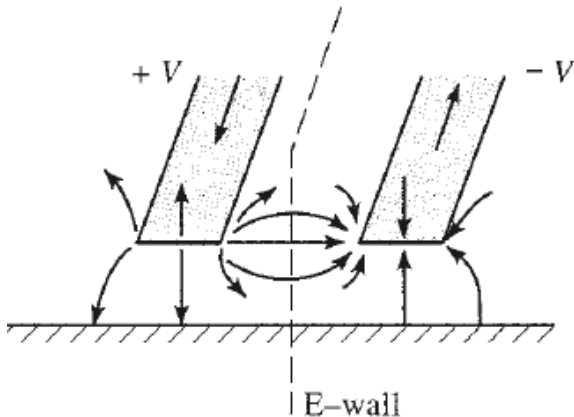
# LINHAS ACOPLADAS

- Impedância característica da linha acoplada

$$Z_0 = \sqrt{Z_{0e} \cdot Z_{0o}}$$



$Z_{0e}$  - Impedância característica de modo par



$Z_{0o}$  - Impedância característica de modo ímpar



# LINHAS ACOPLADAS

- Impedância característica  $Z_0 = \sqrt{Z_{0e} \cdot Z_{0o}}$

- Acoplamento de tensão  $C_V = \frac{Z_{0e} - Z_{0o}}{Z_{0e} + Z_{0o}}$

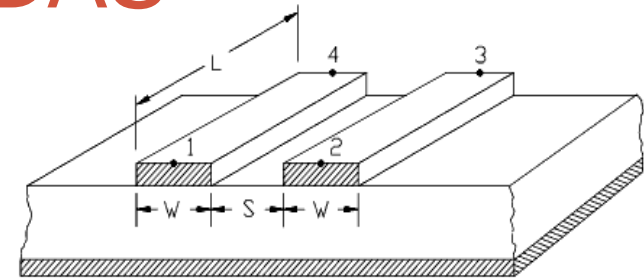
- Acoplamento em dB  $C(dB) = 20 \cdot \log \frac{Z_{0e} - Z_{0o}}{Z_{0e} + Z_{0o}}$

- $C$  e  $Z_0 \rightarrow$  funções  $W$  – largura das fitas metálicas  
 $S$  – espaçamento entre as fitas metálicas

- Projeto de linhas acopladas

- Especificados  $C$  e  $Z_0$

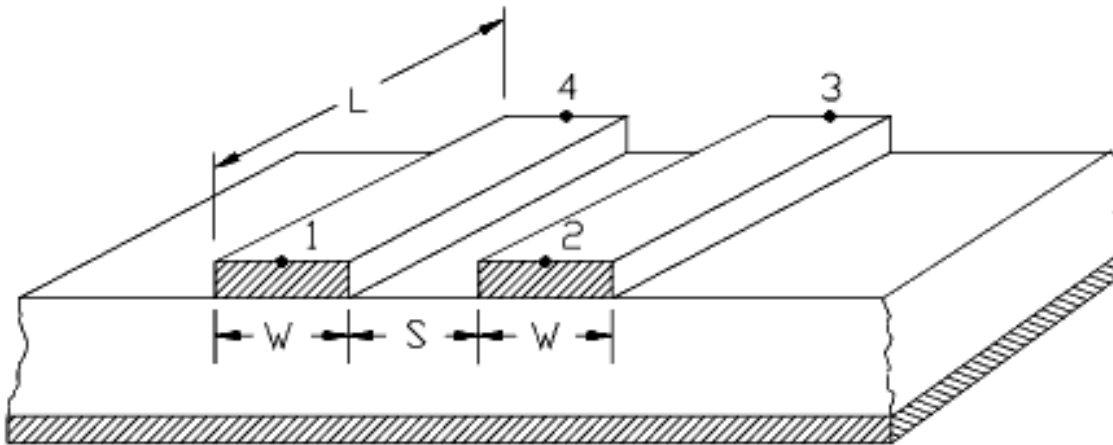
- Define-se o substrato a ser usado



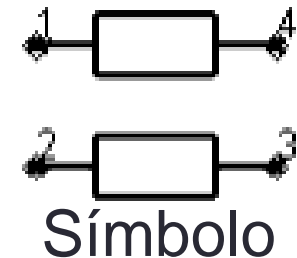
Obtém-se os valores de  $S$  e  $W$

# LINHAS ACOPLADAS

- Exemplo 4 – ferramentas de CAD
  - *Microstrip lines* acopladas
  - CAD  $\Rightarrow$  ADS/Agilent
    - MCLIN  $\Rightarrow$  Microstrip Coupled Lines



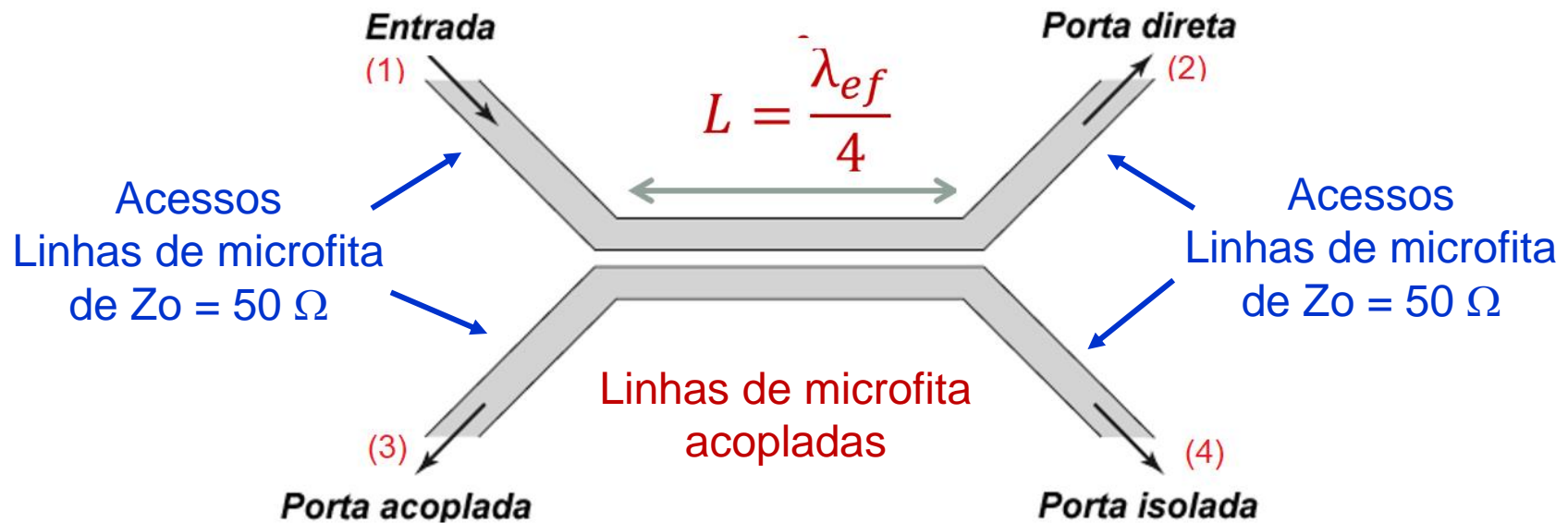
Estrutura das linhas acopladas



layout

# LINHAS ACOPLADAS

Projeto de acoplador direcional de uma seção



- Especificações

- Acoplamento: -15 dB
- Frequência central: 5 GHz
- $Z_0 = 50 \Omega$

- Substrato

$$\epsilon_r = 2,2 \quad h = 0,508 \text{ mm} \quad \text{tg}\delta = 0,001$$

$$\sigma = 5,8e7 \text{ S/m} \quad t = 17 \mu\text{m}$$

# LINHAS ACOPLADAS

## Projeto de acoplador direcional de uma seção

- Linhas acopladas → LineCalc
  - Acoplamento: -15 dB
  - $Z_0 = 50 \Omega$
  - Frequência central: 5 GHz
  - Comprimento elétrico: 90 graus

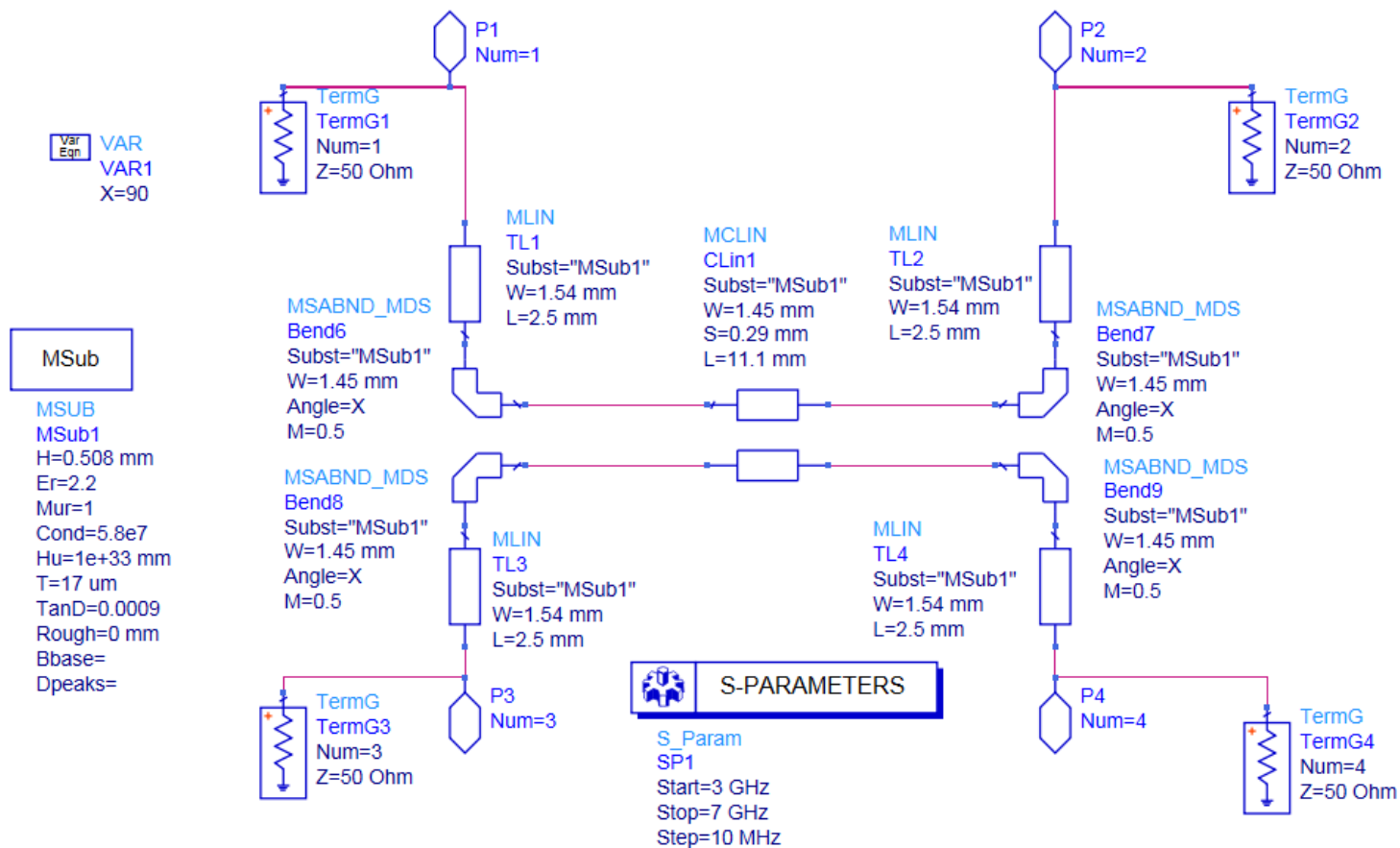
→  $W = 1,488 \text{ mm}$   
 $S = 0,287 \text{ mm}$

→  $L = 11,046 \text{ mm}$
- Acessos em linhas de microfita → LineCalc
  - $Z_0 = 50 \Omega$

→  $W = 1,58 \text{ mm}$

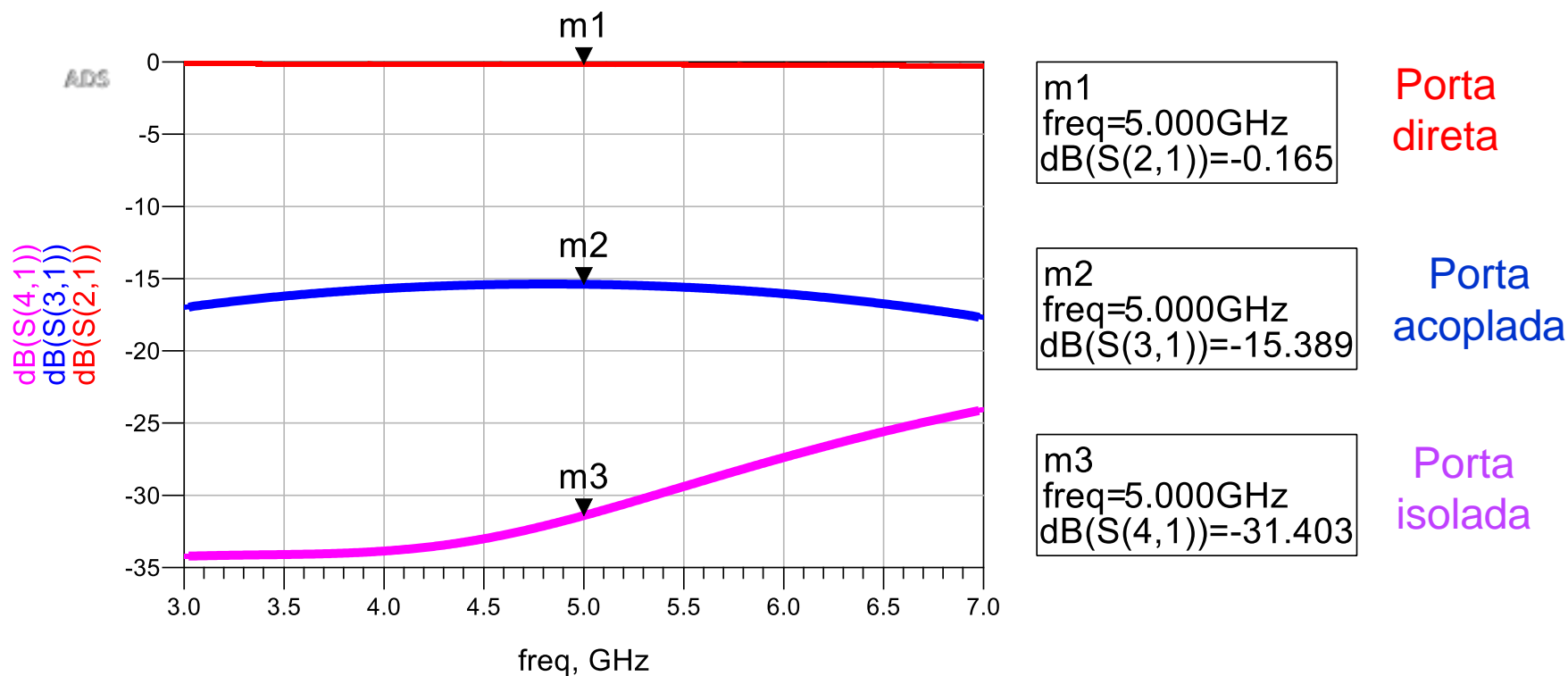
## Projeto de acoplador direcional de uma seção

Circuito esquemático do acoplador com acessos em linha de microfita



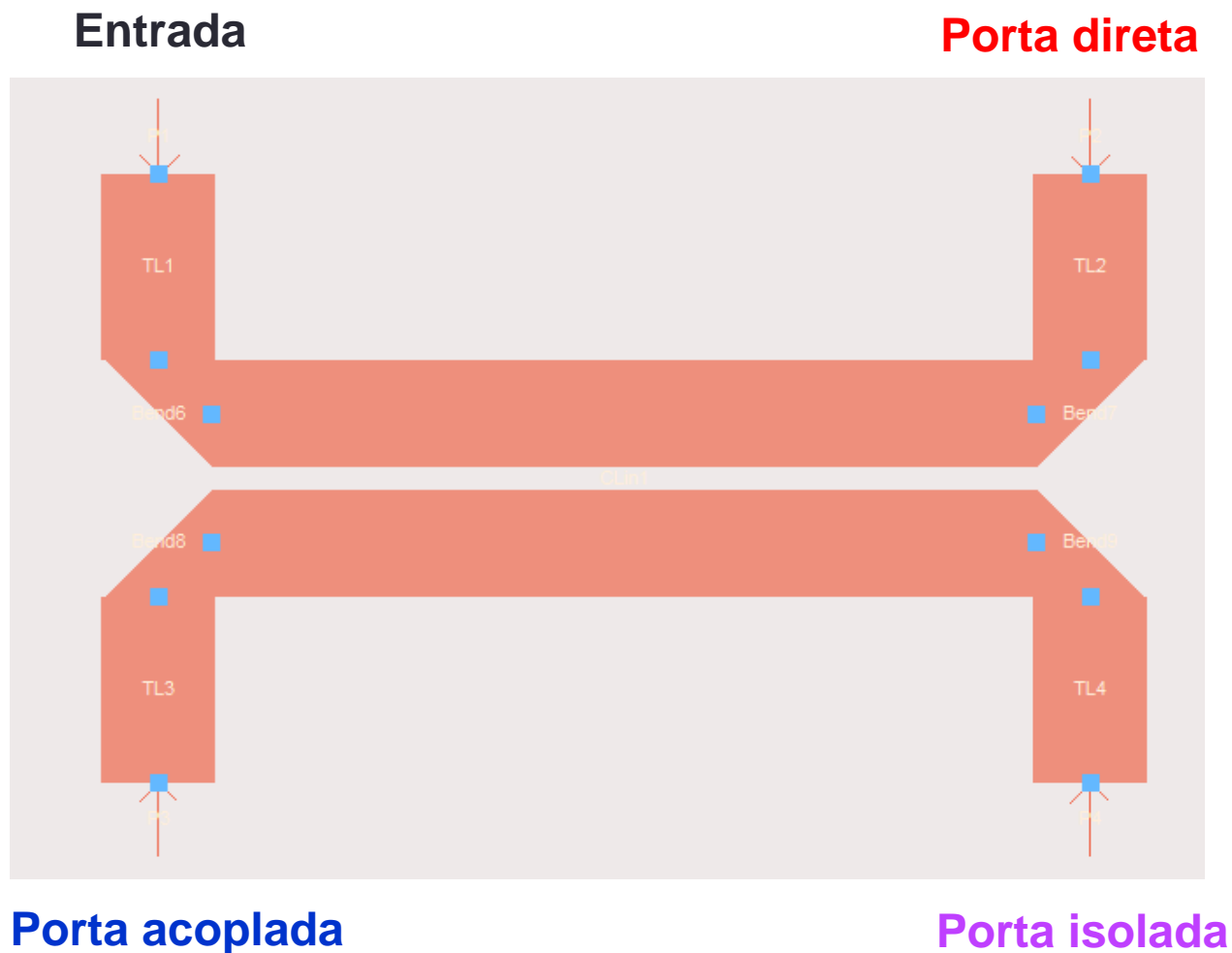
# Projeto de acoplador direcional de uma seção

## Resultados da simulação



# Projeto de acoplador direcional de uma seção

## Leiaute do acoplador



# APLICAÇÕES DE LINHAS PLANARES



# APLICAÇÕES DE LINHAS PLANARES

- Circuitos passivos de micro-ondas
  - Filtros
  - Acopladores
  - Divisores e combinadores de potência, etc...
  - Exemplos: ADS – Passive Circuits DG – Microstrip Circuits
- Circuitos ativos de micro-ondas
- Amplificadores, osciladores
  - Circuitos de casamento de impedância
  - Ressonadores, etc...

# Divisores e Combinadores de Potência

## Função dos circuitos

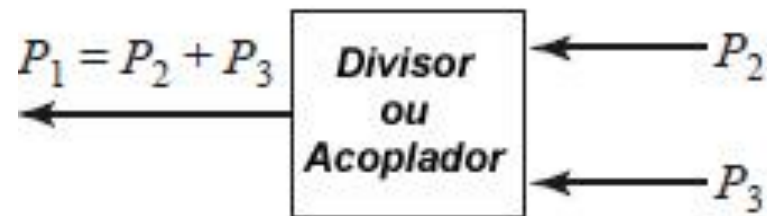
### • Divisor de potência

- Divide a potência de entrada
- Entre 2 ou mais saídas
- Em partes iguais ou diferentes



### • Combinador de potência

- Combina a potência
- De 2 ou mais entradas
- Entrega na porta de saída

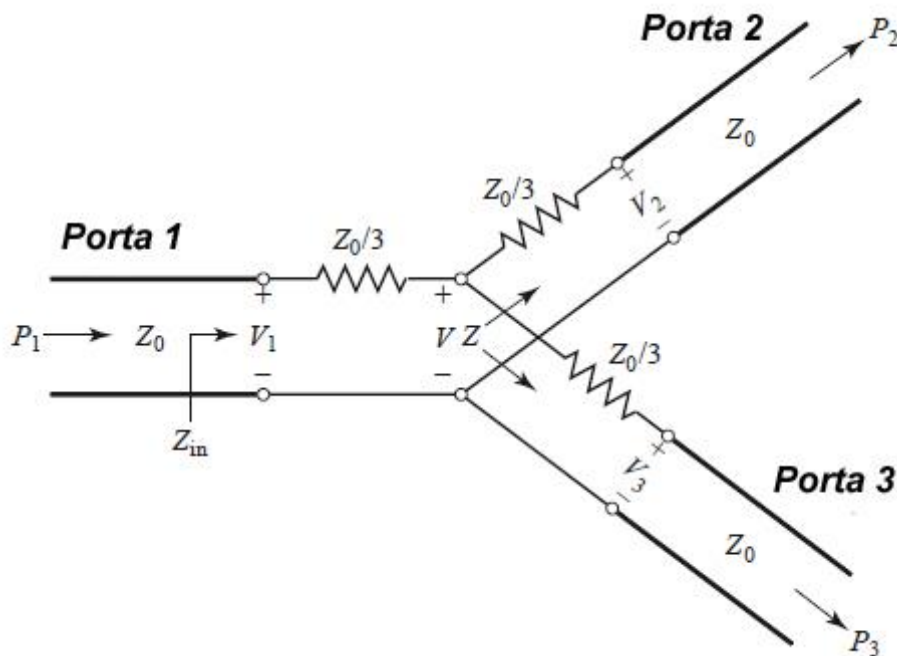


# Divisores e Combinadores de Potência

- **Tipos mais comuns**
  - Divisor resistivo (tem perdas resistivas)
  - Divisor de Wilkinson
  - Híbridos de  $90^\circ$
  - Híbridos de  $180^\circ$
  - Acoplador direcional de linhas acopladas
  - Acoplador de Lange

# Divisor Resistivo

- Sinal de entrada  $\rightarrow$  porta 1
- Divisão de potência igual entre portas 2 e 3



## Vantagem

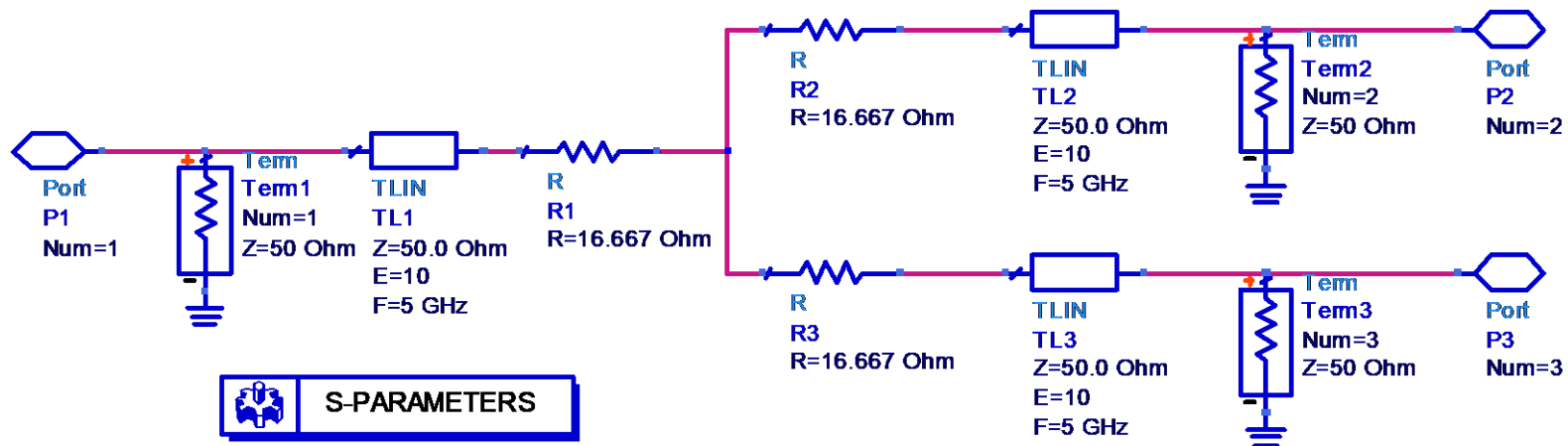
- Banda larga

## Desvantagem

- Resistores consomem potência  $\rightarrow$  perdas

# Divisor Resistivo

- Simule o divisor resistivo com linhas de transmissão ideais
- Trace as curvas de  $S_{21}$ ,  $S_{31}$  e  $S_{32}$  ideais
- Trace as curvas de  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  e  $S_{32}$  ideais
- Verifique que esse divisor opera em banda larga



**S-PARAMETERS**

S\_Param

SP1

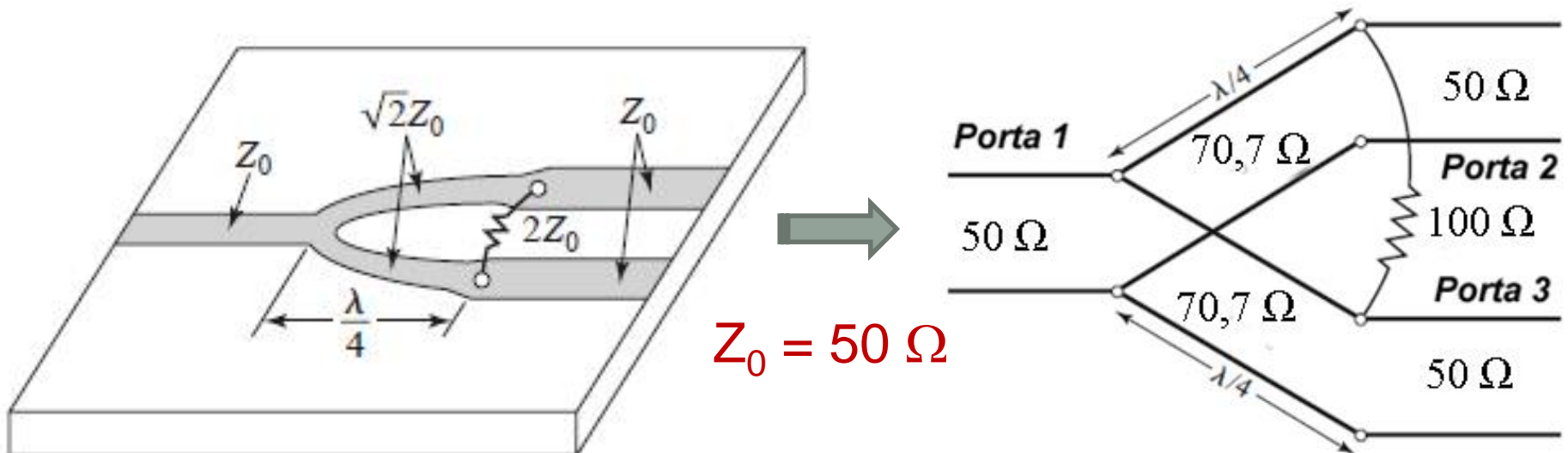
Start=1.0 GHz

Stop=10.0 GHz

Step=10 MHz

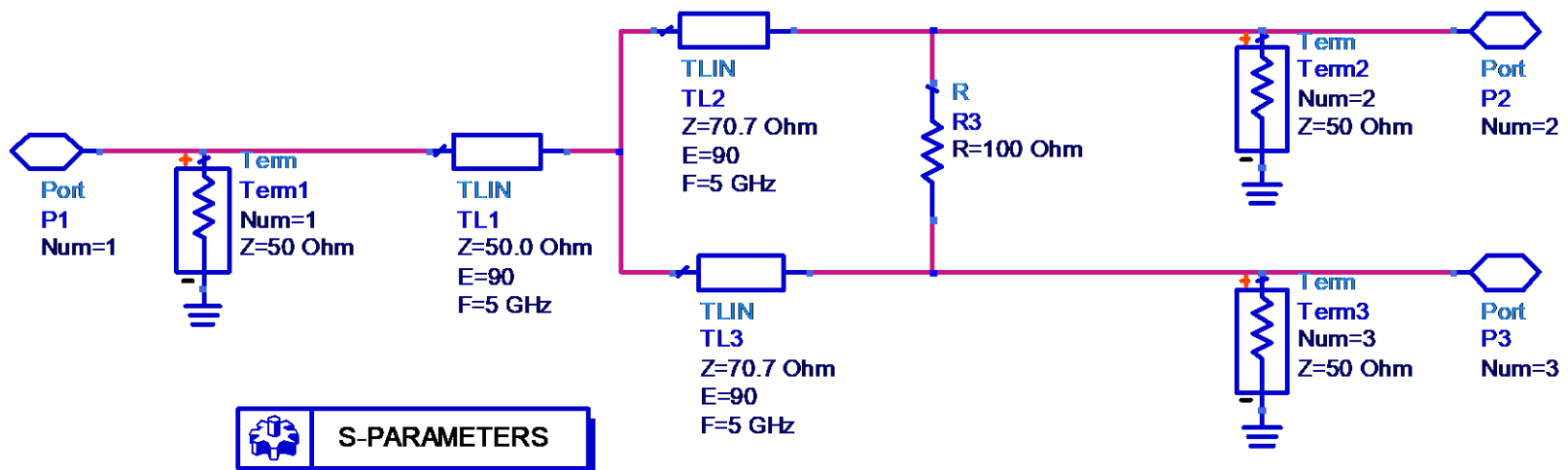
# Divisor de Wilkinson

- Sinal de entrada  $\rightarrow$  porta 1
- Divisão **igual** de potência entre as portas 2 e 3



# Divisor de Wilkinson

- Simule o Divisor de Wilkinson com linhas de transmissão ideais
- Trace as curvas de  $S_{21}$ ,  $S_{31}$  e  $S_{32}$  ideais
- Trace as curvas de  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  e  $S_{32}$  ideais
- Verifique que esse divisor opera em banda estreita



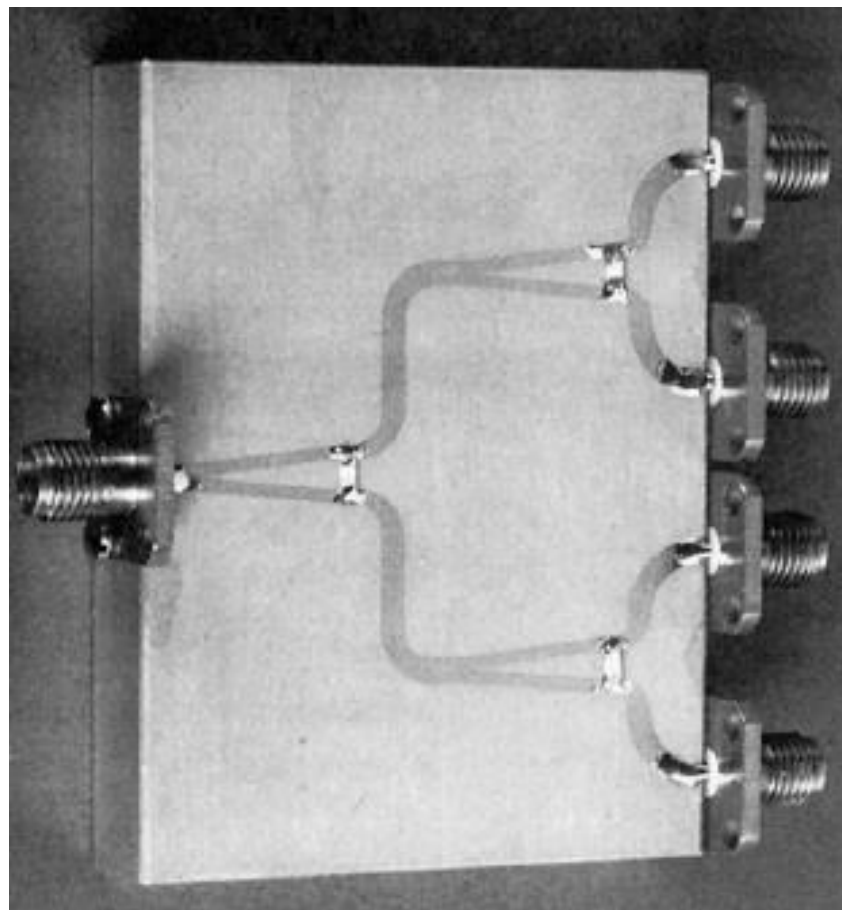
**S-PARAMETERS**

S\_Param  
 SP1  
 Start=1.0 GHz  
 Stop=10.0 GHz  
 Step=10 MHz

## Divisor de Wilkinson

- Divisor de potência com 4 saídas iguais
- Usando 3 Divisores de Wilkinson

Entrada



Saída 1

Saída 2

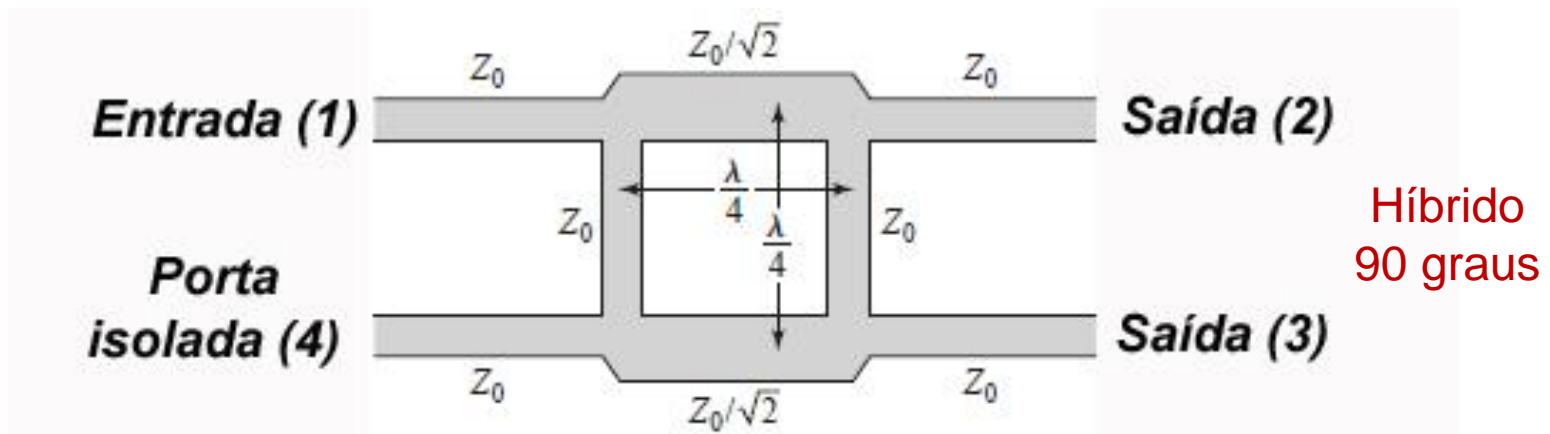
Saída 3

Saída 4



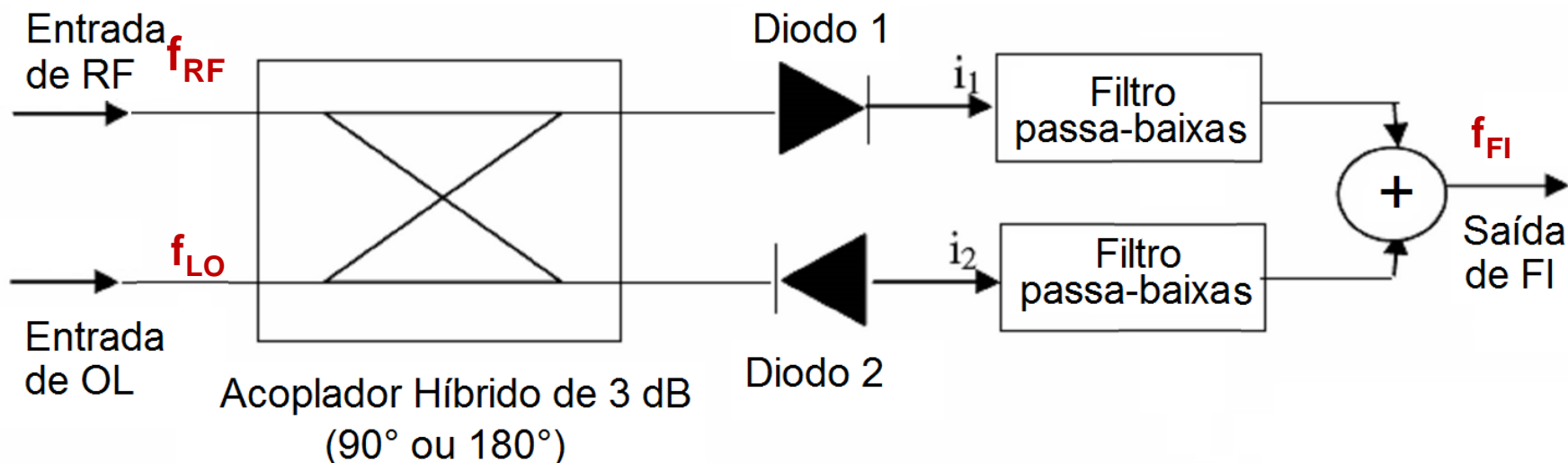
# Acoplador Híbrido de Quadratura ou de 90°

- Híbrido de quadratura ou de 90°
  - Acopladores direcionais de 3 dB – potência de entrada divide-se igualmente entre as saídas acopladas (1) e (2),
  - Diferença de fase de 90° entre os sinais de saída dos braços acoplados



- Impedância característica das linhas em paralelo:  $Z_0 = 50 \Omega$
- Impedância característica das linhas em série:  $Z_0/\sqrt{2} = 35,35 \Omega$
- Entrada → porta 1    Saídas → portas 2 e 3    Porta isolada → porta 4

# Conversor de Frequência usando Híbrido de 90°



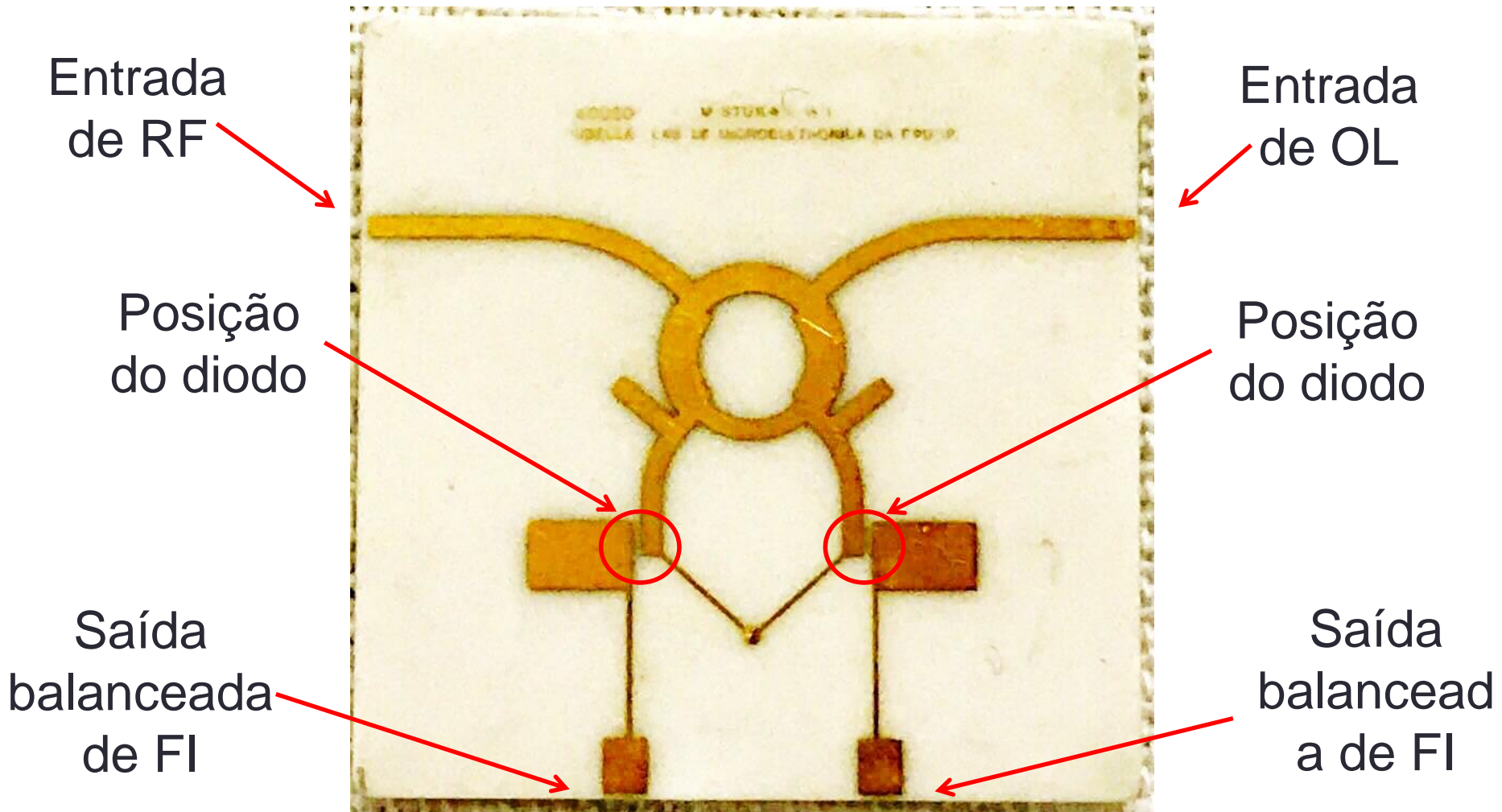
“Conversor de frequência” ou “*Mixer*”, tipo “*down converter*”

RF – sinal de rádio frequência modulado (portadora) →  $f_{RF}$

OL – sinal de Oscilador Local →  $f_{LO}$

FI – Frequência Intermediária →  $f_{FI} = f_{RF} - f_{LO}$  ou  $f_{FI} = f_{LO} - f_{RF}$

# Conversor de Frequência com Híbrido de 90°

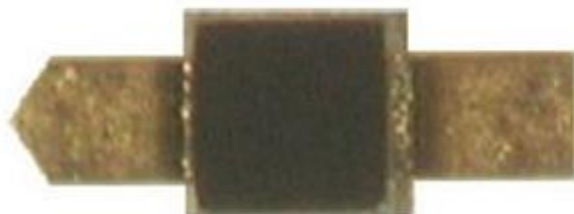


Projeto USP / Phillips-Inbelsa – 1972, Prof. José Kleber da Cunha Pinto

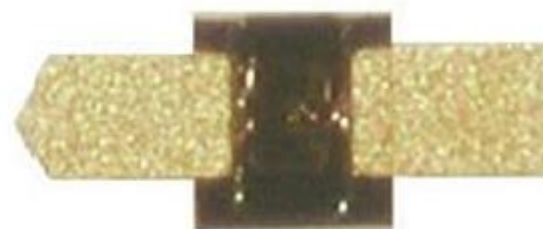
# Detalhe da montagem dos diodos

Diodo Schottky *beam lead*

Vista superior

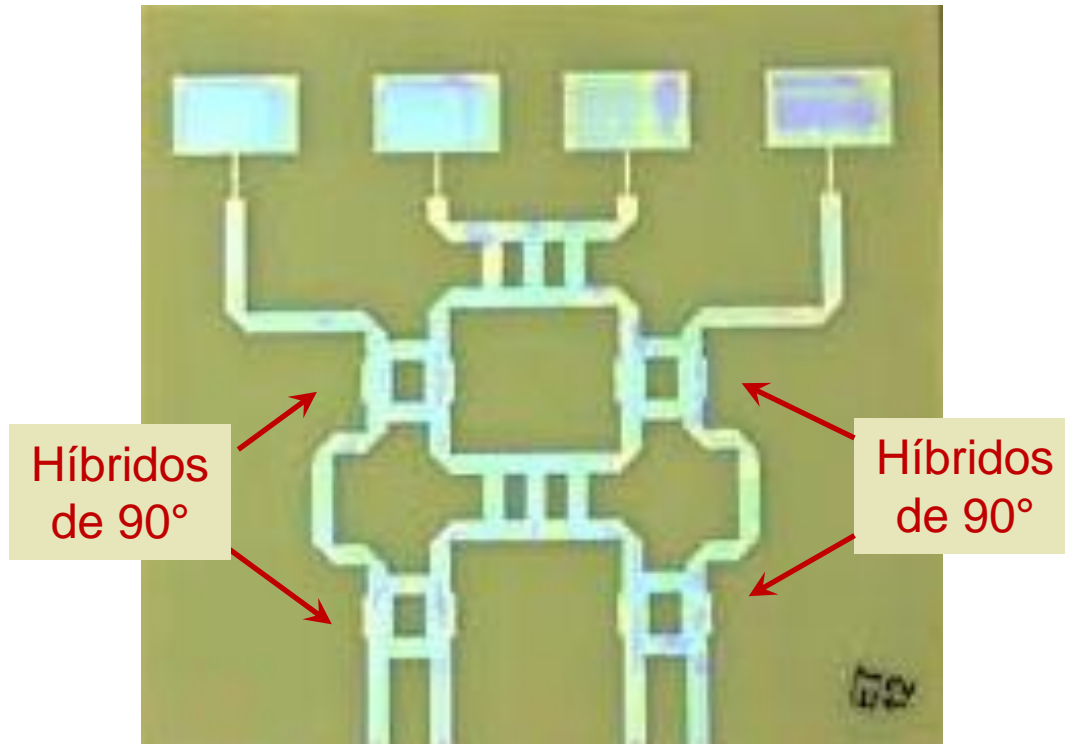


Vista inferior



← Diodo Schottky  
*beam lead* soldado  
sobre a alumina

# Antena Butler usando Híbridos de 90°

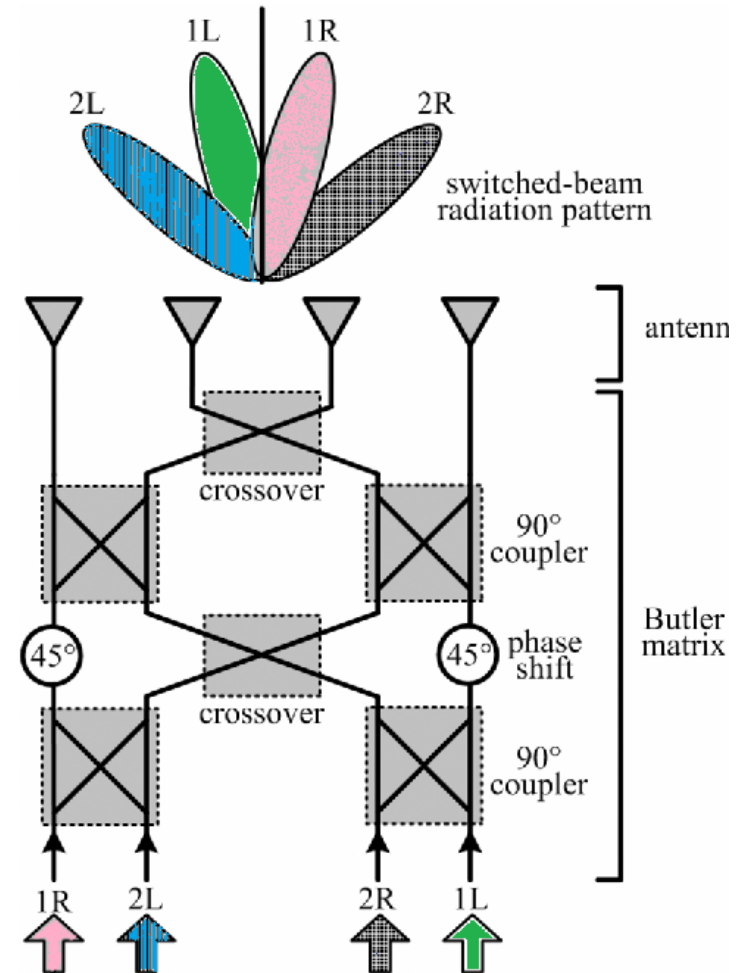


Híbridos  
de 90°

Híbridos  
de 90°

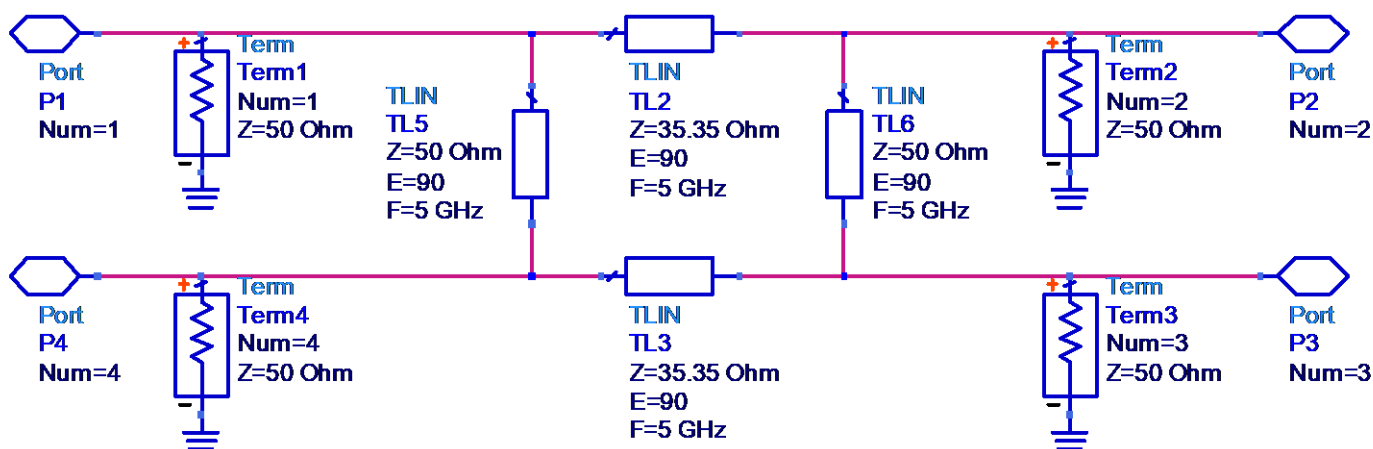


Chaveando-se o sinal de RF entre as **entradas** altera-se a direção do lóbulo principal da antena



# Híbridos de Quadratura (90°)

- Estude as características do acoplador *branch arm* com LTs ideais
- Trace as curvas de  $S_{21}$ ,  $S_{31}$  e  $S_{41}$  em dB
- Trace as curvas de fase de  $S_{21}$  e  $S_{31}$
- Trace as curvas de  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  e  $S_{32}$  em dB
- Verifique que esse divisor opera em banda estreita

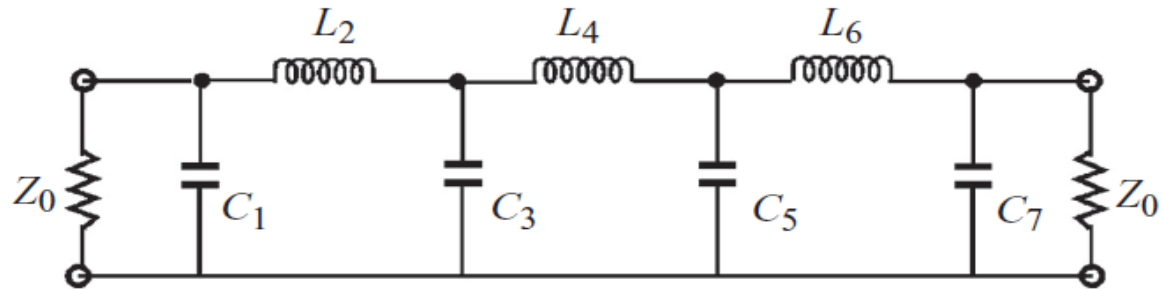


 S-PARAMETERS

S\_Param  
SP1  
Start=1.0 GHz  
Stop=10.0 GHz  
Step=10 MHz

# Filtro passa-baixas usando linhas de microfita

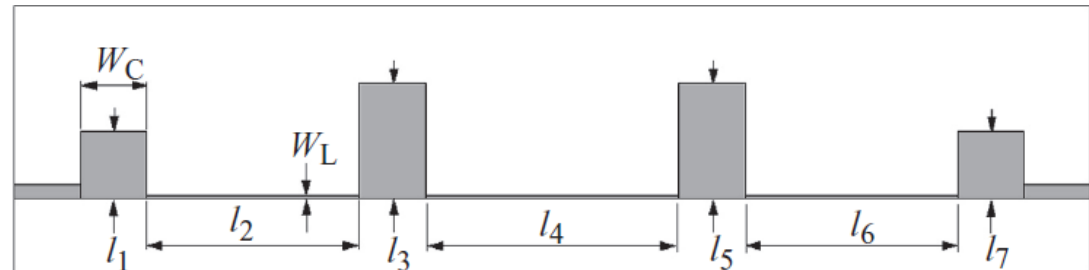
- Protótipo de filtro LC



## Filtro passa-baixas usando tocos (*stubs*)

- Indutores
  - Linhas de transmissão em série com alta impedância característica
- Capacitores
  - Trechos de linha de transmissão de baixa impedância, em paralelo, terminados em circuito-aberto  $\rightarrow$  *open stubs*

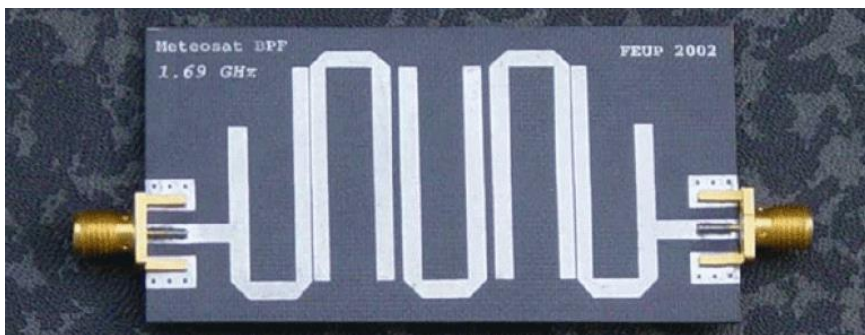
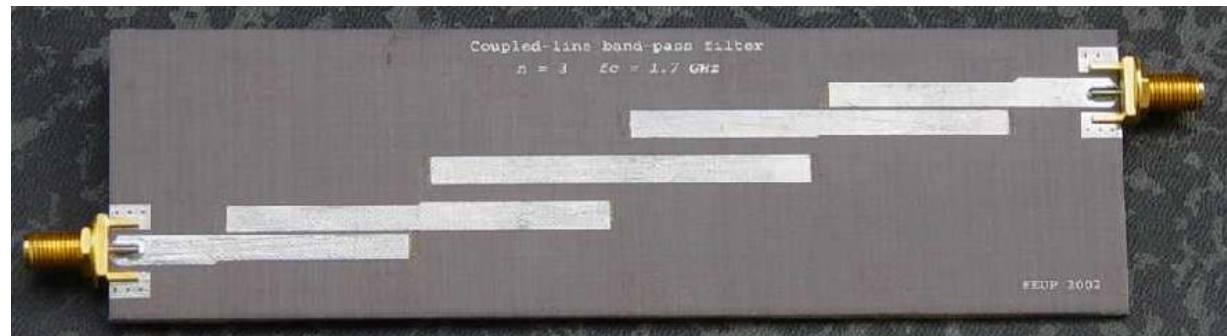
- Protótipo usando linhas de microfita



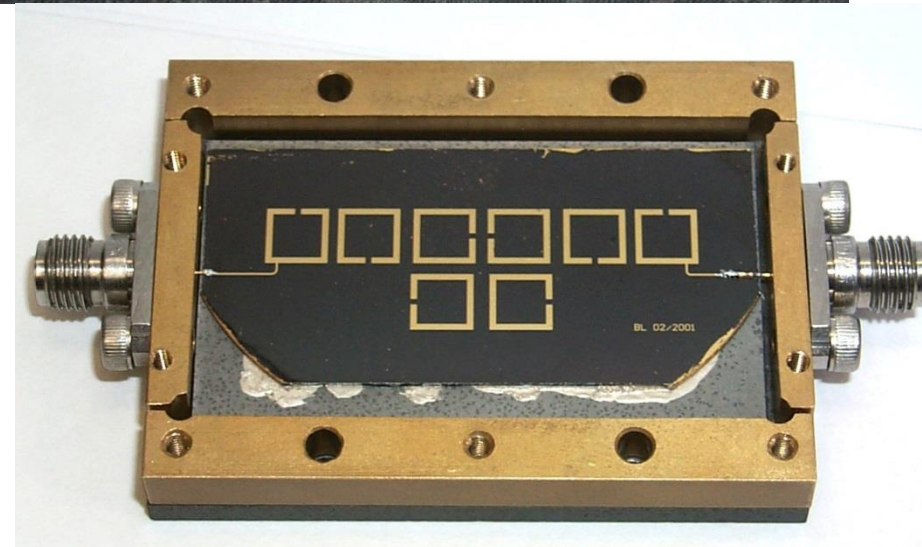
## Filtros passa-faixa

- Empregam linhas de transmissão acopladas
- Exemplos

Filtro de linhas de microfita acopladas pela borda



Filtro Hairpin



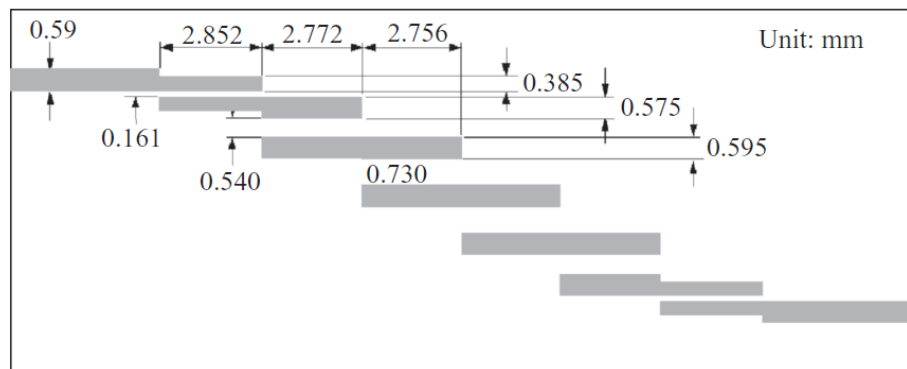
Filtro de Ressonadores Acoplados



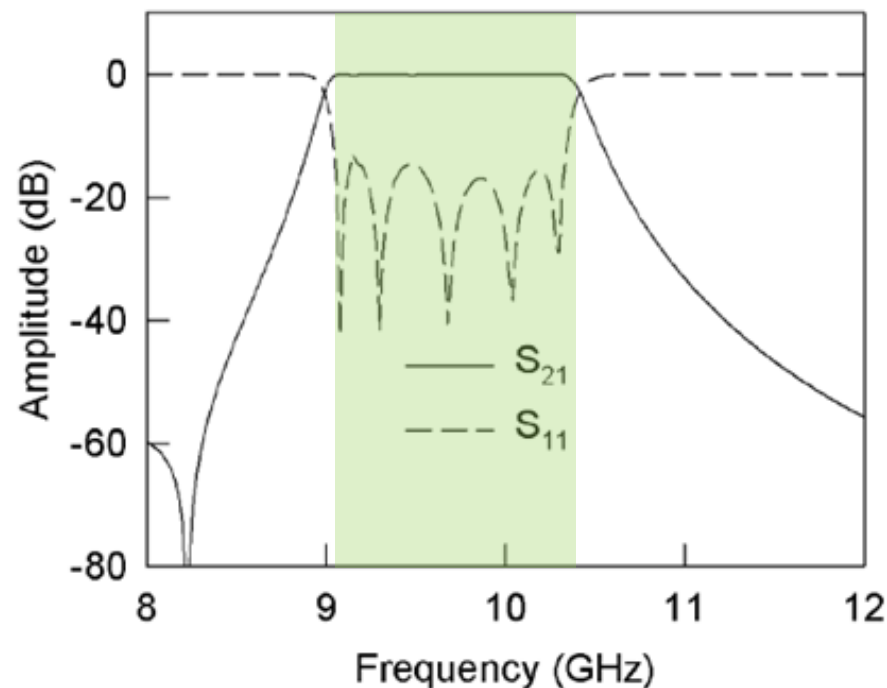
# Filtro passa-faixa de linhas de microfita paralelas acopladas pela borda

## Exemplo

- Leitura de filtro em microfita
  - Substrato:  
 $\epsilon_r=10,2$  e  $h = 0,635$  mm



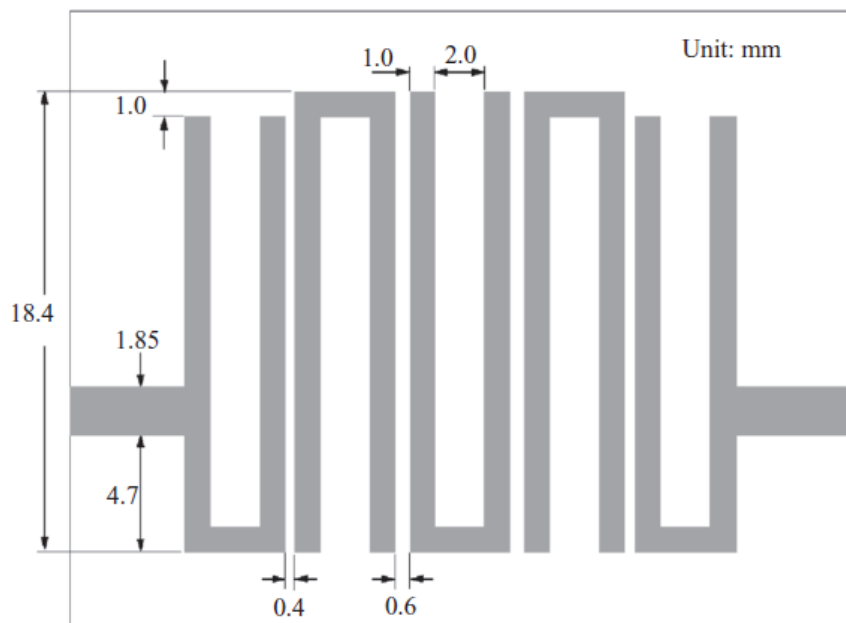
- Resposta em frequência



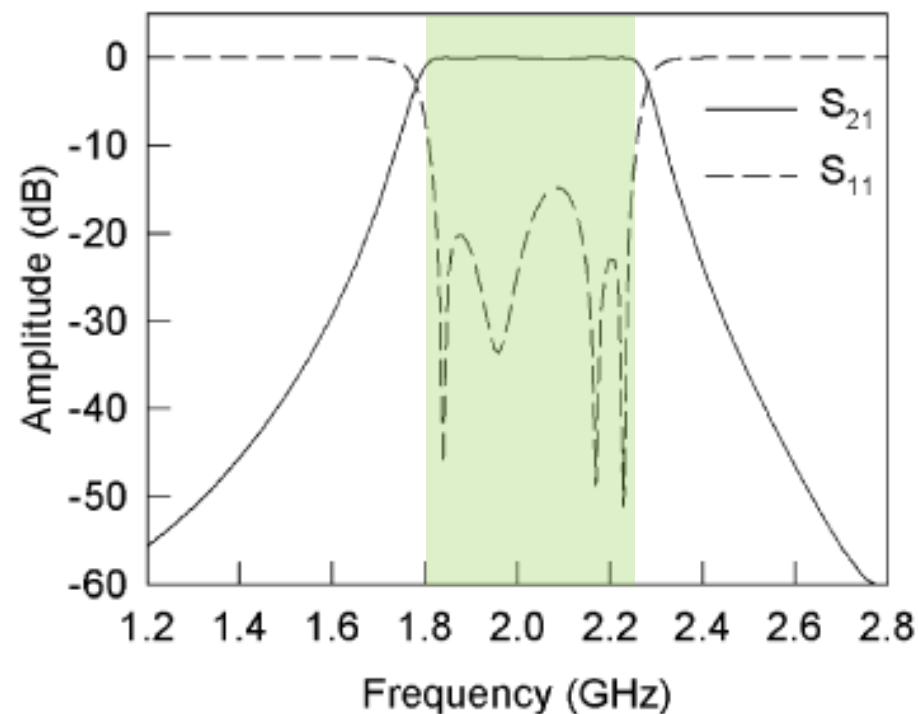
# Filtro passa-faixa Hairpin

## Exemplo

- Leiaute de filtro em microfita
  - Substrato:  
 $\epsilon_r=10,2$  e  $h = 1,27$  mm



- Resposta em frequência



# Filtro passa-faixa usando ressoadores em microfita acoplados

## Exemplo

- Substrato:  $\epsilon_r=10,2$  e  $h = 1,27$  mm

