



PSI3581
CIRCUITOS DE MICRO-ONDAS
Circuitos Passivos

Prof.^a Dr.^a Fatima Salete Correra



Introdução

Circuitos de Micro-ondas

Classificação de circuitos de Micro-ondas



Circuitos Passivos

- Divisores de potência
- Combinadores de potência
- Acopladores
- Filtros
 - Passa-baixas
 - Passa-faixa
 - Passa alta
 - Rejeita faixa



Circuitos Ativos

- Amplificadores
- Osciladores
- Conversores de frequência
- Multiplicadores de frequência
- Divisores de frequência

Circuitos de Micro-ondas

Componentes dos Circuitos de Micro-ondas

Circuitos Passivos

Elementos concentrados

- Resistores
- Capacitores
- Indutores

Elementos distribuídos

- Linhas de transmissão
 - Cabos coaxiais
 - Linhas planares
- Guias de onda

Circuitos Ativos

- Componentes de circuitos passivos
- Diodos
 - Schottky, Varactor, Gunn, PIN
- Transistores
 - Bipolar e FETs
- Válvulas
 - Potências de kW

Circuitos de Micro-ondas

Componentes concentrados em frequências de micro-ondas – resistores, capacitores e indutores

- Condição para ser classificado como elemento concentrado
 - **Maior dimensão física $< \lambda/20$**
 - Efeitos parasitas afetam significativamente seu desempenho
 - Exigem modelagem precisa de efeitos parasitas
 - São geralmente empregados em Circuitos Integrados Monolíticos de Micro-ondas - MMICs
 - Dimensões são miniaturizadas
 - Processo de fabricação no *chip*
- } → Redução dos efeitos parasitas

Circuitos de Micro-ondas

Componentes passivos concentrados de micro-ondas

- Resistores discretos

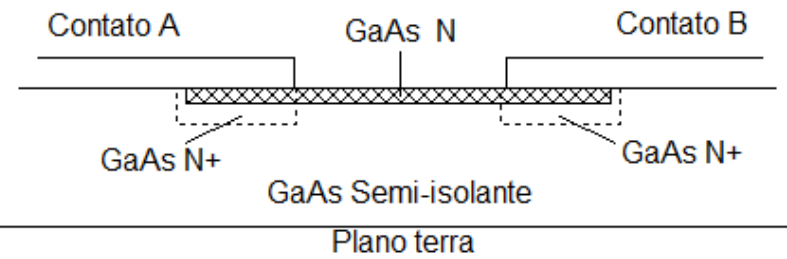
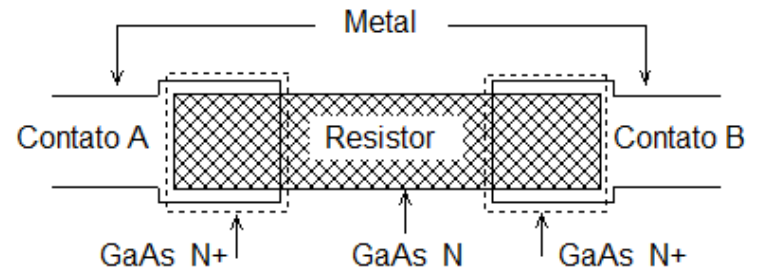
- Componentes individuais, soldados sobre o substrato
- Exemplo



Resistores SMD em filme-fino

Resistores Monolíticos

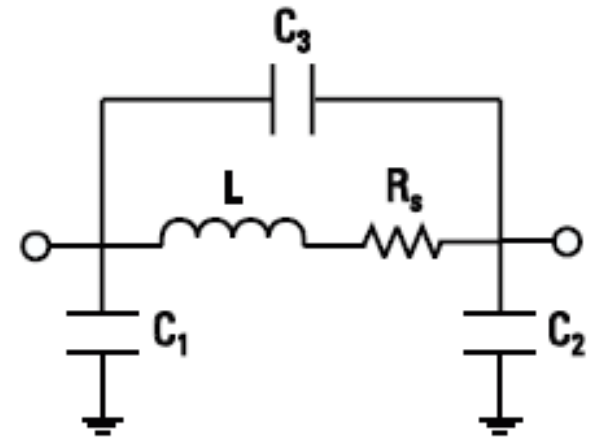
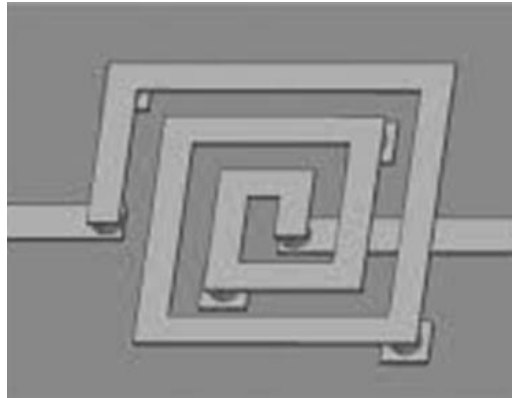
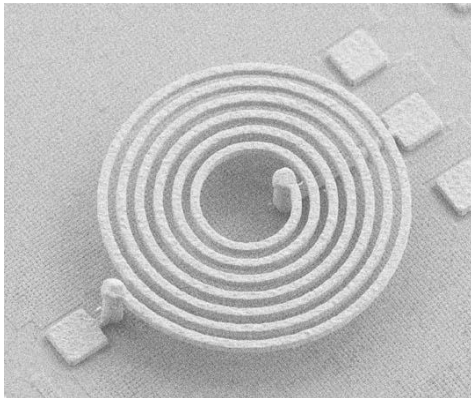
- Construídos no substrato semicondutor
- Exemplo – resistor de camada ativa



Circuitos de Micro-ondas

Componentes passivos concentrados de micro-ondas

- Indutores espirais planares
 - Construídos na face superior do substrato
 - Com plano de terra na face inferior do substrato



Modelo de circuito equivalente

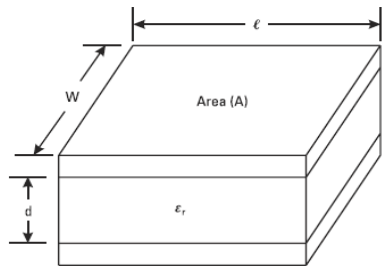
Circuitos de Micro-ondas

Componentes passivos concentrados de micro-ondas

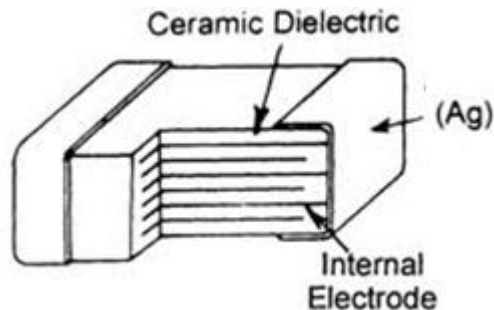
- Capacitores discretos

- Componentes individuais, soldados sobre o substrato

- Exemplo



Capacitor de placas paralelas de uma camada

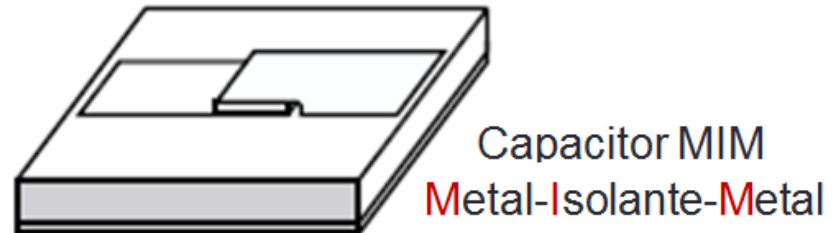


Capacitor multicamada

- Capacitores integrados

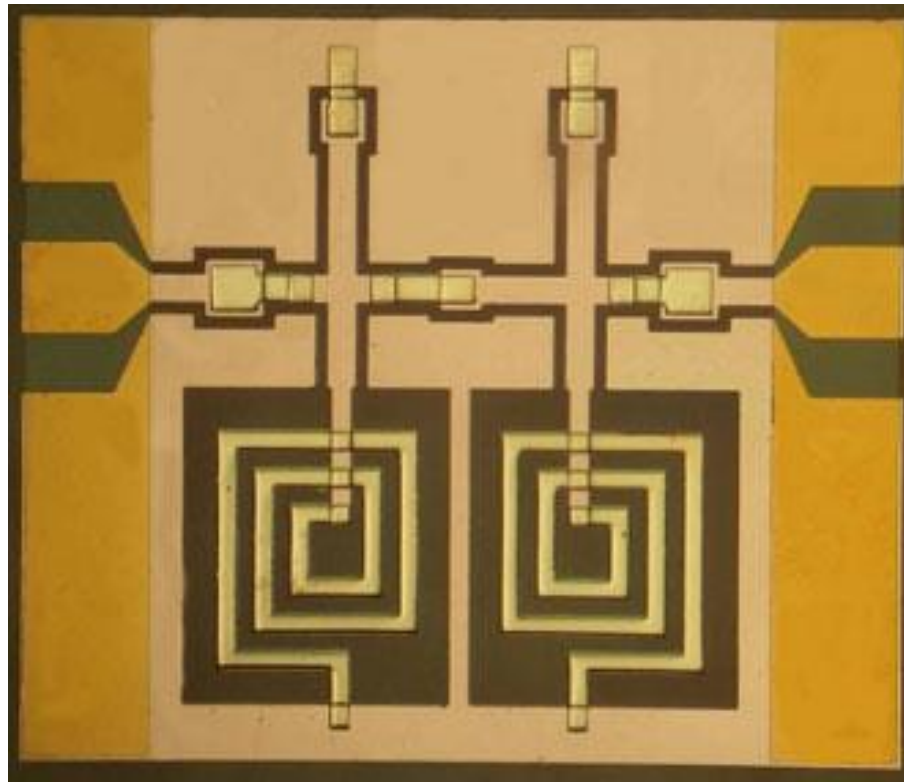
- Construídos sobre o substrato

- Exemplo



Circuitos de Micro-ondas

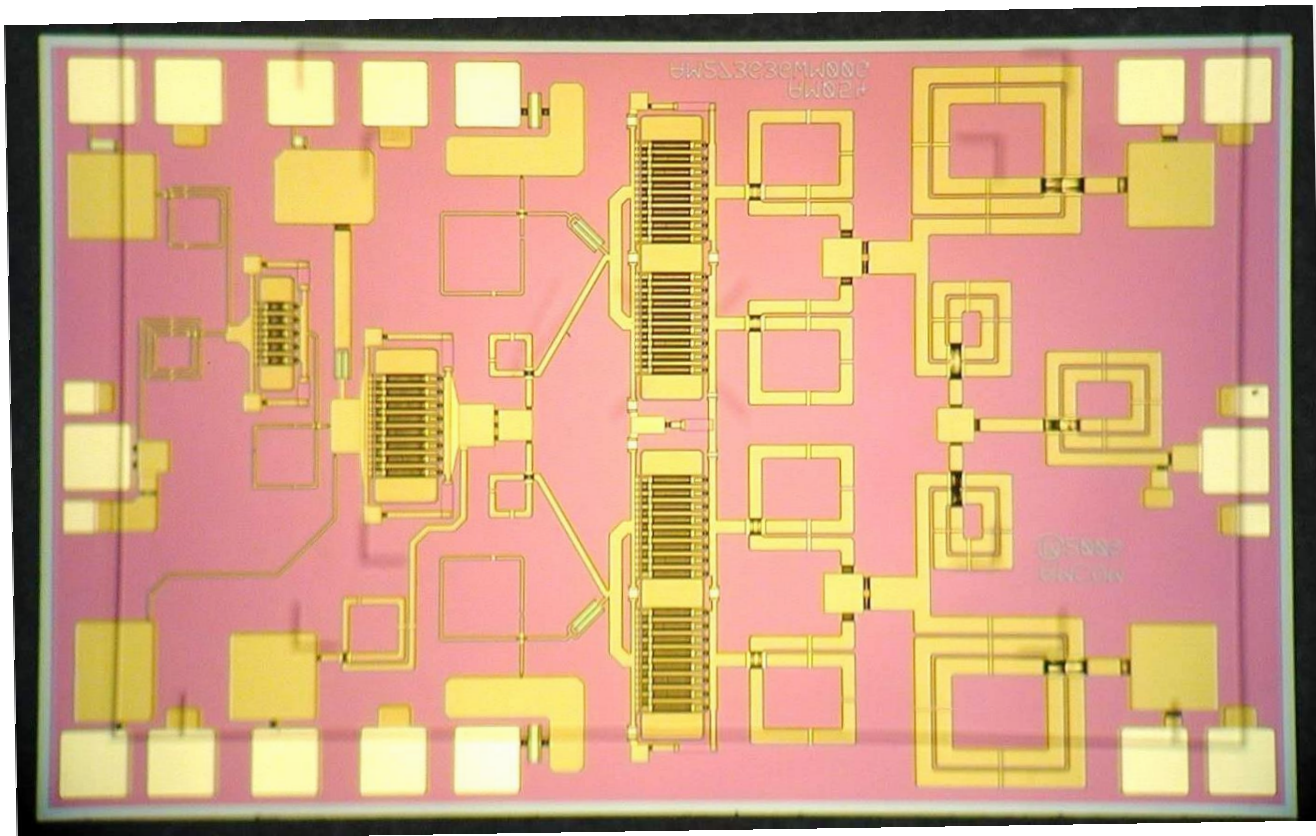
Exemplo de MMIC empregando elementos concentrados



Filtro passa-alta com indutores espirais planares e capacitores MIM (metal-isolante-metal)

Circuitos de Micro-ondas

Exemplo de MMIC empregando elementos concentrados



Amplificador com indutores planares e capacitores MIM

Circuitos de Micro-ondas

Componentes Distribuídos - Linhas de transmissão

- Condição para ser classificado como elemento concentrado
 - **Maior dimensão física $> \lambda/20$**
- Linhas de transmissão planares
 - Largamente usadas em circuitos de micro-ondas
 - Compactas, leves e de baixo custo
 - Diversos tipos: linha de microfita, triplaca, guia de ondas coplanar, linha de fenda, etc.
- Projeto de linhas de transmissão planares
 - Equações específicas para cada tipo de estrutura

Circuitos de Micro-ondas

Substratos usados em circuitos micro-ondas



Não ferromagnéticos

Materiais dielétricos

- Substratos cerâmicos
Exemplo: alumina
- Laminados de alta frequência
Exemplo: Duroid (Rogers Co.)

Semicondutores semi-isolantes

- Arseneto de Gálio
- Fosfeto de Índio



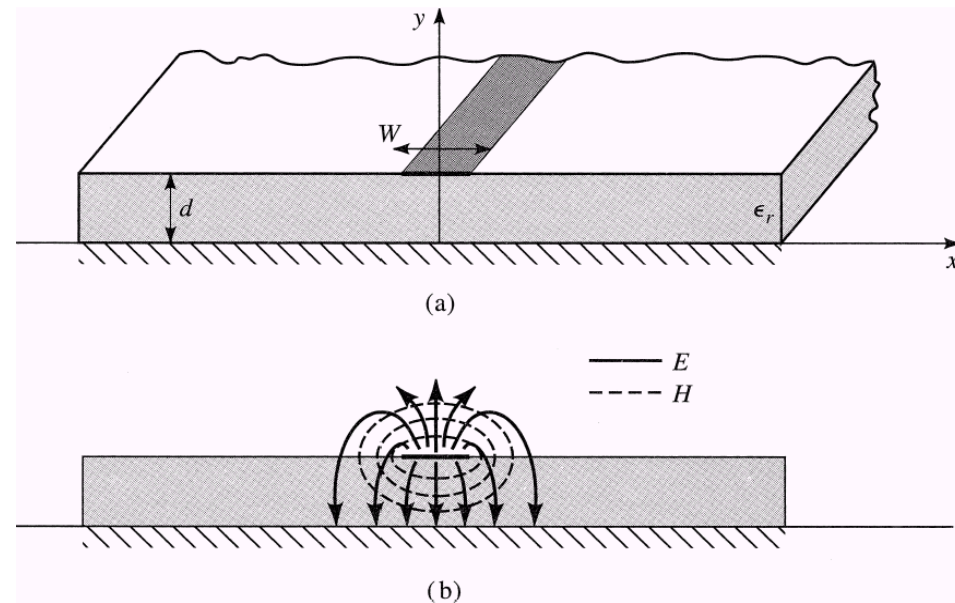
Ferromagnéticos

- Ferrite
 - Óxido de ferro
- Polarizados magneticamente
 - Imãs fixos
 - eletroímãs
- Aplicação
 - Circuladores
 - Isoladores

Circuitos de Micro-ondas

Linha de transmissão de microfita

- Linha de microfita
“*microstrip line*”
- Substrato dielétrico
- Plano de terra na face inferior
- Fita metálica na face superior, recoberta por ar

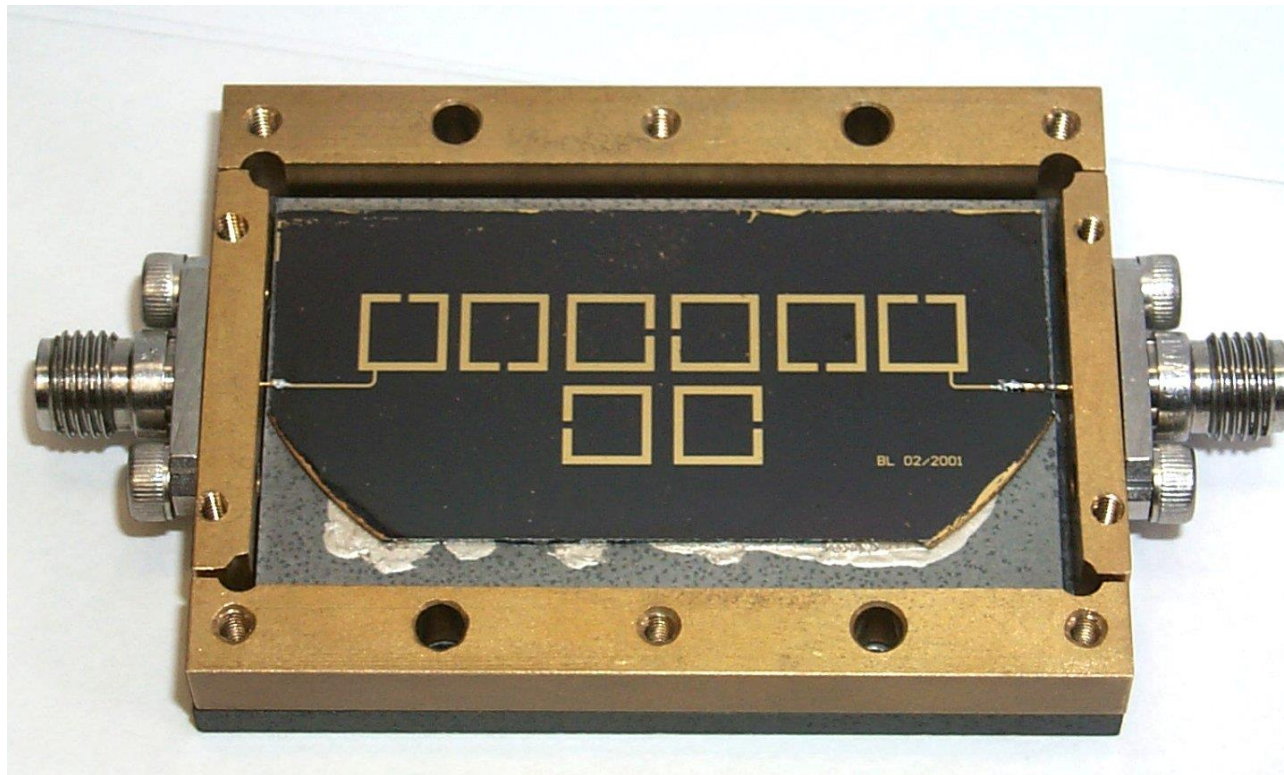


(a) Estrutura física

(b) Distribuição dos Campos EM

Circuitos de Micro-ondas

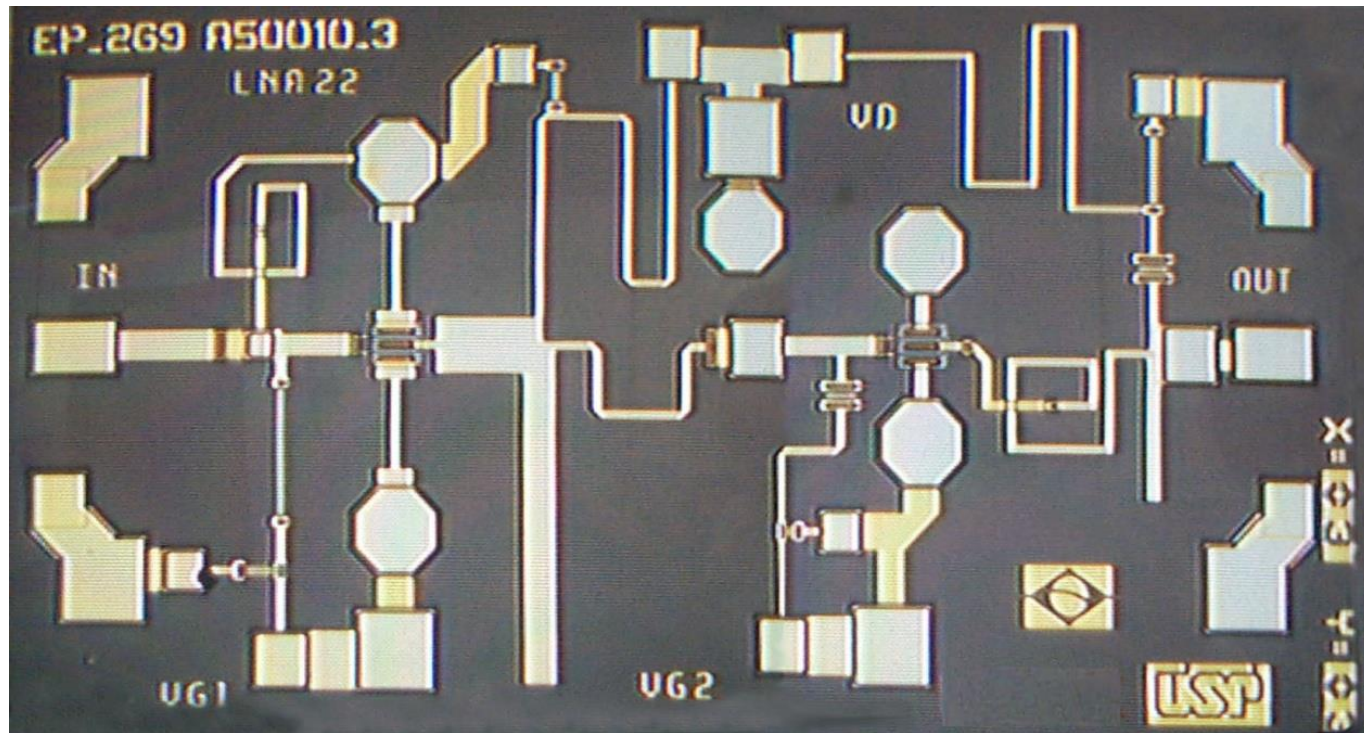
Exemplo de MMIC empregando elementos distribuídos



Filtro empregando ressoadores em anel acoplados

Circuitos de Micro-ondas

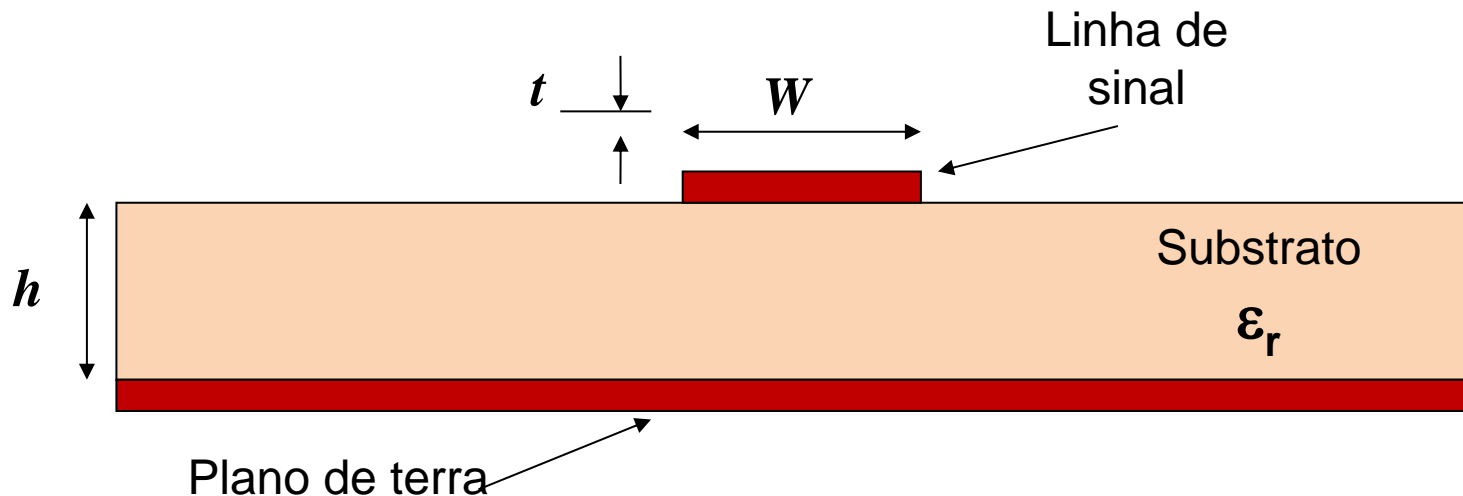
Exemplo de MMIC empregando elementos distribuídos



Amplificador monolítico empregando linhas de microfita

Linhas de microfita

Equacionamento

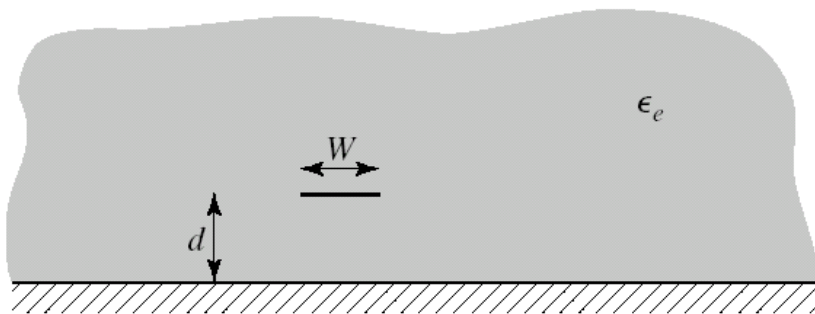
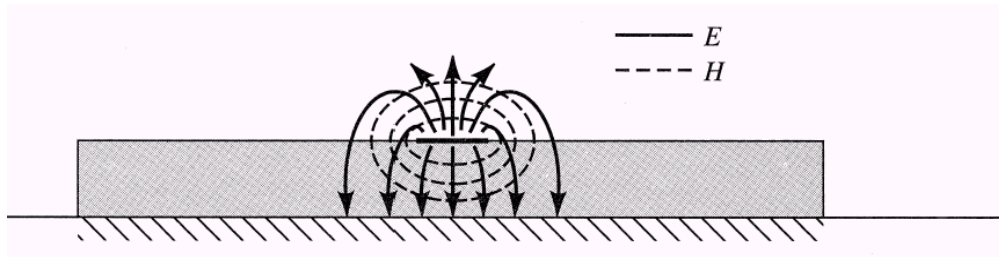


- Parâmetros da microstrip line ou microlinha de transmissão

h	espessura do substrato
ϵ_r	constante dielétrica relativa do substrato
W	largura da microfita
t	espessura do metal

Linhas de microfita

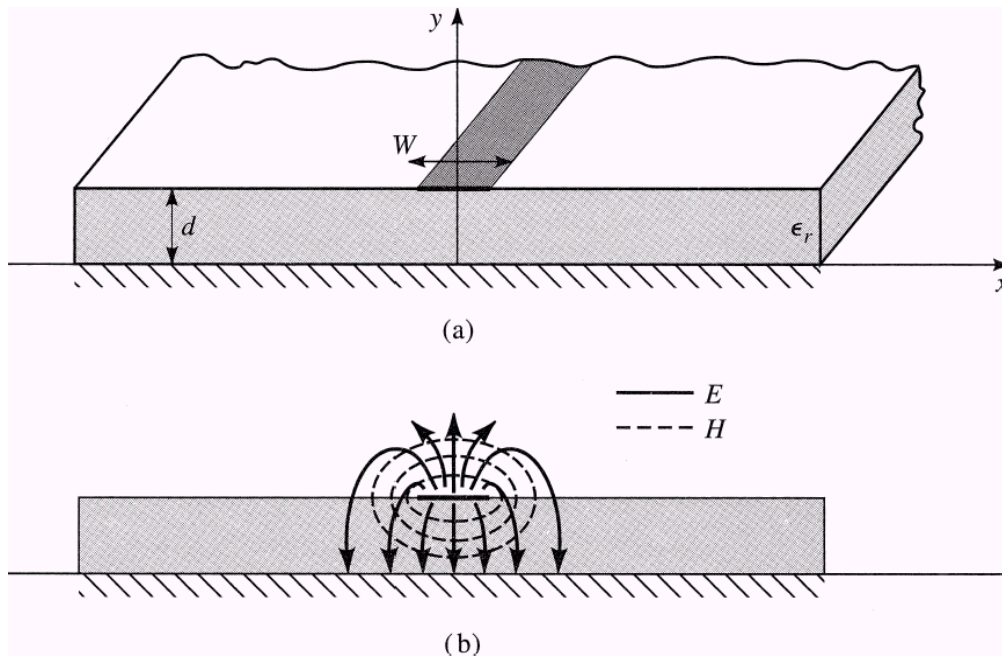
Constante dielétrica efetiva



- Microlinha de transmissão
 - Microfita sobre substrato com ϵ_r
 - Coberta por ar
- Estrutura equivalente
 - Microfita envolvida por meio uniforme
 - com ϵ_{ef}

Linhas de microfita

Constante dielétrica efetiva



- Propagação do campo EM
- Maior parte viaja pelo substrato
 - $\Rightarrow \epsilon_r > 1$
 - $\Rightarrow v = c/\sqrt{\epsilon_r}$
- Um a parte menor viaja pelo ar
 - $\Rightarrow \epsilon_r = 1$
 - $\Rightarrow v = c$
- Define-se uma constante dielétrica efetiva ϵ_{ef} da microlinha de transmissão

$$1 < \epsilon_{ef} < \epsilon_r \Rightarrow (\epsilon_r + 1)/2 < \epsilon_{ef} < \epsilon_r$$

Linhas de microfita

- Constante dielétrica efetiva

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

h espessura do substrato

ε_r constante dielétrica relativa do substrato

W largura da microfita

- Velocidade de propagação da onda

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{ef}}} \quad c: \text{velocidade da luz no espaço livre}$$

- Comprimento de onda

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{ef}}} \quad \lambda_0 = c/f \rightarrow \text{comprimento de onda no espaço livre}$$

Linhas de microfita

Impedância característica da linha de microfita

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

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

h espessura do substrato

ϵ_r constante dielétrica
relativa do substrato

W largura da microfita

t espessura do metal

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

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

Linhas de microfita

Perdas e Atenuação

- Atenuação devido a perdas no dielétrico

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

sendo,

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

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

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

Linhas de microfita

Perdas e Atenuação

- Atenuação devido a perdas nos condutores

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

Sendo

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

$\sigma \rightarrow$ condutividade do metal

- R_s é função da frequência devido ao efeito pelicular

Linhas de microfita

Efeito pelicular

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

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

δ_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 $t \approx 5 \cdot \delta_s$

Linhas de microfita

Material	Condutividade (S/m)	Profundidade de penetração (μm) @ 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

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

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

Linhas de microfita

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.

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

Linhas de microfita

Exercício

- 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

Circuitos de Micro-ondas

Circuitos passivos com elementos distribuídos

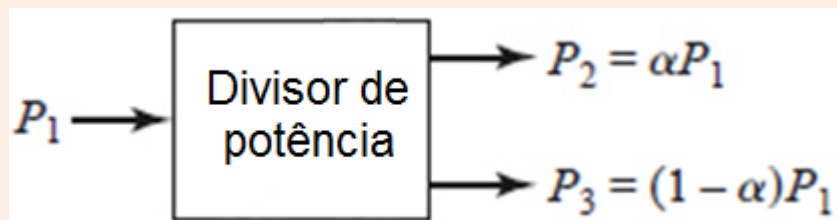
- Circuitos fabricados usando linhas de transmissão
 - Cabos coaxiais
 - Linhas planares
- Linhas de transmissão planares mais usadas
 - Microfita (microstrip line)
 - Triplaca (stripline)
 - Guia de ondas coplanar (Coplanar wave guide)
- Projeto
 - Equações específicas para cada tipo de circuito
 - Ferramentas de CAD de micro-ondas

Divisores e Combinadores de Potência

Função dos circuitos

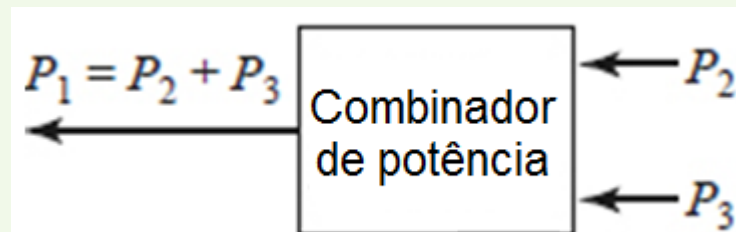
Divisor de potência

- 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

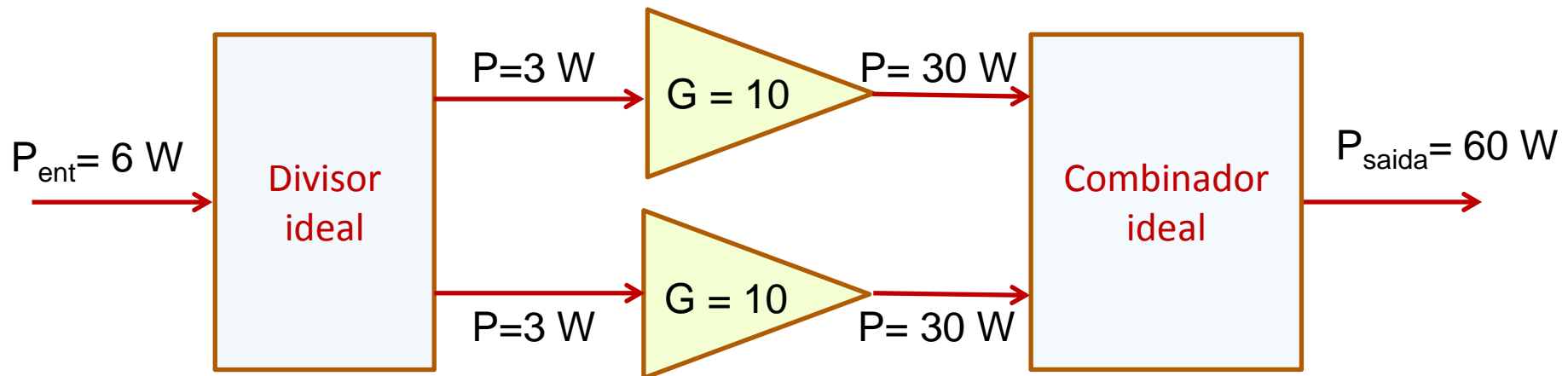


Divisores e Combinadores de Potência

Exemplo de aplicação

Amplificador de potência – ganho de potência 10 / potência de saída 60 W

Transistores disponíveis – ganho de potência 10 / potência de saída de 30 W



- Amplificador de potência
 - Ganho: o mesmo ganho que cada transistor
 - Potência de saída: soma das potências de saída dos dois transistores

Divisores e Combinadores de Potência

- Condições ideais de projeto

- Perdas nulas $P_1 = P_2 + P_3$

- Divisão de potência entre portas como especificado

$$|S_{21}|^2 = \alpha \quad |S_{31}|^2 = (1 - \alpha)$$

- Impedância de cada porta com as demais terminadas em 50Ω

$$Z_1 = Z_2 = Z_3 = 50 \Omega$$

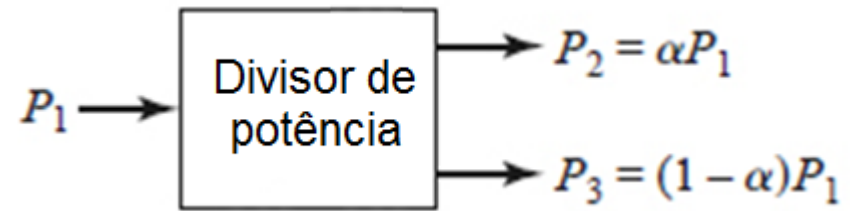
$$S_{11} = S_{22} = S_{33} = 0$$

$$S_{11}(\text{dB}), S_{22}(\text{dB}), S_{33}(\text{dB}) \rightarrow -\infty$$

- Boa isolamento entre saídas

$$S_{32} = S_{23} = 0$$

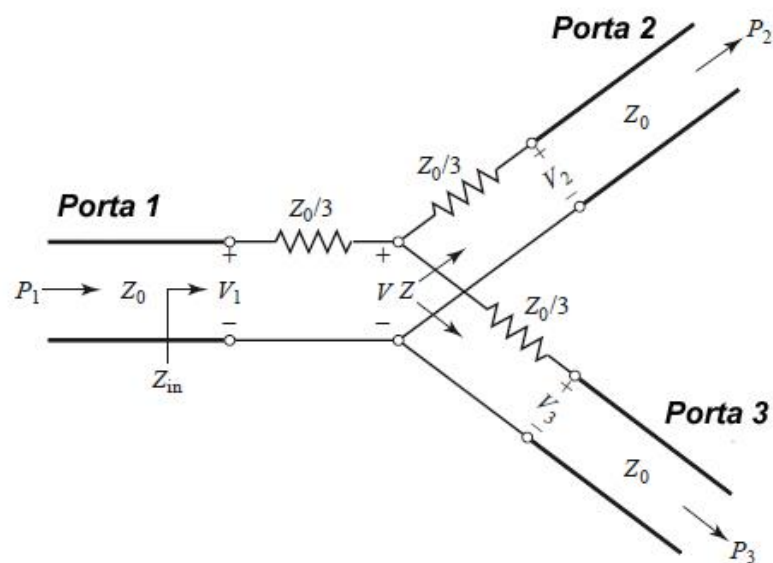
$$S_{32}(\text{dB}) \text{ e } S_{23}(\text{dB}) \rightarrow -\infty$$



Divisores e Combinadores de Potência

Divisor Resistivo

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



Componentes

- Circuito simétrico
- Três resistores com $R = Z_0/3$

Em micro-ondas,

$$Z_0 = 50 \Omega \rightarrow R = 16,67 \Omega$$

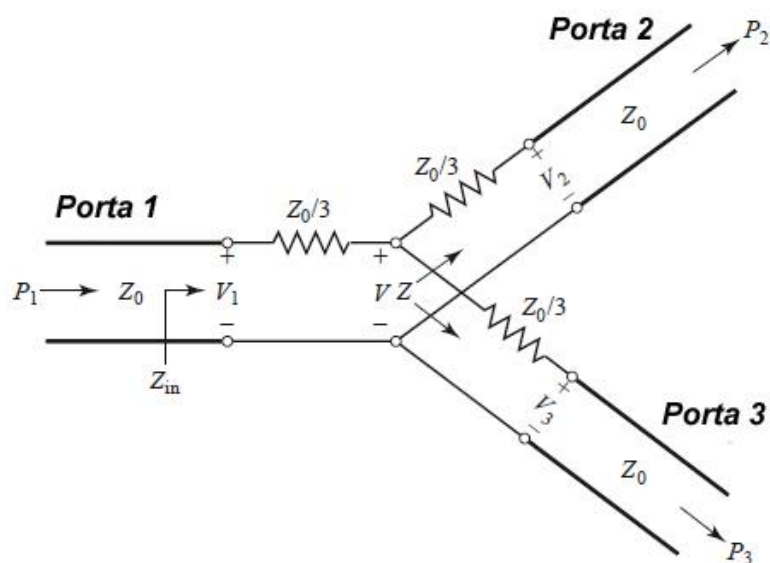
- Acesos do divisor

Linhas de transmissão com impedância característica de 50Ω

Deduza qual a impedância de uma das portas do divisor resistivo quando as demais portas estão terminadas por 50Ω .

Divisores e Combinadores de Potência

Divisor Resistivo



Características

- Opera em banda larga de frequência
- Metade da potência de entrada é dissipada nos resistores

$$\text{Potência dissipada} = P_1/2$$

- Potência em cada porta de saída é um quarto da potência de entrada

$$P_2 = P_3 = P_1/4$$

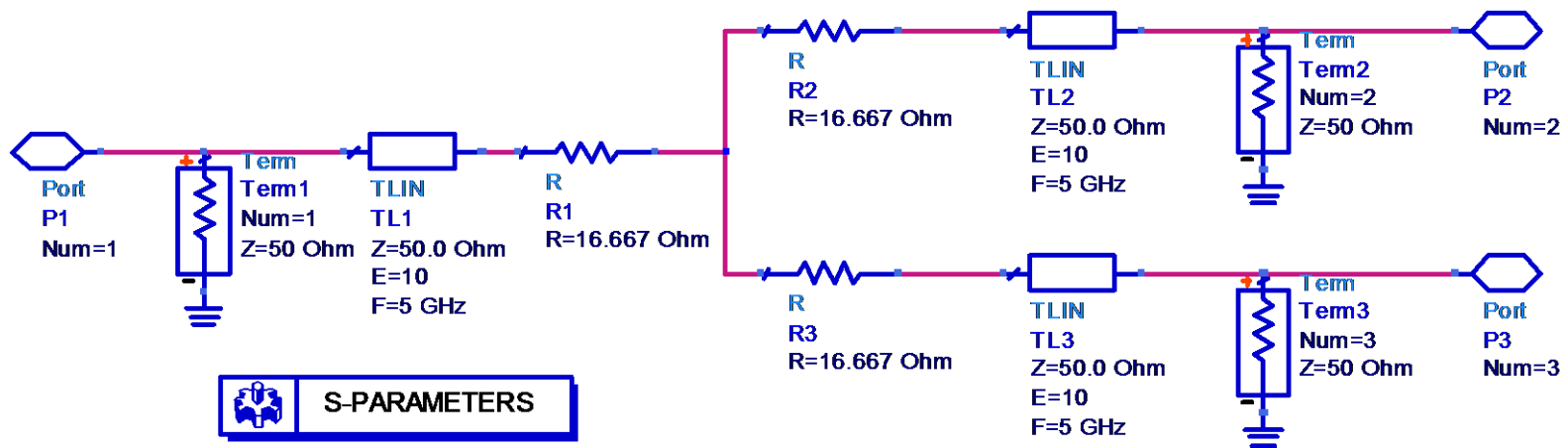
Exemplos de aplicação

- Sistemas que operam em banda larga de frequência – radioastronomia e UWB
- Acessório usado em arranjos para medidas em frequências de micro-ondas

Divisores e Combinadores de Potência

Divisor Resistivo

- Circuito esquemático para simulação no ADS, usando linhas de transmissão ideais (TLIN)



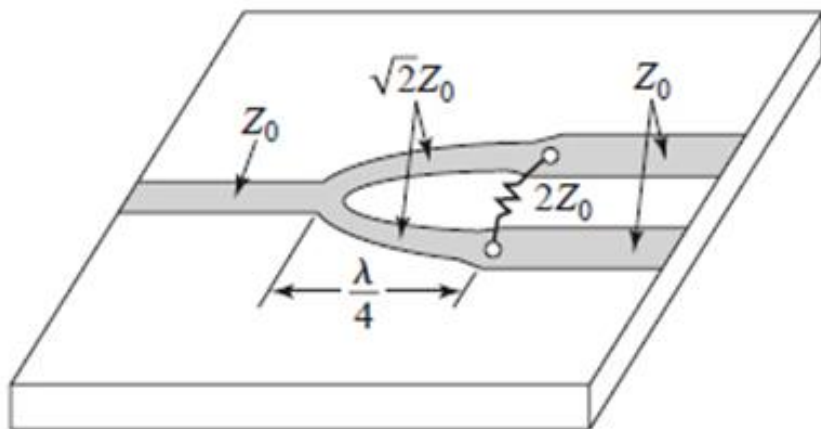
S-PARAMETERS

S_Param
SP1
Start=1.0 GHz
Stop=10.0 GHz
Step=10 MHz

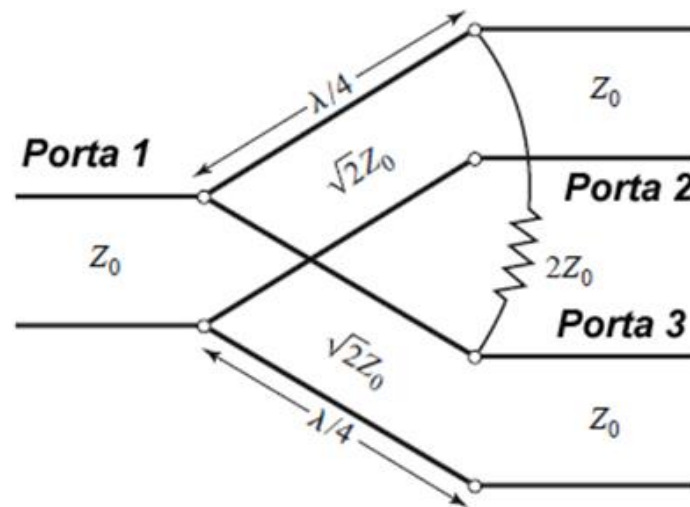
Divisores e Combinadores de Potência

Divisor de Wilkinson

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



Divisor de Wilkinson
em *microstrip line*

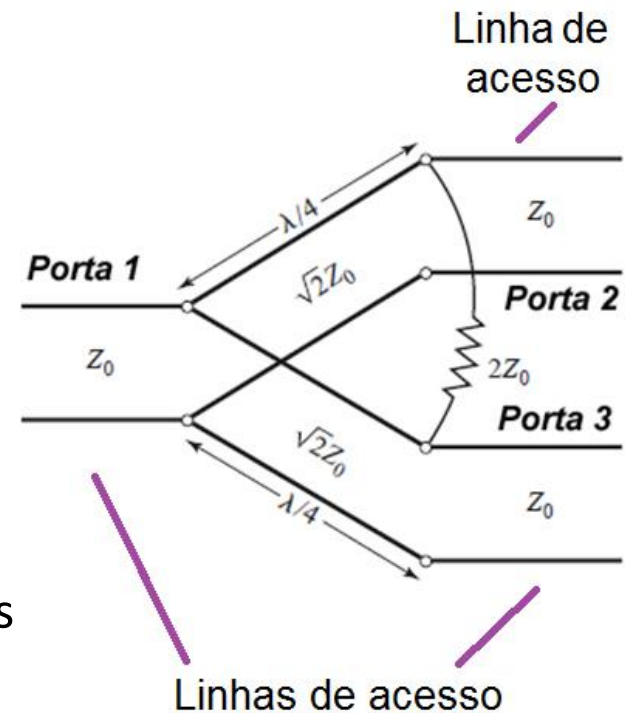


Circuito equivalente em linha
de transmissão

Divisores e Combinadores de Potência

Divisor de Wilkinson

- Circuito assimétrico, com dois braços
 - Linhas de transmissão
 - Impedância característica $\sqrt{2} \cdot Z_0$
 - Comprimento de $\lambda/4$ na frequência central de operação
- Resistor com resistência de $2 \cdot Z_0$
 - Conectado entre os braços do divisor
 - Garante casamento de impedância das saídas
 - Provê isolamento entre as saídas
- Acesos do divisor
 - Linhas de transmissão com impedância característica de Z_0



Em micro-ondas
 $Z_0 = 50 \Omega$

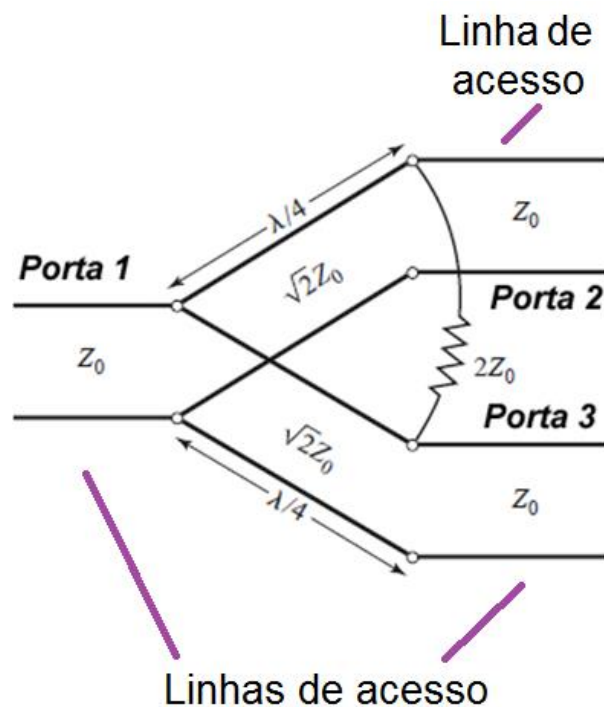
Divisores e Combinadores de Potência

Divisor de Wilkinson

Características

- Opera em banda estreita de frequência
- Baixas perdas
- Perdas do dielétrico e condutor das linhas de transmissão
- Potência em cada porta de saída é aproximadamente metade da potência de entrada

$$P_2 = P_3 = P_1/2$$



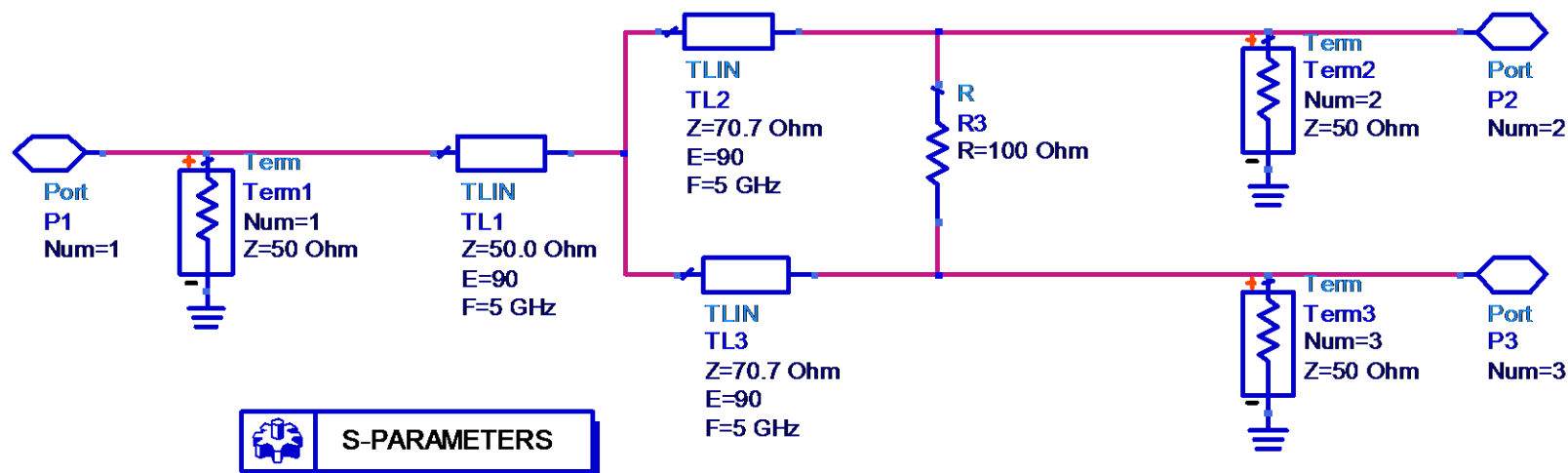
Exemplos de aplicação

- Sistemas que operam em estreita
- Telecomunicações, WiFi, Bluetooth, etc.

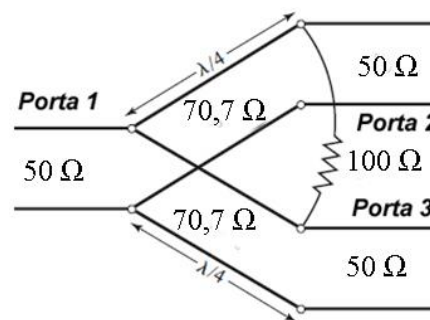
Divisores e Combinadores de Potência

Divisor de Wilkinson

- Circuito esquemático para simulação do acoplador de Wilkinson no ADS, com linhas de transmissão ideais e usando $Z_0 = 50 \Omega$



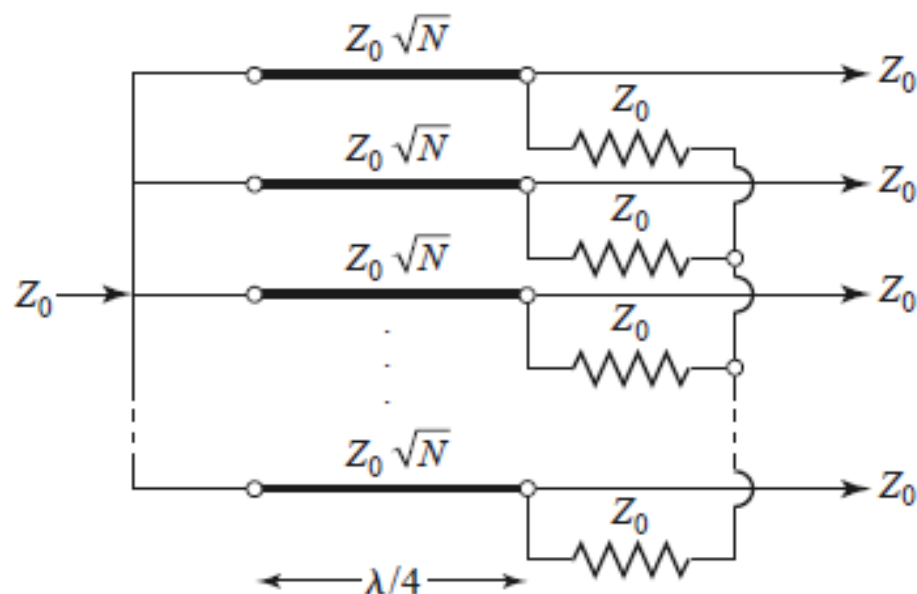
S_Param
SP1
Start=1.0 GHz
Stop=10.0 GHz
Step=10 MHz



Divisores e Combinadores de Potência

Divisor de Wilkinson com N saídas

- Potência de entrada \rightarrow porta 1
- Divisão **igual** de potência entre **N portas**



Exemplo: Divisão por 3

- Resistores: $R = Z_0 = 50 \Omega$
- Impedância característica das linhas de transmissão

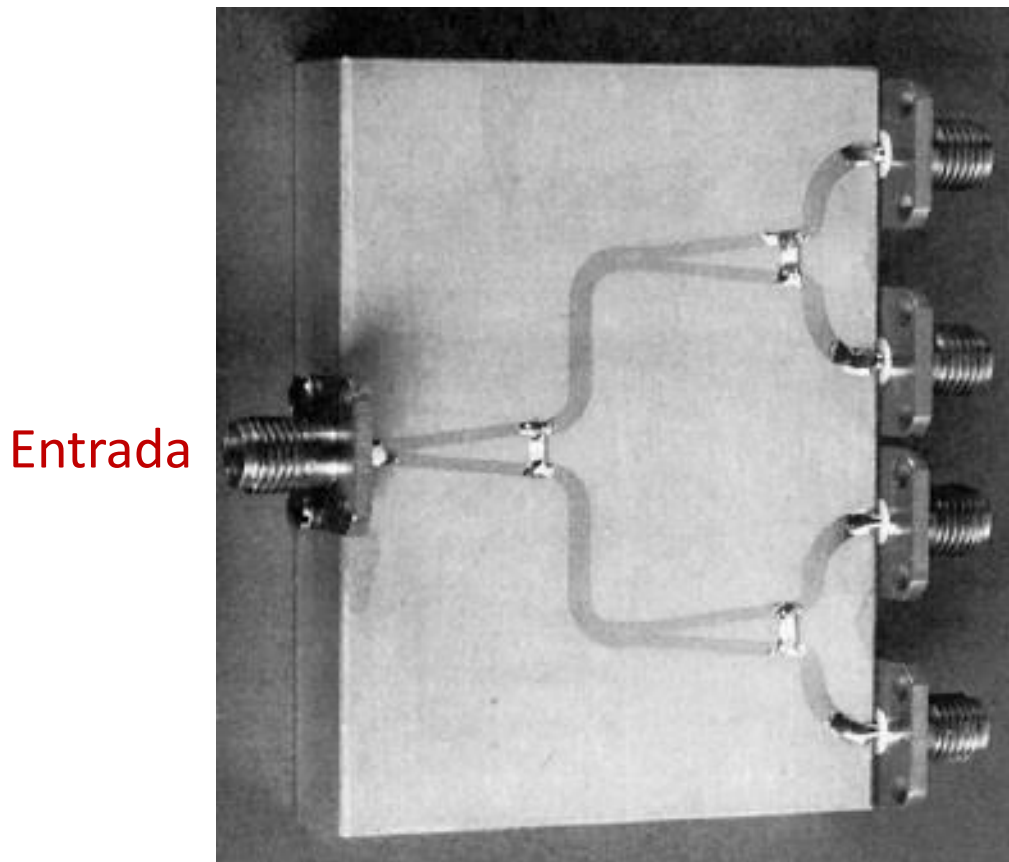
$$Z_0 \sqrt{3} = 50 \sqrt{3} = 86,6 \Omega$$

Desvantagem

- Dificuldade de leiaute cresce com o número de saídas

Divisores e Combinadores de Potência

- Divisor de potência com 4 saídas iguais
 - Associação de 3 divisores de Wilkinson de 2 saídas



Saída 1

Saída 2

Saída 3

Saída 4

Observe o leiaute do acoplador ao lado.

Comente soluções e problemas desse leiaute

Acopladores Direcionais de Micro-ondas

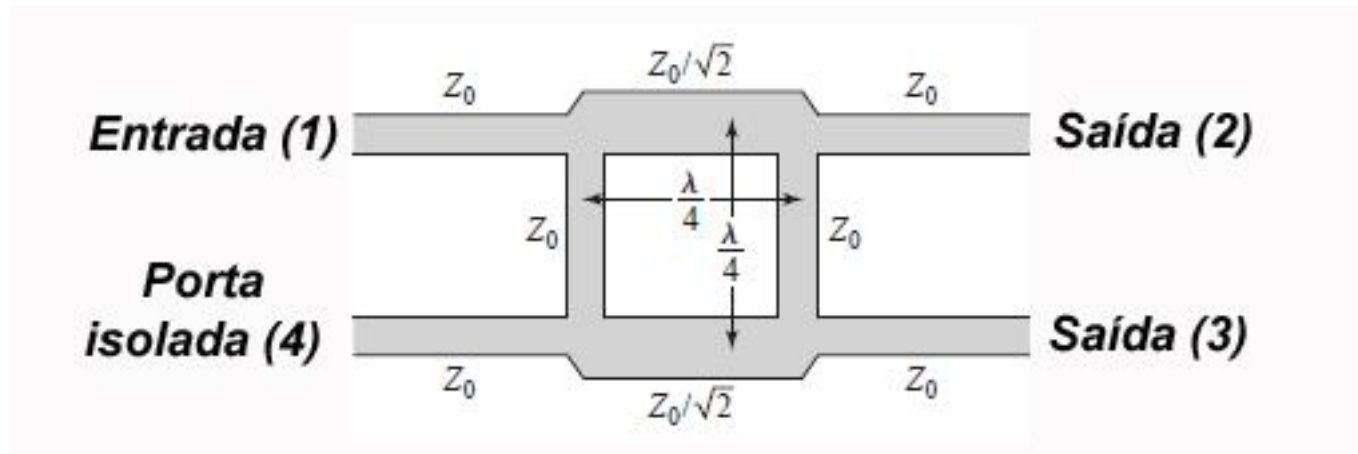
Principais tipos de acopladores usando linhas de transmissão

- **Híbridos**
 - Acoplador Híbrido de 90°
 - Acoplador Híbrido de 180°
- **Linhas acopladas**
 - Acoplador Direcional de Linhas Acopladas
 - Acoplador de Lange

Acopladores Direcionais de Micro-ondas

Acoplador Híbrido de 90°

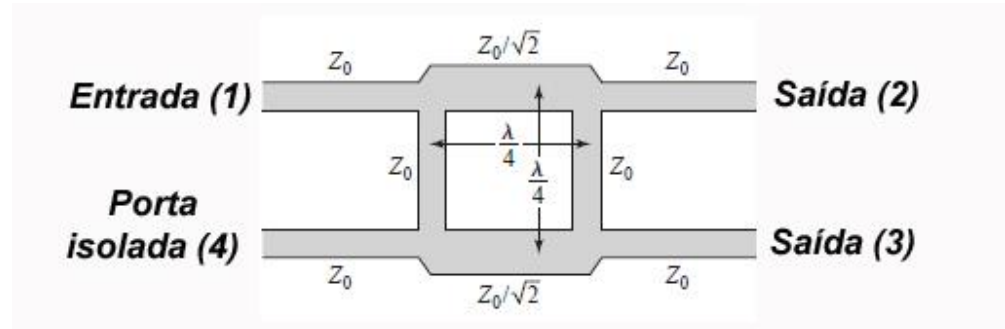
- Acopladores direcionais
 - Dividem igualmente a potência de entrada entre duas portas de saída
 - Tem uma porta isolada, que não recebe potência da entrada



Híbrido de 90°, ou acoplador de quadratura, ou *branch-line coupler*

Acopladores Direcionais de Micro-ondas

Acoplador Híbrido de 90°



Considerando as quatro portas terminadas por Z_0

- A potência de entrada é igualmente dividida entre as saídas (2) e (3)
- Sinais de saídas defasados de 90°
- A porta isolada (4) não recebe potência

$$P_2 = P_3 = P_1 / 2 \quad \text{e} \quad P_4 = 0$$

Considerando as portas de saída (2) e (3) terminadas por $Z_1 \neq Z_0$

- A potência refletida nas saídas (2) e (3) vai para a porta isolada
- A porta de entrada não é afetada por essa reflexão

Acopladores Direcionais de Micro-ondas

Acoplador Híbrido de 90°

Características

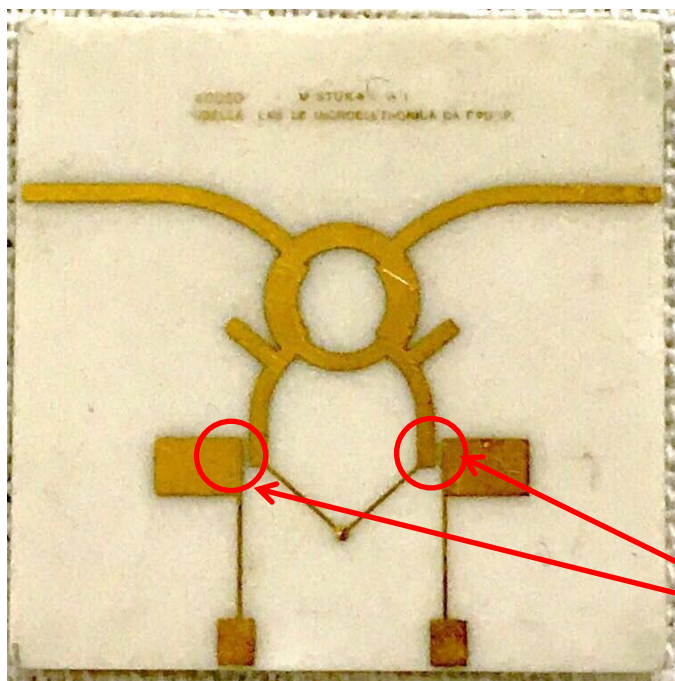
- Operação em banda estreita*
- Bom casamento de impedância nos 4 acessos
- Alta isolação
- Entre a porta de entrada e a porta isolada
- Entre as portas de saída

Exemplos de aplicação

- Amplificadores de potência
- Conversores de frequência balanceados
- Redes de alimentação

*Acopladores híbridos multi-seção permitem obter alargamento da banda de operação

Circuitos usando Híbridos de 90°



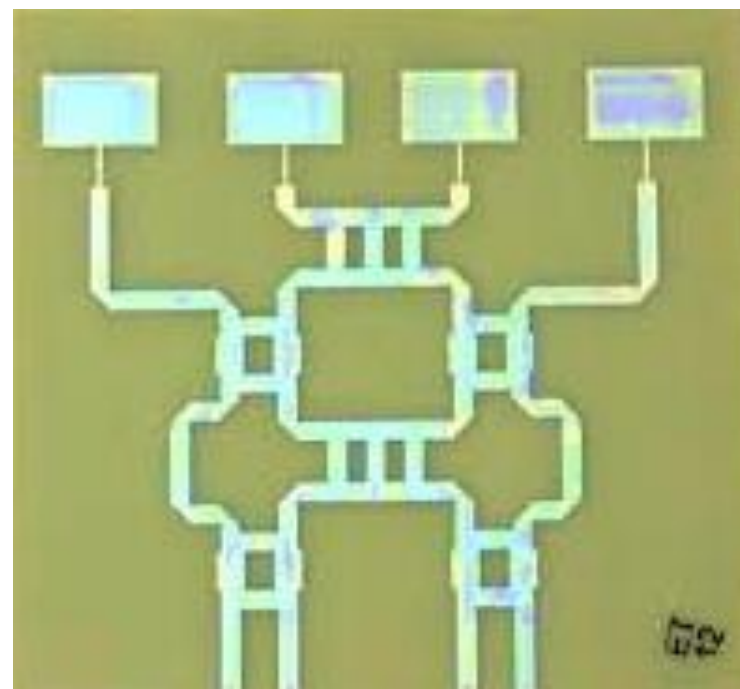
Entrada de RF

Entrada de OL

Posição dos diodos

Saídas balanceadas de FI

Conversor de frequência balanceado

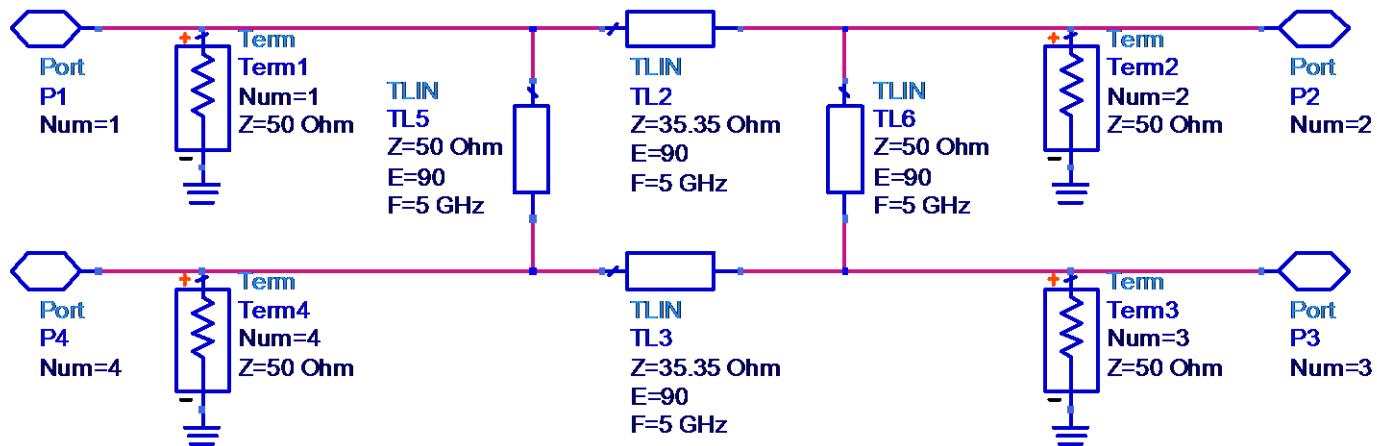


Antena Butler

Acopladores Direcionais de Micro-ondas

Acoplador Híbrido de 90°

- Circuito esquemático para simulação do acoplador Híbrido de 90° no ADS, com linhas de transmissão ideais e usando $Z_0 = 50 \Omega$



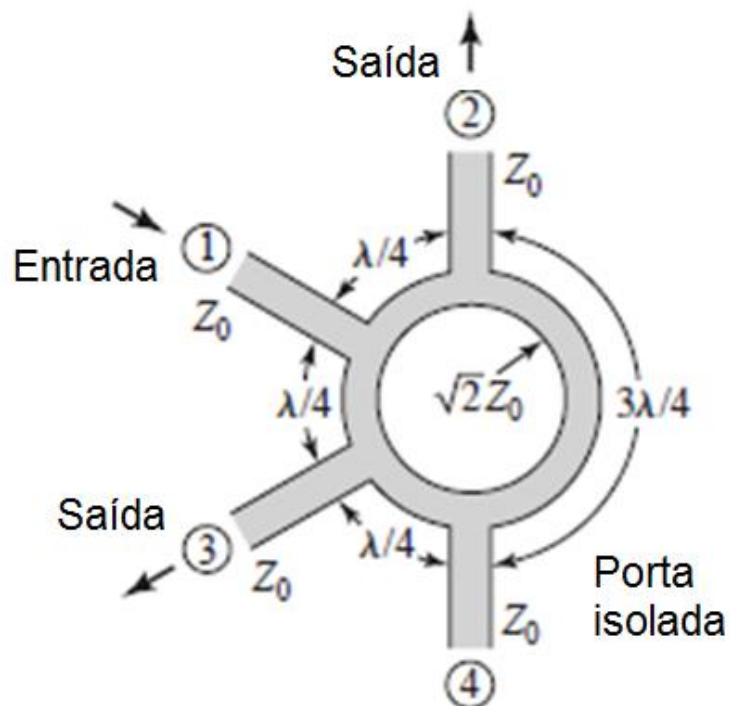
S_Param
SP1
Start=1.0 GHz
Stop=10.0 GHz
Step=10 MHz

Acopladores Direcionais de Micro-ondas

Acoplador Híbrido de 180°

- Acopladores direcionais

- Dividem igualmente a potência de entrada entre duas portas de saída
- Tem uma porta isolada, que não recebe potência da entrada



Operação

- Entrada na porta 1
- Saídas nas portas 2 e 3
- Defasagem de 180° entre sinais das saídas
- Porta 4 isolada

Denominações

- Híbrido de 180°
- Acoplador em anel
- *Rat-race coupler*

Acopladores Direcionais de Micro-ondas

Acoplador Híbrido de 180°

Anel

- 4 trechos de linhas de transmissão
- Impedância característica

$$Z_{anel} = \sqrt{2} \cdot Z_0 = 70,7 \Omega$$

- Comprimentos elétricos

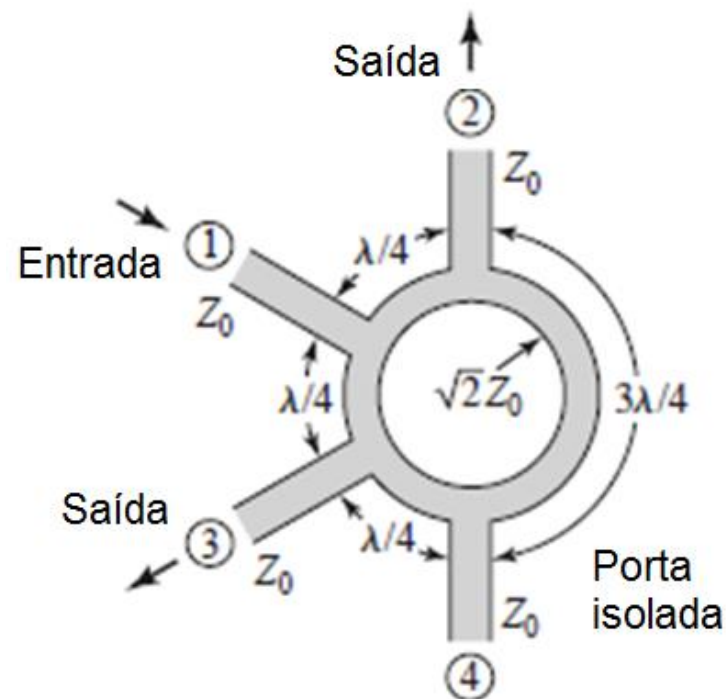
$$\lambda/4, \lambda/4, \lambda/4 \text{ e } 3\lambda/4$$

Acessos

- 4 trechos de linhas de transmissão
- Impedância característica

$$Z_{acessos} = Z_0 = 50 \Omega$$

- Comprimento – o que for requerido para conectar o acoplador aos demais circuitos



Acopladores Direcionais de Micro-ondas

Exercício – Projeto de Acopladores híbridos de 90° e de 180°

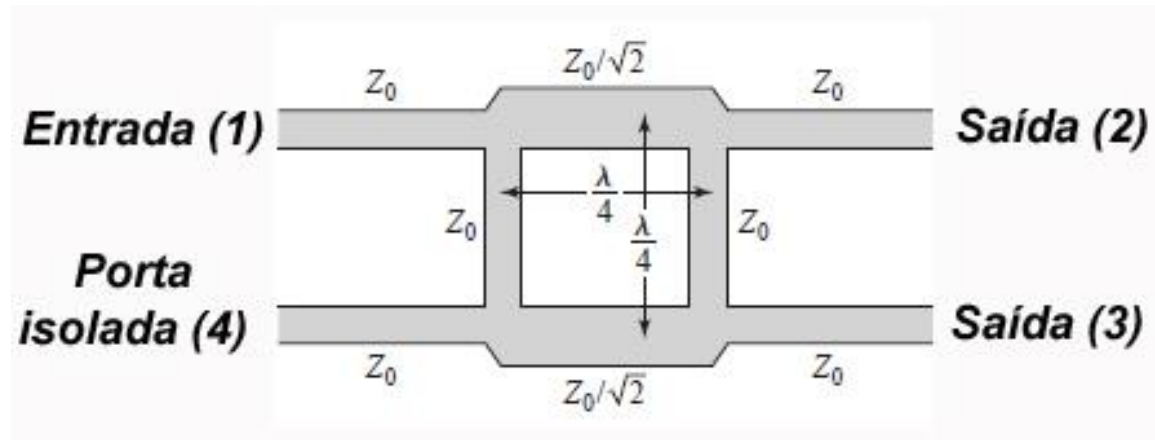
- Frequência central: 5.8 GHz
- Tecnologia: linha de microfita (*microstrip line*)
- Substrato - Alumina
 - Er = 10
 - tg(delta)=0.0002
 - H = 0.635 mm
- Metalização do substrato - Ouro
 - Sigma = 4.1E+07 S/m
 - T = 5 microns
- Projete os dois acopladores
- Gere o circuito esquemático dos acopladores
- Simule os parâmetros S
- Trace as curvas de cada acoplador
 - S_{11} , S_{22} , S_{33} e S_{44} em dB
 - S_{21} , S_{31} e S_{41} em dB
 - S_{11} , S_{22} e S_{32} em dB
 - em função da frequência

Acopladores Direcionais de Micro-ondas

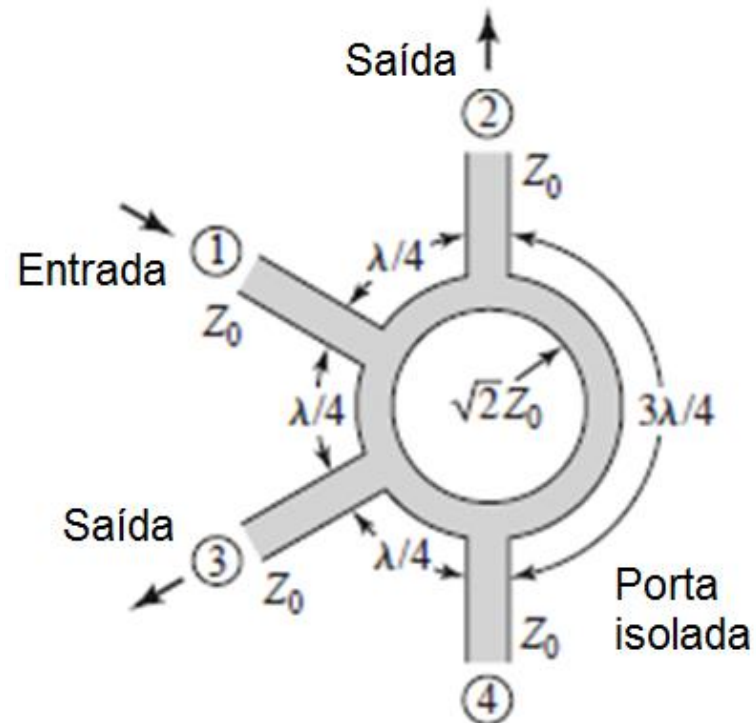
Exercício – Projeto de Acopladores híbridos de 90° e de 180°

- Inclua no esquemático elementos que representem as junções entre as linhas de transmissão de microfita dos acopladores (MTEE – microstrip “T”)
- Simule os acopladores e observe o efeito das junções na resposta dos acopladores
- Ajuste os acopladores usando o recurso “Tuning” – altere o comprimento das linhas de transmissão de modo a otimizar o desempenho dos acopladores
- Trace as curvas de S_{21} e S_{31} em dB dos dois acopladores no mesmo gráfico e compare suas bandas de operação.
- Faça o leiaute dos dois acopladores
- Realize a simulação eletromagnética dos acopladores usando o simulador Momentum do ADS.

Acoplador Híbrido de 90°



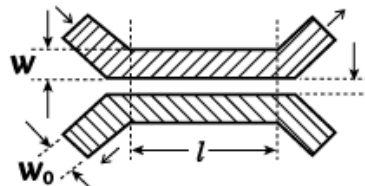
Acoplador Híbrido de 180°



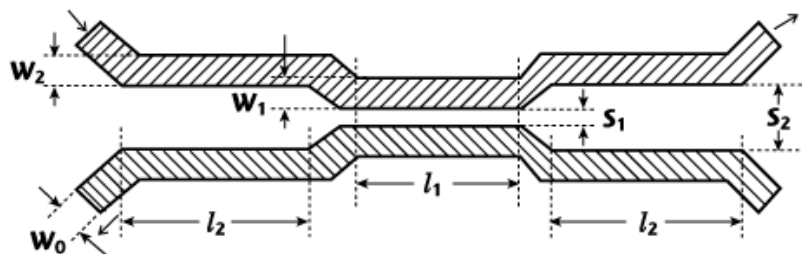
Acopladores Direcionais de Micro-ondas

Acopladores Empregando Linhas Acopladas

- Acoplador Direcional de Linhas Acopladas

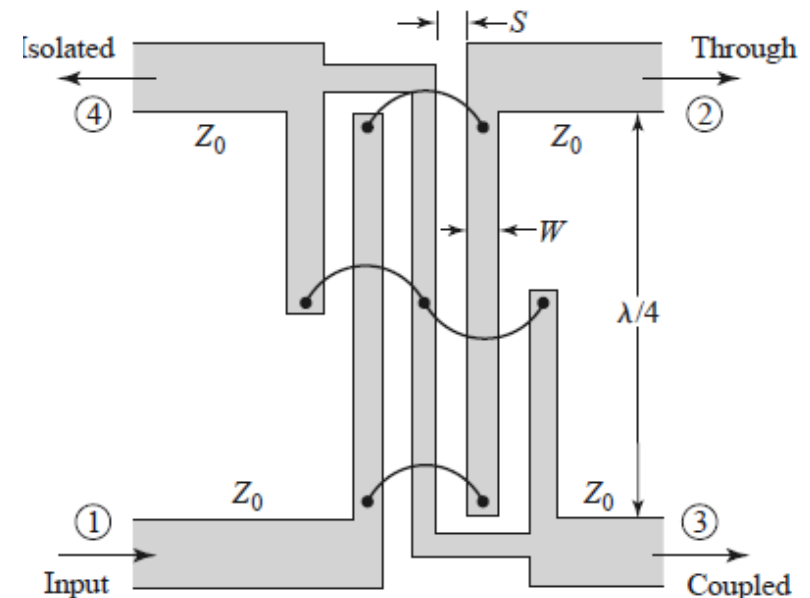


Acoplador de uma seção acoplada em linha de microfita



Acoplador multi-seção em linha de microfita

- Acoplador de Lange



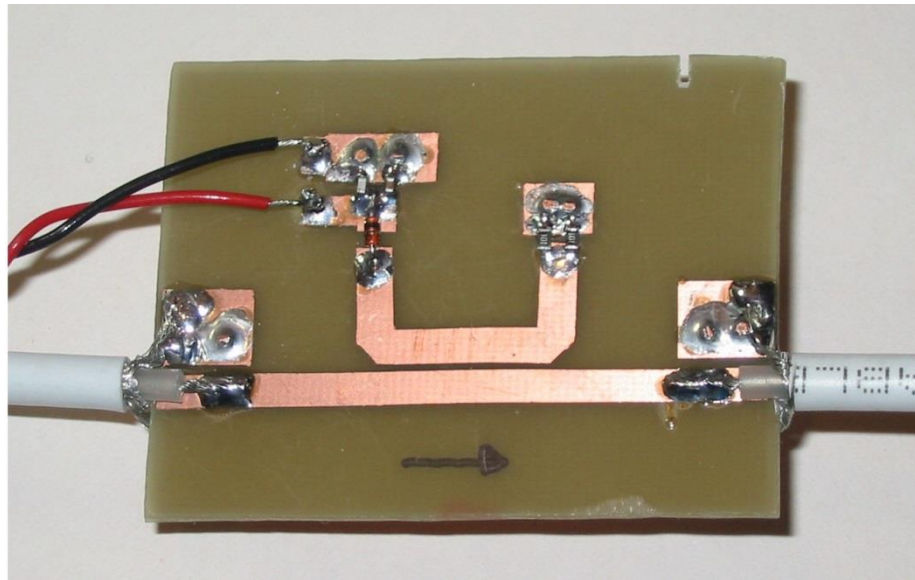
Elemento básico → Linhas de transmissão acopladas

Linhas de transmissão acopladas

- Linhas de transmissão (LTs) acopladas
 - Duas ou mais linhas de transmissão não-blindadas
 - Bem próximas entre si, tal que
 - Há interação entre campos EM das LTs
 - Há acoplamento de potência entre as LTs
- Tipos de linhas acopladas em tecnologias planar
 - Triplaca (*Stripline*)
 - Microfita (*Microstrip line*)
 - Linha de fenda (*Slotline*)
 - Guia de ondas coplanar (*coplanar waveguide*)

Linhas de transmissão acopladas

Exemplo de aplicação – acopladores direcionais em linha de microfita



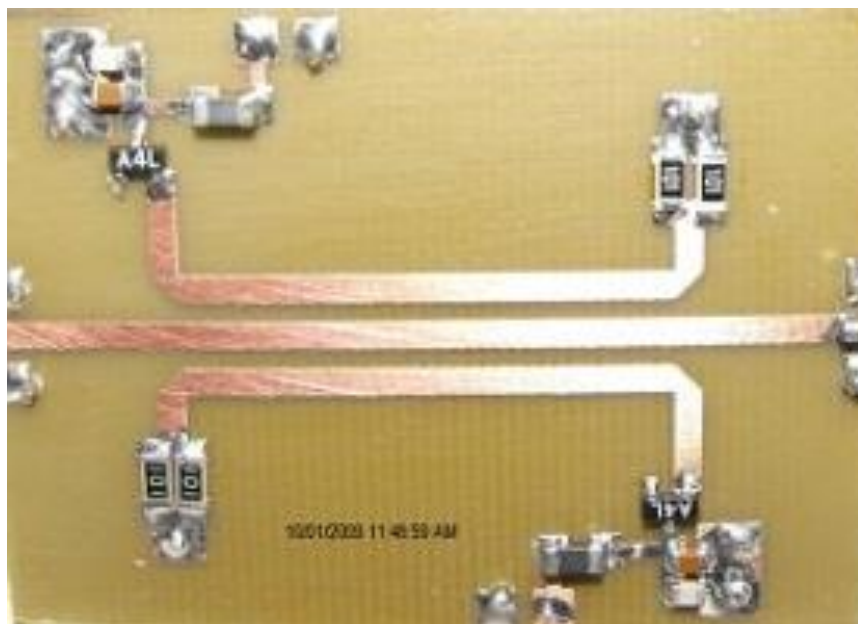
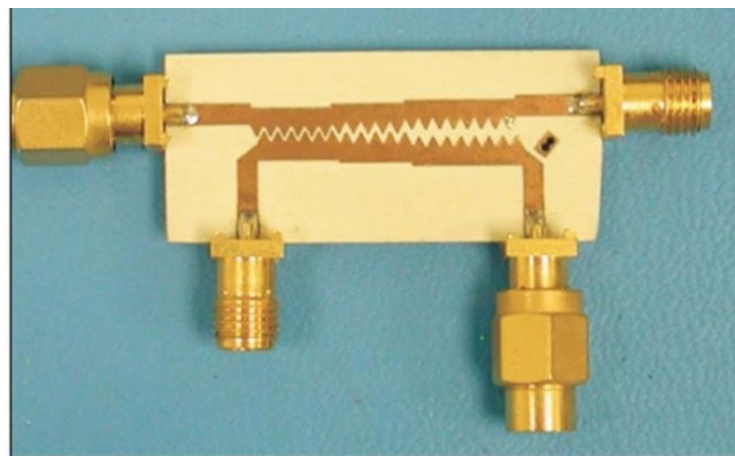
Acoplador com retificador se sinais

- Uma amostra de sinal é alimentada ao retificador a diodo
- A saída do retificador é uma tensão contínua, proporcional à potência que passa pela linha direta

Linhas de transmissão acopladas

Exemplos de aplicação – acopladores direcionais em linha de microfita

Acoplador banda larga
e alta diretividade

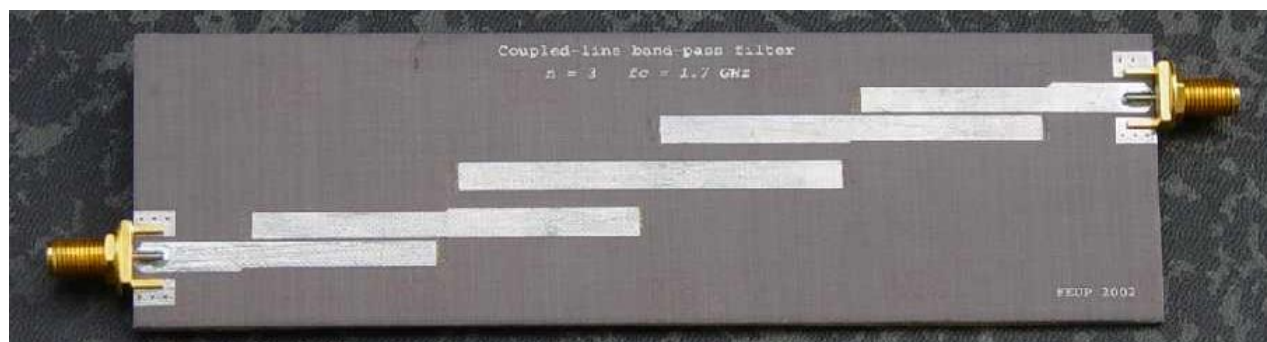
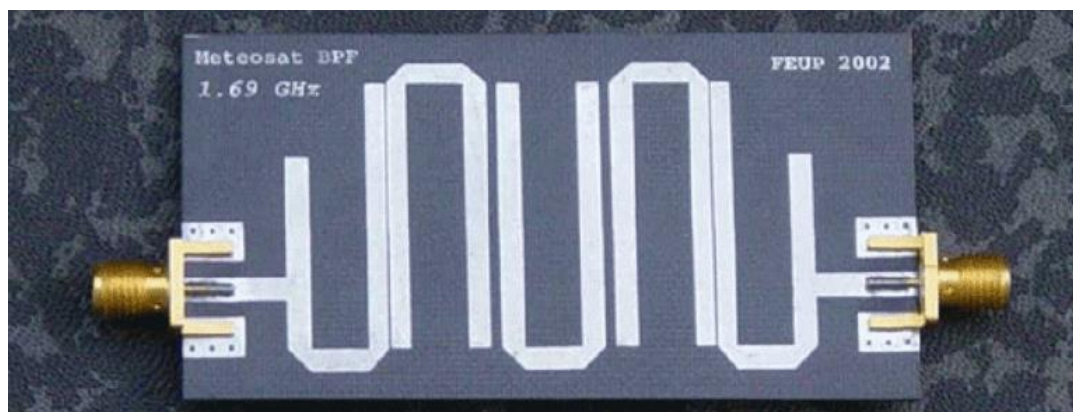


Acoplador duplo com retificador de sinais

- Amostra sinais incidente e refletido na linha de microfita central
- Retifica ambas as amostras

Linhas de transmissão acopladas

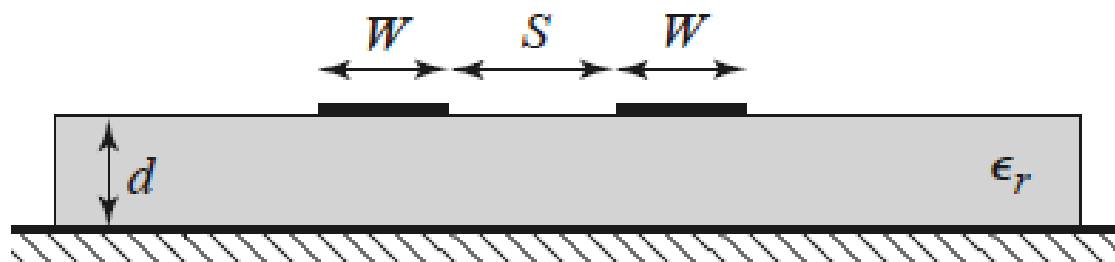
Exemplos de aplicação - filtros passa-faixa de micro-ondas usando linhas de microfita acopladas



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

Linhas de transmissão acopladas

- Seção transversal de linha de microfita acoplada simétrica



Parâmetros físicos da estrutura

- Características do substrato
 - Altura do substrato - d
 - Constante dielétrica - ϵ_r
- Características das microfitas
 - Largura - W
 - Espaçamento - S

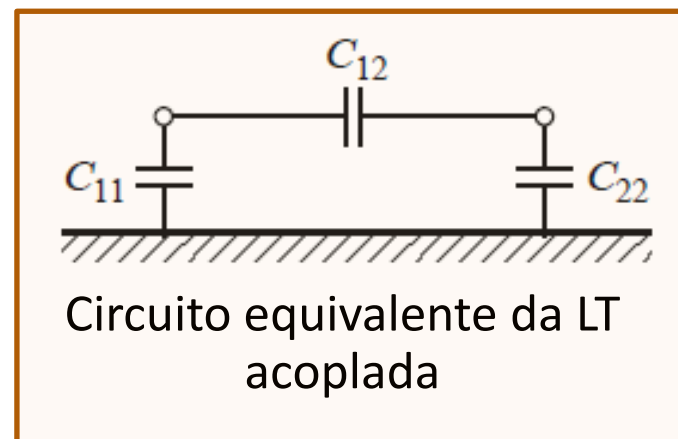
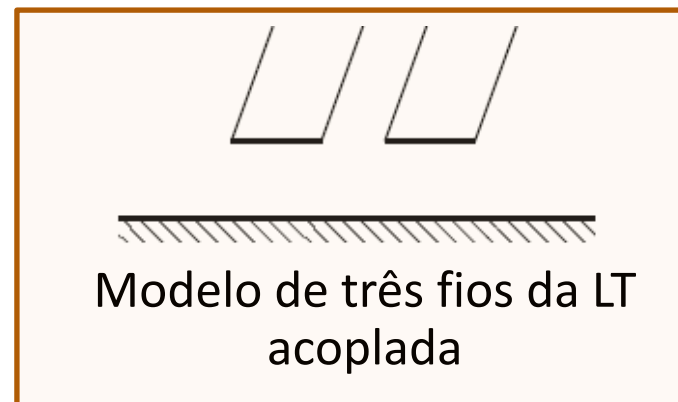
Parâmetros elétricos da linha acoplada

- Impedância característica Z_0
 - Acoplamento - C
- } Funções de S , W , d e ϵ_r

Linhas de transmissão acopladas

Análise de 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

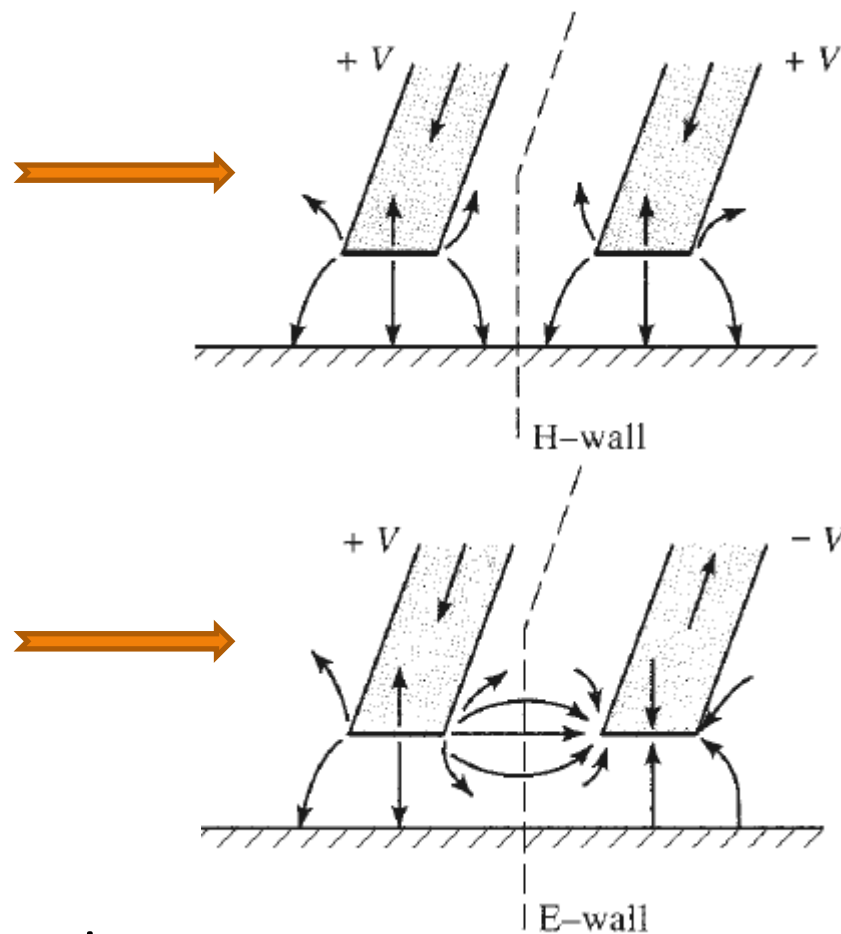


C_{11} , C_{22} e C_{12} : capacitâncias por unidade de comprimento

Linhas de transmissão acopladas

Análise de 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 de modos par e ímpar

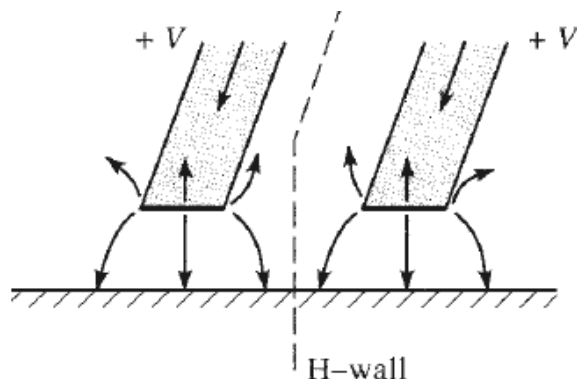


Linhas de transmissão acopladas

Análise de linhas acopladas

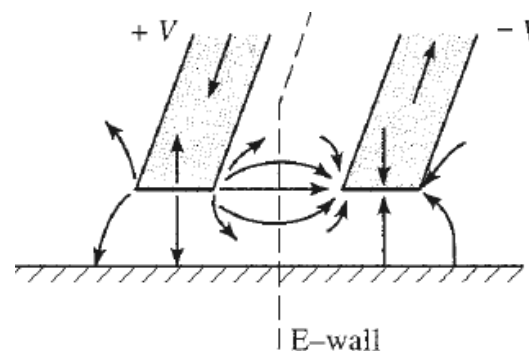
Modo par

Z_{0e} - Impedância característica de modo par



Modo ímpar

Z_{0o} - Impedância característica de modo ímpar



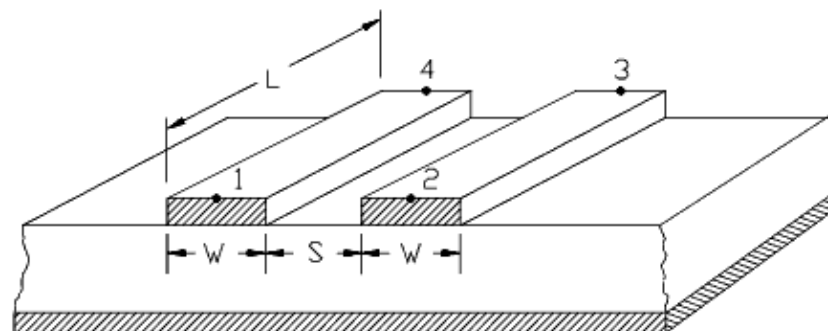
- Impedâncias características Z_{0e} e Z_{0o} são funções de
 - C_{11} , C_{22} e C_{12} - capacitâncias por unidade de comprimento
 - L - indutância por unidade de comprimento

Linhas de transmissão acopladas

Análise de linhas acopladas

- Impedância característica Z_0

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



- Acoplamento C

$$C = \frac{P_{acoplada}}{P_{entrada}} \quad C(\text{dB}) = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{acoplada}}{P_{entrada}} \right)$$

- C e $Z_0 \rightarrow$ funções do substrato e de S e W

W – largura das fitas metálicas

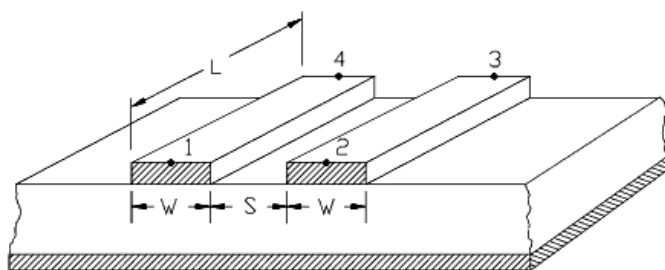
S – espaçamento entre as fitas metálicas

Linhas de transmissão acopladas

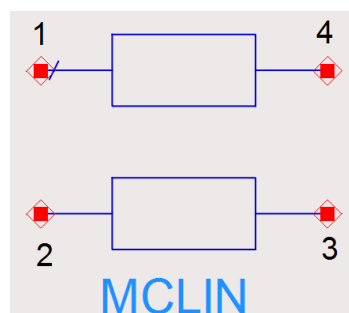
Análise de linhas acopladas

- Equações de linhas de transmissão acoplada
 - Implementadas em ferramentas de CAD de micro-ondas
- Exemplo: ADS - Advanced Design System/Keysight
 - Linhas de microfita acopladas

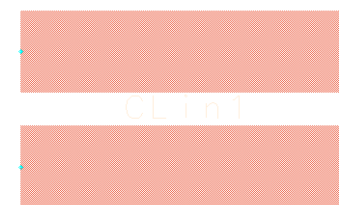
MCLIN → *Microstrip Coupled Lines*



Estrutura das linhas de microfita acopladas



Símbolo no circuito esquemático

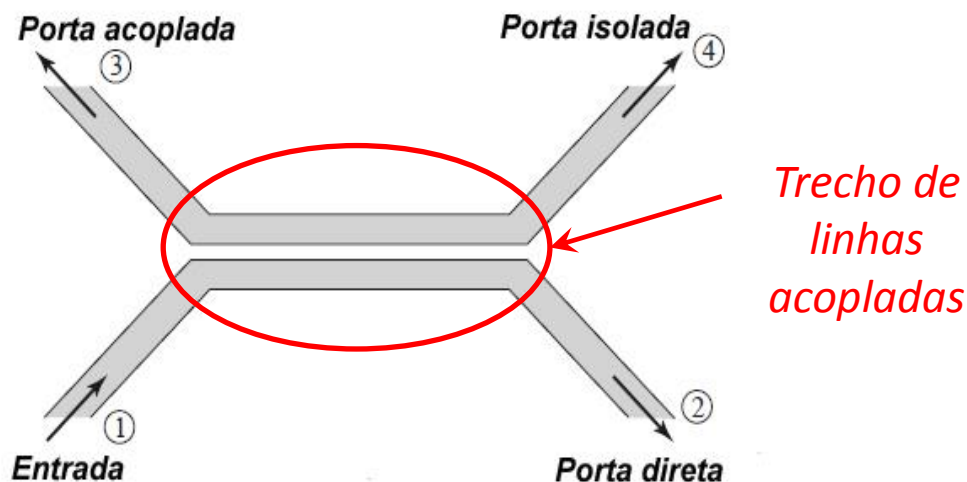


Leiaute correspondente

Acopladores Direcionais de Micro-ondas

Acoplador direcional de linhas acopladas

- Trecho de linhas acopladas
 - Impedância de modo par Z_{0e}
 - Impedância de modo ímpar Z_{0o}
- Acessos: linhas de transmissão com $Z_0 = 50 \Omega$
- Terminação dos acessos em $Z_0 = 50 \Omega$

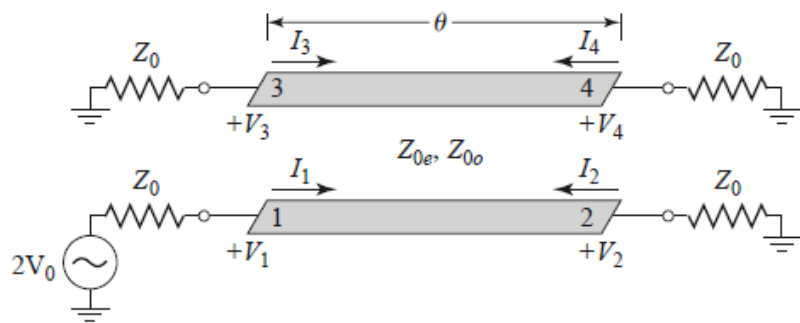


Acopladores Direcionais de Micro-ondas

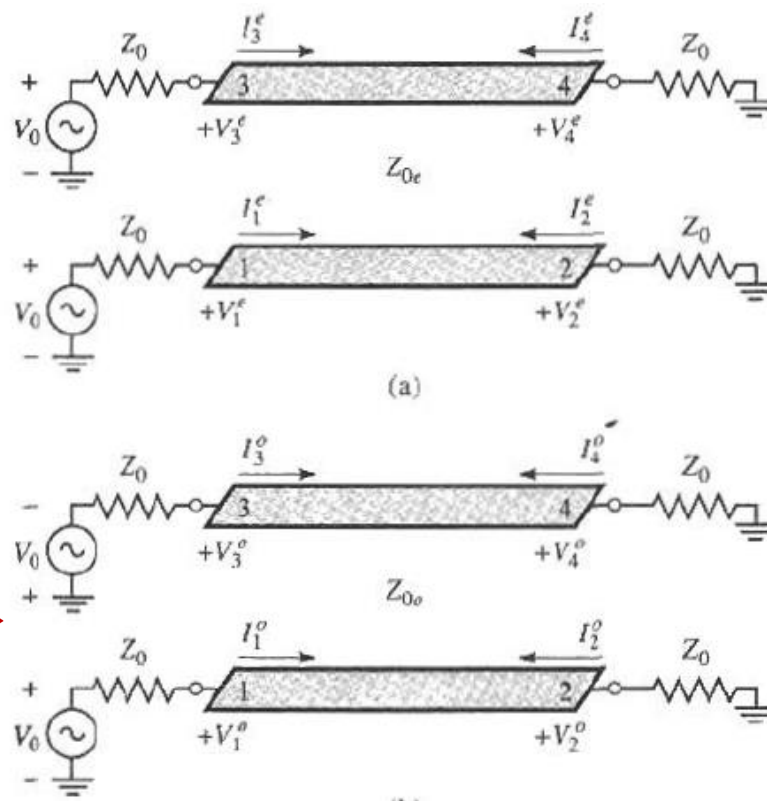
Acoplador direcional de linhas acopladas

- O acoplador é analisado para propagação de sinais em modos par e ímpar

Modo par →



Modo ímpar →



- Calcula-se a tensão nas quatro portas do acoplador

Acopladores Direcionais de Micro-ondas

Acoplador direcional de linhas acopladas

- Análise do acoplador

- Sendo θ o comprimento elétrico do trecho de linhas acopladas, obtém-se

- Acoplamento de tensão $C_V = \frac{Z_{0e} - Z_{0o}}{Z_{0e} + Z_{0o}} \quad C(\text{dB}) = 20 \cdot \log \frac{Z_{0e} - Z_{0o}}{Z_{0e} + Z_{0o}}$

- Tensão da porta acoplada
$$V_3 = V_0 \frac{jC \tan \theta}{\sqrt{1 - C^2} + j \tan \theta}$$

- Tensão da porta isolada
$$V_4 = V_4^e + V_4^o = V_2^e - V_2^o = 0,$$

- Tensão da porta direta
$$V_2 = V_2^e + V_2^o = V_0 \frac{\sqrt{1 - C^2}}{\sqrt{1 - C^2} \cos \theta + j \sin \theta}$$

Acopladores Direcionais de Micro-ondas

Acoplador direcional de linhas acopladas

- Máximo acoplamento

$$\theta = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \dots$$

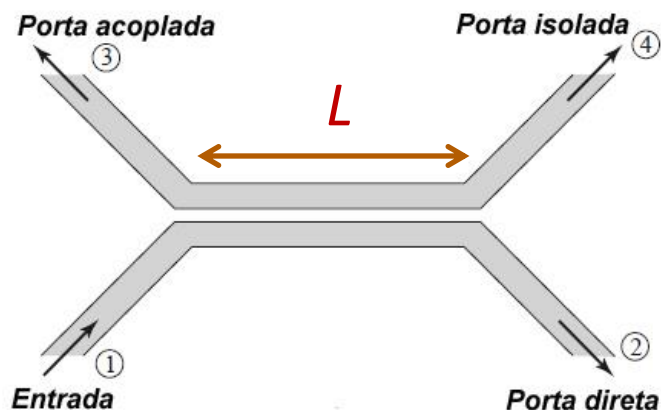
Porta acoplada $\rightarrow \frac{V_3}{V_0} = C$

Porta direta $\rightarrow \frac{V_2}{V_0} = -j\sqrt{1 - C^2}$

Porta isolada $\rightarrow \frac{V_4}{V_0} = 0$

- Usualmente

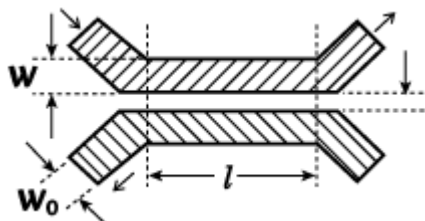
$$\theta = \pi/2 \rightarrow L = \lambda_{ef}/4$$



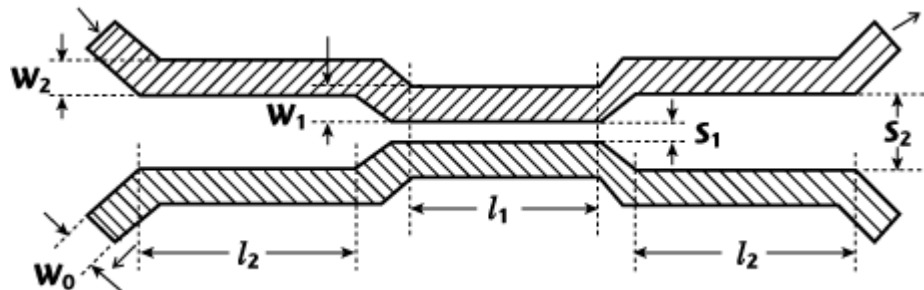
Acopladores Direcionais de Micro-ondas

Acoplador direcional de linhas acopladas

- Observações
 - Acoplador adequado para acoplamentos fracos
Por exemplo: 10 ou 20 dB
 - Acoplamentos fortes
 Z_{0e} e Z_{0o} que resultam em W e S não realizáveis



Acoplador com uma única seção acoplada
Operação em banda estreita



Acoplador com diversas seções acopladas
Banda de operação de uma oitava ou maior

Acopladores Direcionais de Micro-ondas

Acoplador direcional de linhas acopladas

Exercício

- Projete o acoplador com as seguintes características

Especificações

Frequência central : 3 GHz

Acoplamento: 20 dB

1 seção acoplada

Linha de microfita

Substrato

$\epsilon_r = 2.2$ $\text{tg}(\delta) = 0.05$

$b = 3.2$ mm

$t = 150$ microns de cobre

$\sigma = 5.8 \times 10^7$ S/m

- Simule o circuito de 1 a 5 GHz
- Compare os resultados obtidos com as especificações

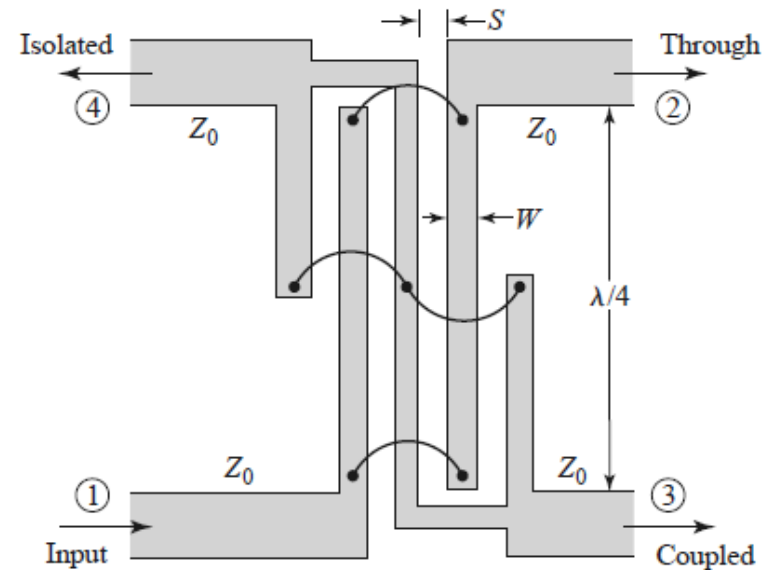
Acopladores Direcionais de Micro-ondas

Acoplador de Lange

- Estrutura com várias linhas acopladas
- Adequado para acoplamentos fortes, geralmente 3 dB
- Banda de uma oitava ou maior

- Sendo a porta (1) a entrada, tem-se
 - Portas (2) e (3) são as saídas
 - Porta (4) está isolada

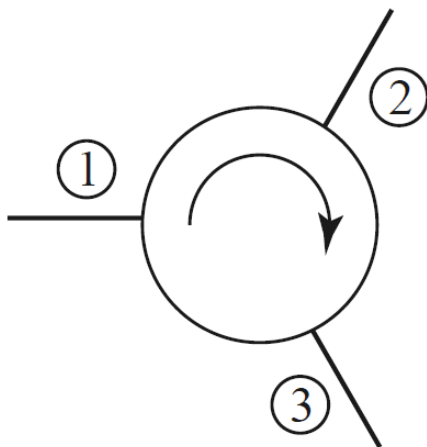
- É um tipo de Híbrido de Quadratura
 - Diferença de 90° entre sinais das saídas



Circuladores e Isoladores

Circuladores

- Dispositivos de três portas
- Sentido preferencial de propagação
 - Substrato ferromagnético
 - Polarizado por um campo magnético DC
- Símbolo



- Seta
Indica direção de propagação dos campos eletromagnéticos

Circuladores e Isoladores

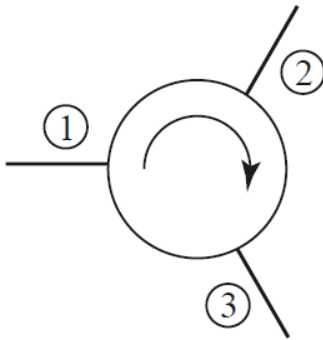
Circuladores

- Efeito direcional
 - Substratos → ferrites
 - Óxidos de ferro com outros materiais, como alumínio, cobalto, magnésio e níquel
 - Alta resistividade
 - Substrato polarizado por campo magnético DC
 - Ímã permanente
 - Eletroímã
 - Alinhamento dos dipolos magnéticos do substrato
 - Direção preferencial de propagação dos campos eletromagnéticos

Circuladores e Isoladores

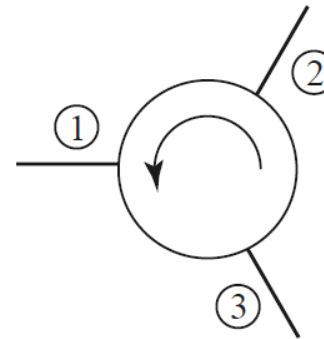
Circuladores

- Sentido da propagação do sinal no circulador
 - Depende da direção do campo magnético DC de polarização



Polarização no sentido horário

- Fluxo da onda EM
 - Porta (1) → Porta (2)
 - Porta (2) → Porta (3)
 - Porta (3) → Porta (1)



Polarização no sentido anti-horário

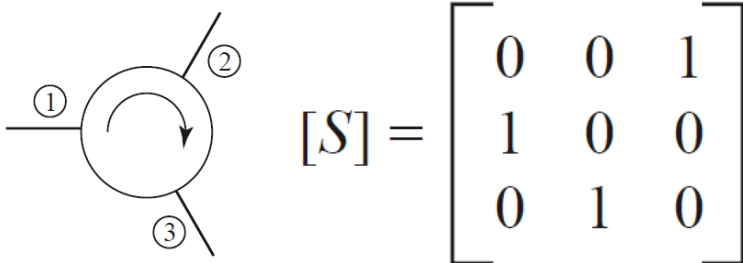
- Fluxo da onda EM
 - Porta (1) → Porta (3)
 - Porta (3) → Porta (2)
 - Porta (2) → Porta (1)

Circuladores e Isoladores

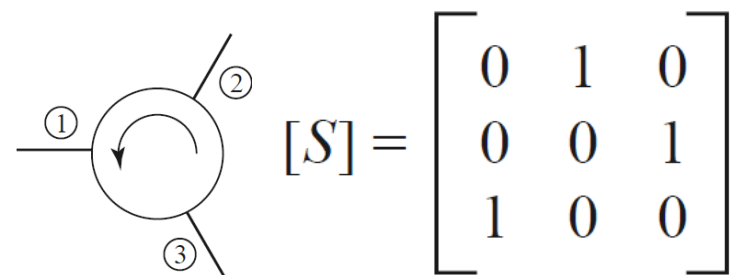
Circuladores

- Parâmetros S do circulador $[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix}$
- Assumindo
 - Circulador sem perdas
 - Casamento de impedância nas três portas do circulador

Polarização no sentido horário



Polarização no sentido anti-horário

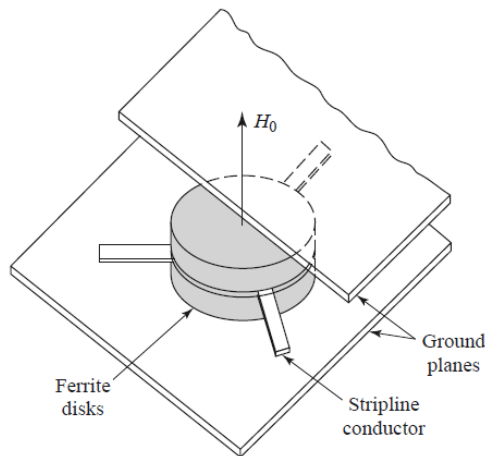


Circuladores e Isoladores

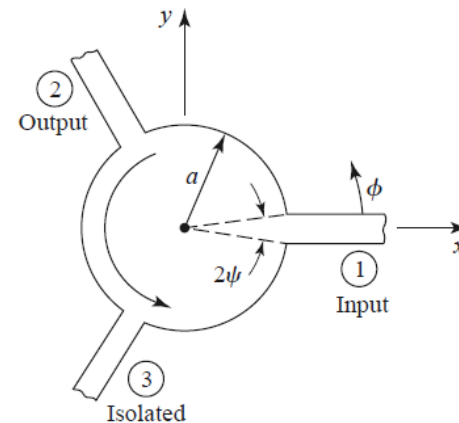
Circuladores

- Tecnologias de fabricação
 - Guia de ondas
 - Microfita (*microstrip line*)
 - Triplaca (*stripline*)

Circulador de junção triplaca



Vista artística



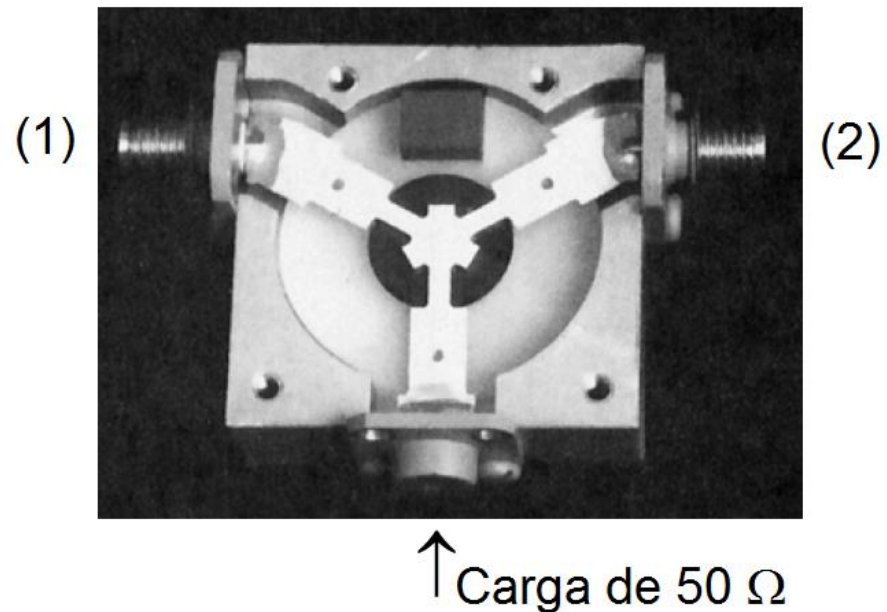
Geometria

Circuladores e Isoladores

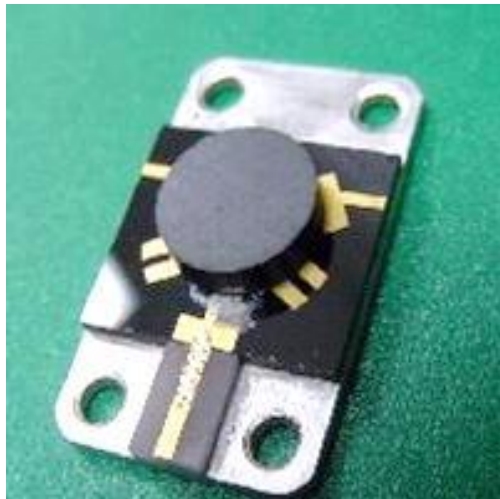
Isolador

- Geometria
 - Circulador com uma das portas terminada por uma carga casada
- Função
 - Evita que sinais refletidos na saída retornem para a entrada

Isolador de junção triplaca
desmontado



Circuladores e Isoladores



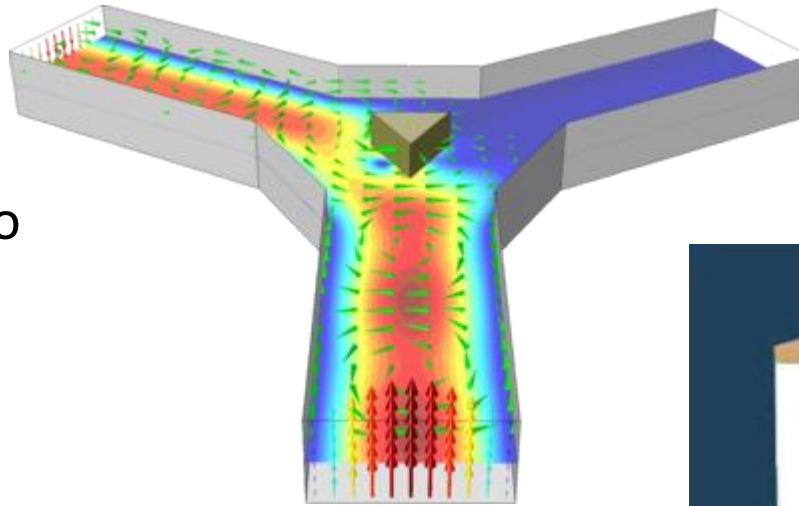
Circulador e isolador em linha de microfitas



Isolador de junção triplaca conectorizado

Circuladores e Isoladores

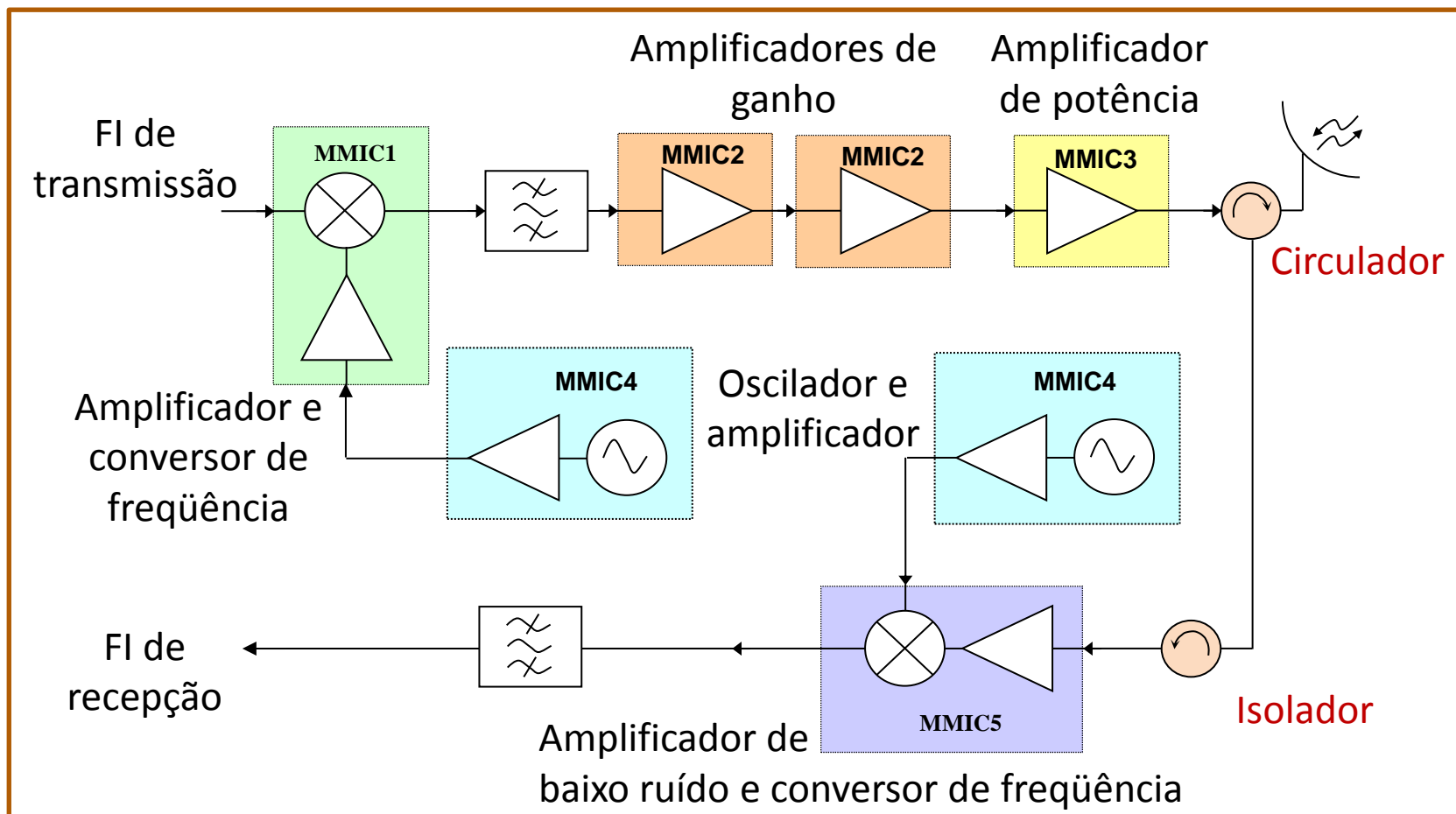
Circuladores de junção
em guia de ondas



Circuladores e Isoladores

Exemplo de aplicação em transceptor de micro-ondas

- Circulador separando sinais recebido e transmitido pela antena
- Isolador provendo casamento de impedância na entrada do LNA



Filtros de Micro-ondas

- Utilizados em circuitos e sistemas de micro-ondas
- **Filtros LC**
 - Usam capacitores e indutores
 - Possuem dimensões reduzidas
 - Usados em MMICs
- **Filtros com linhas de transmissão**
 - Usam LTs simples ou acopladas
 - Maiores que filtros LC
 - Usados em MICs e MMICs
- **Filtros em guias de ondas**
 - Alto desempenho
 - Maiores e mais pesados
- **Tipos de filtros**
 - Passa-baixas
 - Passa-faixa
 - Passa-altas
 - Rejeita-faixa
- **Tipos de resposta**
 - Tchebyshev
 - Butterworth
 - Elíptico, etc.

Filtros de Micro-ondas

Filtros

- Redes de duas portas
- Controlam a resposta em frequência em um dado ponto do sistema
- Provêm transmissão de frequências da banda de passagem com baixas perdas
- Provêm atenuação elevada de frequências na banda de rejeição do filtro

Métodos de projeto de filtros

- Método do parâmetro imagem
- ☞ Método da perda de inserção

Filtros de Micro-ondas

Método da perda de inserção

- Técnica de síntese de redes
- Permite especificar a resposta em frequência completa do filtro a ser projetado

Procedimento

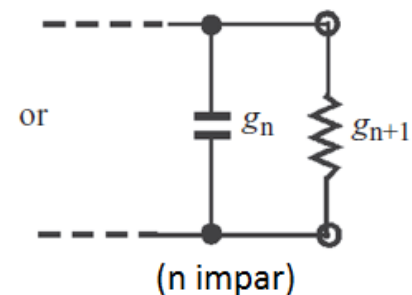
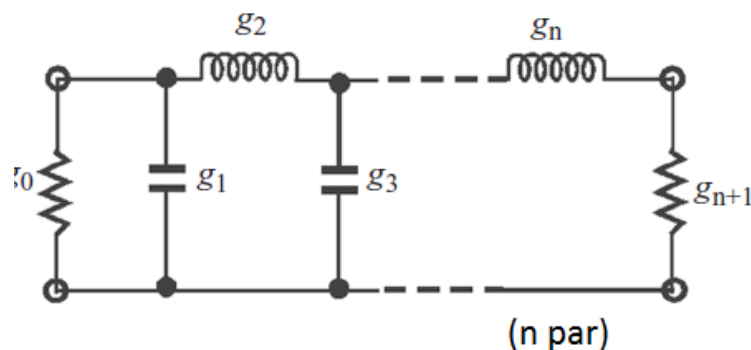
- Inicia com o projeto de protótipos de filtros passa-baixa
 - Normalizados em termos de frequência $\rightarrow \Omega_c = 1 \text{ rad/s}$
 - Normalizado em termos de impedância $\rightarrow R = 1 \Omega$
- Aplicam-se transformações para converter o protótipo para
 - Tipo desejado – passa-baixa, passa-altas, passa-faixa,...
 - Faixa de frequências desejada
 - Impedâncias de entrada e saída desejadas

Filtros de Micro-ondas

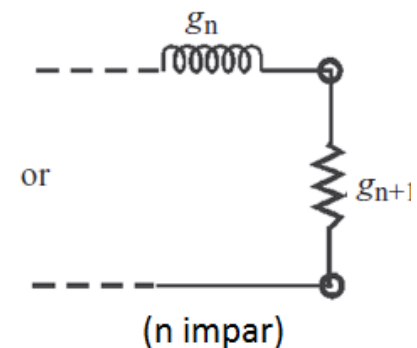
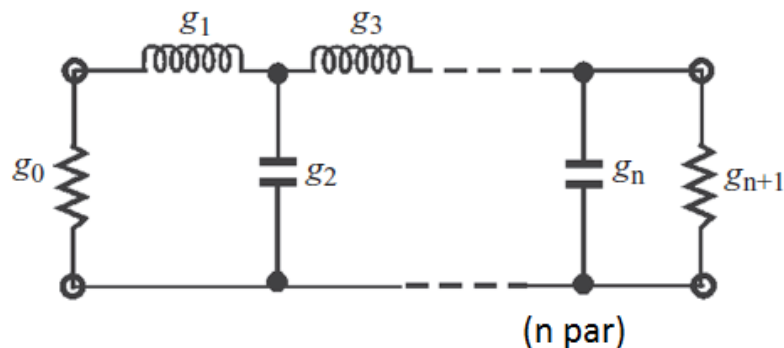
Método da perda de inserção

- Filtro passa-baixa – estruturas da rede em escada

Iniciando com elemento em paralelo →



Iniciando com elemento em série →



- Ordem do filtro: **n**, número total de elementos **L** e **C**

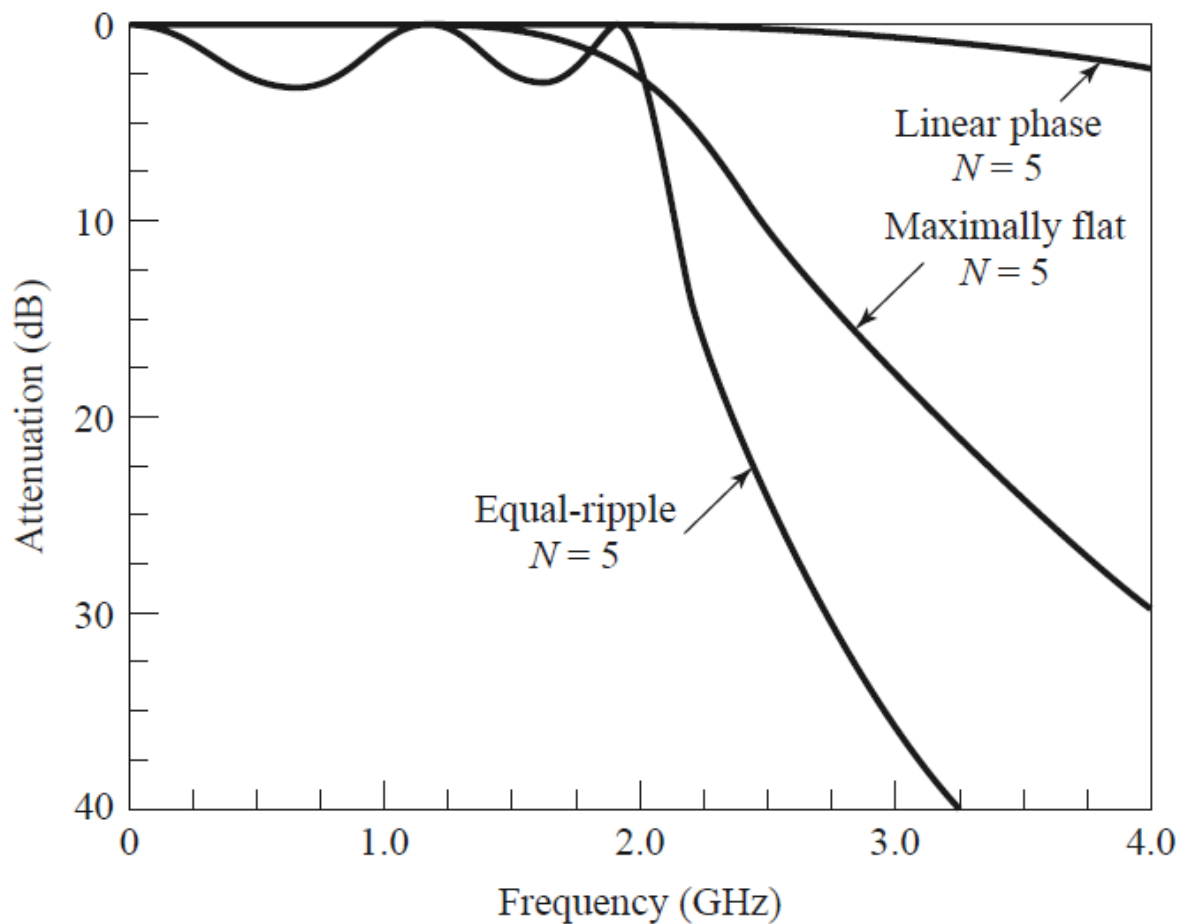
Filtros de Micro-ondas

Método da perda de inserção

- Principais tipos de resposta em frequência
 - Máxima planicidade na banda de passagem - Butterworth
 - Ondulação constante na banda de passagem - Chebyshev
 - Ondulação constante nas bandas de passagem e rejeição - Elíptico
 - Variação linear da fase com a frequência – Fase Linear
- Tabelas de valores dos componentes para cada tipo de filtro
 - Frequência de corte angular $\Omega_c = 1$ rad/s
 - Valores normalizados em relação a impedância de referência Z_0

Filtros de Micro-ondas

Comparação da resposta em frequência de filtros de ordem 5



Filtros de Micro-ondas

Método da perda de inserção

- Elementos normalizados do filtro passa-baixa
 - Resposta em frequência → Butterworth

TABLE 3.1 Element Values for Butterworth Lowpass Prototype Filters ($g_0 = 1.0$, $\Omega_c = 1$, $L_{Ar} = 3.01$ dB at Ω_c)

n	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
1	2.0000	1.0								
2	1.4142	1.4142	1.0							
3	1.0000	2.0000	1.0000	1.0						
4	0.7654	1.8478	1.8478	0.7654	1.0					
5	0.6180	1.6180	2.0000	1.6180	0.6180	1.0				
6	0.5176	1.4142	1.9318	1.9318	1.4142	0.5176	1.0			
7	0.4450	1.2470	1.8019	2.0000	1.8019	1.2470	0.4450	1.0		
8	0.3902	1.1111	1.6629	1.9616	1.9616	1.6629	1.1111	0.3902	1.0	
9	0.3473	1.0000	1.5321	1.8794	2.0000	1.8794	1.5321	1.0000	0.3473	1.0

Filtros de Micro-ondas

Método da perda de inserção

- Resposta em frequência → Chebyshev, ondulação de 0,5 dB

TABLE 8.4 Element Values for Equal-Ripple Low-Pass Filter Prototypes ($g_0 = 1, \omega_c = 1, N = 1$ to 10, 0.5 dB and 3.0 dB ripple)

N	0.5 dB Ripple									
	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9	g_{10}
1	0.6986	1.0000								
2	1.4029	0.7071	1.9841							
3	1.5963	1.0967	1.5963	1.0000						
4	1.6703	1.1926	2.3661	0.8419	1.9841					
5	1.7058	1.2296	2.5408	1.2296	1.7058	1.0000				
6	1.7254	1.2479	2.6064	1.3137	2.4758	0.8696	1.9841			
7	1.7372	1.2583	2.6381	1.3444	2.6381	1.2583	1.7372	1.0000		
8	1.7451	1.2647	2.6564	1.3590	2.6964	1.3389	2.5093	0.8796	1.9841	
9	1.7504	1.2690	2.6678	1.3673	2.7239	1.3673	2.6678	1.2690	1.7504	1.0000

Filtros de Micro-ondas

Método da perda de inserção

- Projeto de filtro LC passa-baixa
 - Especificações do filtro
 - Frequência de corte (ω_c)
 - Impedância de entrada e saída ($Z_0 = 50 \Omega$ em micro-ondas)
 - Tipo de resposta em frequência
 - Valores dos indutores e capacitores do protótipo normalizado
 - Obtidos da tabela da resposta de frequência de interesse
- Valores dos indutores e capacitores do filtro especificado
 - Equações de desnormalização que consideram
 - A frequência de corte ω_c
 - A impedância de referência Z_0

Filtros de Micro-ondas

Conceitos básicos de filtros LC

- Projeto de filtro passa-baixa
 - Equações de desnormalização

$$L = \left(\frac{\Omega_c}{\omega_c} \right) \gamma_0 g \quad \text{para } g \text{ que representa a indutância}$$

$$C = \left(\frac{\Omega_c}{\omega_c} \right) \frac{g}{\gamma_0} \quad \text{para } g \text{ que representa a capacitância}$$

Sendo

ω_c : frequência de corte do filtro

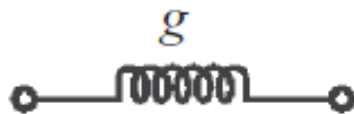
$$\gamma_0 = \begin{cases} Z_0/g_0 & \text{para } g_o \text{ sendo a resistância} \\ g_0/Y_0 & \text{para } g_o \text{ sendo a condutância} \end{cases}$$

Filtros de Micro-ondas

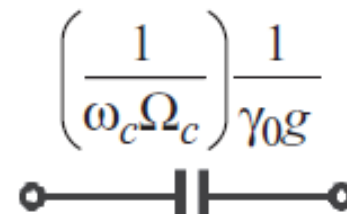
Conceitos básicos de filtros LC

- Projeto de filtros rejeita-faixa – frequência centra ω_0

Elemento do filtro
passa-baixa



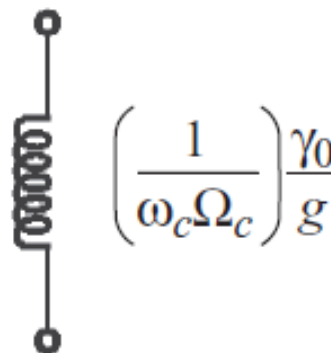
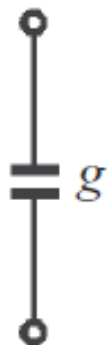
Elemento do filtro
passa-alta



- Realiza-se transformação de elementos



- Calcula-se os elementos desnormalizados

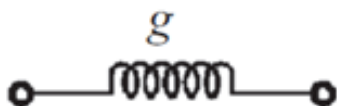


Filtros de Micro-ondas

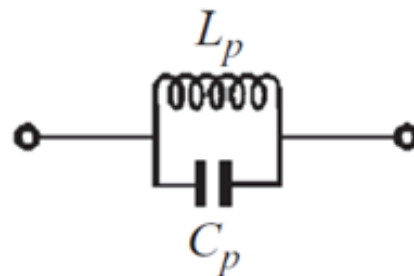
Conceitos básicos de filtros LC

- Projeto de filtros passa-faixa

Elementos do filtro
passa-baixa



Elementos do filtro
passa-faixa

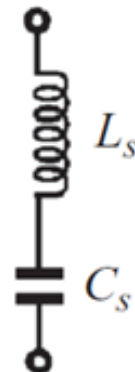
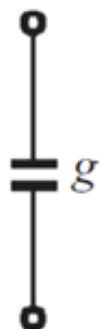


$$L_p = \left(\frac{\Omega_c FBW}{\omega_0} \right) \gamma_0 g$$

$$C_p = 1/(\omega_0^2 L_p)$$

- Realiza-se transformação de elementos

- Calcula-se os elementos desnormalizados



$$L_s = 1/(\omega_0^2 C_s)$$

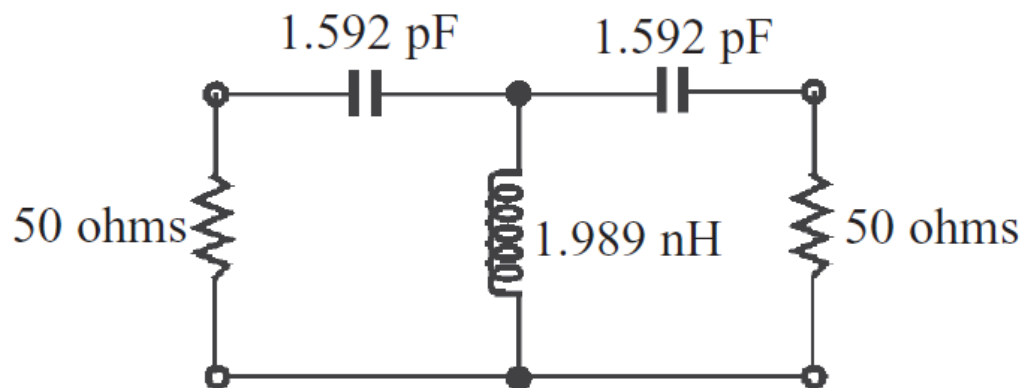
$$C_s = \left(\frac{\Omega_c FBW}{\omega_0} \right) \frac{g}{\gamma_0}$$

Filtros de Micro-ondas

Conceitos básicos de filtros LC

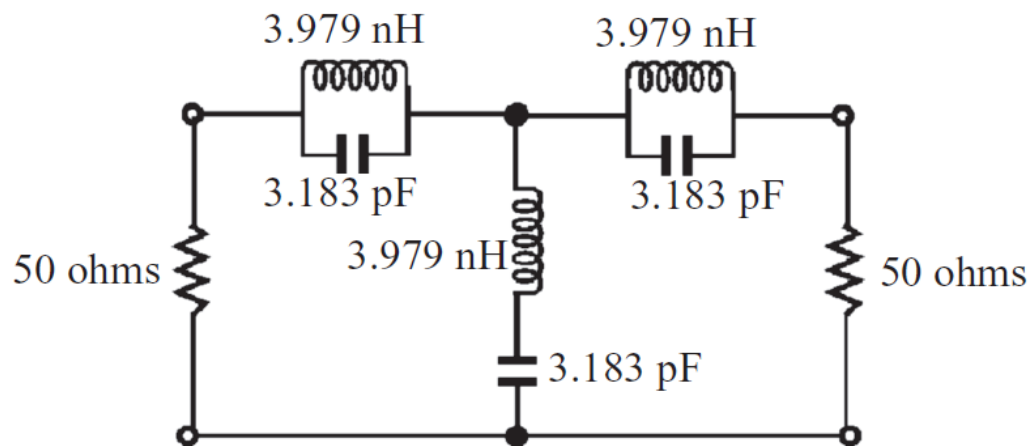
Filtro passa-altas de 3ª ordem

- Frequência de corte de 2 GHz



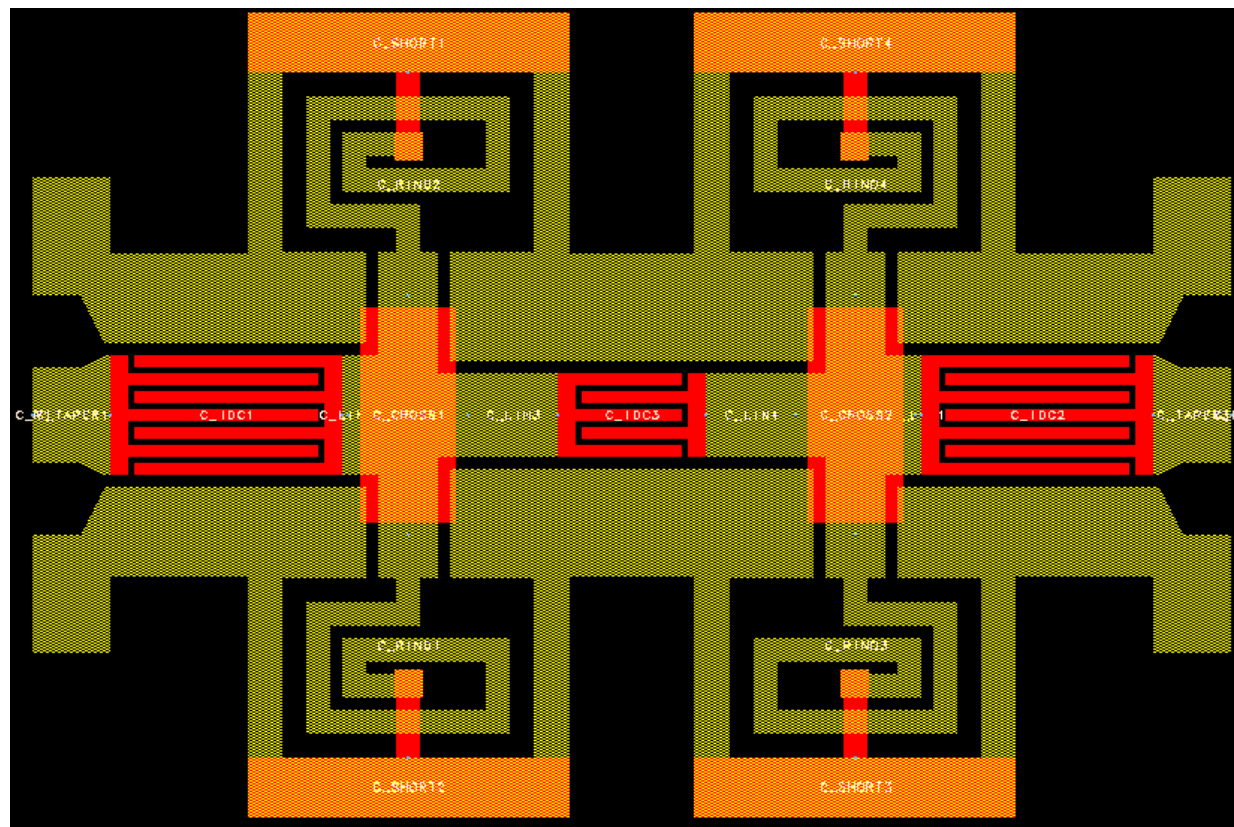
Filtro passa-faixas de 3ª ordem

- Banda de passagem de 1 a 2 GHz



Filtros de Micro-ondas

Filtro LC monolítico de micro-ondas (tecnologia MMIC)



Filtro passa-alta coplanar usando capacitores interdigitais

Filtros de Micro-ondas

Filtros LC em frequências de micro-ondas

- Fabricação em tecnologia MMIC
 - Capacitores e indutores fabricados e integrados no substrato
 - Possuem efeitos parasitas reduzidos
 - Opção viável para filtros LC em micro-ondas
- Fabricação usando componentes discretos
 - Capacitores e indutores são montados sobre o substrato
 - Valores comercialmente disponíveis limitados
 - Apresentam efeitos parasitas significativos
 - Opção viável para filtros LC no início da faixa de micro-ondas (por exemplo – até 2 GHz)

Opção usual → filtros usando linhas de transmissão

Filtros de Micro-ondas

Filtros usando linhas de transmissão

Filtros passa-baixa *Step Impedance*

- Alterna linhas de transmissão de baixa e alta impedância em cascata
- Indutores série
 - Substituídos por trechos de linha de alta impedância
 - Comprimento: proporcional à indutância desejada
- Capacitores para o plano de terra
 - Substituídos por trechos de linha de baixa impedância, terminados por circuito aberto (*open stub*)
 - Comprimento: proporcional à capacitância desejada

Filtros de Micro-ondas

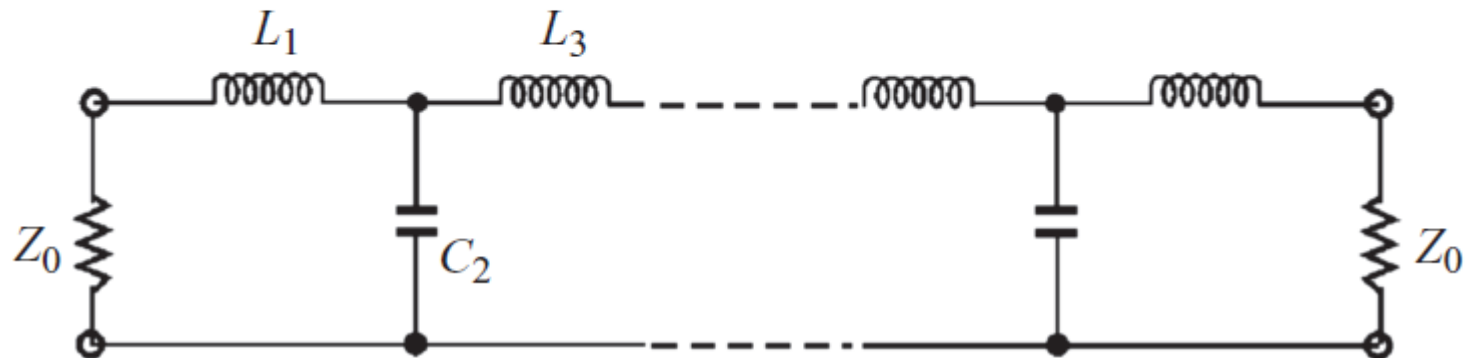
Filtros usando linhas de transmissão

Filtro *Step impedance*

- Geometria e correspondência com elementos do filtro LC passa-baixa



(a)

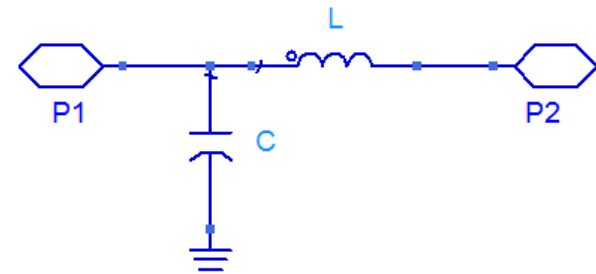


Filtros de Micro-ondas

Filtros usando linhas de transmissão

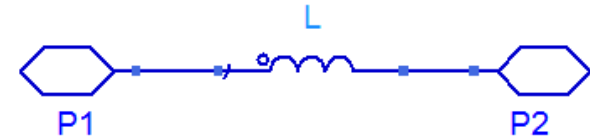
Projeto de filtro *Step Impedance*

Modelo simplificado de um trecho de linha de transmissão



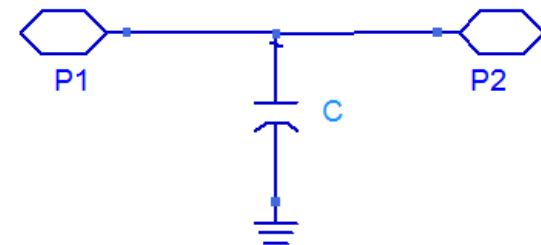
Linha de transmissão com **alta impedância** característica

- Efeito predominante **indutivo**
- Modelo simplificado



Linha de transmissão com **baixa impedância** característica

- Efeito predominante **capacitivo**
- Modelo simplificado



Filtros de Micro-ondas

Filtros usando linhas de transmissão

Projeto de filtro *Step Impedance*

- Indutores série
 - Substituídos por trechos de linha de transmissão com **Impedância característica arbitrária: $Z_{0L} > Z_0$**
- Comprimento
$$l_L = \frac{\lambda_{gL}}{2\pi} \sin^{-1} \left(\frac{\omega_c L}{Z_{0L}} \right)$$
- Capacitores para o plano de terra
 - Substituídos por trechos de linha transmissão em aberto com **impedância característica arbitrária: $Z_{0C} < Z_0$**

- Comprimento
$$l_C = \frac{\lambda_{gC}}{2\pi} \sin^{-1} (\omega_c C Z_{0C})$$

Filtros de Micro-ondas

Filtros usando linhas de transmissão

Projeto de filtro *Step Impedance*

- Indutores série
 - Substituídos por trechos de linha de transmissão com **Impedância característica arbitrária: $Z_{0L} > Z_0$**
 - Comprimento
$$l_L = \frac{\lambda_{gL}}{2\pi} \sin^{-1} \left(\frac{\omega_c L}{Z_{0L}} \right)$$
- Capacitores para o plano de terra
 - Substituídos por trechos de linha transmissão em aberto com **impedância característica arbitrária: $Z_{0C} < Z_0$**

- Comprimento
$$l_C = \frac{\lambda_{gC}}{2\pi} \sin^{-1} (\omega_c C Z_{0C})$$

Filtros de Micro-ondas

Filtros usando linhas de transmissão

Projeto de filtro *Step Impedance* - exemplo

- Especificações
 - Frequência de corte: $f_c = 1$ GHz
→ $\omega_c = 2\pi f_c = 6,28 \times 10^9$ rad/s
 - Ondulação na banda de passagem: 0,1 dB
 - Impedância de fonte e de carga: $Z_0 = 50 \Omega$
- Da tabela de Filtro Passa baixa Chebyshev

$$g_0 = g_4 = 1$$

$$g_1 = g_3 = 1,0317 \quad \rightarrow$$

$$g_2 = 1,1474$$

$$L_1 = L_3 = \left(\frac{Z_0}{g_0} \right) \left(\frac{\Omega_c}{2\pi f_c} \right) g_1 = 8.209 \times 10^{-9} \text{ H}$$

$$C_2 = \left(\frac{g_0}{Z_0} \right) \left(\frac{\Omega_c}{2\pi f_c} \right) g_2 = 3.652 \times 10^{-12} \text{ F}$$

Filtros de Micro-ondas

Filtros usando linhas de transmissão

Projeto de filtro *Step Impedance* - exemplo

- Realização em linha de transmissão
 - Adotando-se $Z_{0C} = 24 \Omega$ e $Z_{0L} = 93 \Omega$
 - Considerando linhas de microfita
 - Substrato com $\epsilon_r = 10,7$ e $h = 1,27$ mm
 - Frequência de 1 GHz

Impedância característica (Ω)	$Z_{0C} = 24$	$Z_0 = 50$	$Z_{0L} = 93$
Comprimento de onda guiado (mm)	$\lambda_{gC} = 105$	$\lambda_{g0} = 112$	$\lambda_{gL} = 118$
Largura da microfita (mm)	$W_C = 4.0$	$W_0 = 1.1$	$W_L = 0.2$

Filtros de Micro-ondas

Filtros usando linhas de transmissão

- Calcula-se os valores iniciais do comprimento linhas de transmissão

$$l_L = \frac{\lambda_{gL}}{2\pi} \sin^{-1} \left(\frac{\omega_c L}{Z_{0L}} \right) \quad l_C = \frac{\lambda_{gC}}{2\pi} \sin^{-1} (\omega_c C Z_{0C})$$

- Valores mais precisos são obtidos considerando
 - Efeito da reatância capacitiva das LTs de alta impedância
 - Efeito da reatância indutiva das LTs de baixa impedância

Resolve-se o sistema de equações

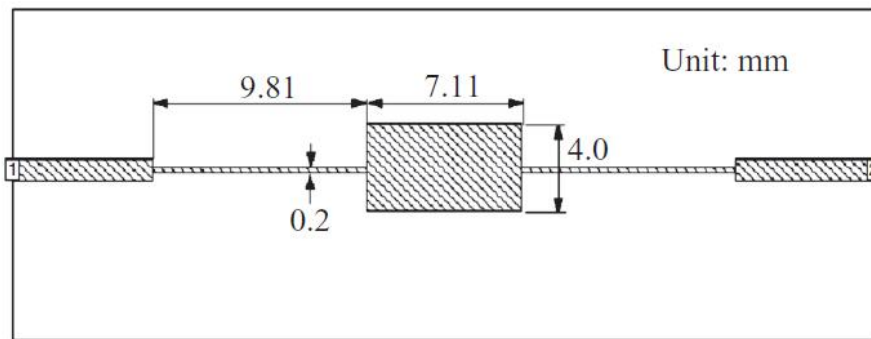
$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_c L = Z_{0L} \sin \left(\frac{2\pi l_L}{\lambda_{gL}} \right) + Z_{0C} \tan \left(\frac{\pi l_C}{\lambda_{gC}} \right) \\ \omega_c C = \frac{1}{Z_{0C}} \sin \left(\frac{2\pi l_C}{\lambda_{gC}} \right) + 2 \times \frac{1}{Z_{0L}} \tan \left(\frac{\pi l_L}{\lambda_{gL}} \right) \end{array} \right.$$

Filtros de Micro-ondas

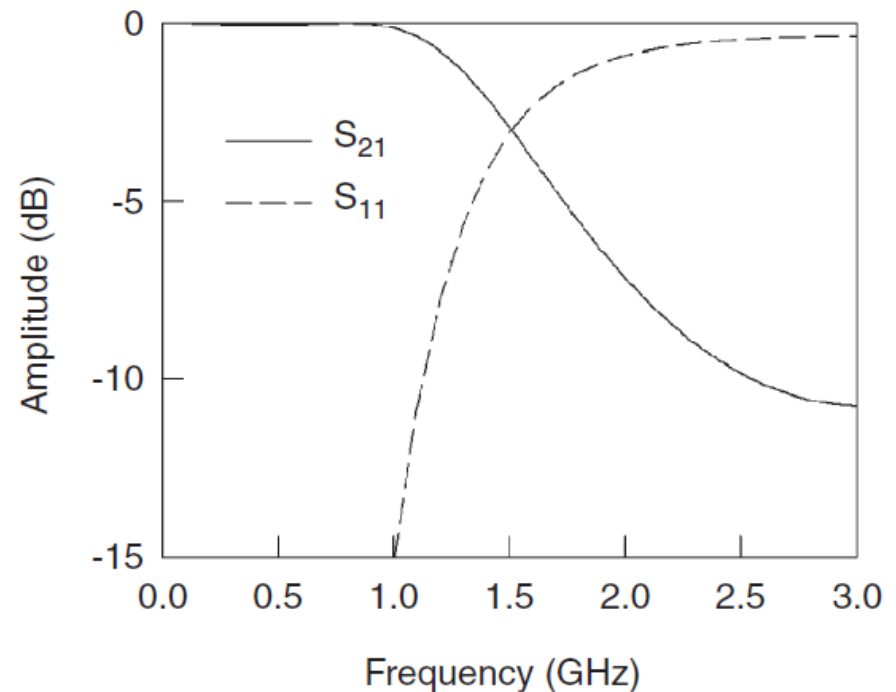
Filtros usando linhas de transmissão

Projeto de filtro *Step Impedance* - exemplo

- Leiaute do filtro



- Resposta em frequência

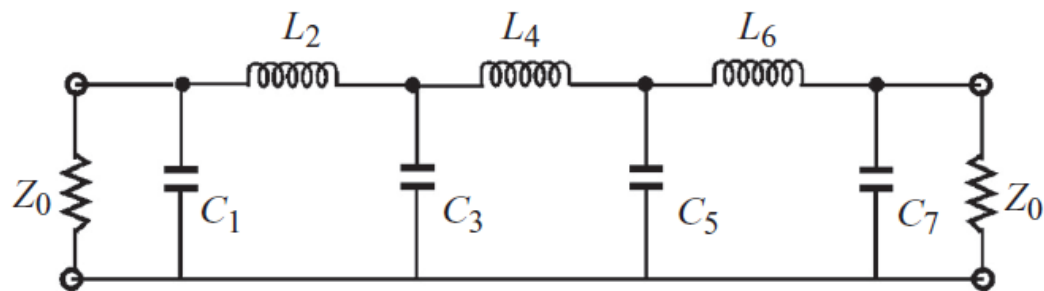


Filtros de Micro-ondas

Filtros usando linhas de transmissão

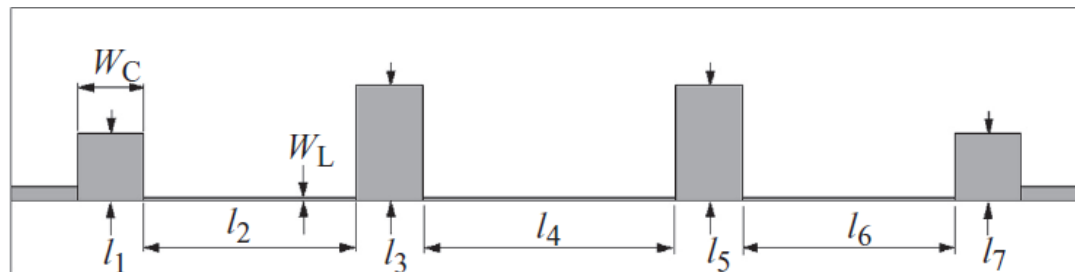
Filtro passa-baixas usando tocos (*stubs*)

- 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



- Protótipo do filtro LC

- Leitura do filtro em linha de microfita



Filtros de Micro-ondas

Filtros usando linhas de transmissão

Filtro passa-baixas usando tocos (*stubs*)

- Projeta-se o protótipo LC do filtro especificado
- Cálculo dos indutores
 - Substituídos por trechos de linha de transmissão com **Impedância característica arbitrária: $Z_{0L} > Z_0$**
 - Comprimento aproximado
- Capacitores
 - Substituídos por tocos de linha de transmissão de baixa impedância, terminados em circuito-aberto com **Impedância característica arbitrária: $Z_{0C} < Z_0$**

$$l_L = \frac{\lambda_{gL}}{2\pi} \sin^{-1} \left(\frac{\omega_c L}{Z_{0L}} \right)$$

- Comprimento aproximado

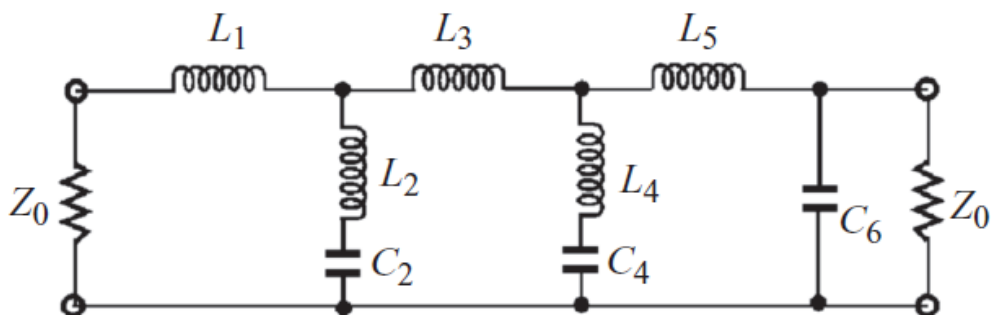
$$l_C = \frac{\lambda_{gC}}{2\pi} \tan^{-1} (\omega_c C Z_{0C})$$

Filtros de Micro-ondas

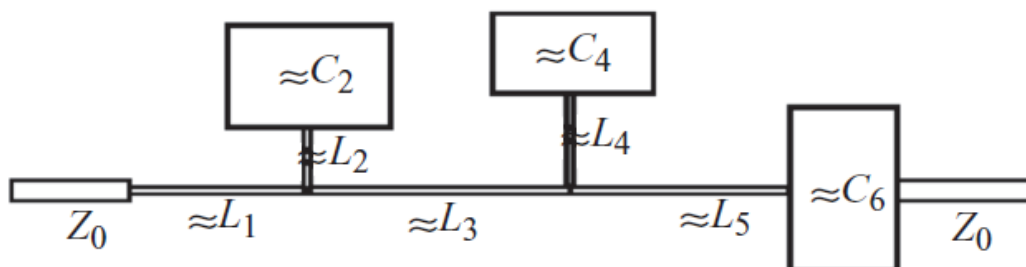
Filtros usando linhas de transmissão

Filtro passa-baixas com zeros de transmissão

- Protótipo do filtro LC



- Leiaute do filtro em linha de microfita

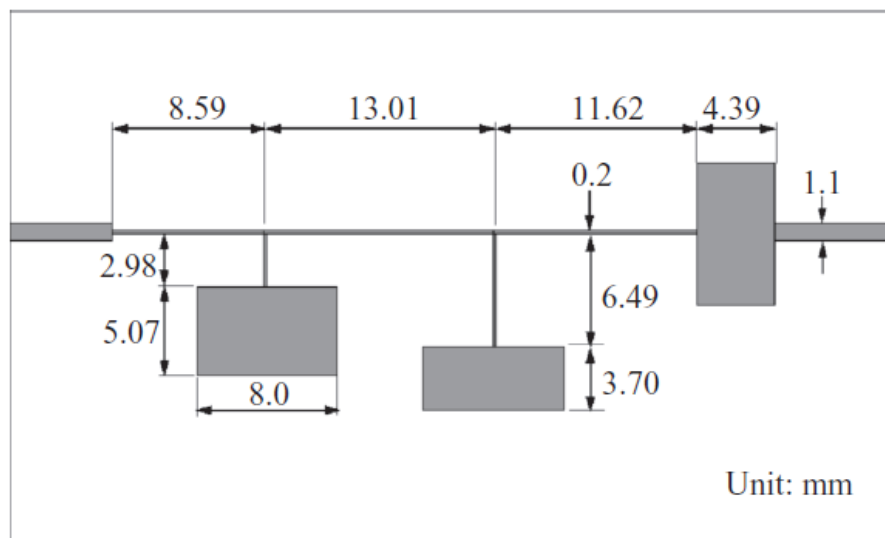


Filtros de Micro-ondas

Filtros usando linhas de transmissão

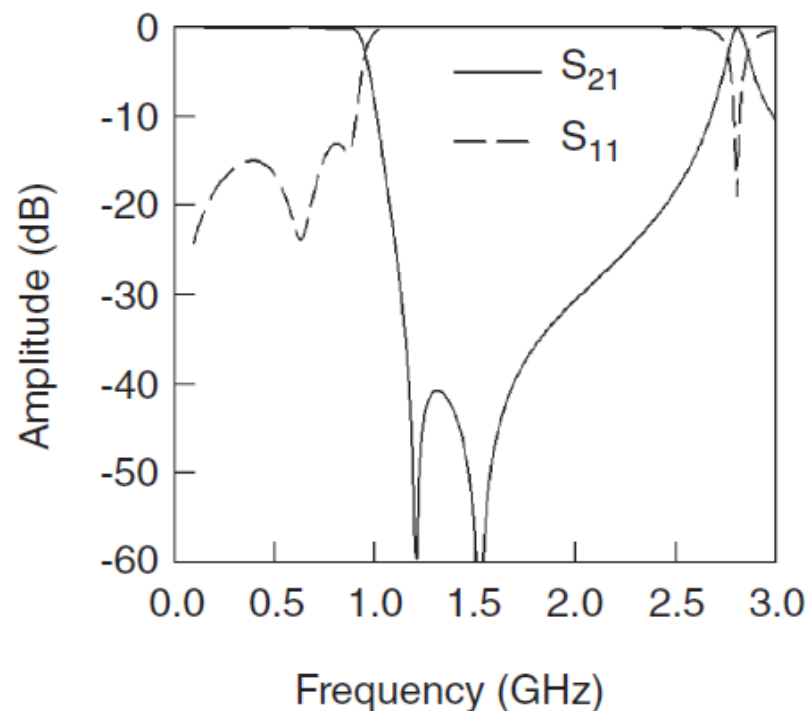
Filtro passa-baixas com zeros de transmissão

- Leiaute do filtro em linha de microfita



Substrato com $\epsilon_r = 10,8$ e $h = 1,27$ mm

- Resposta em frequência



Filtros de Micro-ondas

Filtros usando linhas de transmissão

Filtros passa-faixa

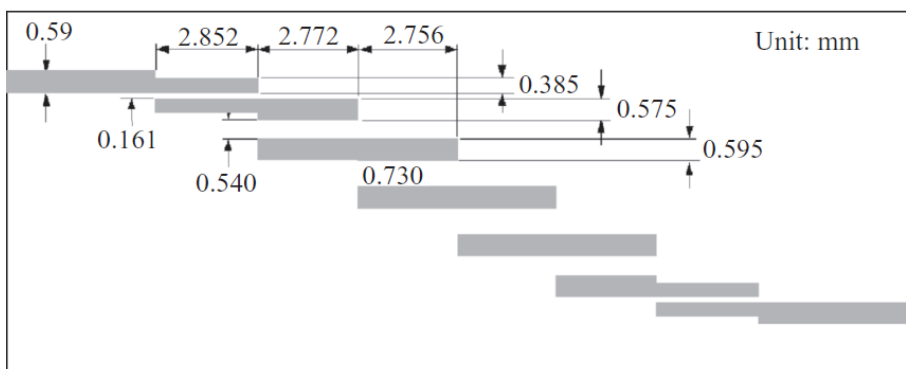
- Utilizam linhas acopladas
- Acoplamento é calculado em função dos elementos das tabelas de filtros em escada: $g_1, g_2, g_3, \dots, g_{n-1}$
- Cada tipo de filtro tem procedimento próprio de projeto
- Tipos usuais de filtros passa-faixa
 - Filtro de linhas de microfita paralelas acopladas pela borda
 - Filtro Harpin
 - Filtro passa-faixa interdigital
 - Filtro Compline
 - Filtro de ressoadores acoplados

Filtros de Micro-ondas

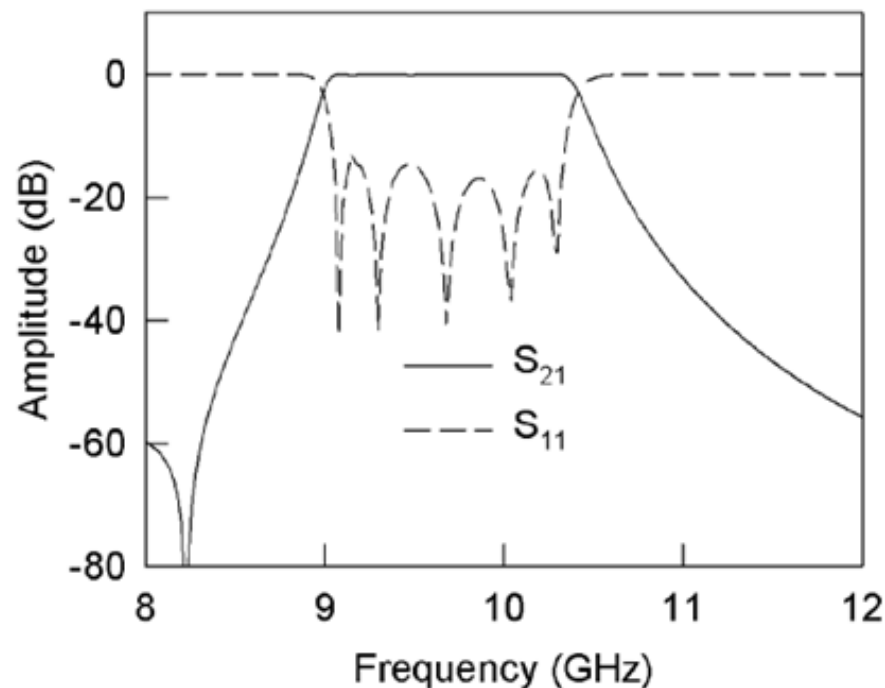
Filtros usando linhas de transmissão

Filtro de linhas de microfita paralelas acopladas pela borda

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



- Resposta em frequência



Filtros de Micro-ondas

Filtros usando linhas de transmissão

Filtro Hairpin

Ressoadores acoplados

- Trechos de linha de transmissão
- Terminados em aberto nos duas extremidades
- Dobrados em forma de “U”

Resposta em frequência

- É função do acoplamento entre os ressoadores
- Da posição da entrada e da saída



Filtros de Micro-ondas

Filtros usando linhas de transmissão

Filtro Hairpin

Projeto do filtro em linha de microfita

- Projeta-se o ressonador em “U” para ressoar na frequência central de operação do filtro
 - Impedância característica arbitrária $\rightarrow W$, largura da microfita
 - Comprimento total da microfita $\rightarrow \lambda g/2$ na frequência central
- Das tabelas de filtro obtém-se os parâmetros g_1, g_2, g_3 do protótipo de filtro passa-baixas normalizado



Filtros de Micro-ondas

Filtros usando linhas de transmissão

Filtro Hairpin

- Calcula-se o acoplamento entre os n ressoadores em “U”

$$M_{i,i+1} = \frac{FBW}{\sqrt{g_i g_{i+1}}} \quad \text{for } i = 1 \text{ to } n - 1$$

- Calcula-se os índices de mérito de entrada e de saída

$$Q_{e1} = \frac{g_0 g_1}{FBW}, \quad Q_{en} = \frac{g_n g_{n+1}}{FBW}$$

FBW Banda de passagem fracionária $\rightarrow FBW = BW / f_0$

BW Banda de passagem do filtro

f_0 Frequência central da banda de passagem

n Número de ressoadores em “U”

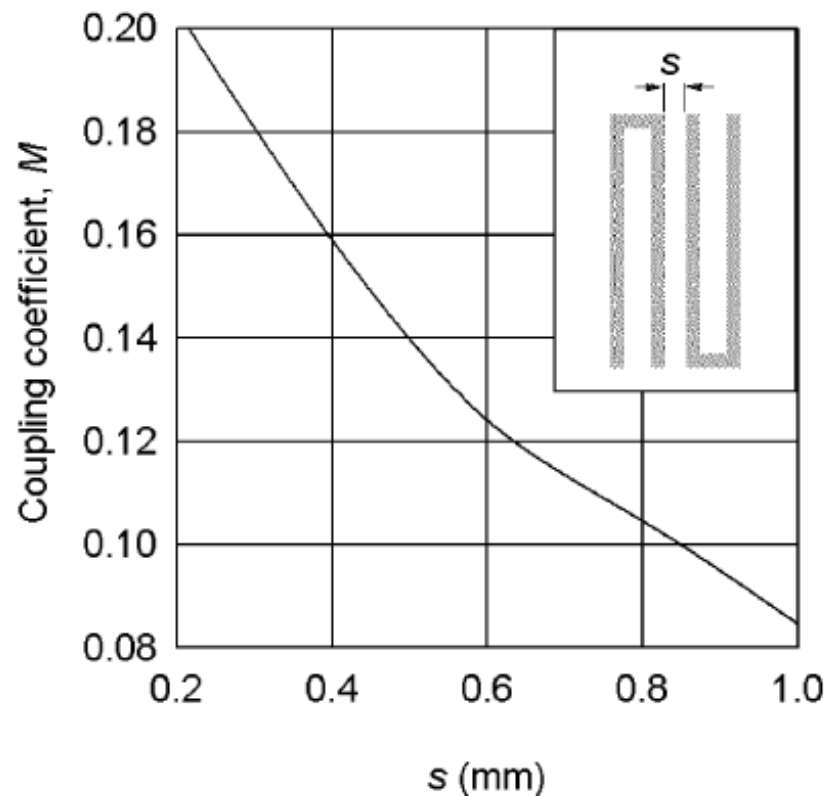
g_i Elementos do protótipo de filtro passa-baixas normalizado

Filtros de Micro-ondas

Filtros usando linhas de transmissão

Filtro Hairpin

- Acoplamento entre os ressoadores em “U”
 - Função da distância entre ressoadores $\rightarrow s$
 - Depende do substrato utilizado
 - Obtido usando simulação eletromagnética

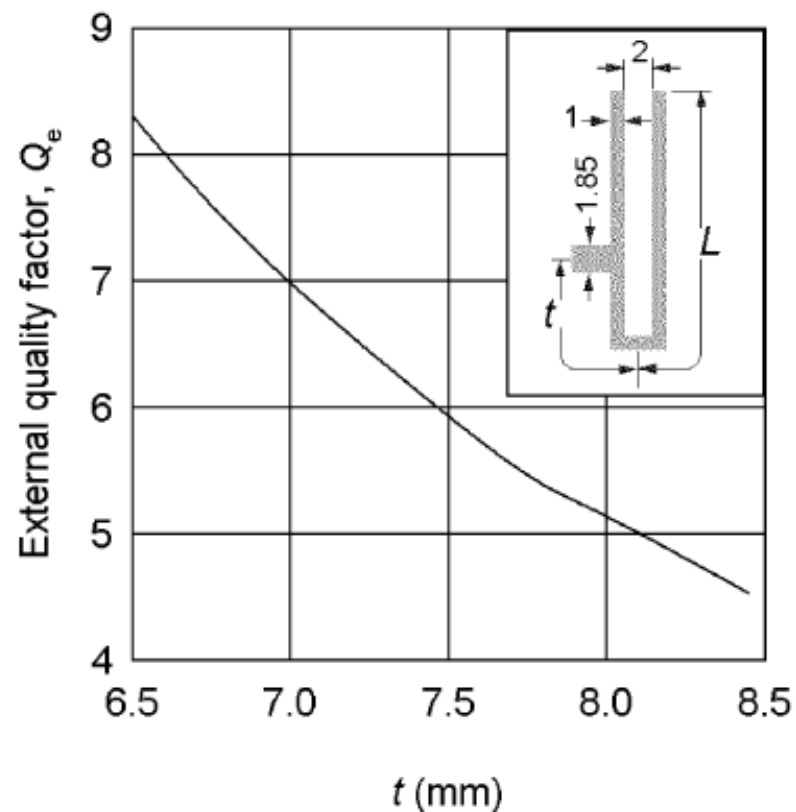


Filtros de Micro-ondas

Filtros usando linhas de transmissão

Filtro Hairpin

- índices de mérito de entrada e de saída
 - Função da ponto de conexão das linhas de entrada e de saída → t
 - Depende do substrato utilizado
 - Obtido usando simulação eletromagnética

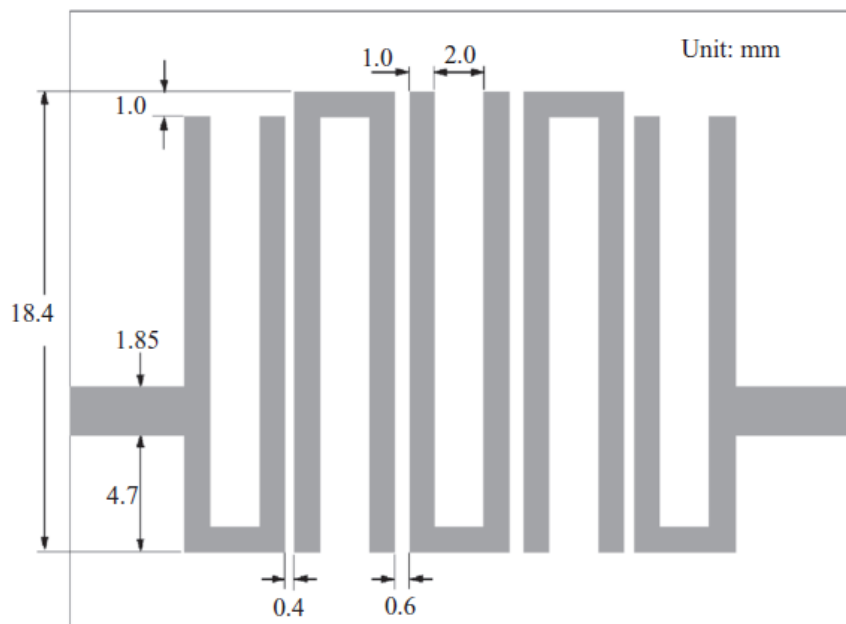


Filtros de Micro-ondas

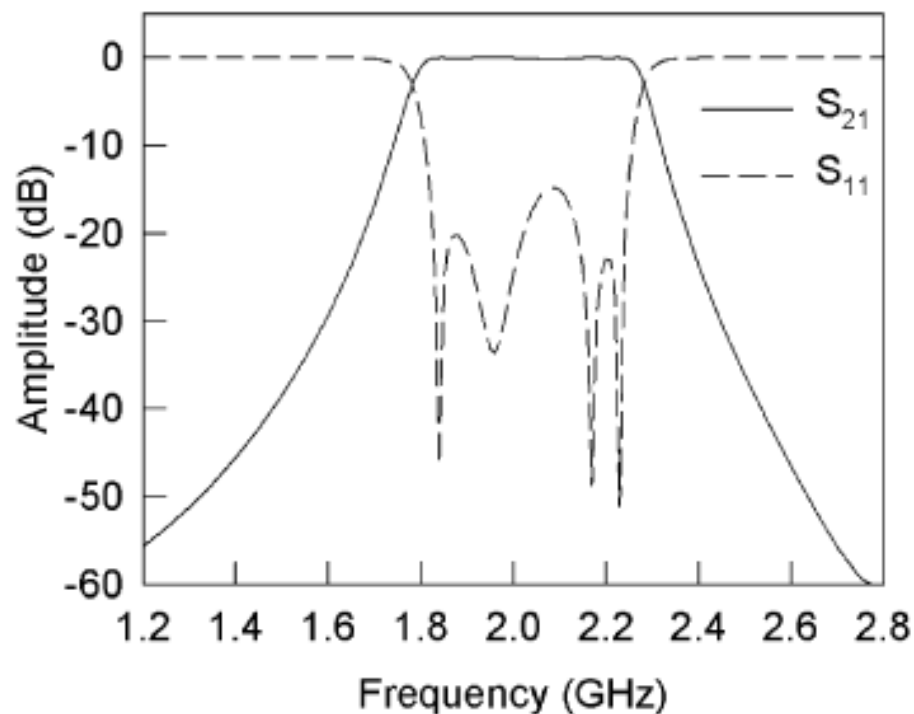
Filtros usando linhas de transmissão

Filtro Hairpin

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



- Resposta em frequência

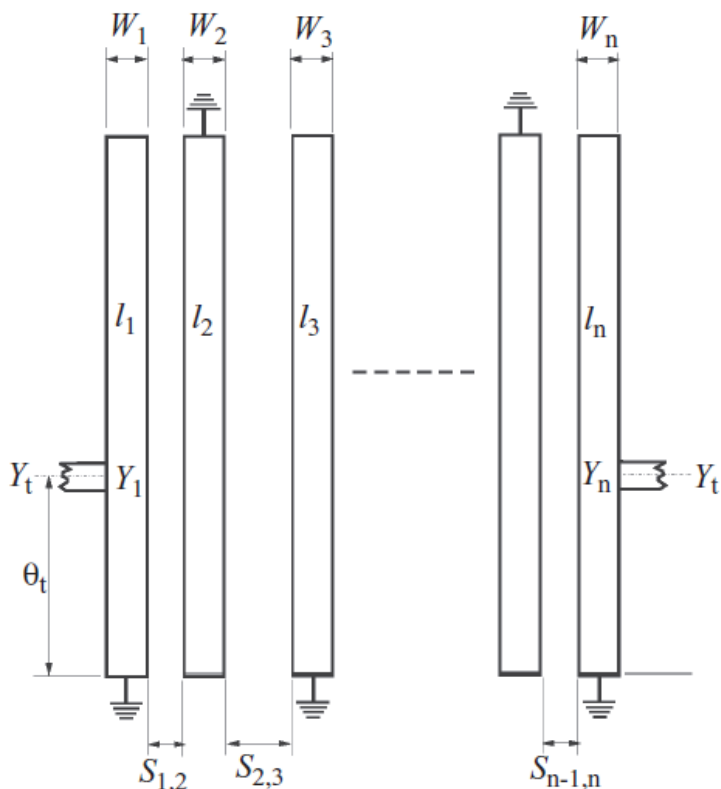


Filtros de Micro-ondas

Filtros usando linhas de transmissão

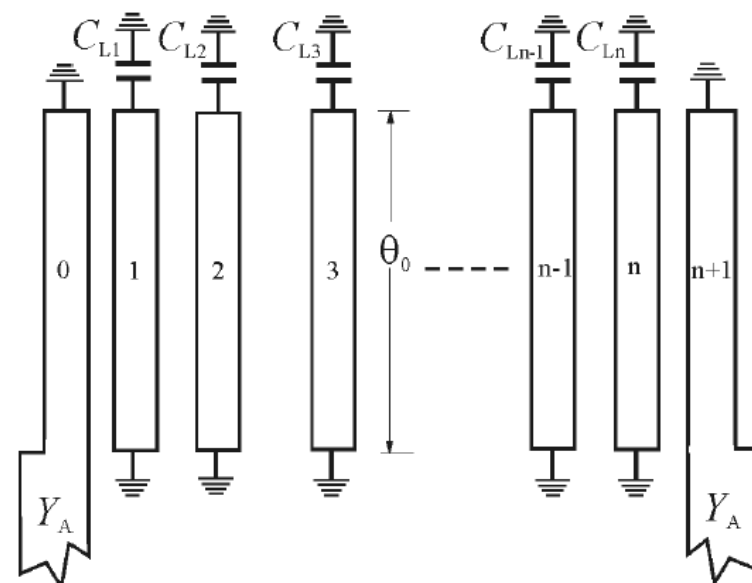
Estrutura de Filtro Interdigital

- Linhas acopladas terminadas em curto e aberto nas extremidades



Estrutura de Filtro Combline

- Linhas acopladas terminadas em curto e por capacitâncias nas extremidades

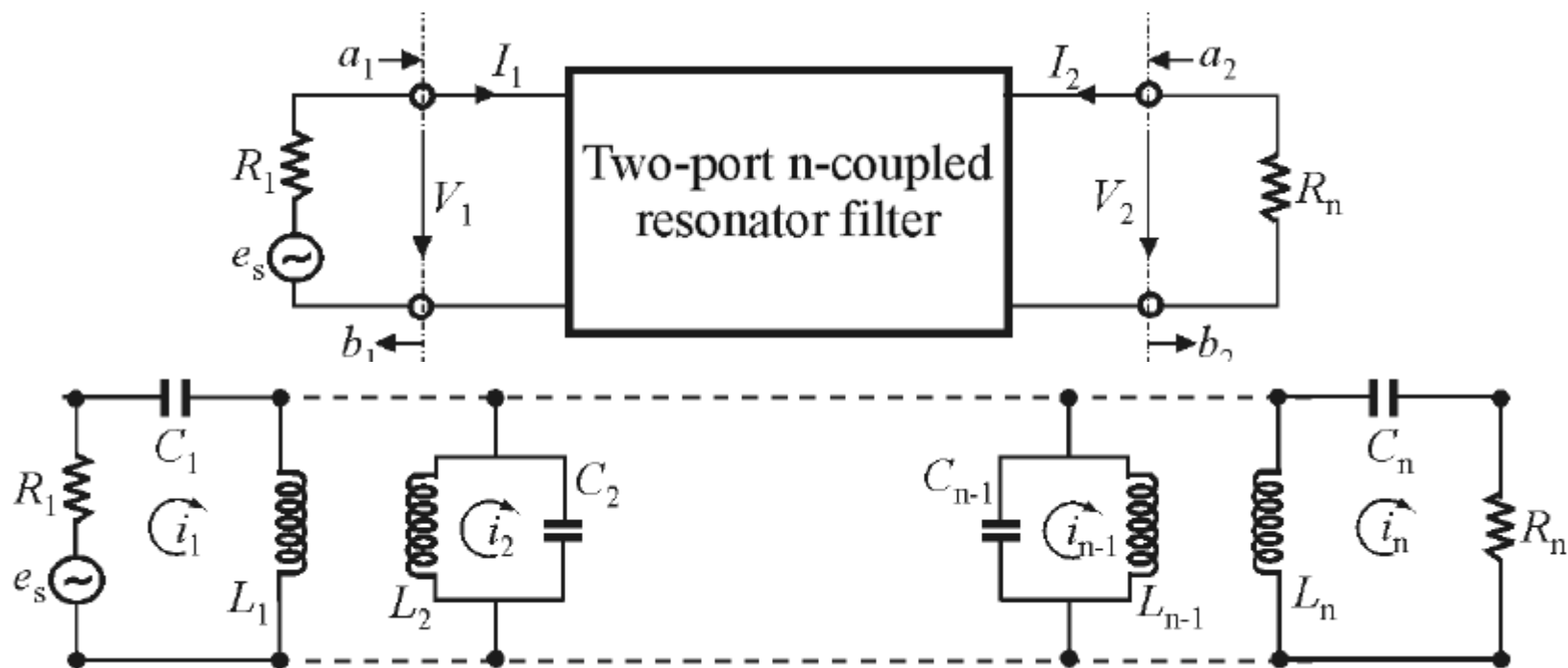


Filtros de Micro-ondas

Filtros usando linhas de transmissão

Filtros de ressoadores acoplados

- Emprega teoria de ressoadores acoplados



- Aplicável a diversos tipos de ressoadores

Filtros de Micro-ondas

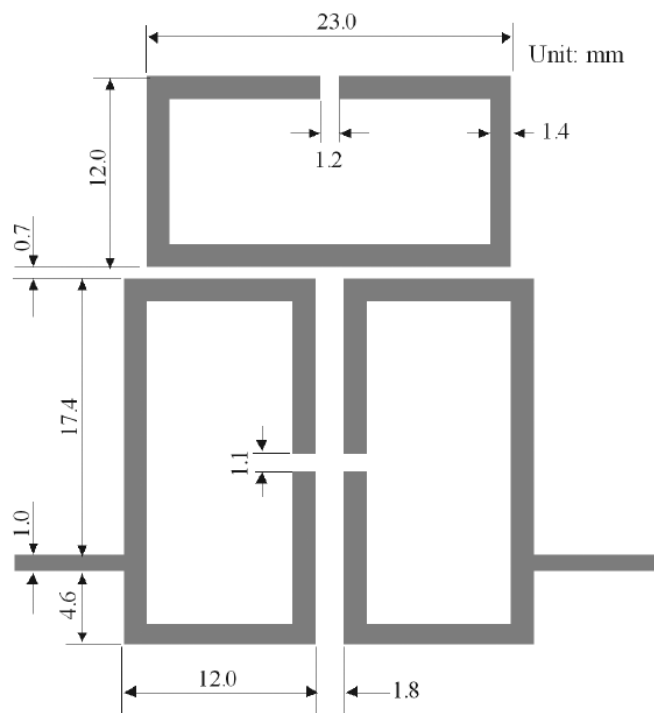
Filtros usando linhas de transmissão

Filtros de três secções usando ressoadores em anel aberto acoplados

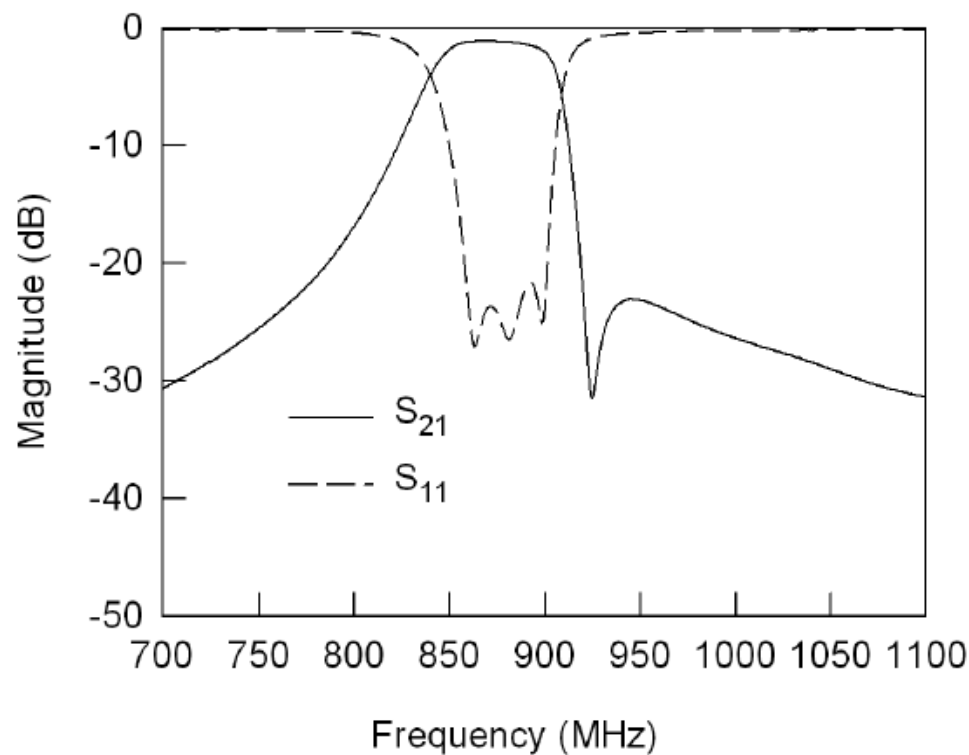
- Leiaute de filtro em microfita

- Substrato:

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



- Resposta em frequência



Filtros de Micro-ondas

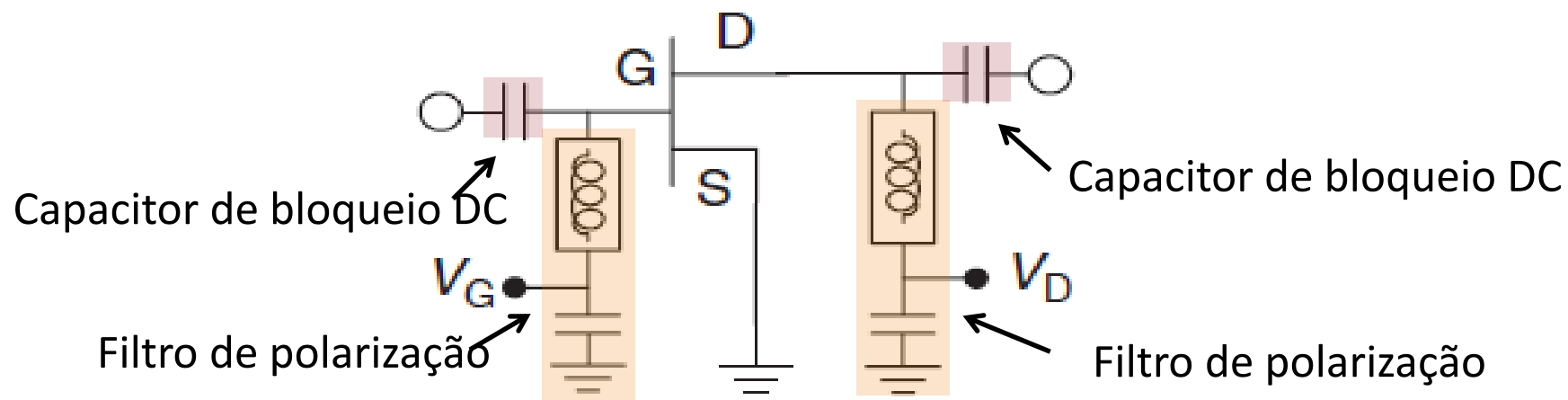
Filtros de polarização

- Usados em circuitos ativos
 - Amplificadores
 - Osciladores
 - Conversores de frequência ativos
 - Multiplicadores de frequência
- Função
 - Conectar tensões ou correntes DC aos terminais do transistor para que operem no ponto quiescente projetado
 - Rejeitar o sinal de micro-ondas, para que o mesmo não se propague para as fontes de alimentação DC.

Filtros de Micro-ondas

Filtros de polarização

- Filtro de polarização com elementos concentrados



- Na faixa de frequência de operação do amplificador

L tal que $X_L = 2\pi.f.L \rightarrow \infty$

C tal que $X_C = 1/(2\pi.f.C) \rightarrow 0$

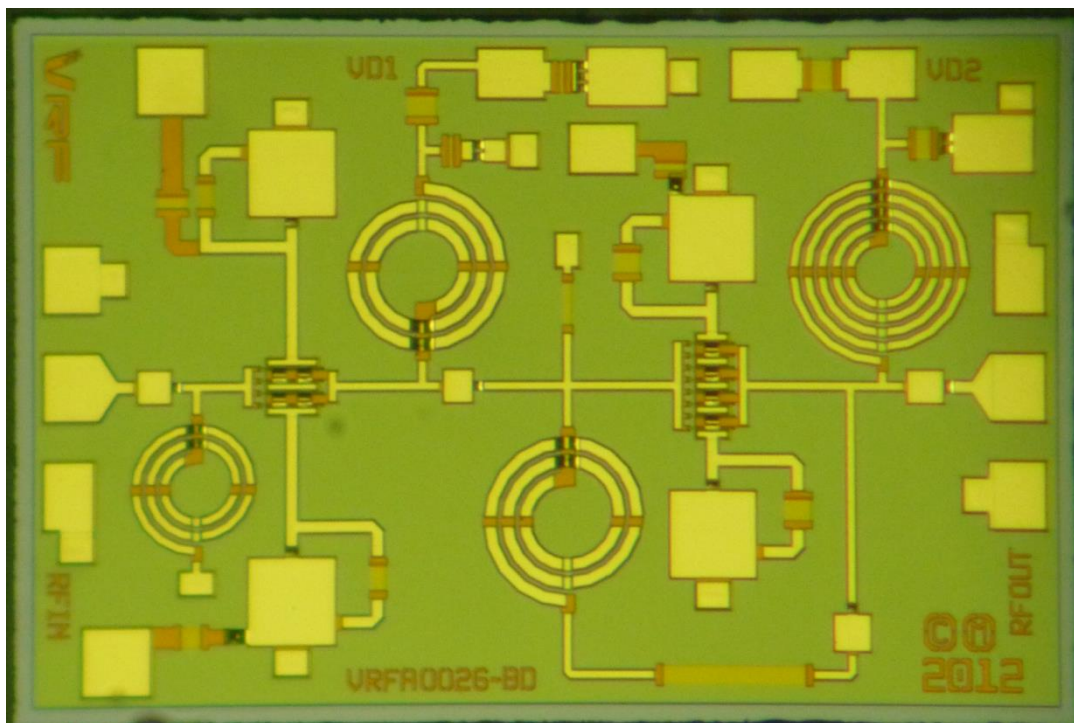
Filtros de Micro-ondas

Filtros de polarização

- Exemplo de filtro de polarização com elementos concentrados

VRFA00026BD - Viper RF

- Amplificador de baixo ruído
- Monolítico
- GaAs PHEMT
- Banda X – 7 a 11 GHz
- Dois estágios



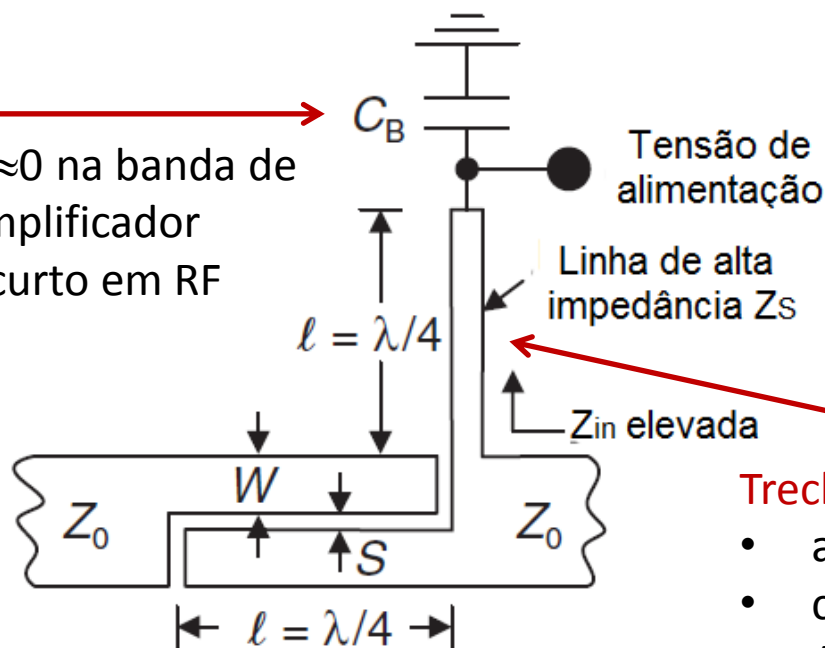
Filtros de Micro-ondas

Filtros de polarização

- Exemplos de filtros de polarização com linhas de transmissão

Capacitor C_B

- $X_{CB} = 1/(2\pi \cdot f \cdot C_B) \approx 0$ na banda de passagem do amplificador
- Atua como um curto em RF



Trecho de linha de microfita

- alta impedância
- comprimento $l = \lambda/4$
- Apresenta alta impedância Z_S no ponto de conexão o circuito de micro-ondas

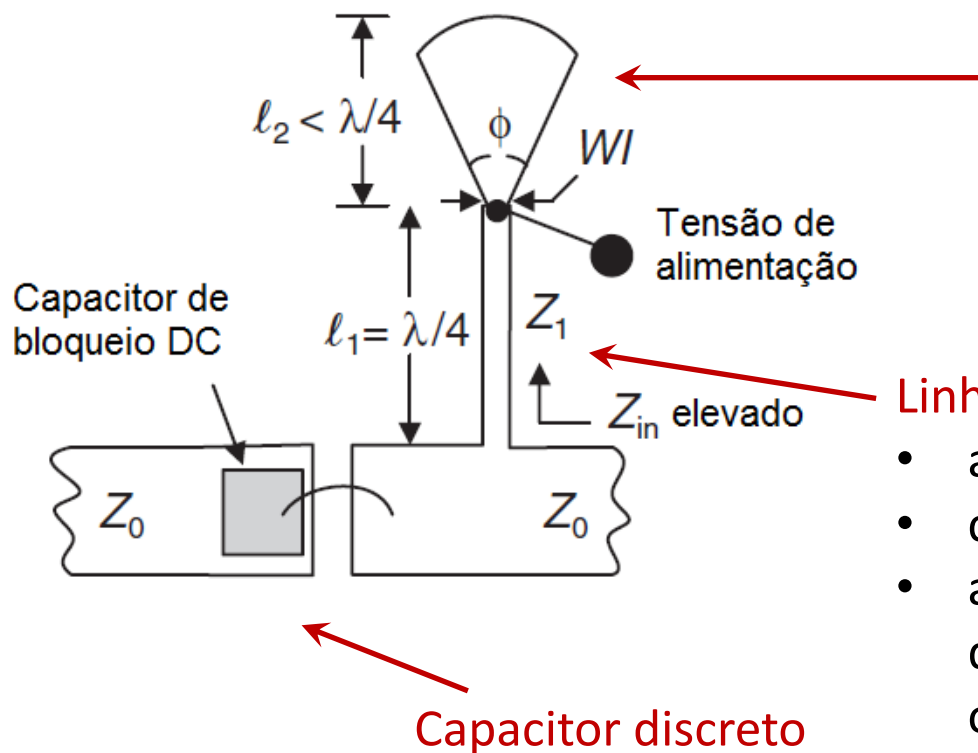
Capacitor interdigital

- Reatância $X_C \approx 0$ na banda de passagem do amplificador
- Atua como capacitor de bloqueio DC

Filtros de Micro-ondas

Filtros de polarização

- Exemplo de filtro de polarização com linhas de transmissão de microfita



Setor radial em aberto

- baixa impedância
- comprimento $l = \lambda/4$
- apresenta curto virtual no ponto de conexão da tensão de alimentação

Linha de microfita

- alta impedância
- comprimento $l = \lambda/4$
- apresenta alta impedância no ponto de conexão no circuito de micro-ondas

Capacitor discreto

- Reatância $X_C \approx 0$ na banda de passagem do amplificador
- Atua como capacitor de bloqueio DC