

# Dispositivos de Micro-ondas

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Fatima Salete Correra

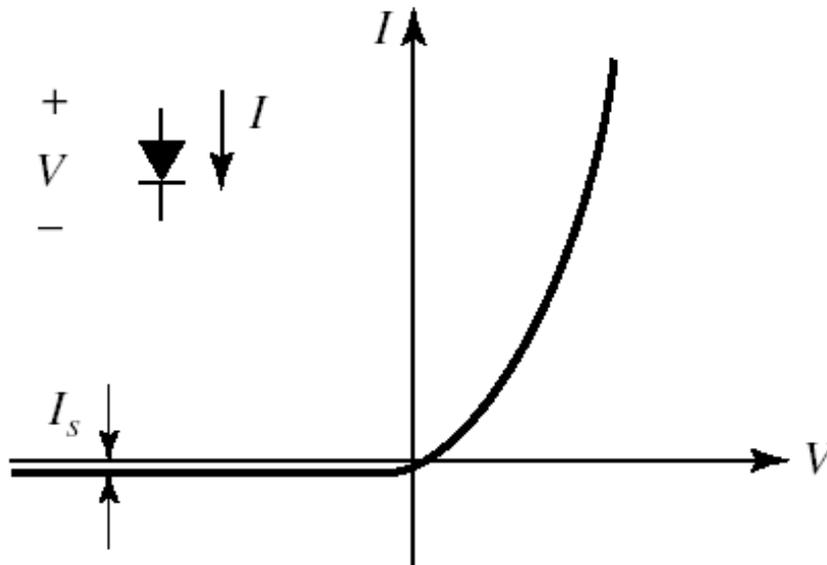
PSI3581 – CIRCUITOS DE MICRO-ONDAS

# Sumário

- Diodos de micro-ondas
  - Diodo Schottky
  - Diodo Varactor
  - Diodo PIN
  - Diodo Gunn
- Transistores de micro-ondas
  - Tipos de transistores
  - Transistores bipolares
  - Transistores de efeito de campo
  - Comparação de desempenho dos transistores de micro-ondas
  - Parâmetros de transistores de micro-ondas

# Diodos de Micro-ondas

- Diodos retificadores
  - Dispositivos semicondutores
  - Dois terminais
  - Característica I x V não-linear



Polarização reversa  $V < 0$

$$I = I_s$$

Polarização direta  $V \geq 0$

$$I = I_s \cdot (e^{\alpha V} - 1)$$

$$\alpha = q/(nkT)$$

$q$  → carga do elétron

$k$  → constante de Boltzmann

$T$  → temperatura em Kelvin

$n$  → fator de idealidade

Fig. 10.21, Microwave Engineering, 3ª ed., D. M. Pozar

# Diodos de Micro-ondas

- Diodos retificadores – Diodo Schottky
  - Retificação em baixas frequências → **Diodo P/N**
    - Junção **Semicondutor Tipo P** / **Semicondutor Tipo N**
    - Capacitância de junção elevada
      - Limita a frequência de operação

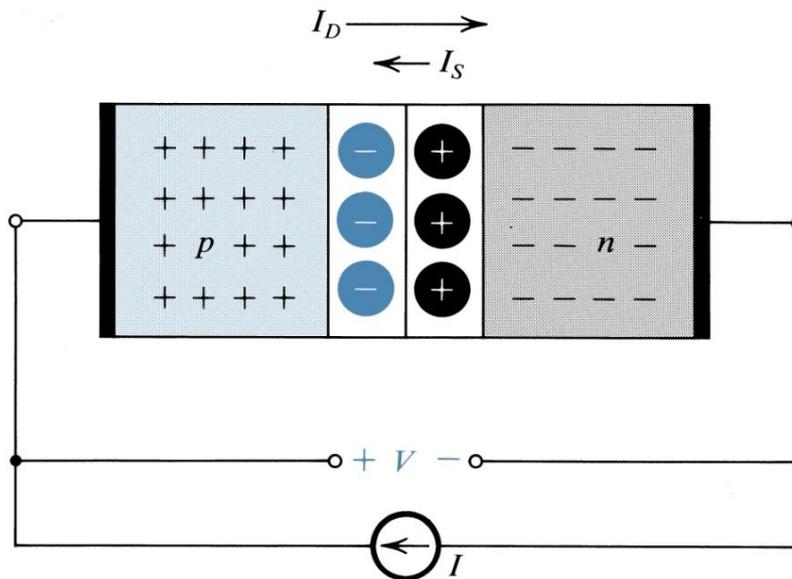
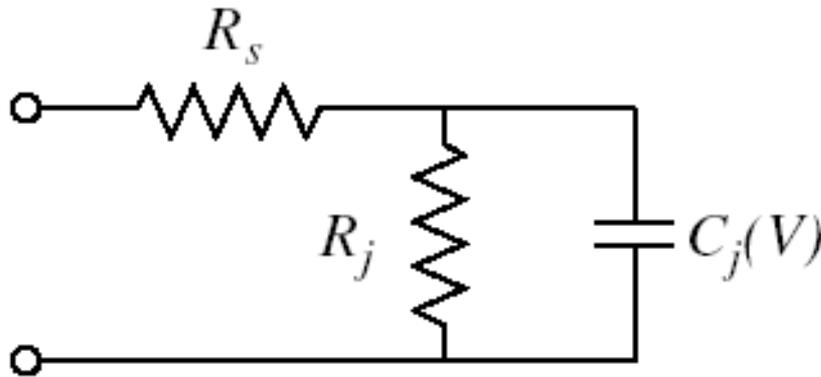


Fig. 3.16, Microeletrônica,  
Sedra-Smith

# Diodos de Micro-ondas

- Modelo equivalente do diodo retificador



Modelo equivalente do diodo

Fig. 10.32 Microwave Engineering, 3ª ed., D. M. Pozar

$R_s \rightarrow$  resistência série  
(contatos e corpo do diodo)

$R_j \rightarrow$  resistência da junção  
não linear  
elemento retificador

$C_j \rightarrow$  capacitância da junção

Reatância da junção

$$X_{C_j} = \frac{1}{\omega \cdot C_j} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C_j} \quad \longrightarrow$$

Para **f elevada**, tal que  $X_{C_j} \rightarrow 0$ ,

$R_j$  “curto-circuitada” por  $C_j$

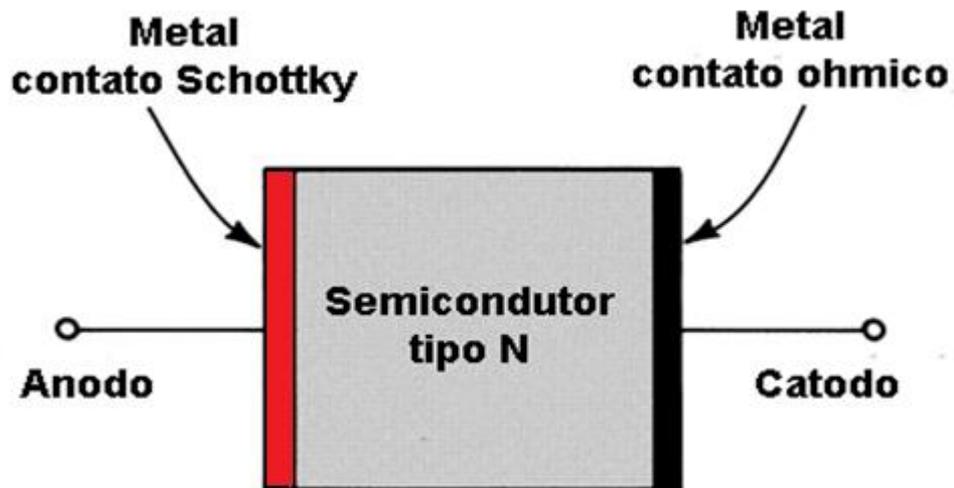
Diodo não atua como retificador!

# Diodos de Micro-ondas

- Diodos retificadores

- Micro-ondas → **Diodo Schottky**

- Junção **Metal / Semicondutor tipo N**
- Capacitância de junção menor que a do diodo PN
- Frequência de operação mais elevada que a do diodo PN



- Semicondutor

- Silício – Si
- Arseneto de gálio – GaAs

- Exemplo

- Semicondutor → GaAs
- Contato Schottky → Alumínio
- Contato ôhmico → Liga Au/Ge

# Diodos de Micro-ondas

- Aplicações do diodo Schottky
  - Retificação de sinais
    - Conversão RF  $\rightarrow$  DC

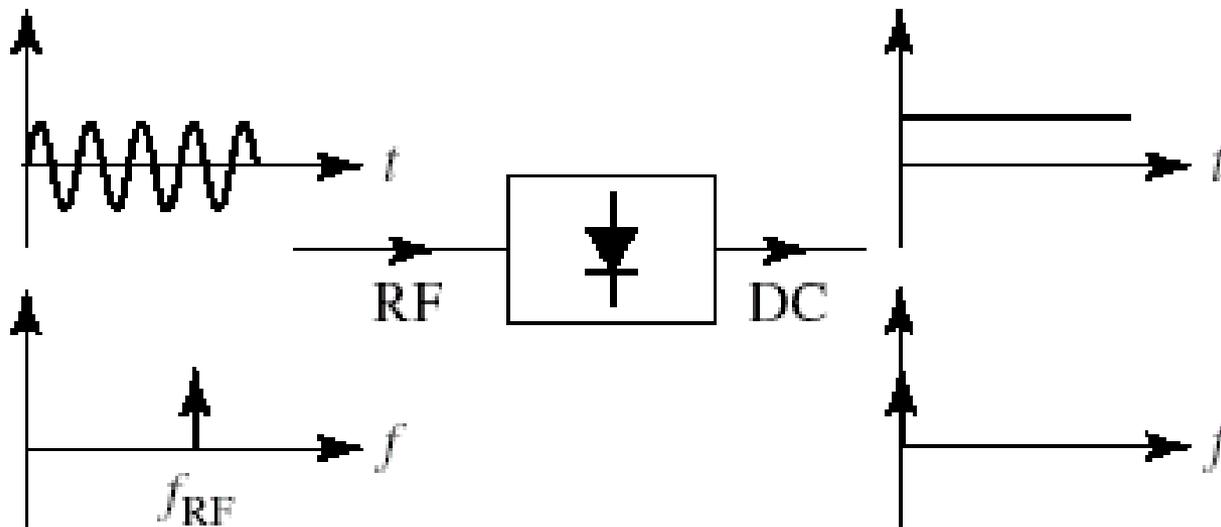


Fig. 10.20 (a)

Microwave Engineering, 3ª ed., D. M. Pozar

# Diodos de Micro-ondas

- Aplicações do diodo Schottky
  - Detecção
    - Demodulação de amplitude

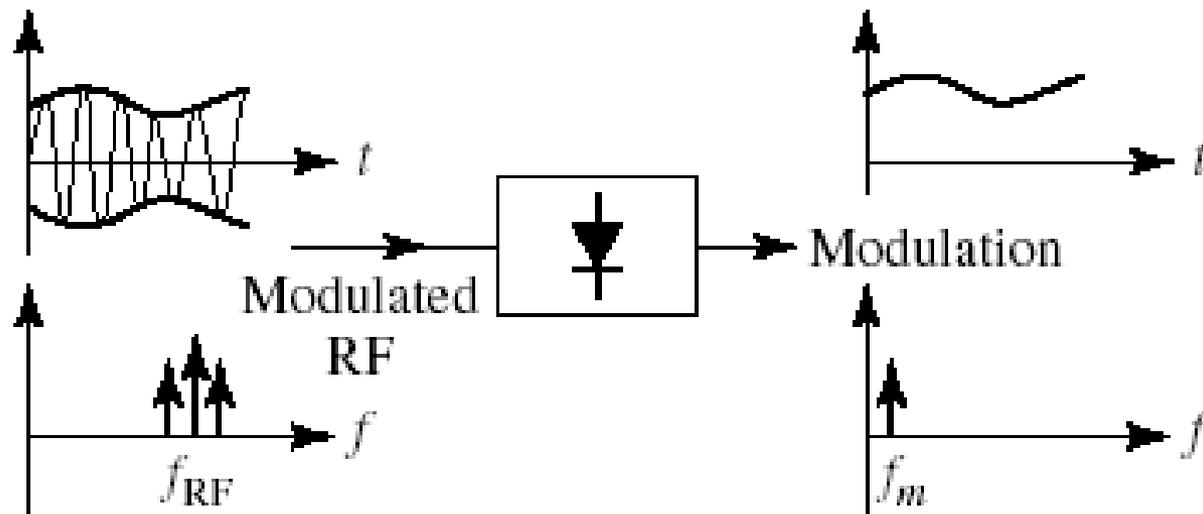
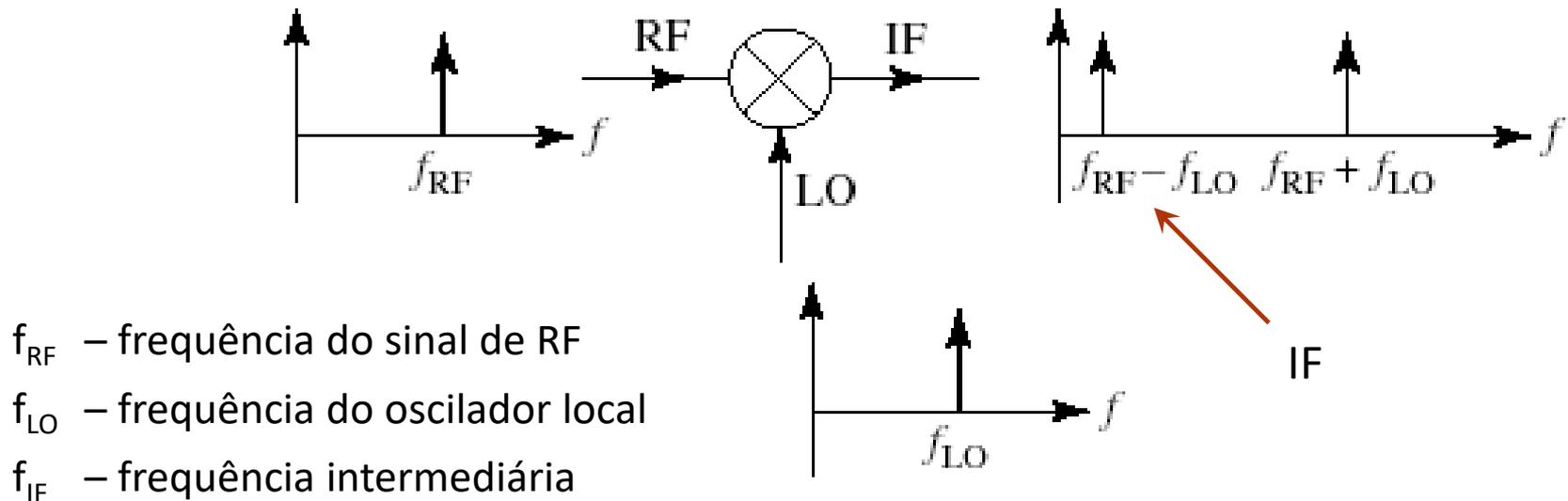


Fig. 10.20 (b)

Microwave Engineering, 3ª ed., D. M. Pozar

# Diodos de Micro-ondas

- Aplicações do diodo Schottky
  - Conversão de frequências (*mixing*)
    - Deslocamento de frequências



$f_{RF}$  – frequência do sinal de RF  
 $f_{LO}$  – frequência do oscilador local  
 $f_{IF}$  – frequência intermediária

Fig. 10.20 (c)

Microwave Engineering, 3ª ed., D. M. Pozar

# Diodos de Micro-ondas

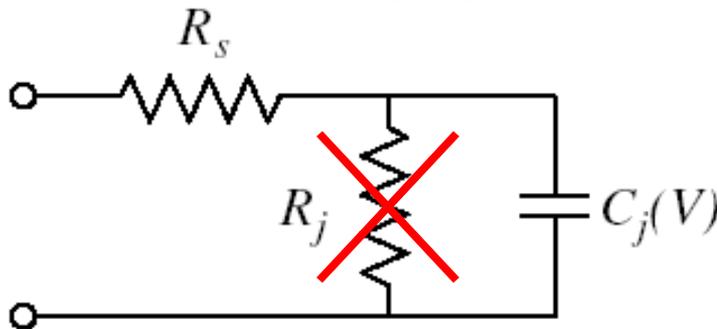
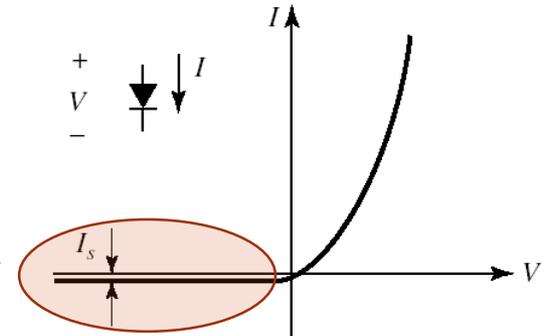
- **Diodo Varactor**

- Diodo PN

- **Polarizado reversamente**

- Resistência de junção  $R_j \rightarrow \infty$

- Capacitância de junção: varia com a tensão reversa de polarização  $V_r$



Modelo equivalente do varactor

Fig. 10.32 Microwave Engineering, 3ª ed., D. M. Pozar

$$C_j(V_r) = C_0 / \left( 1 + \frac{V_r}{\phi} \right)^\gamma$$

- Semicondutor

- Silício – Si

- Arseneto de Gálio – GaAs

- Exemplo

- Semicondutor → GaAs

- Contato ôhmico → Liga Au/Ge

# Diodos de Micro-ondas

- Diodo Varactor

- Capacitância de junção reversamente polarizada

$$C_j(V_r) = \frac{C_0}{\left(1 + \frac{V_r}{\phi}\right)^\gamma}$$

- $C_0$  → Capacitância da junção polarizada com  $V = 0$  V  
Constante que depende tecnologia de fabricação e área do capacitor
- $\phi$  → Constante, depende dos materiais que compõem o diodo
- $\gamma$  → Constante, depende do perfil de dopagem da junção - varia de 1/3 a 5
- $V_r$  → Tensão reversa aplicada ao varactor

# Diodos de Micro-ondas

- Diodo Varactor

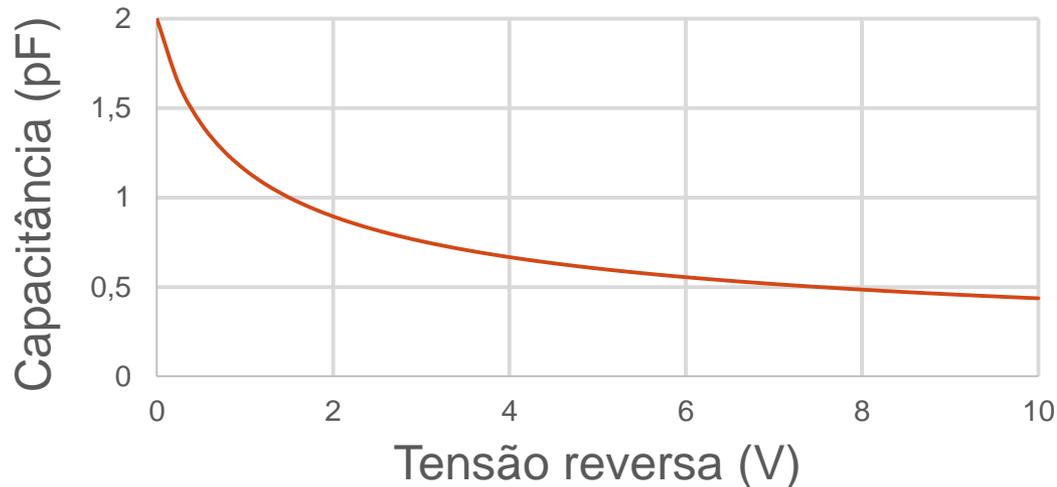
- Exemplo típico

- $\gamma = \frac{1}{2}$ ,
- $C_0 = 2 \text{ pF}$
- $\phi = 0,5 \text{ V}$

$$C_j(V_r) = \frac{2}{\sqrt{1 + \frac{V_r}{0,5}}}$$

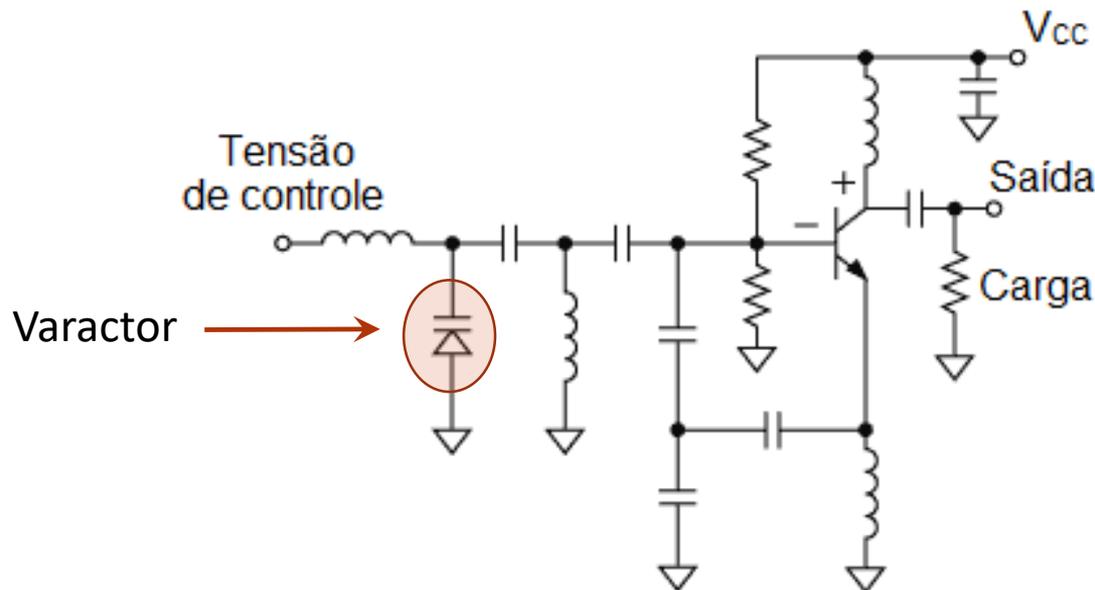


Capacitância vs. Tensão



# Diodos de Micro-ondas

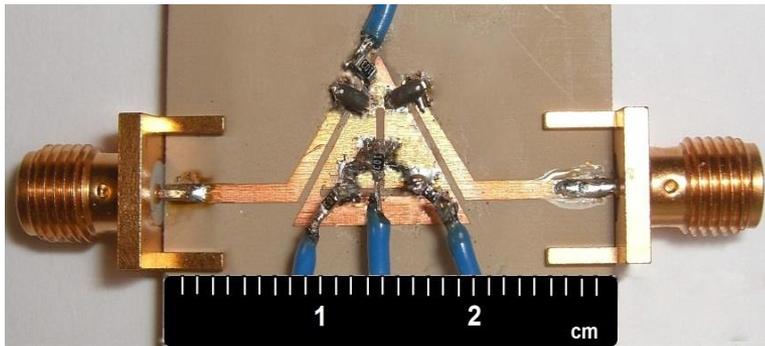
- Aplicações do diodo Varactor
  - Osciladores controlados por tensão - VCO
    - Varactor faz parte do circuito ressonante



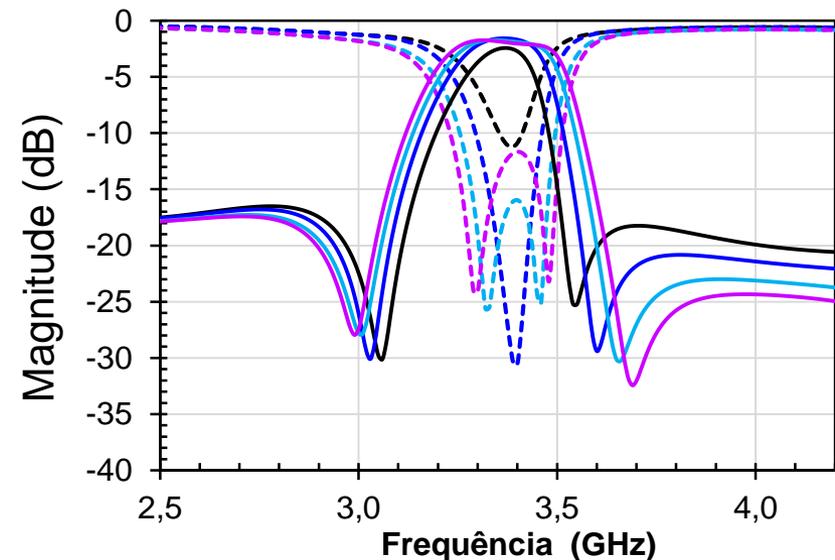
- Variando-se a tensão reversa do varactor  $V_r$ 
  - Varia-se a capacitância do varactor  $C_j(V_r)$
  - Varia-se a frequência de oscilação

# Diodos de Micro-ondas

- Aplicações do diodo Varactor
  - Sintonização eletrônica de filtros
    - Varactor é parte de ressoadores do filtro
    - Variando-se a tensão reversa do varactor  $V_r$ 
      - Varia-se a capacitância do varactor  $C_j(V_r)$
      - Ajusta-se a faixa de passagem, frequência central e/ou seletividade



Filtro *patch* triangular sintonizável



# Diodos de Micro-ondas

- Aplicações do diodo Varactor

- Multiplicadores de frequência

- Usam a não-linearidade da capacitância de junção
- Geração de harmônicas do sinal de entrada
- Entrada  $\rightarrow f_0$  – Saída  $\rightarrow n \cdot f_0$

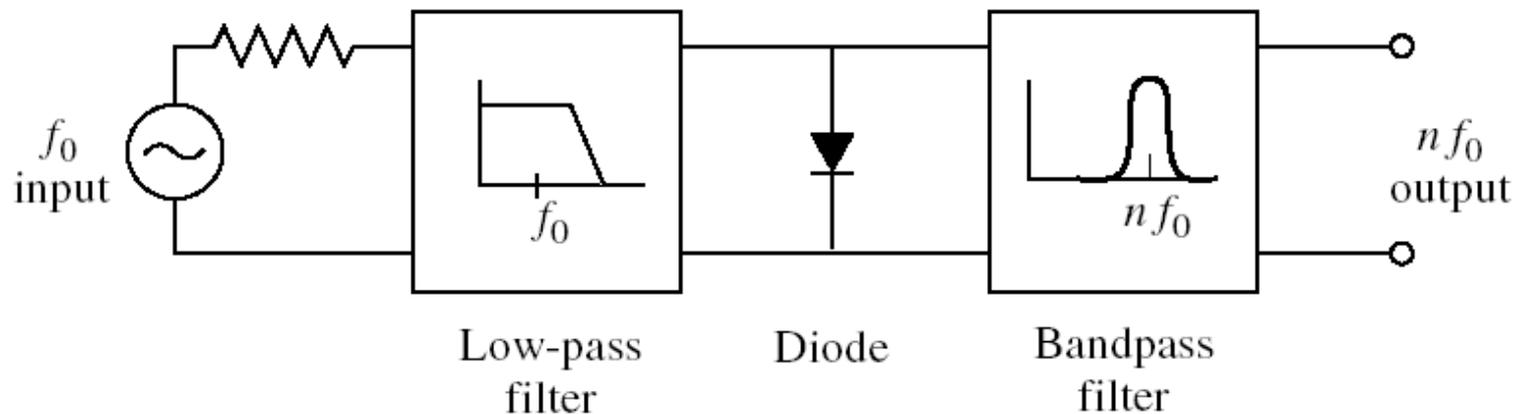


Diagrama de blocos de um multiplicador de frequência a diodo

Fig. 12.20 (c) Microwave Engineering, 3ª ed., D. M. Pozar

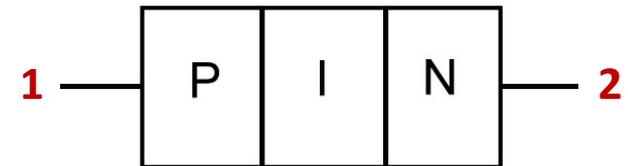
# Diodos de Micro-ondas

- **Diodo PIN**

- Diodo de junção de três tipos de semicondutor

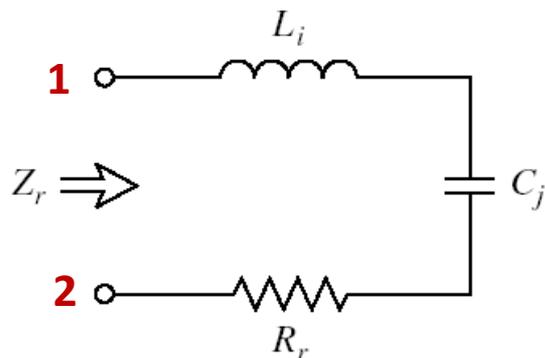
- **Tipo P / Intrínseco / Tipo N**

- Característica  $I \times V \rightarrow$  boa chave de RF



- **Polarização reversa**

- Região “tipo I” sem cargas
- Baixa capacitância de junção série
- Alta impedância  $\rightarrow$  **circuito aberto**



- **Polarização direta**

- Injeção de cargas na região “tipo I”
- Capacitância série é removida
- Baixa impedância  $\rightarrow$  **curto-circuito**

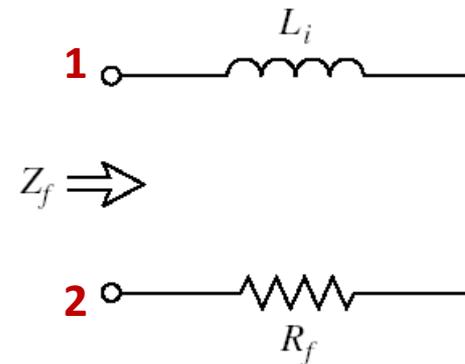
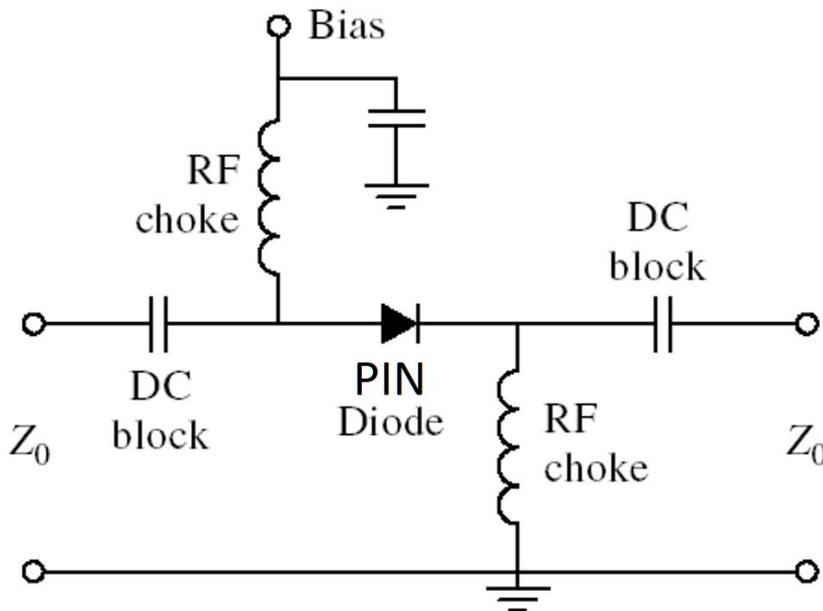


Fig. 12.25 Microwave Engineering, 3ª ed., D. M. Pozar

# Diodos de Micro-ondas

- Exemplos de aplicação do diodo PIN
  - Chave de RF com diodo PIN em série



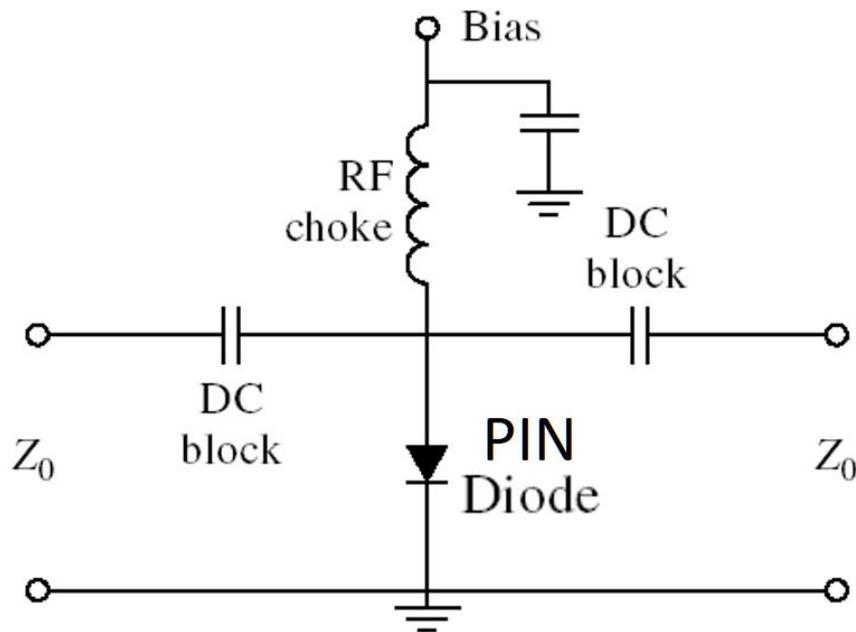
## Polarização do diodo PIN

- Reversa
  - diodo com alta impedância
  - chave aberta
- Direta
  - diodo com baixa impedância
  - chave fechada

Fig. 12.26 Microwave Engineering, 3ª ed., D. M. Pozar

# Diodos de Micro-ondas

- Exemplos de aplicação do diodo PIN
  - Chave de RF com diodo PIN em paralelo



## Polarização do diodo PIN

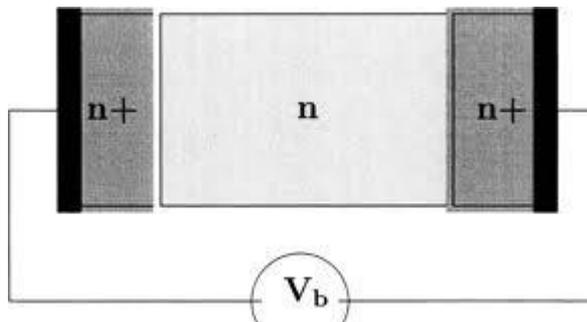
- Reversa
  - diodo com alta impedância
  - chave fechada
- Direta
  - diodo com baixa impedância
  - chave aberta

Fig. 12.26 Microwave Engineering, 3ª ed., D. M. Pozar

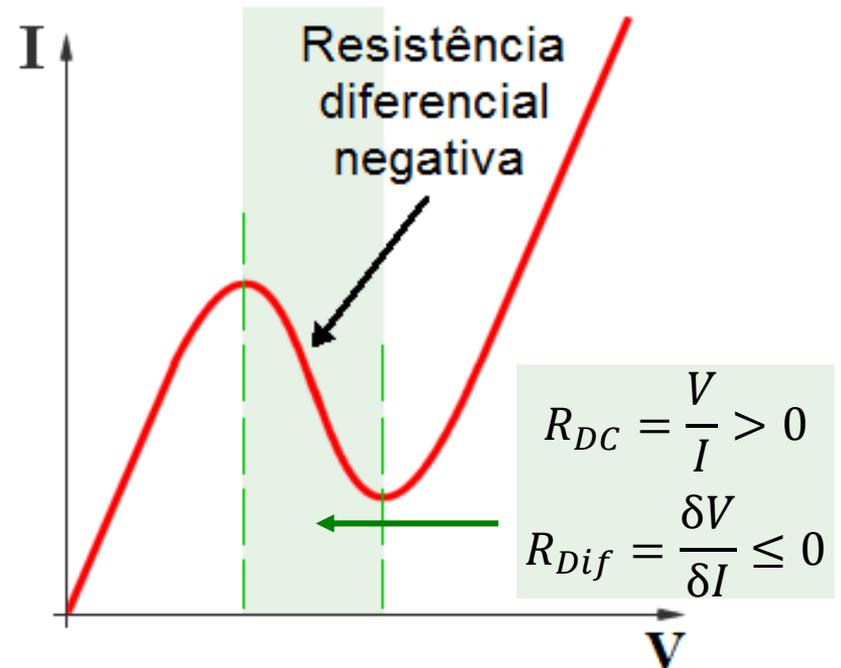
# Diodos de Micro-ondas

- **Diodo Gunn**

- Barra de arseneto de gálio ou fosfeto de índio tipo N
- Contatos ôhmicos nas duas extremidades
- Curva  $I \times V \rightarrow$  resistência diferencial negativa
  - “Efeito Gunn” ou “Efeito de Transferência de Elétrons”
  - Descoberto por J. B. Gunn, em 1963



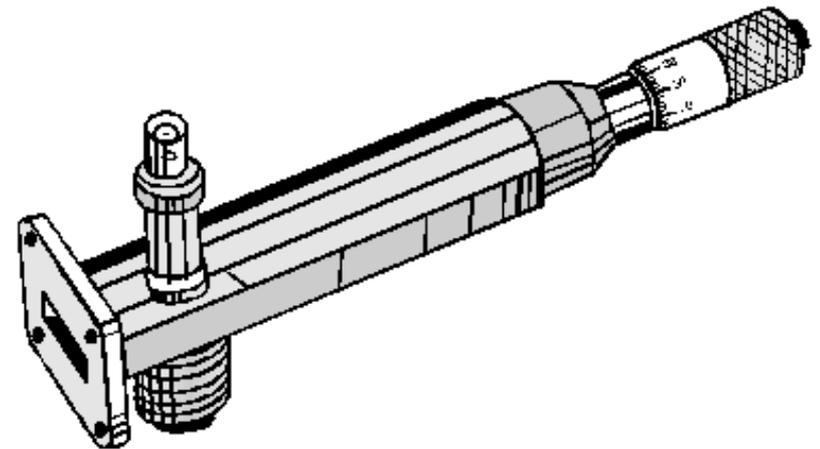
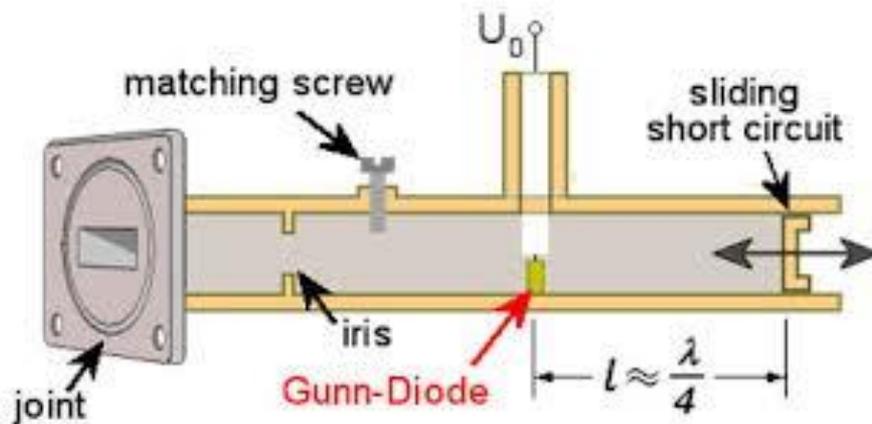
Diodo Gunn encapsulado



# Diodos de Micro-ondas

- Aplicações do diodo Gunn

- Osciladores a resistência negativa
  - Diodo Gunn acoplado a cavidade ressonante de alto Q
  - Geração de sinais de micro-ondas
  - Várias centenas de mW, de 1 a 100 GHz, com eficiência de 5 a 15%
  - Baixo custo → radares de trânsito, detectores de movimento



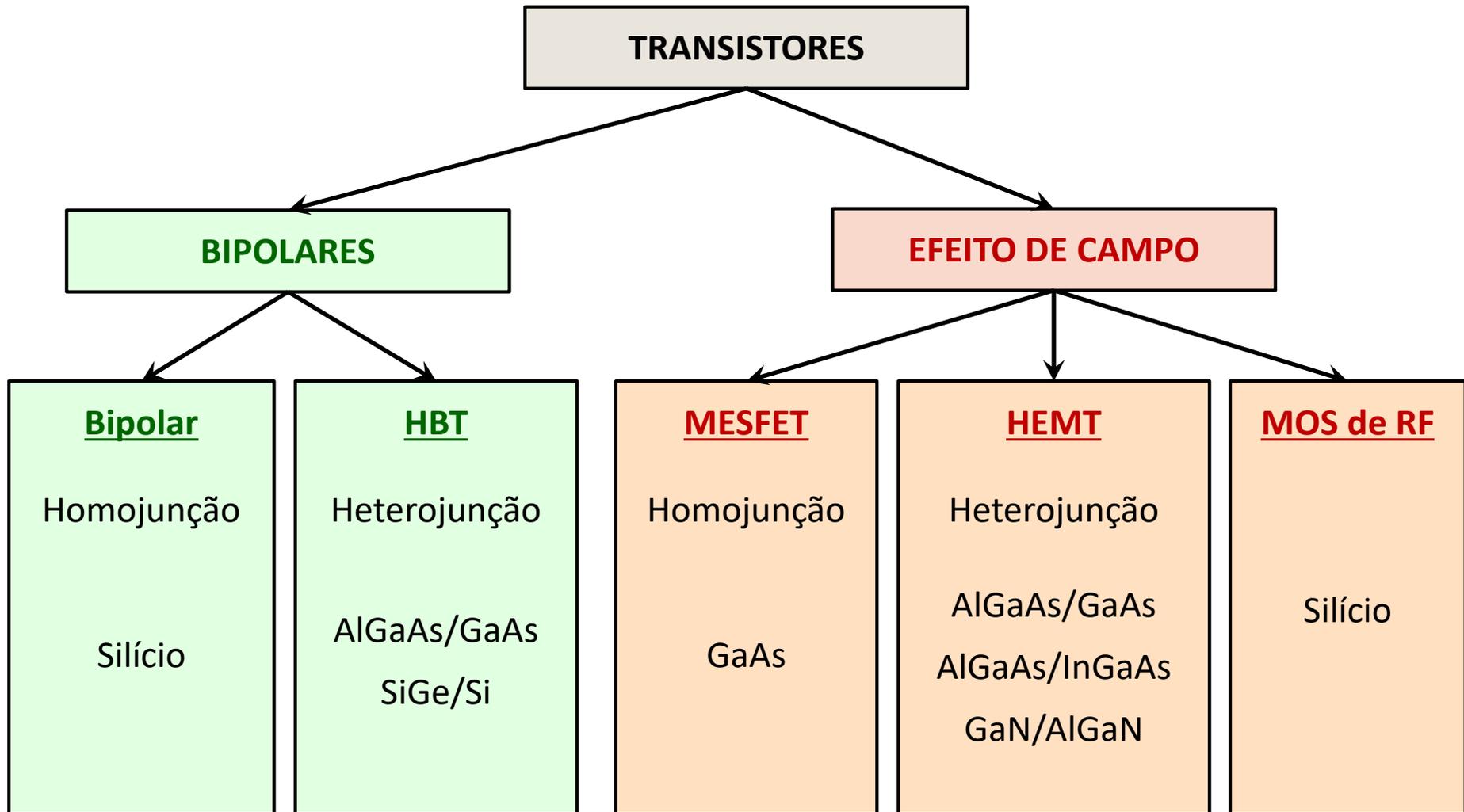
Oscilador a diodo Gunn

# Tipos de Transistores de Micro-ondas

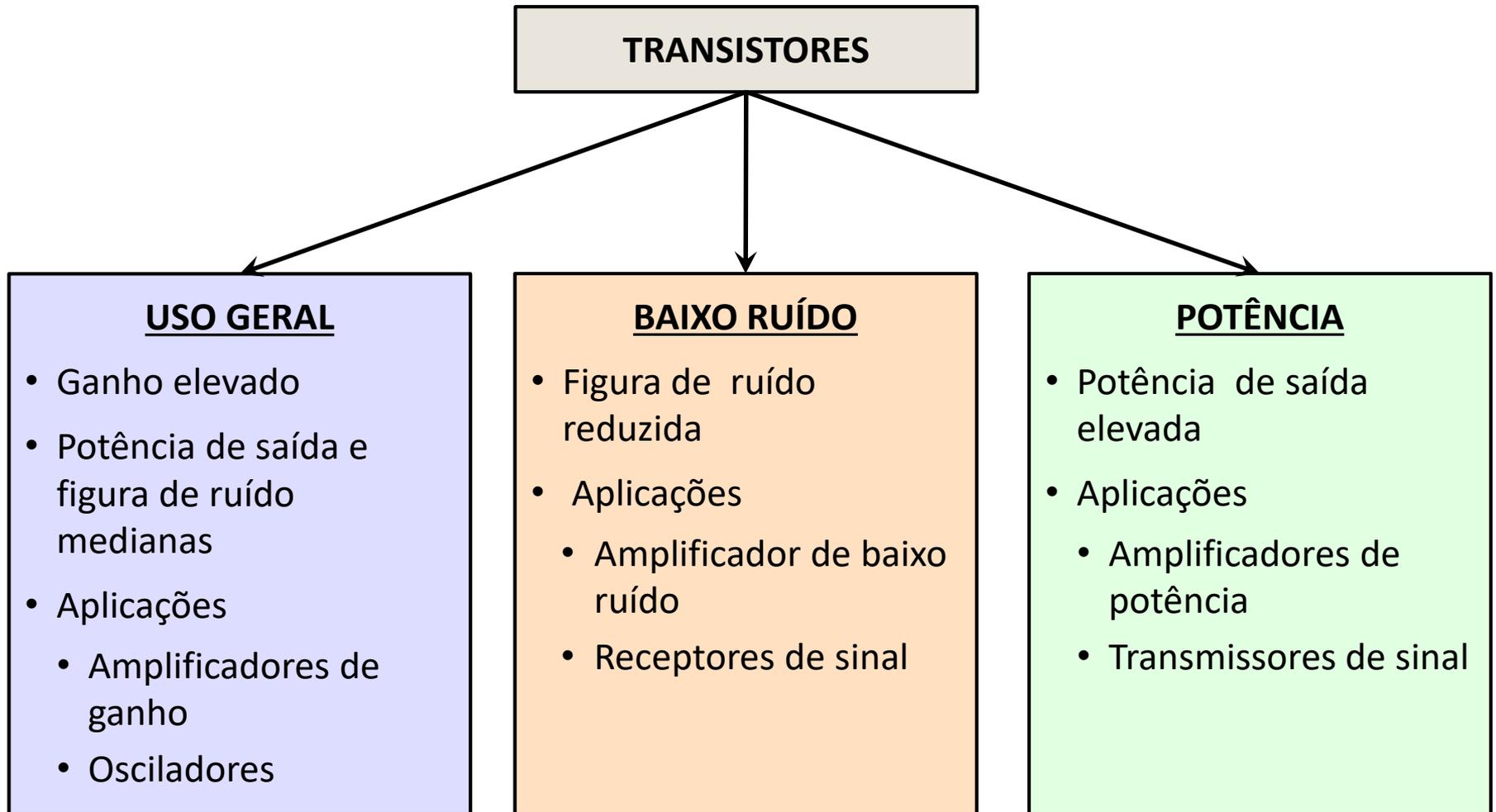
# Introdução

- **Transistores de micro-ondas**
  - Dispositivos semicondutores,
  - de três terminais,
  - que apresentam ganho,
  - na faixa de frequências de micro-ondas
- **Aplicações de transistores de micro-ondas**
  - Amplificadores
  - Osciladores
  - Misturadores de frequência
  - Chaves
  - Atenuadores, etc.

# Transistores de Micro-ondas

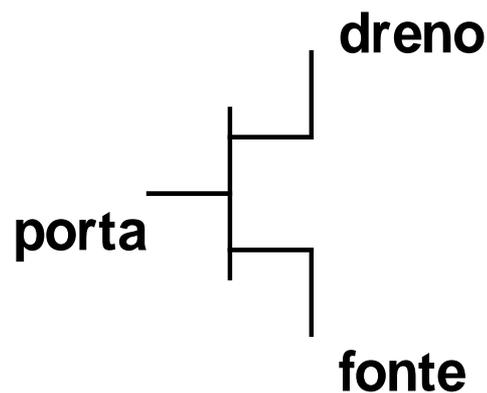


# Classificação Alternativa



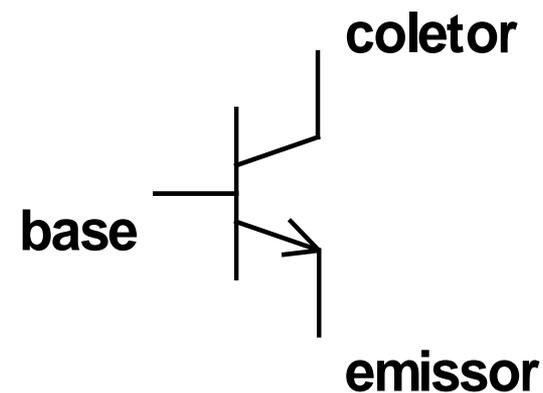
# Símbolos dos Transistores de Micro-ondas

**FET : Transistores de  
efeito de campo**



**MESFET e HEMT**

**Transistores  
bipolares**



**bipolar de Si e HBT**

# Um Pouco de História...

- **Transistor bipolar**
  - Primeiros transistores de micro-ondas
  - Silício, NPN
  - Otimizados para operar em altas frequências
- **MESFET**
  - **ME**tal-**S**emiconductor **F**ield **E**ffect **T**ransistor”
  - Lançamento comercial na década de 70
  - Arseneto de gálio (GaAs)
  - Amplificadores em geral

# Um Pouco de História...

- **HEMT**

- “**H**igh **E**lectron **M**obility **T**ransistor”
- Lançamento comercial em 1985
- Heterojunção: **AlGaAs**/**GaAs**, **AlGaAs**/**InGaAs**
- Amplificadores de baixo ruído

- **HBT**

- “**H**eterojunction **B**ipolar **T**ransistor”
- Lançados comercialmente na década de 90
- Heterojunção de **AlGaAs**/**GaAs**, **SiGe**/**Si**
- Amplificadores de potência de alta linearidade

# Transistores de Micro-ondas

Como maximizar a frequência de operação do transistor?

$$f_T \propto \frac{1}{\tau}$$

- $f_T$  frequência em que o ganho de corrente cai à unidade
- $\tau$  tempo de trânsito do portador de corrente

$$\tau = \frac{d}{v} = \frac{d}{\mu \cdot E}$$

- $d$  distância percorrida pelo portador de corrente
- $v$  velocidade do portador de corrente
- $\mu$  mobilidade do portador de corrente

- **Redução de  $\tau \Rightarrow$  aumento de  $f_T$**
- Uso de portadores de corrente com mobilidade  $\mu$  elevada
- Transistores com percurso dos portadores de corrente  $d$  reduzido

# Transistores de Micro-ondas

Como maximizar a frequência de operação do transistor?

- **Portadores de corrente rápidos**

- Velocidade do portador de corrente  $\rightarrow v = \mu \cdot E$

- $\mu$  – mobilidade     $E$  – campo elétrico

- Portador de corrente rápido  $\rightarrow$  mobilidade  $\mu$  elevada

- Portadores de corrente em semicondutores

- Lacunas e elétrons livres

$$\mu_{(\text{elétron livre})} > \mu_{(\text{lacuna})}$$

- Portador de corrente mais rápido: **elétron livre**

- Transistores de micro-ondas

- Transistores **bipolares NPN**

- Transistores **FET canal N**

# Transistores de Micro-ondas

Como maximizar a frequência de operação do transistor?

- **Materiais semicondutores com mobilidade mais elevada**
  - **GaAs, InP**: compostos dos grupos III A – V A da tabela periódica
    - Maior mobilidade de portadores de corrente do que o Si

## Mobilidade dos elétrons livres ( $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ )

$N_d^*$	$10^{16} \text{ cm}^{-3}$	$10^{17} \text{ cm}^{-3}$	$10^{18} \text{ cm}^{-3}$
Si	1.250	800	230
GaAs	6.550	4.720	2.735

\* dopantes por unidade de volume

# Transistores de Micro-ondas

Como maximizar a frequência de operação do transistor?

- **Redução do percurso do portador de corrente no transistor**

- Reduz o tempo de trânsito  $\tau$  do portador de corrente
- Aumenta a frequência máxima de operação do transistor

$$\tau = \frac{d}{v}$$

- $d$  distância percorrida pelo portador de corrente
- $v$  velocidade do portador de corrente

- **Em transistores de micro-ondas utiliza-se**

- BIPOLAR - Largura da base sub-micrométrica
- FET - Comprimento de porta sub-micrométrico
- Resultando em menores tempos de trânsito

# Transistores de Micro-ondas

Como maximizar a frequência de operação do transistor?

- **Redução de resistências parasitas**
  - Processo otimizado para minimizar
    - resistências de contato
    - resistências série com os acessos do transistor
- **Redução de capacitâncias**
  - Minimização da área do emissor do transistor bipolar
  - Minimização da largura de porta do FET
  - Mas: limita a potência de operação dos dispositivos

# Transistores de Micro-ondas

Como maximizar a frequência de operação do transistor?

- **Evolução tecnológica → novos tipos de transistores**

- Crescimento de camadas semicondutoras
- Usando Molecular Beam Epitaxy - MBE
- Construção de dispositivos com **heteroestruturas** ou **heterojunções**

- **Transistores comerciais com heterojunções**

- **HEMT** – High Electron Mobility Transistor
- **PHEMT** – Pseudomorphic High Electron Mobility Transistor
- **HBT** – Heterostructure Bipolar Transistor

# Transistores de Micro-ondas

- **Heteroestrutura ou heterojunção**
  - Junção de dois semicondutores diferentes
  - Com larguras de banda de energia proibida diferentes
  - Mesmo passo de rede
  - Exemplo: GaAs e AlGaAs
- **Heteroestrutura pseudomórfica**
  - Materiais com passos de rede diferentes, mas próximos
  - Com tensões mecânicas mínimas nas interfaces dos materiais
  - Exemplo: AlGaAs e InGaAs

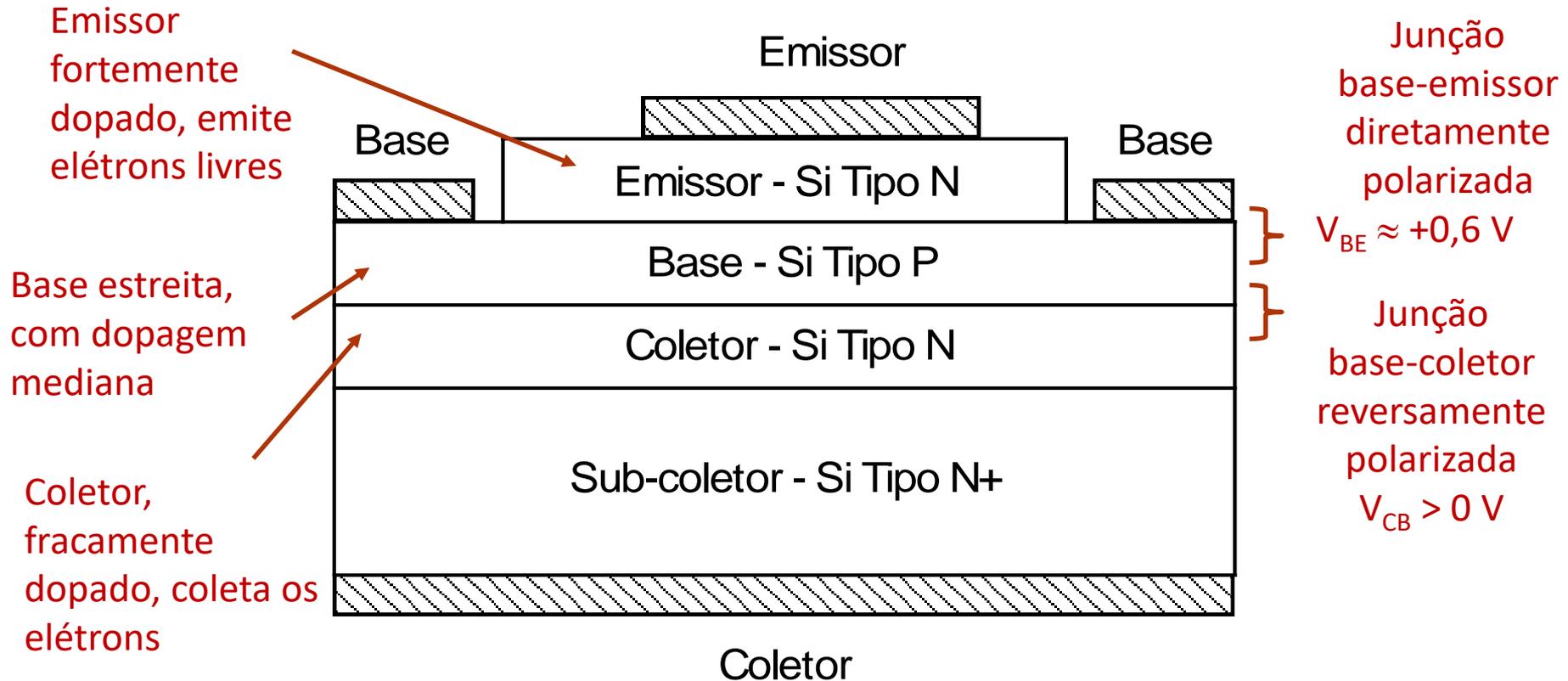
# Transistores Bipolares de Micro-ondas

# Transistor Bipolar de Silício

- Transistor bipolar tipo NPN de silício
- Transistor de micro-ondas mais antigo e popular
- Bom desempenho em termos de faixa de frequência, potência e ruído
- Aplicação
  - Amplificadores na faixa de 2 a 10 GHz
  - Osciladores até 20 GHz
  - Baixo ruído  $1/f$  → osciladores com baixo ruído de fase
- Preferido a FETs na faixa de frequências de 2 a 4 GHz
  - Alto ganho
  - Baixo custo

# Transistor Bipolar de Silício

## Secção transversal do transistor bipolar

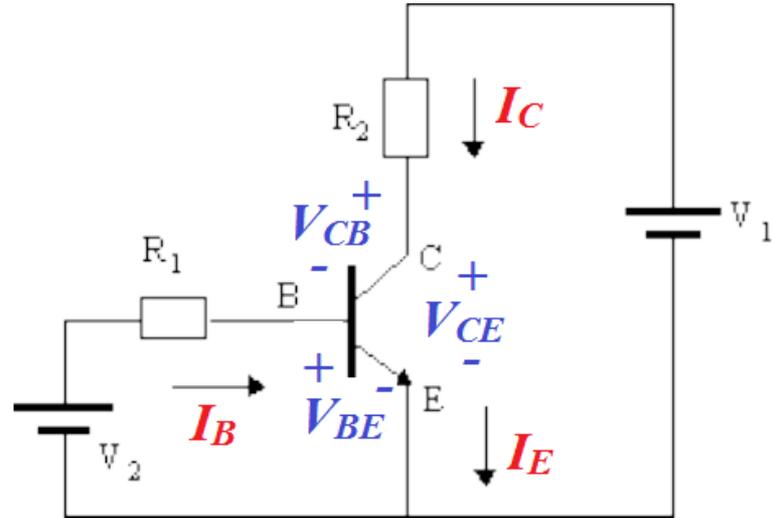


# Transistor Bipolar de Silício

## Polarização do transistor bipolar

$$V_{BE} \approx +0,6 \text{ V} \rightarrow I_B = f_1(V_{BE})$$

$$V_{CE} > 0 \text{ V} \rightarrow I_C = f_2(V_{CE}, I_B)$$



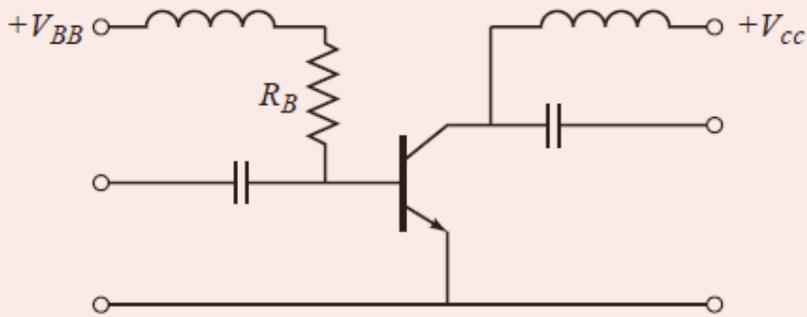
## Operação do transistor bipolar NPN

- Superpondo um pequeno sinal alternado  $v_{be}$  adicionado à tensão base-emissor

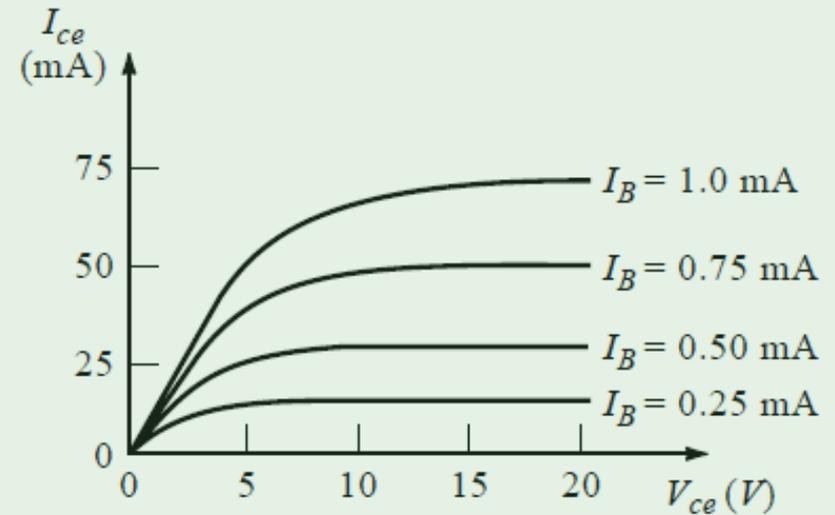
$$v_{BE} = V_{BE} + v_{be} \rightarrow i_B = I_B + i_b \rightarrow i_C = I_C + i_c$$

- Ganho de corrente  $\beta = \frac{i_c}{i_b}$

# Transistor Bipolar de Silício



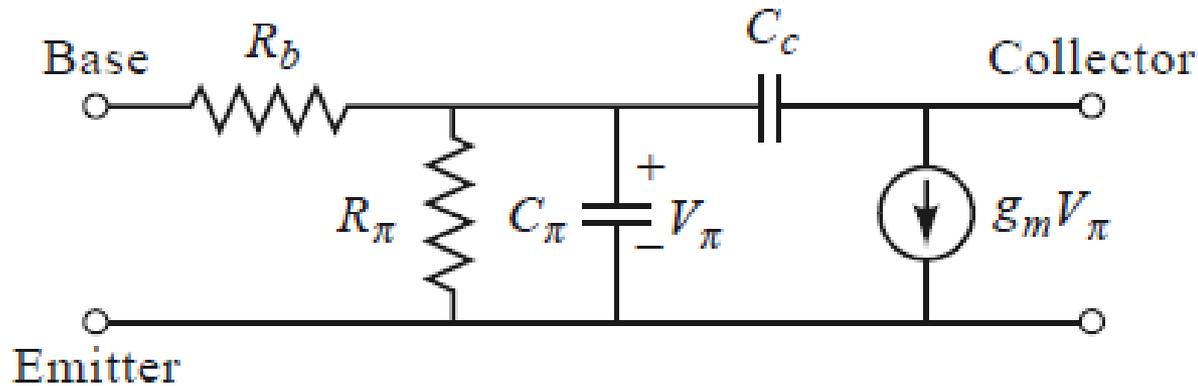
Circuitos de polarização e desacoplamento DC do transistor bipolar NPN



Característica  $I \times V$  em DC

# Transistor Bipolar de Silício

- Circuito equivalente  $\pi$ -híbrido simplificado



$$f_T = \frac{g_m}{2\pi \cdot C_\pi} \quad f_{\max} = \sqrt{\frac{f_T}{8 \cdot \pi \cdot R_b \cdot C_c}}$$

$f_T$  - frequência em que o ganho de corrente cai a 1

$f_{MAX}$  - frequência em que o ganho de potência cai a 1

# Transistor Bipolar de Silício NPN

## Transistor com base estreita

- Reduz  $\tau_{ec}$ , tempo de trânsito dos elétrons entre coletor e emissor
- Mas ocasiona resistência de base elevada  $R_b$

- Aumenta  $f_T$

$$f_T \propto 1/\tau_{ec}$$

- Mas Limita  $f_{max}$

$$f_{max} = \sqrt{\frac{f_T}{8 \cdot \pi \cdot R_b \cdot C_c}}$$

## BJT de micro-ondas de silício

- Tecnologia amadurecida
- Parâmetros físicos otimizados para melhor desempenho em frequência e baixo custo

# HBT - Heterostructure Bipolar Transistor

- Transistor bipolar de heterojunção
  - Transistor bipolar tipo NPN
  - Junção **base-emissor** é uma **heteroestrutura**

Emissor → **Al-GaAs**  
Base → **GaAs**

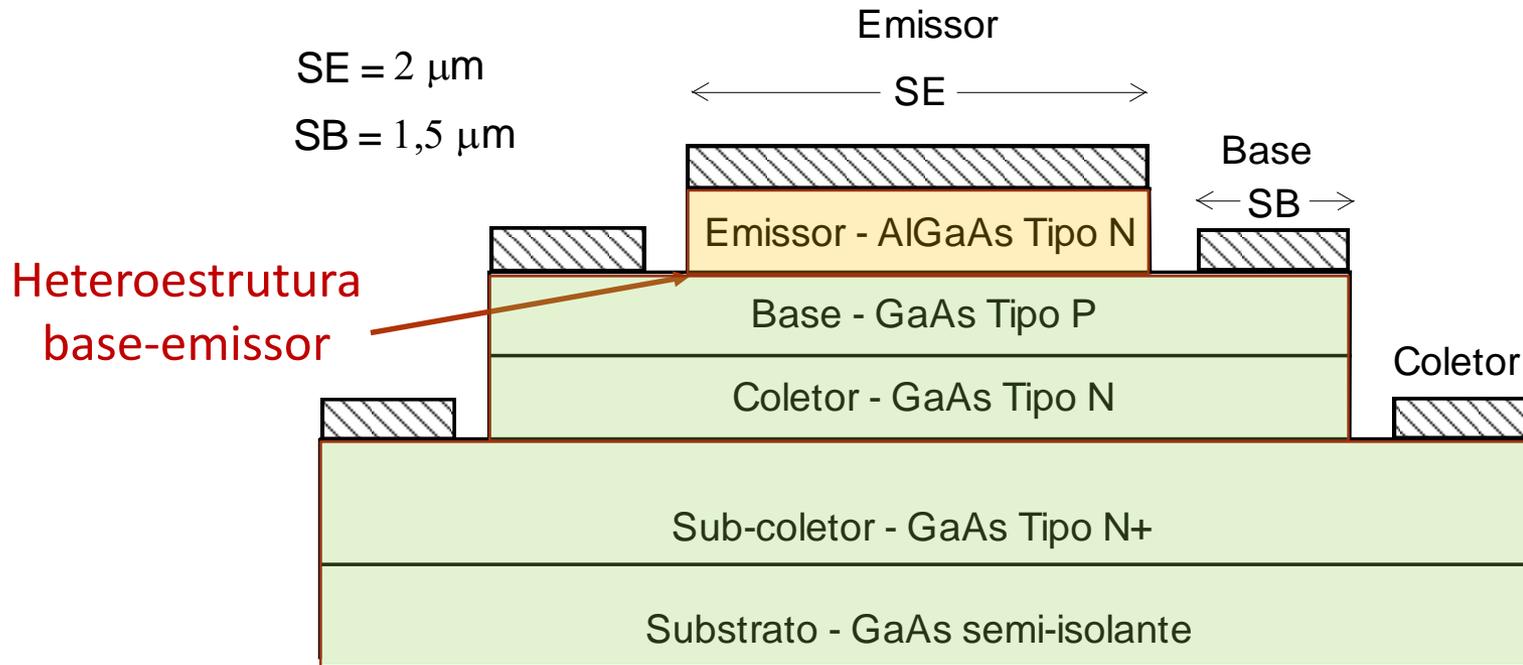
Emissor → **Si-Ge**  
Base → **Si**

Emissor → **GaInAs**  
Base → **InP**

- Características em alta frequência aprimoradas
  - Base estreita, mas altamente dopada → reduz  $R_b$
  - Opera até frequências de 100 GHz e acima
  - HBT de SiGe/Si operando até 60 GHz, com baixo custo
  - Modelo elétrico equivalente
    - O mesmo do transistor bipolar de silício

# HBT - Heterostructure Bipolar Transistor

- Secção transversal HBT



Emissor:	AlGaAs	1.000 Angstroms	$5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
Base:	GaAs	800 Angstroms	$7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
Coletor:	GaAs	7.000 Angstroms	$5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

# HBT X Transistor Bipolar de Silício

- Transistor Bipolar de Silício
  - Largura de emissor  $< 0,5 \mu\text{m}$

$$f_T \text{ e } f_{MAX}: 20 \text{ a } 40 \text{ GHz}$$

$$\beta = 10 \text{ a } 50$$

- HBT
  - Largura de emissor  $1 \text{ a } 3 \text{ mm}$

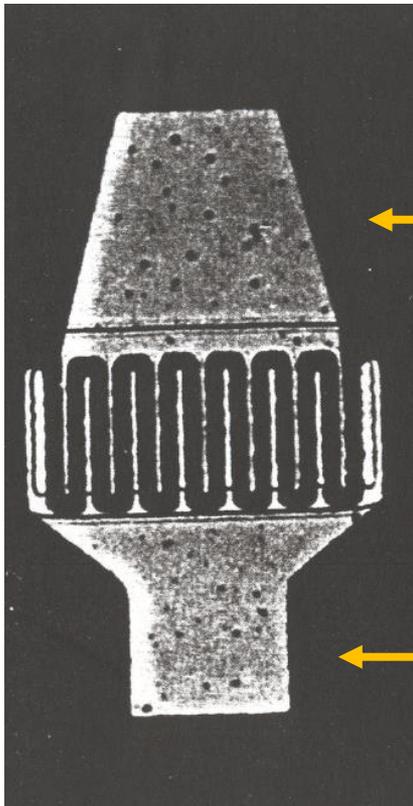
$$f_T \text{ e } f_{MAX}: 100 \text{ a } 200 \text{ GHz}$$

$$\beta = 5 \text{ a } 80$$

$f_t$  frequência em que ganho de corrente cai a 1

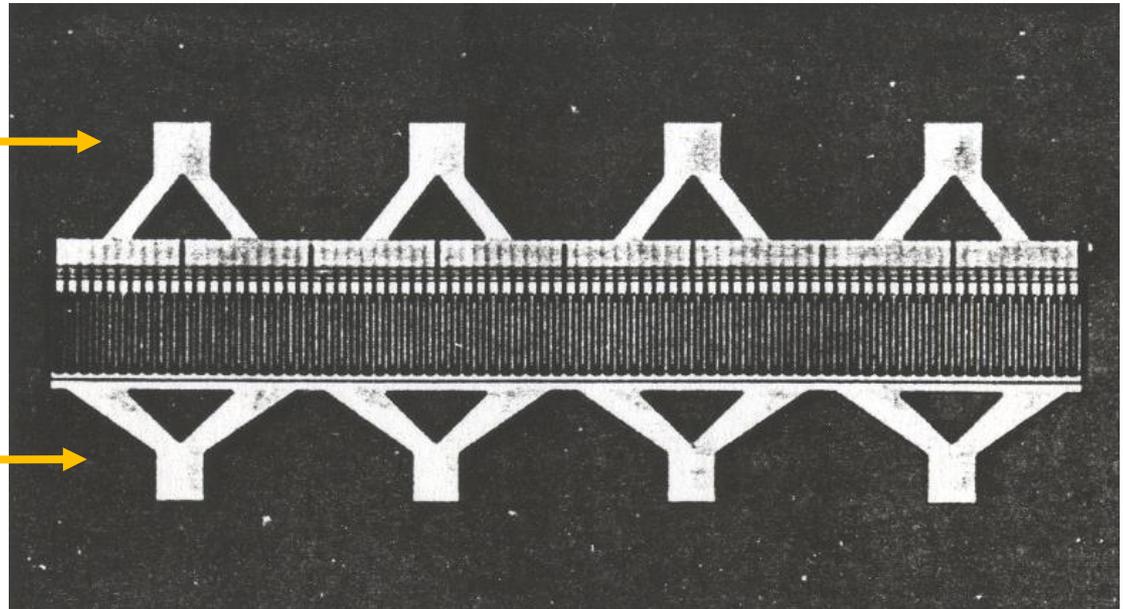
$f_{max}$  frequência em que ganho de potência cai a 1

# Transistor Bipolar de Silício



Contatos de base e de emissor

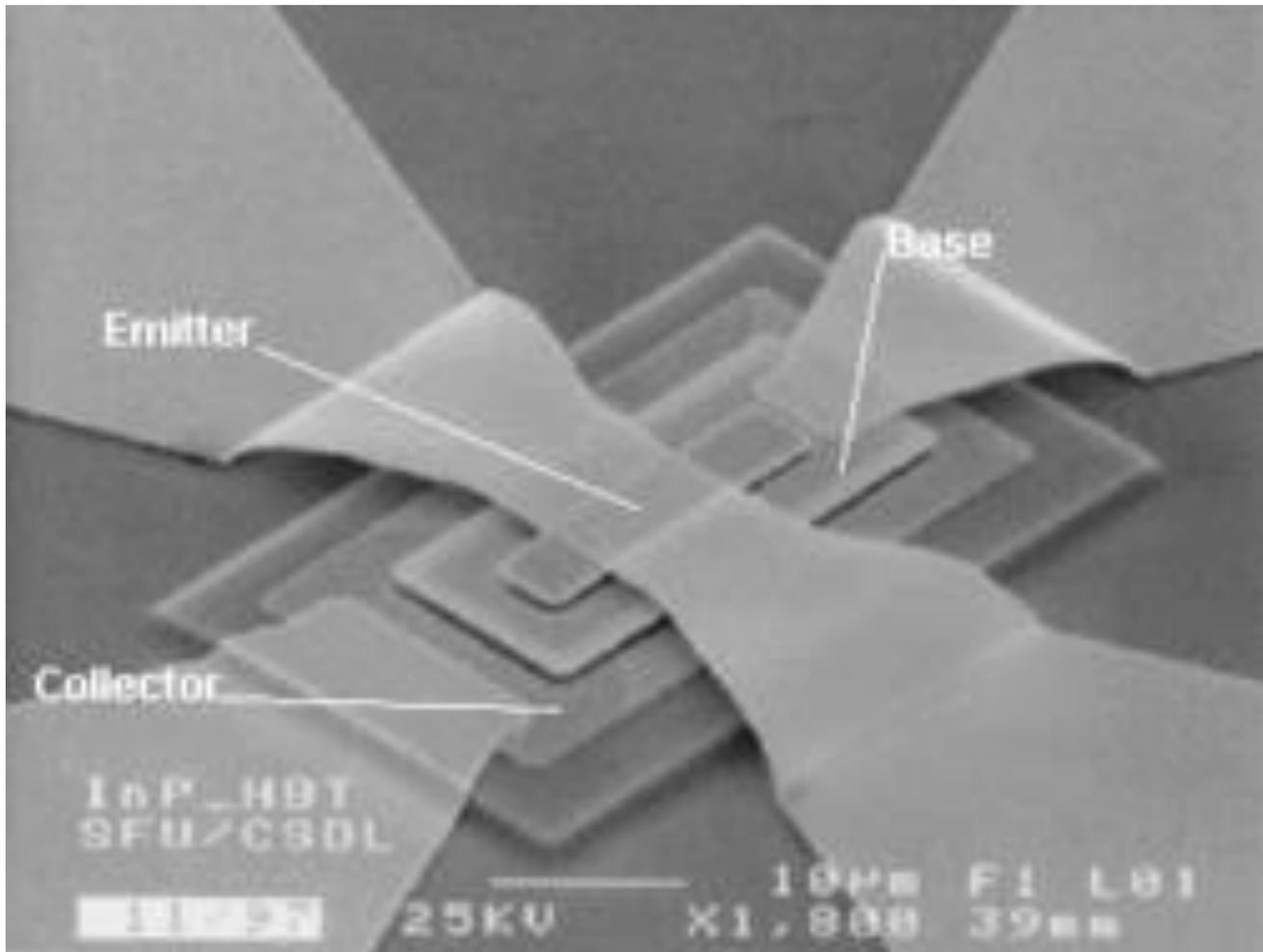
Contato de coletor no verso do chip



Baixo ruído  
largura de emissor: 1 mm

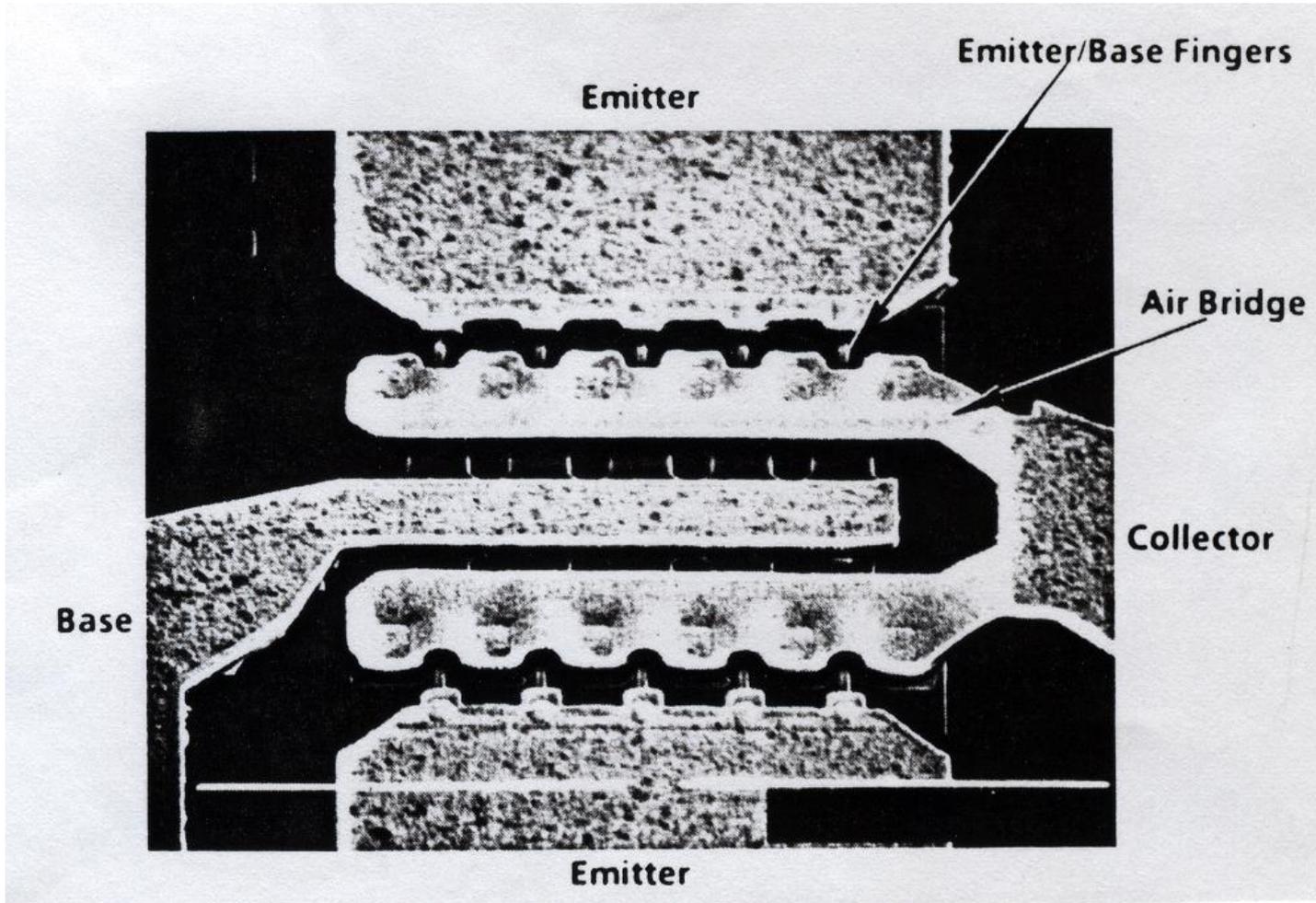
Potência  
5 W em 2 GHz

# HBTs



Emitter  $4 \times 12 \mu\text{m}^2$

# HBTs

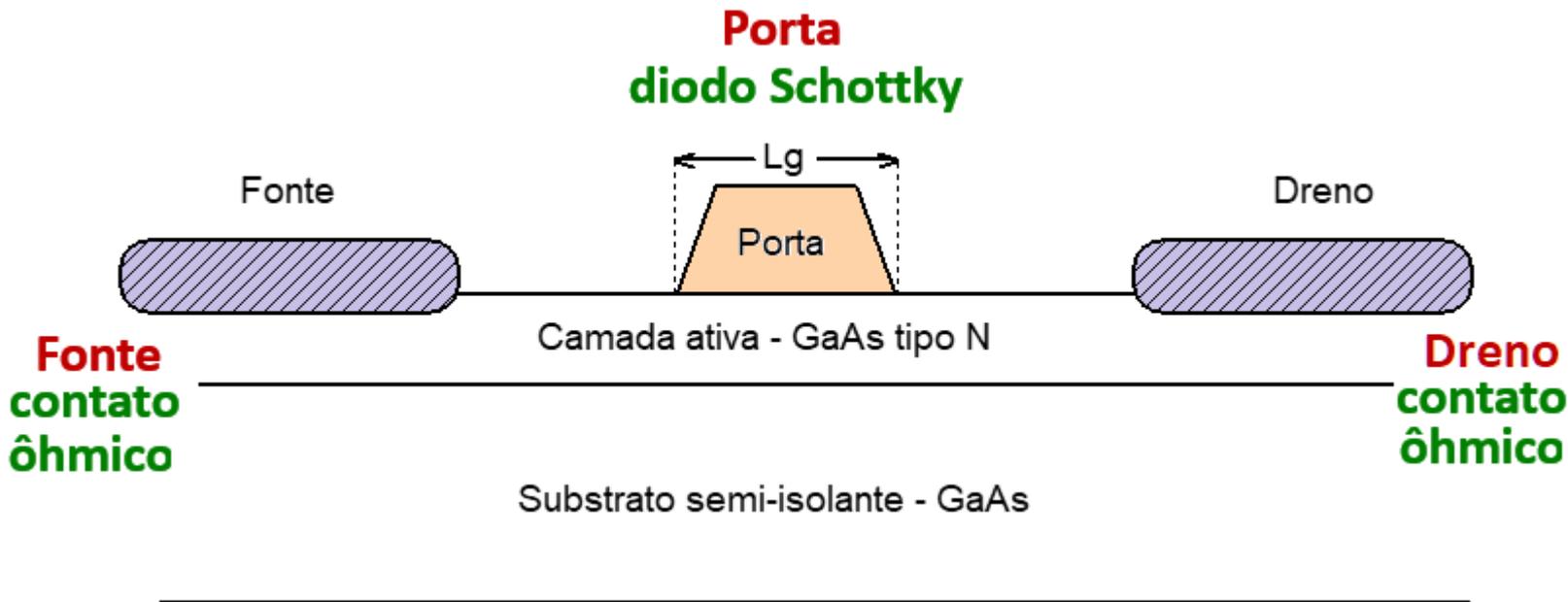


Emissor: 10 dedos de  $2 \times 20 \mu\text{m}^2$

# Transistores de Efeito de Campo de Micro-ondas

# MESFET

## MEtal Semiconductor Field Effect Transistor

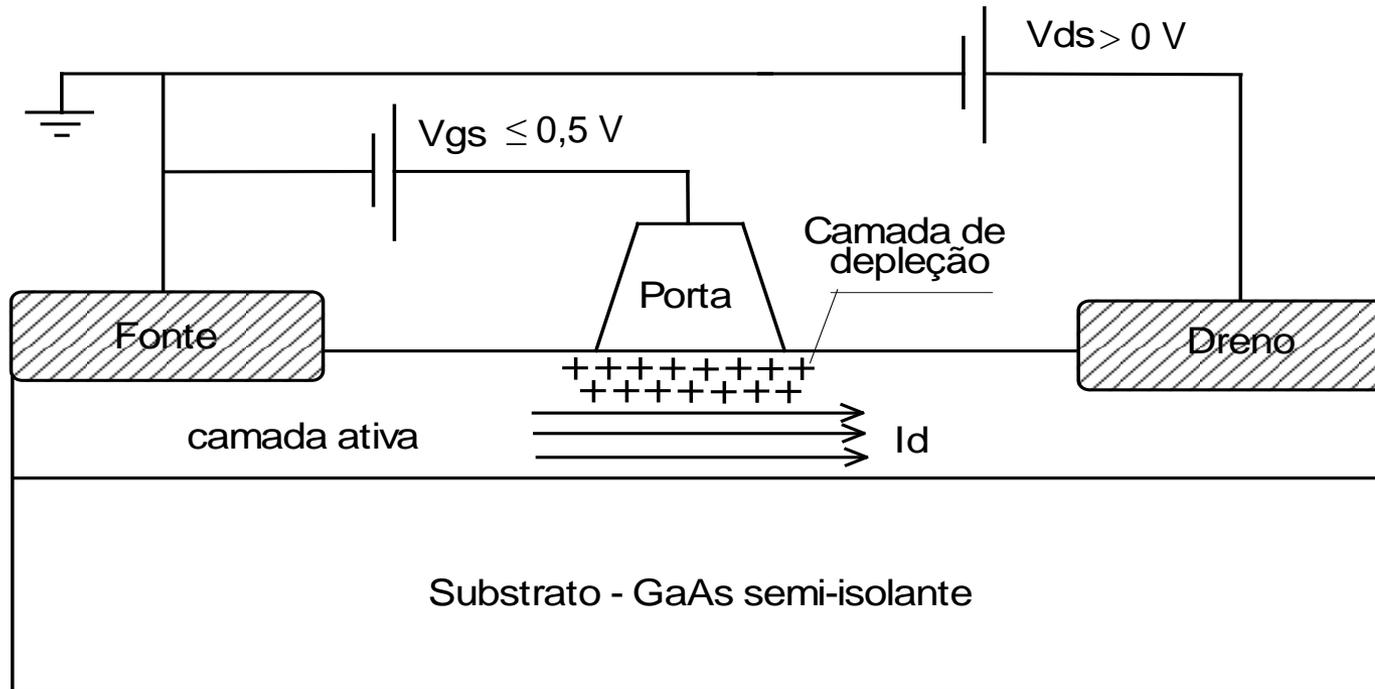


### Secção transversal do MESFET

Comprimento de porta,  $L_g < 1 \mu\text{m}$ , p.e.  $0,25 \mu\text{m}$ ,  $0,5 \mu\text{m}$

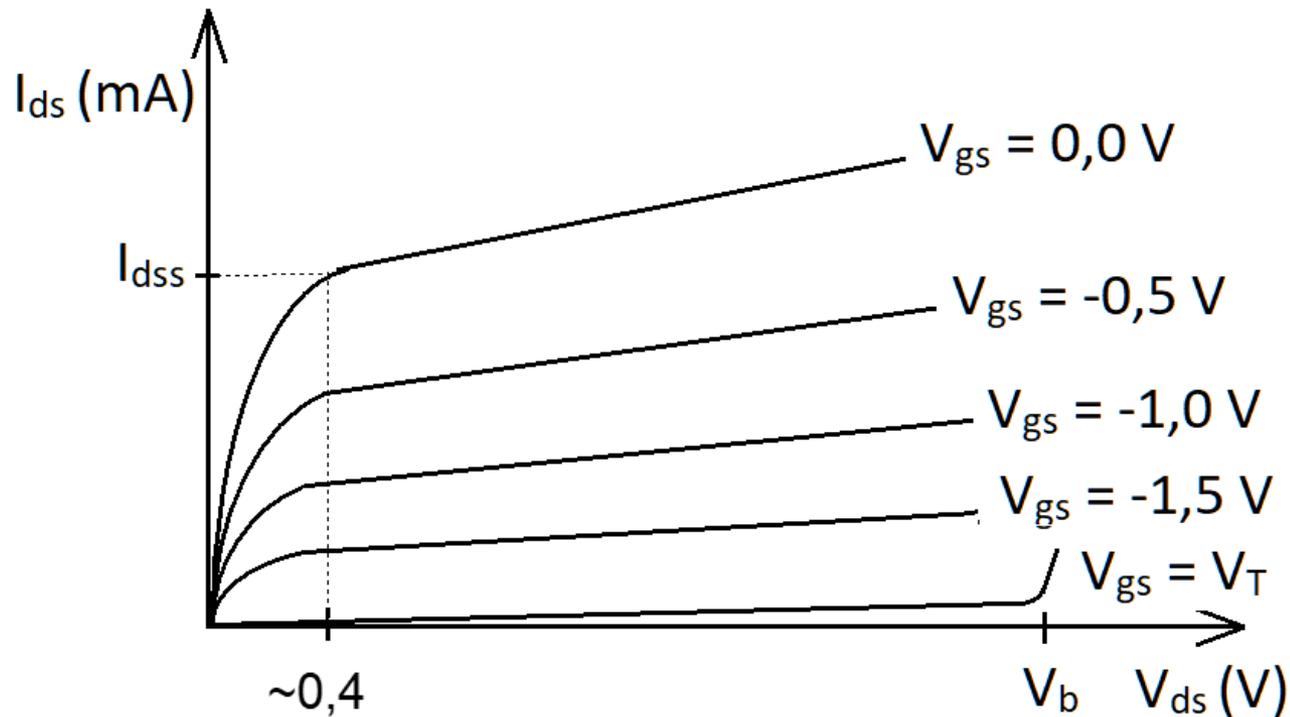
Camada ativa:  $0,15 \mu\text{m}$  de espessura,  
(p.e.)  $3 \cdot 10^{17}$  dopantes/cm<sup>3</sup>

# Princípio de Operação do MESFET



- MESFET - limiar de condução  $\rightarrow V_T < 0$ ,
  - $V_{gs} < V_T$  camada ativa totalmente depletada  $\Rightarrow I_d = 0$
  - $V_{gs} > V_T$  espessura da camada de depleção diminui  $\Rightarrow I_d > 0$
  - $V_T < V_{gs} < 0,5 \text{ V}$  (se  $V_{gs} > 0,5 \text{ V}$ , o diodo de porta conduz!)

# Curva DC $I_{ds}$ versus $V_{ds}$ do MESFET



$I_{dss}$ : corrente dreno-fonte para  $V_{gs} = 0 \text{ V}$

$V_b$ : tensão de ruptura dreno-fonte

# Limites à Operação do MESFET

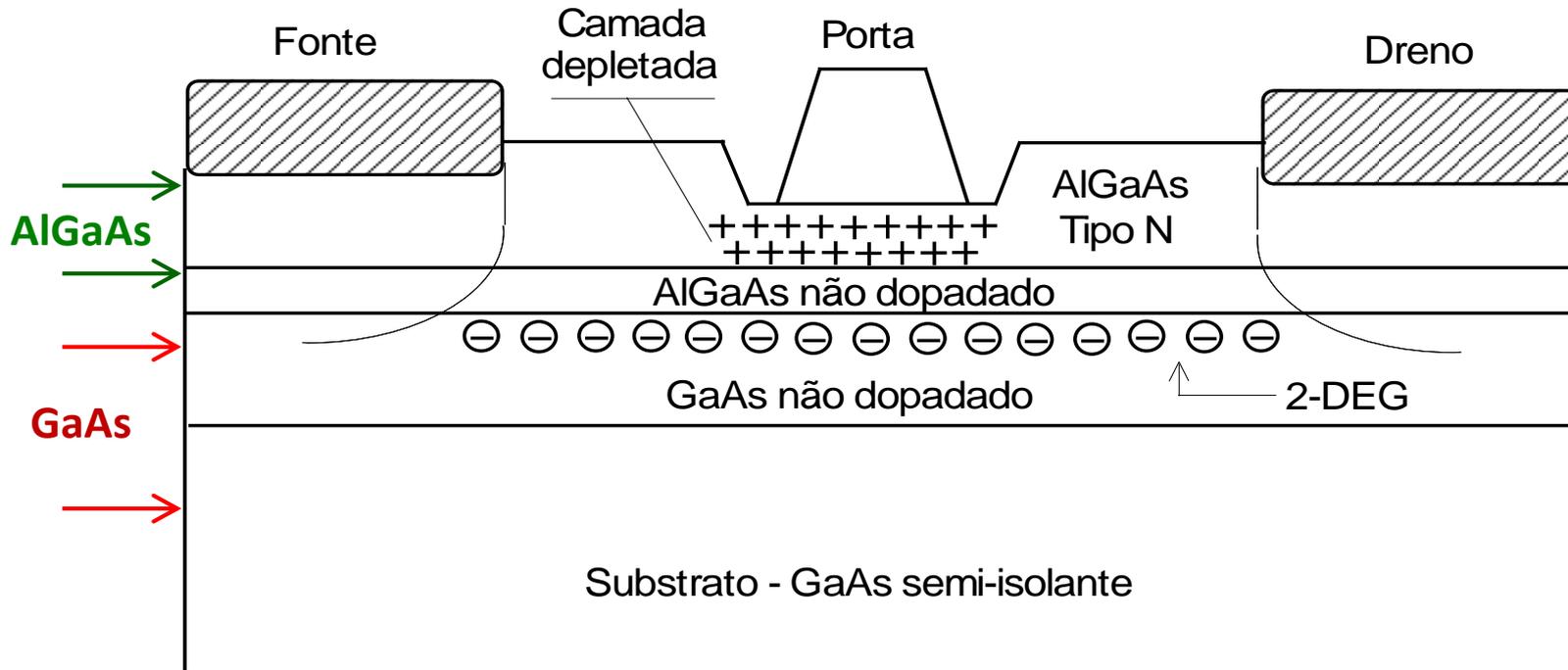
- Camada ativa

- Dopagem tipo N
- $N_D$  dopantes por unidade de volume

- Dopantes

- Doam elétrons para a rede
- Fornecem os elétrons livres, portadores de corrente  $\rightarrow I_D$
- Mas a interação elétrons livres/dopantes ionizados
  - Reduz a mobilidade dos elétrons livres
  - Limita frequência máxima de operação do MESFET

# HEMT – High Electron Mobility Transistor



## Secção transversal do HEMT

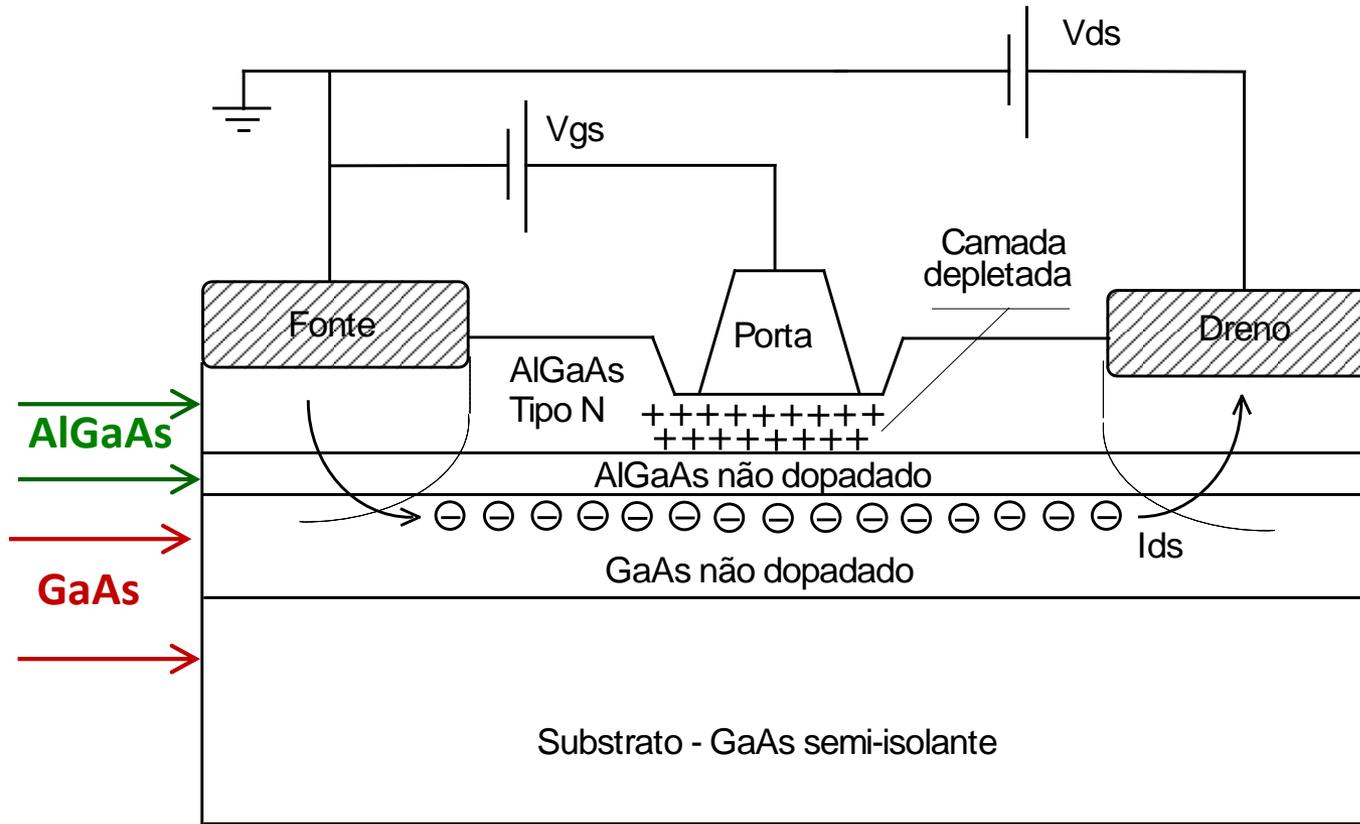
### Heteroestrutura: AlGaAs/GaAs

Camada de AlGaAs tipo N: 600 Angstroms,  $1 \cdot 10^{18}$  dopantes/cm<sup>3</sup>

Condução de corrente: gás bidimensional de elétrons, 2-DEG

Portadores de corrente: elétrons com alta mobilidade

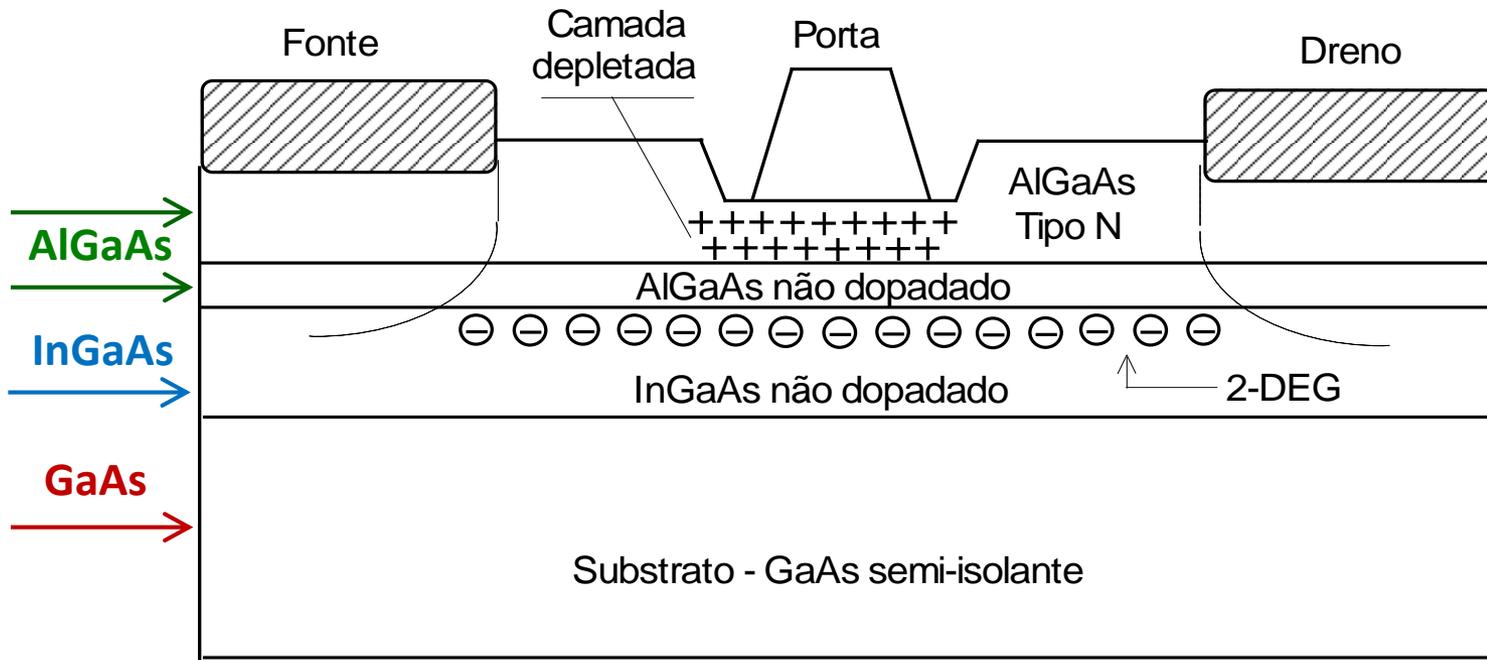
# Princípio de Operação do HEMT



$V_{gs}$ : controla a densidade de carga no 2-DEG  $\Rightarrow$  valor de  $I_d$

Curva DC  $I_{ds} \times V_{ds}$ : comportamento similar ao do MESFET

# HEMT Pseudomórfico ou PHMET

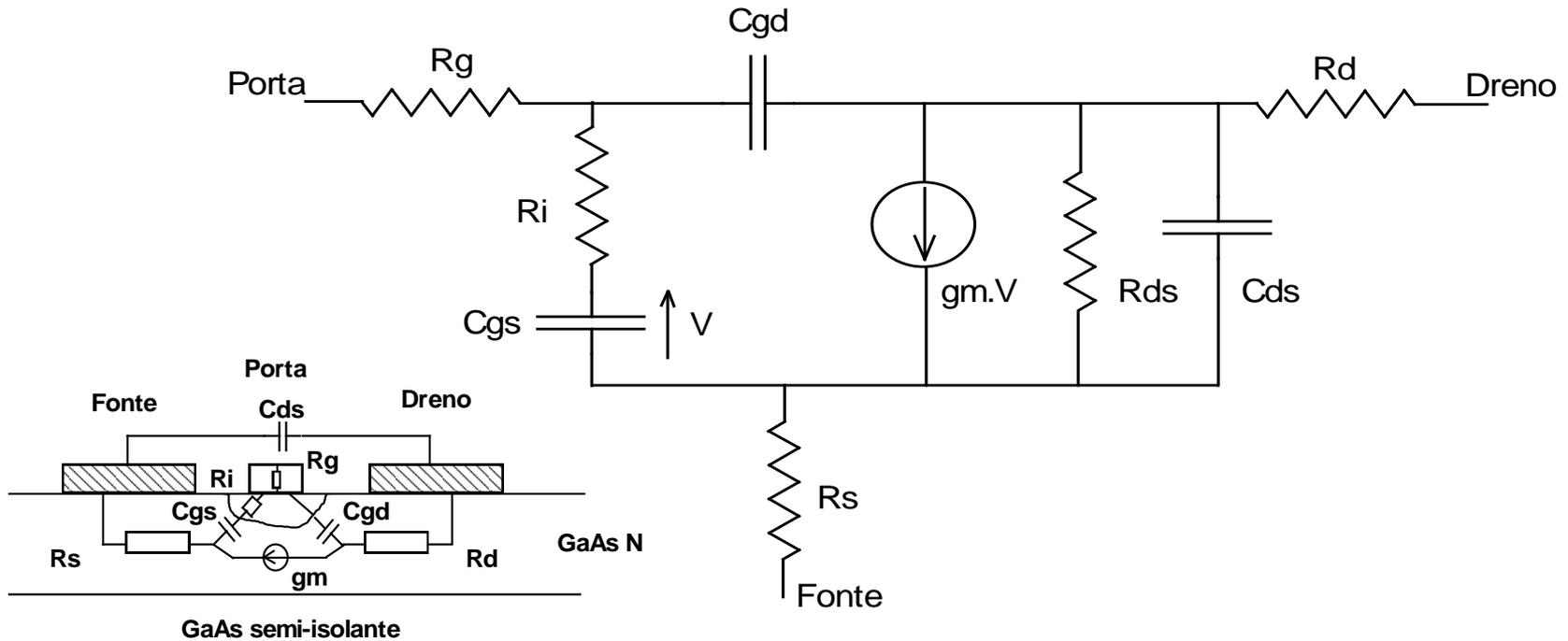


## Heteroestrutura: AlGaAs/InGaAs

Portadores no 2-DEG: maior mobilidade e densidade que o HEMT

Frequência de corte mais elevada, maior potência de saída

# Circuito Elétrico Equivalente de Pequenos Sinais: MESFET e HEMT



$R_g, R_s, R_d$  : resistências de porta, fonte e dreno

$C_{gs}$ : capacitância porta-fonte

$C_{ds}$ : capacitância dreno-fonte

$g_m$ : transcondutância

$C_{gd}$ : capacitância porta-dreno

$R_i$ : resistência de carga de  $C_{gs}$

$1/R_{ds}$ : condutância dreno-fonte

# MESFET e HEMT

## Transistores de baixo ruído

Dispositivo	$L_g \times W$ ( $\mu\text{m}^2$ )	Figura de ruído (dB)	$G_{\text{associado}}$ (dB)	Frequência (GHz)
MESFET	0,3 x 280	1,6	9,0	12
HEMT	0,3 x 280	0,6	10,5	12
PHEMT	0,2 x 200	0,5	11,5	12

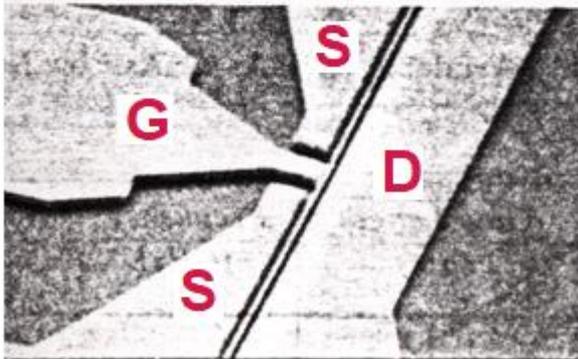
Condições para comparar os tipos de FETs

- Dimensões de porta similares
- Frequências de operação próximas

# HEMTs

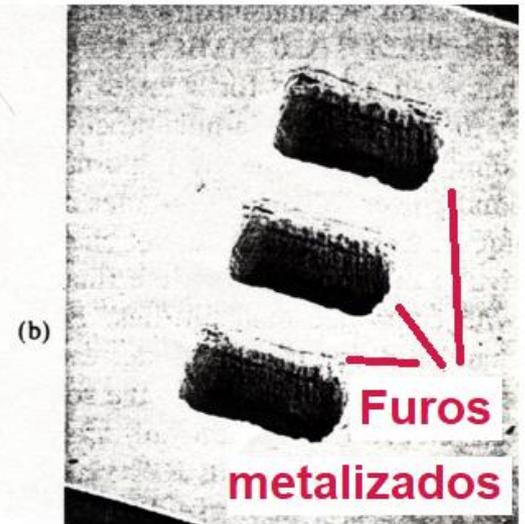
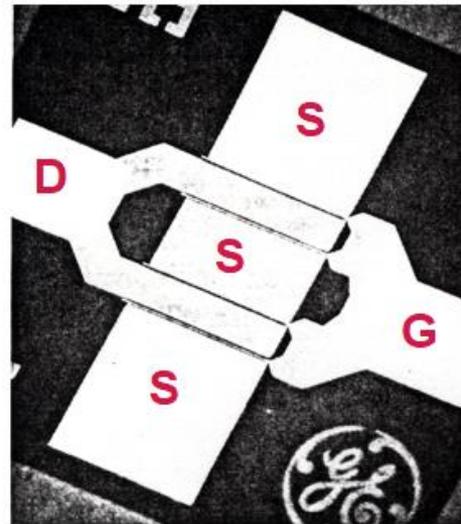
HEMT de potência

Porta: 4 dedos com  $L = 0,25 \mu\text{m}$



HEMT de baixo ruído

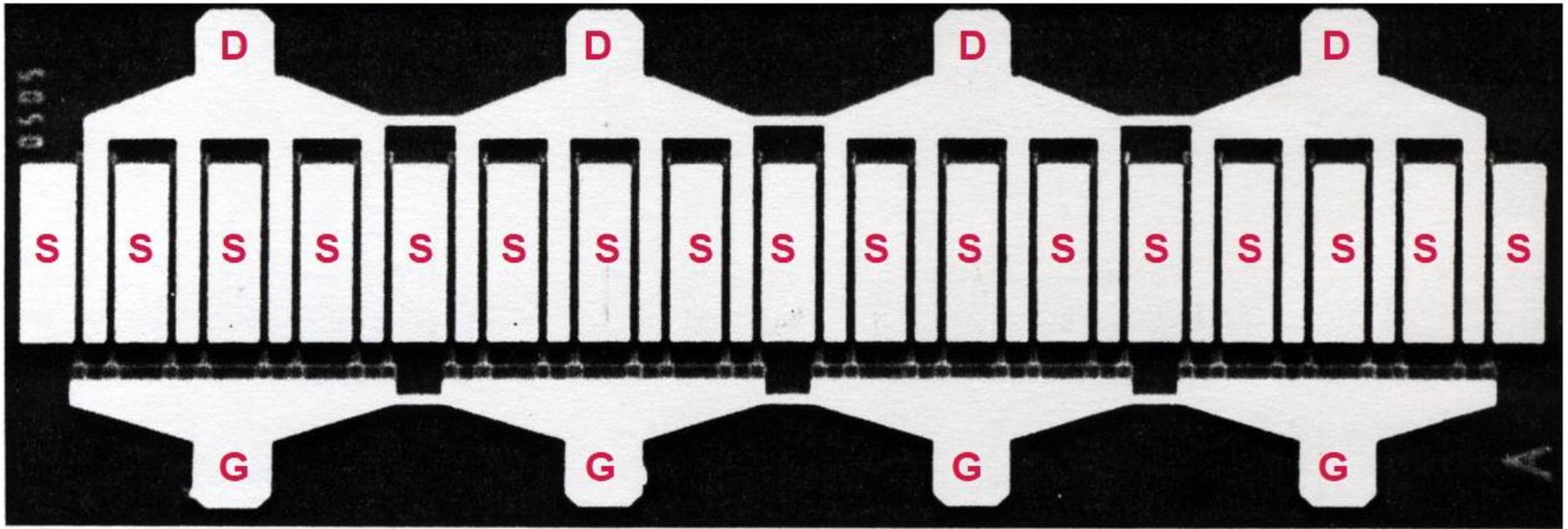
Porta: 2 dedos com  $0,15 \times 25 \mu\text{m}^2$



Verso do chip metalizado

- Furos metalizados
- Interligam áreas de fonte
- Dissipam calor

# PHEMT de Potência



Porta: 32 dedos, com  $W = 150 \mu\text{m}$  cada

$$P_{\text{out}} = 2,5 \text{ W em } 20 \text{ GHz}$$

# Transistores de Micro-ondas

Dispositivo	Si BJT	Si CMOS	SiGe HBT	GaAs MESFET	GaAs HEMT	GaN HEMT
Faixa de frequências (GHz)	10	20	30	60	100	10
Ganho típico (dB)	10 a 15	10 a 20	10 a 15	5 a 20	10 a 20	10 a 15
Figura de Ruído (dB)	2,0 2,0 GHz	1,0 4,0 GHz	0,6 8,0 GHz	1,0 10,0 GHz	0,5 12,0 GHz	1,6 6,0 GHz
Capacidade de potência	Alta	Baixa	Média	Média	Média	Alta
Polaridade de alimentação única	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não
Custo	Baixo	Baixo	Médio	Médio	Alto	Médio

Fonte: Microwave Engineering, 3ª ed., D. M. Pozar, **2012**

# Modelo de Dispositivos de Micro-ondas

- Modelos de pequenos sinais

- Empregados no projeto de circuitos lineares

- Amplificador de ganho
    - Amplificador de baixo ruído
    - Projeto aproximado de osciladores

Simulação linear

Ex.: Parâmetros S

- Modelos de grandes sinais

- Empregados no projeto de circuitos não-lineares

- Amplificadores de potência
    - Misturadores de frequência
    - Osciladores
    - Multiplicadores de frequência e outros

Simulação não-linear

Ex.: Transiente

Balanceamento  
Harmônico

# Modelo de Dispositivos de Micro-ondas

## Modelos de pequenos sinais

### Modelos de caixa preta

- Parâmetros S do transistor
- Parâmetros de Ruído de transistores

### Modelos de circuito elétrico equivalente de pequenos sinais

- Circuito que representa o transistor usando
  - Resistores, capacitores, indutores
  - Fontes vinculadas de tensão ou corrente
  - Componentes de valor fixo

# Modelo de Dispositivos de Micro-ondas

## Modelos de pequenos sinais

### Modelos de caixa preta

- Parâmetros S do transistor
- Parâmetros de Ruído de transistores
- Obtidos experimentalmente
  - Válidos para as condições de medida
    - Ponto de polarização DC
    - Faixa de frequência
- Arquivo padrão de Parâmetros S
  - Arquivo “Touchstone”
  - Terminação “s2p”

# Modelo de Dispositivos de Micro-ondas

## Exemplo de arquivo de Parâmetros S e de Ruído de transistor

Linhas de comentários:  
nome do transistor, ponto  
de polarização, etc..”

Unidades usadas

Frequência em GHz

$S_{ij}$  e módulo e fase

Frequência e  
parâmetros S

Frequência e  
parâmetros de ruído

```
!AT-31011
! S and NOISE PARAMETERS at Vce=2.7V Ic=1mA.
# ghz s ma r 50
0.1 0.96 -7 3.59 174 0.01 86 0.999 -2
0.5 0.93 -32 3.41 152 0.05 69 0.95 -13
0.9 0.83 -56 3.13 132 0.08 55 0.91 -22
1.0 0.81 -61 2.99 128 0.08 53 0.9 -24
1.5 0.68 -89 2.61 107 0.1 40 0.84 -32
1.8 0.62 -104 2.38 96 0.11 34 0.8 -36
2.0 0.58 -113 2.28 90 0.11 31 0.78 -38
2.4 0.52 -133 1.99 77 0.11 27 0.75 -42
3.0 0.45 -160 1.71 61 0.11 25 0.72 -46
4.0 0.43 158 1.37 39 0.1 29 0.69 -56
5.0 0.46 123 1.14 20 0.12 41 0.68 -66
0.5 0.5 0.92 13 0.85
0.9 0.6 0.85 29 0.73
1.8 1.1 0.68 67 0.46
2.4 1.6 0.55 98 0.28
```

Fornecidos somente  
para transistores de  
baixo ruído

# Modelo de Dispositivos de Micro-ondas

# ghz s ma r 50 → Parâmetros S em módulo e fase

Frequência (GHz)	S11		S21		S12		S22	
	módulo	fase	módulo	fase	módulo	fase	módulo	fase
0.1	0.96	-7	3.59	174	0.01	86	0.999	-2
0.5	0.93	-32	3.41	152	0.05	69	0.95	-13
0.9	0.83	-56	3.13	132	0.08	55	0.91	-22
1.0	0.81	-61	2.99	128	0.08	53	0.9	-24
1.5	0.68	-89	2.61	107	0.1	40	0.84	-32
1.8	0.62	-104	2.38	96	0.11	34	0.8	-36
2.0	0.58	-113	2.28	90	0.11	31	0.78	-38
2.4	0.52	-133	1.99	77	0.11	27	0.75	-42
3.0	0.45	-160	1.71	61	0.11	25	0.72	-46
4.0	0.43	158	1.37	39	0.1	29	0.69	-56
5.0	0.46	123	1.14	20	0.12	41	0.68	-66

# Modelo de Dispositivos de Micro-ondas

Exemplo: Bibliotecas transistores comerciais de micro-ondas do ADS

Modelos de grandes sinais



-  Analog\_Parts\_vendor\_kit.7z
-  HFDiode\_vendor\_kit.7z
-  Meas\_SMT\_Passive\_vendor\_kit.7z
-  Microwave\_Transistors\_vendor\_kit.7z
-  RF\_Passive\_SMT\_vendor\_kit.7z
-  RF\_Transistors\_vendor\_kit.7z

Modelos de pequenos sinais



-  S\_Parameter\_vendor\_kit.7z
-  System\_Lib\_vendor\_kit.7z

Acesso às bibliotecas de componentes compactadas:

C:\Program Files\Keysight\ADS2022\_update1\oalibs\componentLib

# Modelo de Dispositivos de Micro-ondas

Modelos de grandes sinais

## Read-Only Libraries

### Microwave\_Transistors

- chip BJTs (No Layout)
- chip GaAs FETs (No Layout)
- chip HEMTs (No Layout) Packaged HEMTs (Layout)

### S\_Parameter

- Agilent Technologies I (No Layout)
- Agilent Technologies II (No Layout)
- Alpha Industries (No Layout)
- Fujitsu (No Layout)
- Harris (No Layout)
- Litton (No Layout)
- Mitsubishi (No Layout)
- Motorola (No Layout)
- Mwt (No Layout)
- NEC (No Layout)
- Phillips (No Layout)
- Raytheon (No Layout)
- Siemens (No Layout)
- Sony (No Layout)
- Toshiba (No Layout)

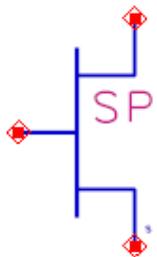
Modelos de pequenos sinais

- Parâmetros S
- Parâmetros de ruído

# Modelo de Dispositivos de Micro-ondas

Exemplo: Transistor representado por parâmetros de S  
Duas condições diferentes de polarização

Transistor da biblioteca: Read\_Only Libraries -> S\_Parameter



sp\_ail\_AFM02N5-00\_2\_19941209  
SNP2

Bias="Fet: Vds=2V Ids=30mA"

→ Frequency="{2.00 - 26.00} GHz"



sp\_ail\_AFM02N5-00\_1\_19941209  
SNP1

Bias="Fet: Vds=2V Ids=10mA"

→ Frequency="{2.00 - 26.00} GHz"

→ Noise Frequency="{2.00 - 26.00} GHz"

**Polarização para alto ganho**

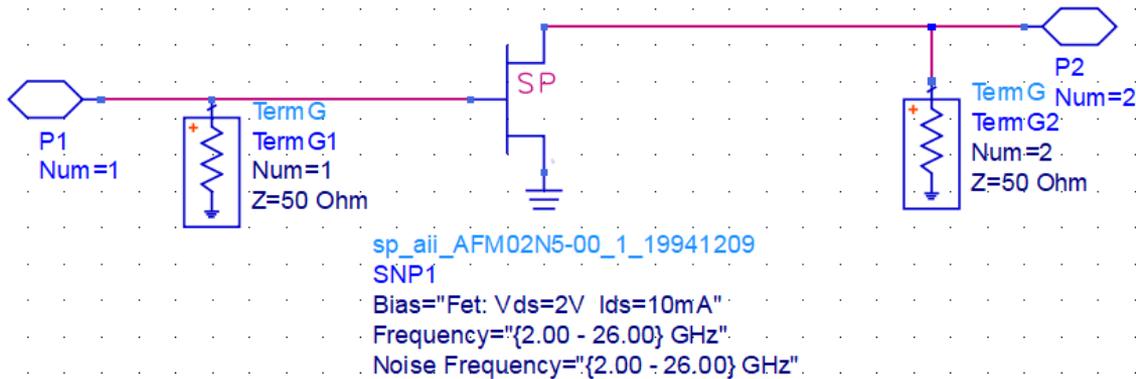
- Parâmetros S

**Polarização para baixo ruído**

- Parâmetros S
- Parâmetros de ruído

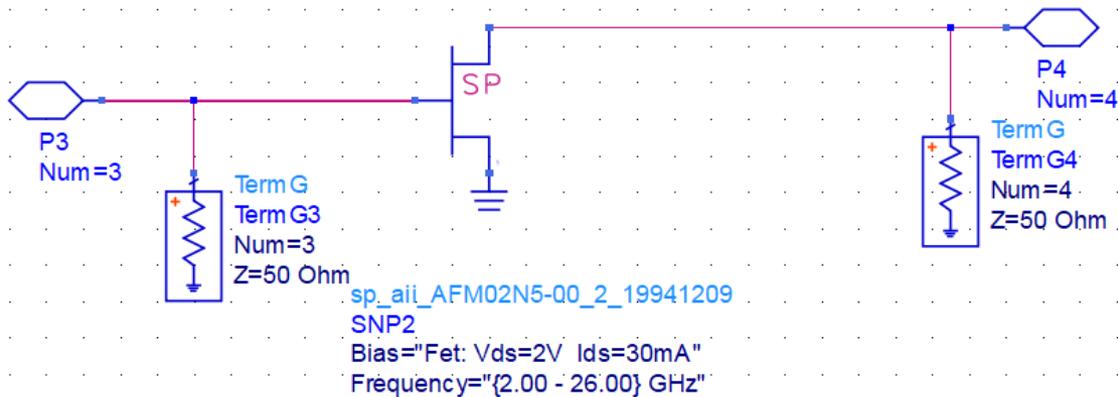
# Modelo de Dispositivos de Micro-ondas

Simule os parâmetros S do transistor



 S-PARAMETERS

S\_Param  
SP1  
Start=2 GHz  
Stop=26 GHz  
Step=10 MHz



Compare o ganho dos transistores terminado em 50  $\Omega$

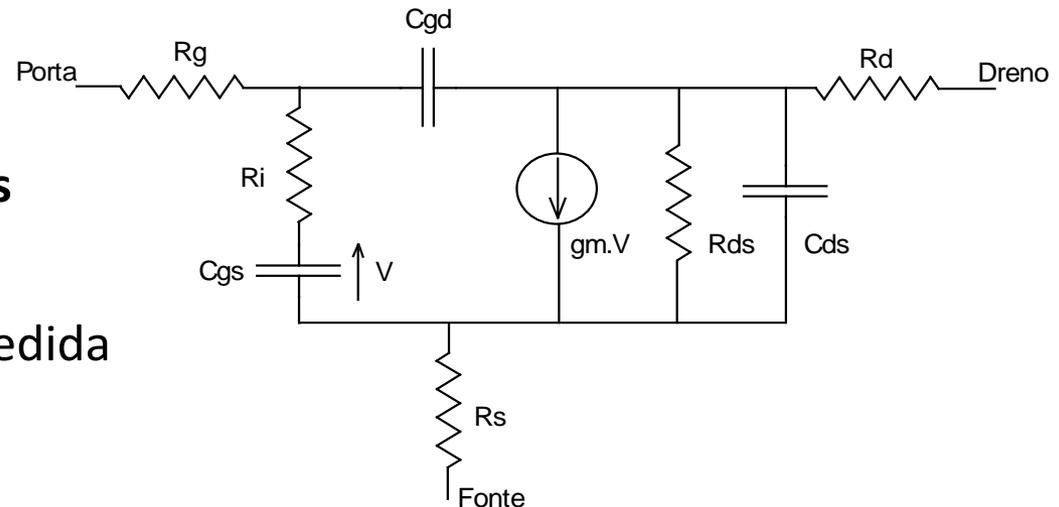
$S_{21}(\text{dB}) \times \text{frequência}$  e  $S_{43}(\text{dB}) \times \text{frequência}$

# Modelo de Dispositivos de Micro-ondas

## Modelos de pequenos sinais

Modelos de circuito elétrico equivalente de pequenos sinais

- Circuito elétrico equivalente
- Componentes com **valores fixos**
  - Obtidos experimentalmente
- Válidos para as condições de medida
  - Ponto de polarização DC
  - Faixa de frequência
  - Transistor operando linearmente
- Alterando o ponto de polarização
  - Novos valores para os componentes



Modelo de circuito elétrico equivalente de pequenos sinais do MESFET, HEMT e PHMET

$R's$ ,  $C's$  e  $g_m \rightarrow$  **valores constantes** para um **dado ponto de polarização**

# Modelo de Dispositivos de Micro-ondas

## Modelos de grandes sinais

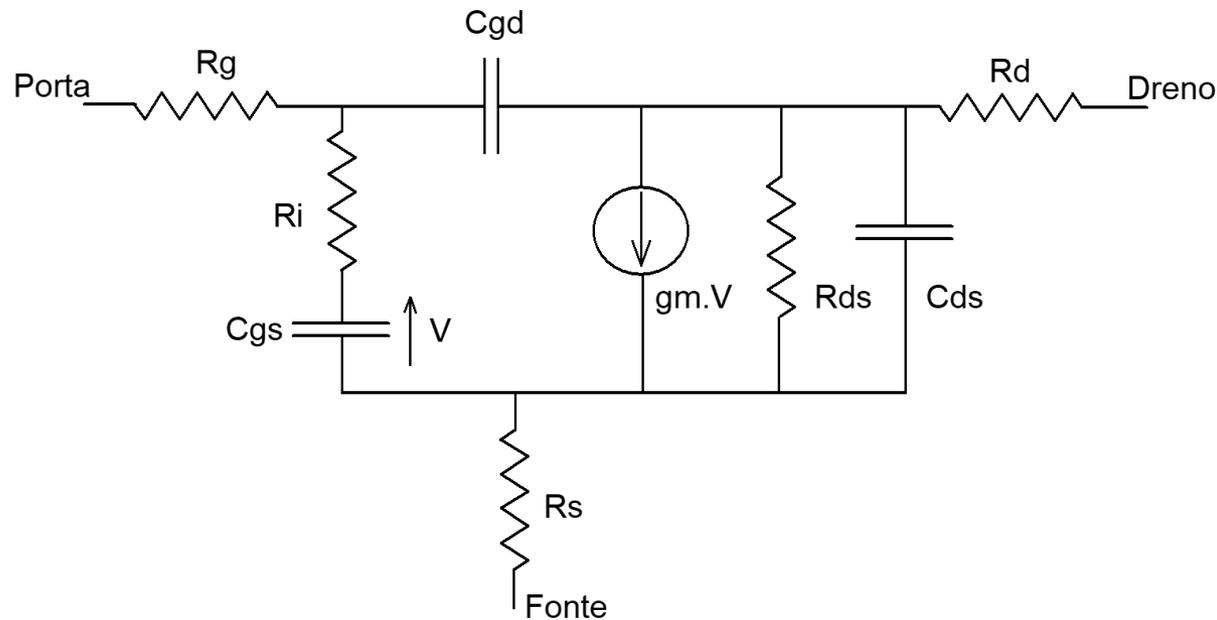
Modelos de circuito elétrico equivalente de grandes sinais

- Circuito elétrico equivalente
- Valores dos componentes
  - Funções das tensões e correntes de polarização do transistor
  - Equações dos componentes são desenvolvidas a partir de dados experimentais, obtidos em diversos pontos de polarização do transistor
- Válidos para as condições de medida
  - Pontos de polarização DC
  - Faixa de frequência

# Modelo de Dispositivos de Micro-ondas

## Modelos de grandes sinais

Modelos de circuito elétrico equivalente de grandes sinais do MESFET, HEMT e PHMET



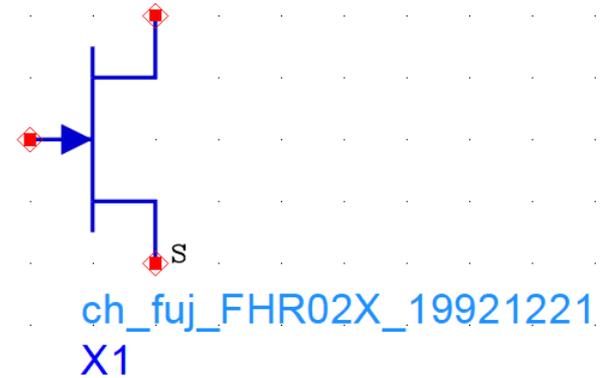
$R$ 's,  $C$ 's e  $g_m \rightarrow$  equações em função do ponto de polarização:  $V_{GS}$ ,  $V_{DS}$ ,  $I_D$   
MESFET, HEMT e PHEMT  $\rightarrow$  modelos com diferentes conjuntos de equações

# Modelo de Dispositivos de Micro-ondas

## Modelos de grandes sinais

Exemplo - ADS

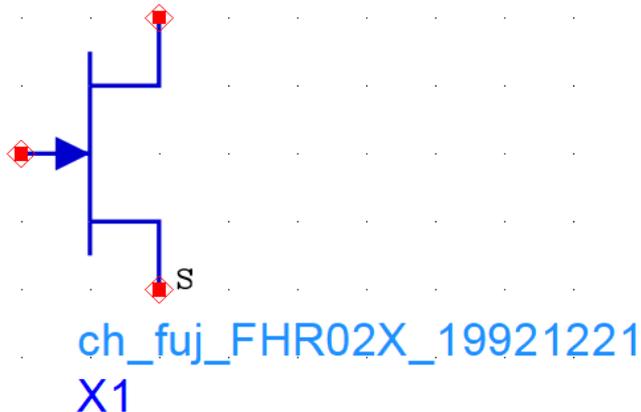
Transistor representado por modelo de grandes sinais



- √ Read-Only Libraries
- √ Microwave\_Transistors
  - chip BJTs (No Layout)
  - chip GaAs FETs (No Layout)
  - chip HEMTs (No Layout) Packaged HEMTs (Layout)

# Modelo de Dispositivos de Micro-ondas

Exemplo: Transistor representado por modelo de grandes sinais



Máxima potência dissipada (mW) para  
operação segura do transistor

Valor típico da tensão dreno-fonte (V)

Corrente de dreno (mA) com  $V_{GS} = 0$  V

Tensão de limiar (V) da corrente de dreno

Dados do transistor

FHR02X

Package:DIE

Model:eehemt1 N-  
channel

Gate Width=na

Gate Length=na,

$P_{diss(max)}=180$

$V_{ds(typical)}=2$

$I_{dss}=42.2$

$V_t=-1.06$

# Modelo de Dispositivos de Micro-ondas

## Curvas DC de transistor - modelo de grandes sinais

### Traçador de curvas do FET

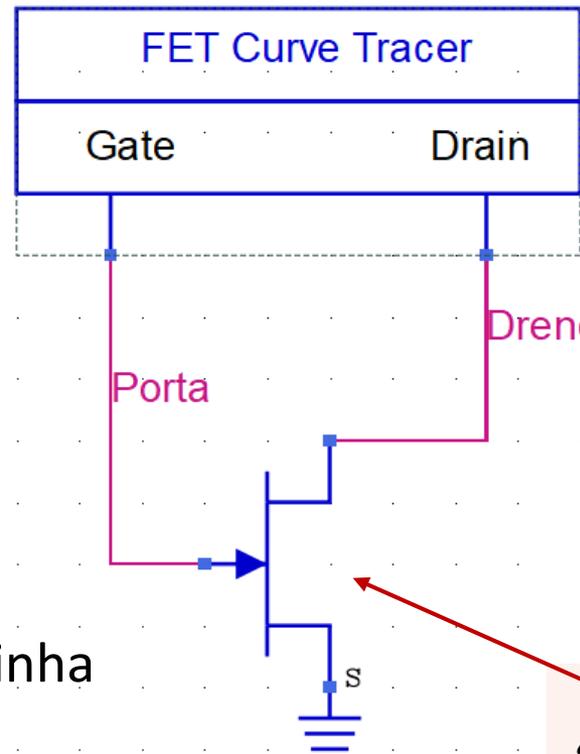
Menu superior

- Insert
- Template...
- ads\_templates:DC\_FET\_T

### Adicionar Lables

Atribuir aos acessos do FET

- Clicar com a direita sobre a linha
- Wire/PIN Lable
- Digite o nome



```
DC_FET
SIM1
VGS_start=-2
VGS_stop=0
VGS_points=5
VDS_start=0
VDS_stop=5.0
VDS_points=41
```

```
Disp
Temp DisplayTemplate
disptemp1
"DC_FET_T"
```

Biblioteca  
"Microwave Transistor"

```
ch_fuj_FHR02X_19921221
X1
```

# Modelo de Dispositivos de Micro-ondas

## Curvas DC de transistor - modelo de grandes sinais

### Simulação das curvas DC

Menu superior

➤ Simulate → Simulate

ou **F7**

### Parâmetros do FET Curve Tracer

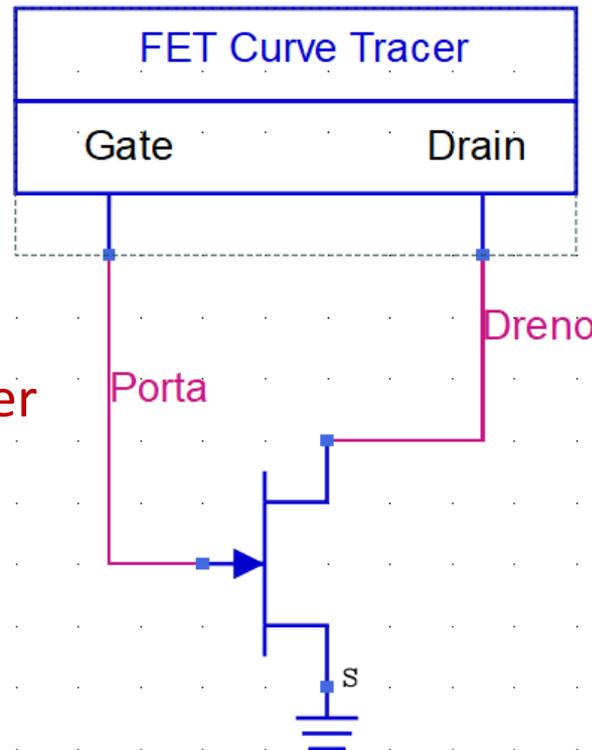
VGS: de  $V_t \approx -1,0$  V até 0 V

VDS: de 0 a 4 V

### Verifique a potência dissipada

VGS = -0,5 V

VDS = 2 V



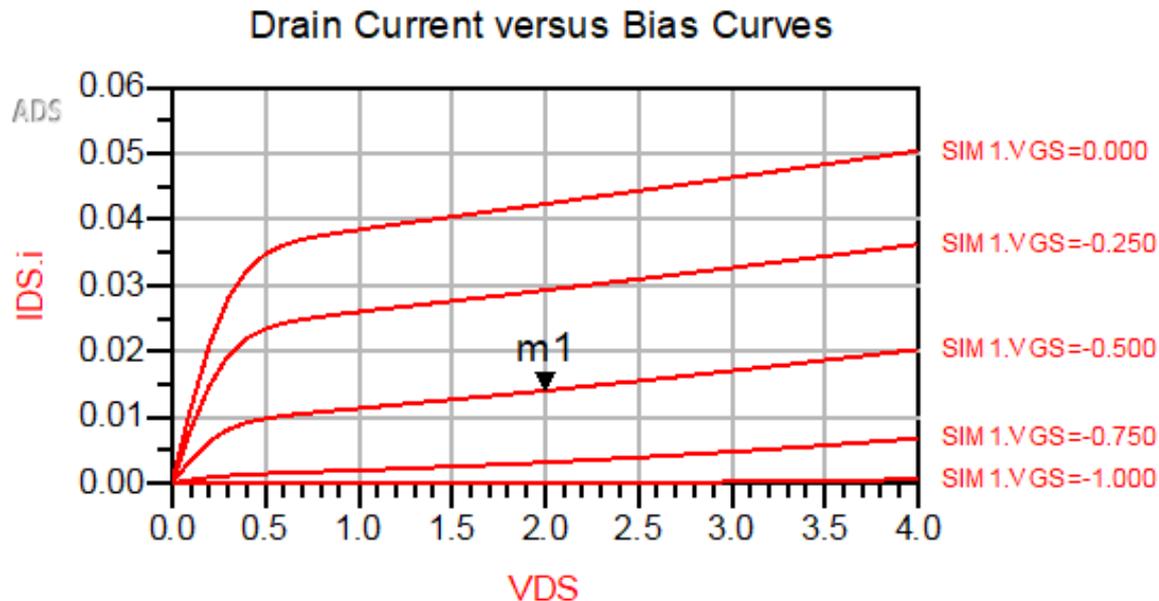
```
DC_FET
SIM1
VGS_start=-2
VGS_stop=0
VGS_points=5
VDS_start=0
VDS_stop=5.0
VDS_points=41
```

```
Disp
Temp
DisplayTemplate
disptemp1
"DC_FET_T"
```

```
ch_fuj_FHR02X_19921221
X1
```

# Modelo de Dispositivos de Micro-ondas

Modelo de grandes sinais → Curvas DC de transistor



```
m1
indep(m1)=2.000
vs(IDS.i,VDS)=0.014
SIM1.VGS=-0.500
```

←  $V_{DS}$  (V)  
←  $I_{DS}$  (A)  
←  $V_{GS}$  (V)

Potência dissipada

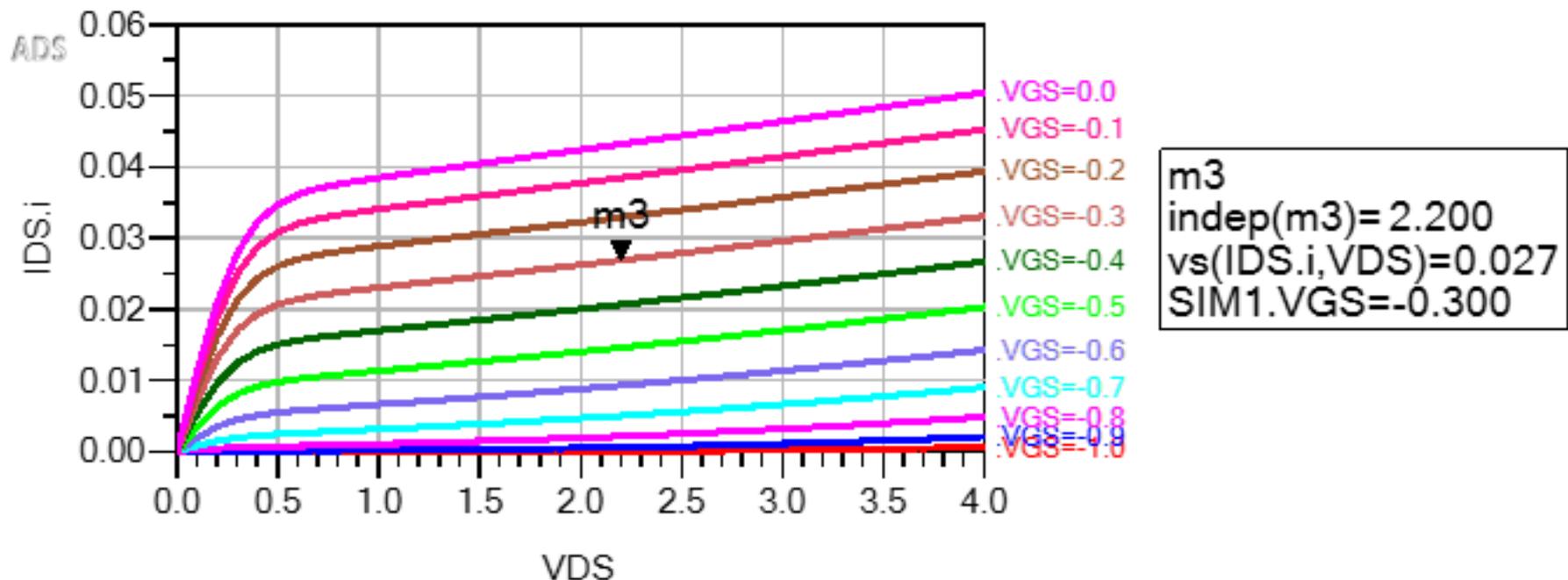
$$P_{dis} = I_{DS} \cdot V_{DS}$$

$$P_{dis} = 0,014 \cdot 2 = 0,028 \text{ W} = 28 \text{ mW}$$

# Modelo de Dispositivos de Micro-ondas

Modelo de grandes sinais → Curvas DC de transistor

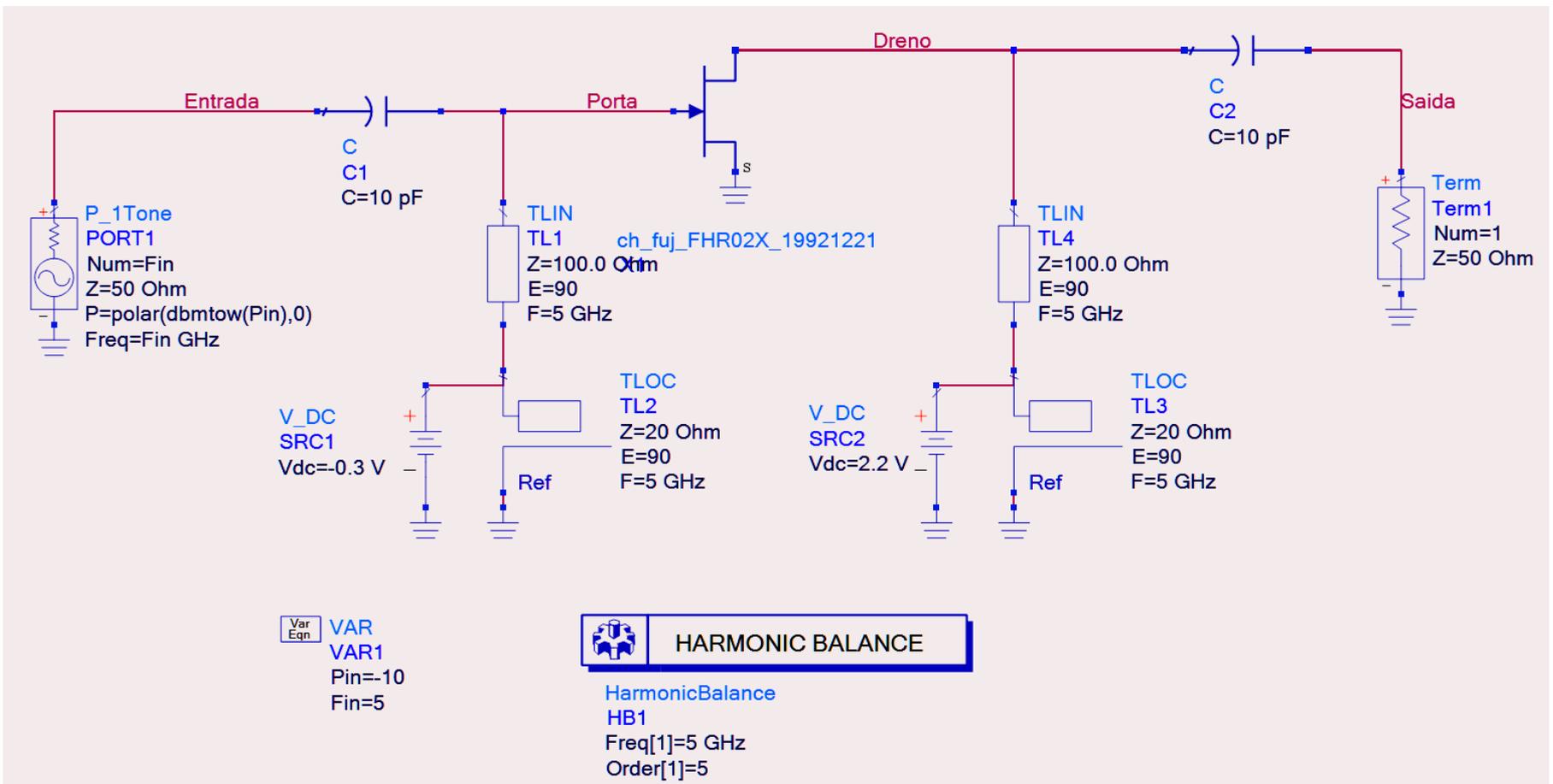
- Permite escolher ponto de polarização do transistor
  - Exemplo:  $V_{DS} = +2,2 \text{ V}$  e  $V_{GS} = -0,3 \text{ V} \rightarrow I_{DS} = 27 \text{ mA}$
  - Potência dissipada:  $P_{dis} = I_{DS} \cdot V_{DS} = 59,4 \text{ mW}$



# Modelo de Dispositivos de Micro-ondas

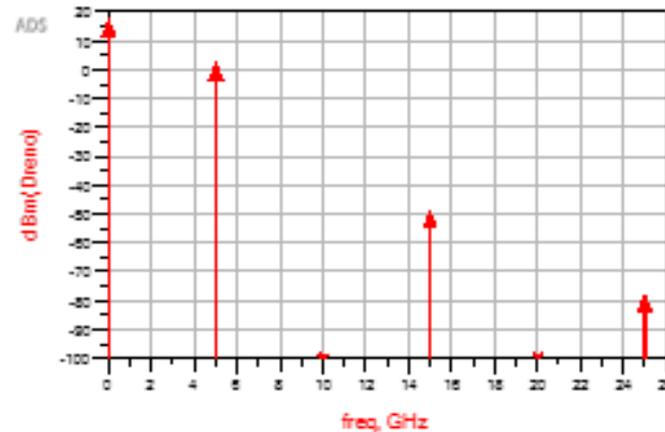
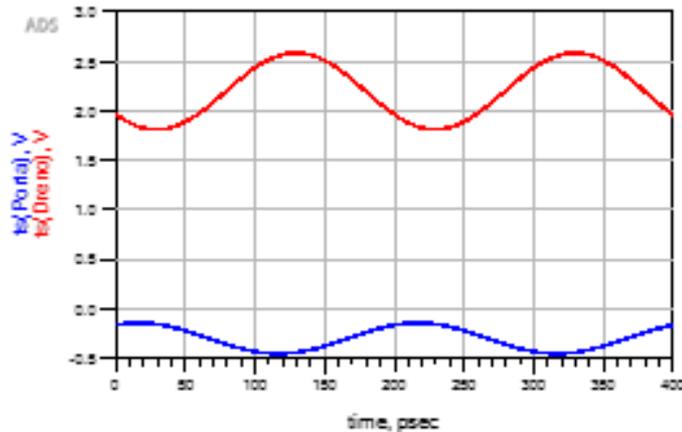
## Modelo de grandes sinais

### Sinais no domínio do tempo - geração de harmônicas



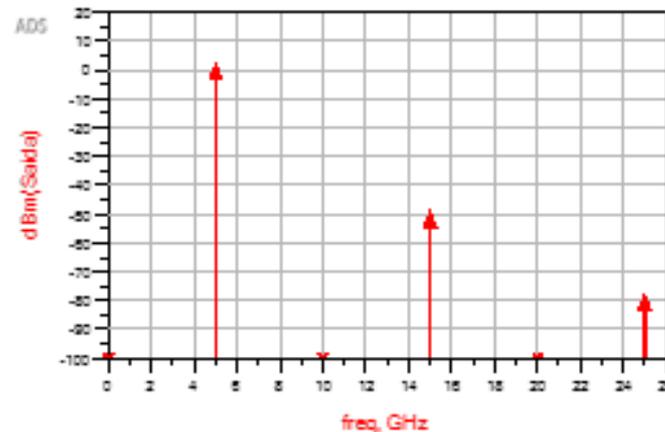
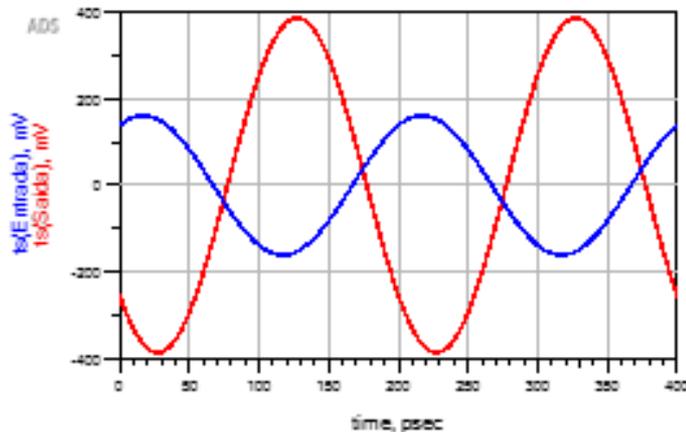
# Modelo de Dispositivos de Micro-ondas

## Tensões de porta e dreno – domínio do tempo e espectro de frequência



Tensões com  
nível DC

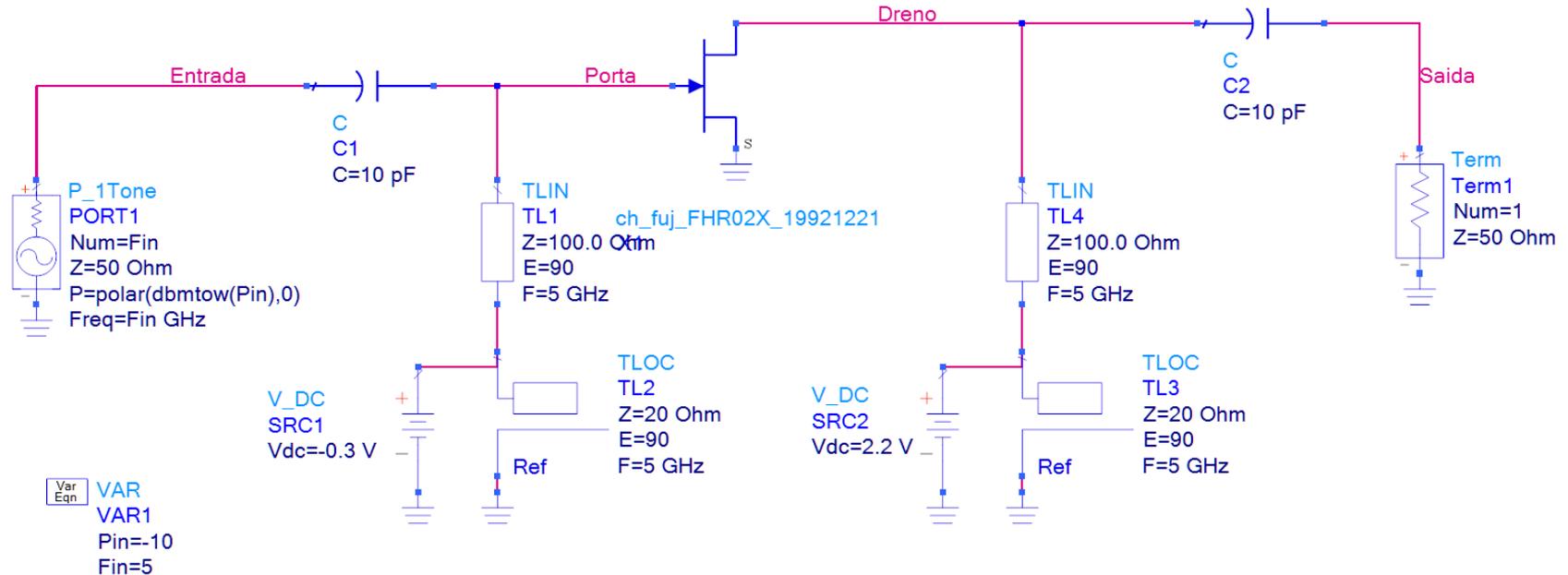
## Tensões entrada e saída – domínio do tempo e espectro de frequência



Tensões sem  
nível DC

# Modelo de Dispositivos de Micro-ondas

## Saturação do transistor – compressão do ganho



Var Eqn  
VAR1  
Pin=-10  
Fin=5

HARMONIC BALANCE

HarmonicBalance  
HB1  
Freq[1]=5 GHz  
Order[1]=5

PARAMETER SWEEP

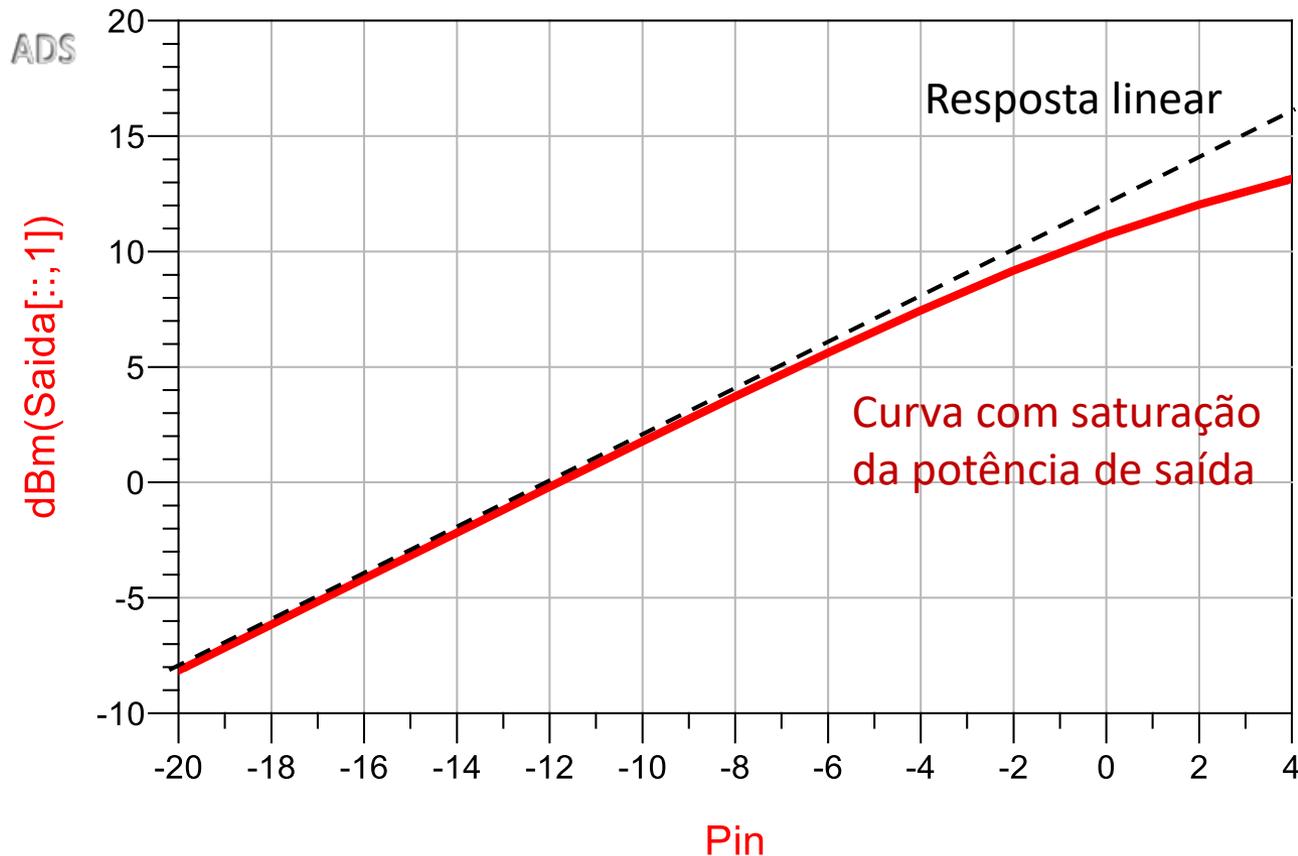
ParamSweep  
Sweep1  
SweepVar="Pin"  
SimInstanceName[1]="HB1"  
SimInstanceName[2]=  
SimInstanceName[3]=  
SimInstanceName[4]=  
SimInstanceName[5]=  
SimInstanceName[6]=  
Start=-20  
Stop=4  
Step=2

Varredura da potencia de entrada  
-20 dBm a 2 dBm

# Modelo de Dispositivos de Micro-ondas

## Saturação do transistor

Potência de saída da frequência fundamental versus a potência de entrada  $P_{in}$



# Modelo de Dispositivos de Micro-ondas

## Compressão do ganho do transistor

Ganho(dB) da frequência fundamental versus a potência de entrada Pin

$$\text{Eqn } \text{Ganho\_dB} = \text{dBm}(\text{Saida}[:,1]) - \text{Pin}$$

