

Dispositivos de Micro-ondas

Prof.^a Dr.^a Fatima Salete Correra

PSI3581 –CIRCUITOS DE MICRO-ONDAS

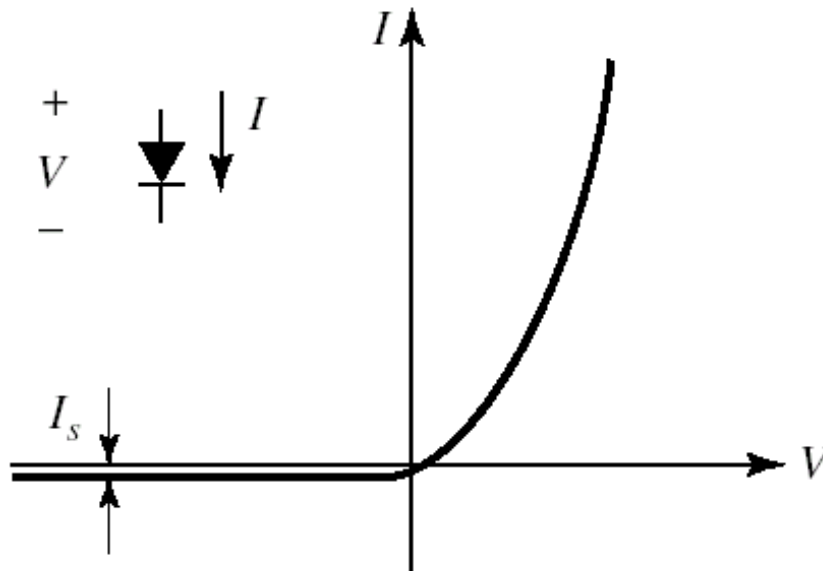
Sumário

- 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

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



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

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

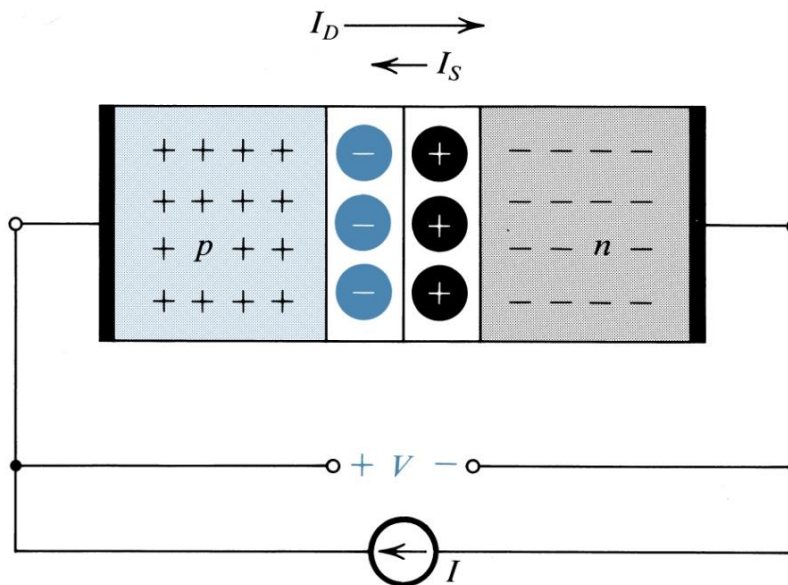
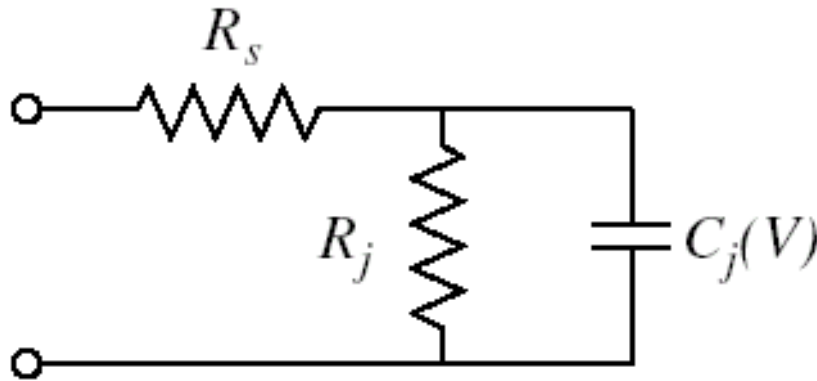


Fig. 3.16, Microeletrônica,
Sedra-Smith

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

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

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

R_j “curto-circuitada” por C_j

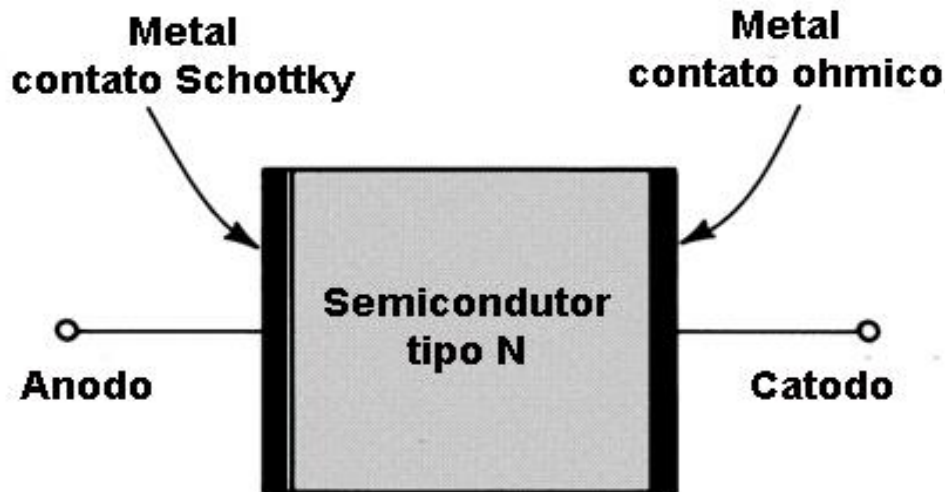
Diodo não atua como retificador!

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

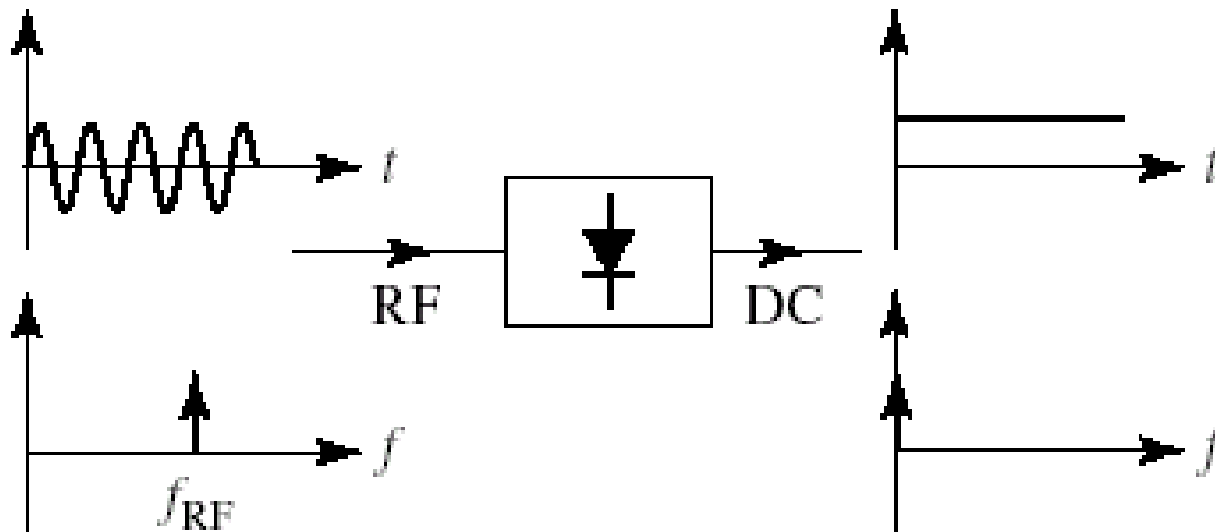


Fig. 10.20 (a)

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

Diodos de Micro-ondas

- Aplicações do diodo Schottky
 - Detecção
 - Demodulação de amplitude

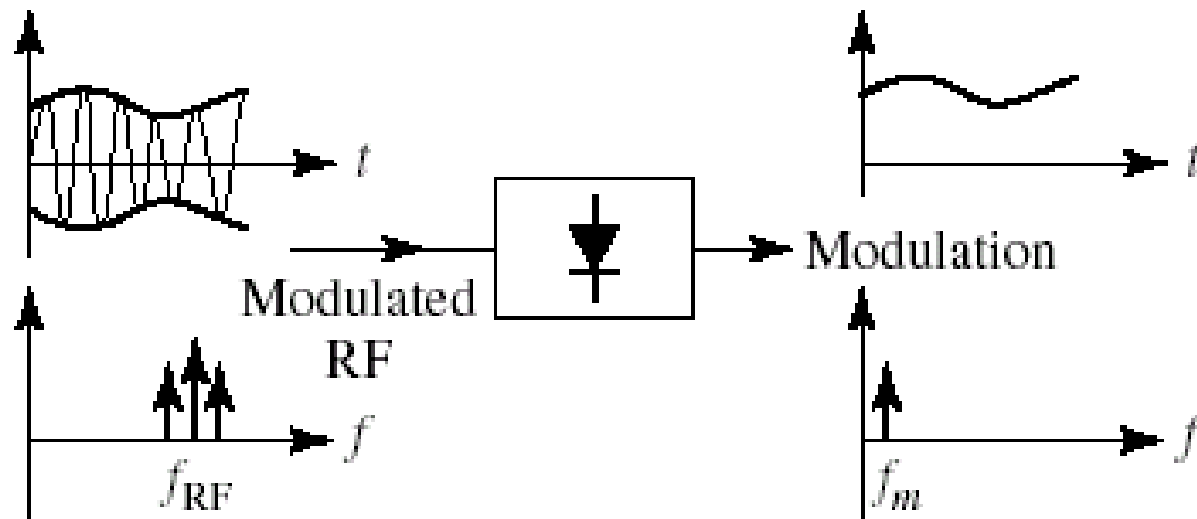


Fig. 10.20 (b)

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

Diodos de Micro-ondas

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

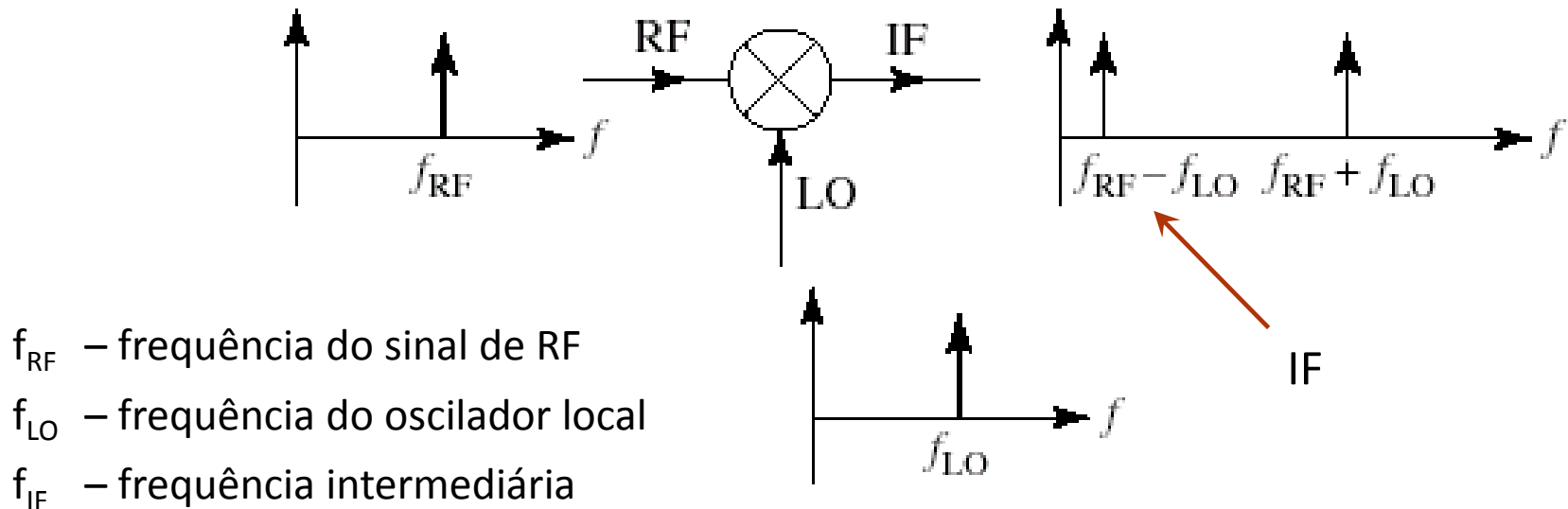


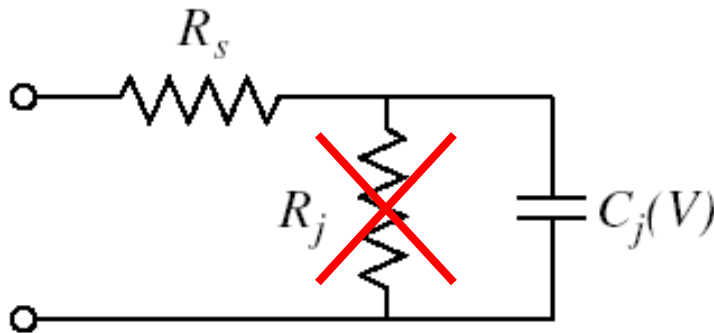
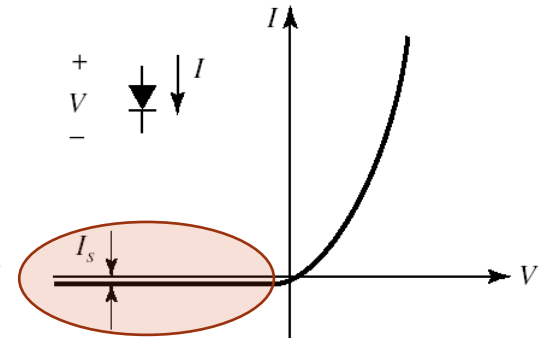
Fig. 10.20 (c)

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



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 → constante, depende da área do capacitor
- ϕ → constante, depende dos materiais que compõem o diodo
- γ → 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

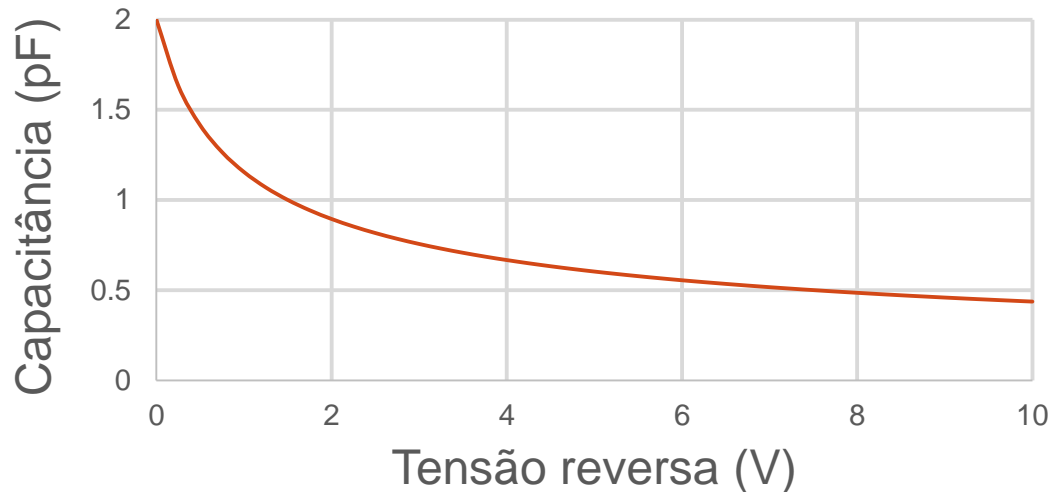
- Exemplo típico

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

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

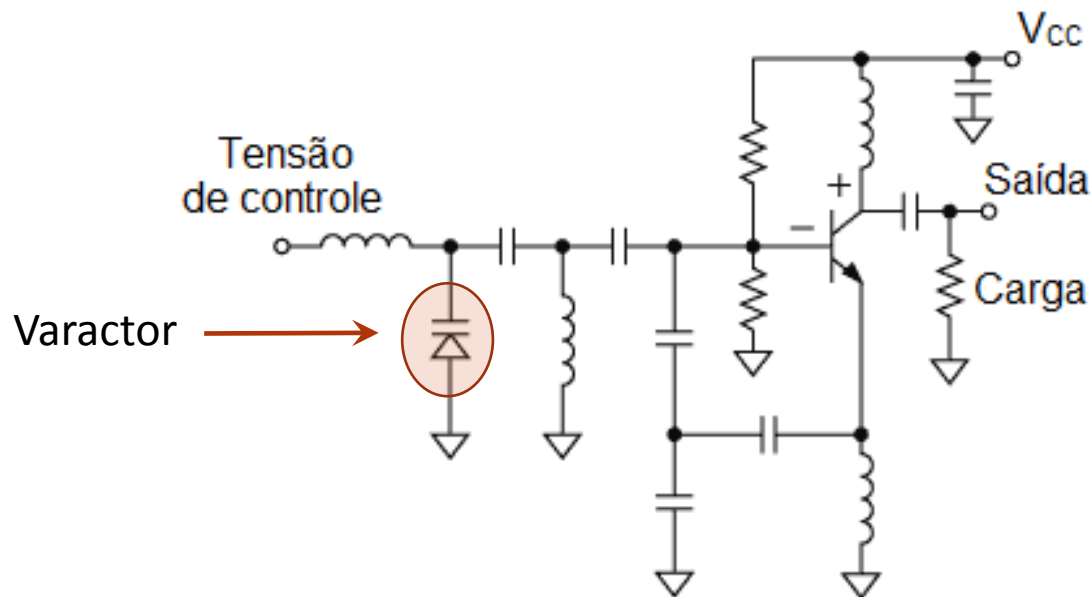


Capacitância vs. Tensão



Diodos de Micro-ondas

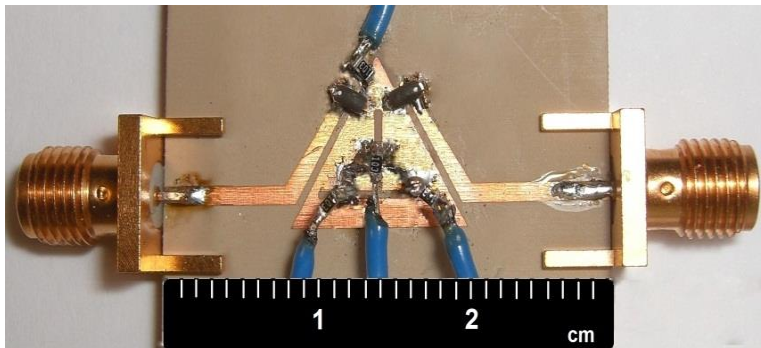
- Aplicações do diodo varactor
 - Osciladores controlados por tensão - VCO
 - Varactor faz parte do circuito ressonante



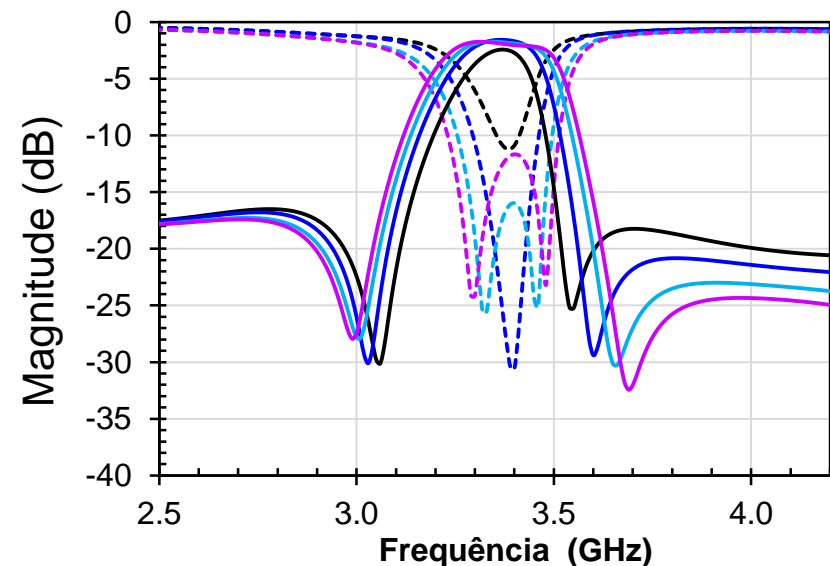
- Variando-se a tensão reversa do varactor V_r
 - Varia-se a capacitância do varactor $C_j(V_r)$
 - Varia-se a frequência de oscilação

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 $\rightarrow n \cdot f_0$

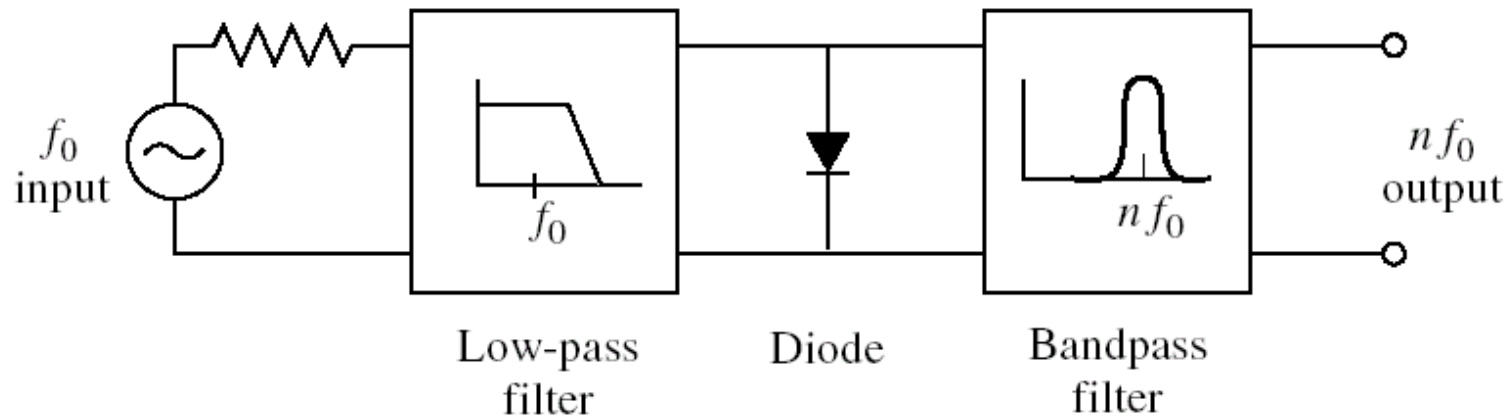


Diagrama de blocos de um multiplicador de frequência a diodo

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

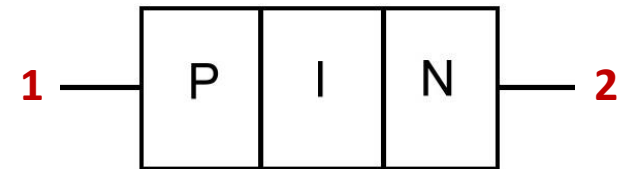
Diodos de Micro-ondas

- Diodo PIN

- Diodo de junção de três tipos de semicondutor

- **Tipo P / Intrínseco / Tipo N**

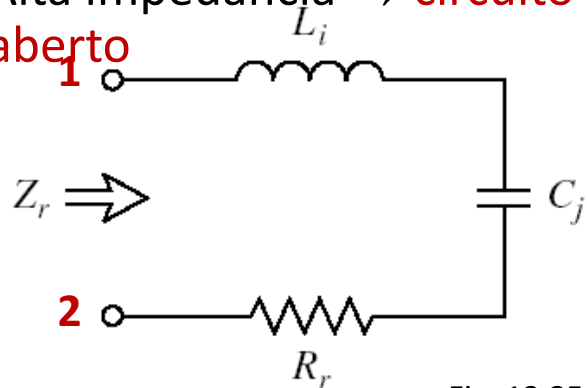
- Característica I x V → boa chave de RF



- Polarização reversa

- Baixa capacitância de junção série

- Alta impedância → **circuito aberto**



- Polarização direta

- Capacitância série é removida

- Baixa impedância → **curto-circuito**

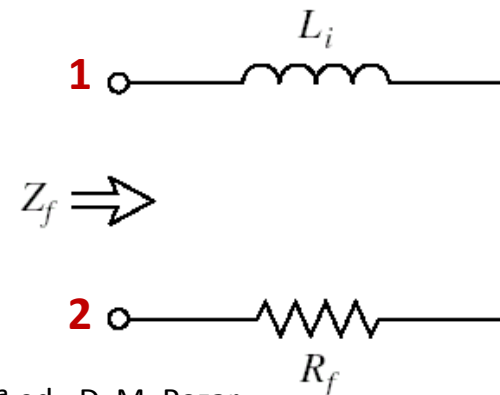
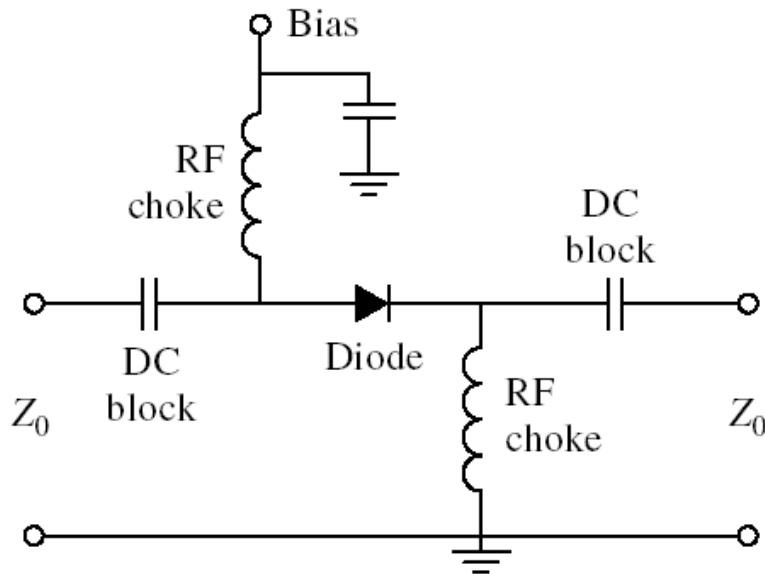


Fig. 12.25 Microwave Engineering, 3ª ed., D. M. Pozar

Diodos de Micro-ondas

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



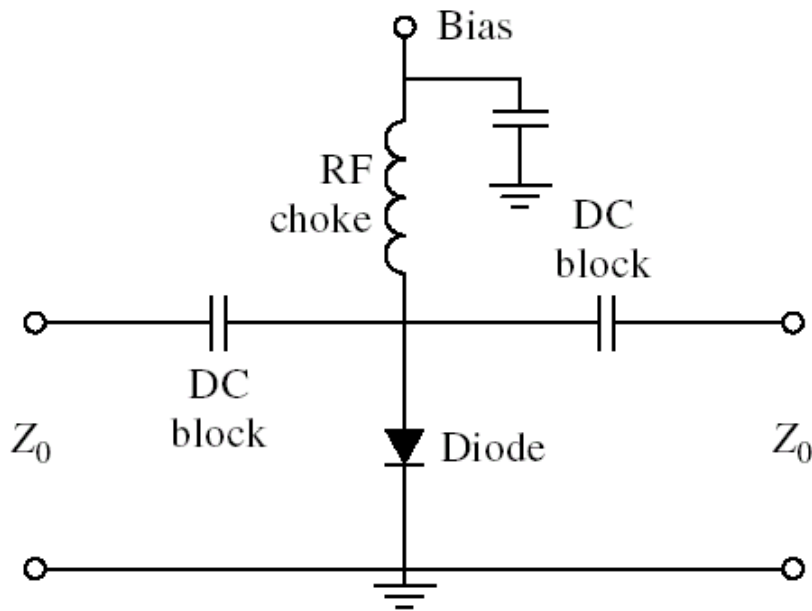
Polarização do diodo PIN

- 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

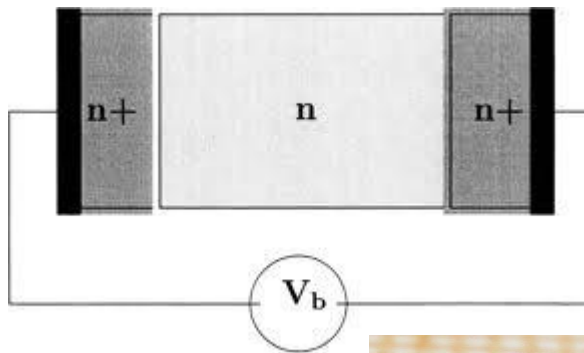
- Reversa
 - diodo com alta impedância
 - chave fechada
- Direta
 - diodo com baixa impedância
 - chave aberta

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

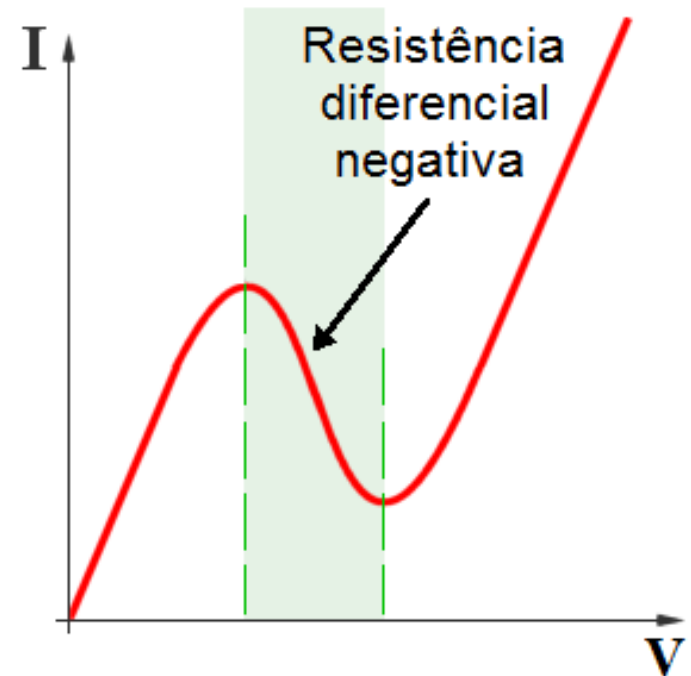
Diodos de Micro-ondas

- **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



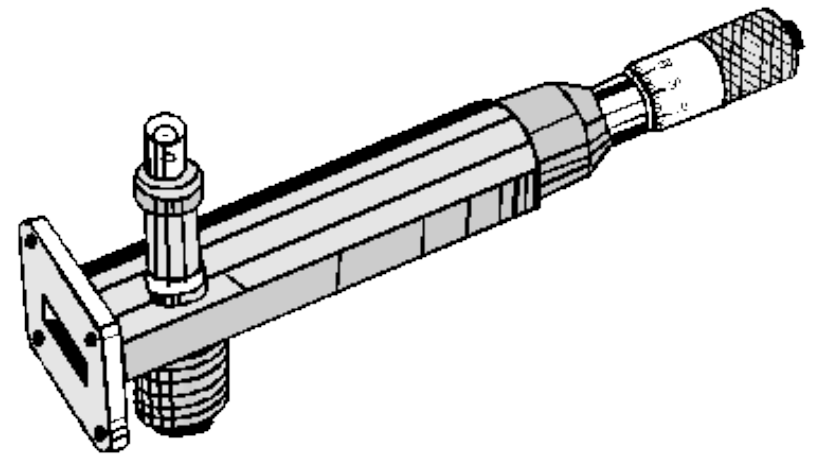
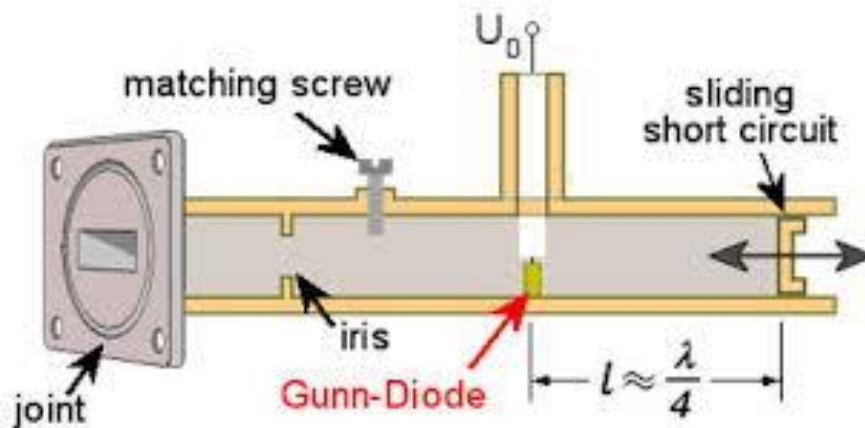
Diodo Gunn encapsulado



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



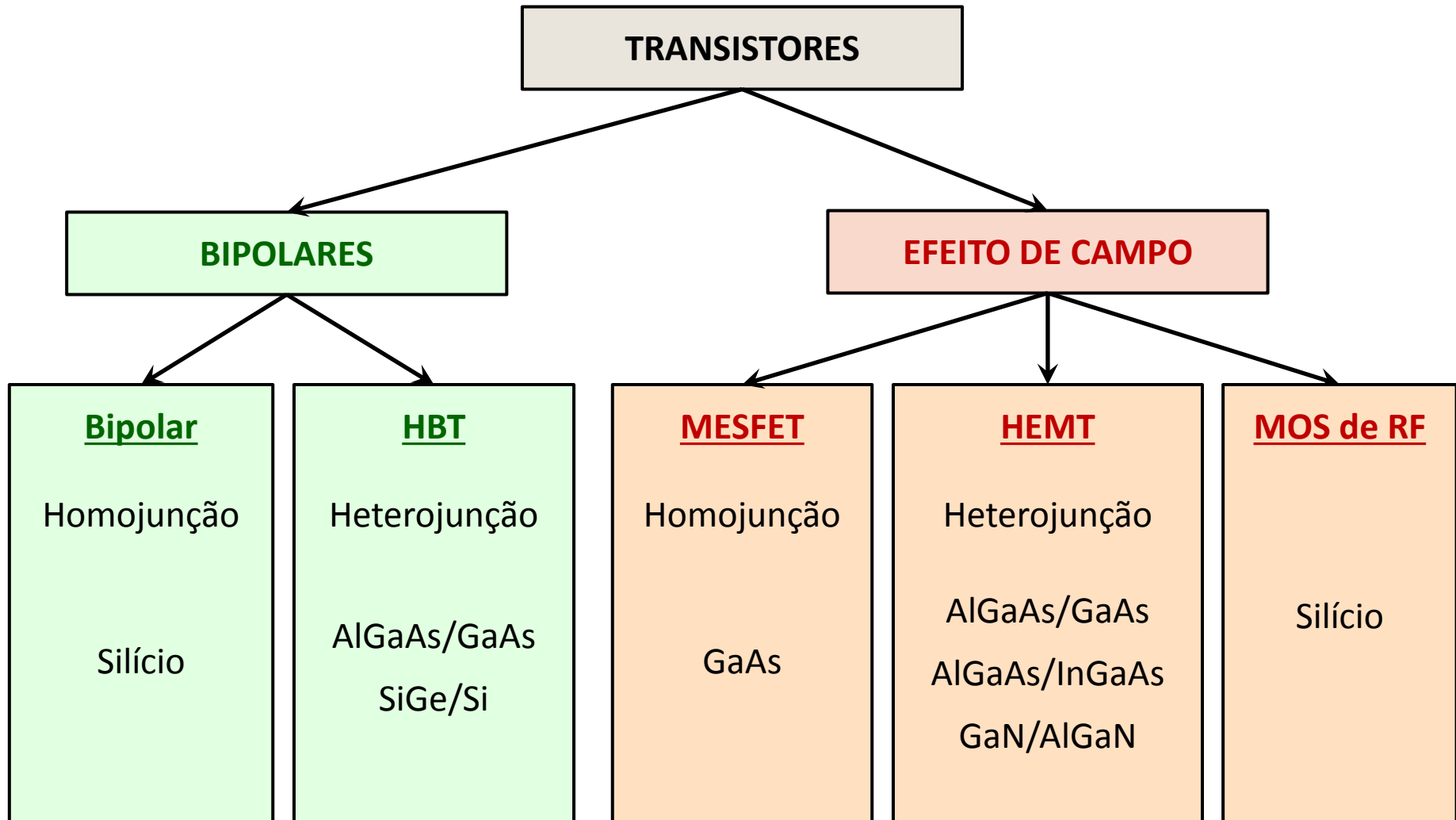
Oscilador a diodo Gunn

Tipos de Transistores de Micro-ondas

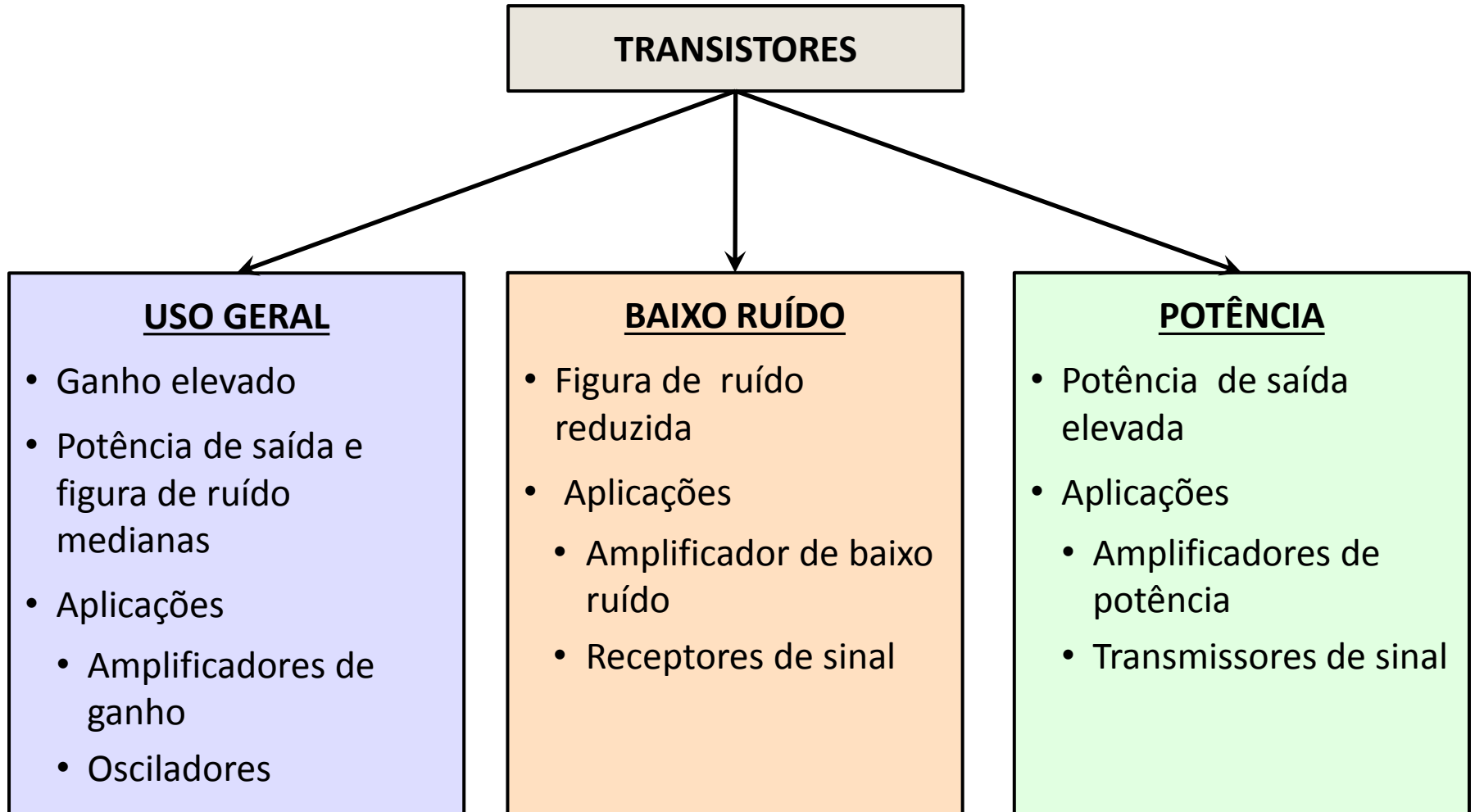
Introdução

- **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

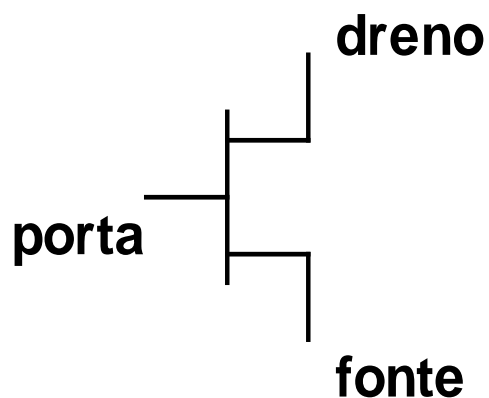


Classificação Alternativa



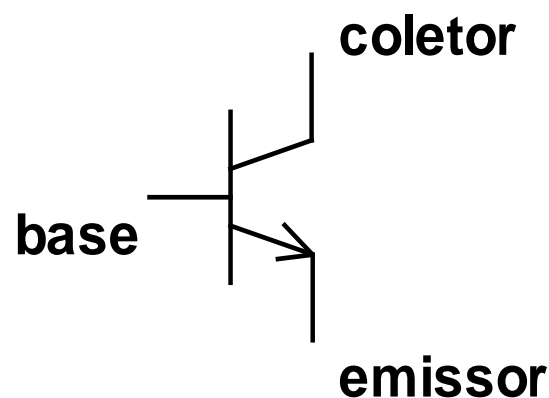
Símbolos dos Transistores de Micro-ondas

**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
- τ 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
- μ mobilidade do portador de corrente

- **Redução de $\tau \Rightarrow$ aumento de f_T**
- Uso de portadores de corrente com mobilidade μ 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 $\rightarrow v = \mu \cdot E$
 - μ – mobilidade E – campo elétrico
- Portador de corrente rápido \rightarrow mobilidade μ 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} cm^{-3}	10^{17} cm^{-3}	10^{18} 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 τ 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

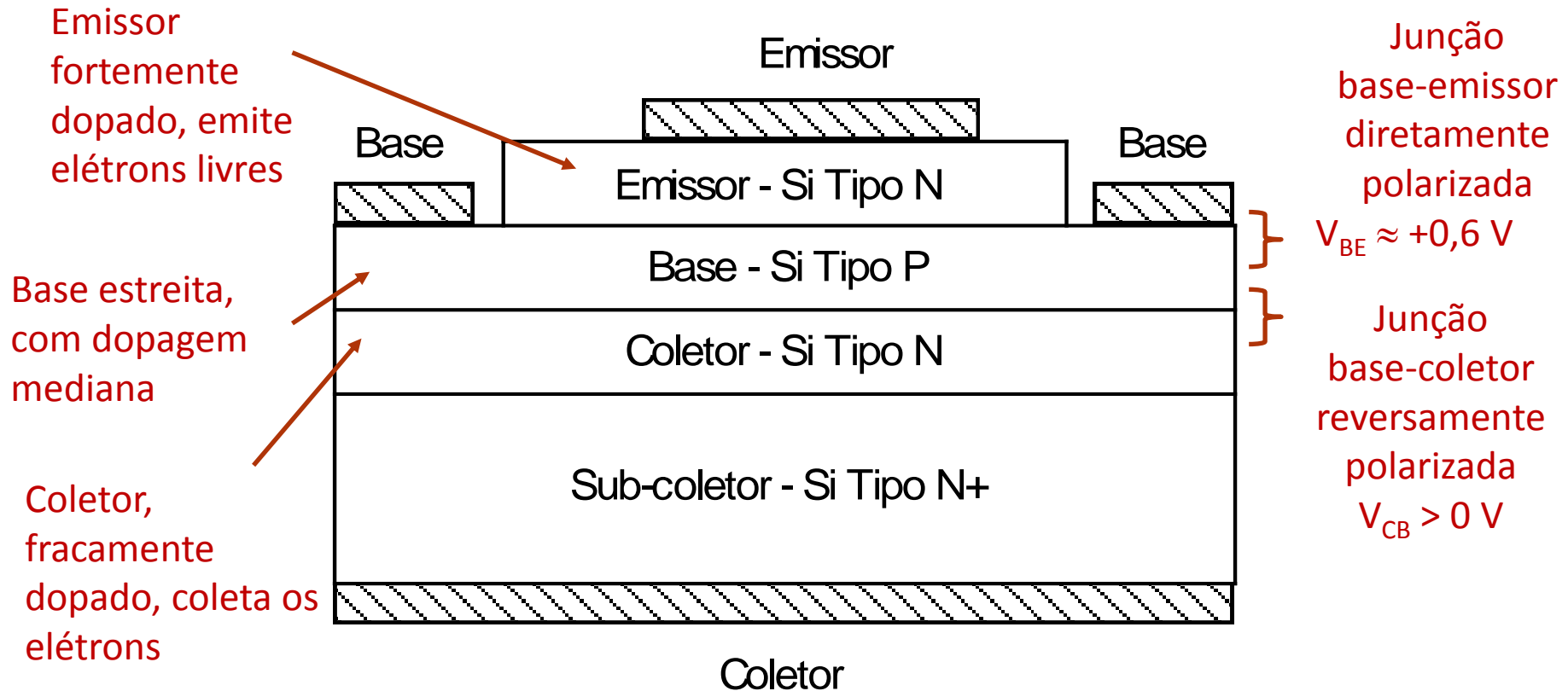
- **Heteroestrutura ou heterojunção**
 - Junção de dois semicondutores diferentes
 - Com larguras de banda de energia proibida diferentes
 - Mesmo passo de rede
 - Exemplo: GaAs e AlGaAs
- **Heteroestrutura pseudomórfica**
 - Materiais com passos de rede diferentes, mas próximos
 - Com tensões mecânicas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

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

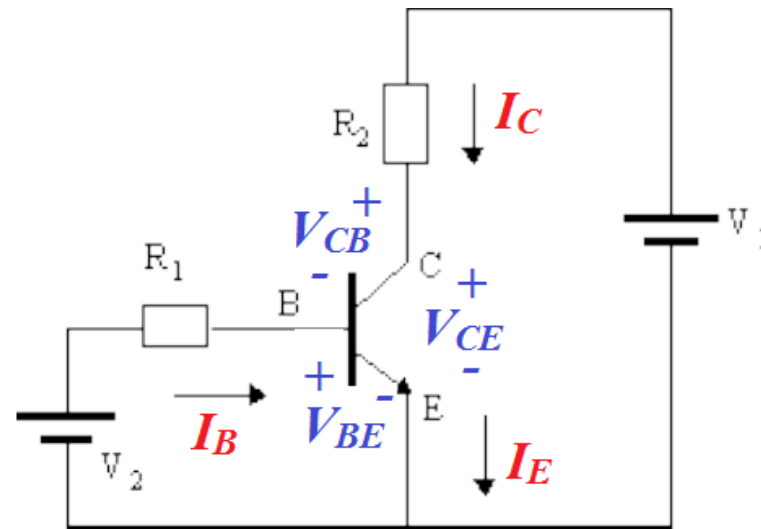
Transistor Bipolar de Silício

Secção transversal do transistor bipolar



Transistor Bipolar de Silício

Polarização do transistor bipolar



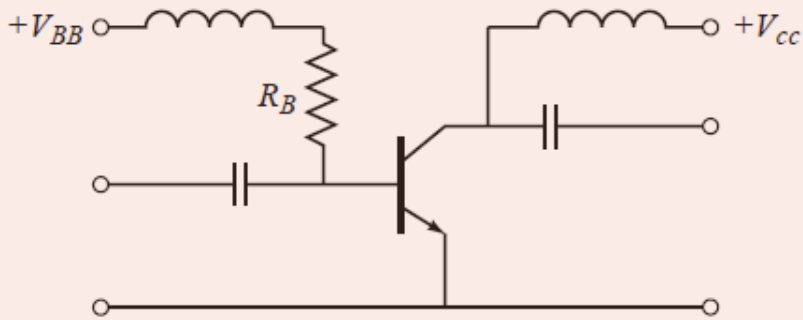
Operação do transistor bipolar NPN

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

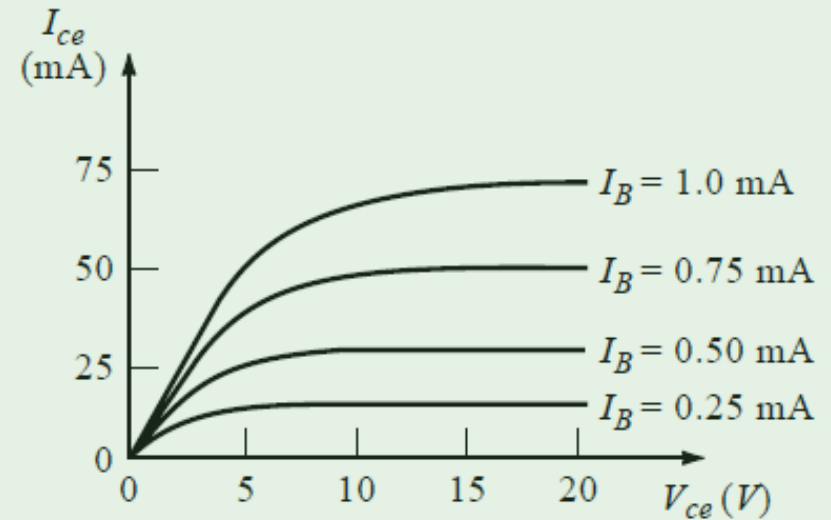
$$v_{BE} = V_{BE} + v_{be} \rightarrow i_B = I_B + i_b \rightarrow i_C = I_C + i_c$$

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

Transistor Bipolar de Silício



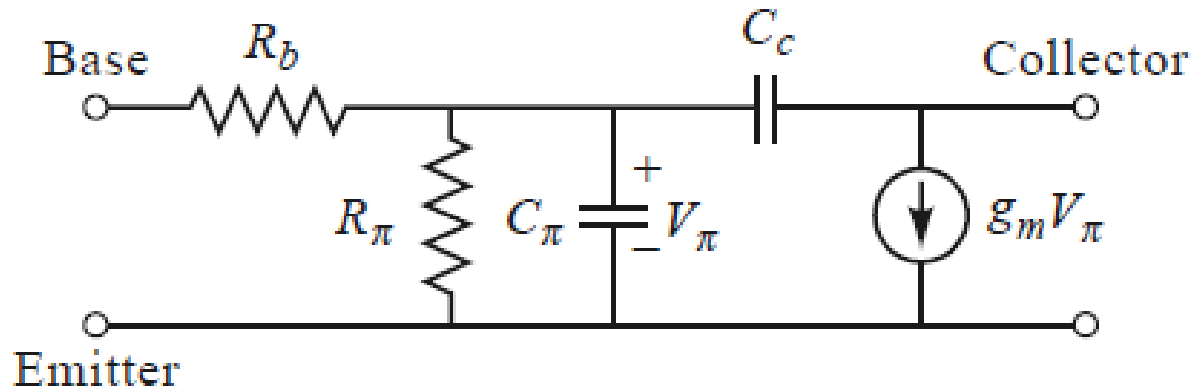
Circuitos de polarização e desacoplamento DC do transistor bipolar NPN



Característica $I \times V$ em DC

Transistor Bipolar de Silício

- Circuito equivalente π -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 τ_{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**

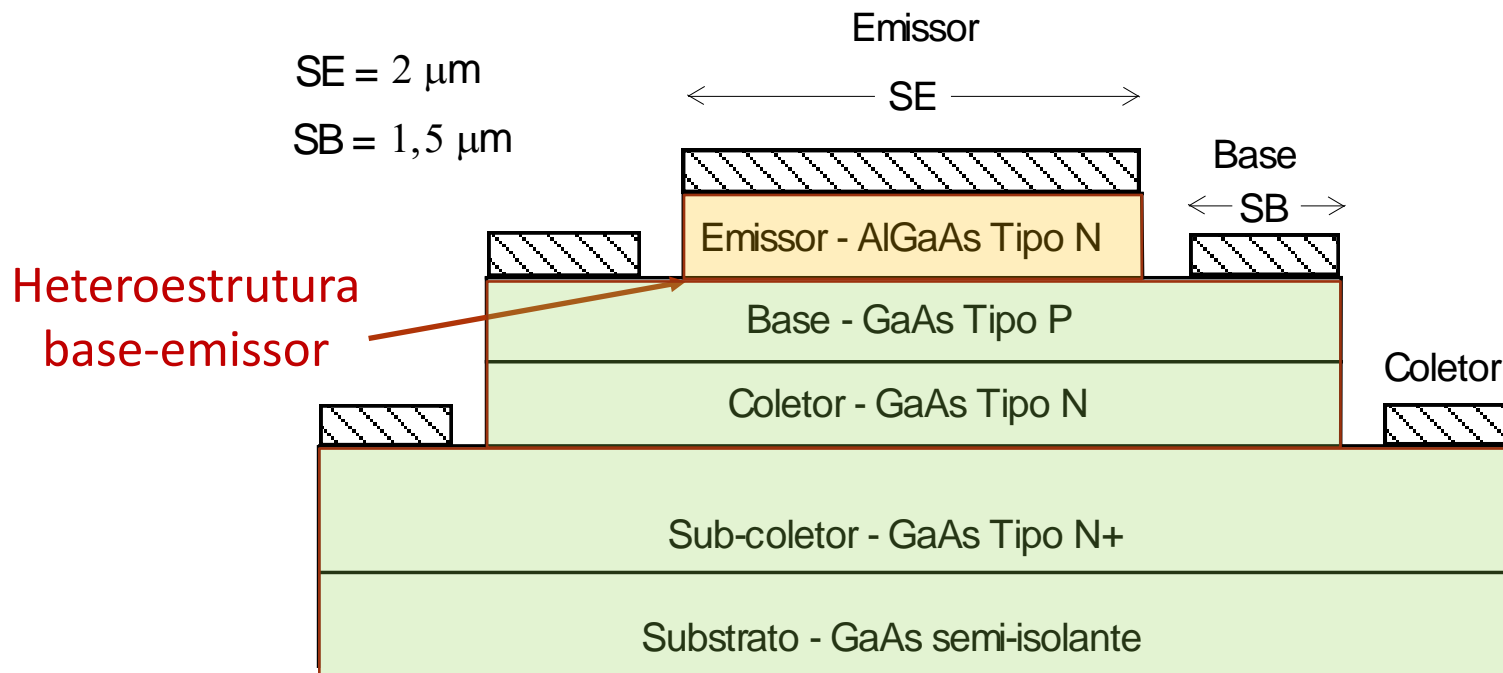
Emissor → **Si-Ge**
Base → **Si**

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 $1 \text{ a } 3 \text{ mm}$

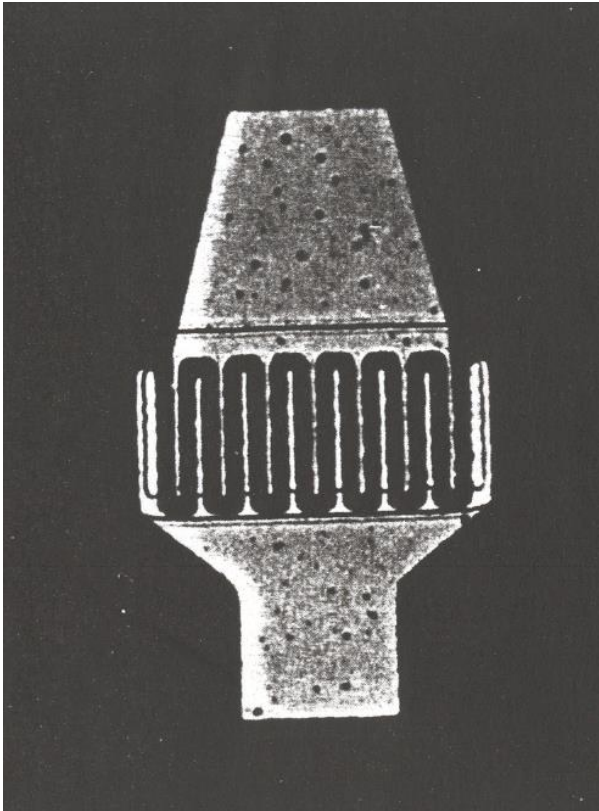
$$f_T \text{ e } f_{MAX}: 100 \text{ a } 200 \text{ GHz}$$

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

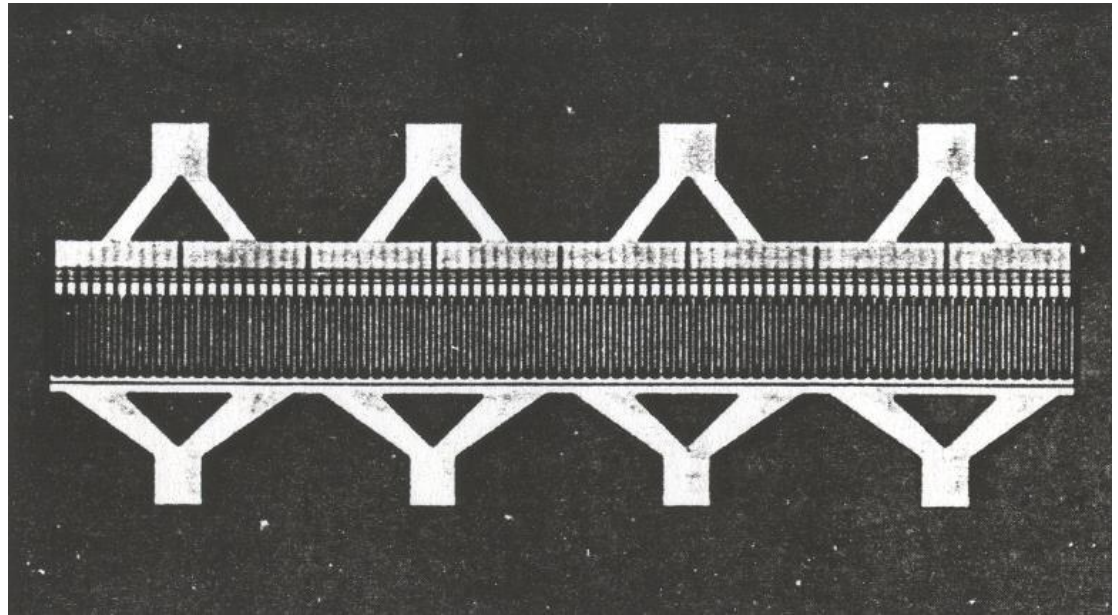
f_t frequência em que ganho de corrente cai a 1

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

Transistor Bipolar de Silício

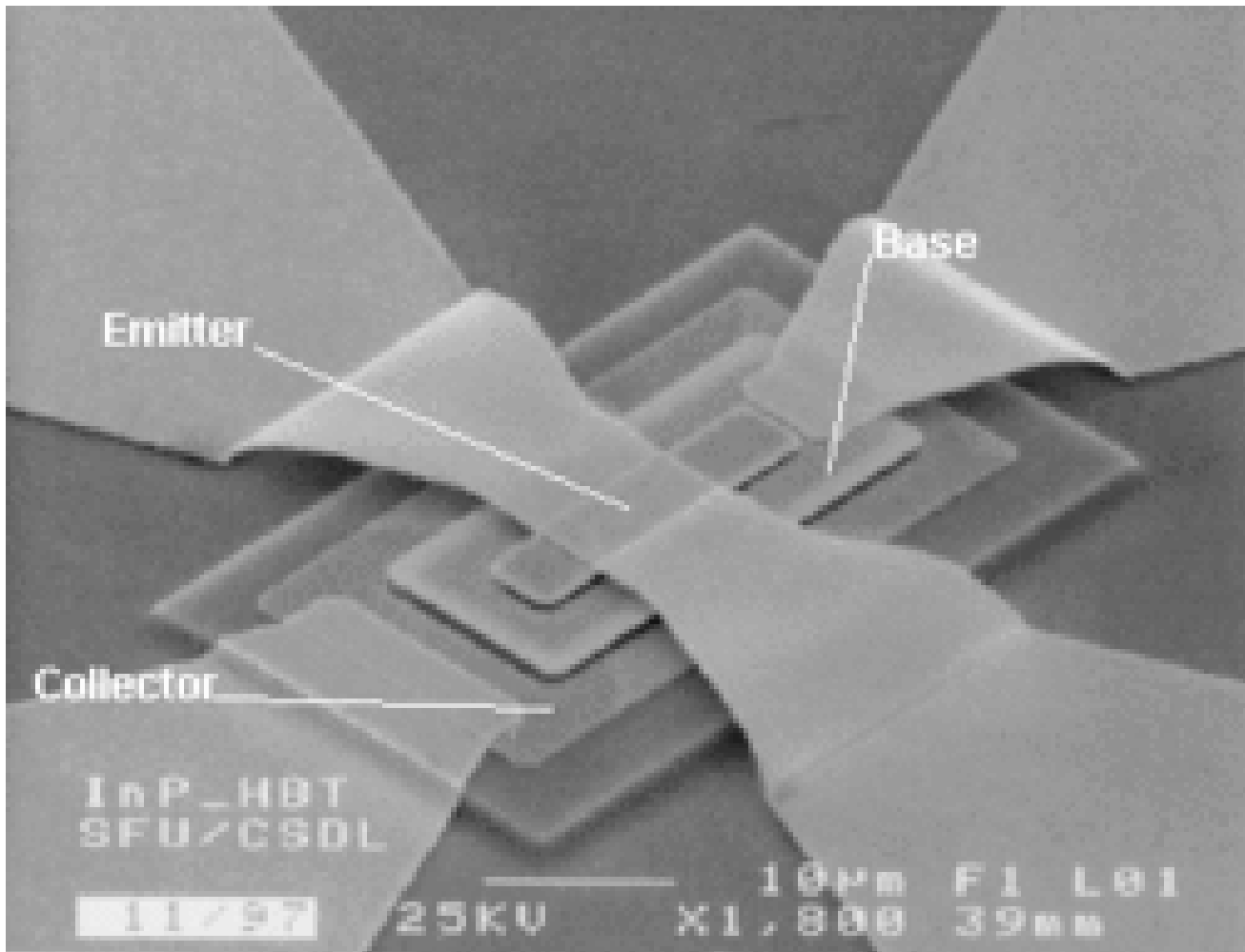


Baixo ruído
largura de emissor: 1 mm



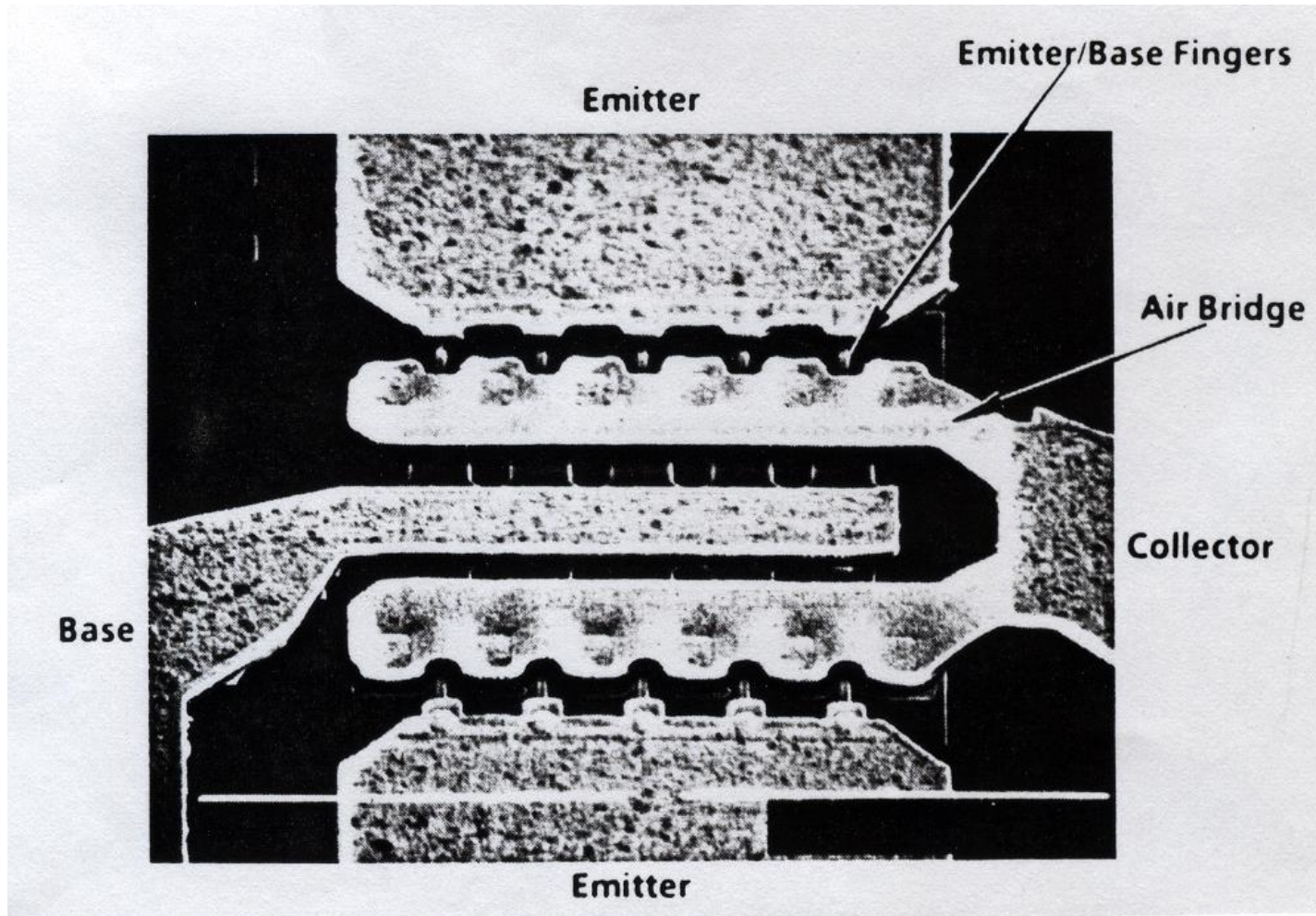
Potência
5 W em 2 GHz

HBTs



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

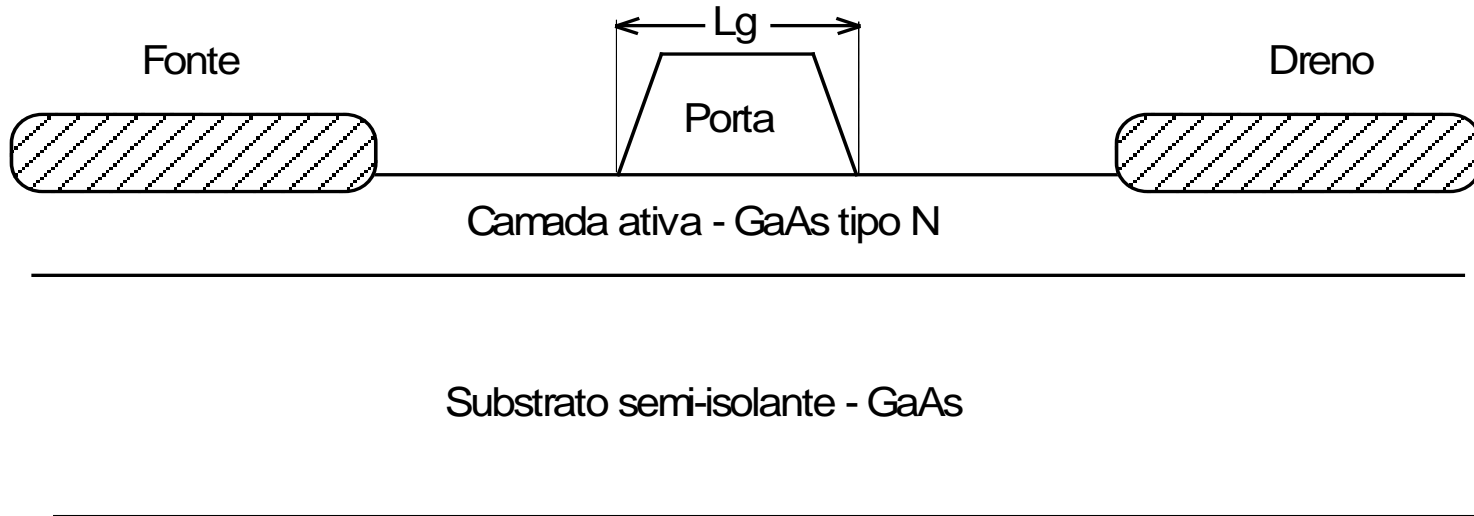
HBTs



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

Transistor de Efeito de Campo - MESFET

Secção transversal do MESFET



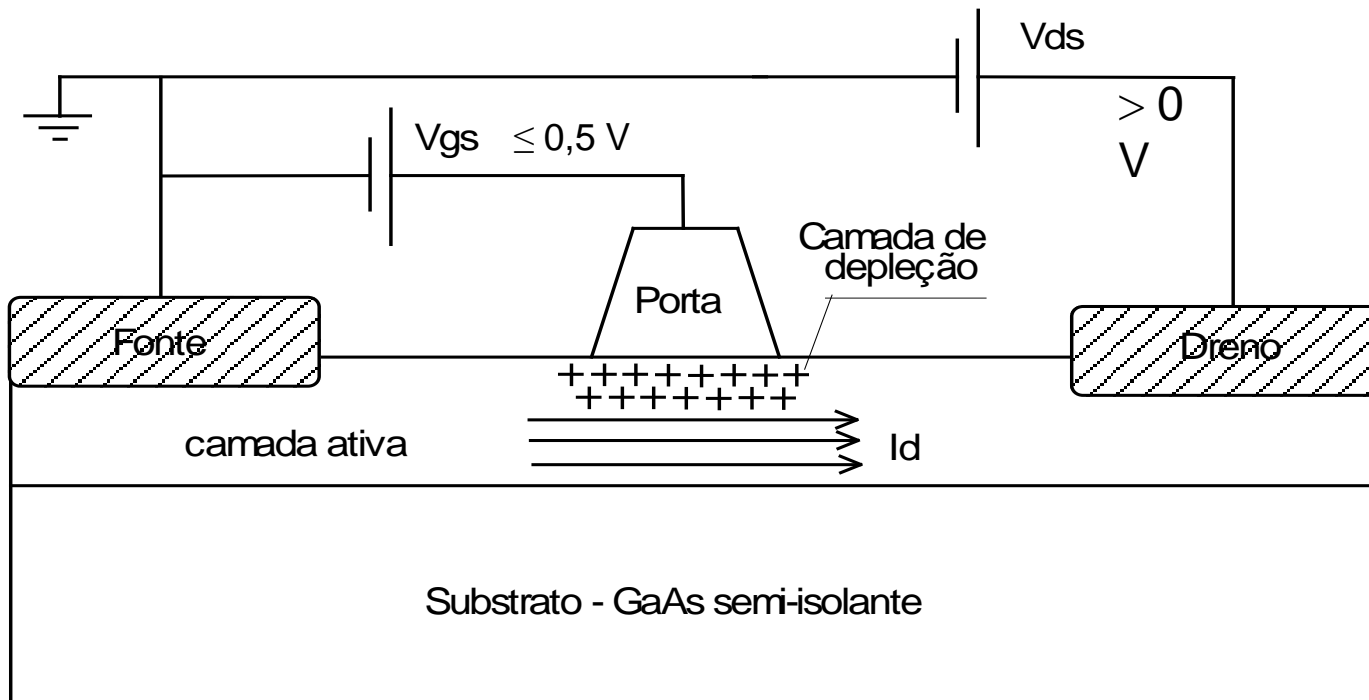
Fonte e dreno: contatos ôhmicos

Porta: diodo Schottky

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

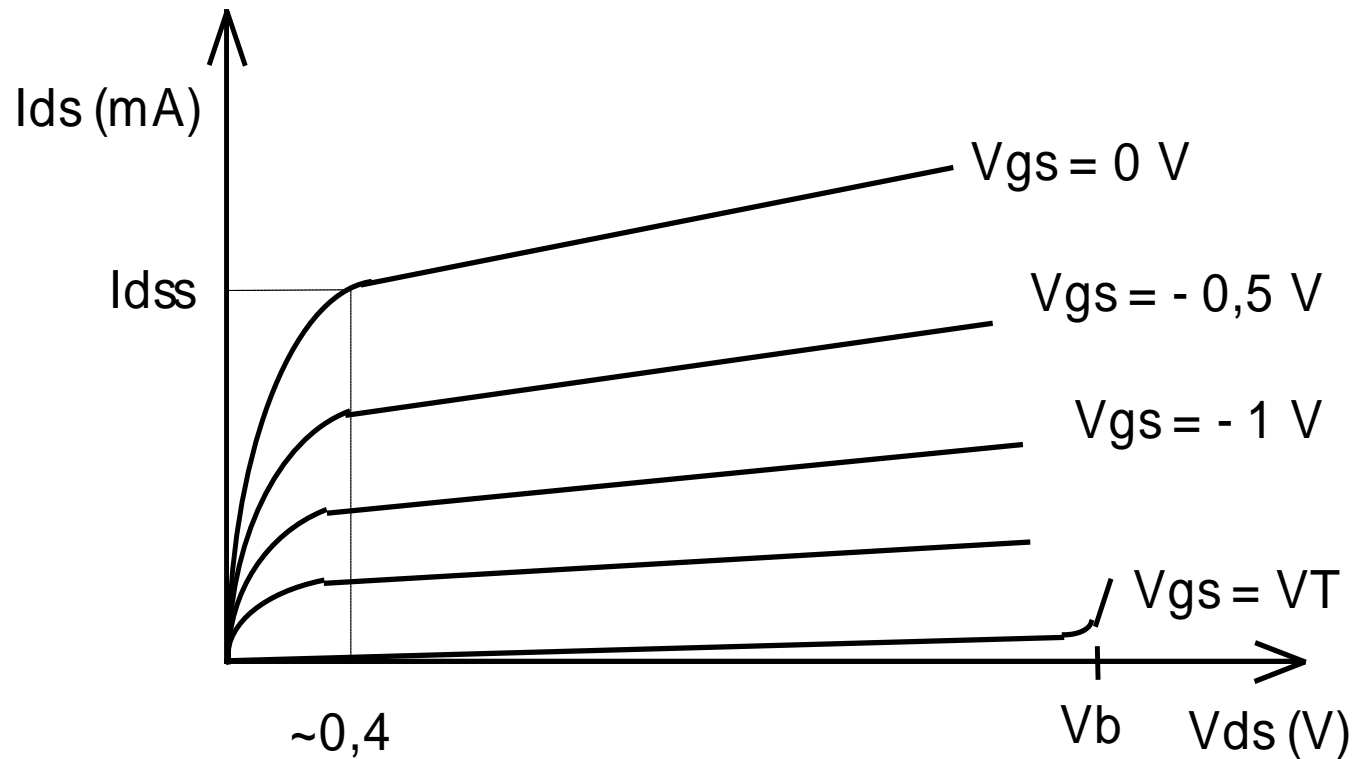
Camada ativa: $0,15 \mu\text{m}$ de espessura,
(p.e.) $3 \cdot 10^{17}$ dopantes/ cm^3

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

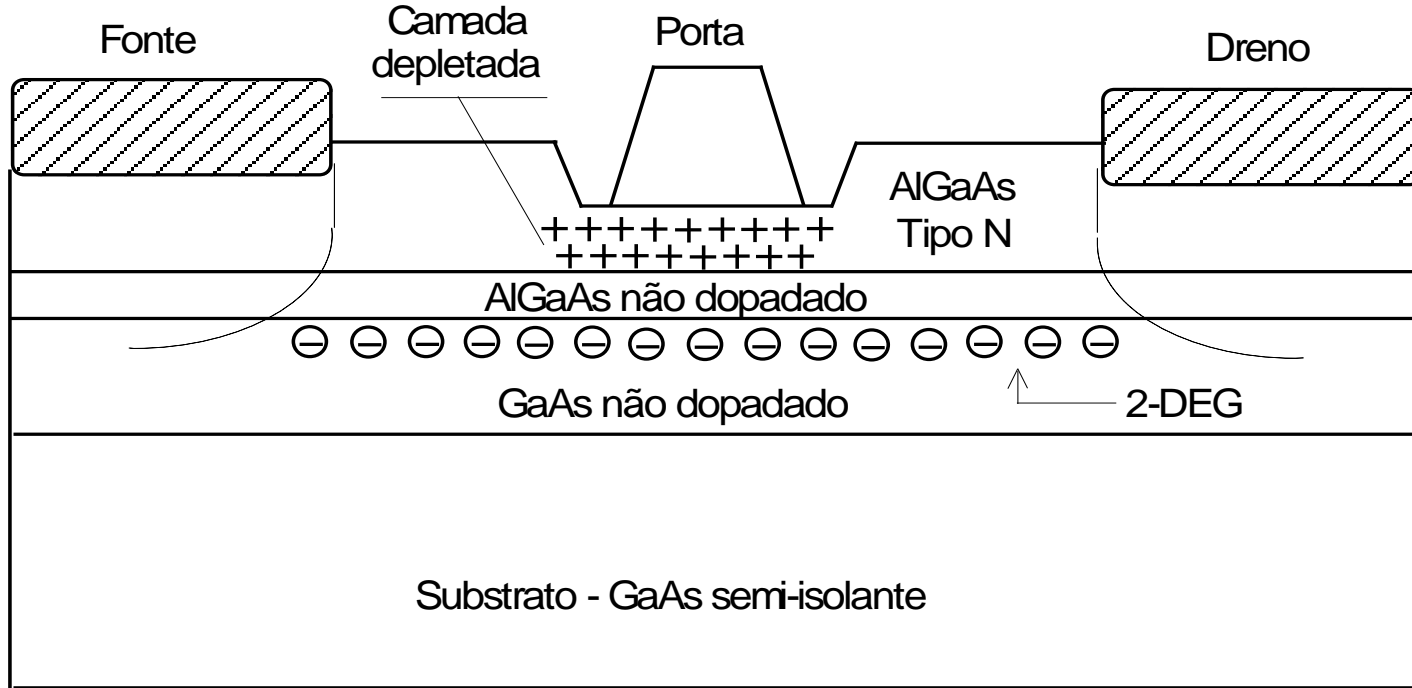
- Camada ativa

- 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

Transistor de Efeito de Campo - HEMT



Secção transversal do HEMT

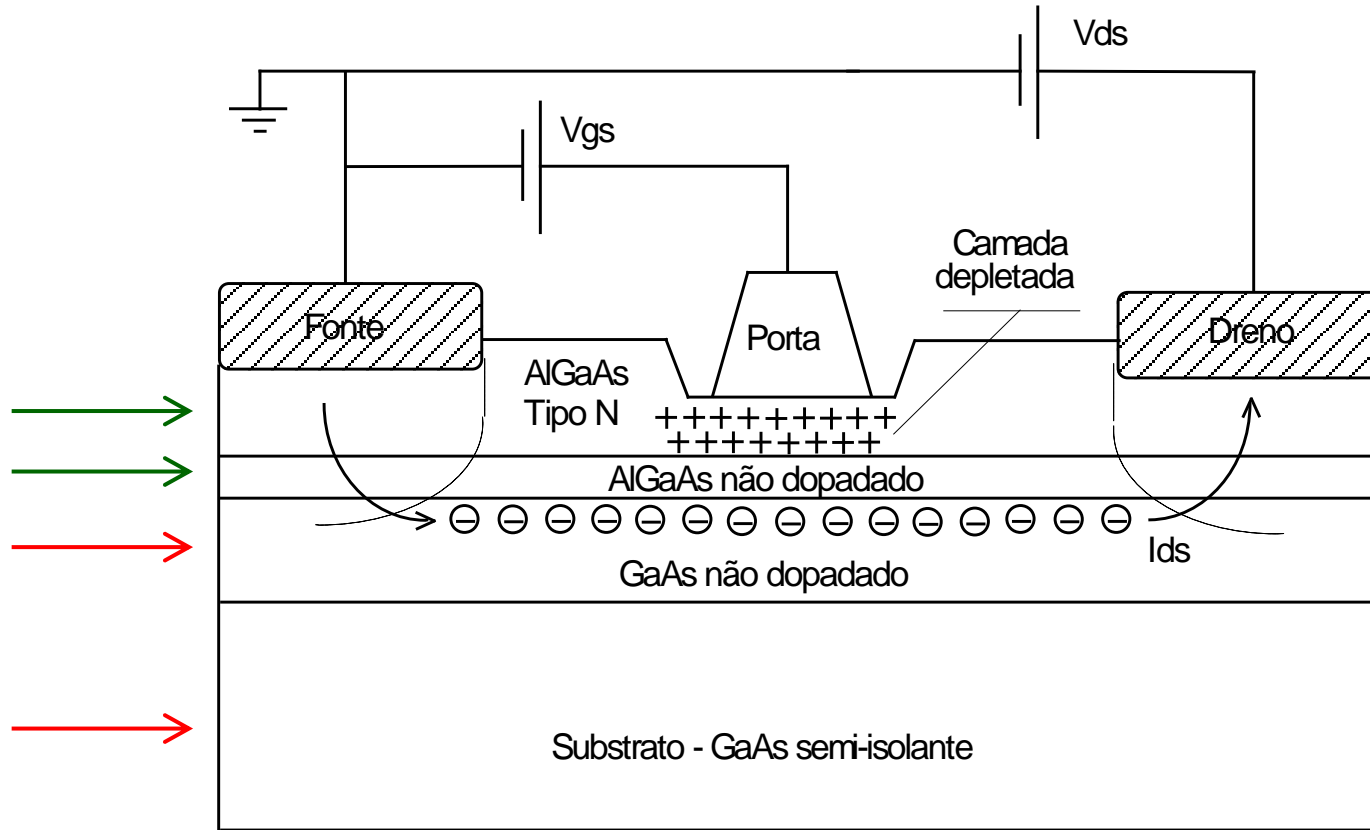
Heteroestrutura: **AlGaAs/GaAs**

Camada de AlGaAs tipo N: 600 Angstroms, $1 \cdot 10^{18}$ dopantes/cm³

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

Portadores de corrente: elétrons com alta mobilidade

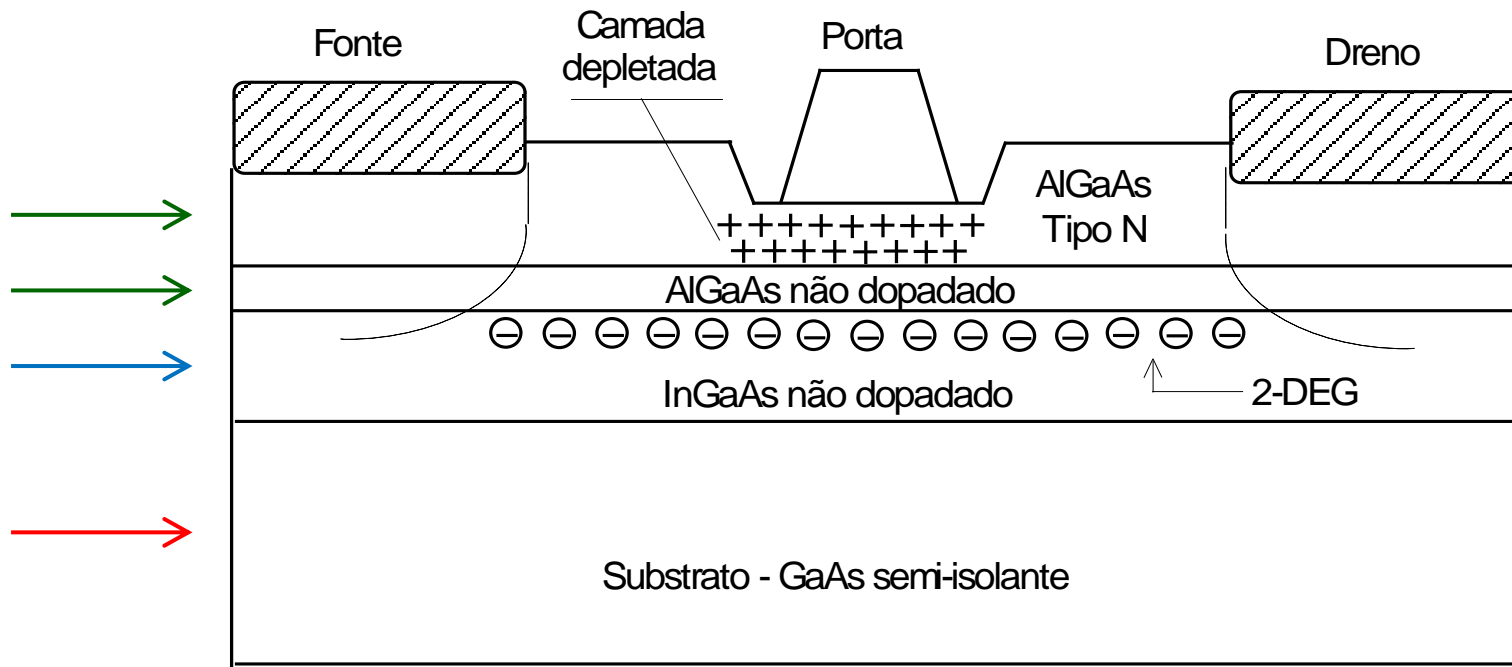
Princípio de Operação do HEMT



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

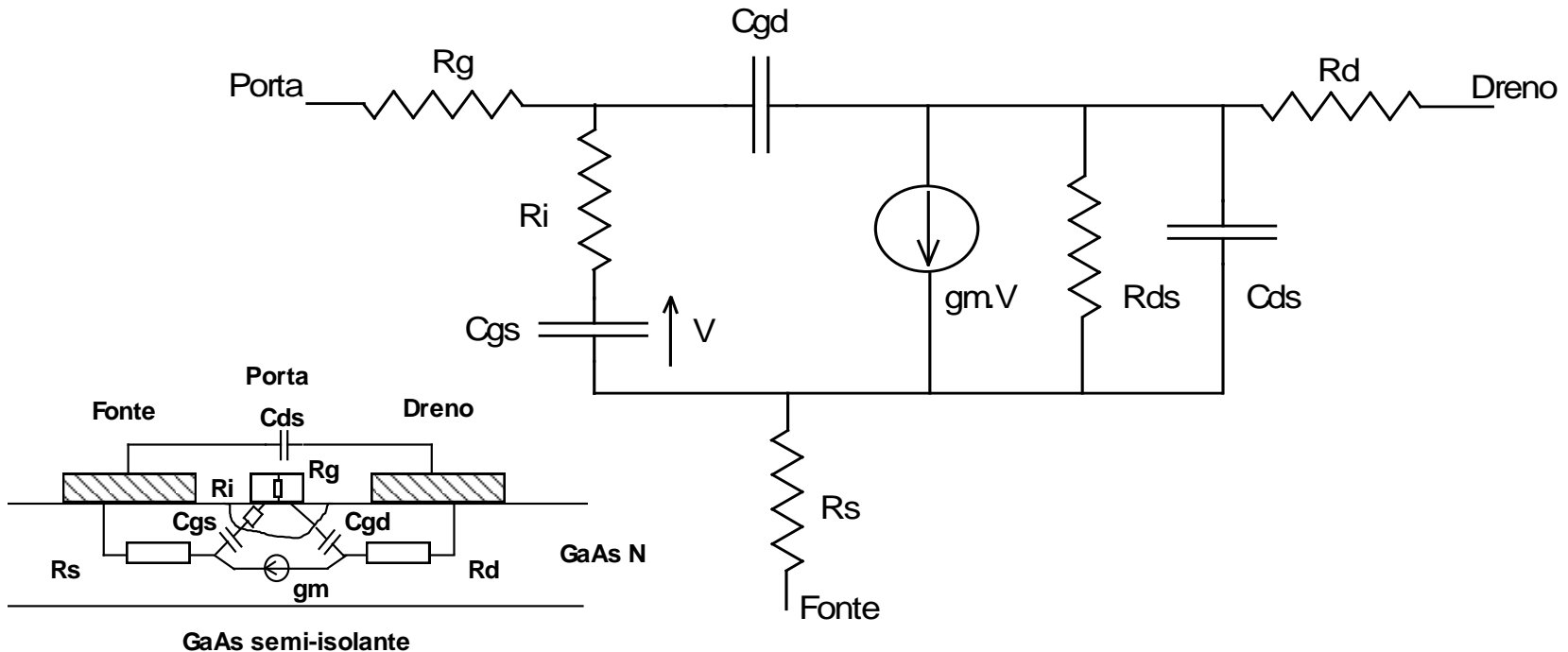


Heteroestrutura: **AlGaAs/InGaAs**

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_{gd} : capacitância porta-dreno

C_{ds} : capacitância dreno-fonte

R_i : resistência de carga de C_{gs}

g_m : transcondutância

$1/R_{ds}$: condutância dreno-fonte

MESFET e HEMT

Transistores de baixo ruído

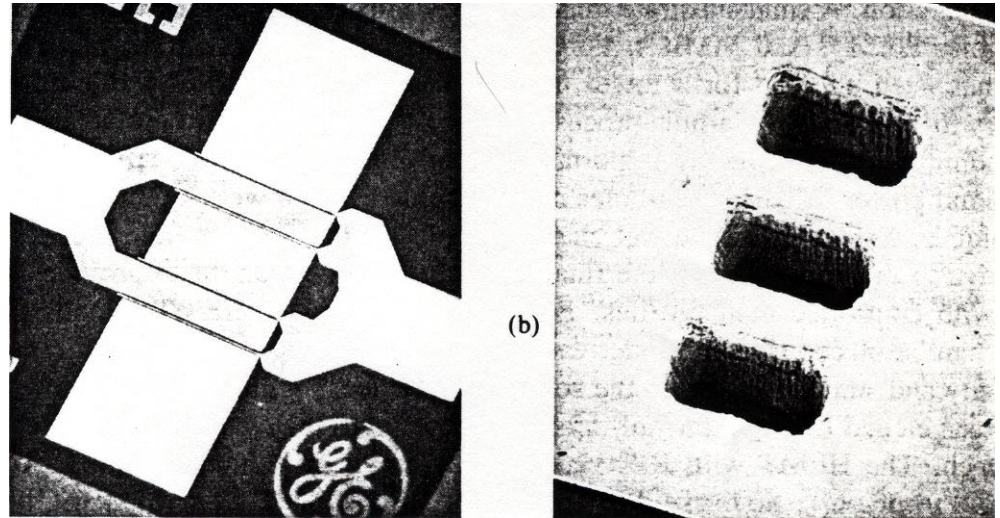
Dispositivo	$L_g \times W$ (μm^2)	Figura de ruído (dB)	$G_{\text{associado}}$ (dB)	Frequência (GHz)
MESFET	0,3 x 280	1,6	9,0	12
HEMT	0,3 x 280	0,6	10,5	12
PHEMT	0,2 x 200	0,5	11,5	12

HEMTs



HEMT de baixo ruído

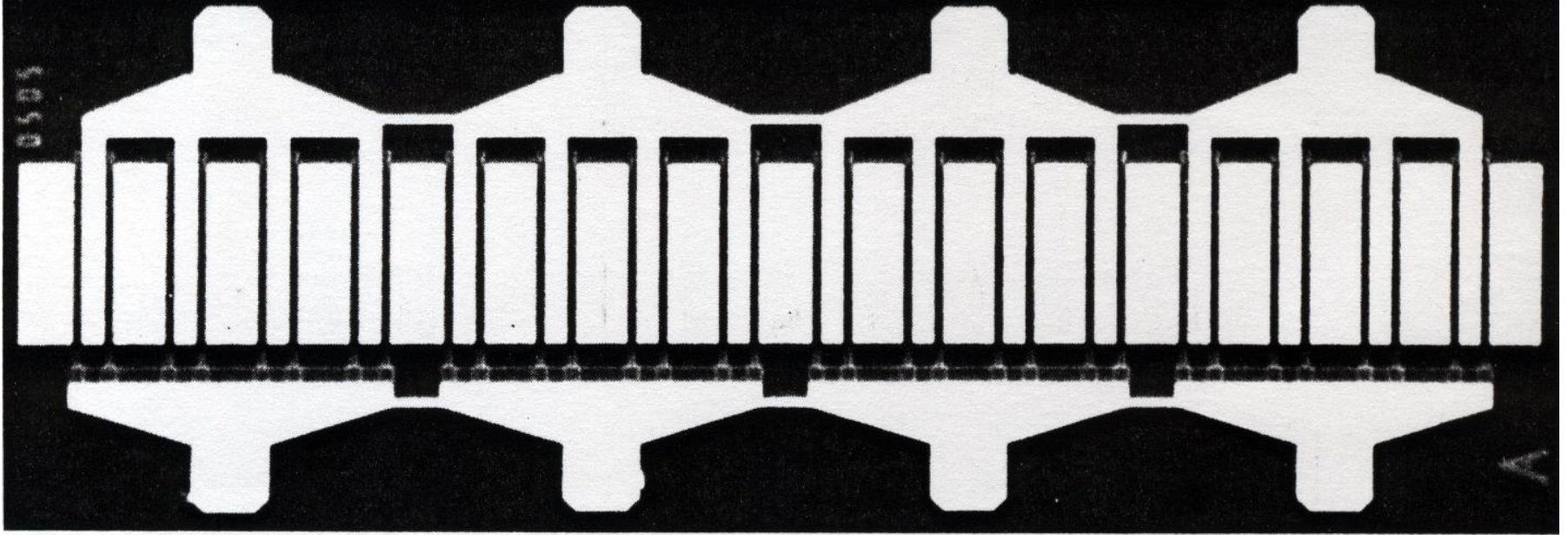
Porta: 2 dedos com $0,15 \times 25 \mu\text{m}^2$



HEMT de potência

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

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
- Modelos de grandes sinais
 - Empregados no projeto de circuitos não-lineares
 - Amplificadores de potência
 - Misturadores de frequência
 - Osciladores
 - Multiplicadores de frequência e outros

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

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

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 “Tocuchstone”
 - 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

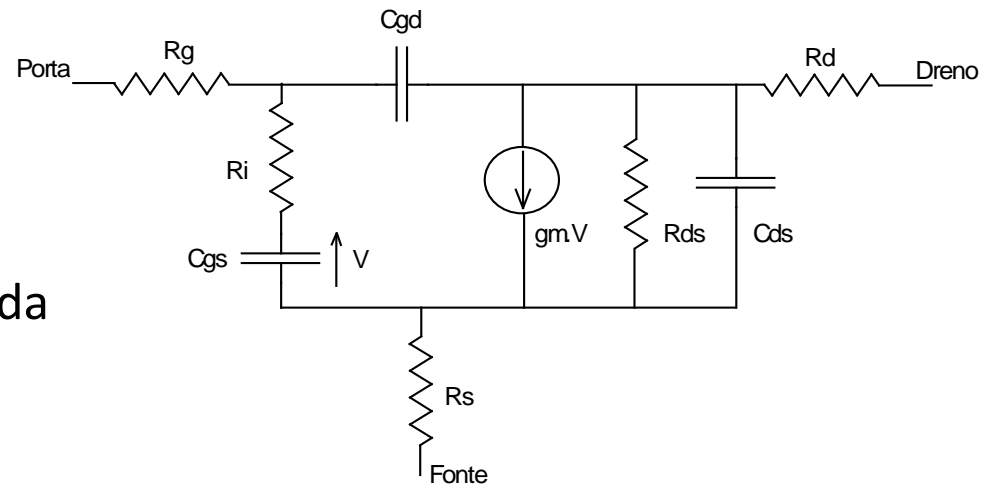
Frequência (GHz)	S11		S21		S12		S22	
	módulo	fase	módulo	fase	módulo	fase	módulo	fase
0.1	0.96	-7	3.59	174	0.01	86	0.999	-2
0.5	0.93	-32	3.41	152	0.05	69	0.95	-13
0.9	0.83	-56	3.13	132	0.08	55	0.91	-22
1.0	0.81	-61	2.99	128	0.08	53	0.9	-24
1.5	0.68	-89	2.61	107	0.1	40	0.84	-32
1.8	0.62	-104	2.38	96	0.11	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

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

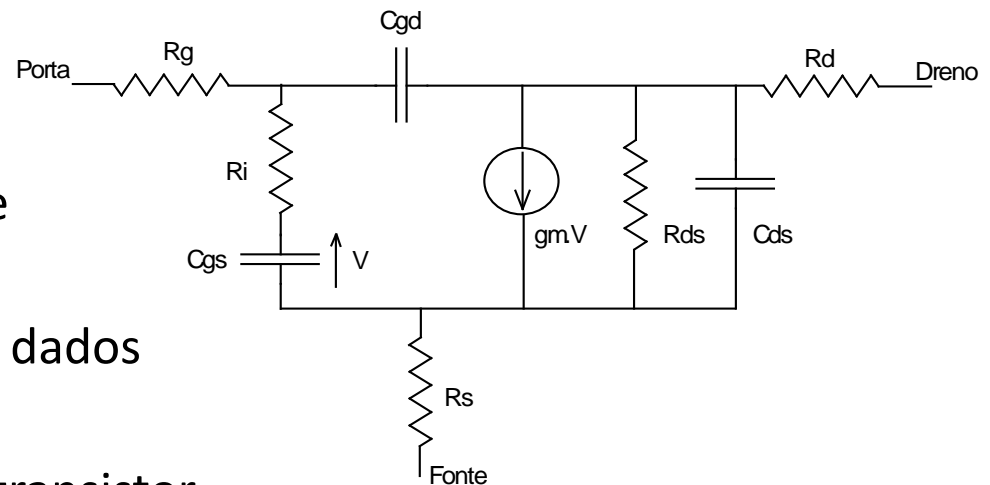
R 's, C 's e $g_m \rightarrow$ valores constantes para um dado ponto de polarização

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 desenvolvidas a partir de dados experimentais obtidos
- Diversos pontos de polarização do transistor
- Válidos para as condições de medida
 - Pontos de polarização DC
 - Faixa de frequência



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

R 's, C 's e $gm \rightarrow$ funções de

$$V_{GS}, V_{DS}, I_D$$