

# Electrónica Aplicada III

## Introducción

Universidad Tecnológica Nacional de Argentina - F. R.  
Córdoba Departamento de Electrónica - Electrónica  
Aplicada III

Daniel Rabinovich [drabinovich@electronica.frc.utn.edu.ar](mailto:drabinovich@electronica.frc.utn.edu.ar)

Ramón Oros [roros@electronica.frc.utn.edu.ar](mailto:roros@electronica.frc.utn.edu.ar)

Claudio Paz [cpaz@frc.utn.edu.ar](mailto:cpaz@frc.utn.edu.ar)

Año 2016

# Referencias

- [1] Rodriguez Mallo, Jorge N., UTN FRBA. Introducción RF.
- [2] François de Dieuleveult, Olivier Romain; Électronique Appliquée aux Hautes Fréquences, Dunod, Paris, 2008
- [3] C. J. Kikkert; RF Electronics, Design and Simulation; James Cook University, Australia, 2013.
- [4] Inder J. Bahl, Fundamentals of RF and Microwave Transistor Amplifier, John Wiley & Sons, 2009

# Referencias

- [1] ADS fundamentals, Slides and Lab Exercises; [https://www.utdallas.edu/~rmh072000/Site/Software\\_and\\_Links\\_files/000\\_contents.pdf](https://www.utdallas.edu/~rmh072000/Site/Software_and_Links_files/000_contents.pdf)
- [2] AWR fundamentals,  
[https://awrcorp.com/download/faq/english/docs/getting\\_started/ch06.html](https://awrcorp.com/download/faq/english/docs/getting_started/ch06.html)
- [3] VNA,  
<http://www.keysight.com/en/pcx-x2015001/network-analyzers?nid=-32503.0&cc=US&lc=eng>
- [4] [http://www.birdrf.com/Products.aspx?sc\\_lang=es-ES#.Vv0RJDbhAy4](http://www.birdrf.com/Products.aspx?sc_lang=es-ES#.Vv0RJDbhAy4)
- [5] NFA,  
<http://www.keysight.com/en/pc-1000002266%3Aepsg%3Apgr/nfa-series-noise-figure-analyzers?cc=AR&lc=eng>
- [7] W. A. Davis, K. Agarwal; *Radiofrequency Circuit Design*; John Wiley; 2001.

# Tipos de transistores de RF

(BJTs),  
(MOSFETs) metal oxide semiconductor field effect transistors,  
(LDMOS) laterally diffused metal oxide semiconductor transistors,  
(MESFETs) GaAs metal semiconductor field effect transistors, or simply FETs,  
(HEMTs) both GaAs and InP based high electron mobility transistors,  
(HBTs) both silicon germanium (SiGe) and GaAs based heterojunction bipolar transistors,  
HEMTs silicon carbide (SiC) based FETs and GaN.

# Transistores de RF

Estos dispositivos pueden operar en un rango de 2 V para dispositivos de pequeña señal, hasta los 48 V para aplicaciones de potencia.

Para aplicaciones de pequeña señal de los dispositivos generalmente se operan a bajos voltajes de drenaje, 2-3 V; para un rendimiento mejorado y ruido para la aplicación de potencia, estos dispositivos funcionan a 5-10 V.

# Transistores de RF

Several commercial foundries provide GaAs and InP based FET, pHEMT, and HBT and Si based transistor processes for custom designs.

La fabricación de transistores comienza con la selección de un wafer type o substrate. Varios materiales substrate son usados para dispositivos activos tales como silicon, silicon carbide, sapphire, GaAs, InP y GaN.

Excepto el Si, todos los otros materiales substrate se llaman compound semiconductors. El Silicon domina el mercado. GaAs es el segundo, luego InP, SiC y el GaN emerge ahora.

# Transistores de RF

**Table 4.1** Comparison of Transistor/Monolithic Integrated Circuit Substrates<sup>a</sup>

Property	Silicon	SiC	GaAs	InP	GaN
Semi-insulating	No	Yes	Yes	Yes	Yes
Resistivity ( $\Omega \bullet \text{cm}$ )	$10^3 - 10^5$	$> 10^{10}$	$10^7 - 10^9$	$\sim 10^7$	$> 10^{10}$
Dielectric constant	11.7	9.7	12.9	14	8.9
Electron mobility ( $\text{cm}^2/\text{V} \bullet \text{s}$ )	1450	500	8500	4000	800
Saturation electrical velocity ( $\text{cm/s}$ )	$9 \times 10^6$	$2 \times 10^7$	$1.3 \times 10^7$	$1.9 \times 10^7$	$2.3 \times 10^7$
Radiation hardness	Poor	Excellent	Very good	Good	Excellent
Density ( $\text{g/cm}^3$ )	2.3	3.1	5.3	4.8	6.1
Thermal conductivity ( $\text{W/cm} \bullet ^\circ\text{C}$ )	1.45	3.5	0.46	0.68	1.3
Operating temperature ( $^\circ\text{C}$ )	250	$> 500$	350	300	$> 500$
Energy gap (eV)	1.12	2.86	1.42	1.34	3.39
Breakdown field ( $\text{kV/cm}$ )	$\approx 300$	$\geq 2000$	400	500	$\geq 5000$

<sup>a</sup>Pure materials at room temperature.

# Transistores de RF

La propiedad semi-aislante del material de sustrato es crucial para proporcionar un mayor aislamiento del dispositivo y una menor pérdida dieléctrica para mmic (MMICs).

Mientras que los dispositivos de silicio son capaces de operar hasta 100 GHz, la baja resistividad del silicio impide el desarrollo de alto rendimiento de la integración monolítica.

Sustratos semi-aislantes de GaAs proporcionan aislamiento hasta aproximadamente 100 GHz.



# Transistores de RF

InP se utiliza para ondas milimétricas hasta 280 GHz. HEMTs pseudomórficos fabricados en sustrato InP exhiben un rendimiento mayor de ganancia, figura de ruido y potencia que un GaAs pHEMT basado de geometría similar.

El sustrato de InP soporta densidades de electrones de gas de dos dimensiones más altas resultando en altos valores de transconductancia.

# Transistores de RF

El alto valor de transconductancia en pHEMTs basados de InP es responsable de los valores de ultra bajo ruido, alta ganancia y alta frecuencia de funcionamiento.

Para aplicaciones de alta potencia y alta temperatura, materiales de banda prohibida de ancho, con relativamente alta conductividad térmica, como SiC y GaN, juegan un papel importante.

Los recientes avances en las técnicas epitaxiales han hecho posible el desarrollo de dispositivos activos en estos sustratos

# Transistores de RF

En comparación con los BJT de Si, los GaAs FET y HEMTs tienen mayor frecuencia de operación, menor factor de ruido, mayor potencia y capacidad PAE a menores tensiones de funcionamiento.

El GaAs FET como un transistor discreto se ha utilizado en los amplificadores para aplicaciones de banda ancha, de potencia media, alta potencia y alta eficiencia circuito híbrido integrado de microondas (MIC).

# Transistores de RF

HEMTs tienen ventaja de rendimiento en ruidos ultra bajos, alta linealidad y aplicaciones de alta frecuencia.

Los pHEMTs tienen un excelente rendimiento de potencia en ondas milimétricas Ku.

HBT son populares como dispositivos de potencia a frecuencias de RF y microondas de baja y están siendo operados utilizando con una sola fuente de alimentación. Ofrecen una mejor linealidad y ruido de fase más baja que los FET y HEMTs.

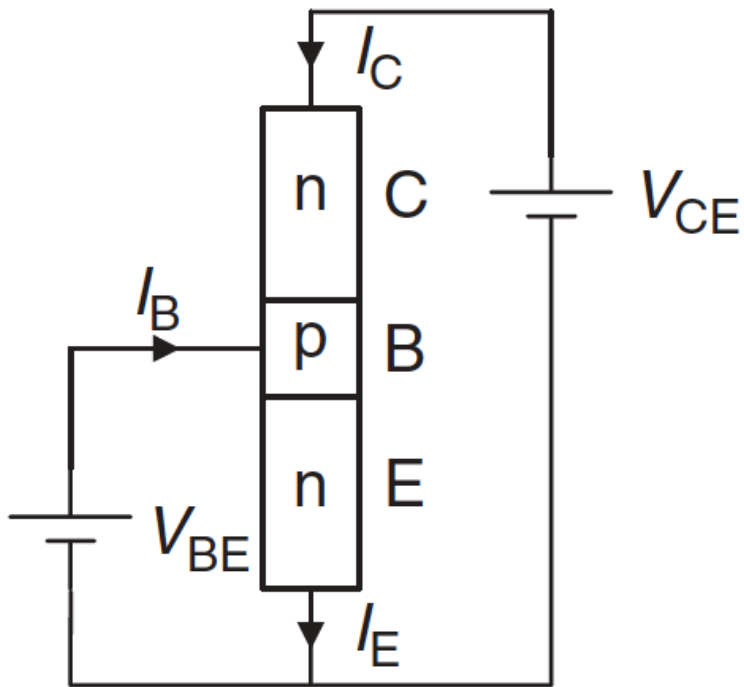
# Transistores de RF

Dispositivos bipolares en base Si son requeridos en una sola fuente de alimentación, tienen una baja fugas y bajo nivel de ruido  $1/f$ , y se produce mucho más barato en Si.

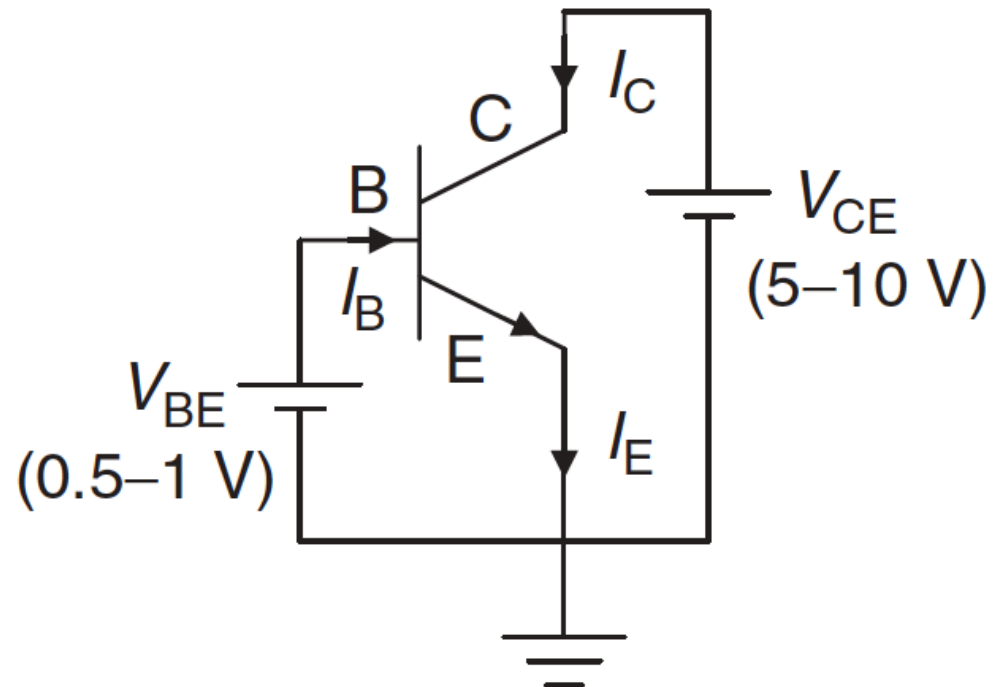
Los SiGe HBT son de bajo costo y el rendimiento eléctrico similar al de GaAs HBT, excepto que tienen tensión de ruptura inferior.

# Transistores de RF

## BJT

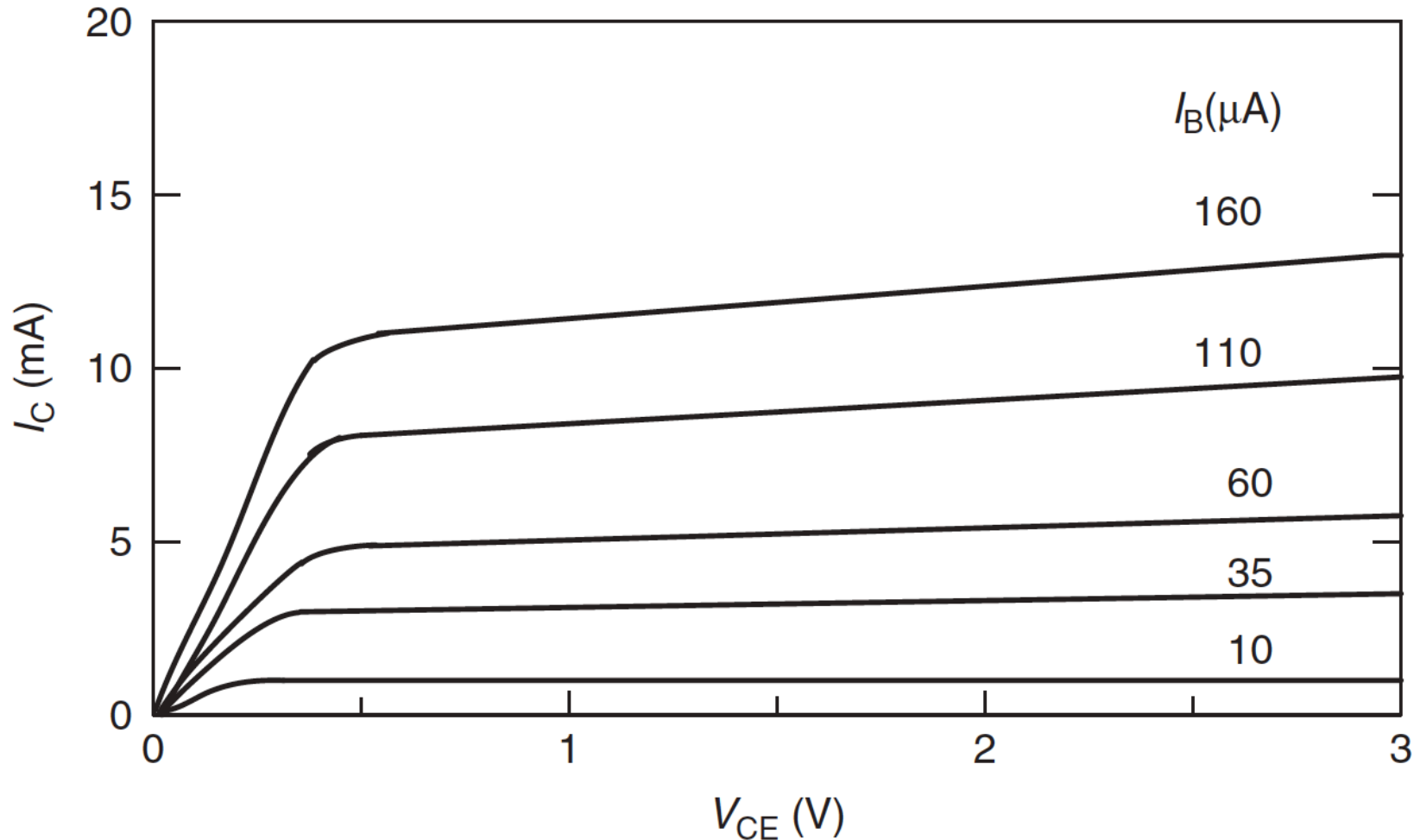


(a)



(b)

# Transistores de RF



I–V representation of a  $0.4 \times 100 \mu\text{m}^2$  emitter area bipolar transistor in common-emitter configuration.

$$I_E = I_s[\exp(qV_i/kT) - 1] \quad \text{and} \quad \Delta I_C = \alpha \Delta I_E$$

The DC current gain  $\beta$  and the transconductance  $g_m$  are defined as

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

$$g_m = \frac{\Delta I_C}{\Delta V_{BE}} = \frac{q}{kT} \alpha I_E = \frac{I_E (\text{in mA})}{26}$$

where  $I_s$  = the surface combination depletion current

$I_B$  = base current

$q$  = electron charge =  $1.602 \times 10^{-19}$  C

$V_{BE}$  = base–emitter voltage

$V_i$  = built-in potential

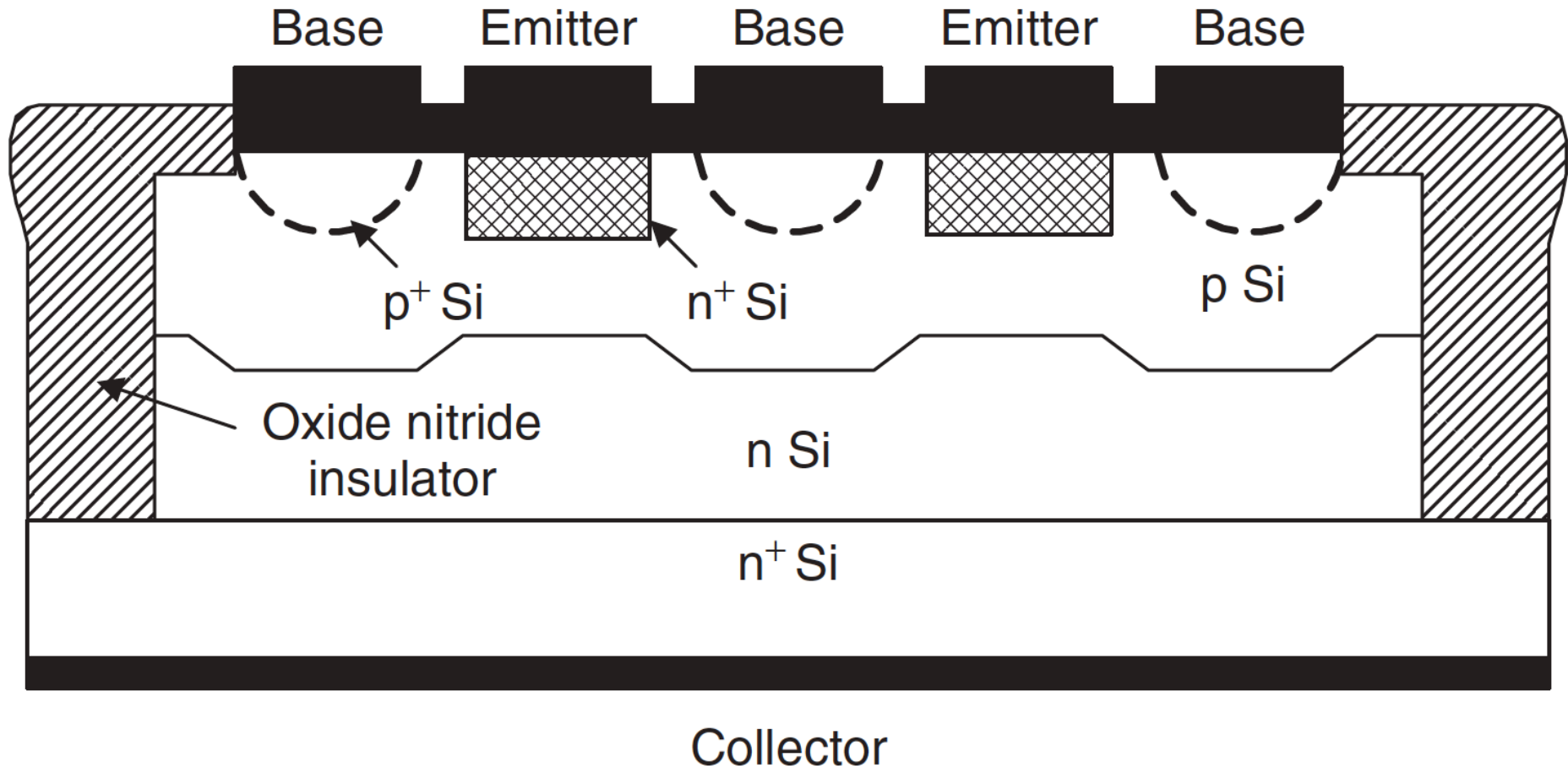
$k$  = Boltzmann constant =  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K

$T$  = temperature in kelvin units

$\alpha$  = low-frequency common-base current gain

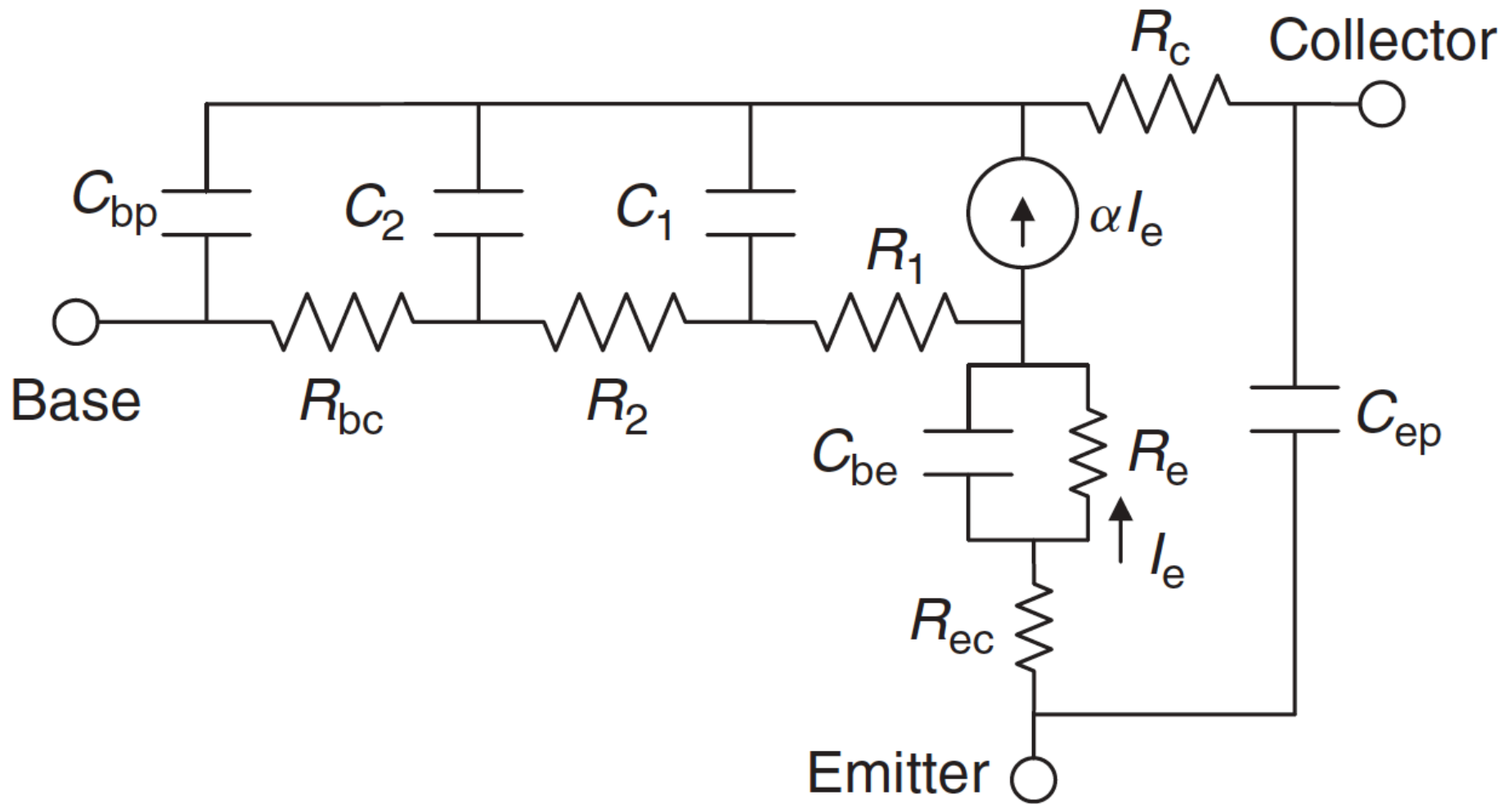


# Transistores de RF



Cross-sectional view of a BJT.

# Transistores de RF



Distributed T-equivalent circuit of a BJT.

# Transistores de RF

La Figura de mérito se expresa como:

$$\left(f_{\max}\right)^2 = \frac{f_T}{8 \pi R_b C_C}$$

Donde  $f_{\max}$  = max frecuencia donde la ganancia unilateral =1

$R_b$  =resistencia de la base

$C_C$  =capacidad colector-base

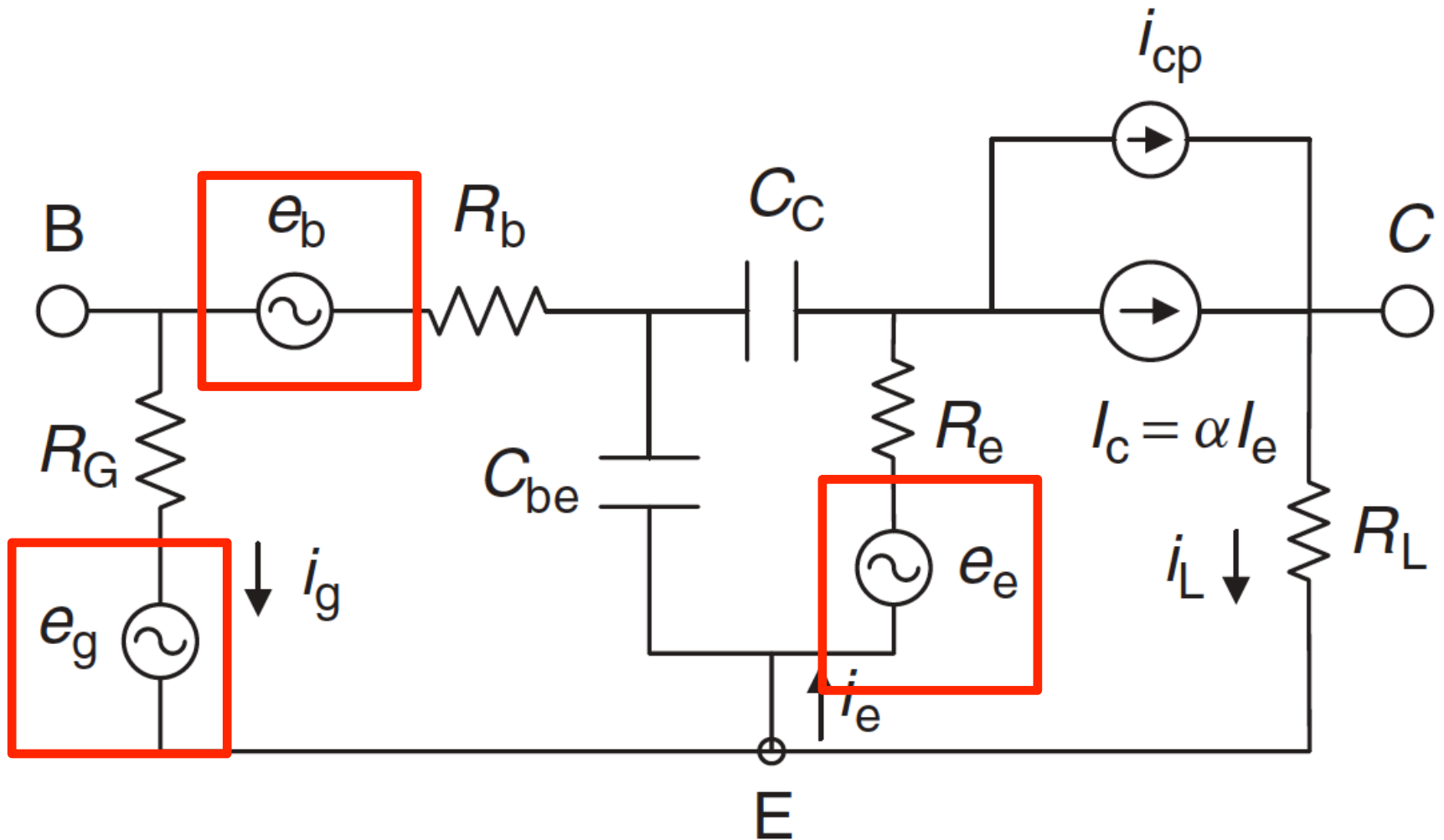
# Transistores de RF

$f_T$  =frecuencia de transición

$$f_T = \frac{1}{2\pi\tau_{ec}}$$

Donde  $\tau_{ec}$  es el tiempo de transición (tiempo de retardo de emisor a colector)

# Transistores de RF



High-frequency noise equivalent circuit of a common-emitter BJT.

# Transistores de RF

Las propiedades del ruido en alta frecuencia se puede caracterizar por tres fuentes de ruido.

$e_b$  Ruido térmico de base, debido al resistor de la base

$e_e$  Ruido térmico de emisor, debido a la resistencia de emisor

$e_g$  Ruido térmico de fuente, debido al resistor de la generador

# Transistores de RF

La máxima potencia de salida operando en clase A es

$$P_{\max} = \frac{1}{4} V_{CE} I_{\max}$$

Si

$$V_{CE} = 5V$$

$$I_{\max} = 200mA$$

$$P_{\max} = 250mV$$

$$(24dBm)$$

# Transistores de RF

## **GaAs MESFET**

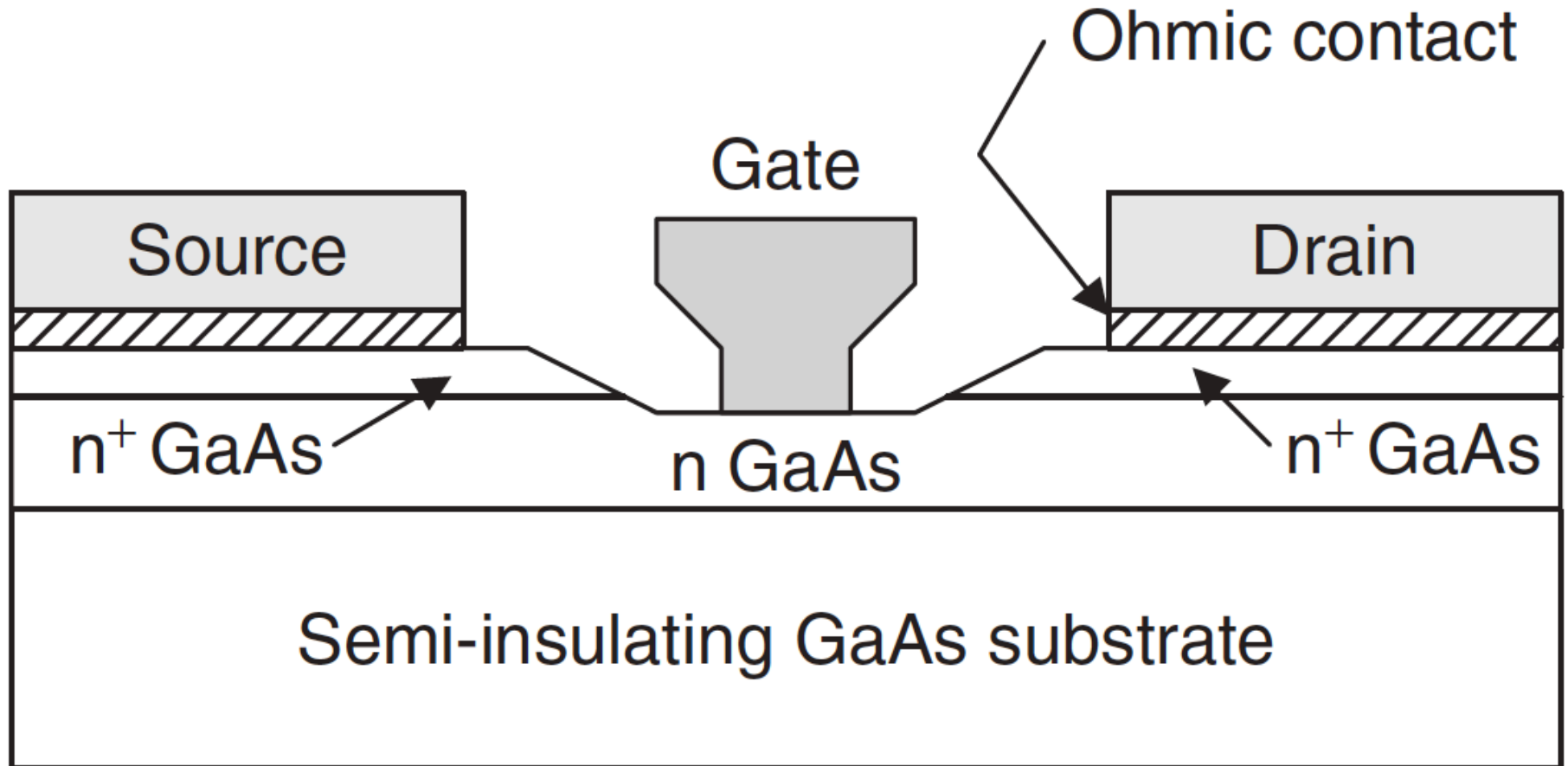
Un MOSFET consiste en una capa altamente conductor de alta calidad de la capa semiconductor de tipo n colocado en un (ej, de alta resistividad) substrato semi-aislante.

El canal conductor se interconecta con la circuitería externa a través de dos contactos óhmicos (llamados la fuente y de drenaje), separados por una distancia de 3–4  $\mu\text{m}$ .

El electrodo de puerta se construye mediante la formación de un rectificador (barrera Schottky) de contacto entre los dos contactos óhmicos.



# Transistores de RF



Physical cross section of a MESFET

# Transistores de RF

La profundidad de los canales conductores es del orden de  $0,1-0.3 \mu\text{m}$  y está optimizado para que la región de agotamiento que se forma bajo el contacto Schottky (puerta) puede controlar de manera eficiente el flujo de corriente en el conductor o capa activa.

La profundidad real depende de la aplicación:

más delgada para aplicaciones de bajo ruido y más espesor para mas potencia y aplicaciones de conmutación.

El dispositivo se comporta como un interruptor de fuente de corriente controlada por voltaje y a elevadas velocidades de modulación.

# Transistores de RF

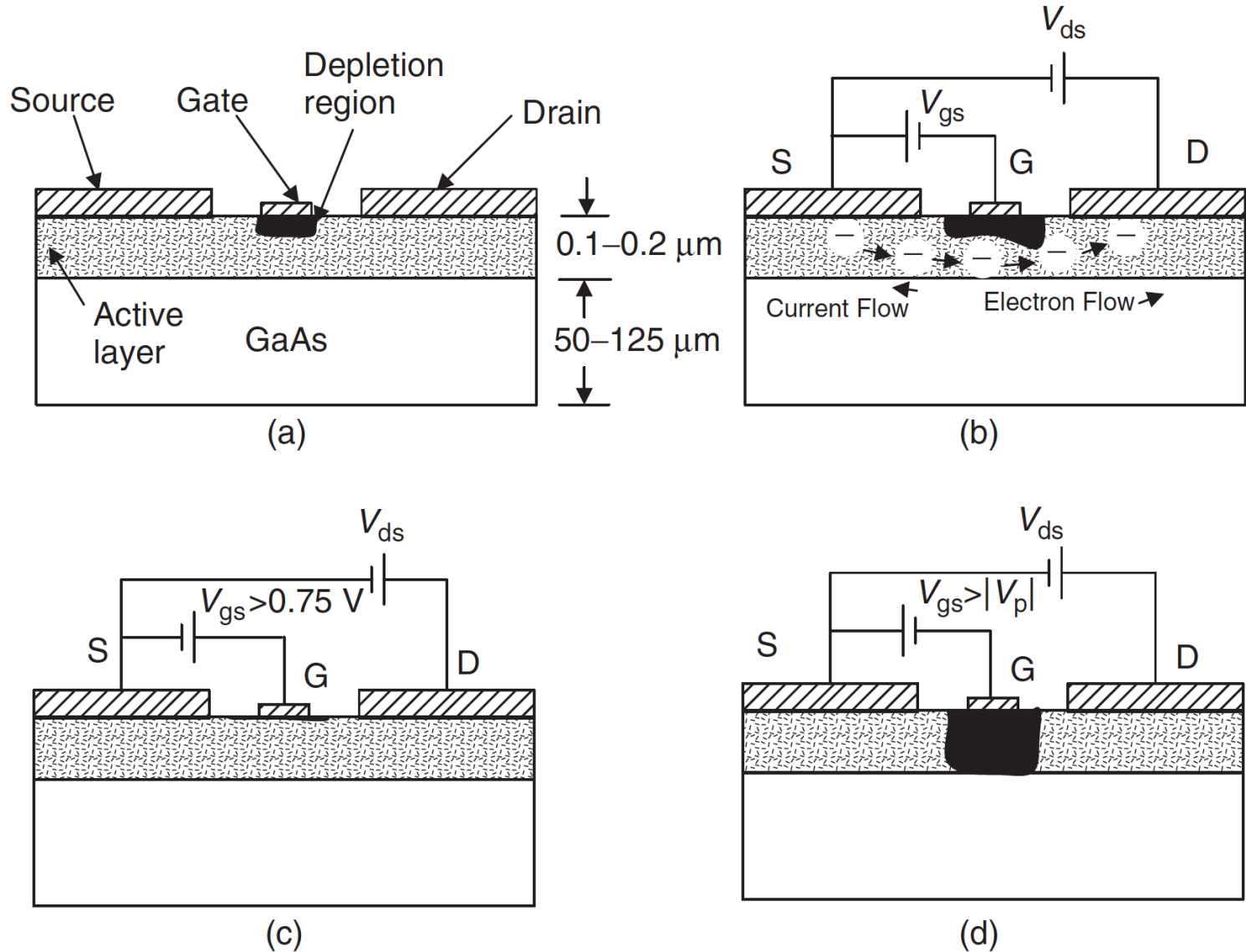
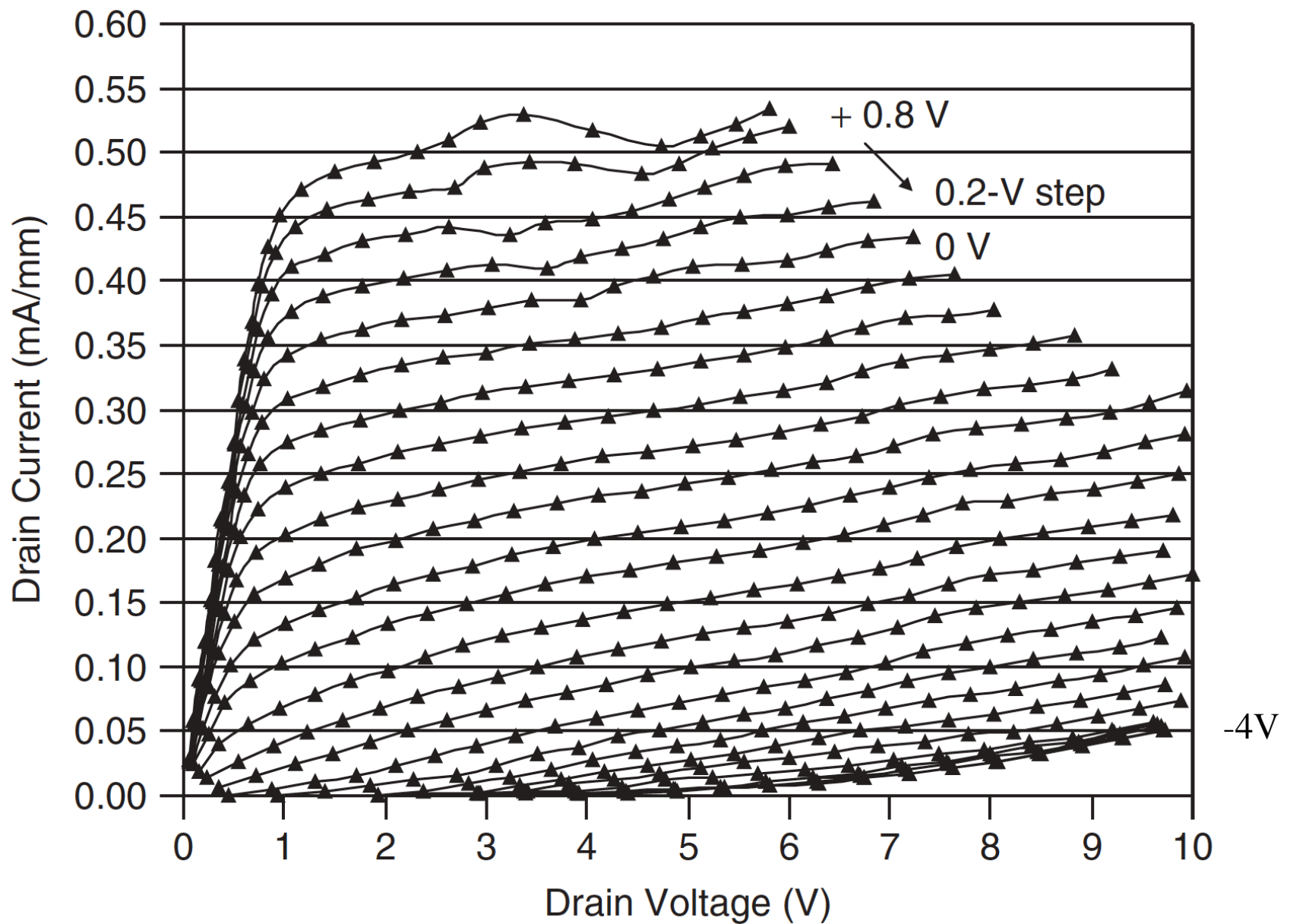


Illustration of FET operation under different bias conditions: (a) no bias, (b) normal bias, (c) channel fully open, and (d) channel pinched off.

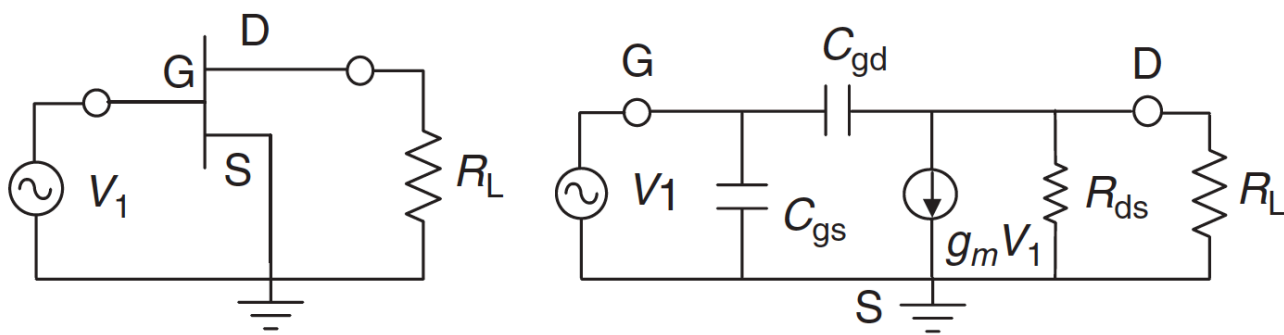
# Transistores de RF

La transconductancia de DC está dada por:

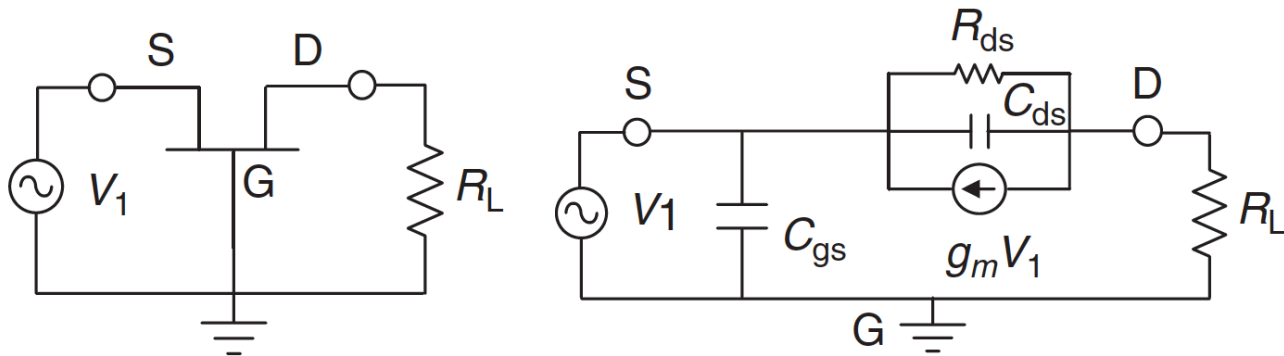
$$g_m = \left. \frac{\Delta I_D}{\Delta V_G} \right|_{\text{operating } V_{ds}}$$



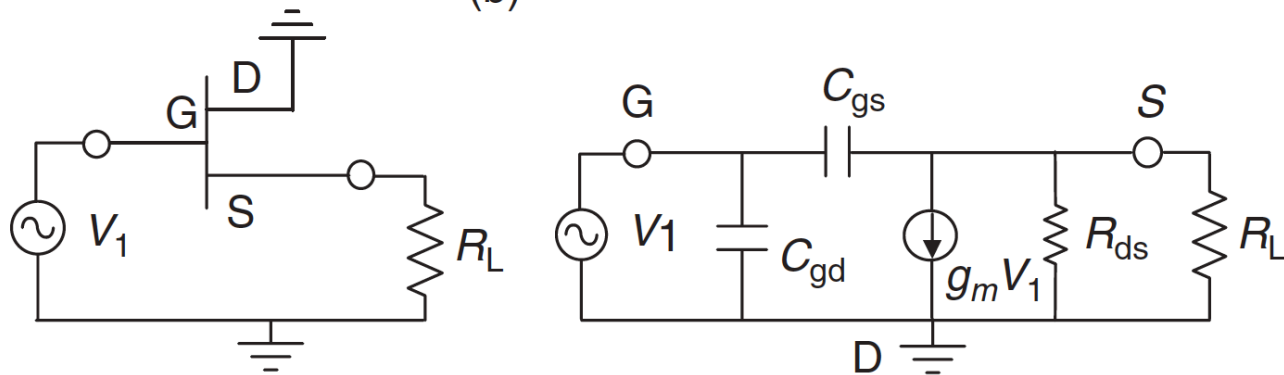
Typical measured pulsed (200 ns and 1% duty cycle) I–V data for a MESFET.  $V_{ds} = 5$  V and  $V_{gs}$  ranged from + 0.8 V to –4 V, with a 0.2-V step.



(a)



(b)



FET configurations and their low-frequency equivalent circuits: (a) common source, (b) common gate, and (c) common drain.

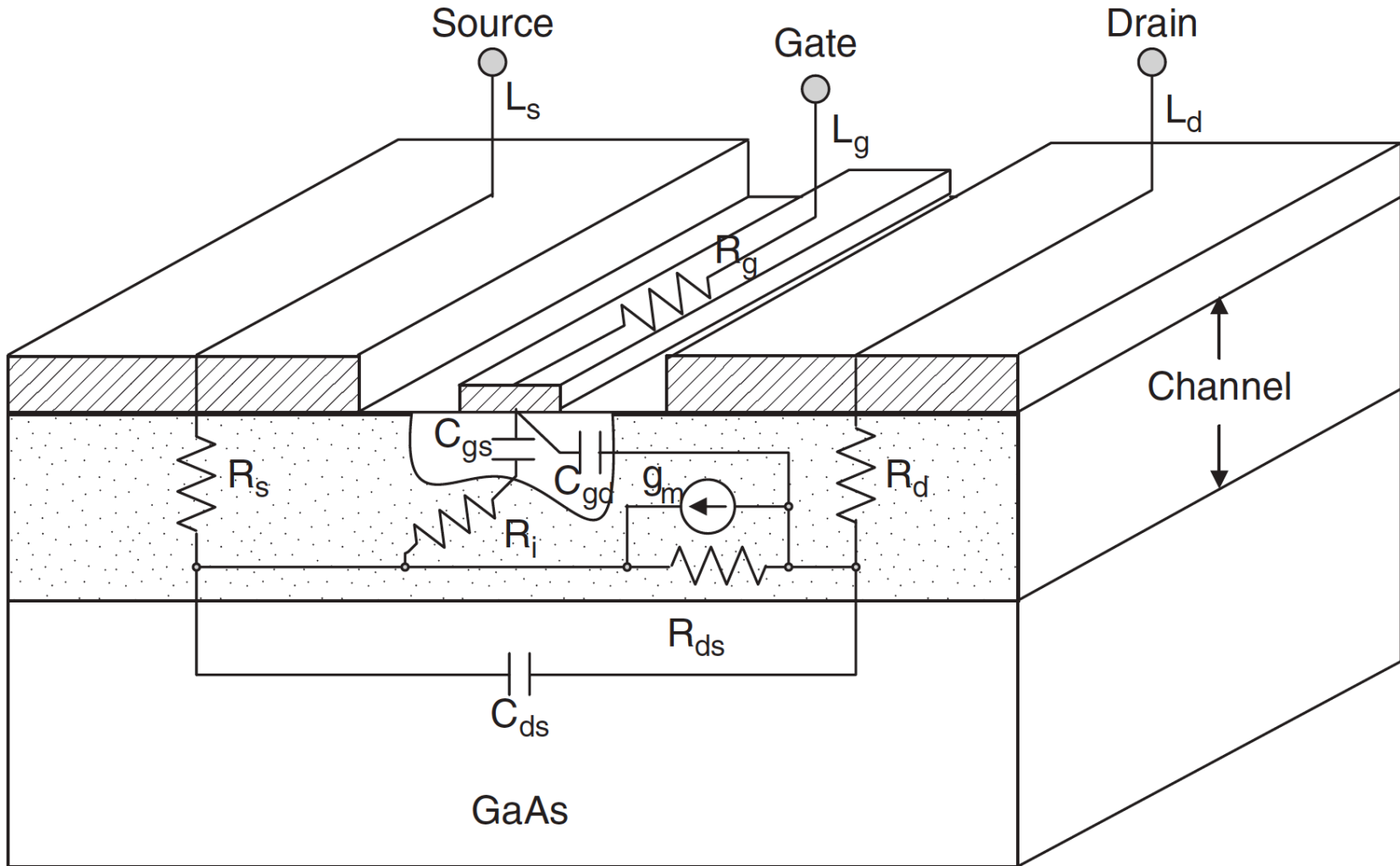
# Transistores de RF

## Comparison of Basic FET Configurations<sup>a</sup>

Characteristic	Common Source	Common Gate	Common Drain
Voltage gain, $A_v$	$-g_m \frac{R_L R_{ds}}{R_L + R_{ds}}$ , high	$g_m R_L$ , higher	$\frac{g_m R_L}{1 + g_m R_L} < 1$
$C_{in}$	$C_{gs} + (1 - A_v)C_{gd}$	$C_{gs} + (1 - A_v)C_{ds}$	$C_{gd} + (1 - A_v)C_{gs}$
Input impedance, $Z_{in}$	High	$\frac{R_{ds} + R_L}{g_m R_{ds} + 1} \cong \frac{1}{g_m}$	High
Output impedance, $Z_{out}$	$R_{ds}$	$R_{ds} + (g_m R_{ds} + 1)R_L$	$\frac{R_{ds}}{g_m R_{ds} + 1}    R_L \cong \frac{1}{g_m}$
Phase inversion from input to output	Yes	Yes	No
Noise contribution	Low	High	High
Reverse isolation	Best	Good	Poor

<sup>a</sup>  $R_L$  is the load resistance.

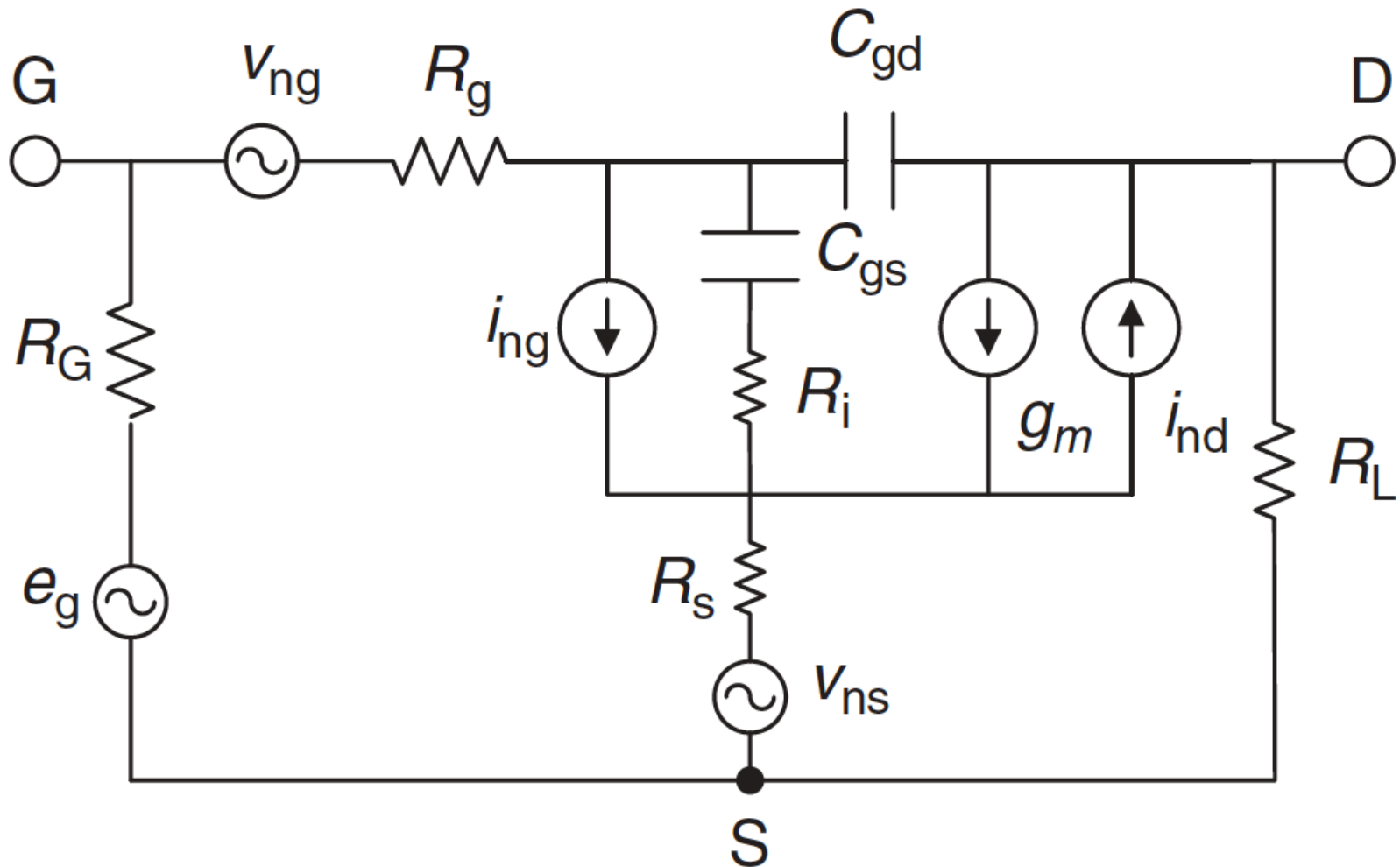
# Transistores de RF



Small-signal equivalent circuit of a MESFET and the physical origin of the circuit elements.



# Transistores de RF



High-frequency noise equivalent circuit of a FET.

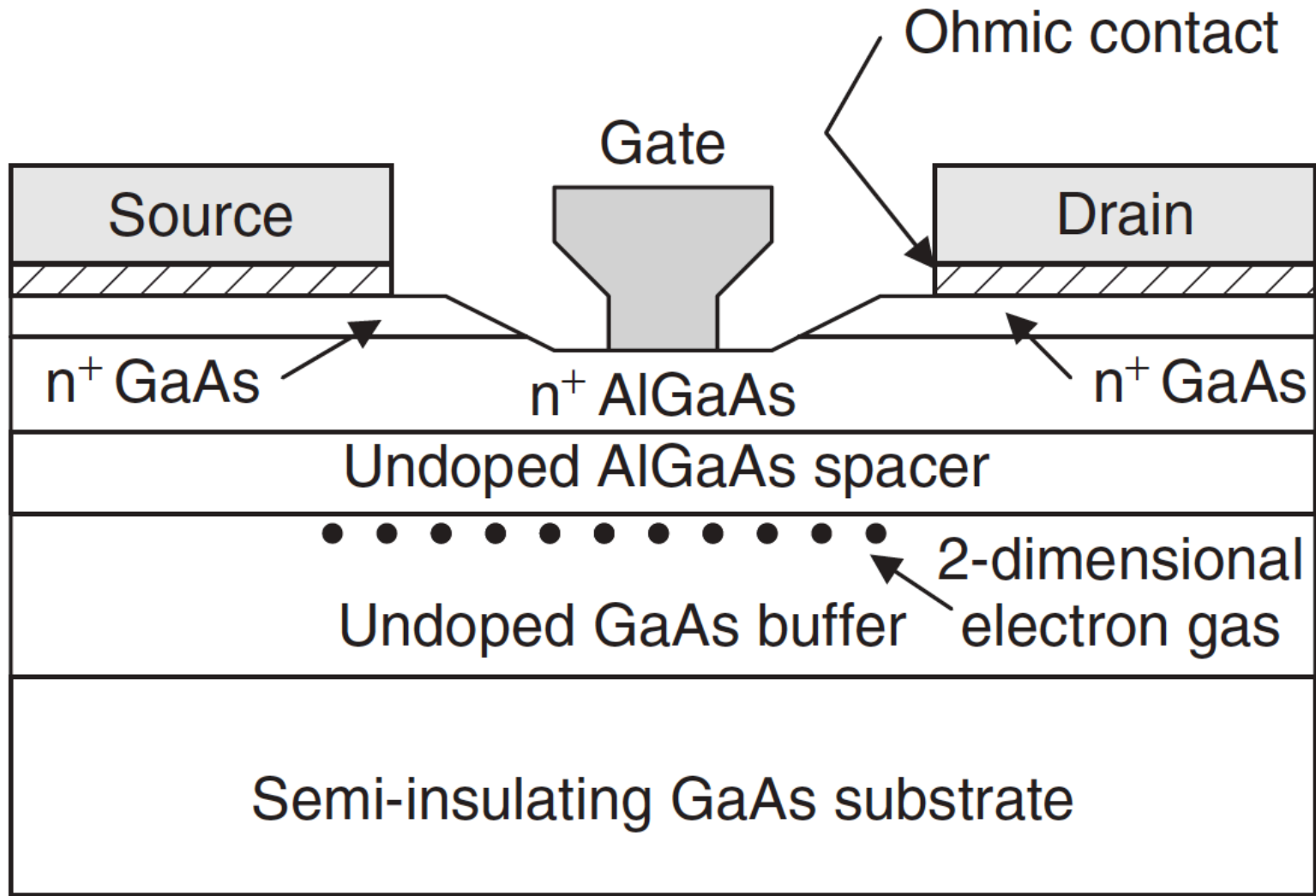
# Transistores de RF

## Heterojunction Field Effect Transistor (HFET)

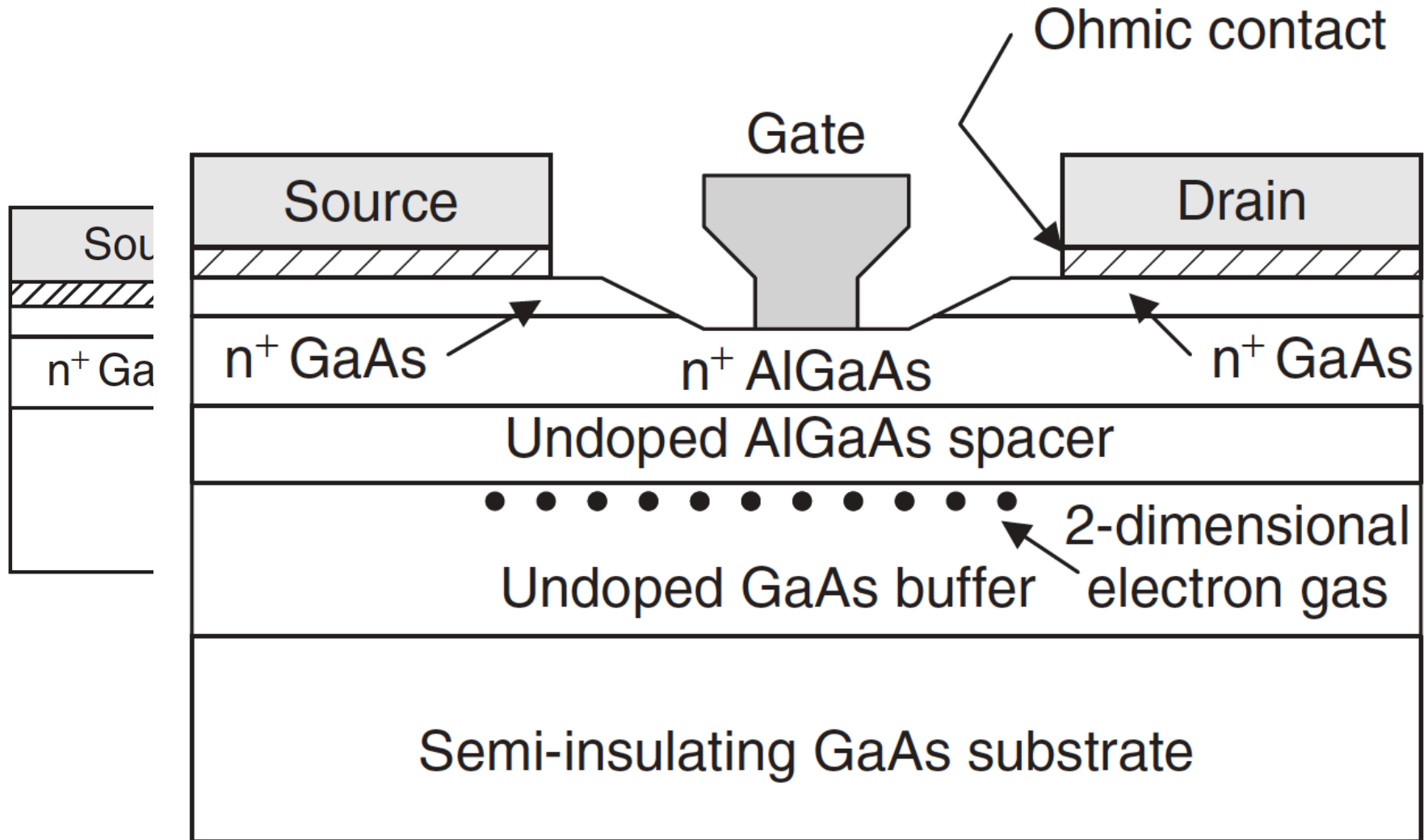
En los dispositivos HFET diferentes materiales se cultivan unas encima del otro mediante la tecnología de crecimiento epitaxial como epitaxia de haces moleculares (molecular beam epitaxy, MBE) o la deposición de vapor químico orgánico molecular (molecular organic chemical vapor deposition, MOCVD).

El JFET también se llama un FET dopado de modulación (MODFET).

# Transistores de RF



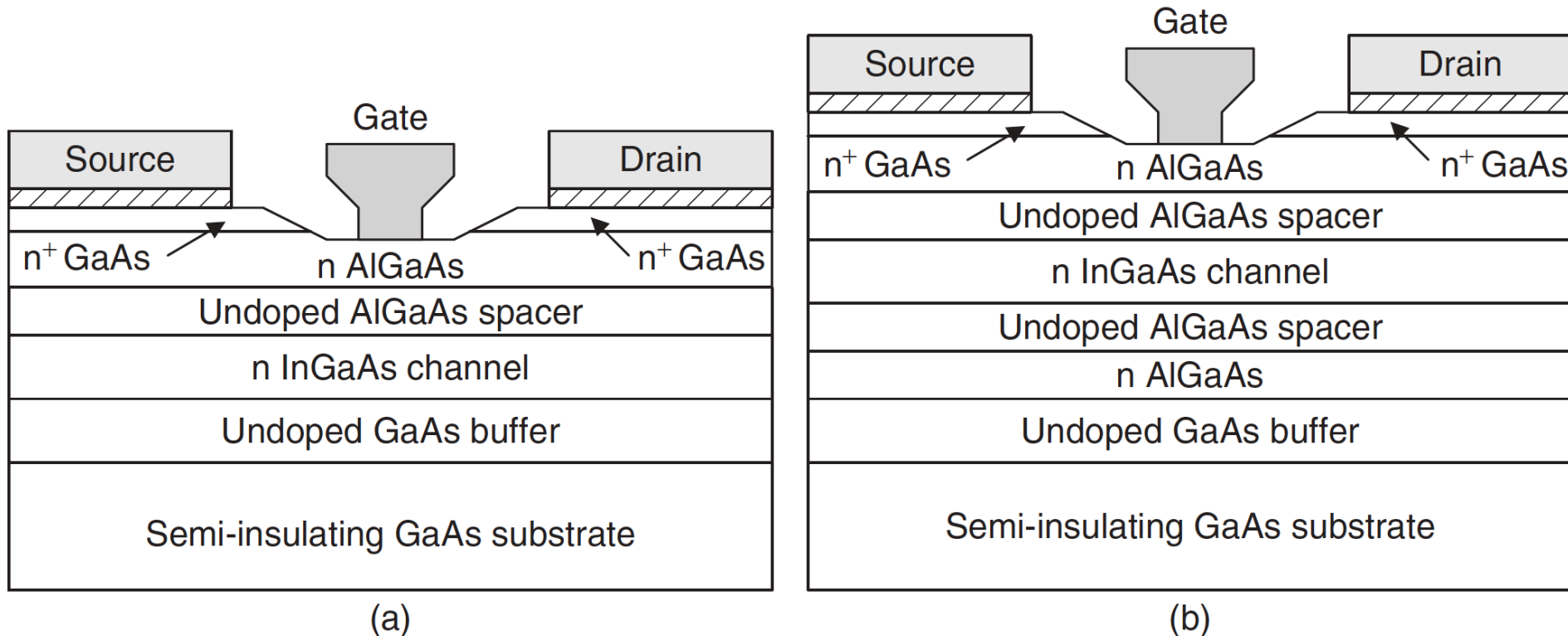
# Transistores de RF



Cross-sectional view of an HEMT.

# Transistores de RF

## Pseudomorphic HEMT (pHEMT)



Cross-sectional representation of pHEMT structures: (a) single heterostructure and (b) double heterostructure.

# Transistores de RF

Los circuitos equivalentes de pequeña señal del HEMT y pHEMT son muy similares a los de GaAs MESFET.

Los diseños de circuitos muy a menudo utilizan la configuración del circuito equivalente de GaAs MESFET con valores adecuados para los parámetros.

La representación de ruido de un HEMT o pHEMT es similar a la MESFET.

En comparación con el FET y HEMT, el dispositivo pHEMT tiene una figura de ruido superior y un rendimiento ganancia de potencia.

# Transistores de RF

Hay dispositivos HEMT de 0.25  $\mu\text{m}$  de longitud de la gate convencional que tienen figura de ruido de 2.1 dB y la ganancia asociada de 7 dB @ 40 GHz.

Hay pHEMT con la misma longitud de la puerta alcanza 1.8-dB una figura de ruido y ganancia asociada de 6.4 dB @ 60 GHz.

# Heterojunction Bipolar Transistors, HBT





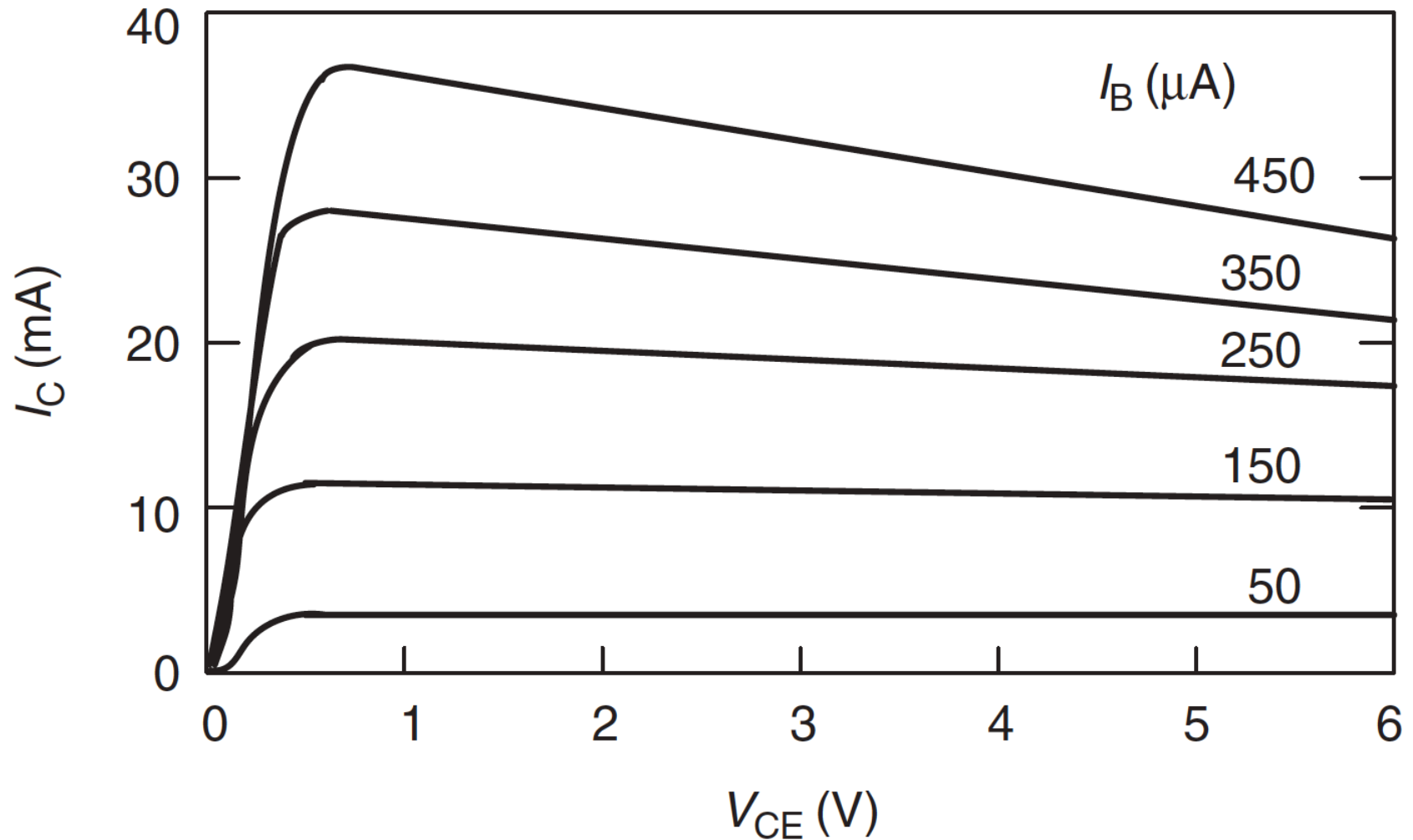
# Transistores de RF

En comparación con el BJT, el HBT tiene mayor ganancia de producto de ancho de banda con geometrías relajadas debido a la movilidad de los electrones más alta en GaAs / InP y parásitos reducidos.

La alta impedancia de salida de emisor común es resultado del alto dopaje de base permitido por la heterojunction que minimiza la modulación del ancho de la base.

Esto conduce a una mayor linealidad y baja distorsión armónica en HBT.

# Transistores de RF



I–V representation of a  $2 \times 80 \mu\text{m}^2$  emitter area GaAs HBT in common-emitter configuration.

# Transistores de RF

## A comparison for Devices

(a) Power Performance Comparison of Discrete Power Transistors @ 10 GHz

Parameter	GaAs FET	GaAs pHEMT	GaAs HBT	InP HBT
Gate/emitter length ( $\mu\text{m}$ )	0.4	0.25	2.0	2.0
Gain (dB)	11	12	11	12
$P_{\text{out}}$ (W)	0.5	0.5	0.6	0.5
PAE (%)	65	70	60	70
Voltage (V)	10	8	5	5

(b) Noise Figure Comparison of Discrete Transistors @ 10 GHz

Parameter	GaAs FET	GaAs pHEMT	GaAs HBT	InP HBT
Gate/emitter length ( $\mu\text{m}$ )	0.4	0.25	2.0	2.0
Gain (dB)	12.6	16.0	14.7	16.1
NF (dB)	0.8	0.4	1.0	1.5
Voltage (V)	3	2	2	2