

02_dispositivos_semiconductores

June 19, 2026

1 Tema 2 - Dispositivos Semiconductores

Electrónica General — 2.º GIERM

Contenido: 1. Unión PN: potencial de contacto, zona espacial de carga, polarización directa e inversa, ruptura 2. JFET: canal N/P, pinch-off, regiones de operación 3. MOSFET: acumulación, deplección, inversión, regiones triodo y saturación 4. Ejercicios resueltos y catálogo de problemas tipo 5. Resumen de fórmulas clave

1.1 1. La unión PN

Cuando se ponen en contacto un semiconductor tipo **P** (mayoritariamente huecos) y uno tipo **N** (mayoritariamente electrones), se produce una **difusión** de portadores que crea la **zona espacial de carga** (ZEC) o zona de deplección.

1.1.1 1.1 Potencial de contacto V_0

El equilibrio termodinámico genera un campo eléctrico interno y un potencial de contacto:

$$V_0 = \phi_T \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$

donde $\phi_T = kT/q \approx 26 \text{ mV}$ a temperatura ambiente ($T = 300 \text{ K}$).

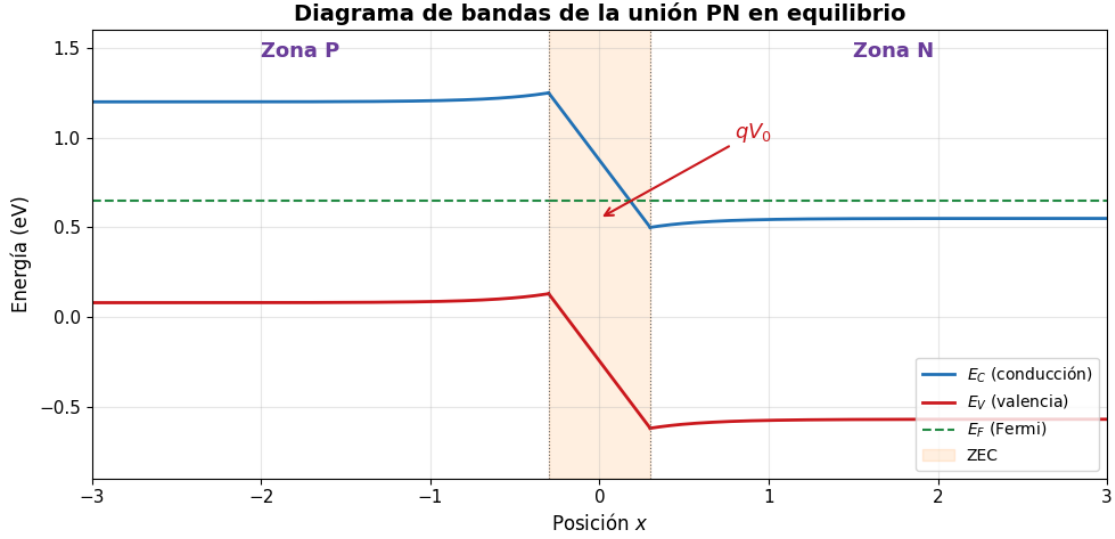
Símbolo	Significado	Unidades
N_A	Concentración de aceptores (zona P)	cm^{-3}
N_D	Concentración de donadores (zona N)	cm^{-3}
n_i	Concentración intrínseca (1.5×10^{10} en Si)	cm^{-3}

1.1.2 1.2 Zona espacial de carga (ZEC)

La ZEC es la región desprovista de portadores móviles que rodea la unión. Su anchura total W depende de la polarización aplicada v_D :

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_0 - v_D)}$$

- **Polarización directa** ($v_D > 0$): la ZEC se estrecha, fluye corriente.
- **Polarización inversa** ($v_D < 0$): la ZEC se ensancha, corriente despreciable ($\approx I_0$).



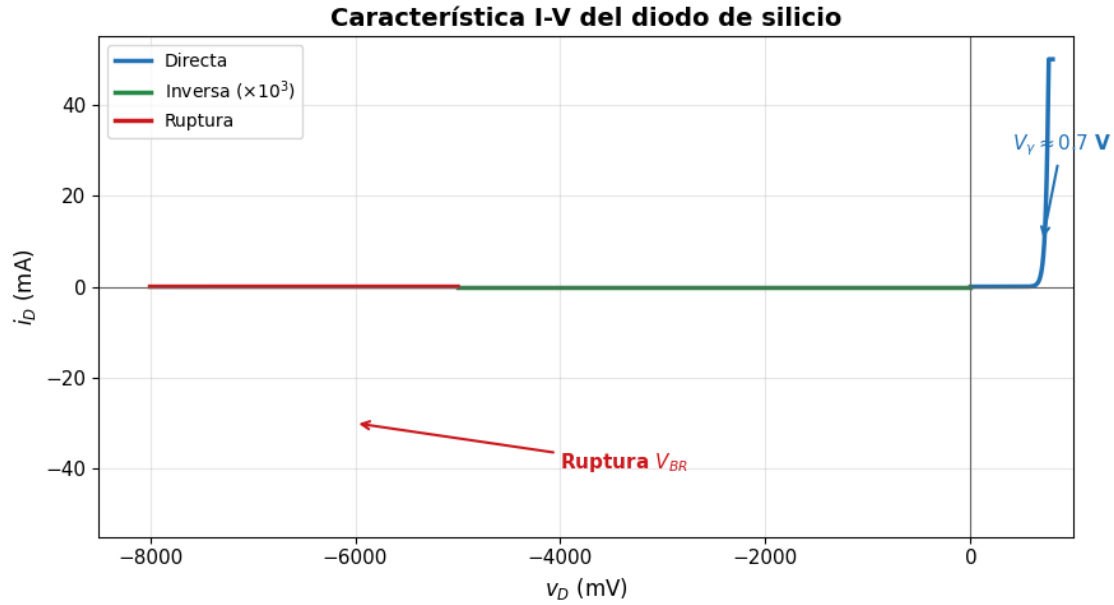
1.1.3 1.3 Ecuación del diodo (Shockley)

La relación corriente-tensión del diodo ideal es:

$$i_D = I_0 (e^{v_D/\phi_T} - 1)$$

$$\phi_T = \frac{kT}{q} \approx 26 \text{ mV} \quad (T = 300 \text{ K})$$

- I_0 : corriente de saturación inversa (del orden de pA en diodos de Si).
- En directa: i_D crece exponencialmente con v_D .
- En inversa: $i_D \approx -I_0$ (muy pequeña).



1.1.4 1.4 Ruptura de la unión PN

Cuando la tensión inversa supera V_{BR} , la corriente inversa aumenta drásticamente. Existen dos mecanismos:

Mecanismo	Causa	Dopaje típico	V_{BR}
Zener	Efecto túnel (campo eléctrico rompe enlaces)	Alto ($> 10^{18}$)	$< 5 \text{ V}$
Avalancha	Ionización por impacto en cascada	Bajo-moderado	$> 7 \text{ V}$

Nota: Entre 5 V y 7 V ambos mecanismos coexisten.

1.2 2. Transistor JFET

El **JFET** (Junction Field-Effect Transistor) es un dispositivo de tres terminales (puerta G, drenador D, fuente S) controlado por tensión.

1.2.1 2.1 Estructura y principio de funcionamiento

- **Canal N:** portadores mayoritarios son electrones; la puerta es una unión PN en inversa.
- **Canal P:** portadores mayoritarios son huecos; polaridades invertidas.

Al aplicar $v_{GS} < 0$ (canal N) la ZEC de la puerta se ensancha y **estrangula** el canal.

1.2.2 2.2 Pinch-off y regiones de operación

Región	Condición	Comportamiento
Óhmica (triodo)	$v_{DS} < v_{GS} - V_P$	Canal sin estrangular; $i_D \propto v_{DS}$
Saturación (pinch-off)	$v_{DS} \geq v_{GS} - V_P$	Canal estrangulado; $i_D \approx \text{cte}$
Corte	$v_{GS} \leq V_P$	$i_D = 0$

En saturación:

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{v_{GS}}{V_P}\right)^2$$

donde I_{DSS} es la corriente con $v_{GS} = 0$ y V_P es la tensión de pinch-off (negativa para canal N).

1.3 3. Transistor MOSFET

El **MOSFET** (Metal-Oxide-Semiconductor FET) es el transistor más utilizado en circuitos integrados. La puerta está **aislada** del canal por una capa de óxido (SiO_2).

1.3.1 3.1 Estructura MOS: acumulación, deplección, inversión

Para un NMOS sobre sustrato tipo P, al variar v_{GS} :

Régimen	v_{GS}	Superficie del semiconductor
Acumulación	$v_{GS} < 0$	Huecos atraídos a la superficie
Deplección	$0 < v_{GS} < V_T$	Huecos repelidos; zona de carga espacial
Inversión	$v_{GS} > V_T$	Capa de electrones (canal N) en la superficie

1.3.2 3.2 Regiones de operación del MOSFET

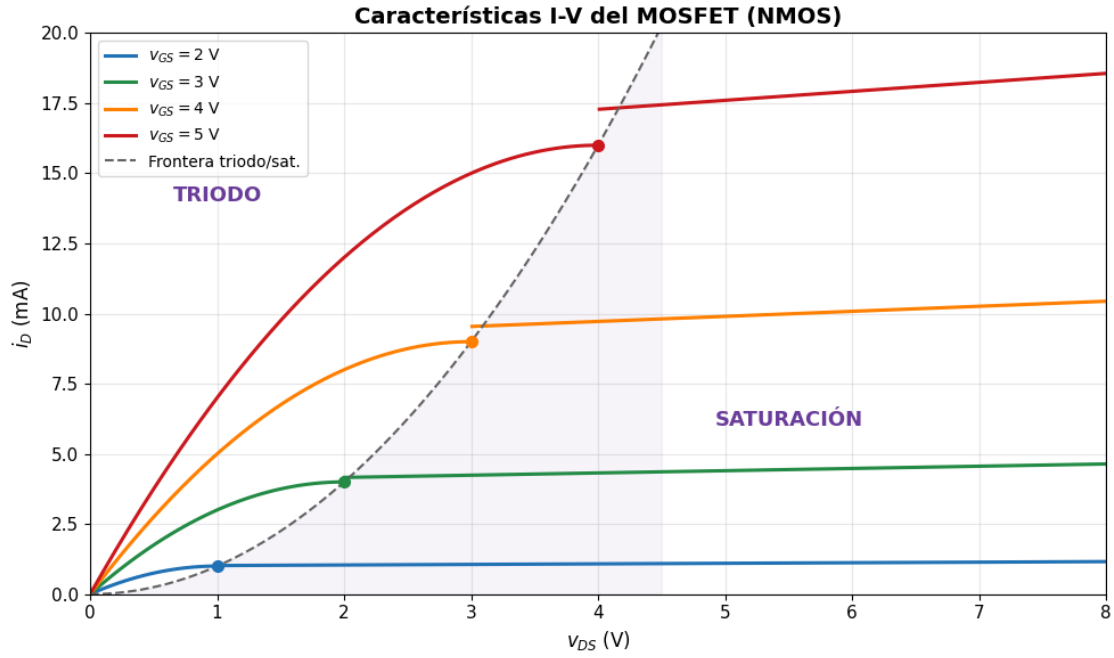
Una vez formado el canal ($v_{GS} > V_T$):

Región	Condición	Ecuación de i_D
Triodo	$v_{DS} < v_{GS} - V_T$	$i_D = K_n \left[(v_{GS} - V_T)v_{DS} - \frac{v_{DS}^2}{2} \right]$
Saturación	$v_{DS} \geq v_{GS} - V_T$	$i_D = \frac{K_n}{2} (v_{GS} - V_T)^2$
Corte	$v_{GS} < V_T$	$i_D = 0$

donde $K_n = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}$ es el parámetro de transconductancia.

Con modulación de longitud de canal (λ):

$$i_D = \frac{K_n}{2}(v_{GS} - V_T)^2(1 + \lambda v_{DS})$$



1.3.3 3.3 Parámetros de pequeña señal del MOSFET

En el punto de operación (saturación), el modelo de pequeña señal se caracteriza por:

Transconductancia:

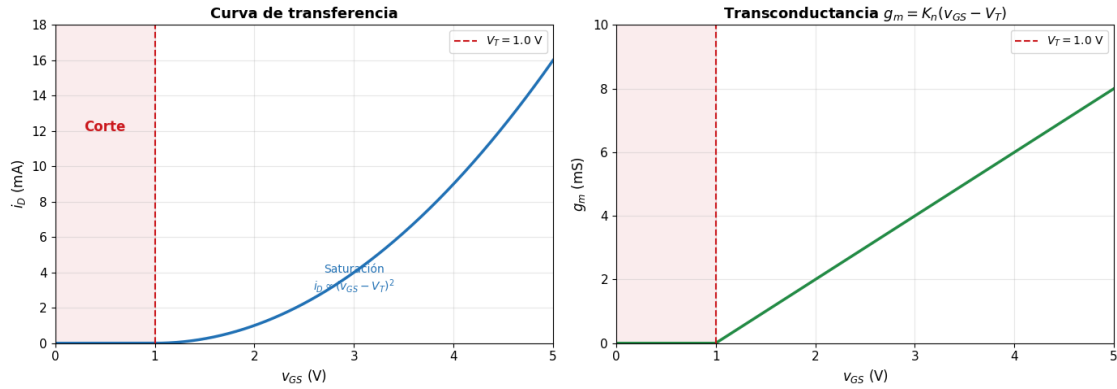
$$g_m = K_n(v_{GS} - V_T) = \frac{2I_D}{V_{EFF}}$$

donde $V_{EFF} = v_{GS} - V_T$ es la tensión de sobreexcitación (overdrive).

Resistencia de salida:

$$r_o = \frac{1}{\lambda I_D}$$

Estos parámetros definen la ganancia intrínseca del transistor: $A_v = g_m \cdot r_o$.



Regiones de operación del MOSFET (NMOS)



1.4 4. Ejercicios resueltos

A continuación se resuelven 4 ejercicios representativos que cubren los conceptos fundamentales de dispositivos semiconductores.

1.4.1 Ejercicio 1: Potencial de contacto de una unión PN

Enunciado: Calcular el potencial de contacto V_0 de una unión PN de silicio a $T = 300$ K con $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ y $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Dato: $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

Solución:

$$\phi_T = \frac{kT}{q} = 26 \text{ mV}$$

$$V_0 = \phi_T \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) = 0.026 \cdot \ln\left(\frac{10^{17} \cdot 10^{16}}{(1.5 \times 10^{10})^2}\right)$$

$$V_0 = 0.026 \cdot \ln(4.44 \times 10^{12}) = 0.026 \times 29.12 = 0.757 \text{ V}$$

$$V_0 \approx 0.76 \text{ V}$$

phi_T = 25.86 mV
V0 = 0.7532 V
V0 = 0.75 V (redondeado)

1.4.2 Ejercicio 2: Corriente del diodo en directa

Enunciado: Un diodo de silicio tiene $I_0 = 10^{-14}$ A. Calcular la corriente cuando $v_D = 0.65$ V a $T = 300$ K.

Solución:

$$i_D = I_0 (e^{v_D/\phi_T} - 1) = 10^{-14} \cdot (e^{0.65/0.026} - 1)$$

$$i_D = 10^{-14} \cdot (e^{25} - 1) = 10^{-14} \cdot 7.2 \times 10^{10}$$

$$i_D \approx 0.72 \text{ mA}$$

Exponente: $v_D/\phi_T = 25.00$
 $i_D = 7.2005\text{e-}04$ A
 $i_D = 0.720$ mA

1.4.3 Ejercicio 3: Punto de operación del MOSFET

Enunciado: Un NMOS tiene $K_n = 2 \text{ mA/V}^2$, $V_T = 1$ V y $\lambda = 0$. Si $v_{GS} = 3$ V y $v_{DS} = 4$ V, determinar la región de operación y i_D .

Solución:

1. Verificar canal: $v_{GS} = 3 > V_T = 1$ V $\Rightarrow$ canal formado.
2. Tensión de overdrive: $V_{EFF} = v_{GS} - V_T = 3 - 1 = 2$ V.
3. Comprobar región: $v_{DS} = 4 \geq V_{EFF} = 2 \Rightarrow$ **Saturación**.
4. Corriente:

$$i_D = \frac{K_n}{2} (v_{GS} - V_T)^2 = \frac{2 \times 10^{-3}}{2} (2)^2 = 4 \text{ mA}$$

$$i_D = 4 \text{ mA} \quad (\text{saturación})$$

$V_{EFF} = v_{GS} - V_T = 2.0 \text{ V}$
 $v_{DS} = 4.0 \text{ V} > V_{EFF} = 2.0 \text{ V}$
 Region: Saturacion
 $i_D = 4.00 \text{ mA}$

1.4.4 Ejercicio 4: Parámetros de pequeña señal

Enunciado: Para el MOSFET del ejercicio anterior, con $\lambda = 0.02 \text{ V}^{-1}$, calcular g_m y r_o .

Solución:

Con $I_D = 4 \text{ mA}$ y $V_{EFF} = 2 \text{ V}$:

$$g_m = \frac{2I_D}{V_{EFF}} = \frac{2 \times 4 \times 10^{-3}}{2} = 4 \text{ mS}$$

$$r_o = \frac{1}{\lambda I_D} = \frac{1}{0.02 \times 4 \times 10^{-3}} = 12.5 \text{ k}\Omega$$

Ganancia intrínseca:

$$A_v = g_m \cdot r_o = 4 \times 10^{-3} \times 12500 = 50$$

$g_m = 4 \text{ mS}, \quad r_o = 12.5 \text{ k}\Omega, \quad A_v = 50$

$g_m = 4.0 \text{ mS}$
 $r_o = 12.5 \text{ k}\Omega$
 $A_v = g_m \cdot r_o = 50$

1.5 5. Catálogo de problemas tipo

#	Tipo de problema	Conceptos clave	Dificultad
1	Cálculo de V_0 y anchura de ZEC	$V_0 = \phi_T \ln(N_A N_D / n_i^2)$, anchura W	Media
2	Punto de operación del diodo	Ecuación de Shockley, modelo exponencial, recta de carga	Media
3	Identificar región del MOSFET	Comparar v_{DS} con V_{EFF} , calcular i_D	Básica
4	Diseño de punto Q del MOSFET	Dado I_D objetivo, encontrar v_{GS} y R_D	Media-Alta
5	Parámetros pequeña señal y ganancia	g_m , r_o , $A_v = g_m r_o$, modelo π	Alta

1.6 6. Resumen de fórmulas clave

1.6.1 Unión PN

$$\phi_T = \frac{kT}{q} \approx 26 \text{ mV}$$

$$V_0 = \phi_T \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$

$$i_D = I_0 (e^{v_D/\phi_T} - 1)$$

1.6.2 JFET (saturación)

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{v_{GS}}{V_P} \right)^2$$

1.6.3 MOSFET

$$i_D = \frac{K_n}{2} (v_{GS} - V_T)^2 \quad (\text{saturación})$$

$$g_m = \frac{2 I_D}{V_{EFF}}$$

$$r_o = \frac{1}{\lambda I_D}$$

$$A_v = g_m \cdot r_o \quad (\text{ganancia intrínseca})$$