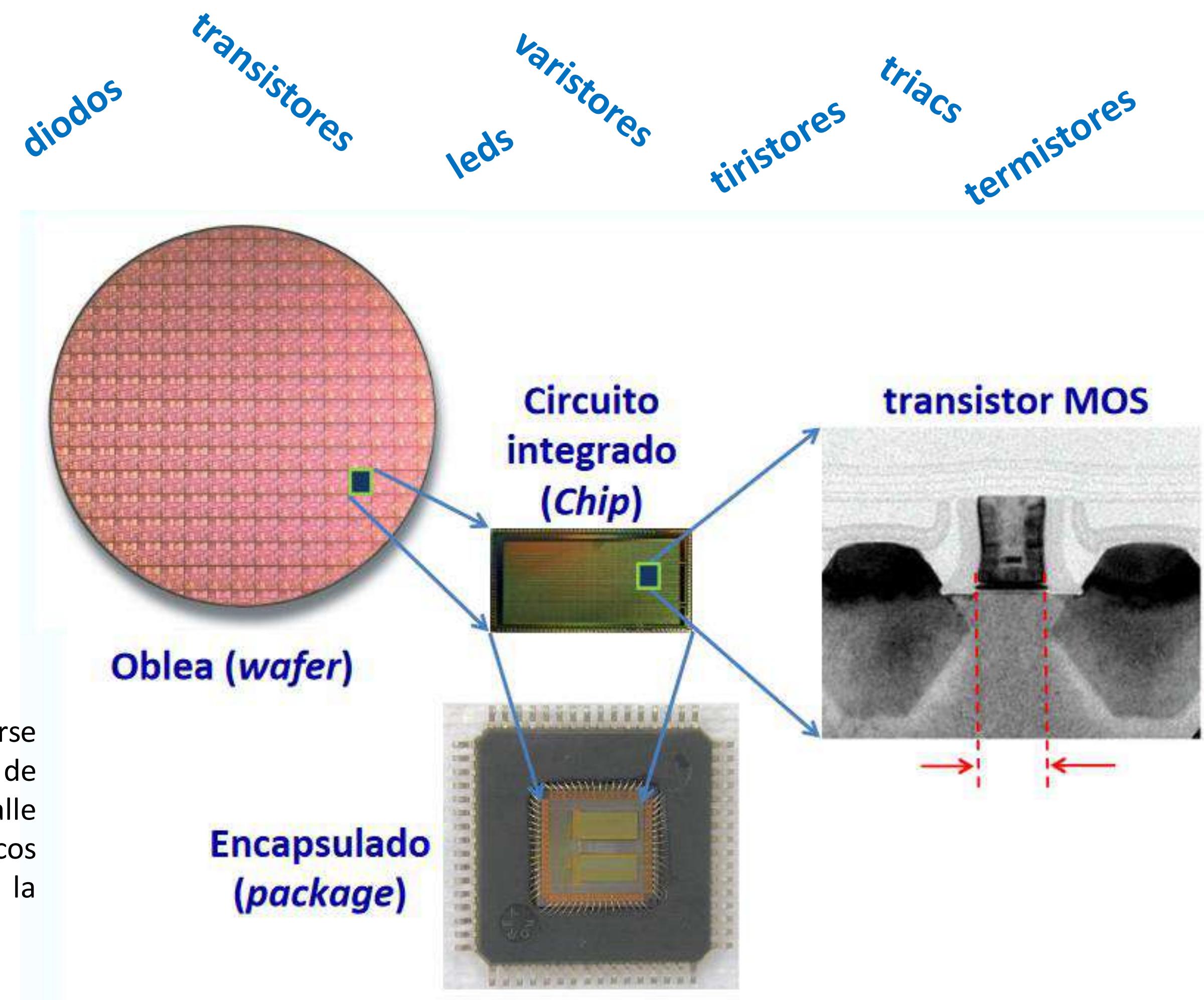
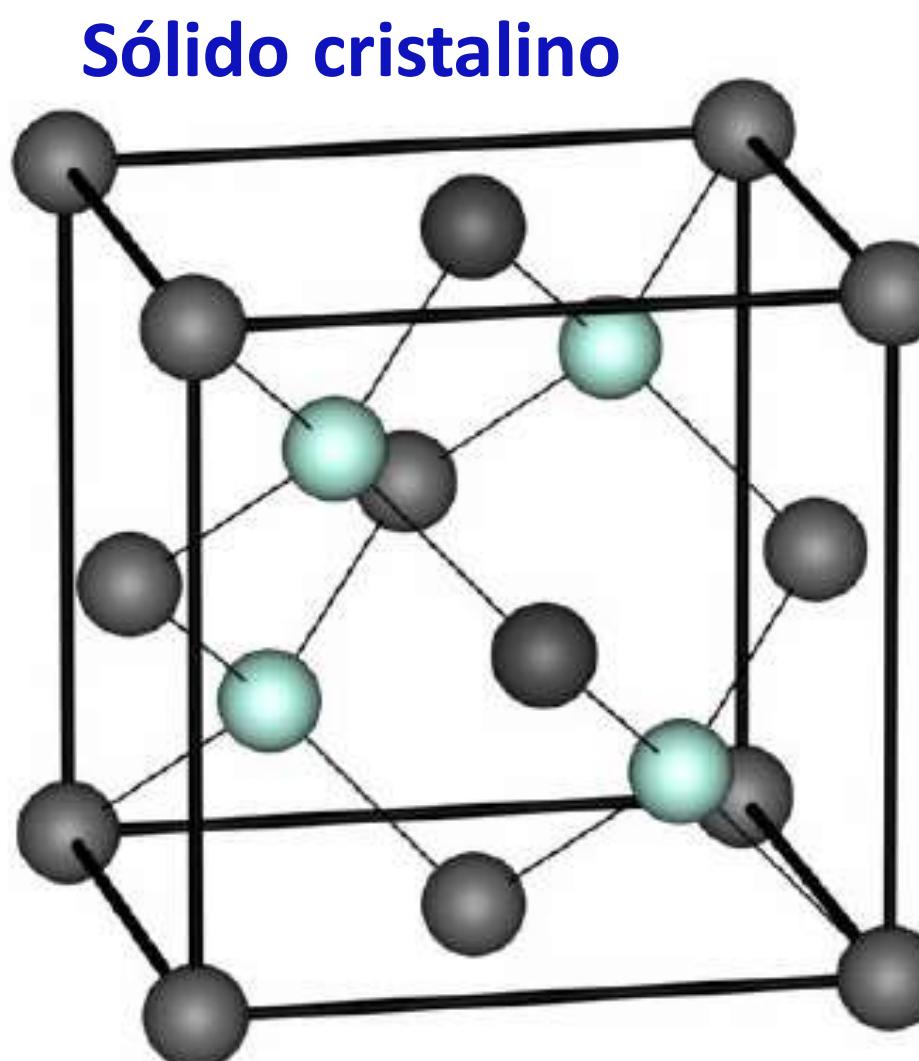


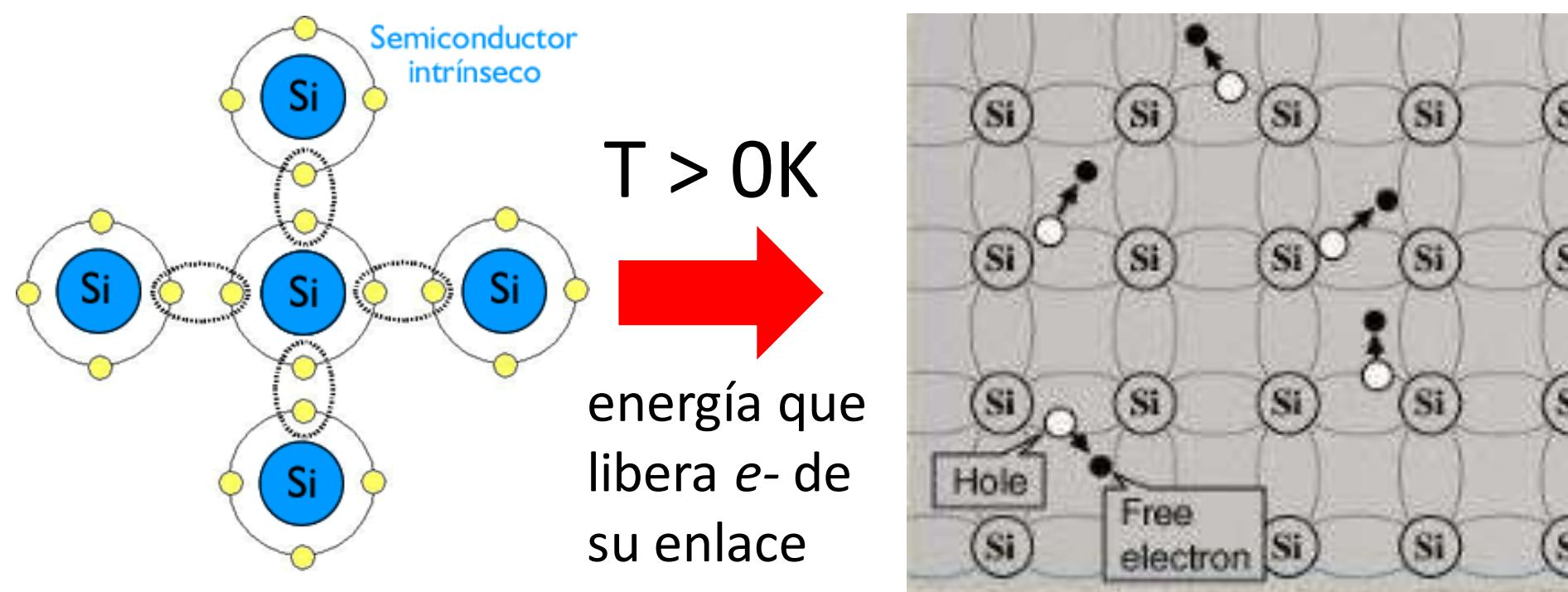
Semiconductores, junturas y dispositivos sólidos activos



El objeto de esta introducción es familiarizarse con la terminología usada en el análisis de circuitos amplificadores, sin entrar en detalle en la justificación de los fenómenos físicos involucrados (temas que se tratarán en la asignatura Dispositivos Semiconductores).

Semiconductores

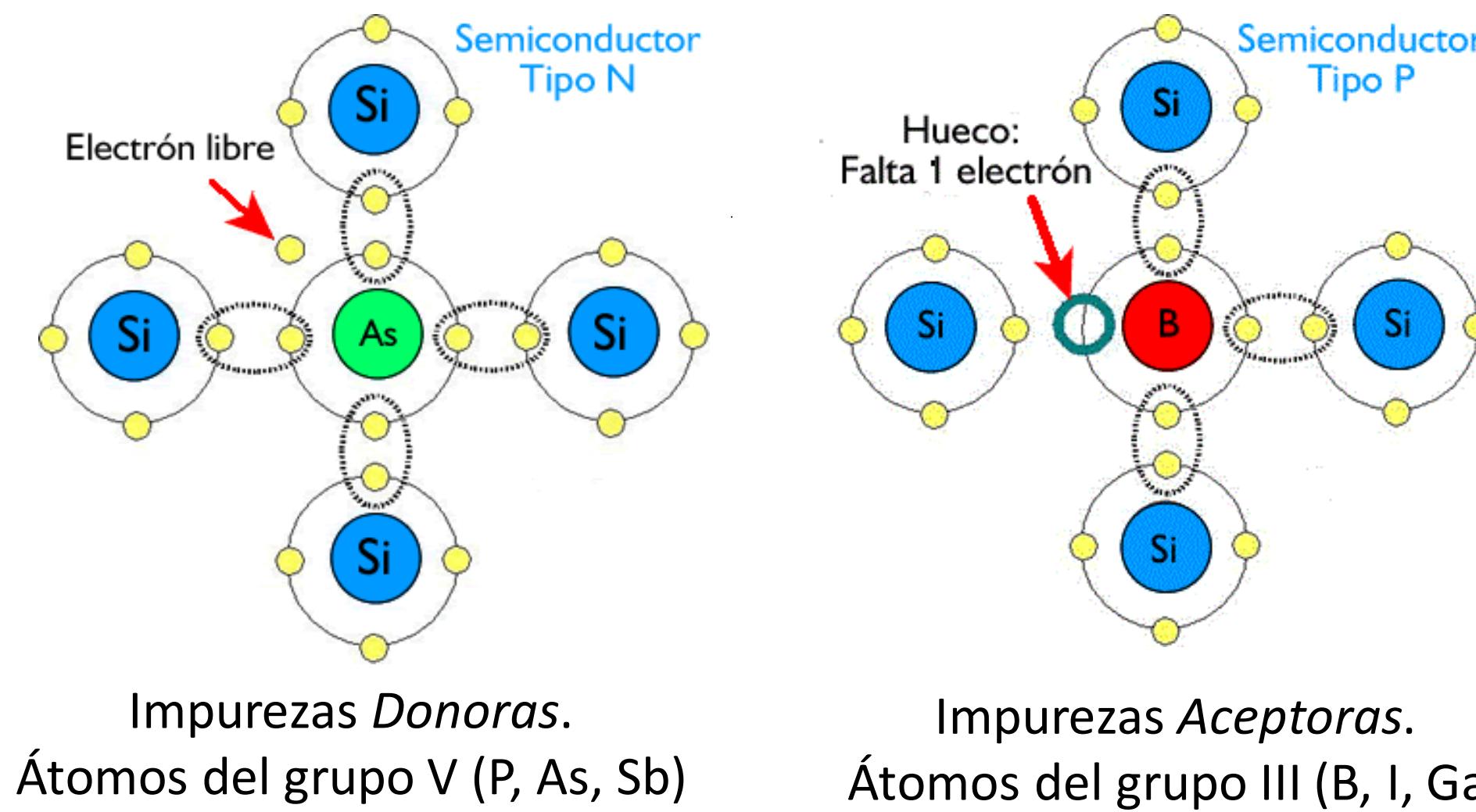
Un **SC** (Ge, Si, GaAs, GaP, SiC, ZnO, etc.) es un material que se comporta o bien como un conductor o bien como un aislante dependiendo de diversos factores (campo eléctrico o magnético, presión, radiación incidente, temperatura).



El lugar que deja el electrón se lo denomina *laguna* o *hueco* y otro electrón ligado de un enlace cercano puede introducirse en el lugar vacante \Rightarrow como si una carga (+) se haya desplazado en sentido contrario al electrón.

cristal de Si

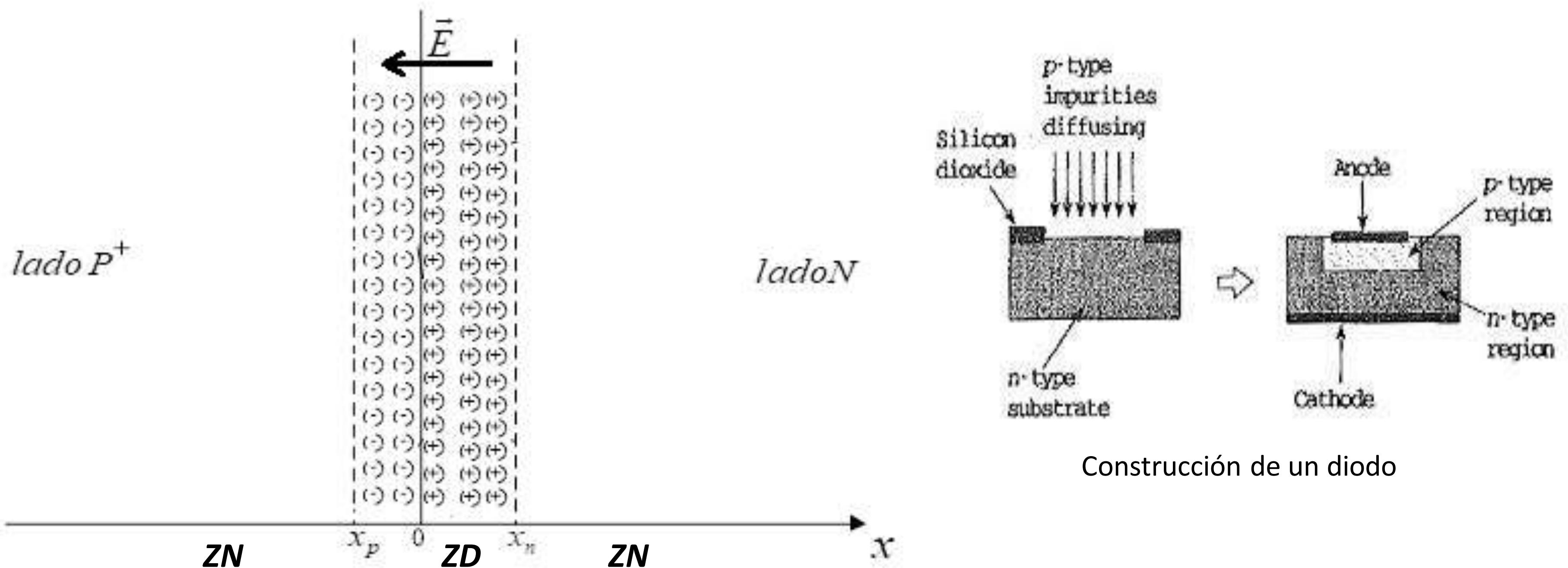
Al **SC** puro se le introduce (dopa) átomos de otros elementos (impurezas) que ocupan en la red cristalina el mismo lugar del átomo sustituido, a fin de aumentar su conductividad (aumento de portadores libres).



La densidad de impurezas deberá ser mucho menor que el total de átomos del **SC** (10^{22} átomos/ cm^3) (por ejemplo: $N_D=10^{18}$ atm./ cm^3 , $N_A=10^{15}$ atm./ cm^3) para que el material no pierda sus propiedades y se transforme en cristal amorfo.

Juntura P-N: Diodo

Si se tienen por ejemplo dos SC tipos N y P con $N_A > N_D$ (materiales $P+$ y N), al unirlos (por la diferencia de concentraciones existente en la zona de unión) los electrones del lado N (*mayoritarios*) se difundirán hacia el lado $P+$ y los huecos del lado $P+$ (*mayoritarios*) se difundirán hacia el N. Quedarán en la zona cercana al plano de unión iones positivos y negativos (respectivamente) sin neutralizar, formándose una *zona desierta* (**ZD**) de portadores libres. La difusión continuará hasta que la carga de los iones fijos sin compensar a ambos lados de la unión forme un campo eléctrico tal que se oponga a la tendencia a la difusión (*equilibrio dinámico*).

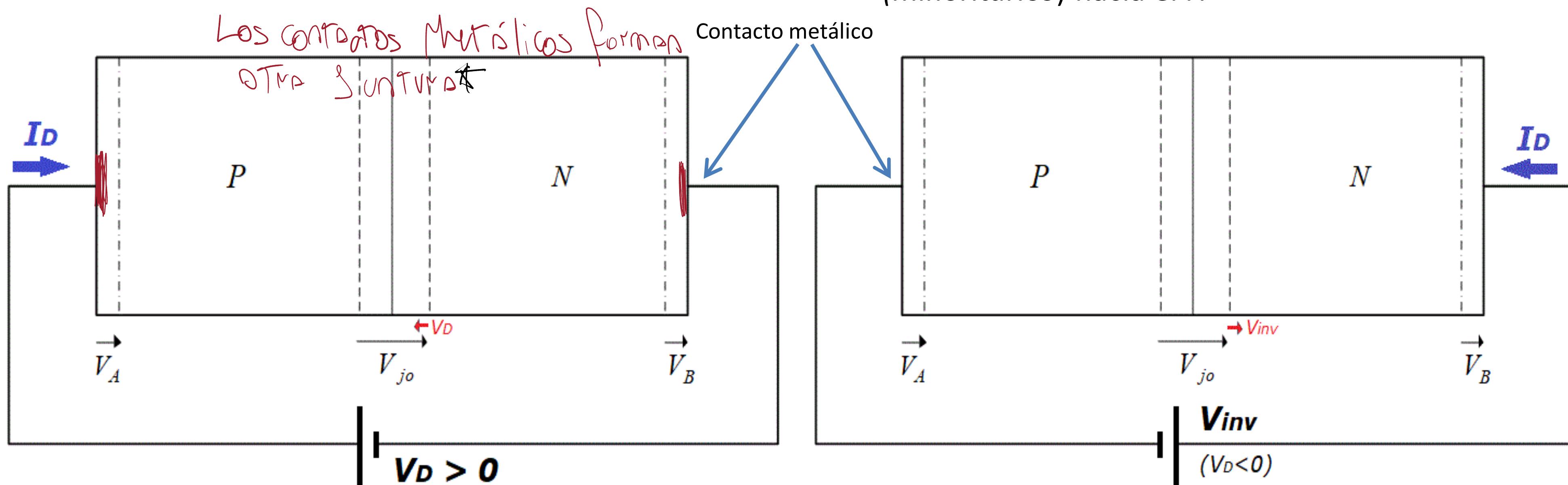


Por el principio de conservación de la carga eléctrica, el nuevo material sigue siendo *eléctricamente neutro*. Como las cargas de los iones de ambos lados deben igualarse, la zona desierta será más extensa del lado del material menos dopado. Fuera de esta zona desierta, las zonas **P+** y **N** se admiten *eléctricamente neutras*.

Juntura P-N con polarización

Con $V_D > 0$, el voltaje de la unión P-N, disminuirá respecto de su valor de equilibrio (V_{jo}) \Rightarrow se reduce el campo eléctrico E (se reduce la zona desierta), permitiendo una mayor difusión de mayoritarios hacia el lado opuesto de la juntura

Con $V_D < 0$, el voltaje de la unión P-N, aumentará respecto de su valor de equilibrio (V_{jo}) \Rightarrow aumenta el campo eléctrico E (aumenta la zona desierta), arrastrando a los electrones libres del lado P (*minoritarios*) hacia el lado N y a los huecos del lado N (*minoritarios*) hacia el P.

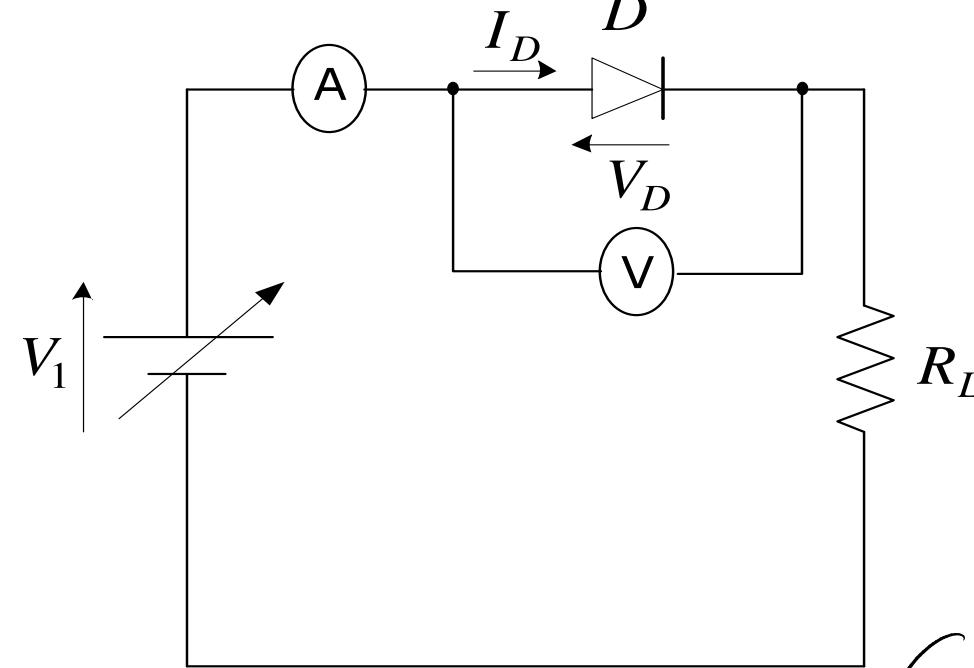


$$\Rightarrow I_D \text{ (directa)} \gg I_D \text{ (inversa)}$$

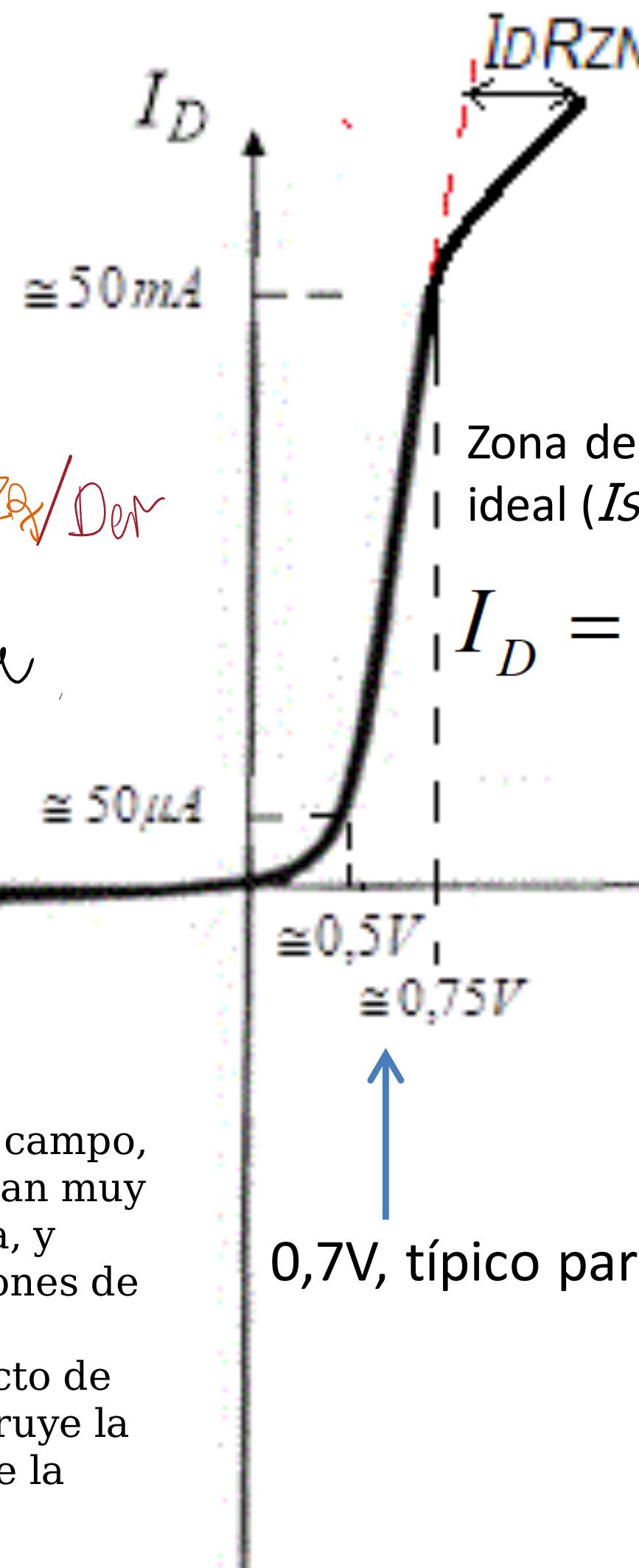
Los contactos metal-semiconductor que se construyen en los extremos de los materiales en una juntura P-N son de tipo **óhmico**: la diferencia de potencial en el contacto **es independiente** de la corriente que la atraviesa en uno u otro sentido. También existen uniones metal-semiconductor de tipo rectificante: conduce corriente en un sentido y no en el otro, tal como una juntura P-N (diodo Schottky).

* En esa juntura cae tensión solo cuando estan cortocircuitadas las terminales, si se aplica un potencial cae todo en la juntura sc-sc. La junturas sc-metal permiten conducción en ambos sentidos, la sc-sc permiten en un solo sentido

Característica I-V del diodo

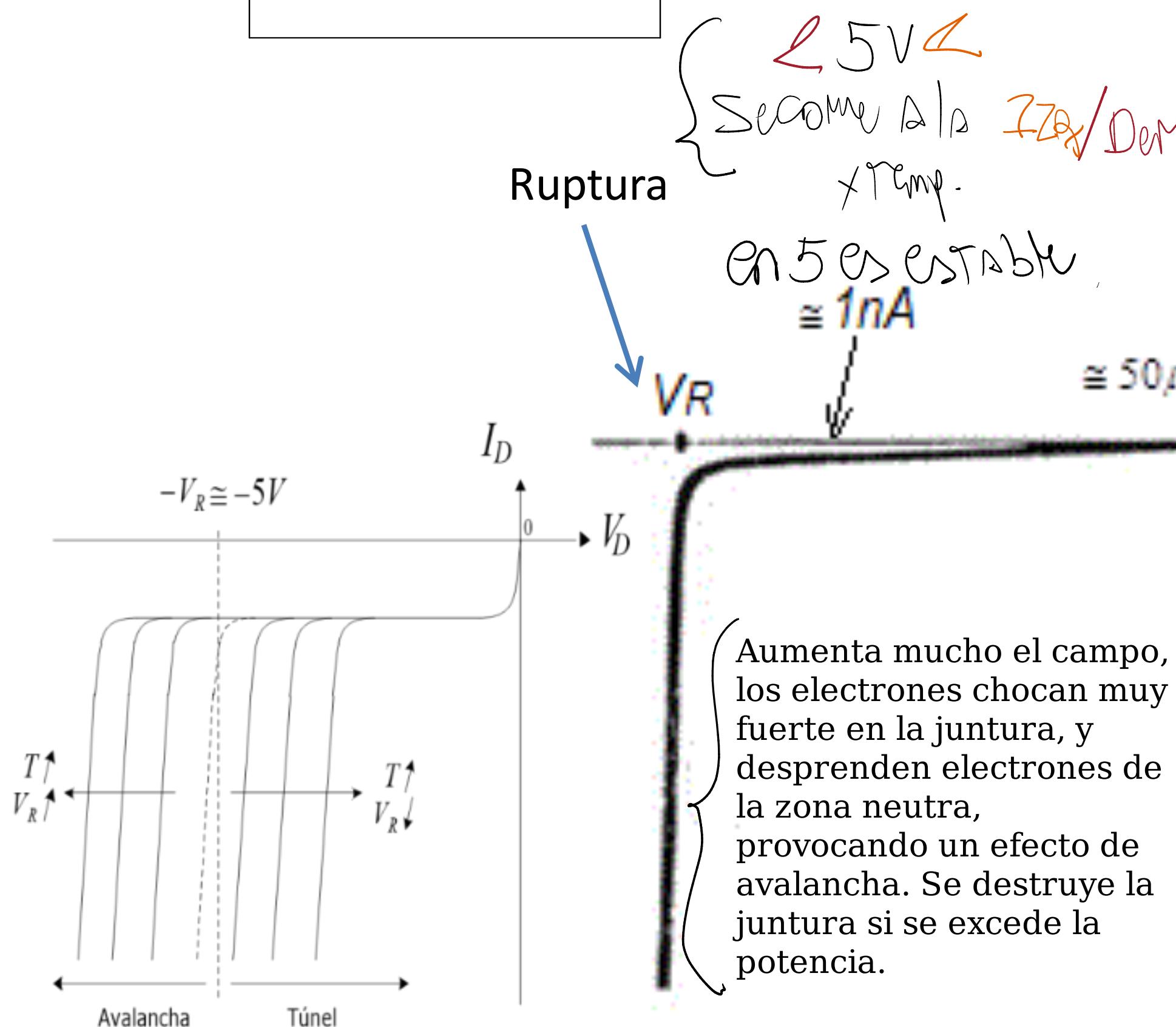


Bajo niveles de potencia $P \ll I_W$

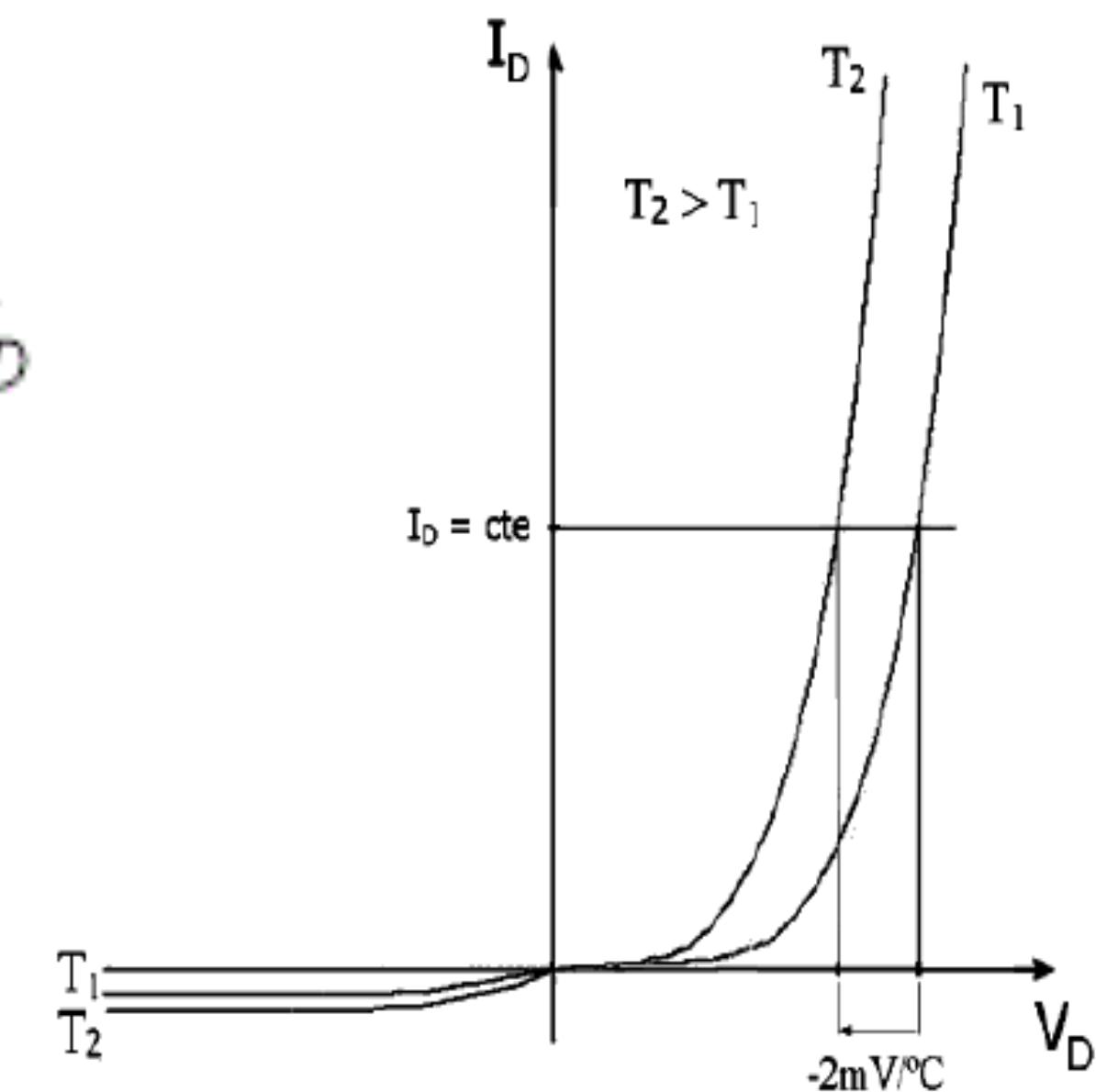


Ya no es válido
admitir $\sigma(ZN) \rightarrow \infty$

Empieza a ocurrir la ionización en los
Zonas Neutrales (Lado N)



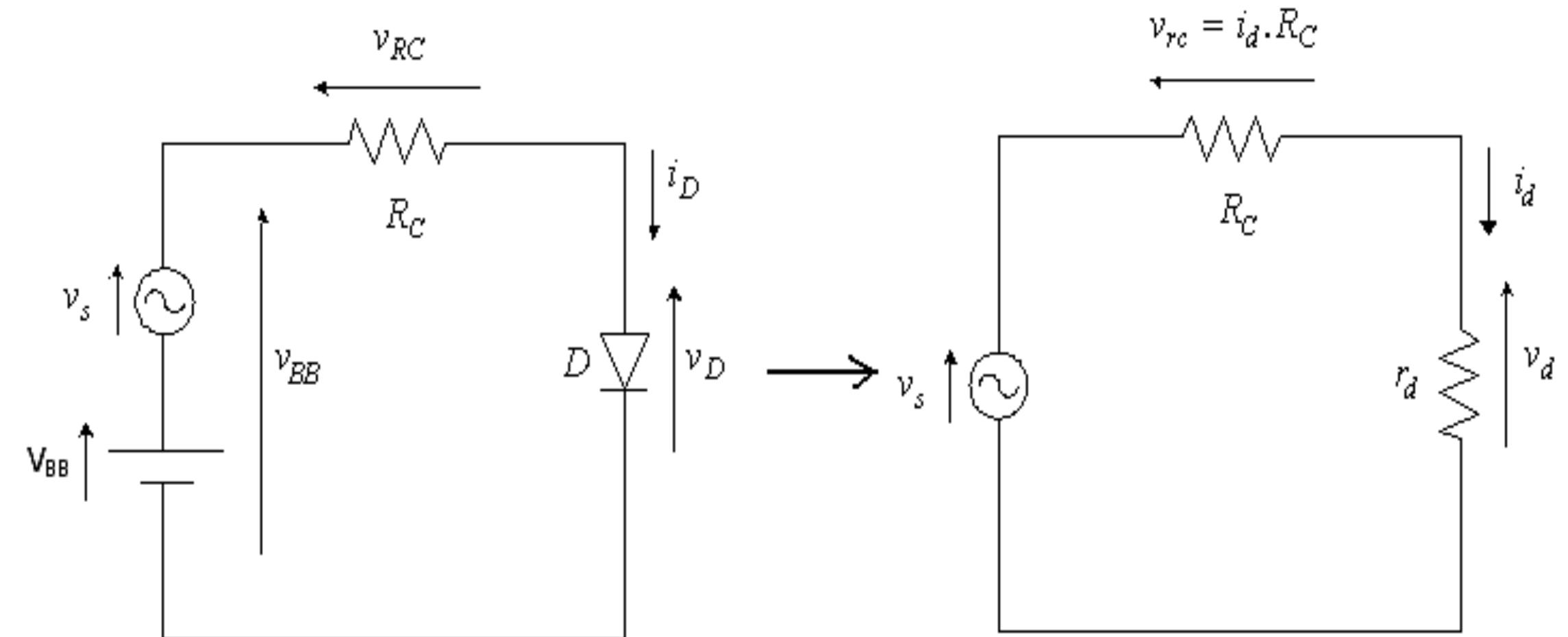
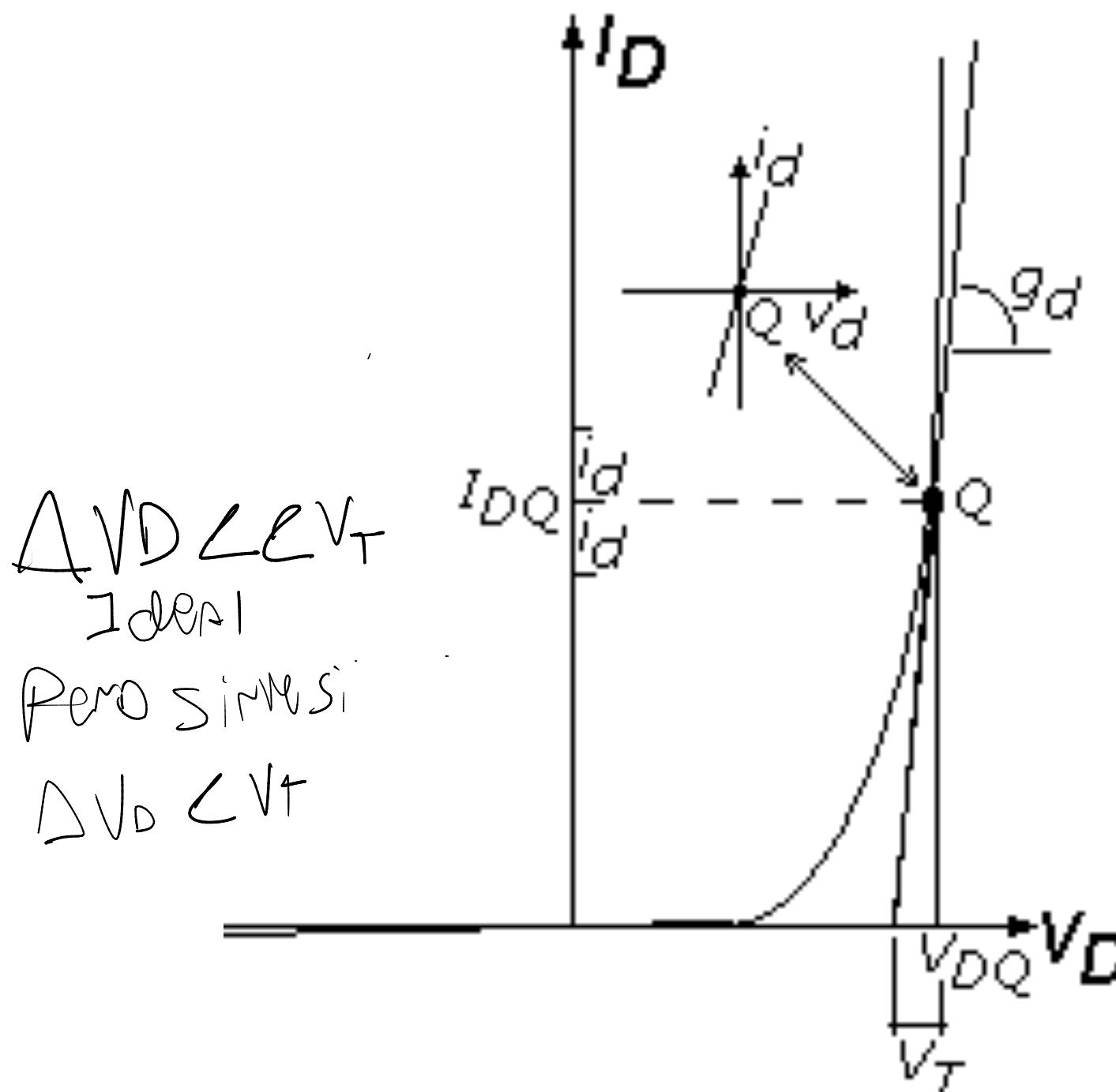
Variación de I_D con la temperatura



Variación de I_D con la temperatura

Modelo del diodo para pequeña señal

Si se producen pequeñas variaciones de la corriente (y tensión) en un diodo, alrededor de un dado punto Q , para el análisis de tales variaciones resulta adecuado aproximar la característica estática del diodo mediante la recta tangente en ese punto (*linealización*).



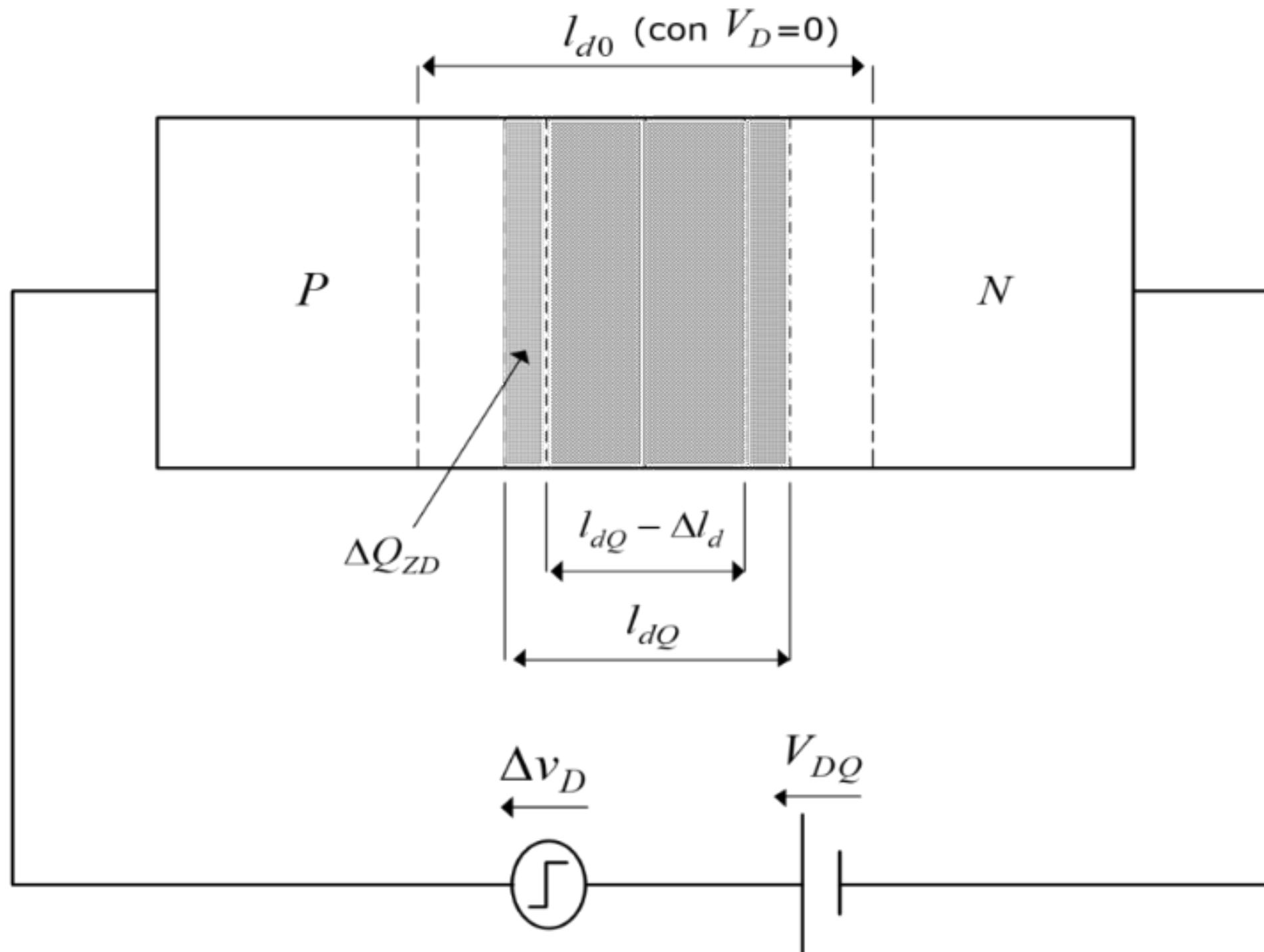
En directa y para corrientes medias, puede obtenerse la conductancia dinámica mediante la ecuación del diodo ideal:

$$g_d = \Delta I_D / \Delta V_D \mid_Q = 1/r_d = I_{DQ} / V_T$$

$$r_d = 25\Omega \text{ para } I_{DQ} = 1mA$$

Para el diodo en inversa, r_{inv} , será del orden de los $10M\Omega$ (pendiente de la tangente de muy bajo valor), salvo en ruptura donde cambia a r_z .

Efectos reactivos en pequeña señal



Capacitancia de juntura: *Más Imp. en I_NV.*

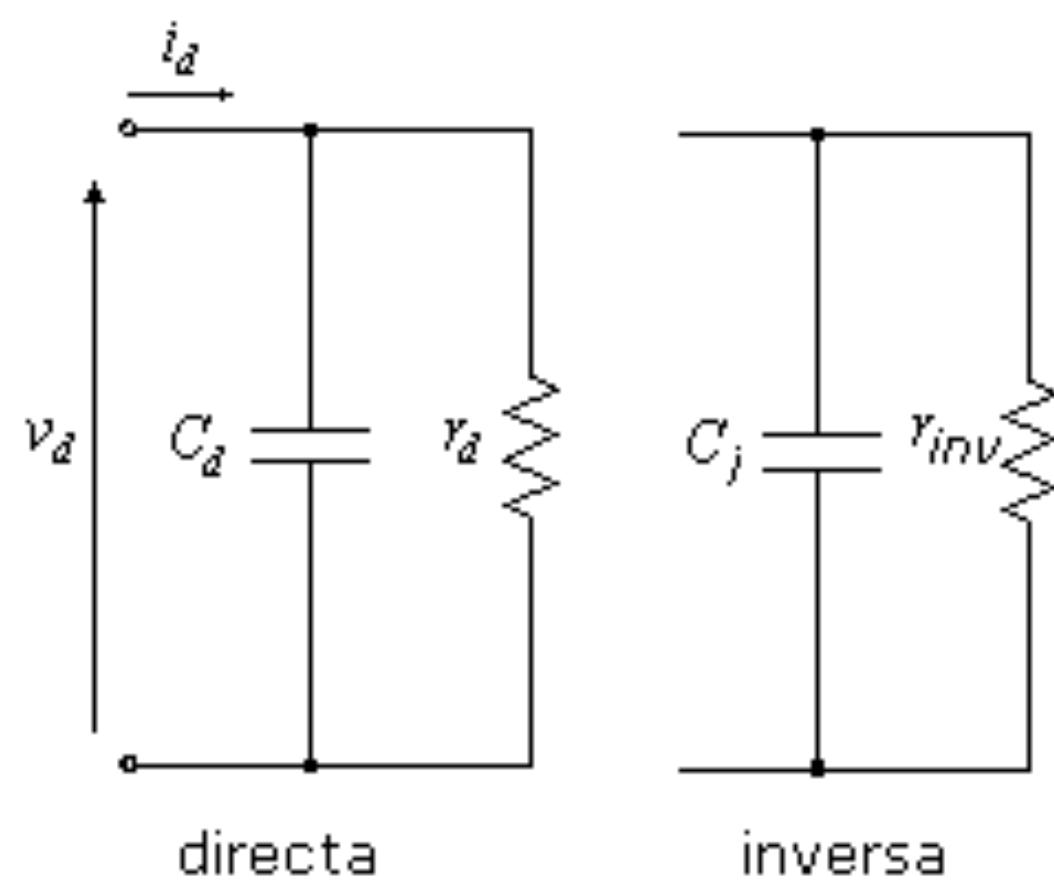
Al aplicar ΔV_D , el $\Delta Q_N = \Delta Q_P$ que se produce al variar la longitud de la ZD, puede interpretarse como un capacitor de placas planas con dieléctrico de Si.

$$C_j = \Delta Q_{ZD} / \Delta V_D = \epsilon A / l_{dQ}$$

Capacitancia de difusión: *Más Imp. en d. MTA*

ΔV_D , provocará una variación de los portadores que se inyectan hacia uno y otro lado de la juntura (acumulación de carga móvil en ZN) y que se moverán hasta los contactos metálicos en un tiempo τ_F (*de tránsito*).

Impedancia dinámica de pequeña señal

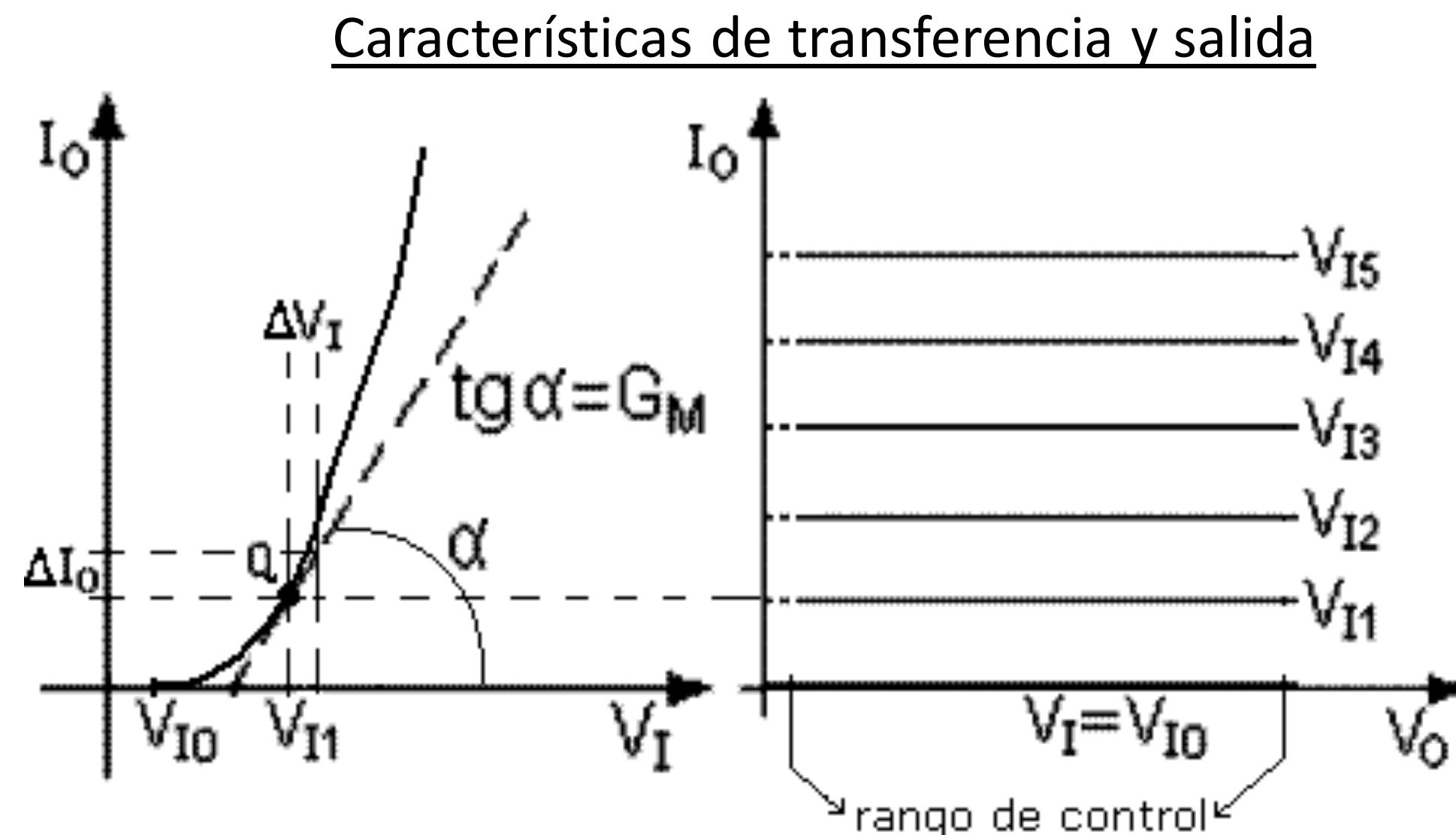
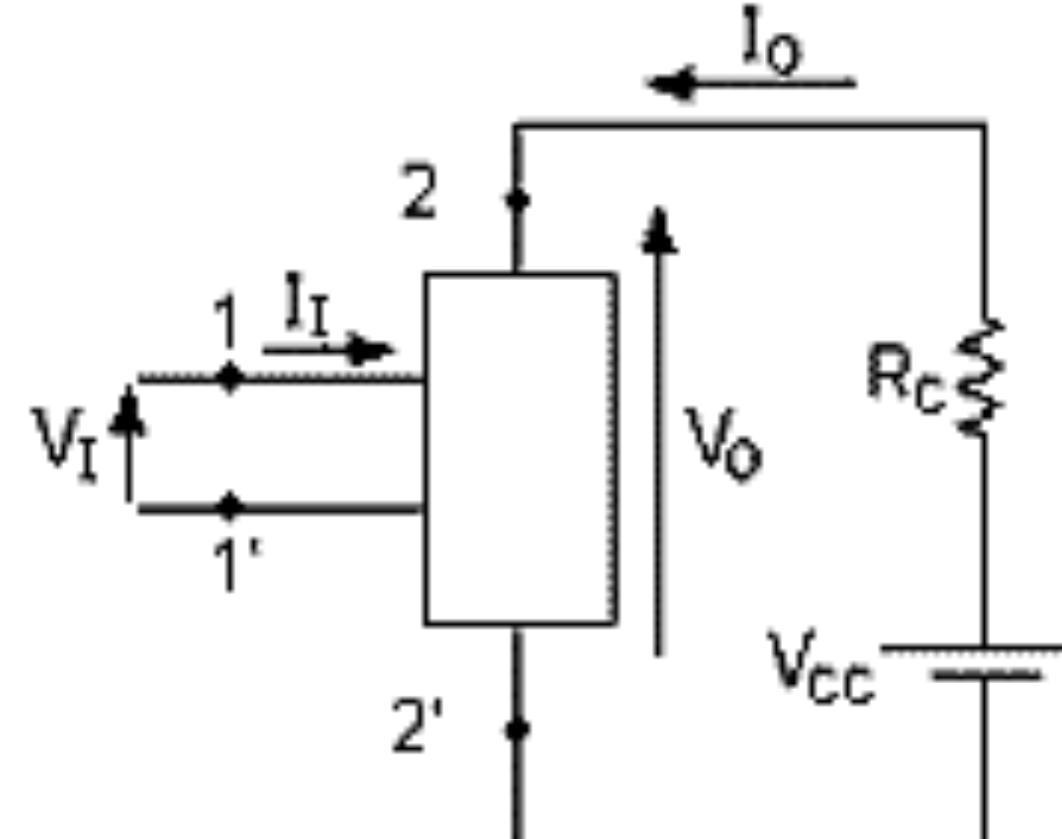


Como $C_d = f(I_{DQ}) \Rightarrow$ diodo en directa: $C_d \gg C_j$
diodo en inversa: $C_d \rightarrow 0$

$$\begin{aligned} C_d &= \Delta Q_{ZN} / \Delta V_D = (\Delta Q_{ZN} / \Delta V_D) \Delta t / \Delta t \\ &= \Delta I_D / \Delta V_D \cdot \Delta t = g_d \cdot \tau_F = (I_{DQ} / V_T) \cdot \tau_F \end{aligned}$$

Dispositivos de control de potencia

Este dispositivo controla la potencia entregada por una fuente de alimentación V_{CC} a una carga R_C mediante el control de la corriente que circula por dicha carga, por una tensión (o corriente) que no forma parte de la malla donde se encuentra la carga.



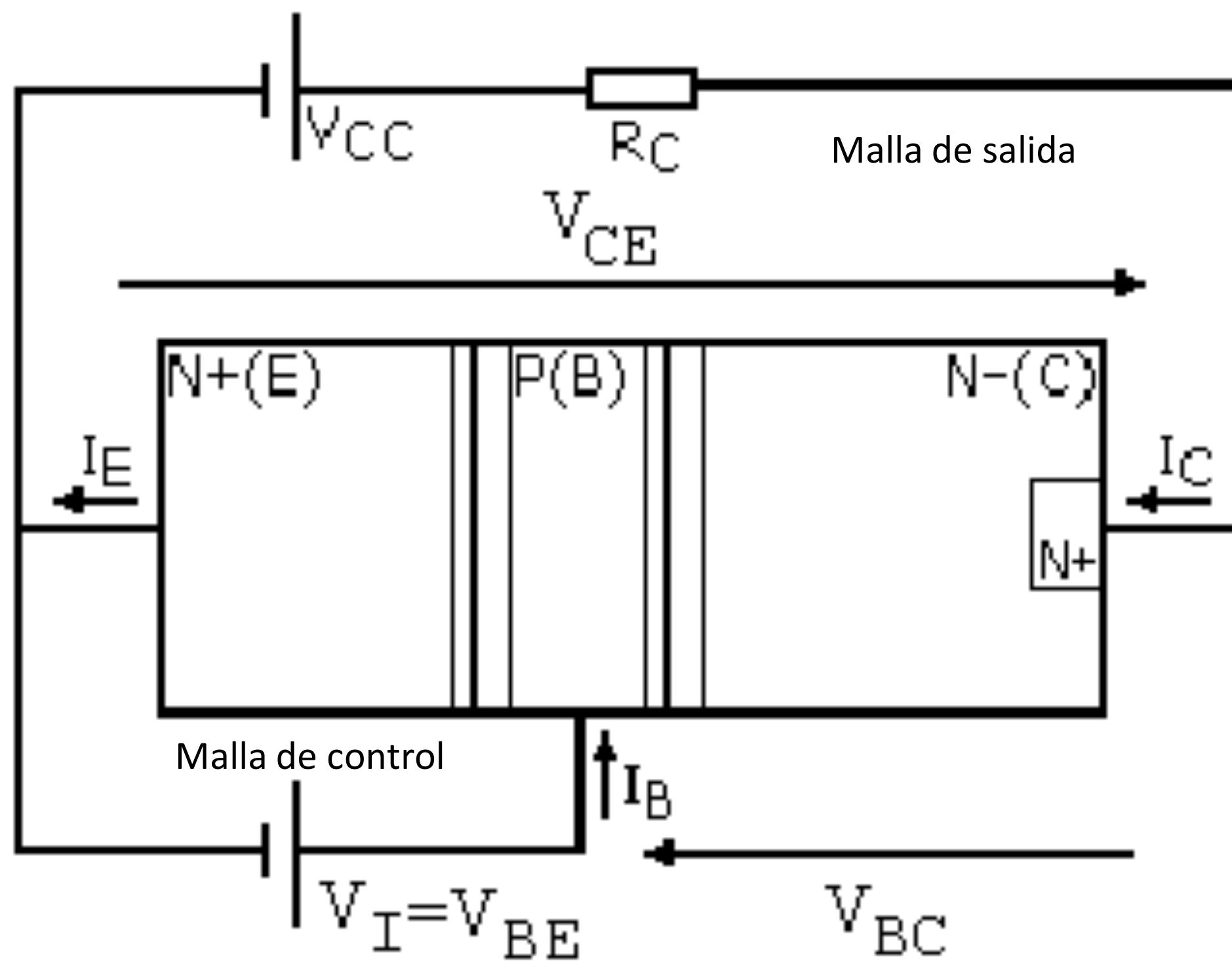
Variando la tensión de control V_I , se varía la relación V_O/I_O (resistencia estática de salida que presenta el dispositivo), por lo que se lo denomina “de resistencia de transferencia variable” o “*transistor*”.

Las variaciones de I_O debidas a pequeñas variaciones de V_I en los alrededores de V_{I1} (o V_{IQ}), pueden analizarse sobre la recta tangente a la característica de transferencia (*linealización*), que muestra el efecto de control de la corriente de señal de salida con una tensión de señal de entrada: $\Delta I_O = G_M \cdot \Delta V_I$.

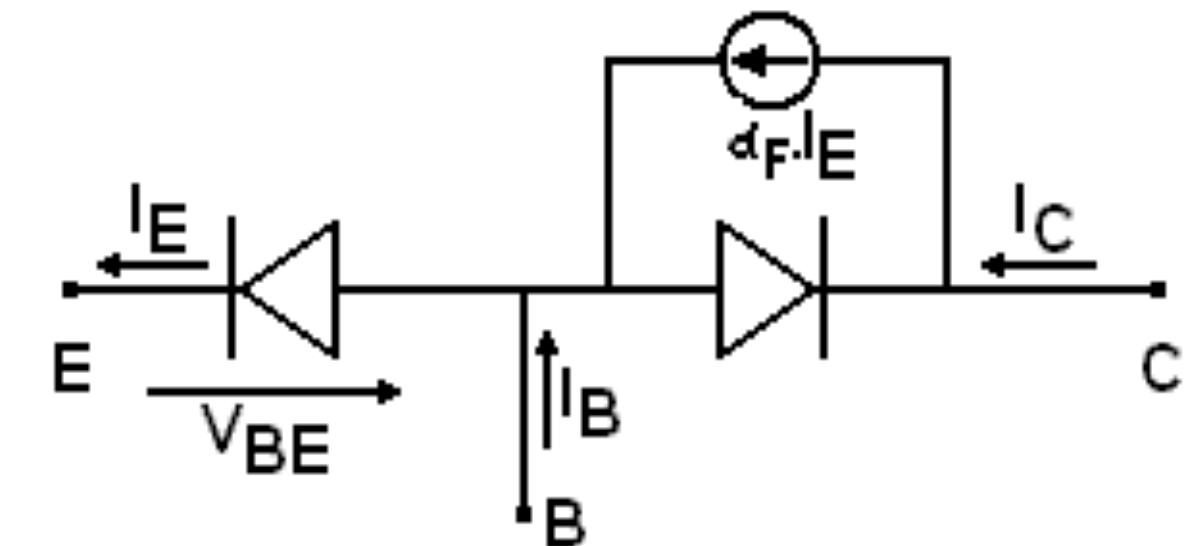
G_M : conductancia mutua o *transconductancia* del dispositivo.

Transistor bipolar de juntura (TBJ)

El TBJ tiene una estructura basada en dos junturas PN: Para el tipo NPN, una N+P y otra PN-, con la zona P compartida por ambas junturas.



Modelo eléctrico o de Ebers-Moll, simplificado para el modo de control de potencia:



$$I_C = I_S \cdot (e^{V_{BE}/V_T})$$

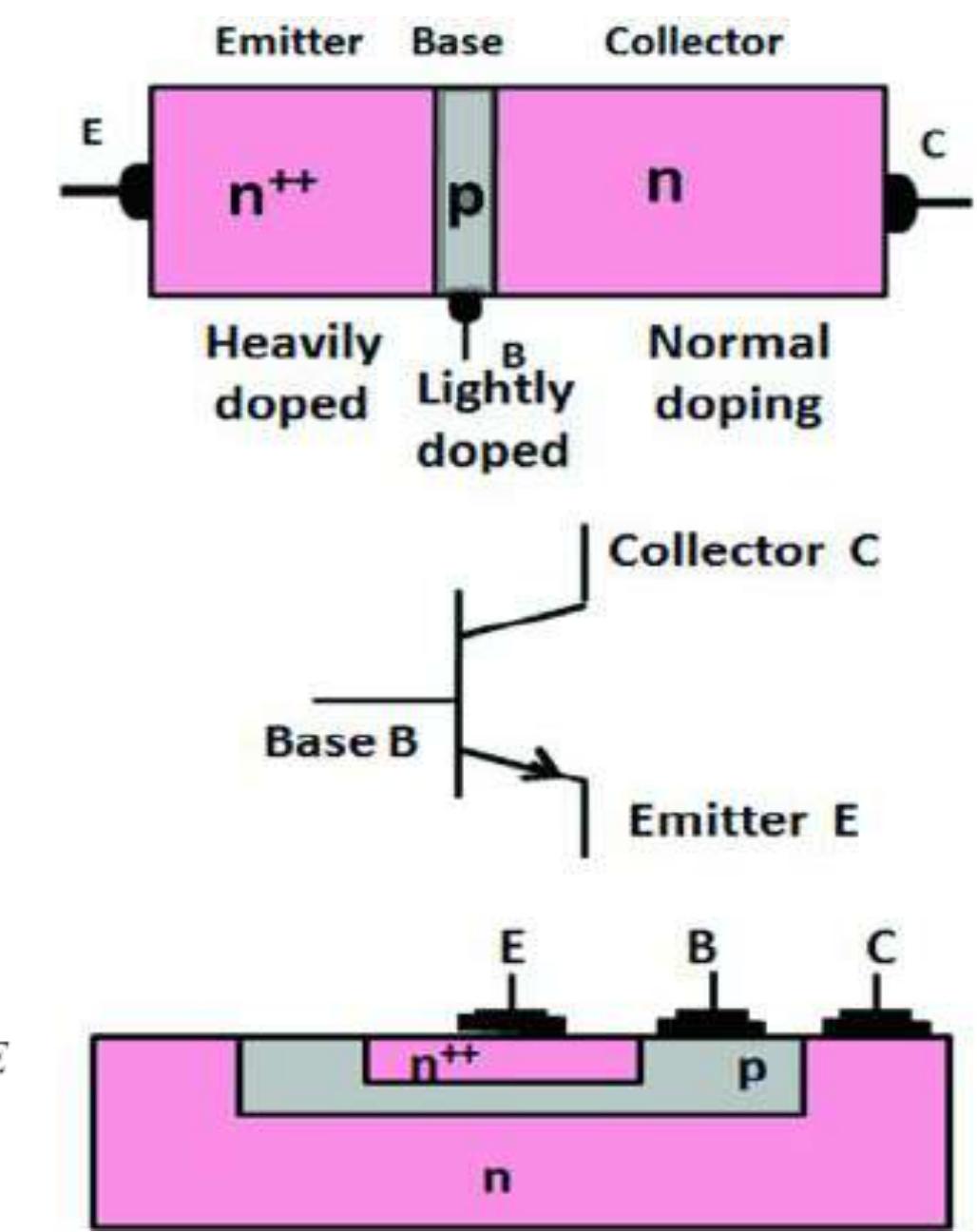
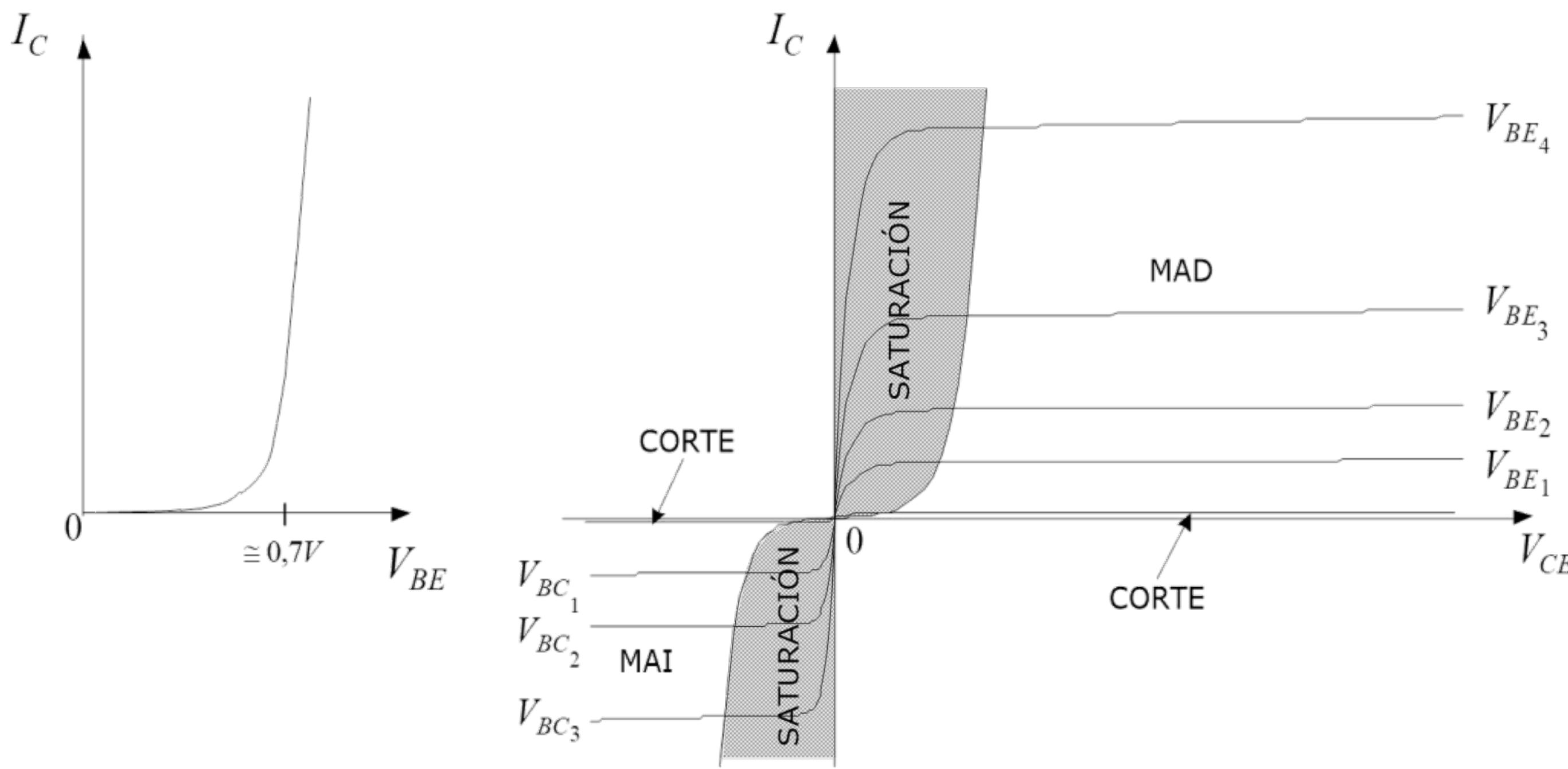
$$I_C = I_B \cdot \beta_F \quad (\beta_F \gg 1)$$

Si V_{CC} es tal que $V_{CE} > V_t \approx 0,7V$, la juntura N+ P se encontrará en directa y la P N- en inversa.

Los electrones injectados desde el lado N+ (Emisor) al P (Base) serán arrastrados en su mayoría hacia el lado N- (Colector) por el campo eléctrico elevado de la juntura P N- en inversa y de allí hacia la batería V_{CC} (I_C). En mucha menor proporción se irán hacia el terminal positivo de V_I (I_B).

TBJ: modos de funcionamiento

Características de transferencia y salida



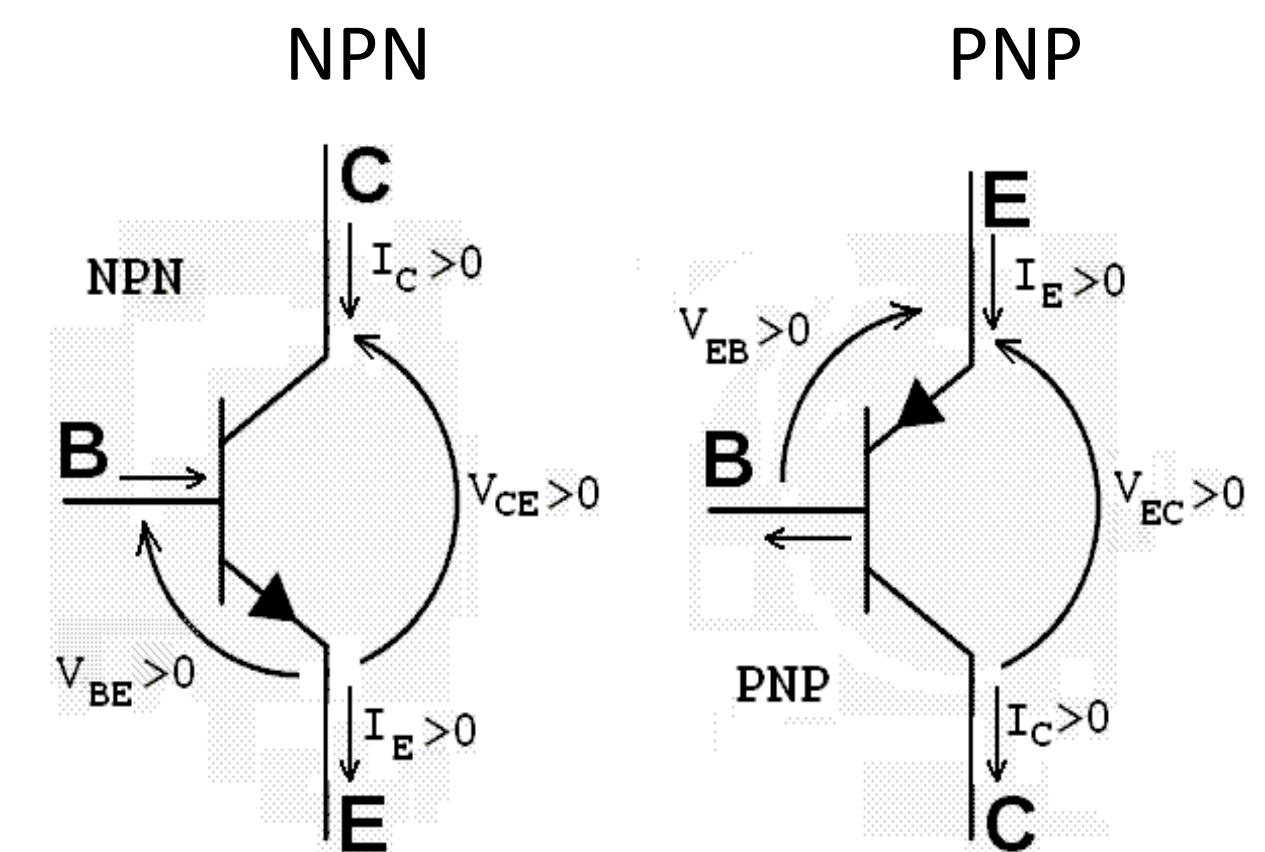
jBE en directa y jCB en inversa: MAD

jBE en directa y jCB en directa: SATURACIÓN ($V_{CE} \rightarrow 0$)

jBE en inversa y jCB en inversa: CORTE (*)

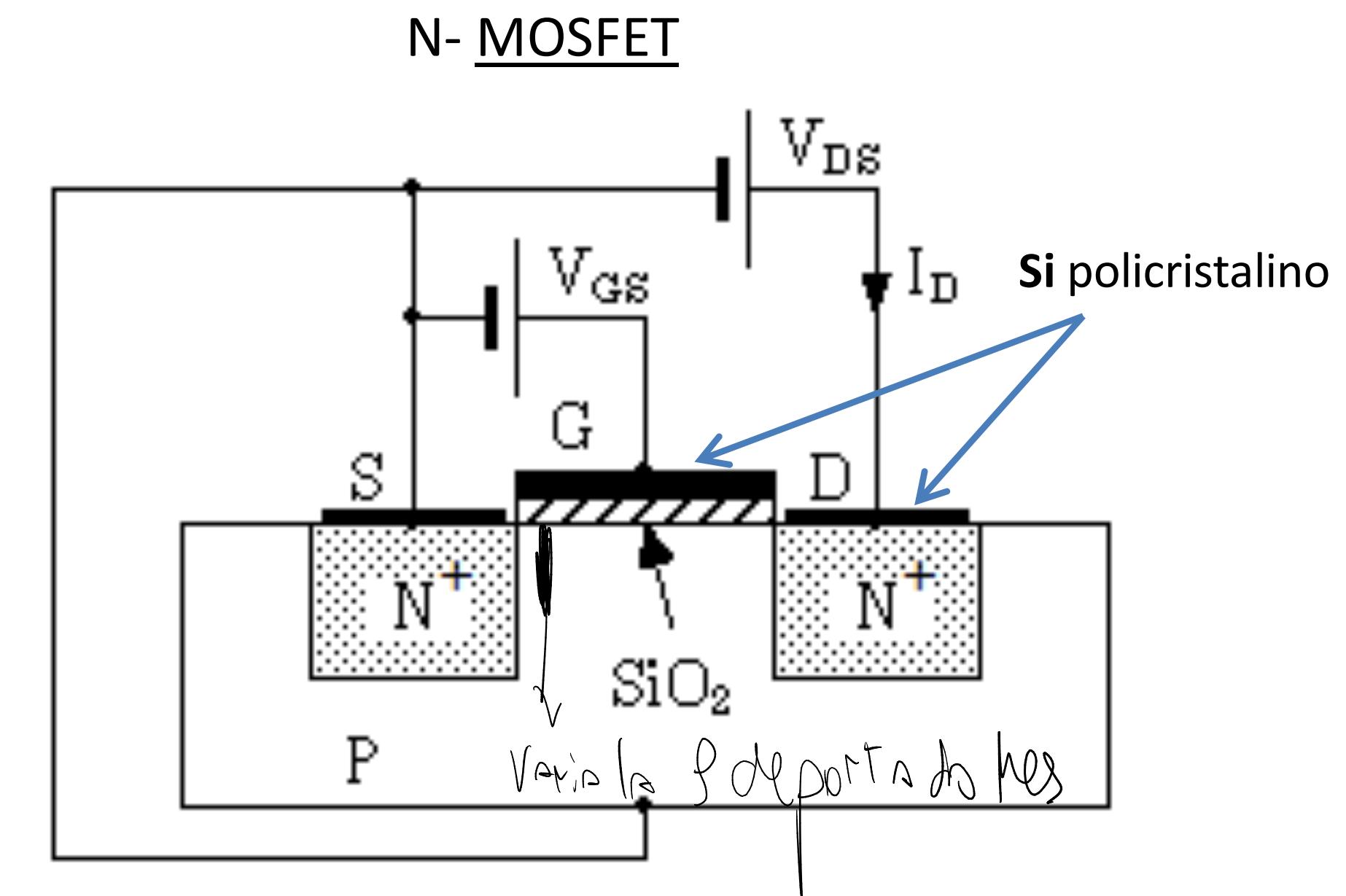
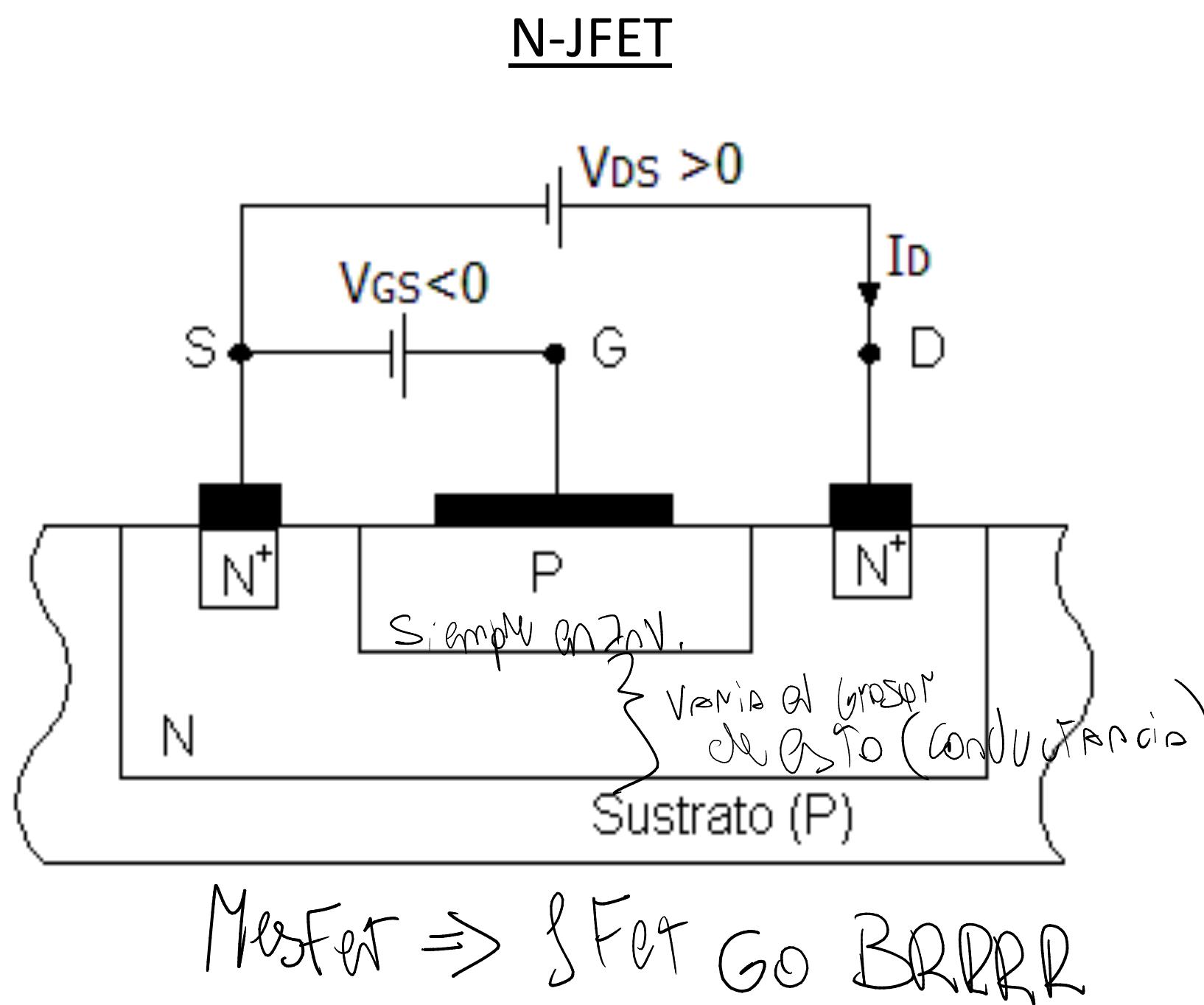
jBE en INVERSA y jCB en directa: MAI

(*) en la práctica con $V_{BE} < 0,5V$ (en Si), el TBJ conduce una corriente tan baja, que puede considerarse en corte.

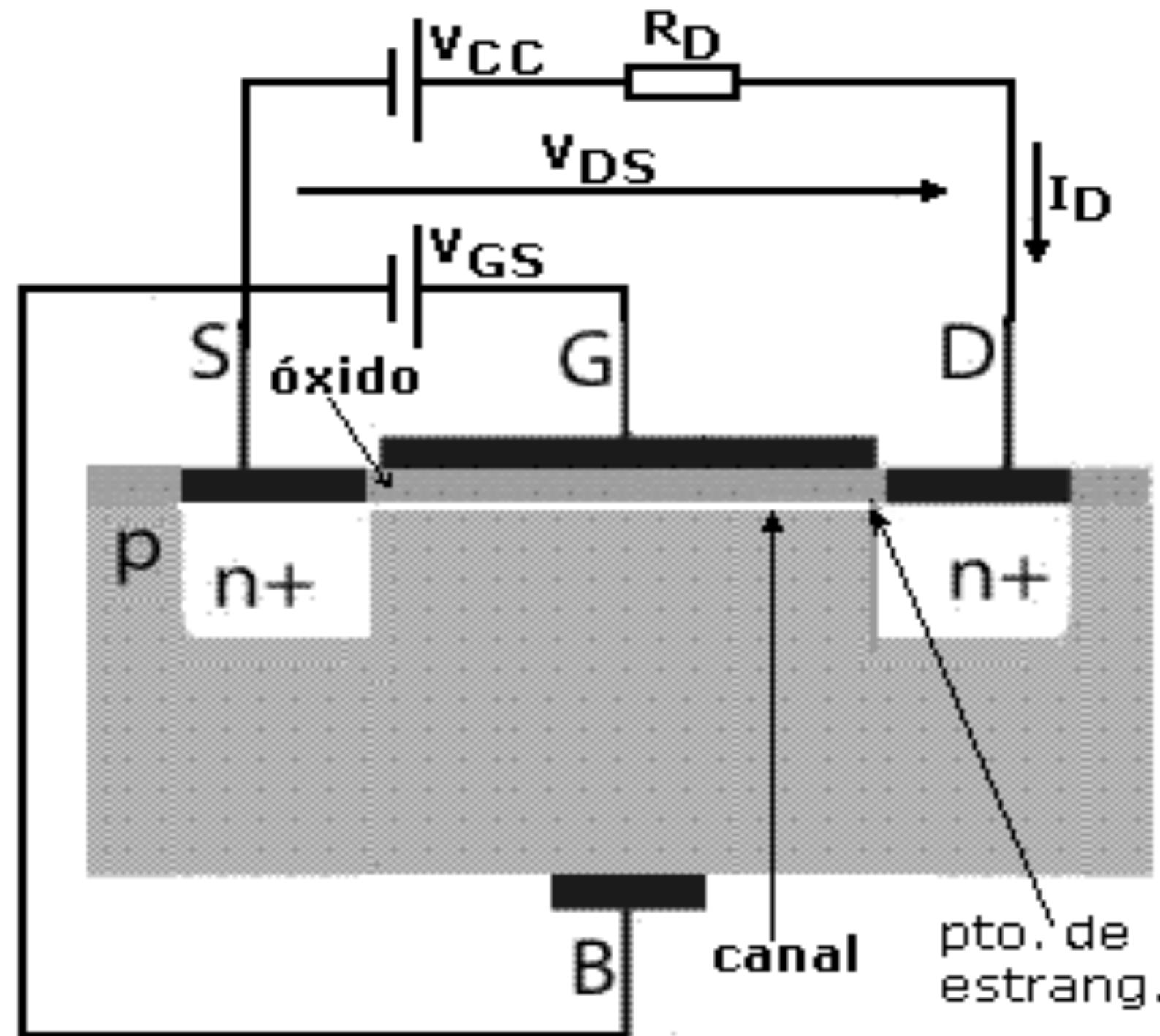


Transistores de efecto de campo (FETs)

Los FETs (transistores unipolares) basan su funcionamiento en el control de la conducción de un tipo de portador a través de una zona de semiconductor llamada *canal*. El efecto transistor está dado por el control del valor de la conductancia de dicho canal. Siendo la conductancia de un material proporcional a la conductividad y a su sección transversal, si para controlar la corriente se varía la conductividad estamos en presencia de un MOSFET y si se varía la sección, de un JFET o MESFET.



Transistor MOSFET



El MOSFET (MOS) puede modelarse como un capacitor donde se controla el desplazamiento de su carga por una de sus placas. En la fig., con $V_{GS} > 0$ se carga positivamente al metal (Gate) \Rightarrow para neutralizar la carga los electrones del Si P (Bulk) se acercan a la cara inferior del SiO_2 invirtiendo el dopaje en su superficie (pasa de P a Nsup). Para $V_{GS} = V_{Th}$ (ó V_T) (*umbral*), $\text{Nsup} = \text{P} \Rightarrow$ queda formado un *canal N* que conecta Source y Drain (MOSFET canal N o NMOS)

$$\text{Con } V_{DS} \rightarrow 0 \text{ (canal uniforme)} \Rightarrow I_D = G_{\text{canal}} \cdot V_{DS}$$

$$G_{\text{canal}} = f(\sigma_{\text{canal}}) = f(Q_{\text{canal}}) = f[\text{Cox.}(V_{GS} - V_T)]$$

Para $V_{GD} < V_T$ ($V_{DS} > V_{GS} - V_T = V_{DSE}$)
 \Rightarrow no hay canal junto a D (*estrangulamiento*)

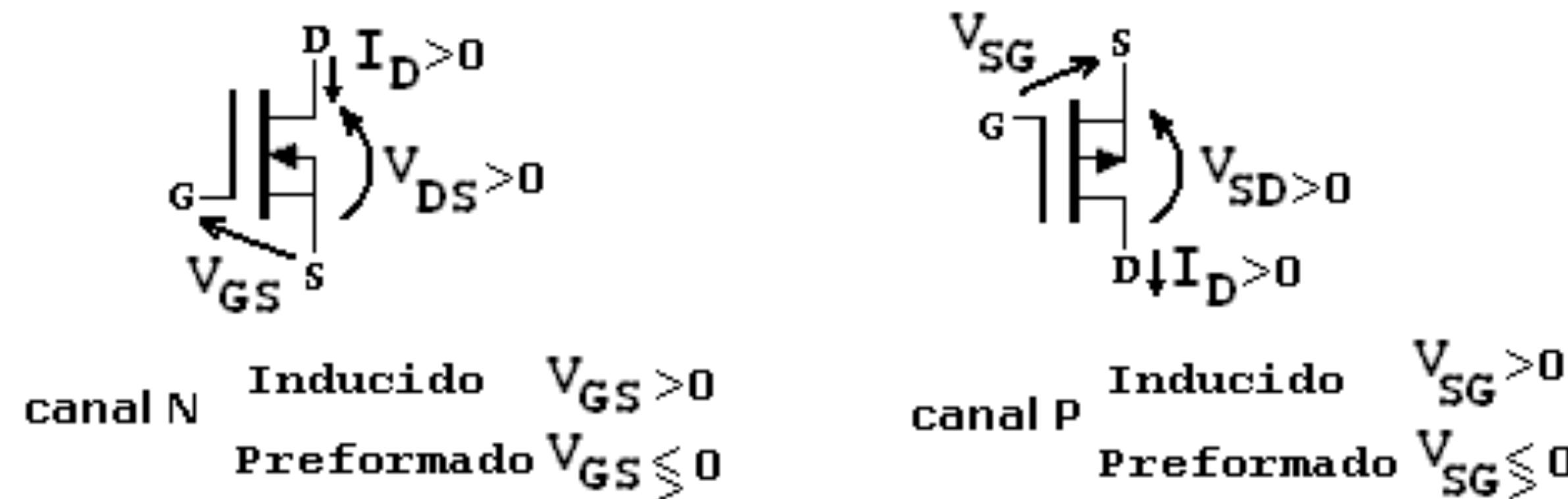
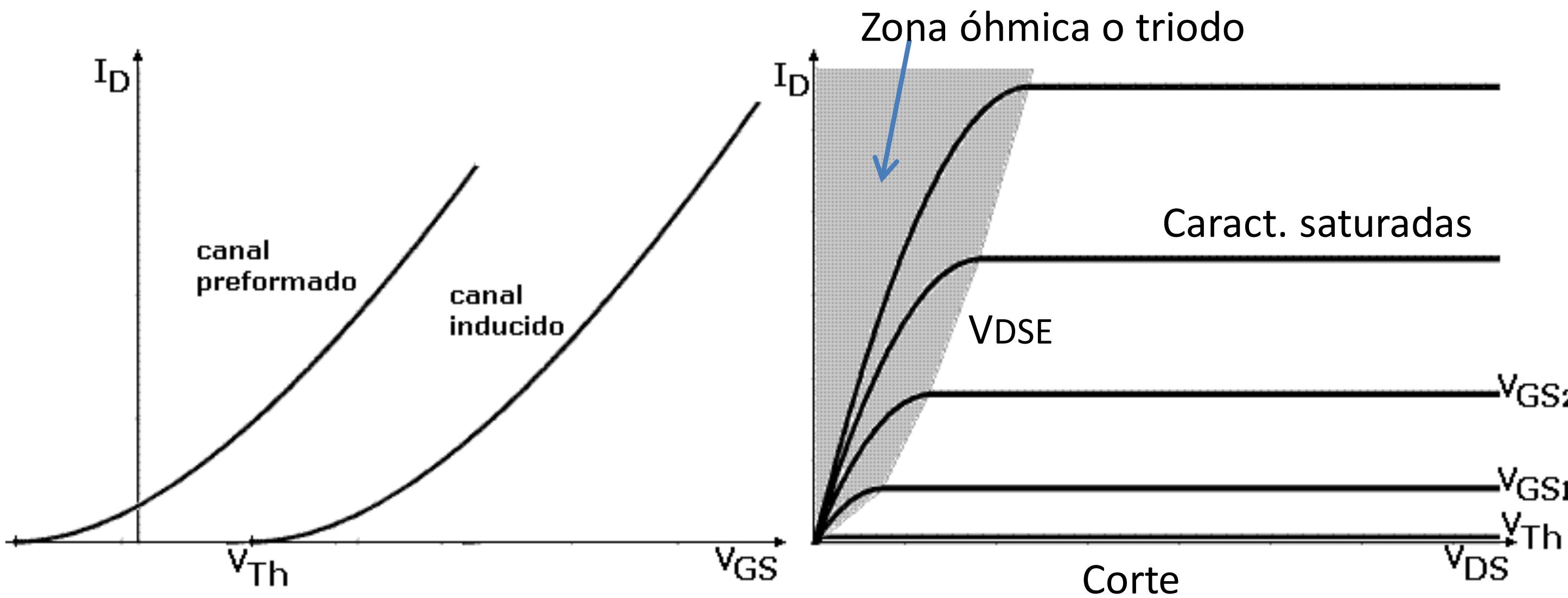
Todo ΔV_{DS} por encima de V_{DSE} , cae en el “*punto de estrangulamiento*” (donde $\sigma \rightarrow 0$) $\Rightarrow V_{\text{canal}} = V_{DSE} = \text{cte.}$
 $\Rightarrow I_D \neq f(V_{DS})$ (hay circulación de corriente porque el campo en el estrangulamiento arrastra a los electrones hacia Vcc)

$$\Rightarrow I_D = f[(V_{GS} - V_T)^2] \Rightarrow I_D = K (V_{GS} - V_T)^2$$

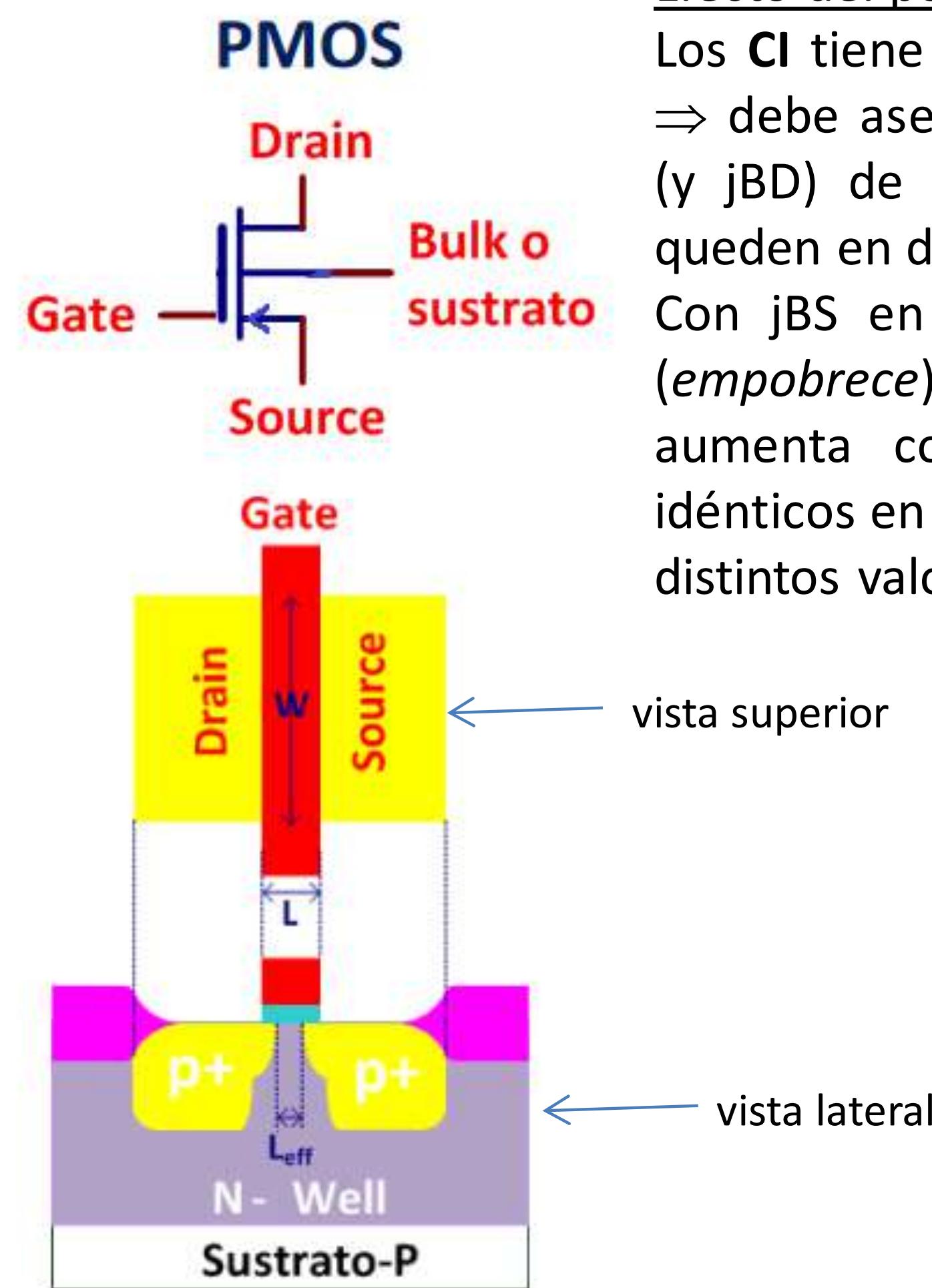
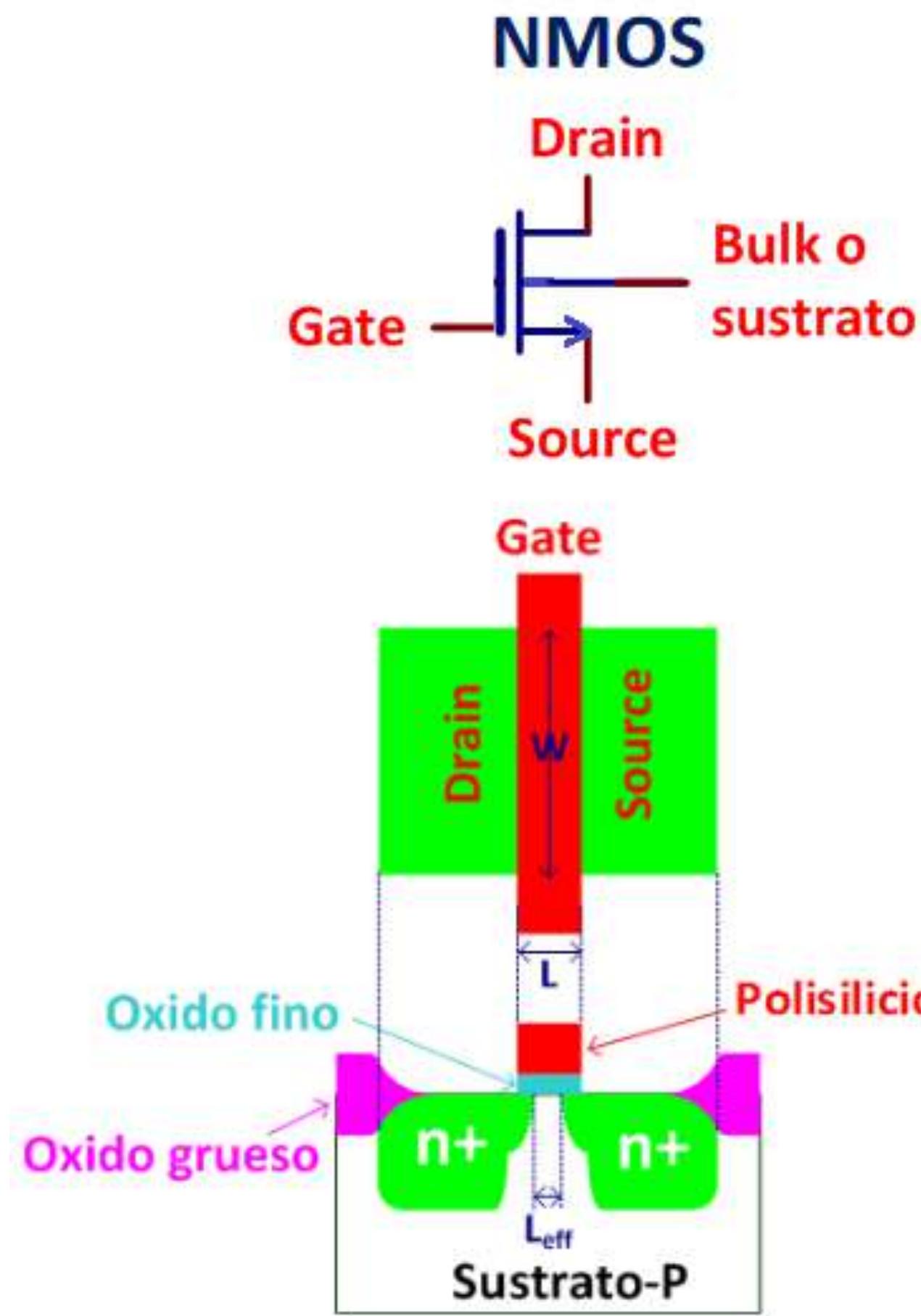
$k'(W_c / L_c)$

MOSFET: modos de funcionamiento

Características de transferencia y salida



MOSFET: ejemplo de disposición del transistor integrado (layout)



Efecto del potencial de sustrato:
Los CI tienen un sustrato común
⇒ debe asegurarse que las jBS
(y jBD) de todos los MOS no
queden en directa.
Con jBS en inversa se reduce
(empobrece) el canal ⇒ $|V_T|$
aumenta con $|V_{SB}|$ ⇒ MOS
idénticos en un CI podrían tener
distintos valores de V_T .

vista superior

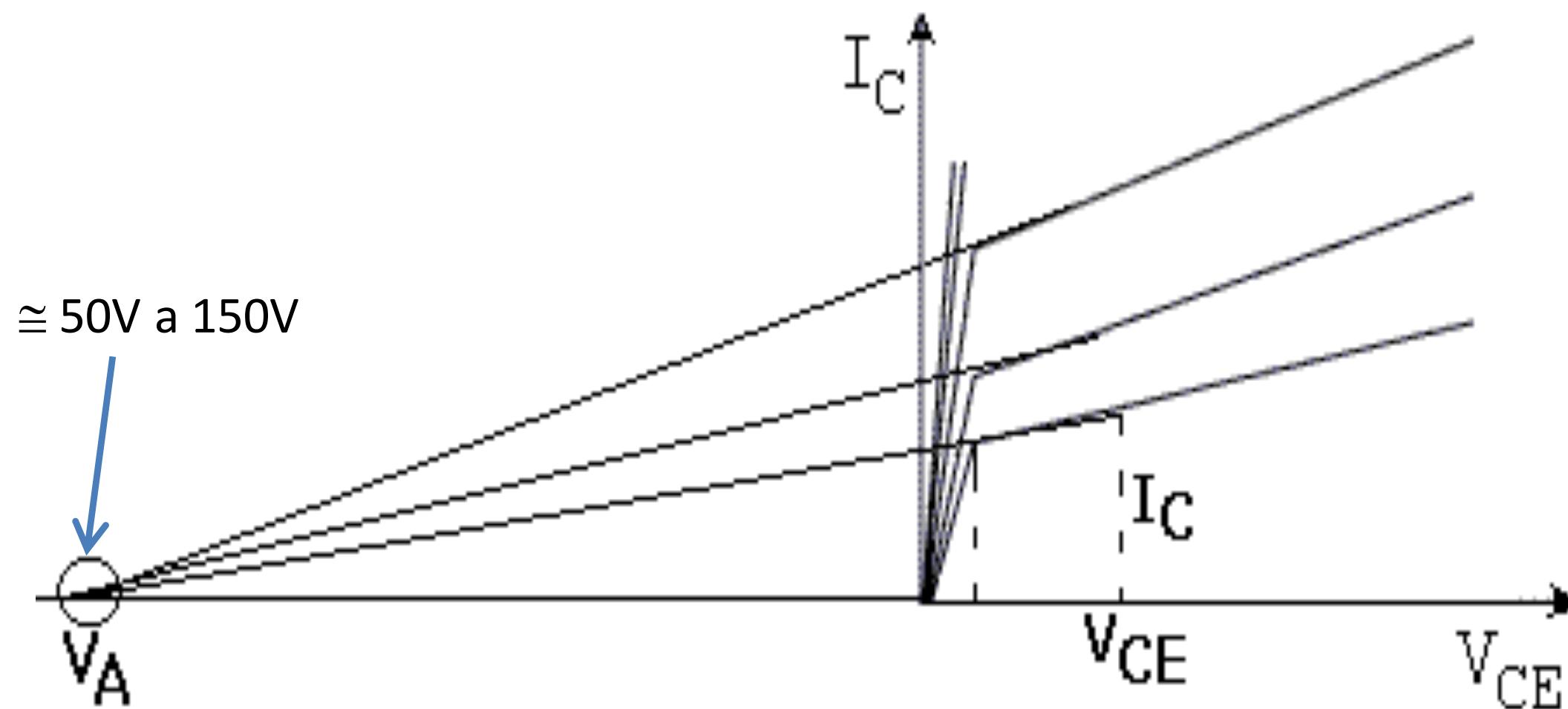
vista lateral

Transistores: efectos de 2do orden

Las desviaciones en el funcionamiento de los transistores reales son en la mayoría de los casos debidas a efectos similares a los indicados para el diodo y modificarán la característica de transferencia y la de salida.

Modulación del ancho de la base en el TBJ o efecto Early

En MAD existe una ligera dependencia de I_C con V_{CE} (características de salida con una leve pendiente positiva).



Corrección de la ecuación del TBJ
por efecto Early:

$$I_C = I_S \cdot (e^{V_{BE}/V_T}) \cdot (1 + V_{CE} / |V_A|)$$

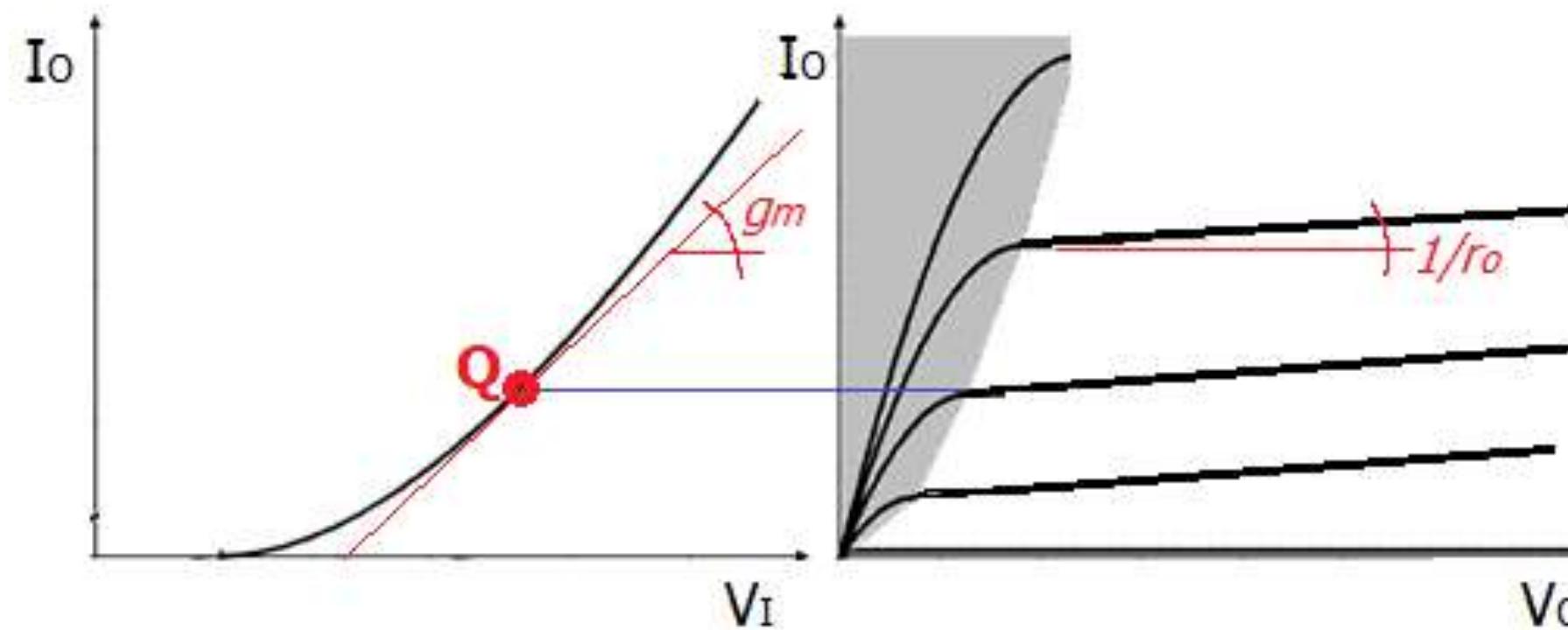
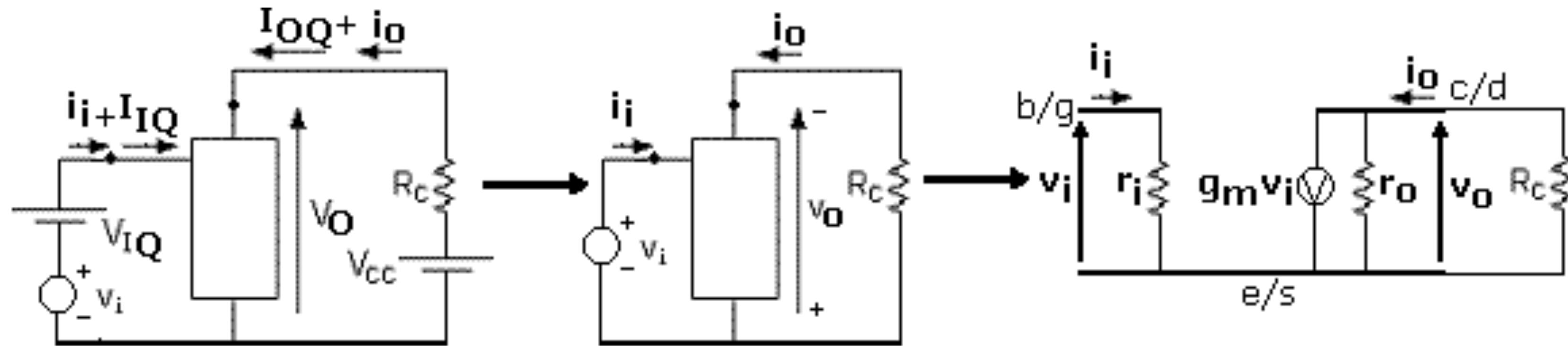
Modulación del largo del canal en los FETs

En zona de características saturadas, las curvas de salida tienen una leve pendiente positiva.

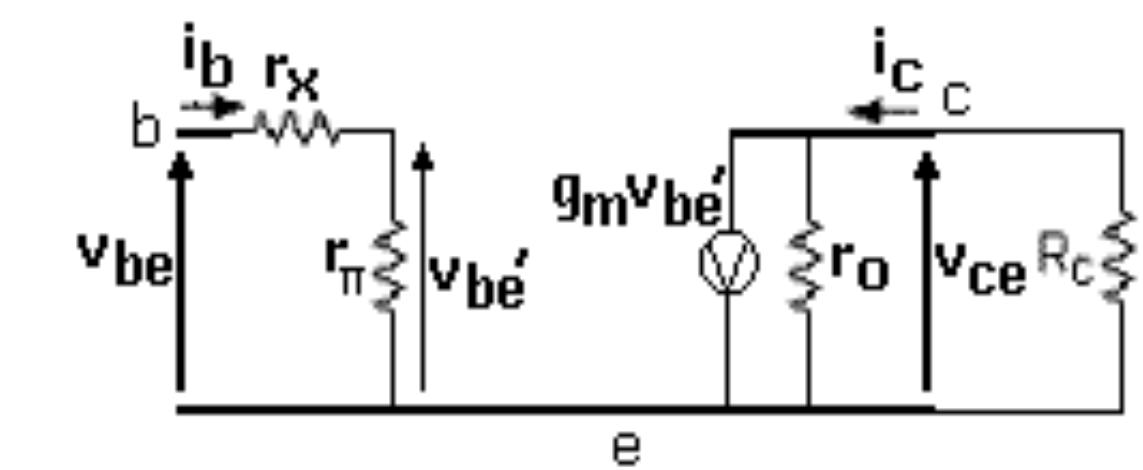
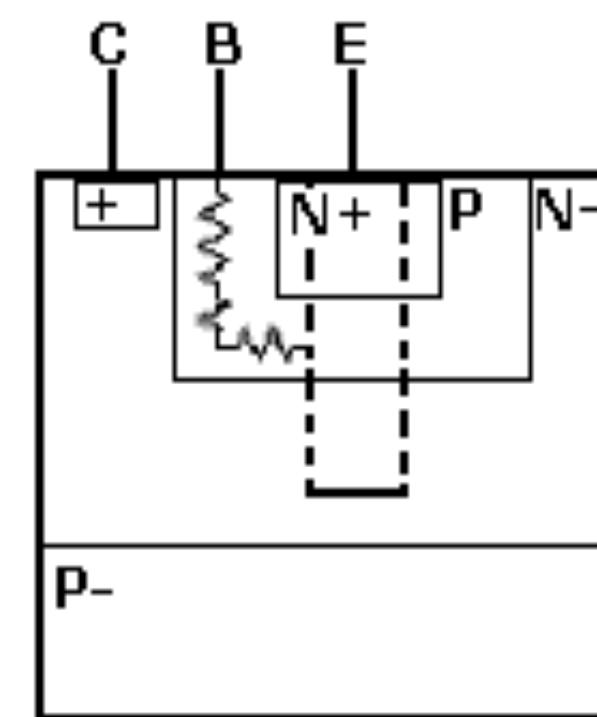
$$I_D = K (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

Corrección de la ecuación del MOSFET ($\lambda \approx 0,01 \text{ 1/V a } 0,02 \text{ 1/V, aprox.}$)

Transistores: modelos para pequeña señal



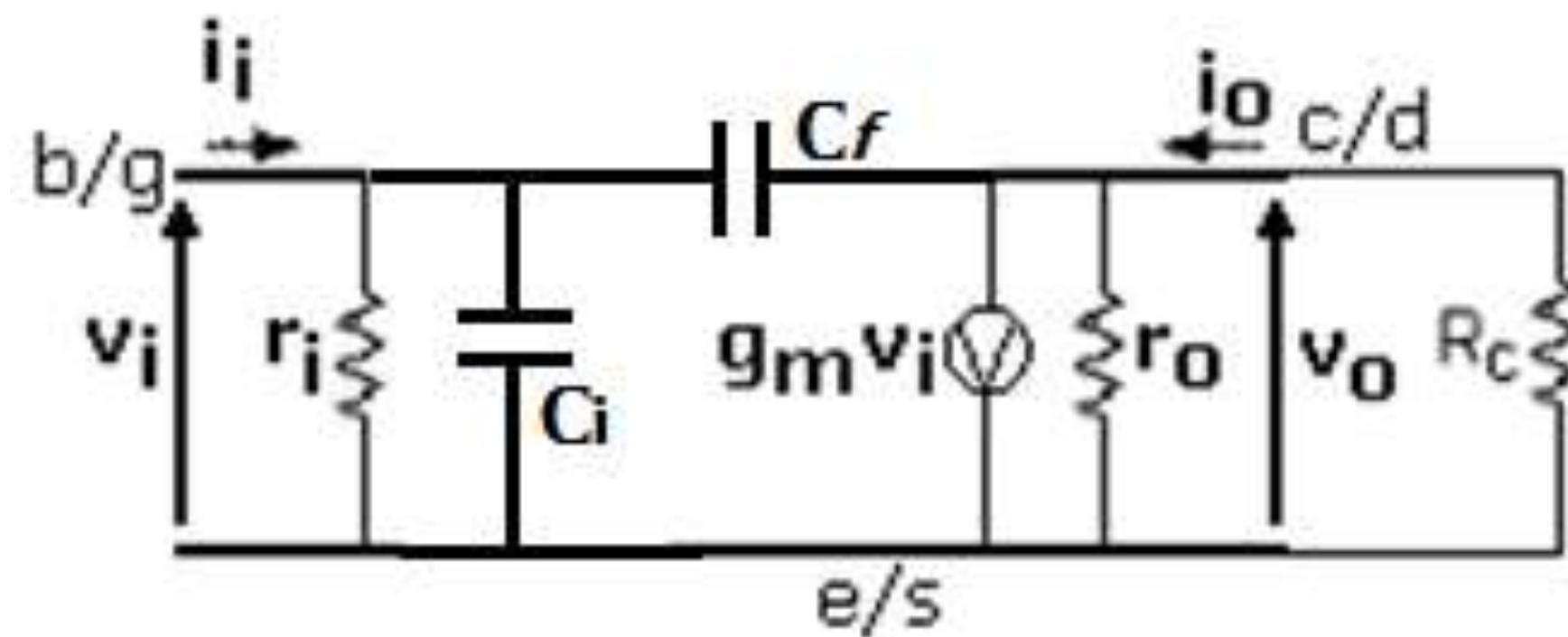
Estructura básica del TBJ: efecto del cuerpo de la base



Transistores: parámetros para pequeña señal

g_m, v_i	Efecto de control de señal o efecto transistor. El factor de proporcionalidad es la transconductancia (pendiente de la recta tangente a la característica de transferencia del transistor en los alrededores del punto de reposo).	TBJ g_m	$= \frac{dI_c}{dV_{BE} _Q} = i_c / v_{be} _Q$ $= I_{CQ}/V_T$
		MOSFET g_m	$= \frac{dI_d}{dV_{GS} _Q} = i_d / v_{gs} _Q$ $= 2(K \cdot I_{DQ})^{1/2}$
r_i	TBJ r_π	Variación de la corriente en la base al estar más en directa (o menos) la jBE	$= v_{be} / i_b _Q = \beta \cdot v_{be} / i_c = \beta / g_m$
	MOSFET r_{gs}	Resistencia del óxido aislante (que puede considerarse infinita)	$= v_{gs} / i_g _Q = r_{gs} \rightarrow \infty$
r_o	TBJ r_o	Efecto Early	$= v_{ce} / i_c _{Q, v_{be}=0} = V_A / I_{CQ}$
	MOSFET r_{ds}	Modulación del largo del canal	$= v_{ds} / i_d _{Q, v_{gs}=0} = 1/\lambda I_{DQ}$

Transistores: efectos reactivos en pequeña señal



TBJ:

$C_i = C_\pi$ (difusión)

$C_f = C_\mu$ (juntura)

MOSFET:

$C_i = C_{gs}$ (\approx Cóxido)

$C_f = C_{gd}$ (\approx Cov)

Otras capacitancias del MOSFET: C_{bs} ; C_{bd} (juntura)

Bibliografia

Oral Meyer

'Analysis and design of Integrated Analog Circuits'

Sadra Sadri

