

- **Semiconductores**
- **La unión P-N: El Diodo.**
- **El Transistor Bipolar.**
- **El Transistor MOS.**
  - Estructura MOS
  - Transistor MOSFET de acumulación
  - Transistor MOSFET de depleción

# Semiconductores

Dependiendo de su resistividad clasificamos los materiales en:

a) Aislantes

Resistividad comprendida entre  $10^3$  y  $10^8 \Omega\text{m}$

b) Conductores

Resistividad comprendida entre  $10^{-8}$  y  $10^{-6} \Omega\text{m}$

c) Semiconductores

A bajas temperaturas son aislantes. Conforme aumenta la temperatura, aumenta su conductividad.

Ejp: Germanio, Silicio, Arseniuro de Galio

Se puede aumentar la conductividad de los semiconductores añadiendo impurezas.

Semiconductor puro	⇒	Semiconductor Intrínseco
Semiconductor con impurezas	⇒	Semiconductor Extrínseco

Dos tipos de impurezas:

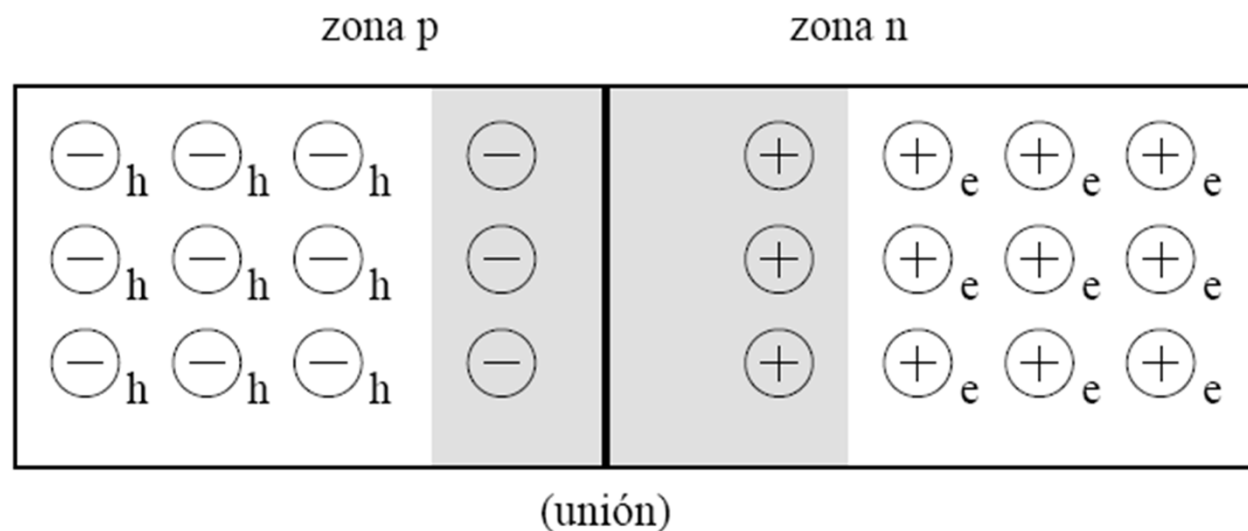
Impurezas donadoras (añaden electrones)	⇒	Semiconductor tipo n
Ejp: P, As, Sb		

Impurezas aceptoras (añaden huecos)	⇒	Semiconductor tipo p
Ejp: B, Ga, Al		

## La unión P-N: El Diodo

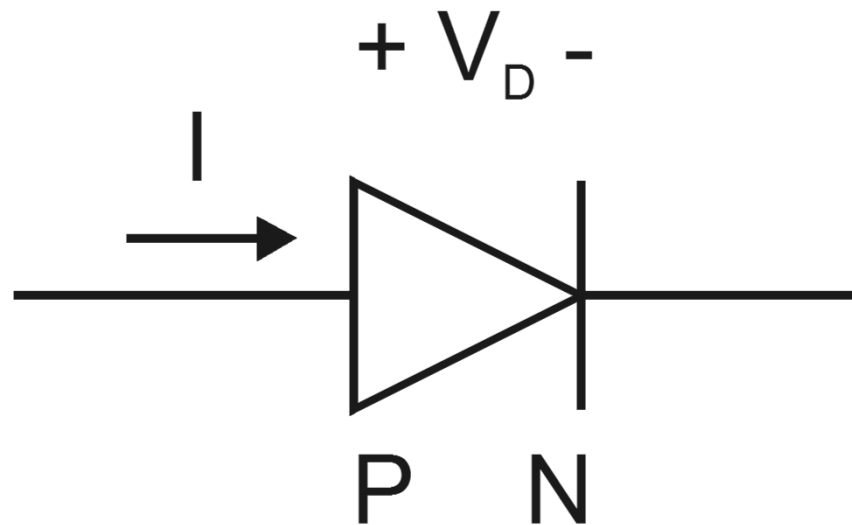
La mayoría de los elementos electrónicos que se estudian en la teoría del estado sólido están basados en la unión de semiconductores de tipo P y de tipo N.

La unión p-n se produce dopando dos zonas de un monocristal semiconductor de forma diferente, una con impurezas donadoras (tipo n) y la otra con impurezas aceptoras (tipo p).



- Diodo

Vamos ahora a estudiar la unión p-n sometida a un campo eléctrico externo, es decir la unión P-N polarizada.



- **Polarización nula ( $V_D = 0$ )**

La corriente  $I$  total es nula.

- **Polarización directa ( $V_D > 0$ )**

Se produce un aumento en la corriente  $I$  de forma exponencial.

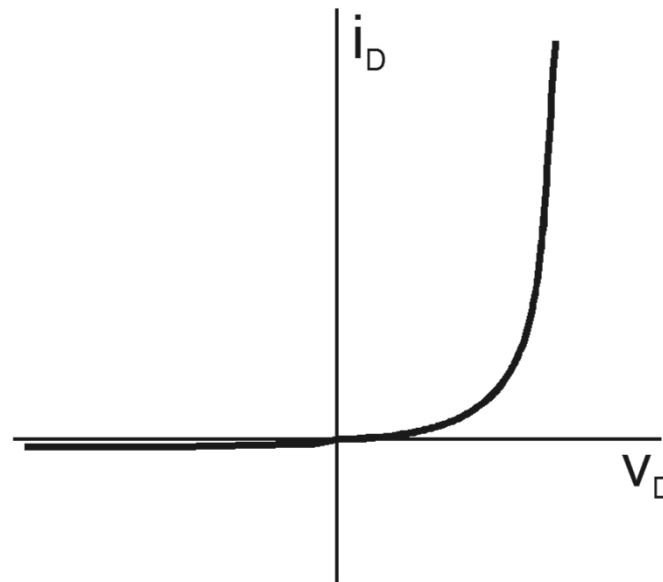
- **Polarización inversa ( $V_D < 0$ )**

Se produce una corriente  $I$  negativa muy pequeña que se denominada *corriente inversa de saturación* ( $I_S$ ), muy sensible a la temperatura.



- **Curva característica del diodo.**

Es la representación gráfica de la intensidad que circula por él ( $I_D$ ) frente a la tensión que existe entre sus extremos ( $V_D$ ).



$$I_D = I_S (e^{(q V_D / k T)} - 1)$$

- **Modelo ideal del diodo**

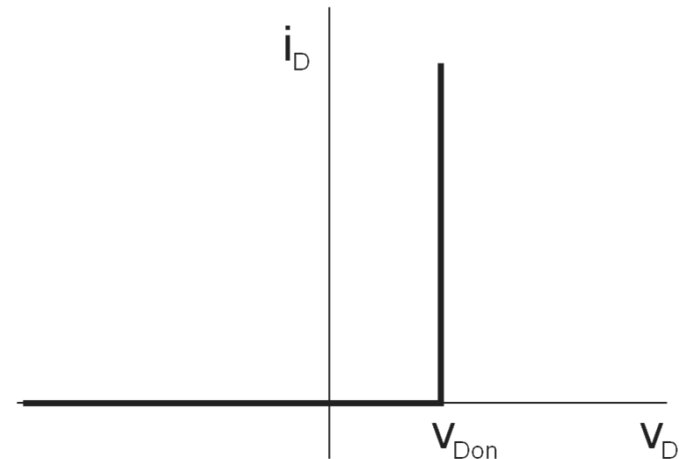
Tiene en cuenta que la conducción del diodo en polarización directa sólo es apreciable por encima de un determinado valor de tensión, denominada tensión umbral o  $V_{Don}$

Polarización inversa: Circuito abierto

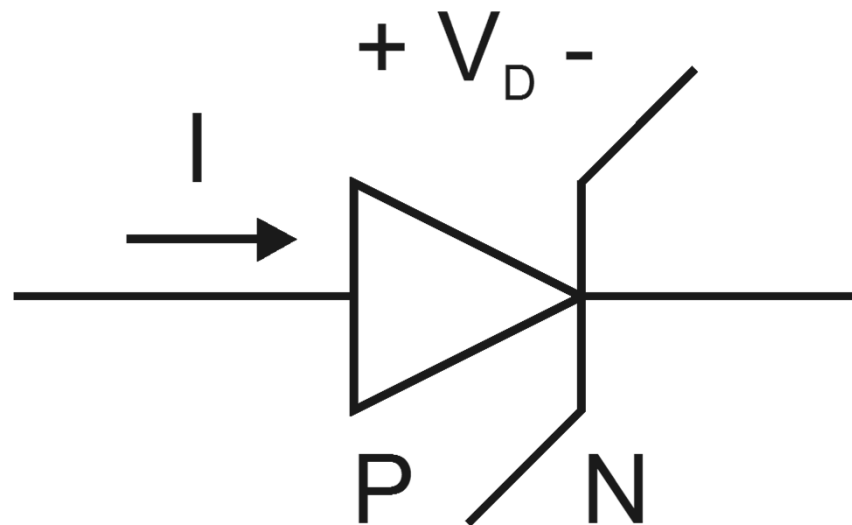
Polarización directa: Fuente de tensión  $V_{Don}$

$$\forall v_D \leq v_{Don} \Rightarrow i_D = 0$$

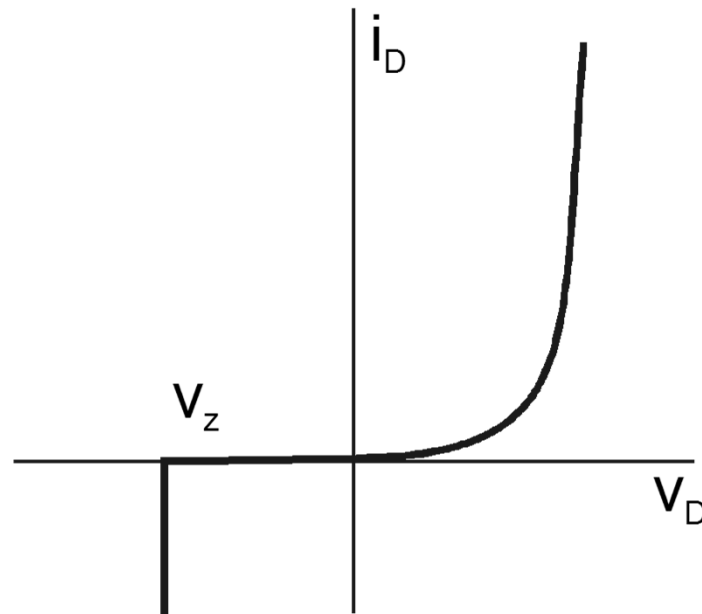
$$\forall i_D \geq 0 \Rightarrow v_D = v_{Don}$$



- Diodo Zener



- Curva característica del diodo Zener



- **Modelo ideal del diodo Zener**

Conducción inversa: Fuente de tensión  $V_Z$

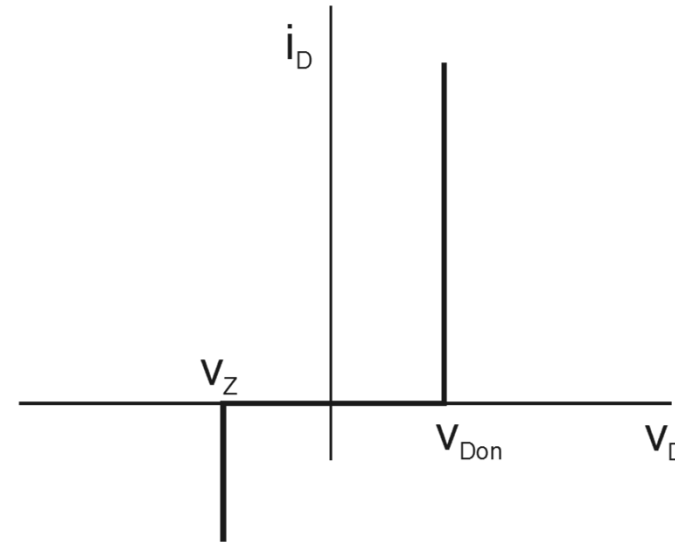
Polarización inversa: Circuito abierto

Polarización directa: Fuente de tensión  $V_{Don}$

$$\forall i_D \leq 0 \Rightarrow v_D = v_Z$$

$$\forall v_Z \leq v_D \leq v_{Don} \Rightarrow i_D = 0$$

$$\forall i_D \geq 0 \Rightarrow v_D = v_{Don}$$



# El transistor Bipolar

Dispositivo electrónico constituido por un monocristal de silicio en el que se ha realizado un dopado alterno con impurezas tipo N y P en tres zonas diferentes.

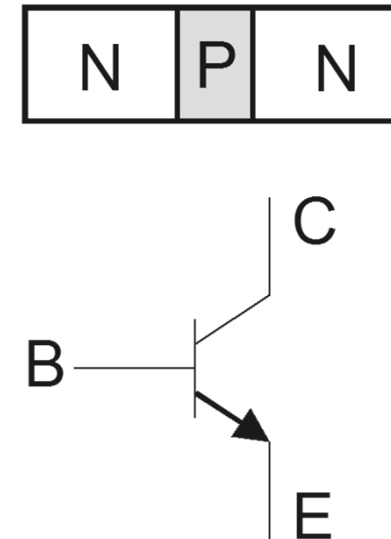
Dos tipos de estructuras distintas: NPN y PNP

Ambas estructuras tienen un funcionamiento equivalente.

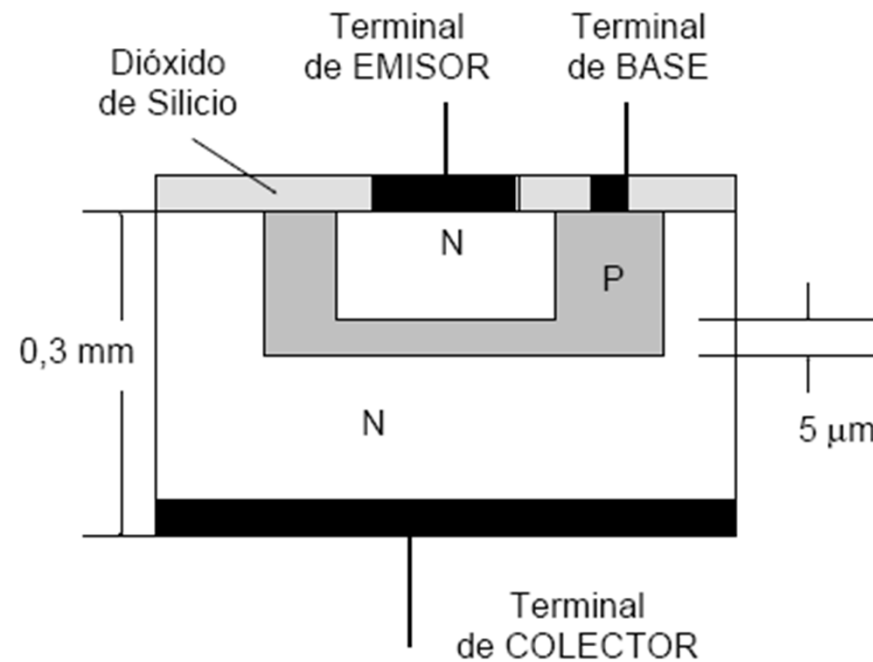
Estudiamos sólo el NPN por ser el más utilizado.

Dispositivo de 3 terminales:

Zona central:	Base (B)
Extremos:	Colector (C) Emisor (E)



- Estructura de un B.J.T.





- **Funcionamiento del B.J.T.**

Un transistor NPN puede considerarse como dos uniones PN en serie, pero debido a la pequeña anchura de la base, las dos uniones interactúan entre sí produciéndose lo que se conoce como efecto transistor.

Cada una de las uniones puede polarizarse de dos formas, de lo que se deduce que existen cuatro posibilidades diferentes de polarizar al transistor:

<b>Activa</b>	Unión B-E → Directa	Unión B-C → Inversa
<b>Saturación</b>	Unión B-E → Directa	Unión B-C → Directa
<b>Corte</b>	Unión B-E → Inversa	Unión B-C → Inversa
<b>Activa Inversa</b>	Unión B-E → Inversa	Unión B-C → Directa

- Zonas de funcionamiento

**Activa**                      Unión B-E → Directa                      Unión B-C → Inversa

Utilizada en circuitos analógicos ya que se obtienen grandes ganancias.

$$V_{BE} \approx V_{DON} ; V_{BC} < V_{DON} ; I_B > 0 ; I_C \approx \beta I_B ; \beta \gg 1$$

**Saturación**                      Unión B-E → Directa                      Unión B-C → Directa

Utilizada en circuitos digitales (cero lógico en la salida).

$$V_{BE} \approx V_{DON} ; V_{BC} \approx V_{DON} ; I_B > 0$$

**Corte**                      Unión B-E → Inversa                      Unión B-C → Inversa

Utilizada en circuitos digitales (uno lógico en la salida).

$$V_{BE} < V_{DON} ; V_{BC} < V_{DON} ; I_B = I_C = 0$$

**Activa Inversa**                      Unión B-E → Inversa                      Unión B-C → Directa

Es muy poco utilizada. No la consideraremos.

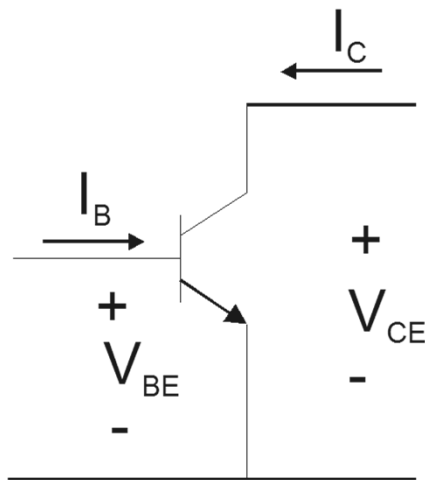
$$V_{BE} < V_{DON} ; V_{BC} \approx V_{DON} ; I_B > 0 ; I_E \approx \beta_R I_B ; \beta_R < 1$$

- El BJT como elemento de circuito

Dispositivo de 3 terminales. Su estado viene dado por 6 variables:  $I_B$ ,  $I_C$ ,  $I_E$ ,  $V_{BE}$ ,  $V_{BC}$  y  $V_{CE}$ , pero sólo 4 de ellas son independientes.

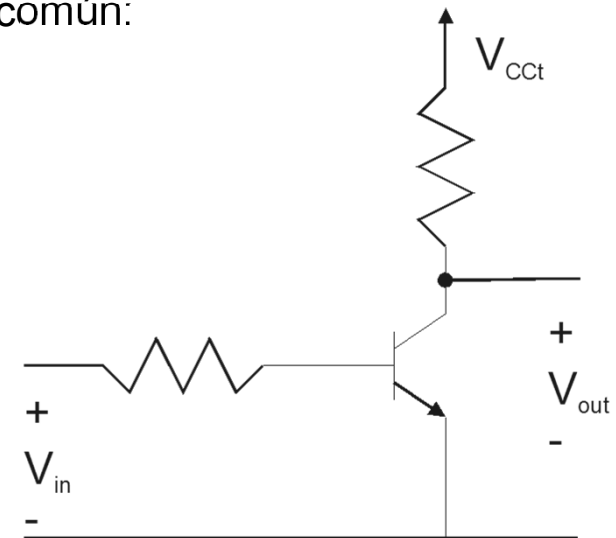
Configuraciones del BJT: Cuando se inserta un transistor bipolar en un circuito, su función es análoga a un elemento con dos puertos, uno de entrada y otro de salida, de forma que uno de los terminales es común a ambos puertos.

Habitualmente utilizaremos la configuración en emisor común:

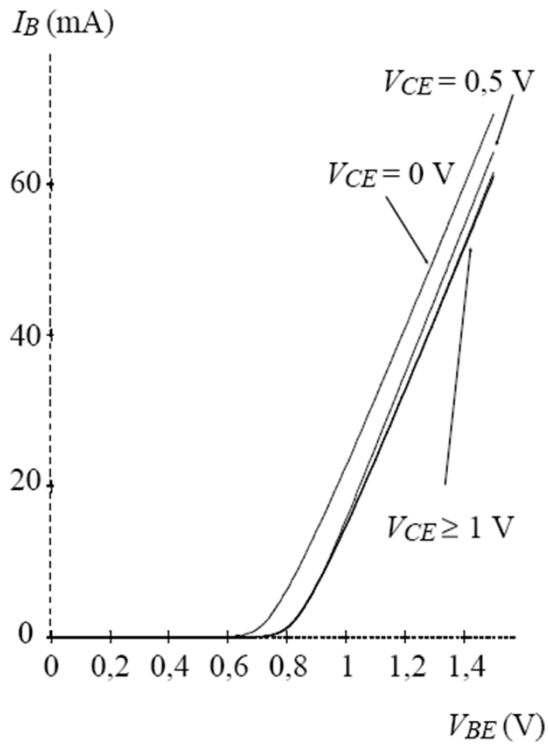


$$I_B = f(V_{BE}, V_{CE})$$

$$I_C = g(V_{CE}, I_B)$$

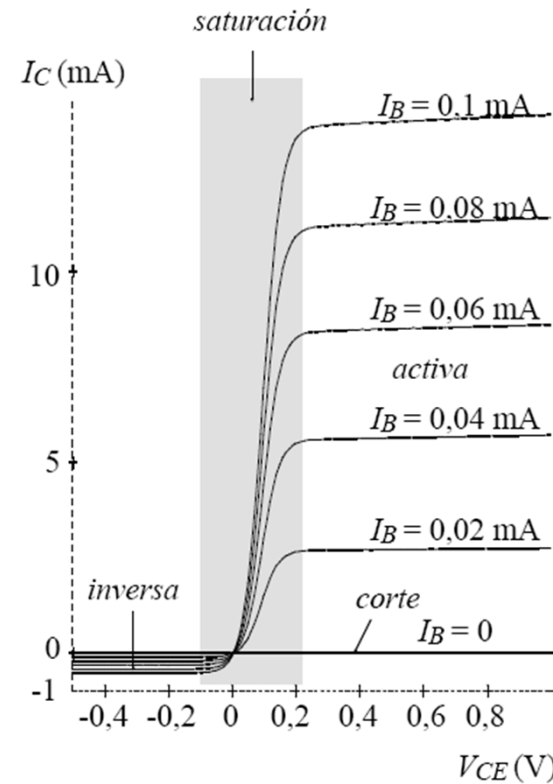


- Curvas características del B.J.T.



Curva de Entrada

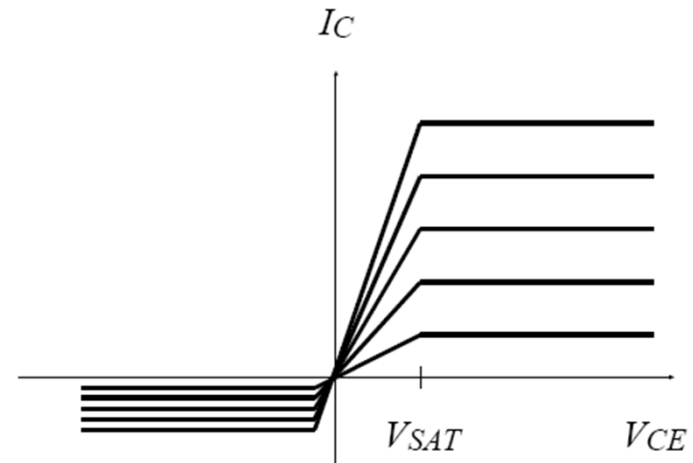
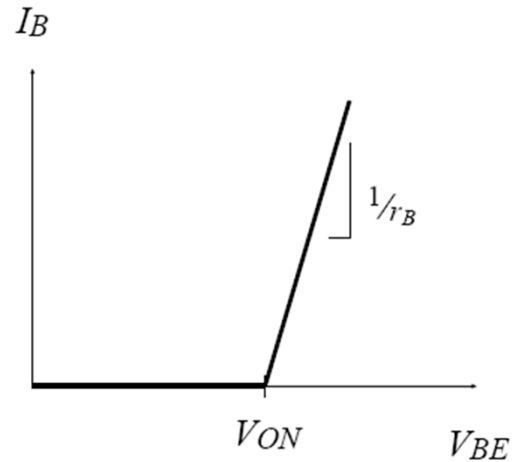
$$I_B = f(V_{BE})$$



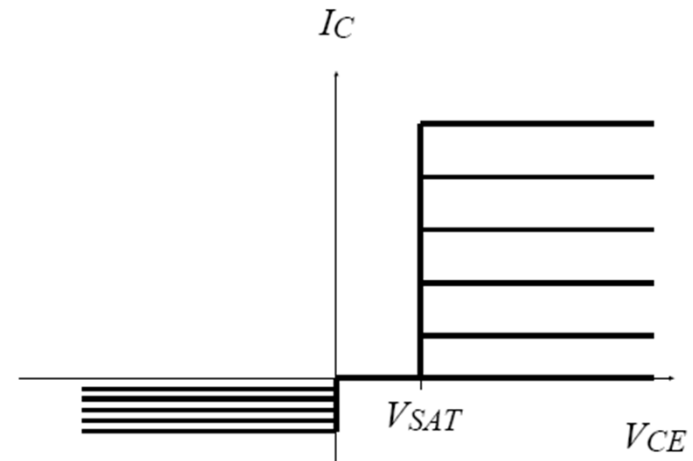
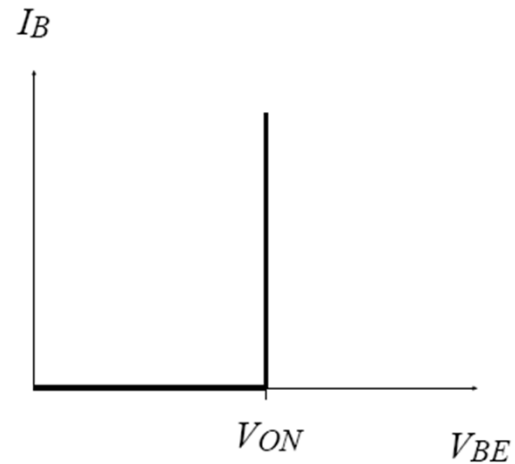
Curva de Salida

$$I_C = g(V_{CE})$$

- Modelo linealizado



- Modelo idealizado

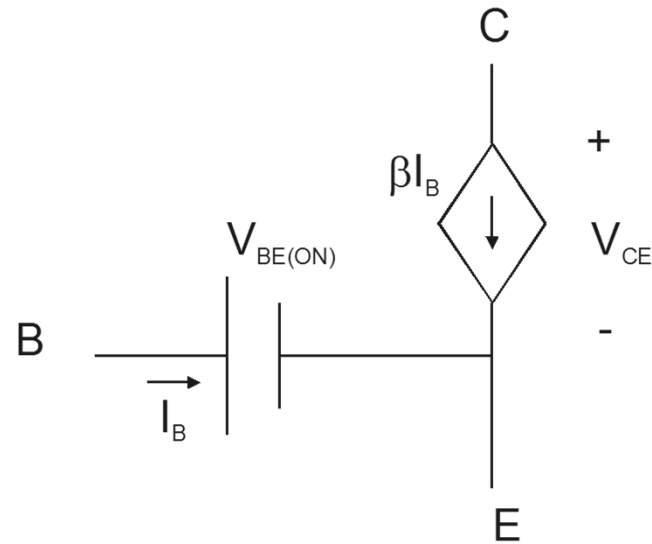


• **Modelo idealizado**

Zona activa

$$\text{Condiciones: } \begin{cases} I_B \geq 0 \\ V_{CE} > V_{CE(SAT)} \end{cases}$$

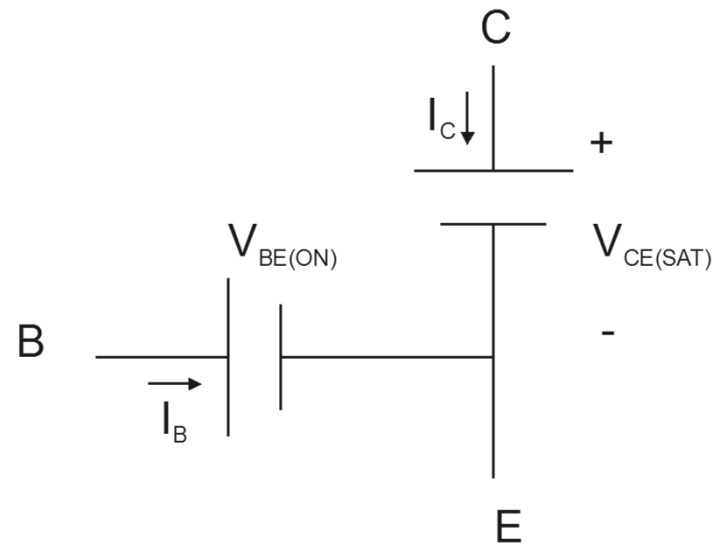
$$\text{Circuito: } \begin{cases} V_{BE} = V_{BE(ON)} \\ I_C = \beta I_B \end{cases}$$



Zona saturación

$$\text{Condiciones: } \begin{cases} I_B > 0 \\ 0 < I_C \leq \beta I_B \end{cases}$$

$$\text{Circuito: } \begin{cases} V_{BE} = V_{BE(ON)} \\ V_{CE} = V_{CE(SAT)} \end{cases}$$

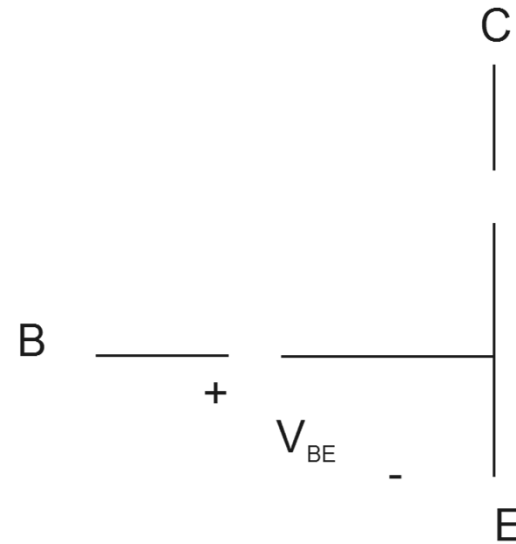


- **Modelo idealizado**

Zona corte

Condición:  $V_{BE} < V_{BE(ON)}$

Circuito:  $\begin{cases} I_B = 0 \\ I_C = 0 \end{cases}$



Zona activa inversa

No la estudiamos

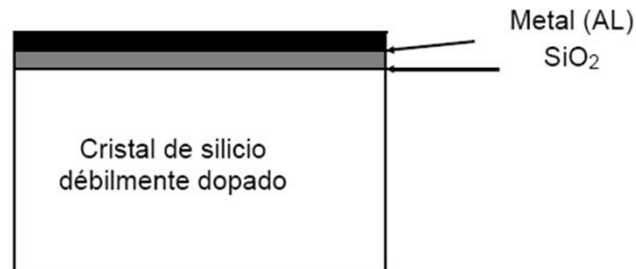
# El transistor MOS



### • Estructura MOS

#### Características

- a) Reducido consumo.
- b) Posibilidad de hacer dispositivos muy pequeños.
- c) Los circuitos digitales están realizados únicamente con transistores MOSFET, no incluyen diodos, resistencias ni otro tipo de elementos.



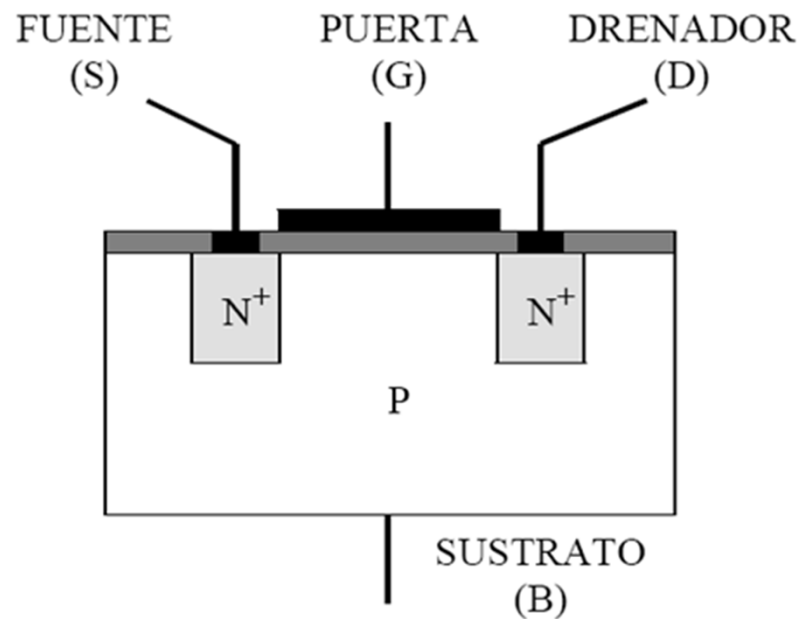
#### Composición de la estructura MOS (Metal-Óxido-Semiconductor).

- a) Una capa metálica (aluminio).
- b) Una capa intermedia muy delgada de óxido de silicio (SiO<sub>2</sub>), que es un material muy buen aislante.
- c) Un cristal de silicio débilmente dopado con impurezas aceptoras o donadoras denominado sustrato.

- **Transistor MOSFET de acumulación o enriquecimiento**

La estructura MOSFET deriva de la estructura MOS, implantando en el sustrato dos "islas" o zonas de fuerte dopado con impurezas de tipo contrario a las del sustrato.

Se conectan terminales metálicos a las dos islas, a la zona del metal y al sustrato, lo que significa que el MOSFET es un dispositivo de 4 terminales, aunque el terminal del sustrato no se utiliza.



Según sea el dopado del sustrato y las islas existen dos tipos de MOSFET de Acumulación:

De canal N (NMOS)                      con islas tipo N y sustrato tipo P

De canal P (PMOS)                      con islas tipo P y sustrato tipo N.

Las características estructurales del transistor son las siguientes:

- a) No existe ninguna diferencia entre las dos islas, es decir el transistor es simétrico.
- b) A los terminales conectados a ellas se les denomina fuente (S) o drenador (D) según sea el sentido del movimiento de los portadores en el canal, pero en la realidad, **los dos son completamente equivalentes**.
- c) Al terminal conectado a la zona de metal se denomina puerta (G). **Por el terminal de puerta nunca entrará ni saldrá intensidad**, debido a la capa aislante de  $\text{SiO}_2$  que tiene a la entrada.
- d) La zona del sustrato debe estar más débilmente dopada que las islas, y estará conectada a una tensión fija del circuito.

- **Funcionamiento del NMOS de acumulación**

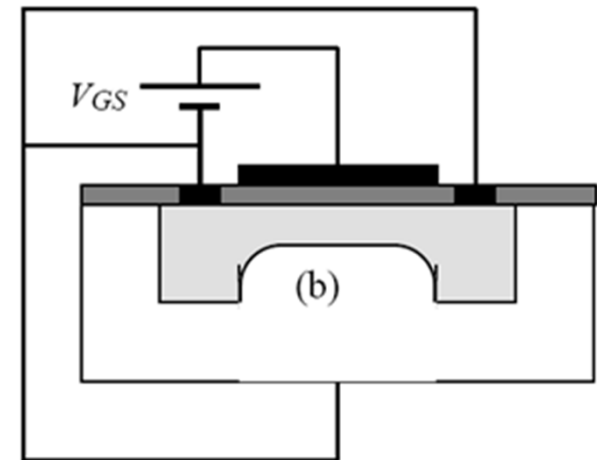
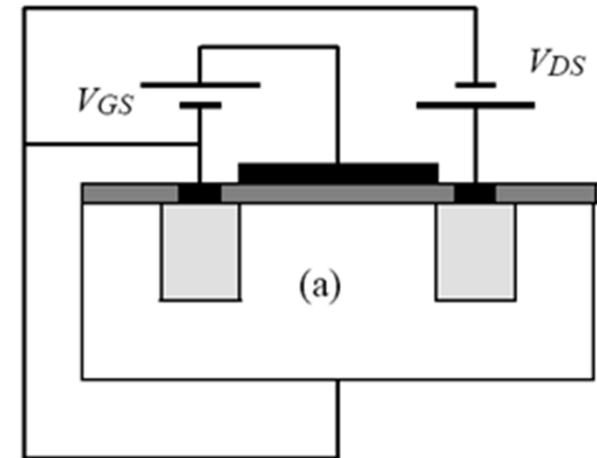
$$V_{GS} \leq V_T$$

No aparece canal inducido, por lo que, cualquiera que sea la tensión  $V_{DS}$ , no circulará intensidad entre las dos islas.

**(Región de Corte)**

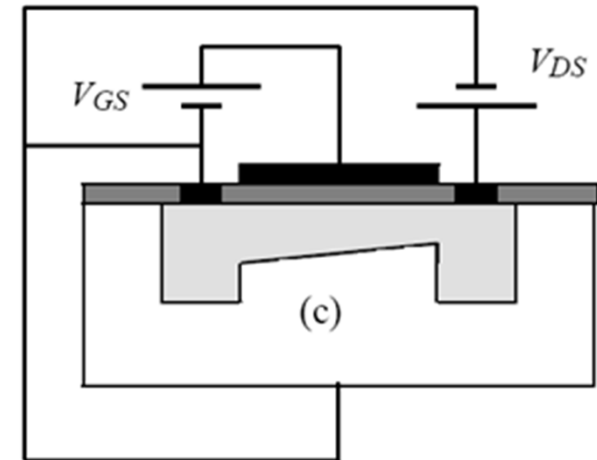
$$V_{GS} \geq V_T, V_{DS} = 0$$

Aparece un canal inducido entre las dos islas, pero al ser  $V_{DS} = 0$  entre ellas no circula intensidad y la profundidad es la misma en todo el canal.



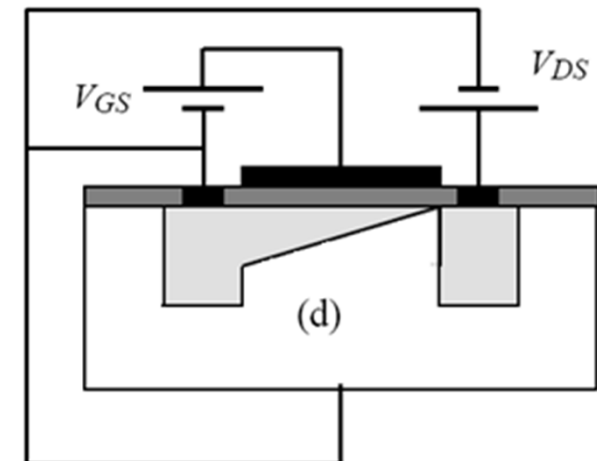
$$V_{GS} \geq V_T \quad 0 \leq V_{DS} \quad V_{DS} \leq V_{GS} - V_T$$

Circula una intensidad por el canal debido a la tensión  $V_{DS}$ . Debido a esta tensión, la profundidad del canal ya no es constante, sino que se estrecha en la zona cercana al drenador. **(Región Ohmica)**



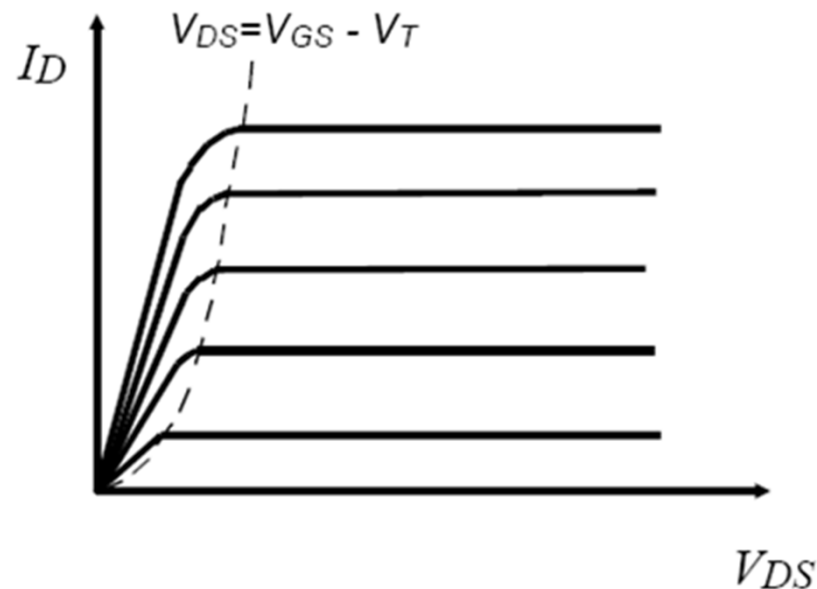
$$V_{GS} \geq V_T \quad 0 \leq V_{DS} \quad V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$$

El canal se estrangula en la zona del drenador, por lo que a partir de este punto, aunque se siga aumentando la tensión  $V_{DS}$ , la intensidad ya no aumenta, permaneciendo con el mismo valor que tiene cuando  $V_{DS} = V_{GS} - V_T$ . **(Región de Saturación)**



- Curva característica

En la gráfica se representa la curva de variación de  $I_D$  frente a  $V_{DS}$  para varias tensiones  $V_{GS} > V_T$ . El punto en el que la intensidad  $I_D$  se hace constante corresponde al estrangulamiento del canal, es decir cuando  $V_{DS} = V_{GS} - V_T$ .



Pueden distinguirse tres zonas de funcionamiento, denominadas CORTE, OHMICA y SATURACIÓN.

El terminal de puerta está aislado del canal por la capa de  $\text{SiO}_2$ , por lo que la **intensidad de puerta siempre es nula** en un MOSFET. La única intensidad es la que circula entre drenador y fuente.

En el caso estudiado del NMOS, la corriente circula entre dos islas tipo N y un canal también tipo N, por lo que prácticamente todos los portadores de carga que forman la corriente eléctrica son electrones.

En el caso de un PMOS ocurre lo contrario, los portadores de carga son mayoritariamente huecos.

Se denomina **fuentes** al terminal por donde entran los portadores y **drenador** al terminal por el que salen.

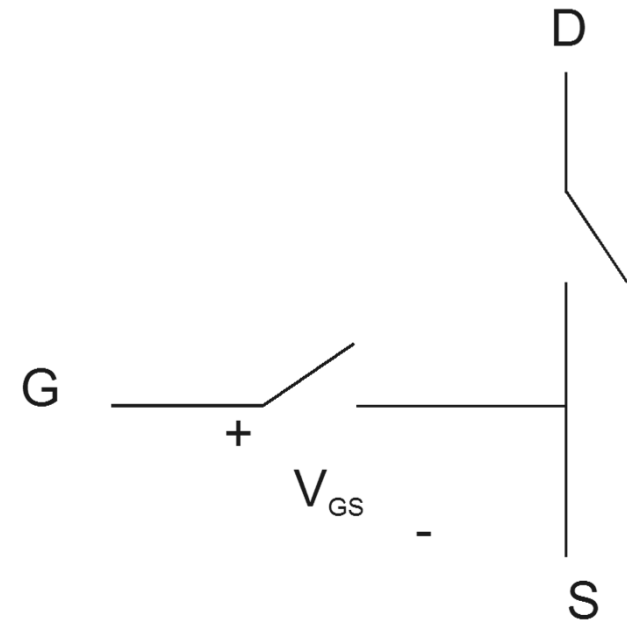
- a) Los portadores en un NMOS son electrones  $\Rightarrow$  el terminal drenador será siempre el que esté conectado al mayor valor de tensión
- b) Los portadores en un PMOS son huecos  $\Rightarrow$  el terminal fuente será el que esté conectado al mayor valor de tensión.

- Zona de Corte

En esta zona no hay canal inducido.

Condiciones:  $V_{GS} \leq V_T$

Funcionamiento:  $I_D = 0$  para cualquier valor de  $V_{DS}$





- Zona Óhmica

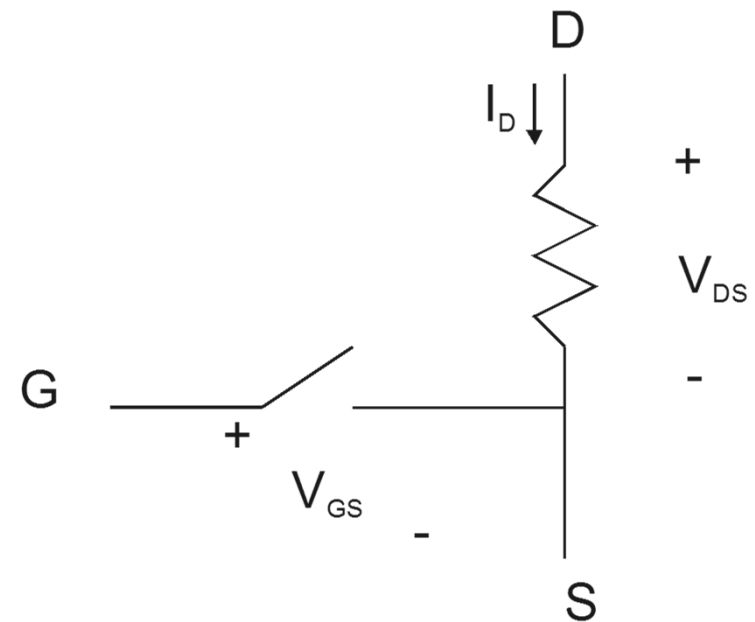
En esta zona existe canal inducido y no está estrangulado.

Condiciones:  $V_{GS} \geq V_T$  y  $V_{GD} \geq V_T$ , es decir,  
 $V_{DS} \leq V_{GS} - V_T$

Funcionamiento: Su denominación se debe a que el comportamiento es similar al de una resistencia cuyo valor depende del valor de  $V_{GS}$ , aunque la relación entre  $I_D$  y  $V_{DS}$  es no lineal.

$$I_D = K_N \left( V_{GS} - V_T - \frac{V_{DS}}{2} \right) V_{DS}$$

$K_N$  es una constante que depende de la geometría del transistor.



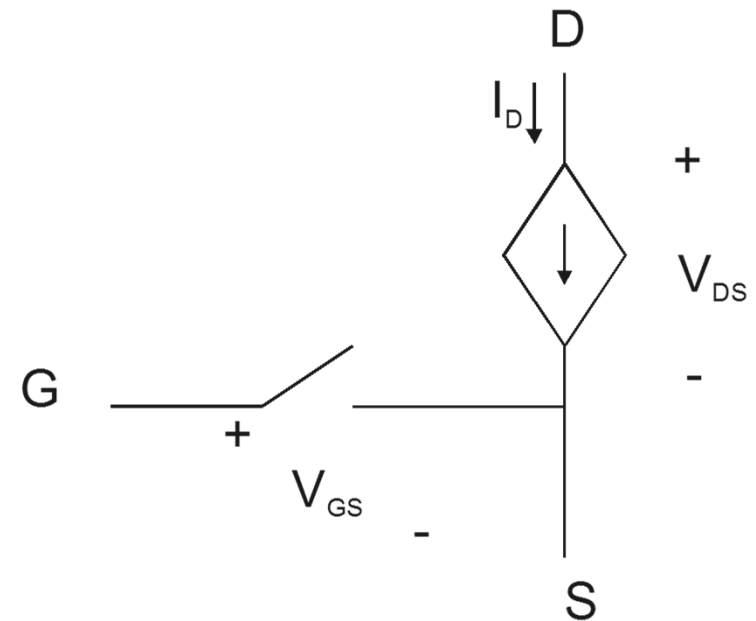
- Zona de Saturación

En esta zona, el canal inducido está estrangulado.

Condiciones:  $V_{GS} \geq V_T$  y  $V_{GD} \leq V_T$ , es decir,  
 $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$

Funcionamiento: El transistor se comporta como una fuente de intensidad no lineal controlada por la tensión  $V_{GS}$ .

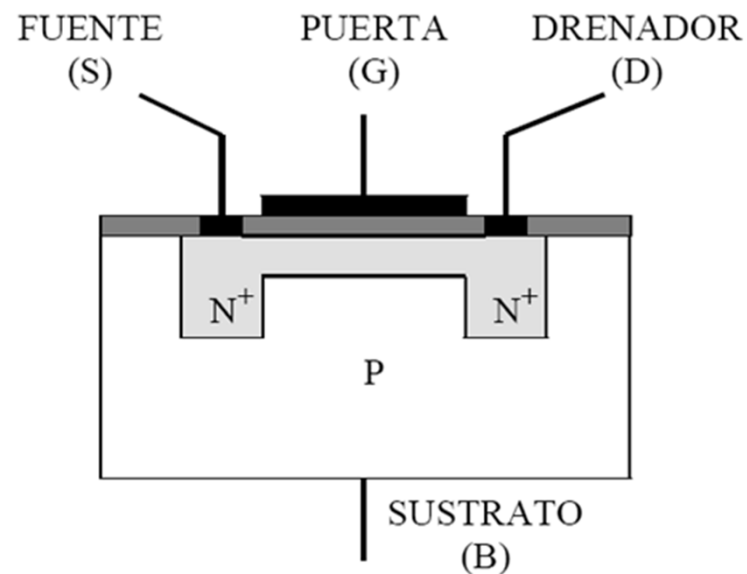
$$I_D = \frac{K_N}{2} (V_{GS} - V_T)^2$$



- **Transistor MOSFET de deplexión o empobrecimiento**

La diferencia con el MOSFET de Acumulación es que se fabrica con un canal implantado entre las islas.

Por el transistor puede circular intensidad aunque la tensión  $V_{GS}$  sea cero, ya que no es necesario inducir el canal puesto que ya existe.

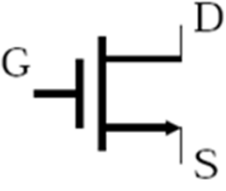
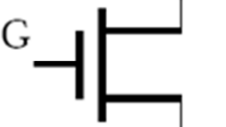
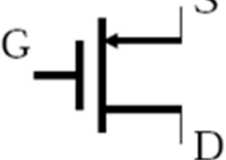
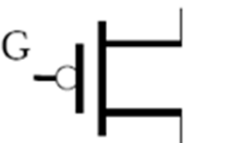


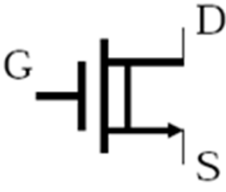

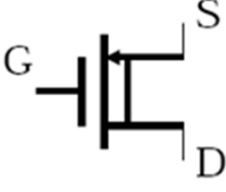
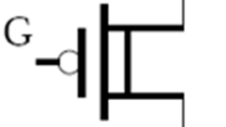
MOSFET de Deplexión de canal N

Si se aplica una tensión  $V_{GS}$  negativa, los electrones que forman el canal inducido tenderán a alejarse de dicha zona por efecto del campo eléctrico. Por la misma razón, los huecos tenderán a aproximarse a la zona del canal, provocando el estrechamiento del canal

Para un valor de tensión  $V_{GS} = V_P$  ( $V_P < 0$ ) denominado "pinch-off", los huecos neutralizarán a los electrones del canal y éste desaparecerá. En este caso ya no podrá circular intensidad entre el drenador y la fuente y el transistor habrá entrado en corte.

Por tanto, el funcionamiento del transistor de Deplexión es totalmente análogo al de acumulación, con la única diferencia que la tensión umbral  $V_T$ , que es positiva en el de acumulación, se sustituye en las ecuaciones por la tensión de pinch-off  $V_P$ , que es negativa.

	ACUMULACIÓN o ENRIQUECIMIENTO ( $V_T > 0$ )			
	Símbolos de circuito	Zona de CORTE	Zona OHMICA	Zona de SATURACIÓN
canal N		$V_{GS} < V_T$	$V_{GS} \geq V_T$ $V_{DS} \leq V_{GS} - V_T$	$V_{GS} \geq V_T$ $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$
		$I_D = 0$	$I_D = K_N (V_{GS} - V_T - \frac{V_{DS}}{2}) V_{DS}$	$I_D = \frac{K_N}{2} (V_{GS} - V_T)^2$
canal P		$V_{SG} < V_T$	$V_{SG} \geq V_T$ $V_{SD} \leq V_{SG} - V_T$	$V_{SG} \geq V_T$ $V_{SD} \geq V_{SG} - V_T$
		$I_S = 0$	$I_S = K_P (V_{SG} - V_T - \frac{V_{SD}}{2}) V_{SD}$	$I_S = \frac{K_P}{2} (V_{SG} - V_T)^2$

	DEPLEXIÓN o EMPOBRECIMIENTO ( $V_P < 0$ )			
canal N		$V_{GS} < V_P$	$V_{GS} \geq V_P$ $V_{DS} \leq V_{GS} - V_P$	$V_{GS} \geq V_P$ $V_{DS} \geq V_{GS} - V_P$
		$I_D = 0$	$I_D = K_N (V_{GS} - V_P - \frac{V_{DS}}{2}) V_{DS}$	$I_D = \frac{K_N}{2} (V_{GS} - V_P)^2$
canal P		$V_{SG} < V_P$	$V_{SG} \geq V_P$ $V_{SD} \leq V_{SG} - V_P$	$V_{SG} \geq V_P$ $V_{SD} \geq V_{SG} - V_P$
		$I_S = 0$	$I_S = K_P (V_{SG} - V_P - \frac{V_{SD}}{2}) V_{SD}$	$I_S = \frac{K_P}{2} (V_{SG} - V_P)^2$