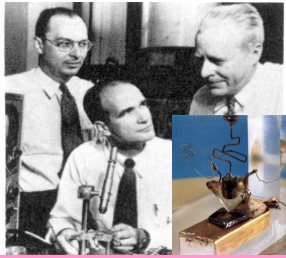
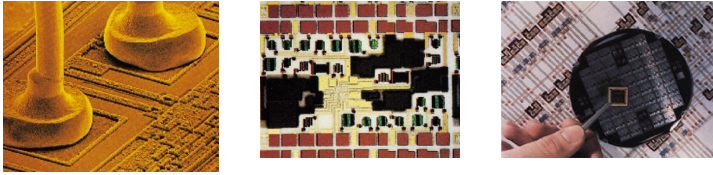
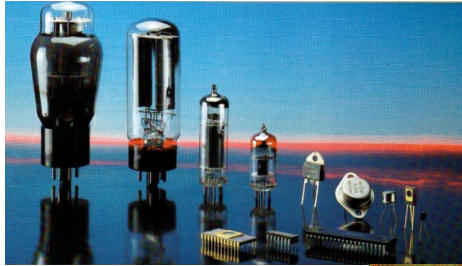


# Tema 7. El transistor



Shockley, Bardeen, Brattain (1948)  
Nobel 1956



# Tema 7. El Transistor

## 7.1 El transistor bipolar de unión (BJT).

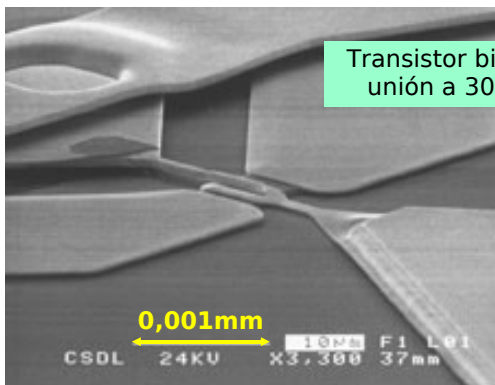
El transistor de unión como amplificador.

## 7.2 Transistores de efecto campo.

Transistores de efecto campo de unión (JFET).

Transistores de efecto campo metal-óxido-semiconductor (MOS-FET).

# El transistor bipolar de unión



Transistor bipolar de unión a 300 GHz

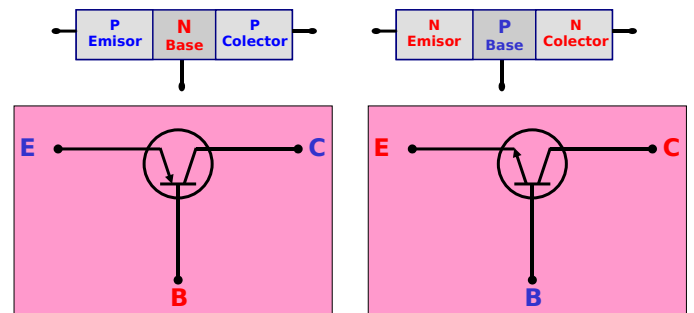
# Tema 7. El transistor

## Objetivos:

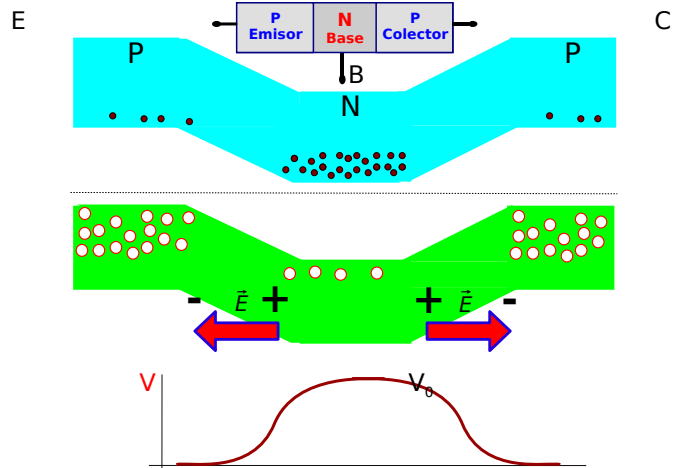
- Entender cualitativamente el funcionamiento de los transistores de unión y de efecto campo.
- Conocer algunas aplicaciones de transistores.

# El transistor bipolar de unión

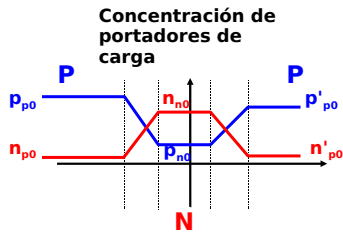
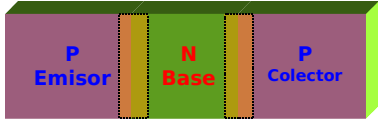
## Transistor bipolar de unión BJT (Bipolar Junction Transistor)



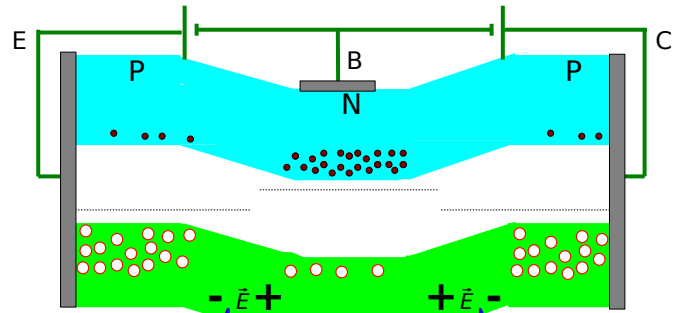
# El transistor bipolar de unión



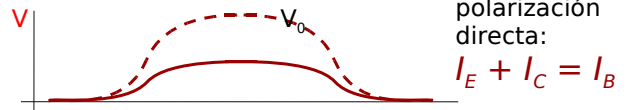
# Concentración de portadores



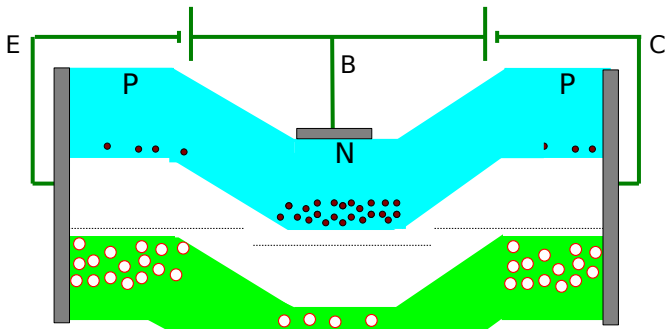
# El transistor bipolar de unión



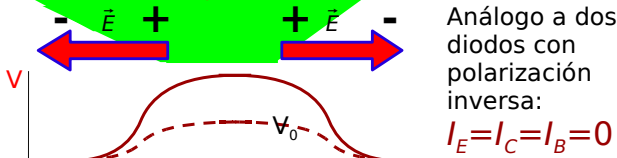
Saturación



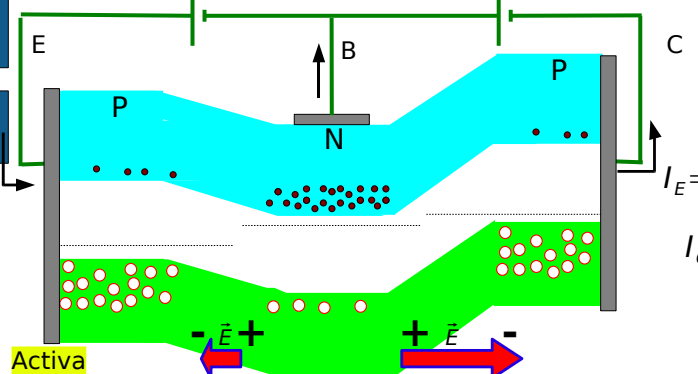
# El transistor bipolar de unión



Corte



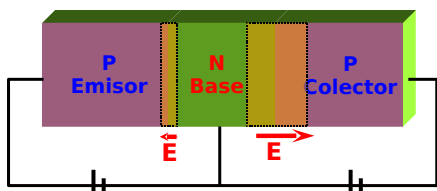
# Transistor polarizado en forma activa



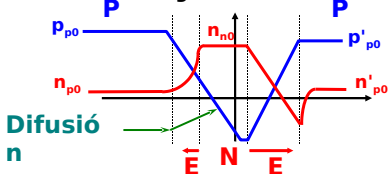
Activa



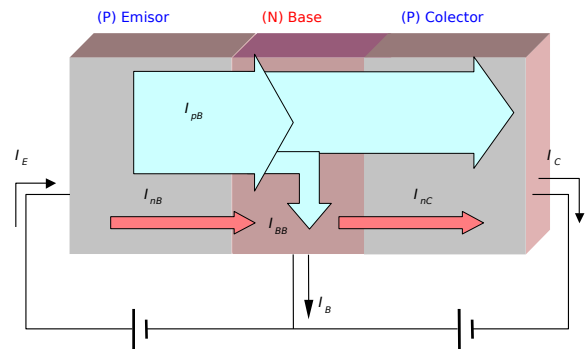
# Transistor polarizado en forma activa



Concentración de portadores de carga



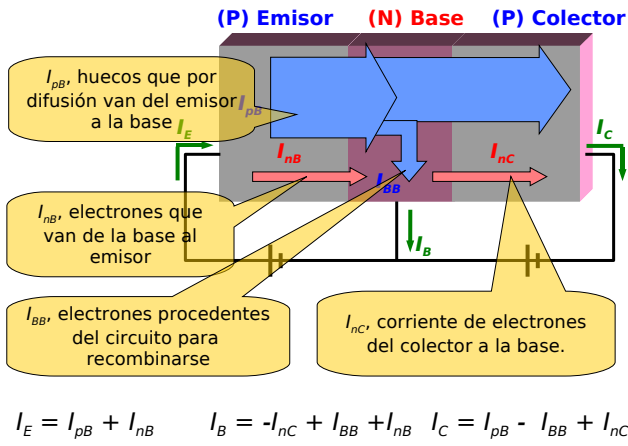
# Transistor polarizado en forma activa



$I_E = I_B + I_C$   
 $I_C \gg I_B$   
 $I_E \approx I_C$   
 $I_C = \beta I_B$   
 (región activa)

$\beta$  factor de ganancia

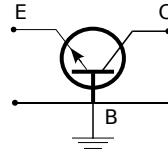
# Transistor polarizado en forma activa



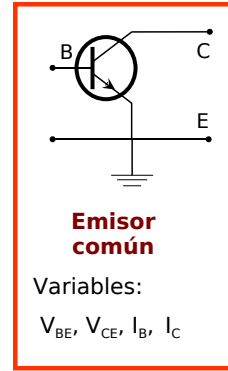
# Configuraciones del transistor



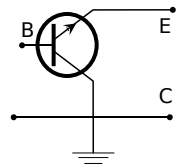
hay 4 variables que dependen del tipo de conexión:  
 $V_{salida}$ ,  $V_{entrada}$ ,  $I_{salida}$ ,  $I_{entrada}$ .



**Base común**  
 Variables:  
 $V_{BE}$ ,  $V_{CB}$ ,  $I_E$ ,  $I_C$

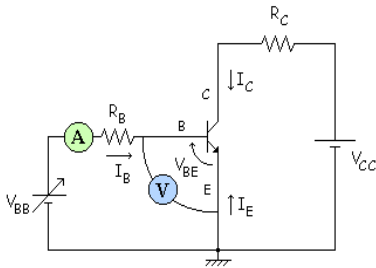


**Emisor común**  
 Variables:  
 $V_{BE}$ ,  $V_{CE}$ ,  $I_B$ ,  $I_C$



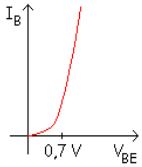
**Colector común**  
 Variables:  
 $V_{CB}$ ,  $V_{CE}$ ,  $I_B$ ,  $I_E$

# Curva característica de entrada

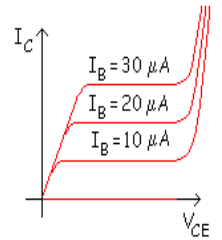
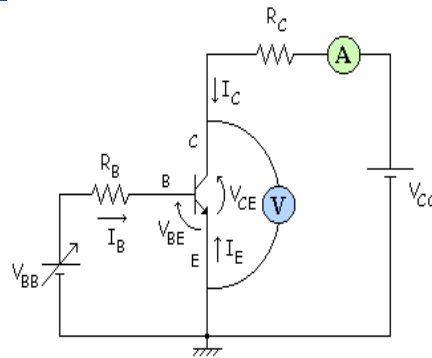


Si variamos el valor del generador  $V_{BB}$  de la malla de entrada, tomando valores de  $I_B$  y  $V_{BE}$  podemos obtener la característica de (la malla de) entrada.

Como vemos, el la característica del diodo base-emisor

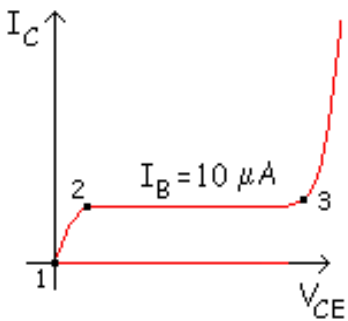


# Curva característica de salida

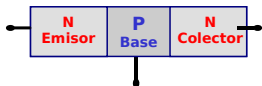


Ajustando  $V_{BB}$  fijo un valor de  $I_B$  que voy a mantener constante (por ejemplo  $I_B = 10$  mA). Ahora variando  $V_{CC}$  mido valores de  $V_{BE}$  y  $I_C$  y obtengo la correspondiente curva de  $I_B = 10$  mA.

# Curva característica de salida



- Zona entre 1 y 2: ZONA DE SATURACIÓN.
  - E-B directa.
  - C-B directa.
- Zona entre 2 y 3: ZONA ACTIVA.
  - E-B directa.
  - C-B inversa.
- Zona a partir de 3: ZONA DE RUPTURA.
  - E-B directa.
  - C-B muy en inversa.



# Emisor común: variables

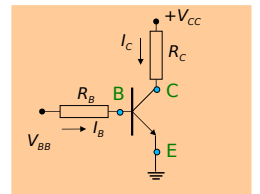
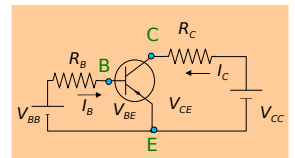
Variables:  $V_{BE}$ ,  $V_{CE}$ ,  $I_B$ ,  $I_C$

$V_{BE} \approx 0,7$  V para el silicio

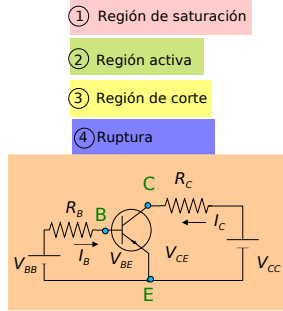
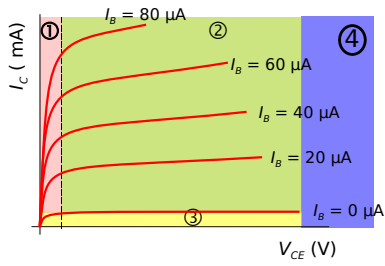
$$V_{BE} = V_{BB} - I_B R_B$$

$$I_C = \beta I_B \quad (\text{en activa})$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

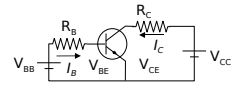
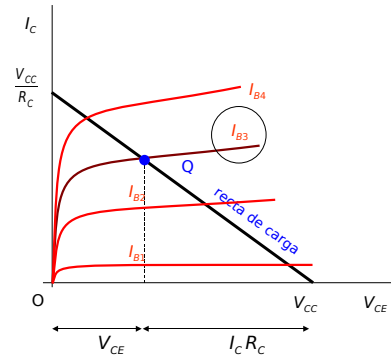


# Curva característica del transistor CE



- En **región activa**: unión EB con polarización directa, BC con polarización inversa. Aplicación en amplificación.
- En **región de corte**: las dos uniones polarizadas inversamente: **circuito abierto**.
- En **región de saturación**: las dos uniones polarizadas directamente: **cortocircuito**.

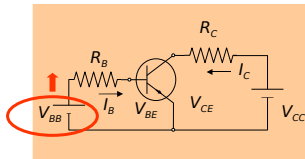
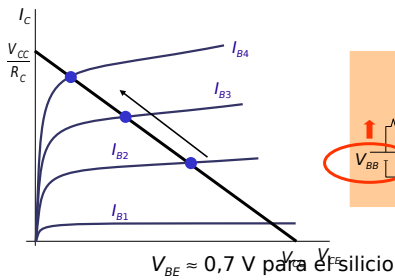
# Recta de carga y punto de funcionamiento Q



$$V_{CE} = -I_C R_C + V_{CC}$$

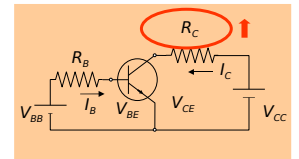
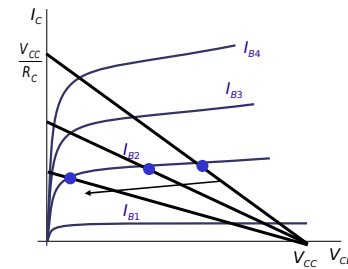
$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C}$$

# Punto de trabajo: I\_B



$$V_{BE} = V_{BB} - I_B R_B$$

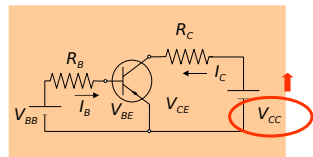
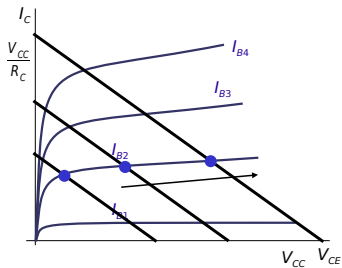
# Punto de trabajo: I\_B



$$V_{CE} = -I_C R_C + V_{CC}$$

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C}$$

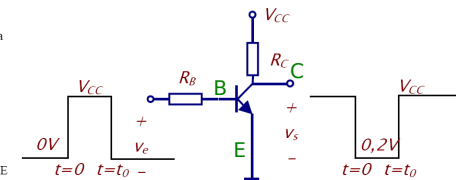
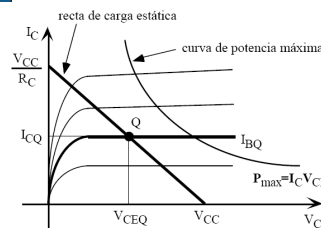
# Punto de trabajo: I\_B



$$V_{CE} = -I_C R_C + V_{CC}$$

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C}$$

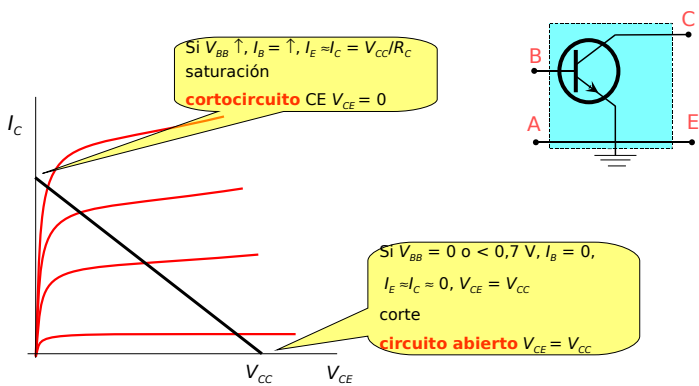
# Punto de trabajo (Q)



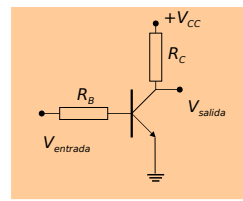
$$I_B = \frac{V_e - V_Y}{R_B}$$

$$\text{Recta de carga } V_{CC} = V_{CE} + I_C R_C$$

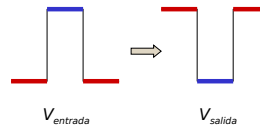
# El transistor como conmutador



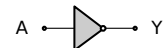
# Circuito inversor simple



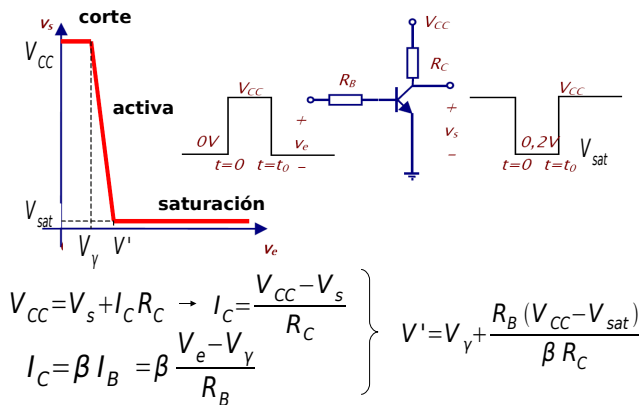
$V_{BB}$ (V)	$V_{CE}$ (V)	$I_C$ (mA)	$I_B$ ( $\mu$ A)
0,7	10	0	0
0,8	9,38	0,63	6,25
0,9	8,75	1,25	12,5
1	8,13	1,88	18,75
1,2	6,88	3,13	31,25
1,4	5,63	4,38	43,75
1,6	4,38	5,63	56,25
1,8	3,13	6,88	68,75
2	1,88	8,13	81,25
2,2	0,63	9,38	93,75
2,3	0	10	100



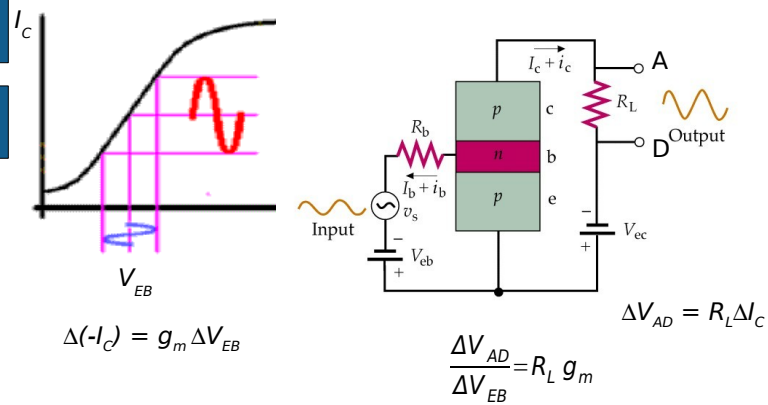
**INVERSOR**  $Y = \text{not } A$



# Curva de transferencia Vs (Ve)

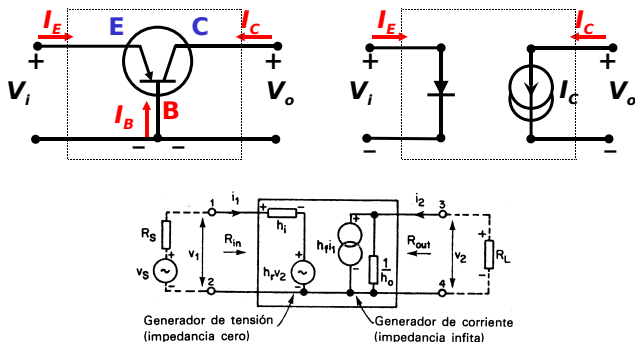


# El transistor de unión: amplificador



$g_m$  : transconductancia

# Transistor de unión: modelización



# Transistores de efecto campo

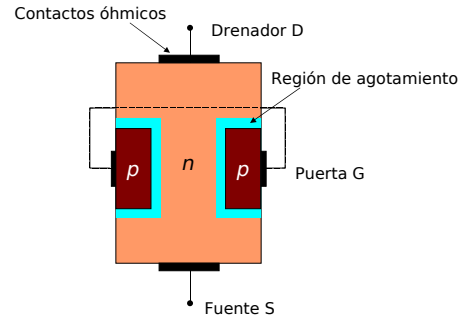
- FET
- Monopolares
- Control por voltaje
- Muy alta integración

# Transistores de efecto campo

- Transistor de efecto campo de unión (JFET)
- Transistor de efecto campo metal-óxido-semiconductor (MOSFET)

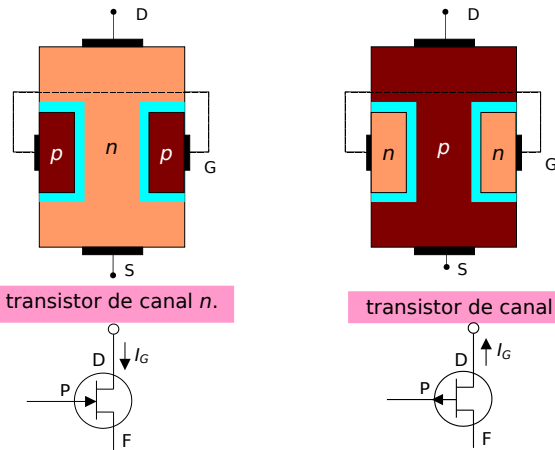
# Transistores de efecto campo de unión (JFET)

El transistor de efecto de campo de unión JFET (Junction Field Effect Transistor)



# Transistores de efecto campo de unión (JFET)

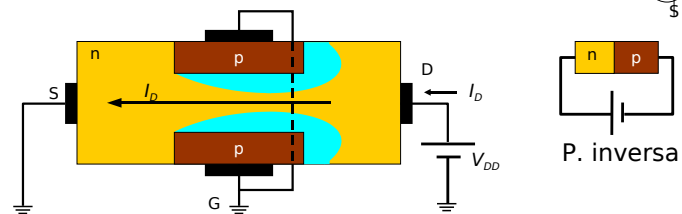
El transistor de efecto de campo de unión JFET



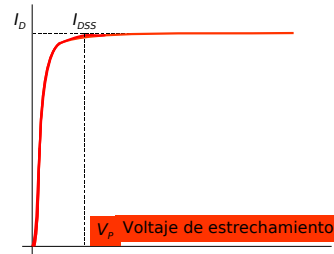
transistor de canal n.

transistor de canal p.

# Transistores de efecto campo de unión (JFET)

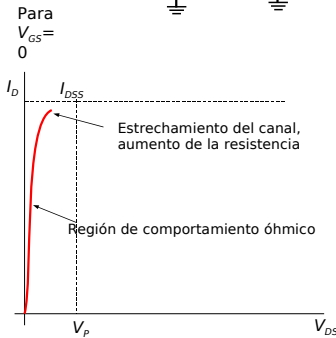
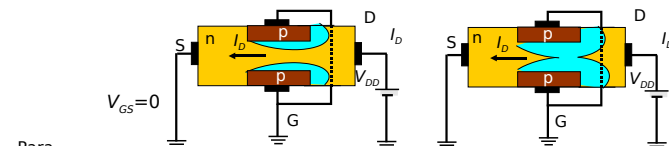


P. inversa



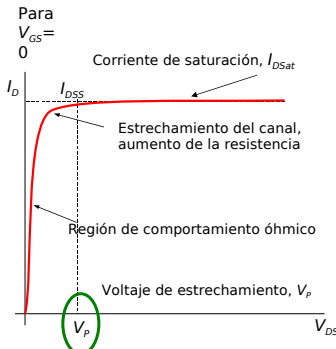
Al aumentar la tensión entre Drenador y Fuente  $V_{DS}$ , la intensidad  $I_D$  aumenta, al tiempo que se estrecha el pasillo debido al incremento de la de las uniones  $p-n$  y la ampliación de la región de agotamiento. El pasillo se cierra para  $V_{DS} = V_P$ ; tensión para la que  $I_D$  deja de aumentar.

# Transistores de efecto campo de unión (JFET)



Manteniendo nula la tensión entre la fuente y G,  $V_{GS}$ , al aumentar la tensión entre Drenador y Fuente  $V_{DS}$ , la intensidad  $I_D$  aumenta, al tiempo que se estrecha el pasillo debido al incremento de la de las uniones  $p-n$  y la ampliación de la región de agotamiento.

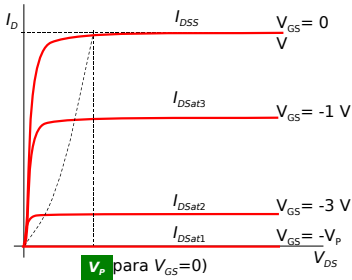
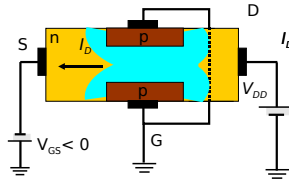
# Transistores de efecto campo de unión (JFET)



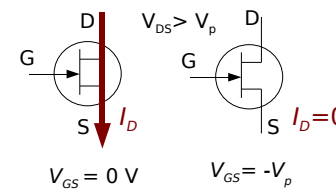
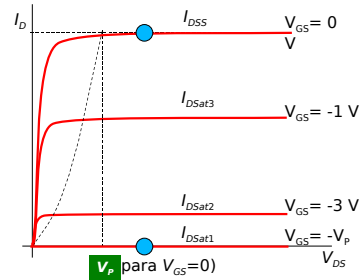
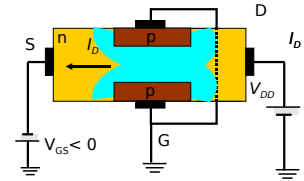
Al aumentar la tensión entre Drenador y Fuente  $V_{DS}$ , la intensidad  $I_D$  aumenta, al tiempo que se estrecha el pasillo debido al incremento de las uniones  $p-n$  y la ampliación de la región de agotamiento. El pasillo se cierra para  $V_{DS} = V_P$ .

# Transistores de efecto campo de unión (JFET)

Con valores negativos de  $V_{GS}$  el pasillo se cierra antes, siendo la corriente de saturación menor



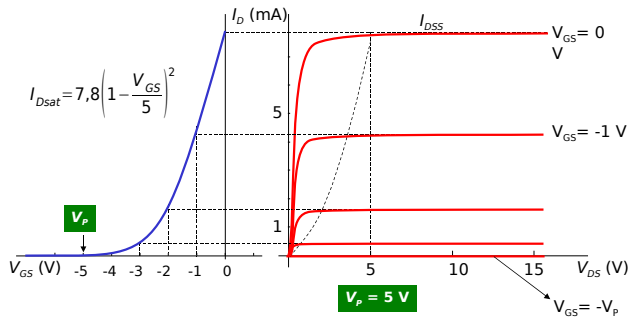
# Transistores de efecto campo de unión (JFET)



## Intensidad de saturación

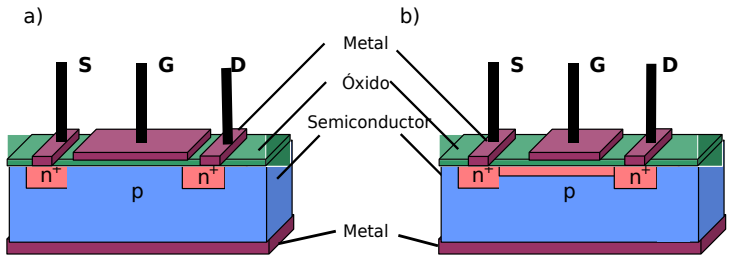
$$I_{DS} = f(V_{GS})$$

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



## Transistores de efecto campo MOSFET

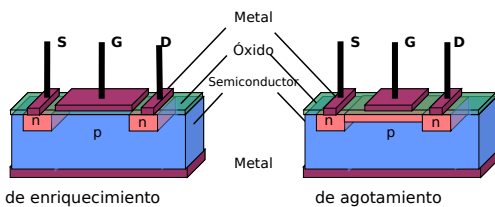
El Transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor MOSTFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)



Modo "enriquecimiento"

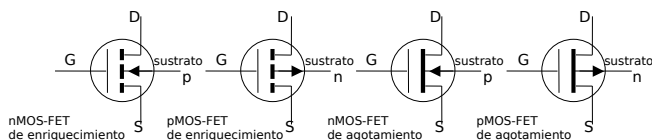
Modo "agotamiento"

# Transistores de efecto campo MOSFET

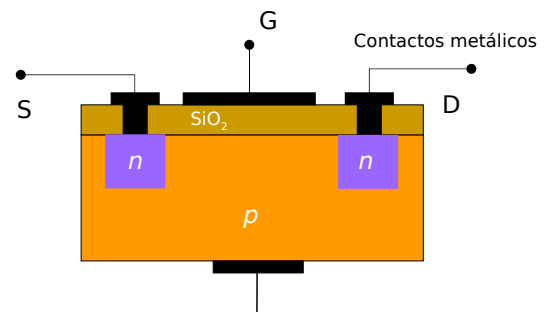


Formado por una placa de metal y un semiconductor, separados por una zona de óxido del semiconductor - por ejemplo SiO<sub>2</sub> - de unos 100 nm de espesor. Posee cuatro electrodos:

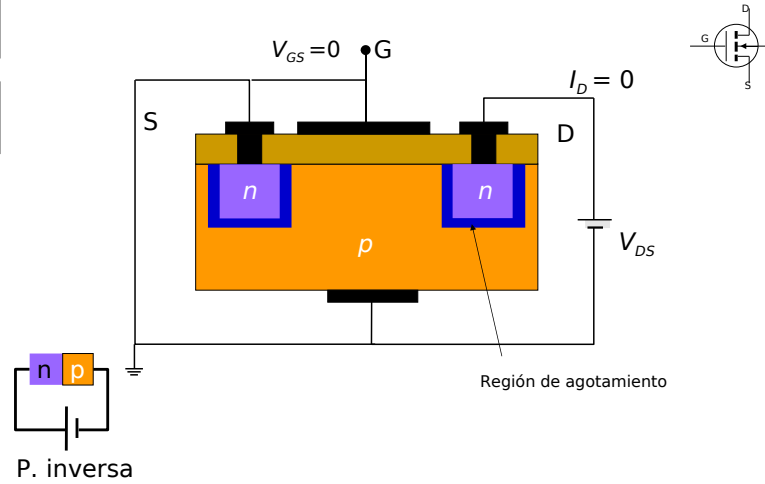
- Puerta, gate en inglés, simbolizado con G; que se conecta a la placa metálica.
- Fuente (Source) y drenador (Drain), ambos simétricos, que se interonan en el sustrato.
- Sustrato (Body), generalmente conectado eléctricamente con la fuente.



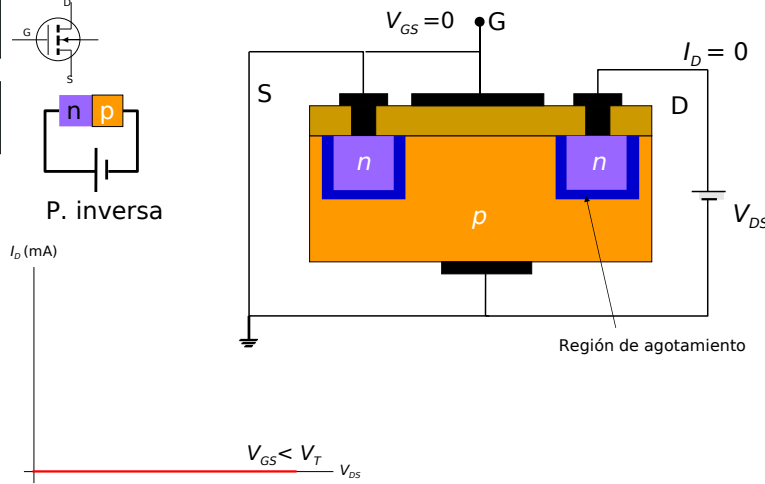
# MOSFET de enriquecimiento n



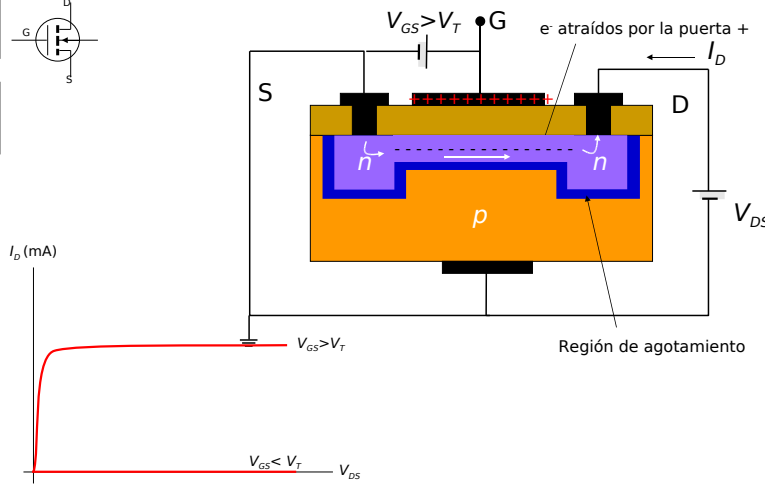
# Formación del canal en MOSFET de enriquecimiento n



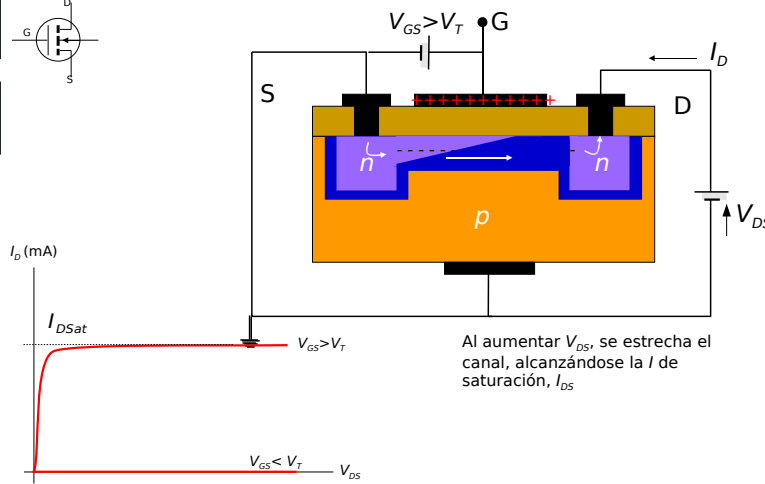
# Formación del canal en MOSFET de enriquecimiento n



# Formación del canal en MOSFET de enriquecimiento n



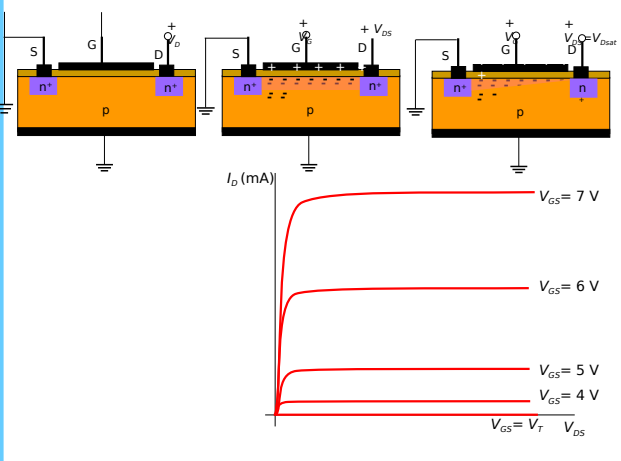
# Formación del canal en MOSFET de enriquecimiento n



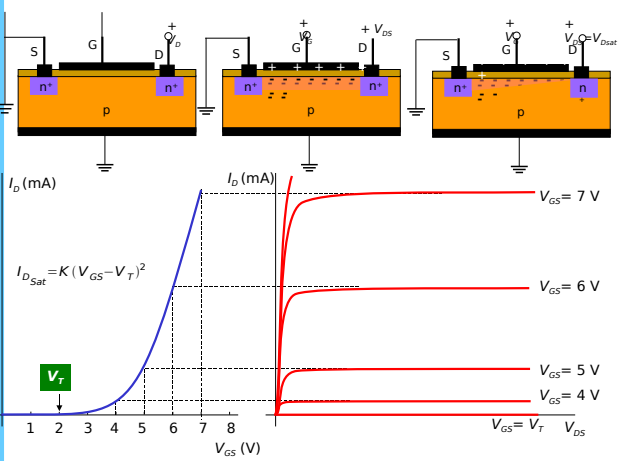
En ausencia de canal para  $V_{GS} = 0$ , no hay corriente  $I_D$ . Es necesario un valor mínimo de **voltaje umbral  $V_T$**  positivo de  $V_{GS}$  para que se forme el canal. Aumentando  $V_{GS}$  aumenta el valor de la corriente de saturación

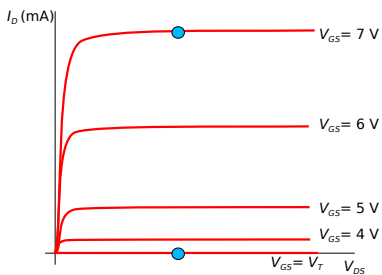
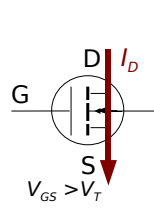
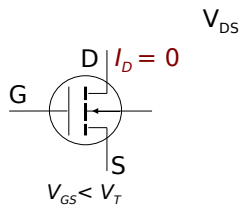
En ausencia de canal para  $V_{GS} = 0$ , no hay corriente  $I_D$ . Es necesario un valor mínimo de **voltaje umbral  $V_T$**  positivo de  $V_{GS}$  para que se forme el canal. Aumentando  $V_{GS}$  aumenta el valor de la corriente de saturación

Característica MOSFET de enriquecimiento de canal n

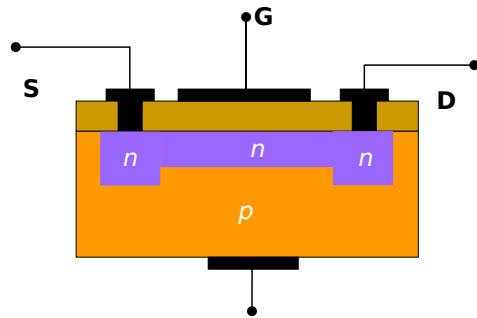


Característica MOSFET de enriquecimiento de canal n

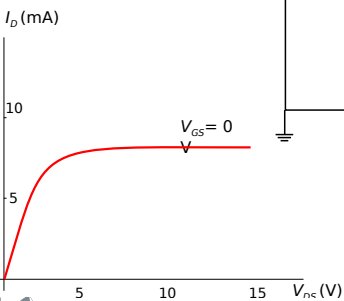
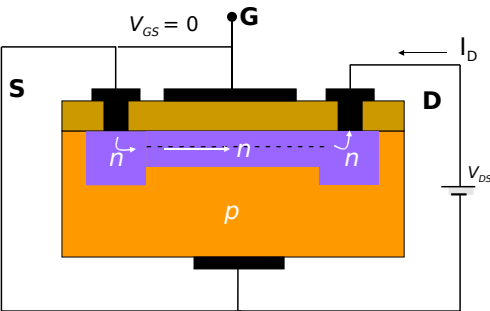




## MOSFET de agotamiento n

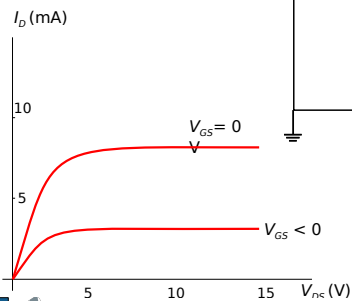
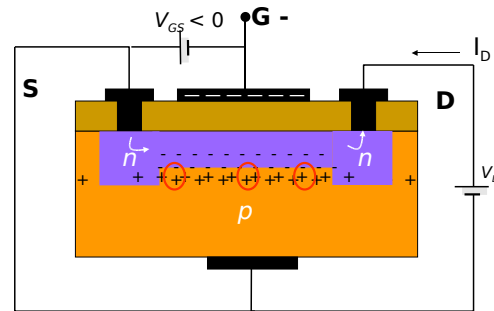


## MOSFET de agotamiento n



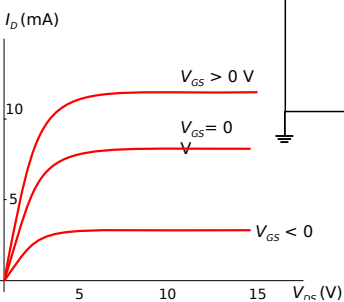
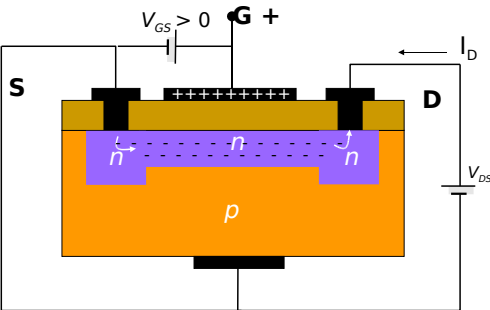
Con  $V_{GS} = 0$  ya existe canal y hay corriente de electrones

## MOSFET de agotamiento n



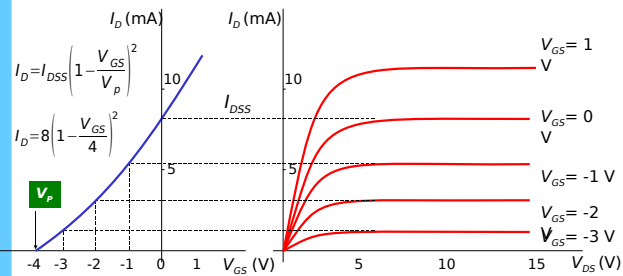
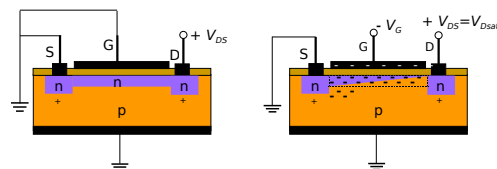
Con  $V_{GS} < 0$ , los  $e^-$  del canal son repelidos hacia la zona p, recombinándose con huecos. La corriente de saturación disminuye.

## MOSFET de agotamiento n

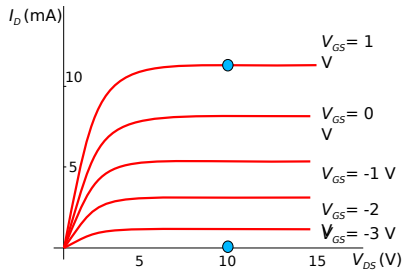
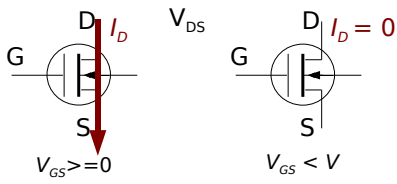


Con  $V_{GS} > 0$ , los  $e^-$  atraídos. La corriente de saturación aumenta. (como el MOSFET de enriquecimiento)

### Característica MOSFET de agotamiento de canal n

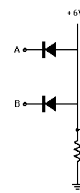


# MOSFET de agotamiento n

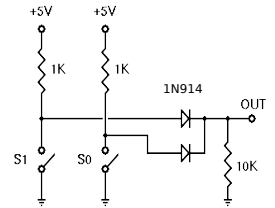
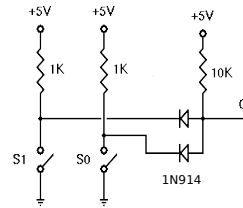
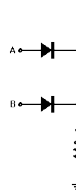


# Lógica de diodos: puertas AND y OR

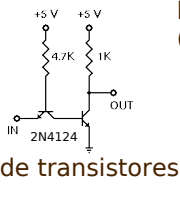
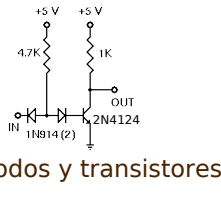
Diodo AND Gate



Diodo OR Gate



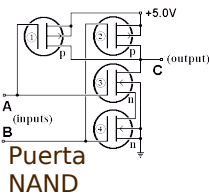
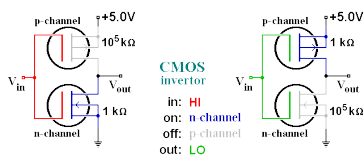
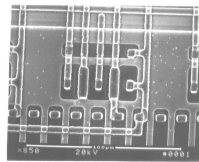
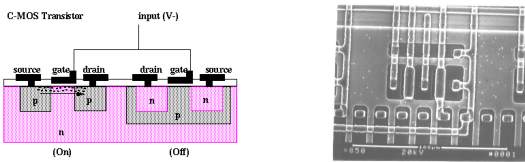
# Aplicaciones: circuitos lógicos inversores



# De las válvulas de vacío al CMOS

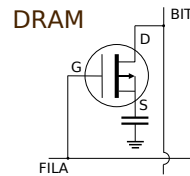
- 1950:** Abandono de las válvulas de vacío y sustitución por transistores individuales
- 1960:** Circuitos integrados en sustrato de silicio
- 1980:** Transistores de efecto campo
- 1993:** Tecnología CMOS

# Aplicaciones: circuitos lógicos, tecnología CMOS



Inversor (NOT)

# Aplicaciones: memoria RAM

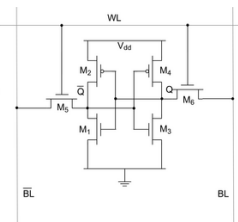


Se almacena un "1" en la celda cargando el condensador mediante una  $V_G$  en fila y  $V_D$  en bit

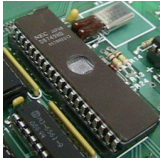
La lectura se hace aplicando  $V_G$  en fila y midiendo la corriente en la línea bit

La lectura es un proceso destructivo. Hay que restaurar el valor leído

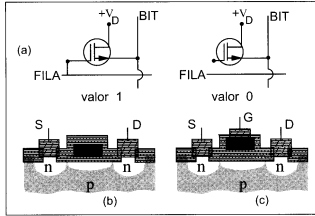
SRAM



# Aplicaciones: memorias ROM

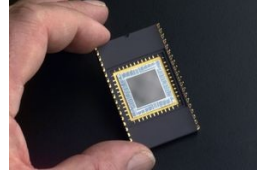


EPROM

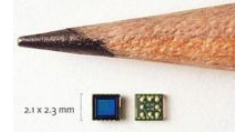


MOSFET ROM

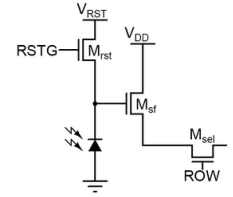
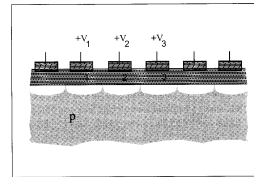
# Aplicaciones: CCD



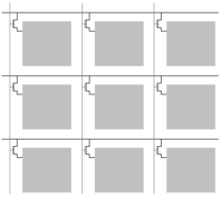
CCD



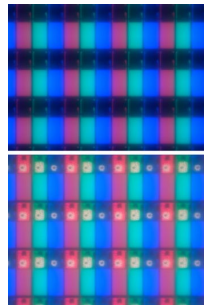
CMOS sensor



# Aplicaciones: TFT



Estructura DRAM con celda LCD y LED



RGB