

Transistor MOSFET

ELEMENTOS ACTIVOS EL-2207

Objetivos

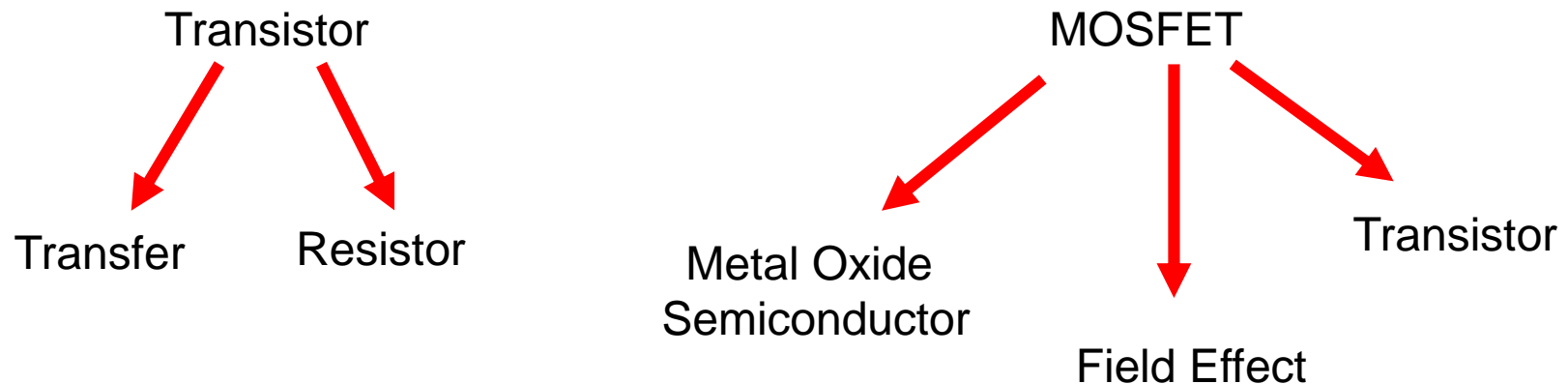
- **El transistor de efecto de campo MOSFET y la tecnología CMOS (6 semanas)**
 - Construcción, símbolo, clasificación.
 - Funcionamiento.
 - Curvas características y polarización.
 - Modelo del MOSFET para aplicaciones analógicas.
 - Modelo del MOSFET para aplicaciones digitales.
 - Capacitancias internas y modelos de alta frecuencia.
 - Aplicaciones: El FET como interruptor: interruptor serie, paralelo, inversor lógico y compuertas lógicas básicas
 - Escalamiento de MOSFETs

- **Objetivo**

Conocer el comportamiento y modelado del transistor de efecto de campo MOSFET, así como sus principales aplicaciones.

Transistor MOSFET

Transistor: dispositivo de al menos tres terminales, en el que una terminal controla el flujo de corriente entre las otras dos

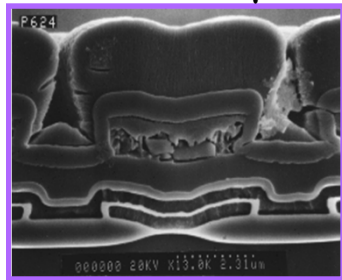


- MOSFETs
 - Basado en el principio de efecto de campo
 - Uso de un campo eléctrico para controlar corriente entre dos terminales
 - Transistor más utilizado (más de 80% del mercado)
 - Base de la industria microelectrónica

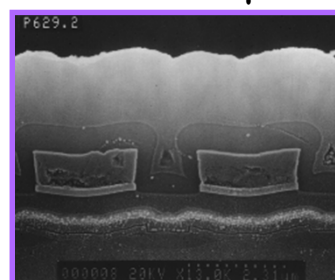
Transistor MOSFET

- Principio de efecto de campo presentado en 1925 por Julius Lillienfeld
- MOSFET
 - Patente presentada en 1928 por Lillienfeld
 - Implementación posible en los 60s
- Teoría de escalamiento = miniaturización
 - 60s, Robert Dennard

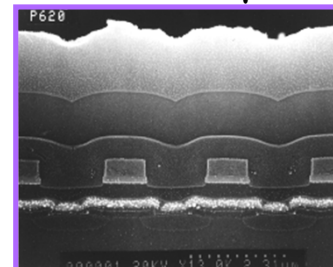
1986 / 1.5 μ m



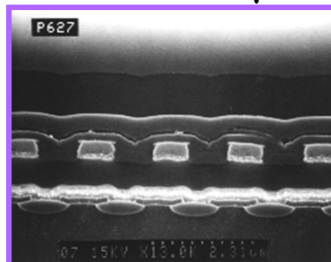
1988 / 1.0 μ m



1991 / 0.8 μ m



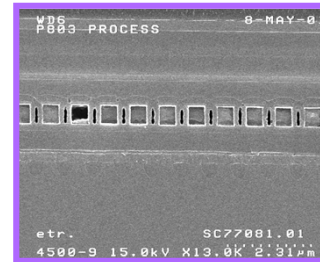
1993 / 0.6 μ m



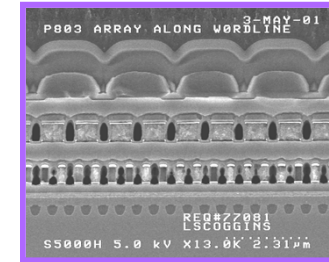
1996 / 0.4 μ m



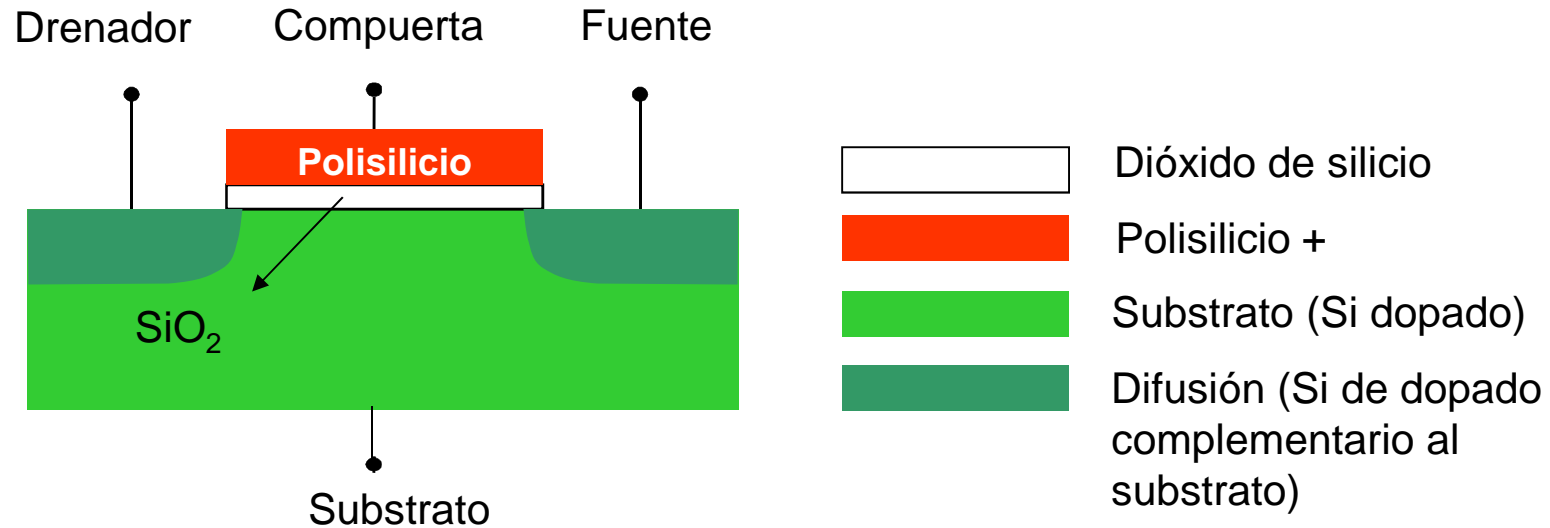
1998 / 0.25 μ m



2000 / 0.18 μ m

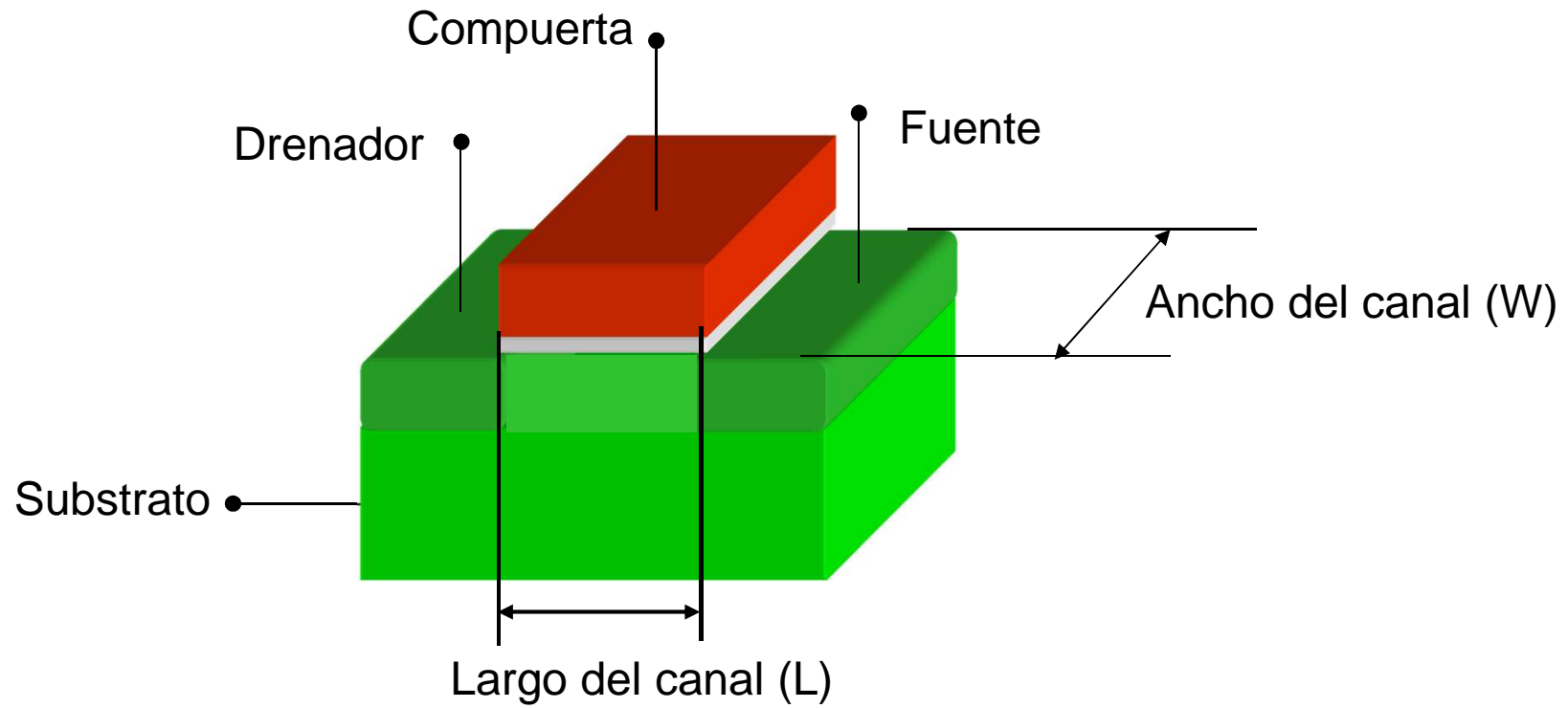






Transistor MOSFET

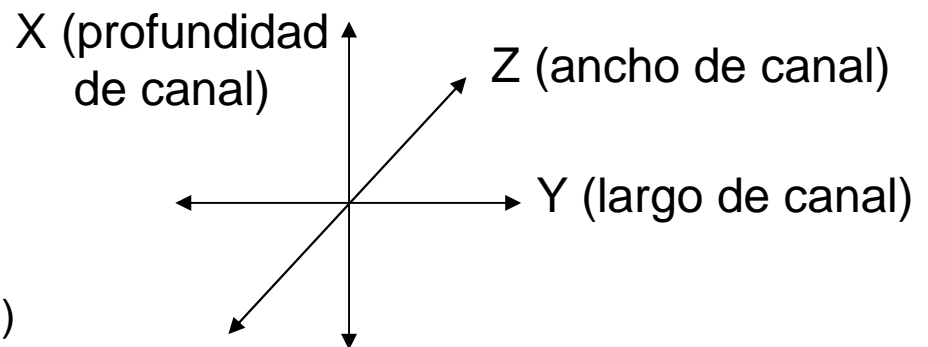


- Dispositivo de 4 terminales: compuerta, fuente, drenador y substrato
- Dispositivo UNIPOLAR \Rightarrow corriente de conducción involucra prácticamente sólo un tipo de portador de carga
- MOSFET consiste en
 - dos regiones semiconductoras fuertemente dopadas separadas por una región semiconductor de tipo complementario
 - un aislante y un electrodo sobre dicha región

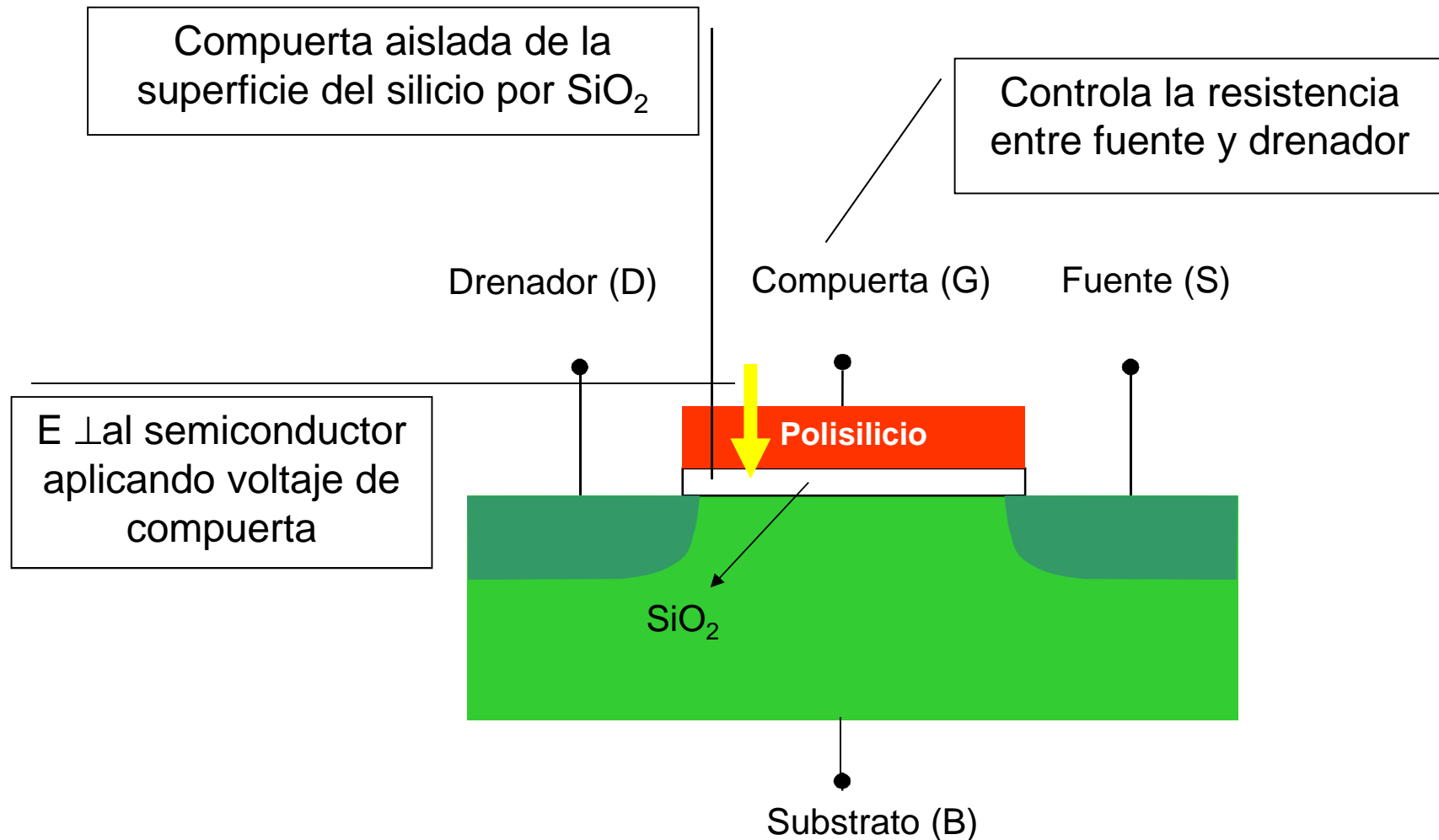
Transistor MOSFET



	Dióxido de silicio
	Polisilicio +
	Substrato (Si dopado)
	Difusión (Si de dopado complementario al substrato)

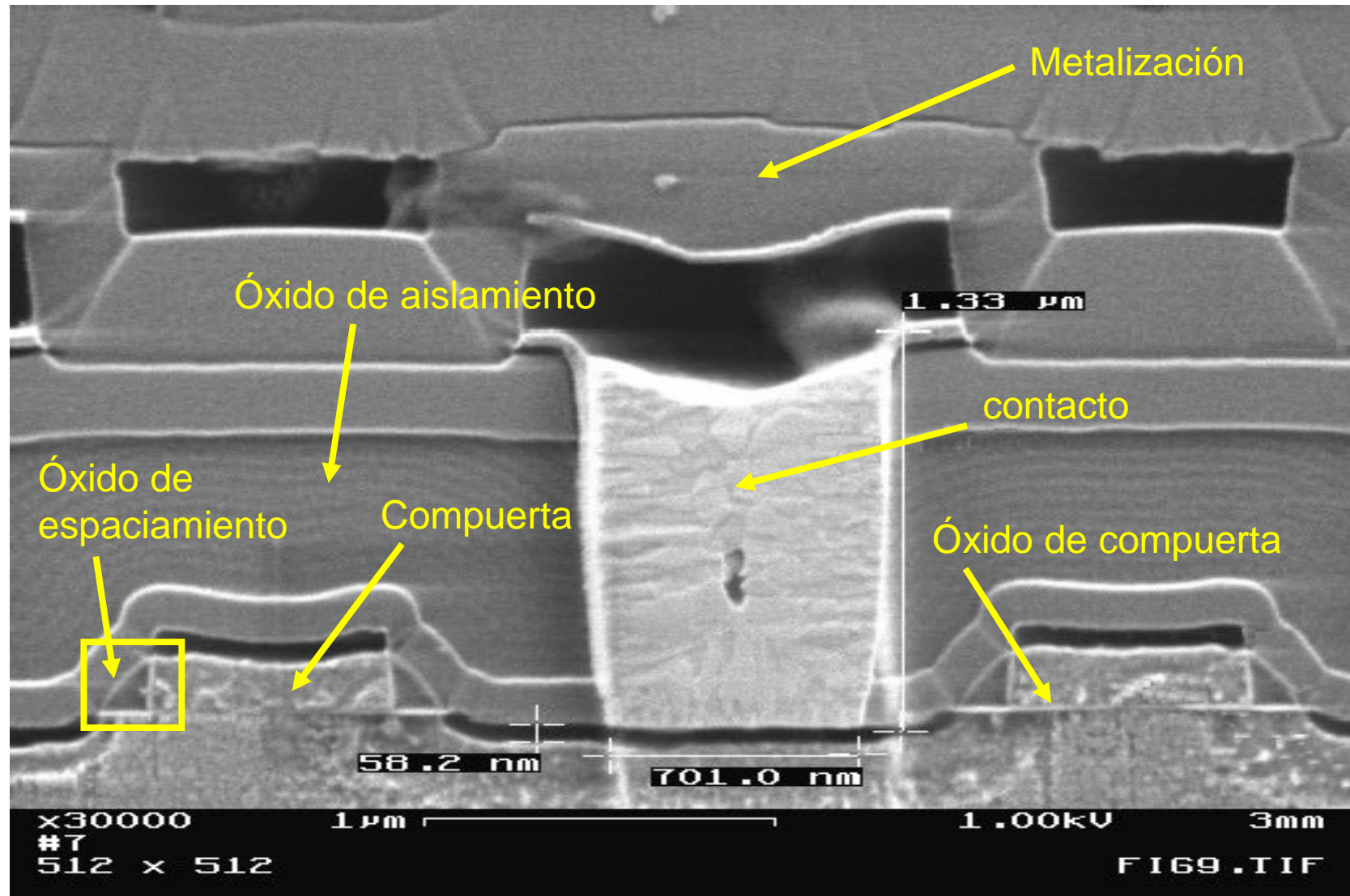


Principio de Funcionamiento del MOSFET



La corriente de arrastre que fluye entre fuente y drenador se controla variando el voltaje en el electrodo de compuerta

Sección Transversal - MOSFET



Polarización y Regiones de Operación

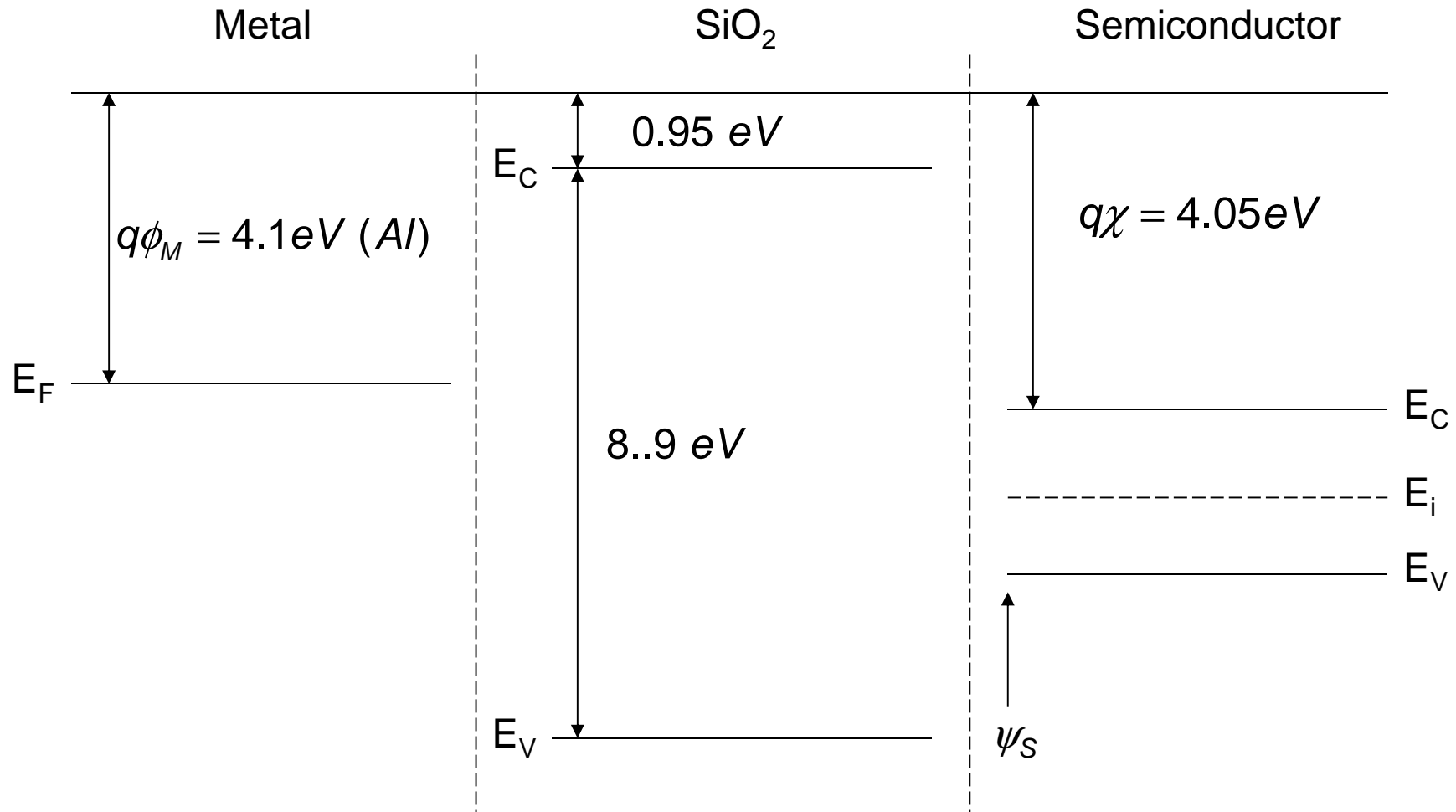
- Desde el punto de vista del potencial de superficie/ V_{GS}
 - Banda plana
 - Acumulación
 - Agotamiento
 - Inversión
 - Inversión débil
 - Inversión fuerte

Transistor “apagado” = Corriente ≈ 0

Transistor “encendido” = Corriente $\neq 0$
- Desde el punto de vista de V_{DS} en comparación con V_{GS}
 - Región de corte
 - Transistor “apagado” = Corriente ≈ 0
 - Determinado por V_{GS}
 - Región lineal
 - Región de saturación

Transistor “encendido” = Corriente $\neq 0$

Sistema Metal Oximo Semiconductor



El comportamiento del MOSFET se define con base en el POTENCIAL DE SUPERFICIE ψ_S , que mide la deformación de bandas del semiconductor en la interfaz con el óxido

Banda Plana

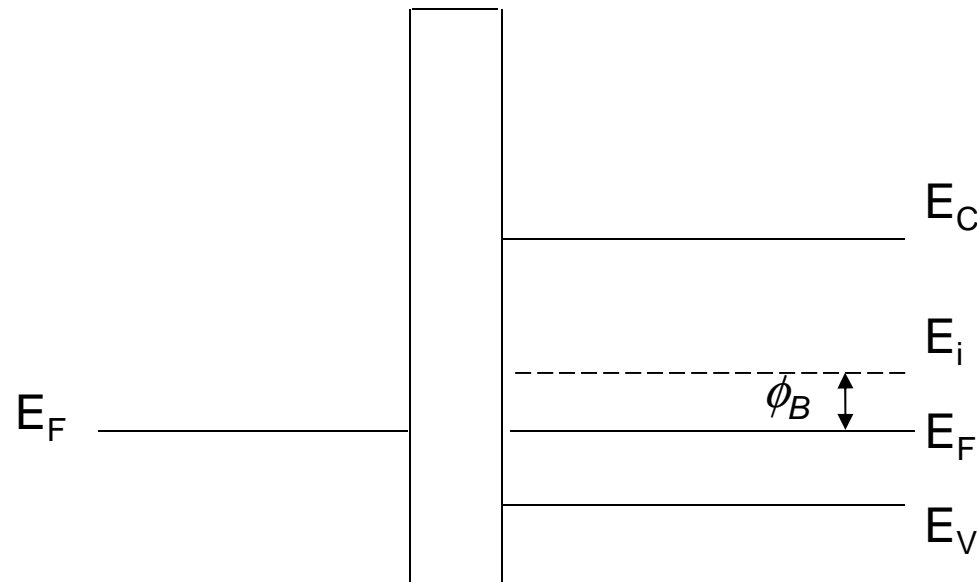
ψ_s : potencial en la interfaz Si-SiO₂, potencial de superficie, medido con respecto a ϕ_B

ϕ_B : potencial en el semiconductor en zona lejana a la interfaz Si-SiO₂, diferencia entre E_i y E_F

Banda plana:

$$\psi_s = 0$$

$$V_{GS} = V_{FB}$$

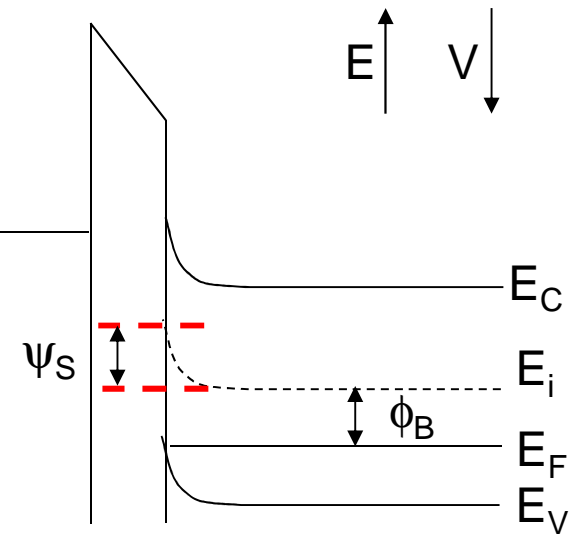
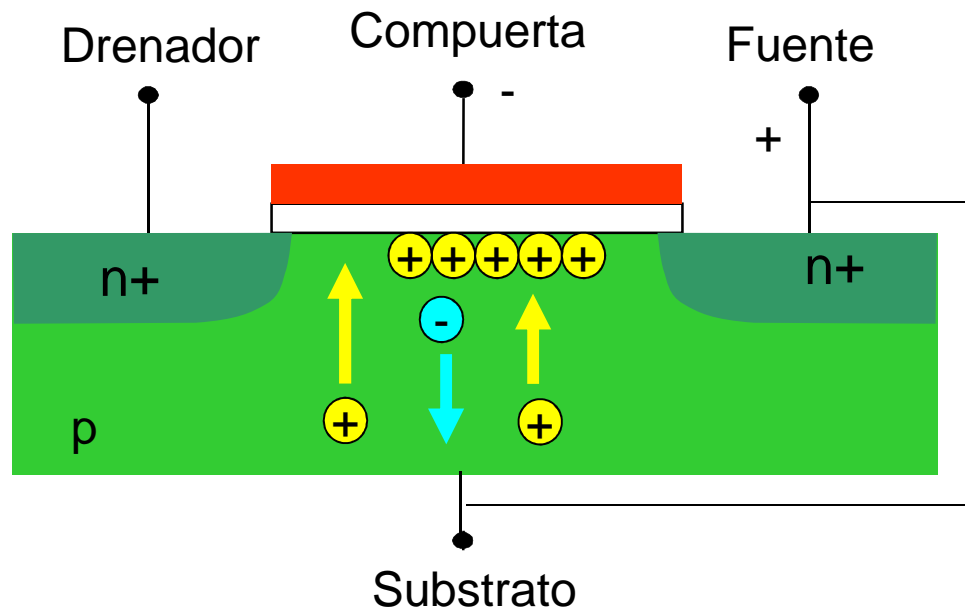


$-V_{FB}$ voltaje necesario para compensar la diferencia de función de trabajo del metal y el semiconductor

Acumulación

Acumulación: $\psi_S < 0$ $V_{GS} < 0$

- huecos se acumulan en la superficie
- no se forma canal entre drenador y fuente = transistor inactivo



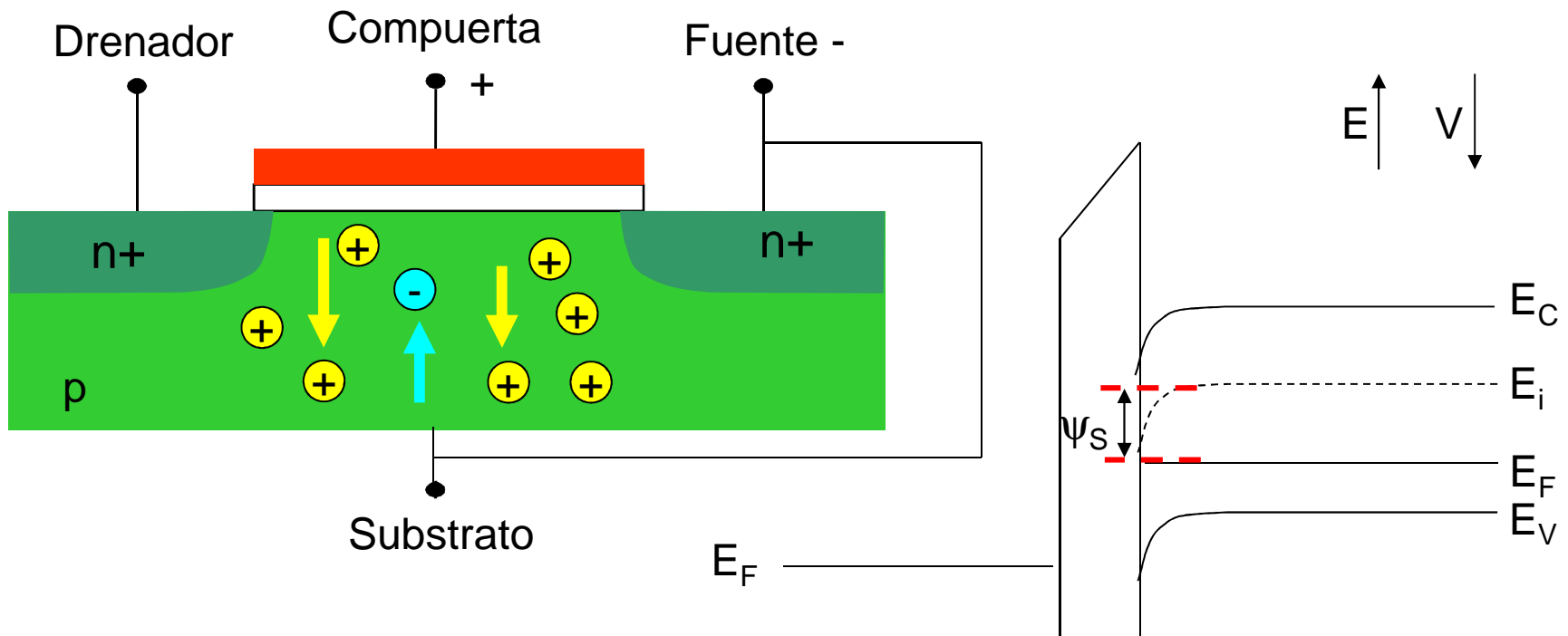
Sin canal \Rightarrow MOSFET = Dos diodos en serie en direcciones opuestas $\Rightarrow I_{DS} \approx 0$

Agotamiento

Agotamiento: $0 < \psi_S < \phi_B$

$$0 < V_{FB} < V_{GS} < V_{TH}$$

V_{TH} = voltaje de umbral (V_{GS} para activar MOSFET)



- huecos repelidos de la superficie = empobrecimiento de huecos en la superficie
- Transistor aún inactivo = región de subumbral

Inversión

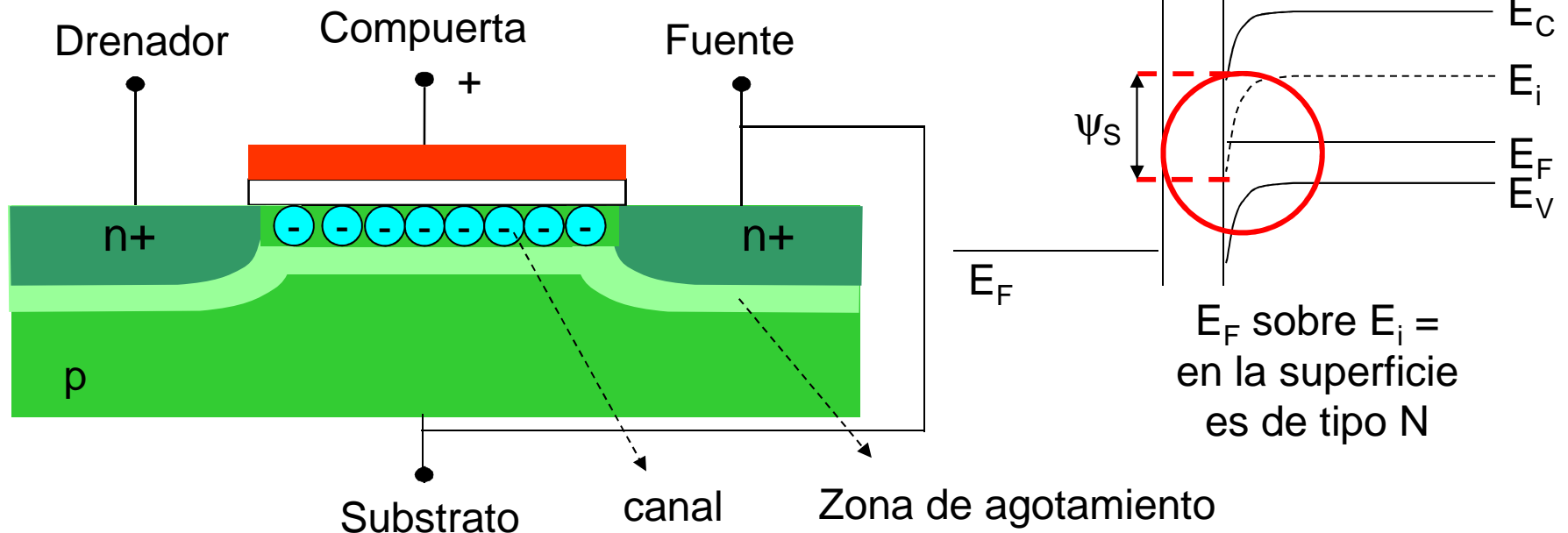
Inversión débil: $\phi_B < \psi_S < 2\phi_B$

Inversión fuerte: $\psi_S \geq 2\phi_B$

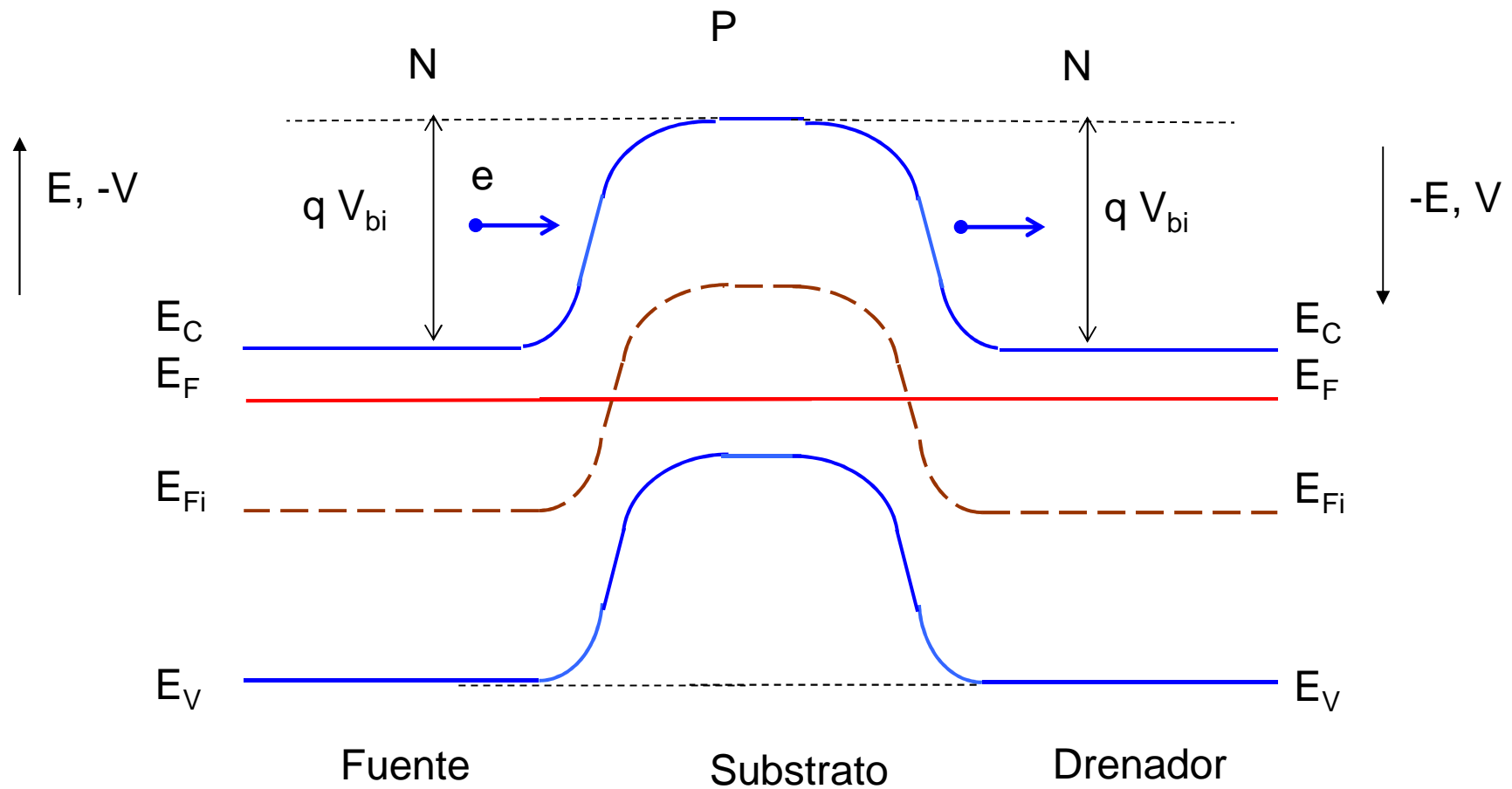
$$\Rightarrow V_{GS} \geq V_{TH}$$

-electrones atraídos a la superficie = concentración de electrones en la superficie iguala concentración de huecos en el substrato
 \Rightarrow superficie de substrato p se comporta como material n

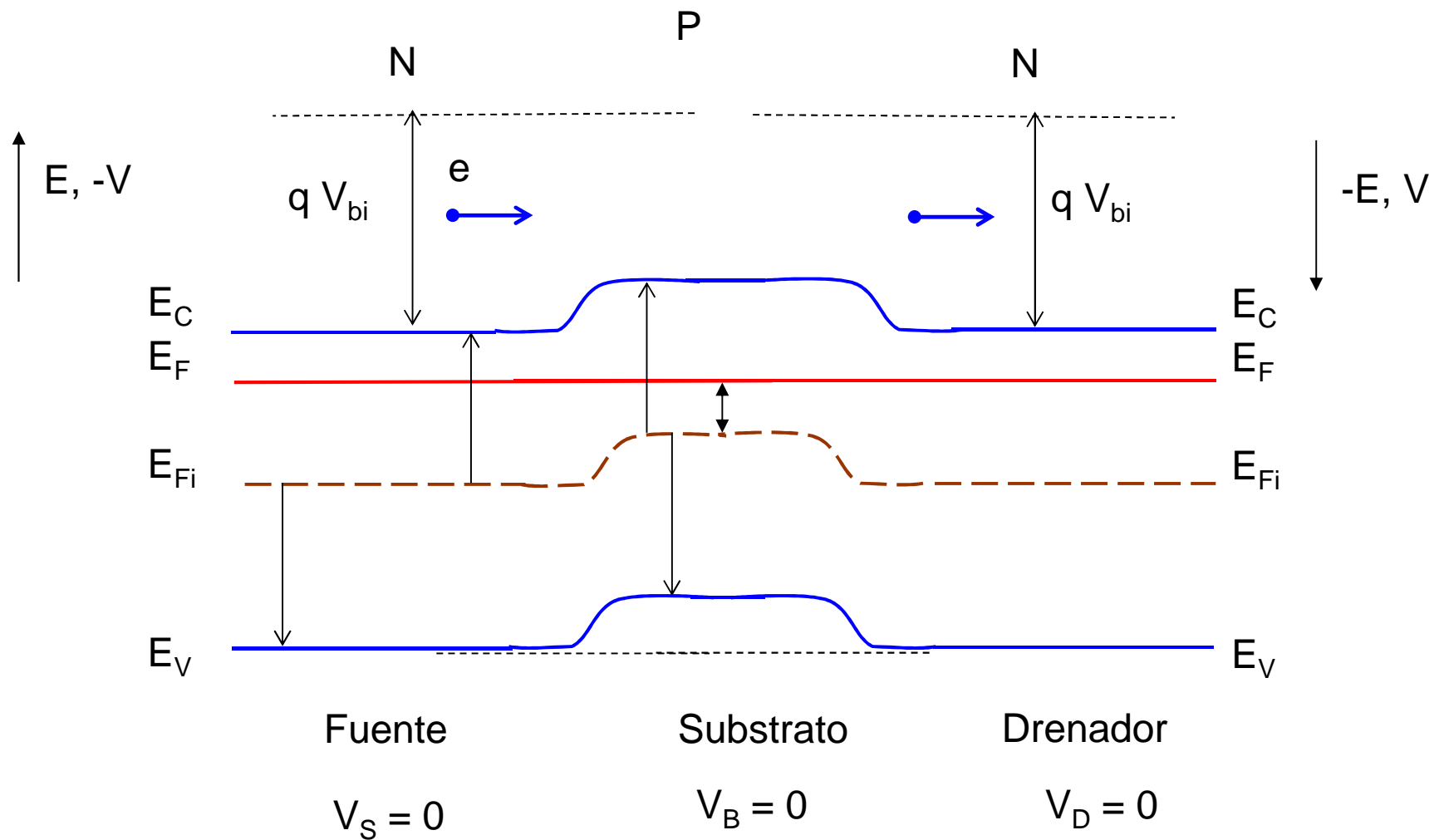
-existe un canal entre drenador y fuente, transistor activo



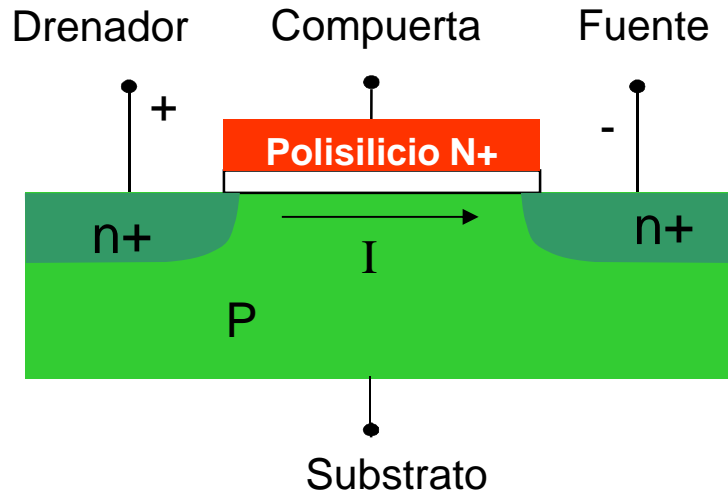
MOSFET sin Tensión Aplicada



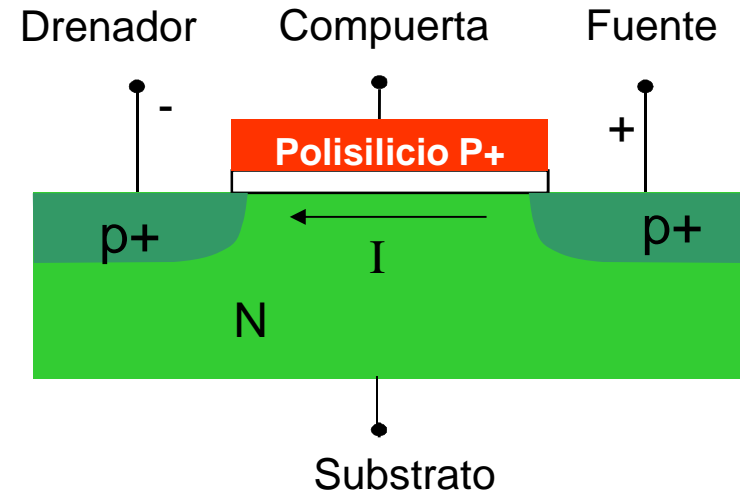
MOSFET con $V_{GS} > V_{TH}$



Transistores NMOS y PMOS



- Flujo de corriente: de drenador a fuente
- Drenador es región n+ conectada al potencial más alto
- Se forma canal tipo N entre drenador y fuente
- Flujo de corriente debido a electrones



- Flujo de corriente: de fuente a drenador
- Drenador es región p+ conectada al potencial más bajo
- Se forma canal tipo P entre drenador y fuente
- Flujo de corriente debido a huecos

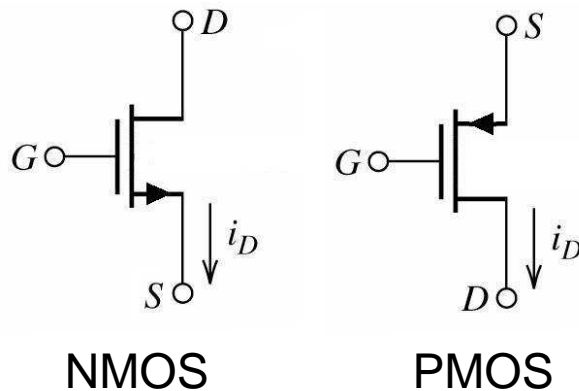
Desde el punto de vista de fabricación, la fuente y el drenador son intercambiables. Sólo pueden distinguirse después de polarizarlos

Simbología del MOSFET

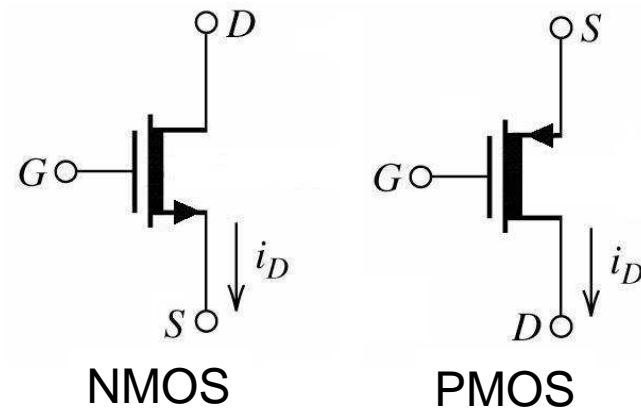
Símbolos de tres terminales: substrato conectado a fuente, flecha indica dirección de corriente técnica

Si no se usan flechas, un círculo sin rellenar se añade a la compuerta de los transistores PMOS

MOSFETs de enriquecimiento
(normalmente apagado)



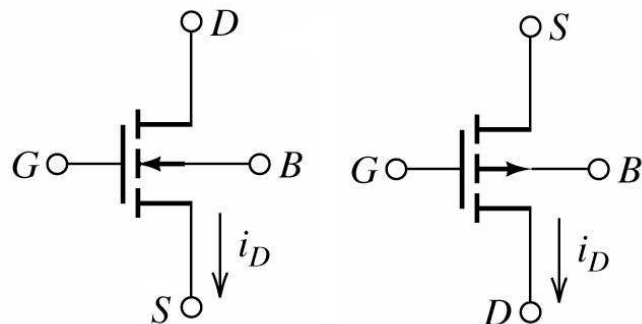
MOSFETs de empobrecimiento
(normalmente encendido)



Simbología del MOSFET

Símbolos de cuatro terminales: flecha en sustrato apunta de P a N

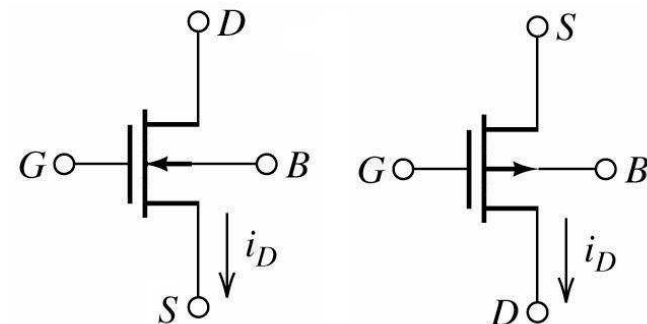
MOSFETs de enriquecimiento
(normalmente apagado)



NMOS:
Substrato P,
canal N

PMOS:
Substrato N,
canal P

MOSFETs de empobrecimiento
(normalmente encendido)



NMOS

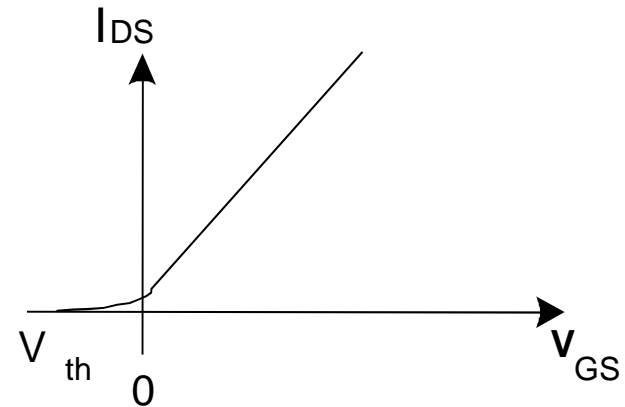
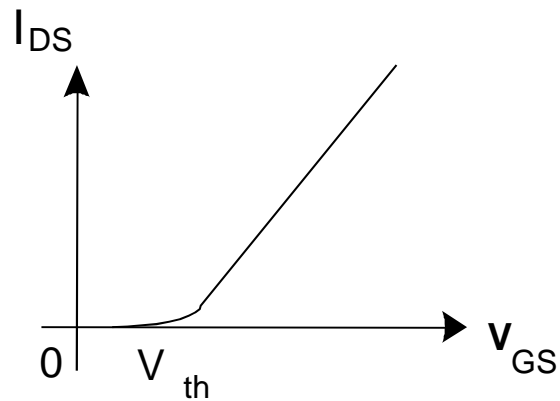
PMOS

Empobrecimiento y Enriquecimiento

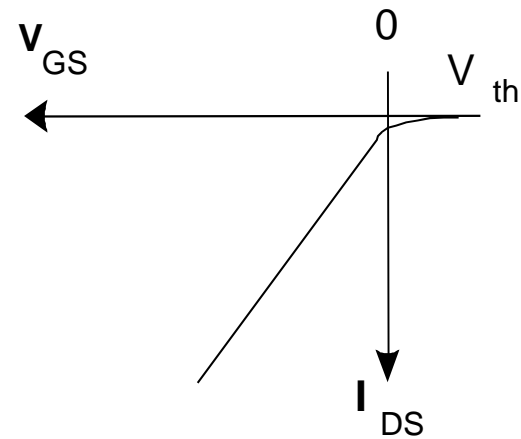
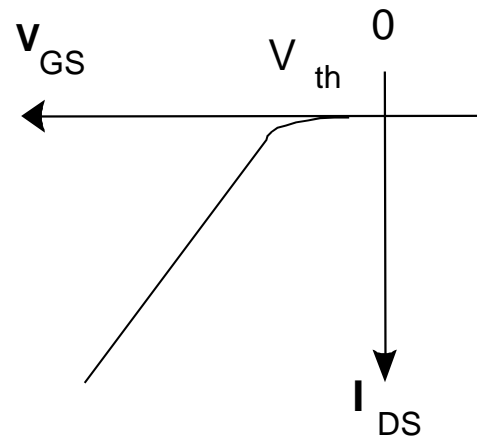
Enriquecimiento:
normalmente inactivo

Empobrecimiento:
normalmente activo

NMOS



PMOS



Voltaje de Umbral

- Voltaje V_{GS} necesario para causar inversión de la superficie

V_{TH} tiene 4 componentes

$$V_{TH} = \phi_{GC} + 2\phi_B - \frac{Q_B}{C'_{ox}} - \frac{Q_{ox}}{C'_{ox}}$$

The diagram shows the equation $V_{TH} = \phi_{GC} + 2\phi_B - \frac{Q_B}{C'_{ox}} - \frac{Q_{ox}}{C'_{ox}}$ with four arrows pointing from each term to a descriptive text block:

- ϕ_{GC} : Diferencia de función de trabajo entre compuerta y canal
- $2\phi_B$: Voltaje necesario para cambiar el potencial superficial
- $-\frac{Q_B}{C'_{ox}}$: Caída de tensión en la zona de carga espacial
- $-\frac{Q_{ox}}{C'_{ox}}$: Compensación de cargas parásitas en SiO_2 y la interfaz óxido-semiconductor

$$Q_B = -qN_A x_d = -\sqrt{2qN_A \epsilon_{Si} |\psi_S|} = -\sqrt{2qN_A \epsilon_{Si} |2\phi_B|}$$

x_d : ancho de zona de agotamiento

Ecuaciones Características (región de subumbral)

En la región de corte (subumbral), $V_{GS} < V_{TH}$. **Idealmente, la corriente es cero.**

En el caso **real**, la corriente de subumbral se calcula como

$$I_D = I_{D0} \cdot e^{\frac{(V_{GS}-V_{TH})}{mV_t}} \cdot [1 - e^{-V_{DS}/V_t}] \approx I_{D0} \cdot e^{\frac{(V_{GS}-V_{TH})}{mV_t}}$$

$$I_{D0} = I_D(V_{GS} = V_{TH}) \cdot \frac{W}{L} \approx 0.1\mu A \cdot \frac{W}{L}$$

W: ancho de transistor

L: longitud de canal

V_{TH} : voltaje de umbral

V_t : voltaje térmico

C_{dep} : capacitancia de agotamiento de sustrato,

C_{ox} : capacitancia de compuerta

$$m = 1 + \frac{C_{dep}}{C_{ox}}$$

O bien, con la pendiente de subumbral S,

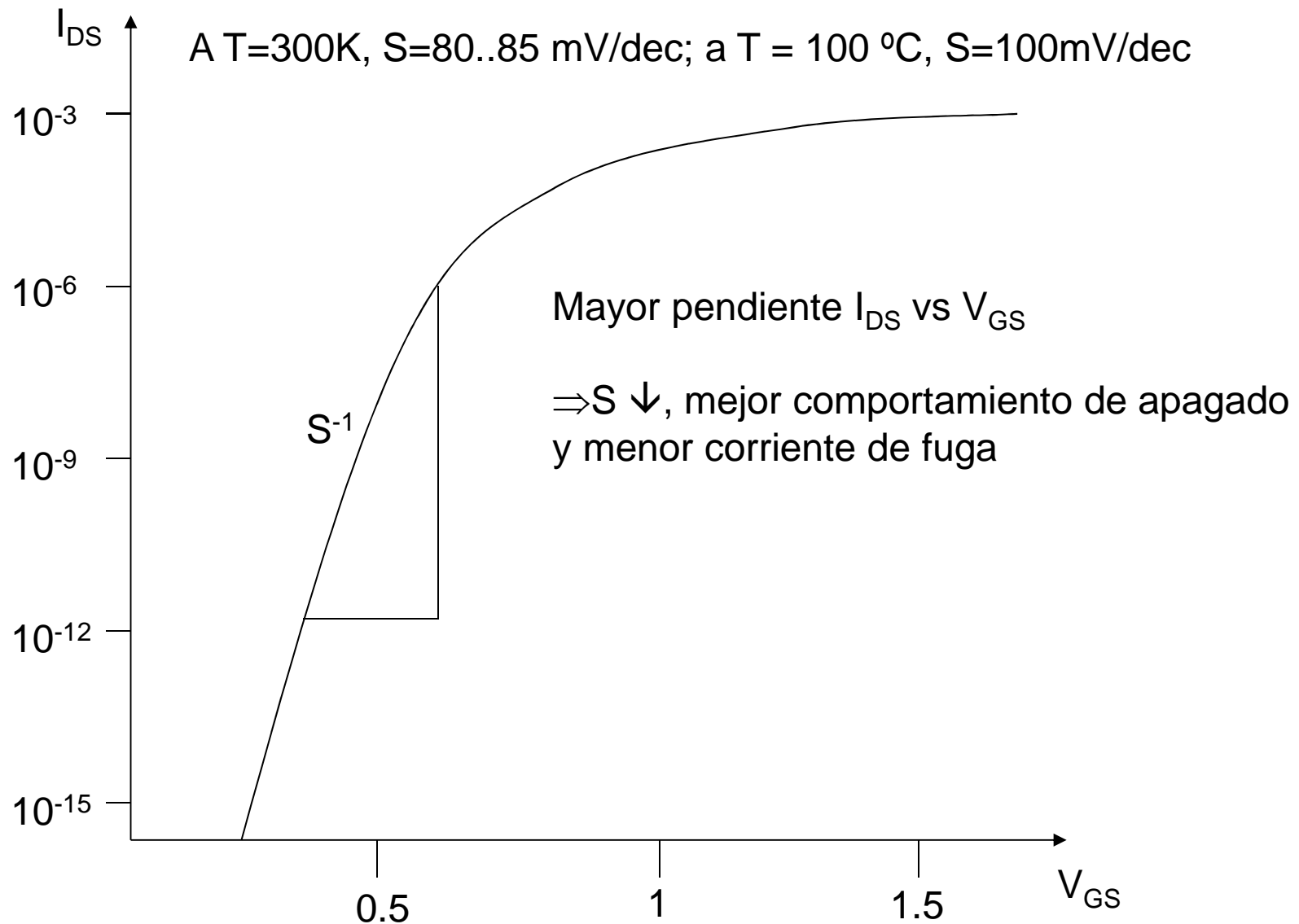
$$I_D = I_{D0} \cdot e^{\frac{(V_{GS}-V_{TH})}{mV_t}} = I_{D0} \cdot e^{\frac{(V_{GS}-V_{TH}) \ln 10}{S}}$$

$$S = \left[\frac{d(\log I_{DS})}{dV_{GS}} \right]^{-1} = \ln 10 \cdot V_t \cdot m$$

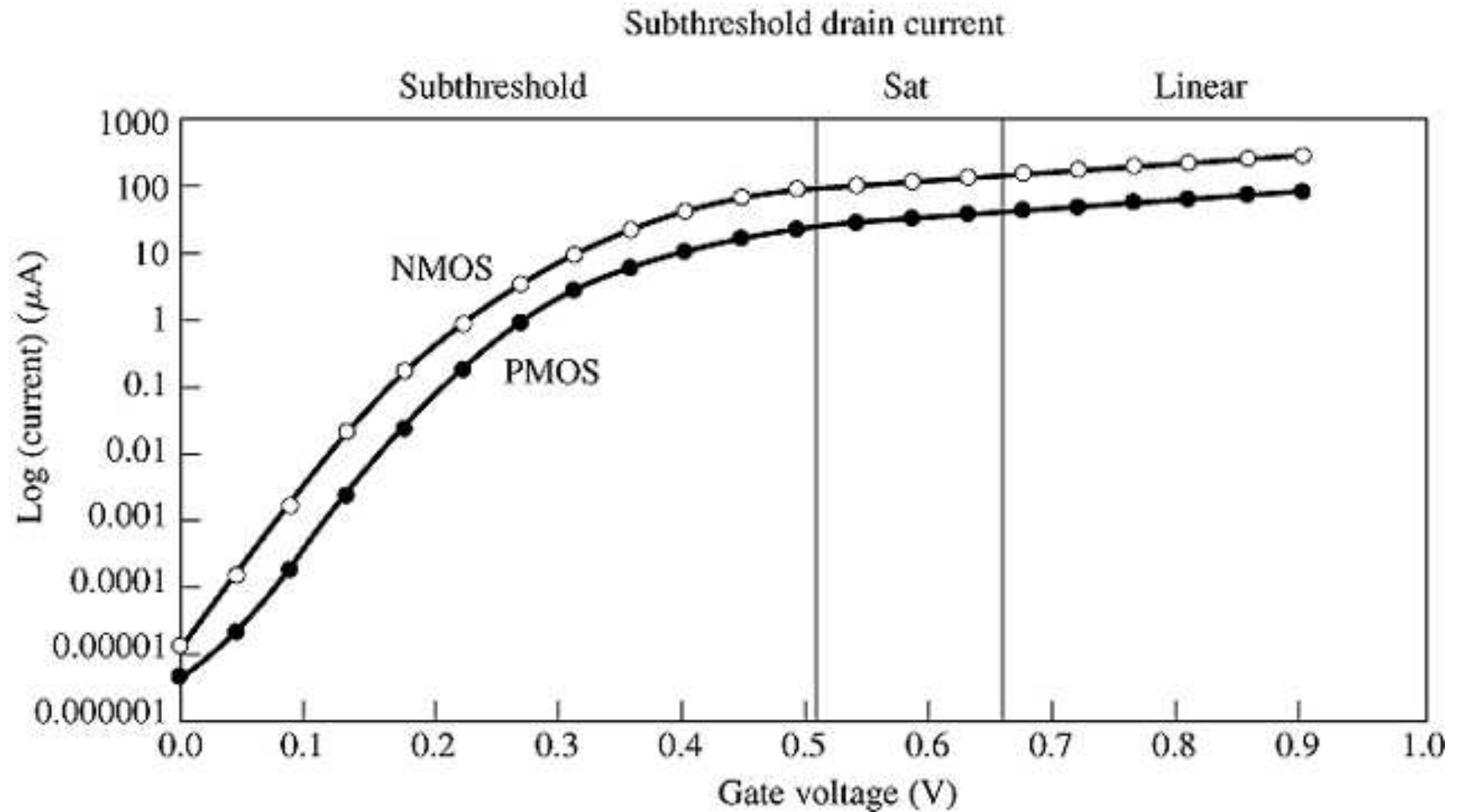
Cambio en V_{GS} necesario para una variación de una década en I_{DS}

Valor ideal: 60 mV/dec

Corriente de Subumbral



Pendiente de Subumbral



Ecuaciones Características (región lineal)

Corriente de drenador en la región lineal: $V_{GS} \geq V_{TH}$, $V_{GS} - V_{TH} > V_{DS}$

$$I_D = K' \cdot \frac{W}{L} \left(V_{GS} - V_{TH} - \frac{V_{DS}}{2} \right) \cdot V_{DS} = K \cdot \left(V_{GS} - V_{TH} - \frac{V_{DS}}{2} \right) \cdot V_{DS}$$

$$K' = \frac{\mu \cdot \epsilon_{OX}}{t_{OX}}, \left[\frac{A}{V^2} \right] \quad K = \frac{\mu \cdot \epsilon_{OX}}{t_{OX}} \cdot \frac{W}{L}$$

K: parámetro de transconductancia
K' = transconductancia del proceso

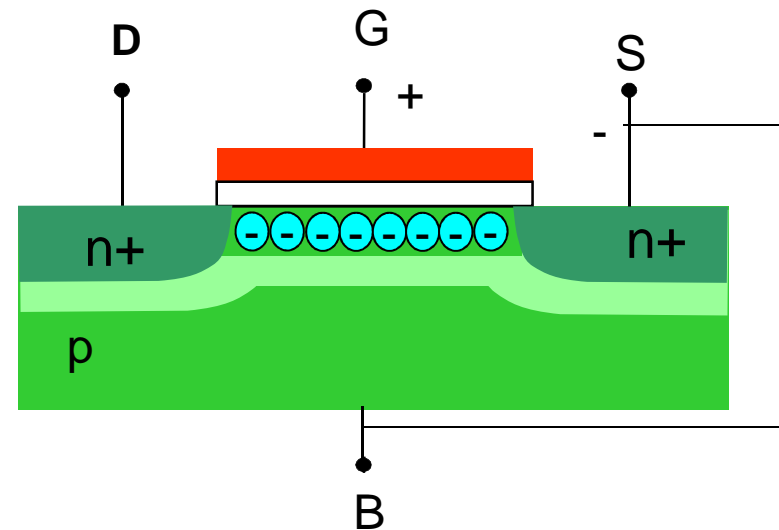
μ : movilidad

ϵ_{OX} : permitividad del $\text{SiO}_2 = 3.9\epsilon_0$

t_{OX} : espesor de óxido

Región lineal

$$V_{GS} \geq V_{TH}, V_{DS} < V_{GS} - V_{TH}$$



Ecuaciones Características (región de saturación)

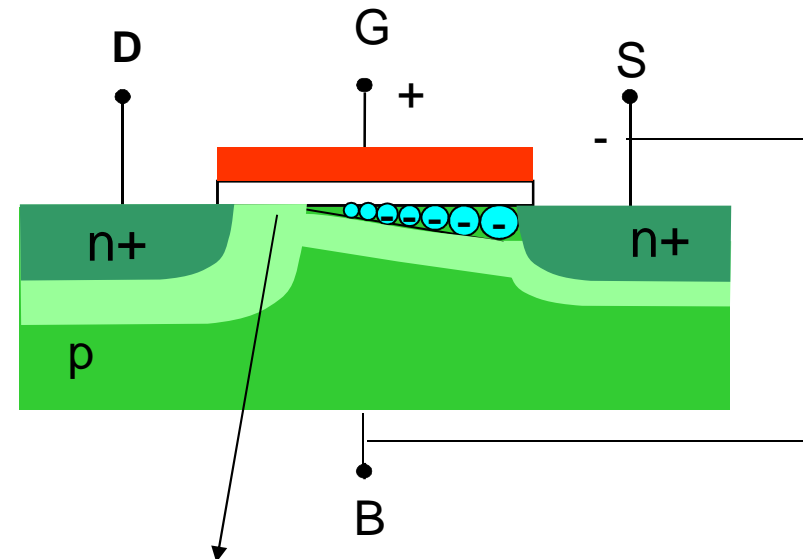
Corriente de drenador en la región de saturación: $V_{GS} \geq V_{TH}$, $V_{GS} - V_{TH} \leq V_{DS}$

$$I_D = \frac{K'}{2} \cdot \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 = \frac{K}{2} (V_{GS} - V_{TH})^2$$

Modulación de largo de canal

$$I_D = \frac{K'}{2} \cdot \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

λ : coeficiente de modulación de canal [V^{-1}]



Modulación de longitud de canal: Estrangulamiento del canal
a partir de $V_{DS} \geq V_{DS,SAT} = V_{GS} - V_{TH}$

\Rightarrow El canal se acorta \Rightarrow La corriente en saturación no es constante para un V_{GS} dado, sino depende también de V_{DS}

Curvas Características del MOSFET

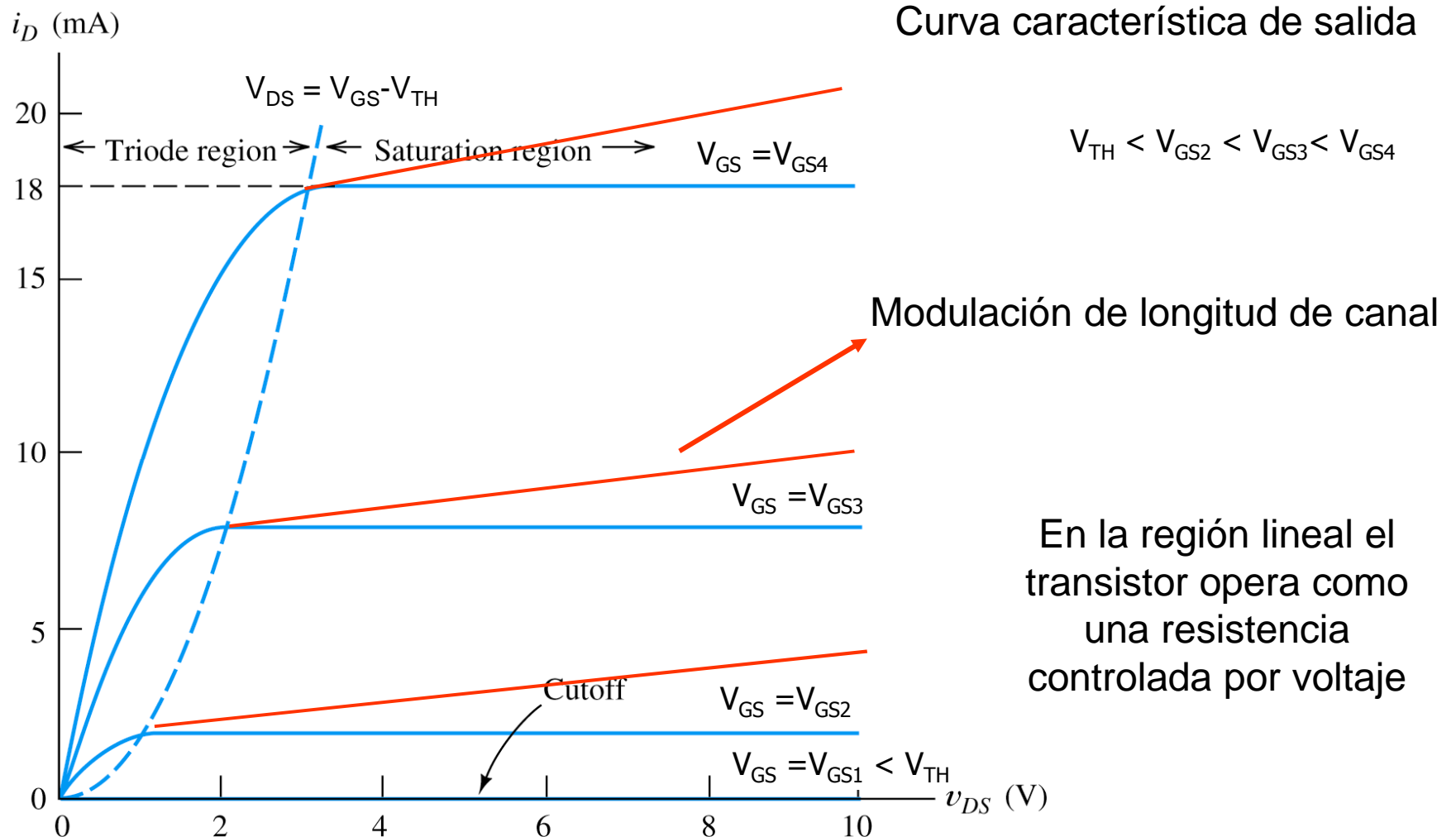
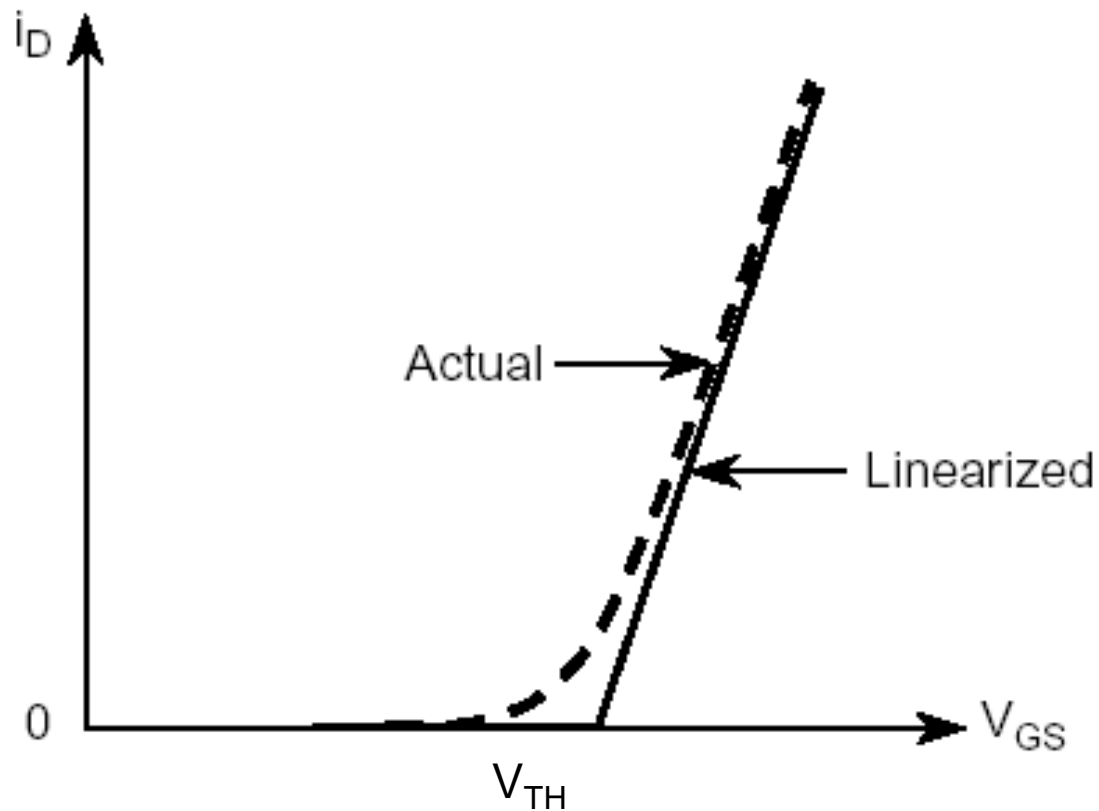


Figure 12.6 Characteristic curves for an NMOS transistor.

Curvas Características del MOSFET

Curva de transferencia



Función de
transferencia:

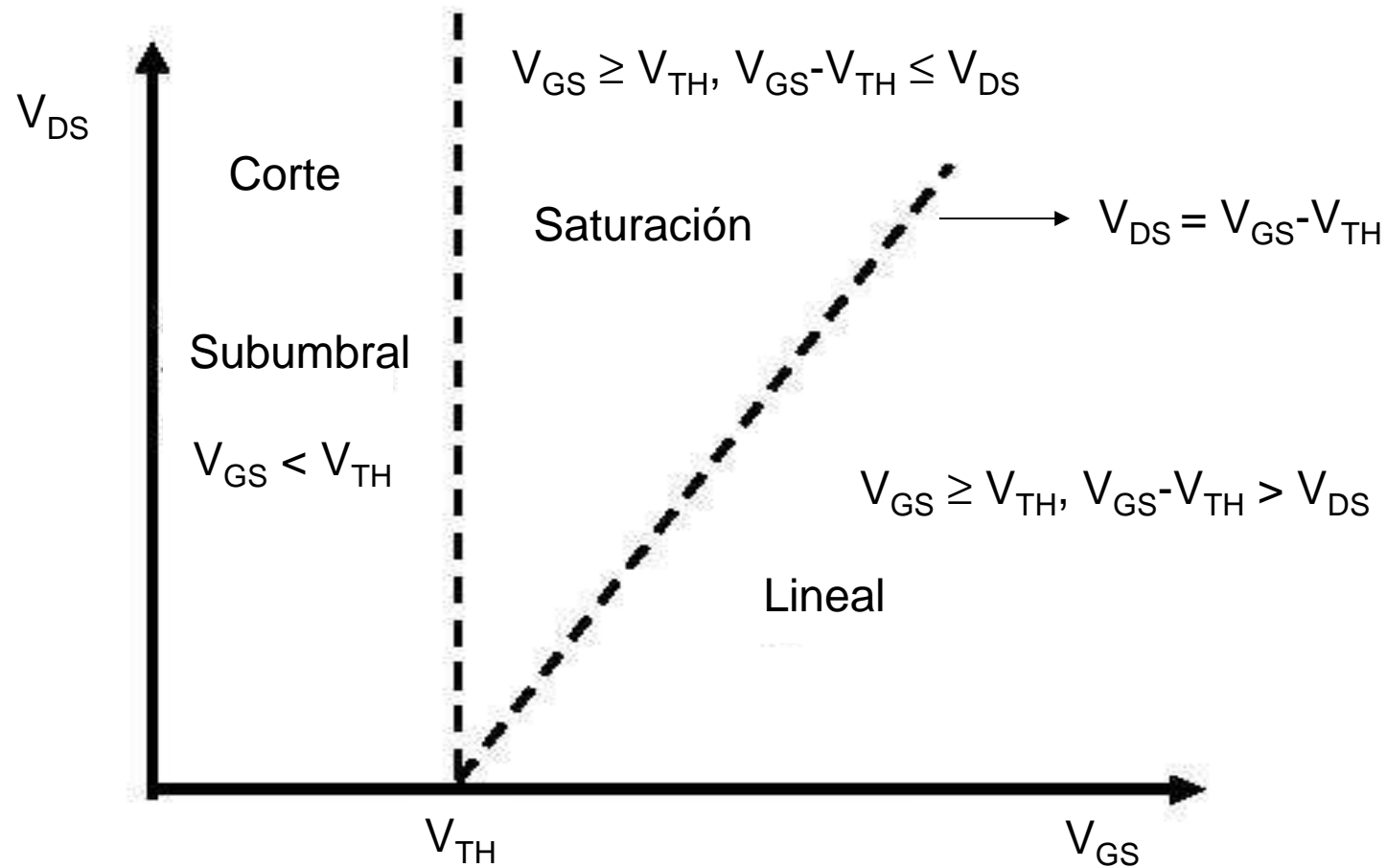
Salida = f(Entrada)

Salida : I_D

Entrada : V_{GS}

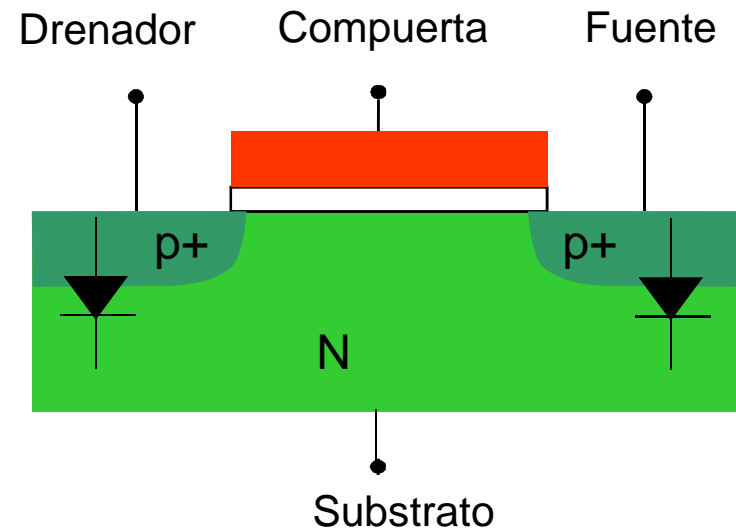
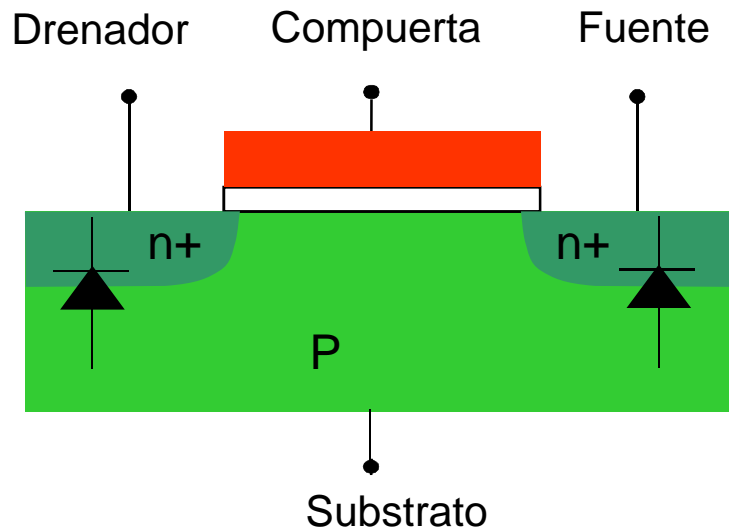
$$I_D = \frac{K'}{2} \cdot \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 = \frac{K}{2} (V_{GS} - V_{TH})^2$$

Regiones de Operación



Polarización del Substrato

- Diodos parásitos difusión-substrato deben estar polarizados en inversa



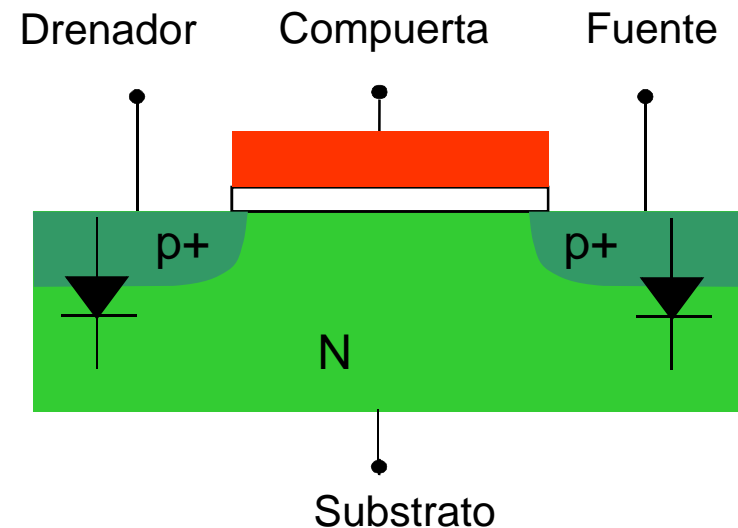
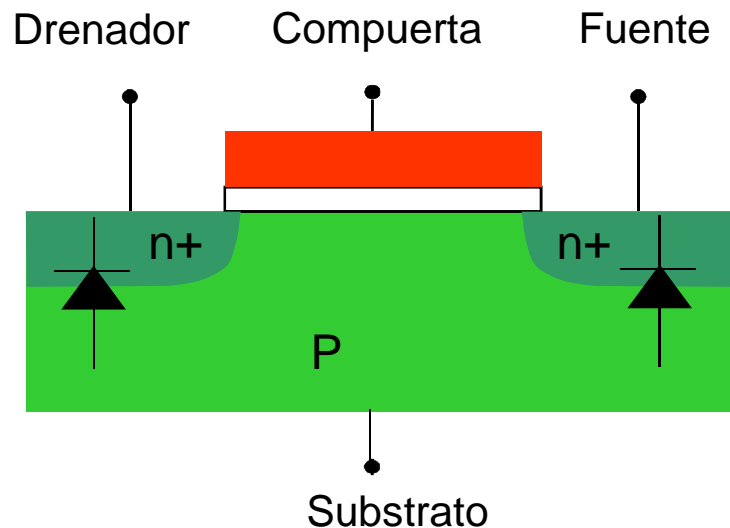
NMOS: Substrato debe conectarse al voltaje más bajo del sistema, por ejemplo a tierra (GND).

PMOS: Substrato debe conectarse al voltaje más alto del sistema, por ejemplo, a V_{DD} .

También como protección ante el efecto de enganche (latch-up)

Polarización del Substrato

- Polarización V_{BS} afecta la tensión de umbral V_{TH} = efecto de substrato (body effect)



El efecto se conoce también como sensibilidad de substrato

En general, se presenta de manera que aumenta el voltaje de umbral

Puede utilizarse para disminuir la corriente de subumbral, por ejemplo, en memorias DRAM

Voltaje de Umbral con Efecto de Substrato

- $V_B \neq V_S$ cambia el voltaje de umbral
- Se analiza aquí el caso de un NMOS

$$V_{TH} = V_{TH0} + \gamma(\sqrt{2\phi_B - V_{BS}} - \sqrt{2\phi_B})$$

Voltaje de umbral
con $V_{BS}=0$

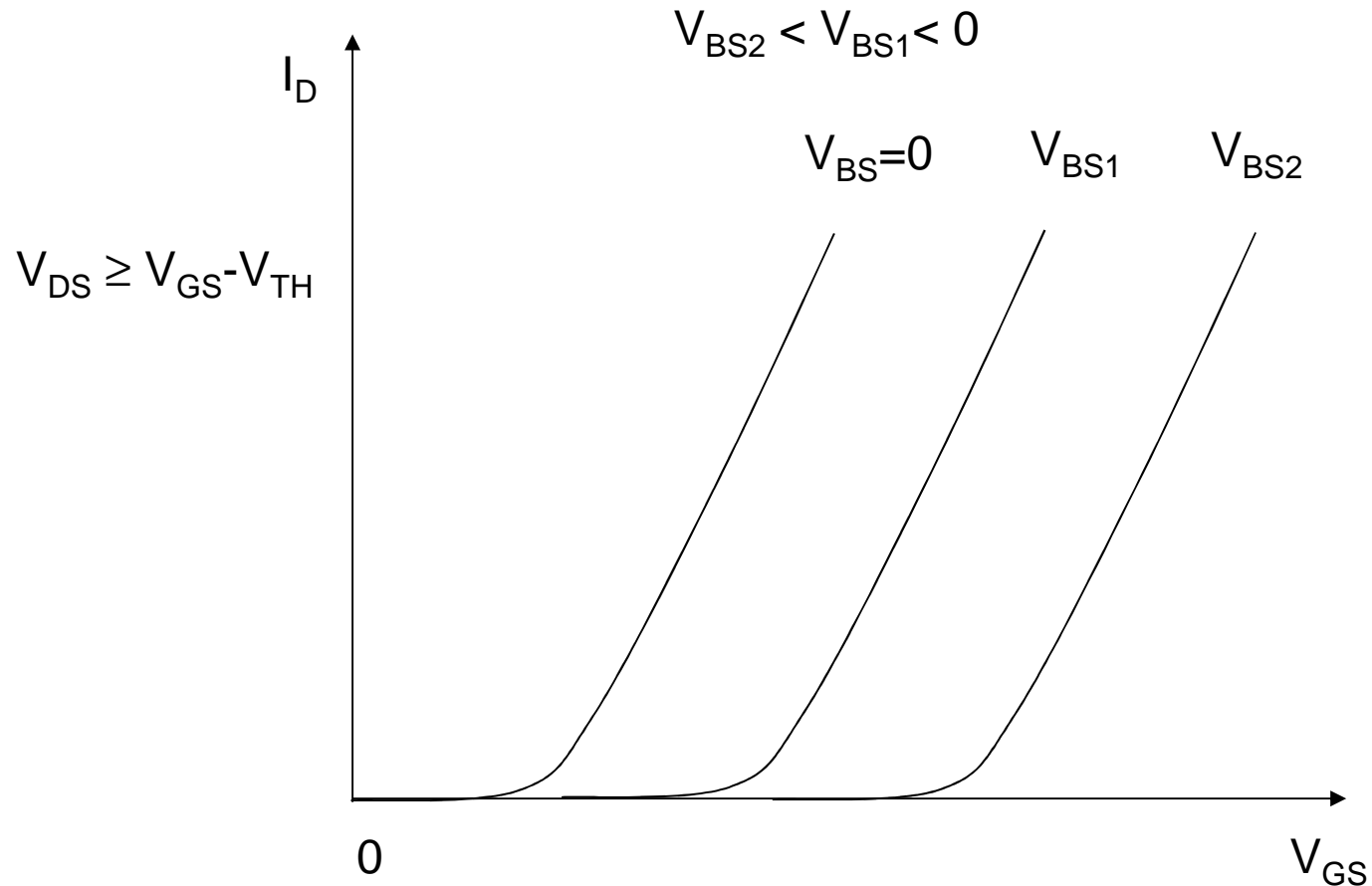
Coeficiente de efecto
de substrato

$$\gamma = \frac{\sqrt{2qN_A\epsilon_{si}}}{C'_{ox}}$$

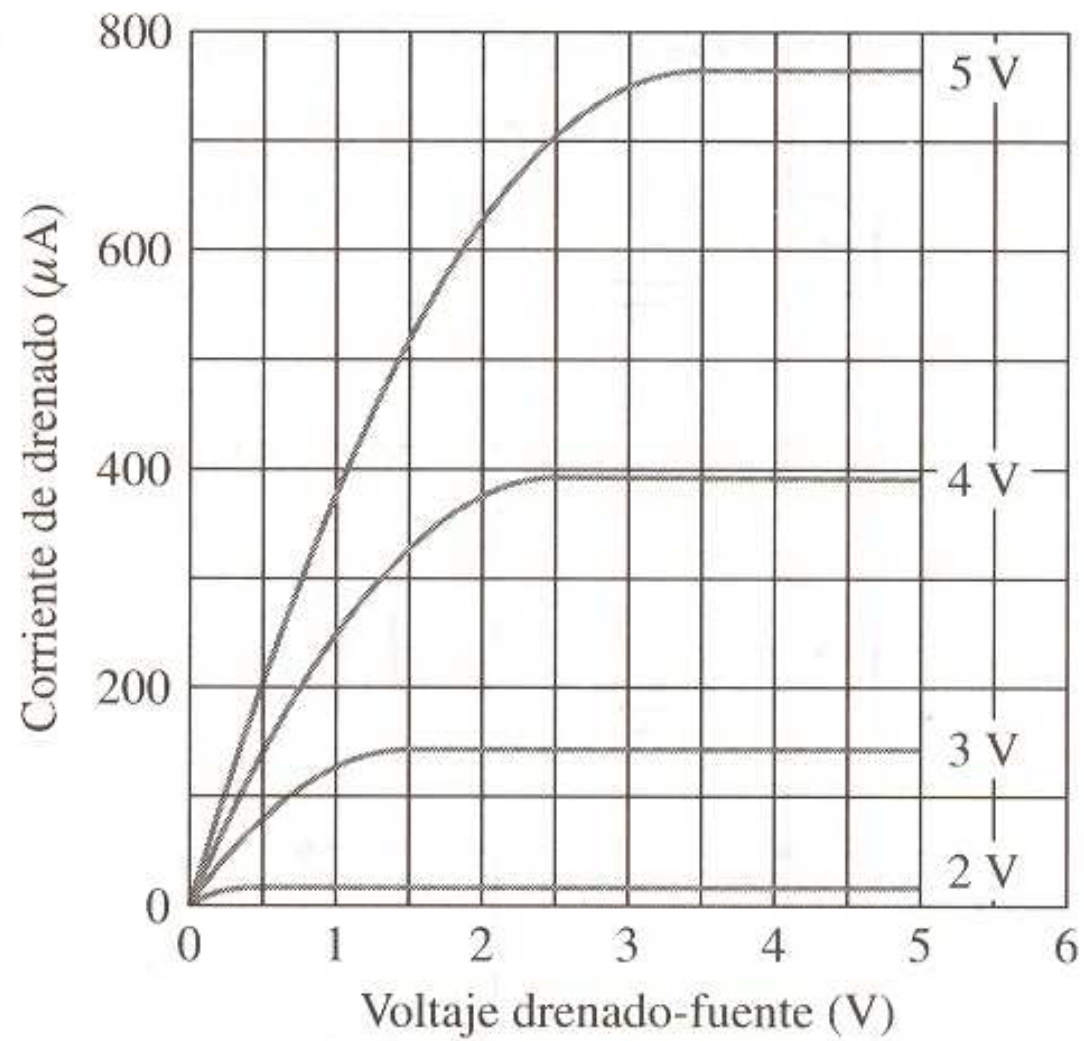
Compensación del cambio en la carga
en la zona de carga espacial debido a
 $V_{BS} \neq 0$

$$\phi_B = V_t \cdot \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$$

Efecto de Substrato

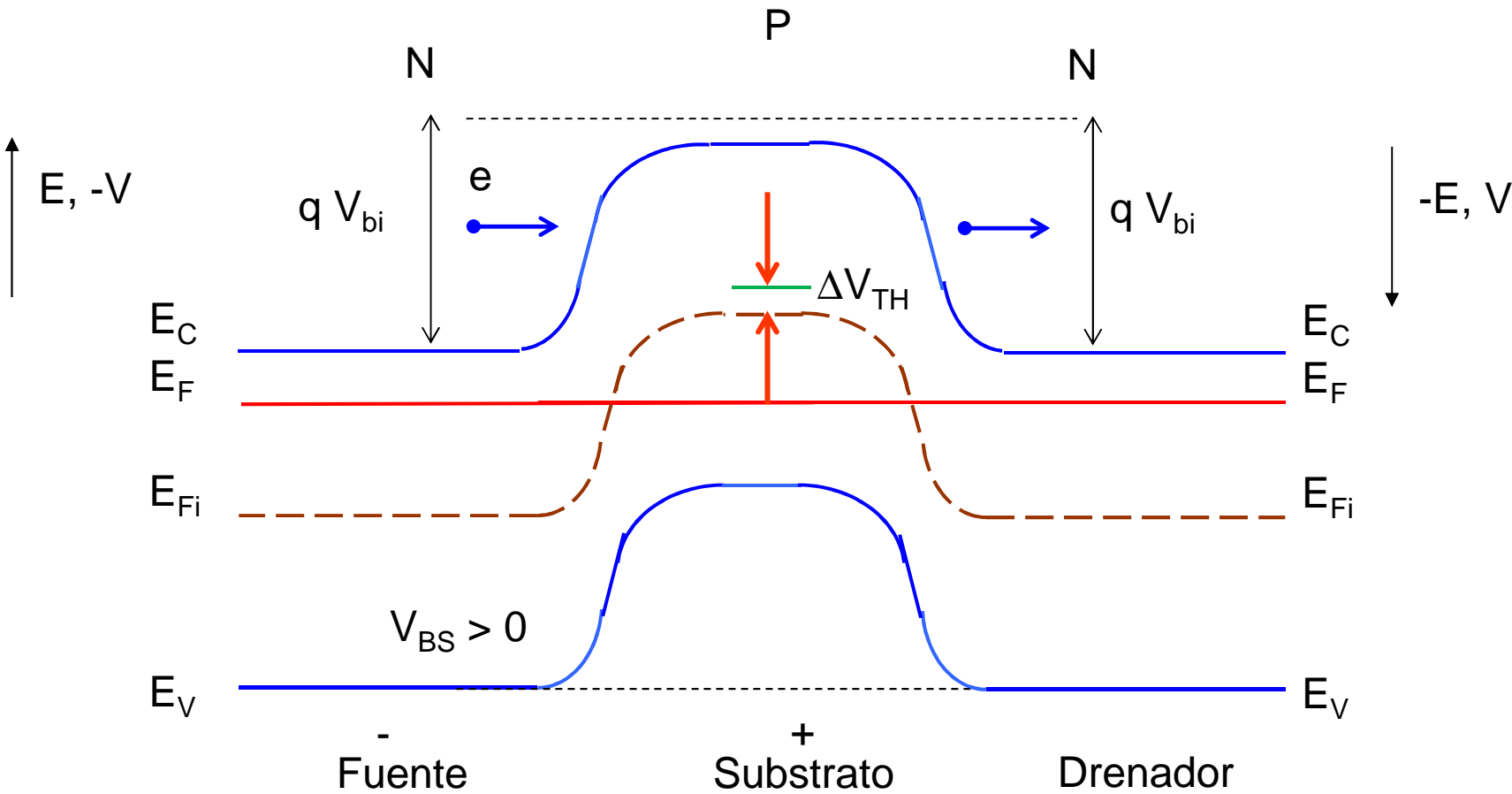


Un voltaje de substrato negativo con respecto al surtidor o bien un voltaje de surtidor positivo con respecto al substrato causan un aumento del voltaje de umbral



MOSFET con $V_{TH} < V_{TH0}$

V_{TH} disminuye, más corriente de fuga de subumbral



MOSFET con $V_{TH} > V_{TH0}$

V_{TH} aumenta, menos corriente de fuga de subumbral

