

# Fundamentos Físicos y Tecnológicos

## Tema 4. Dispositivos Semiconductores

Isabel M. Tienda Luna

Departamento de Electrónica y Tecnología de Computadores  
Universidad de Granada

isabelt@ugr.es

Grado en Informática - Doble Grado en Informática y Matemáticas  
Curso 2015-2016

- 1 Introducción
- 2 Modelo atómico
- 3 Materiales sólidos
- 4 Semiconductores
- 5 La unión PN
- 6 El Transistor MOSFET













- 1 Introducción
- 2 Modelo atómico
- 3 Materiales sólidos
- 4 Semiconductores
- 5 La unión PN
- 6 El Transistor MOSFET

# Introducción

- Los dispositivos semiconductores son componentes electrónicos que hacen uso de las propiedades electrónicas de los materiales semiconductores.
- Usan la conducción eléctrica en sólidos y no en gases o la emisión termoiónica en condiciones de vacío.
- Se fabrican individualmente o formando partes de circuitos integrados en obleas.
- Como veremos, el uso de semiconductores es útil debido a que su comportamiento puede manipularse se forma sencilla añadiendo impurezas.
- Los semiconductores pueden ser excelentes sensores ya que su conductividad puede controlarse por distintos mecanismos (campos eléctricos os magnéticos, luz, calor o deformaciones mecánicas).
- Los dispositivos semiconductores son las piezas básicas de las puertas lógicas, partes fundamentales de la electrónica digital.
- Son claves en amplificadores y osciladores en electrónica analógica.
- Son elementos de traducción entre circuitos digitales y analógicos.

- 1 Introducción
- 2 Modelo atómico**
- 3 Materiales sólidos
- 4 Semiconductores
- 5 La unión PN
- 6 El Transistor MOSFET

# Un poco de historia....

Año	Científico	Descubrimientos experimentales	Modelo atómico
1808	 <a href="#">John Dalton</a>	Durante el s.XVIII y principios del XIX algunos científicos habían investigado distintos aspectos de las reacciones químicas, obteniendo las llamadas <a href="#">leyes clásicas de la Química</a> . 	La imagen del átomo expuesta por Dalton en su <a href="#">teoría atómica</a> , para explicar estas leyes, es la de minúsculas partículas esféricas, indivisibles e inmutables, iguales entre sí en cada elemento químico. 
1897	 <a href="#">J.J. Thomson</a>	Demostó que dentro de los átomos hay unas partículas diminutas, con carga eléctrica negativa, a las que se llamó <a href="#">electrones</a> . 	De este descubrimiento dedujo que el átomo debía de ser una esfera de materia cargada positivamente, en cuyo interior estaban incrustados los electrones. ( <a href="#">Modelo atómico de Thomson.</a> ) 
1911	 <a href="#">E. Rutherford</a>	Demostó que los átomos no eran macizos, como se creía, sino que están vacíos en su mayor parte y en su centro hay un diminuto <a href="#">núcleo</a> . 	Dedujo que el átomo debía estar formado por una corteza con los electrones girando alrededor de un núcleo central cargado positivamente. ( <a href="#">Modelo atómico de Rutherford.</a> ) 
1913	 <a href="#">Niels Bohr</a>	<a href="#">Espectros atómicos</a> discontinuos originados por la radiación emitida por los átomos excitados de los elementos en estado gaseoso. 	Propuso un nuevo modelo atómico, según el cual los electrones giran alrededor del núcleo en unos niveles bien definidos. ( <a href="#">Modelo atómico de Bohr.</a> ) 

# Modelo atómico actual

- Energía cinética + Energía potencial = Energía total

## Ecuación de Schroedinger dependiente del tiempo

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi(r, t) + V(r) \Psi(r, t) = j\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(r, t) \quad (1)$$

donde:

- $-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2$  es el operador energía cinética y m es la masa de la partícula.
- $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$
- $V(r)$  es la energía potencial en la posición r
- $\Psi(r, t)$  es la función de onda

## Ecuación de Schroedinger independiente del tiempo

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi(r, t) + V(r) \Psi(r, t) = E \Psi(r, t) \quad (2)$$

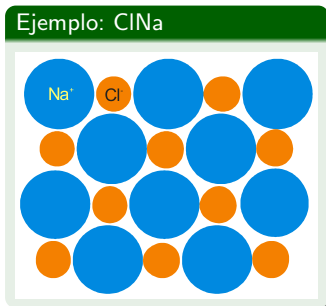
- 1 Introducción
- 2 Modelo atómico
- 3 Materiales sólidos**
- 4 Semiconductores
- 5 La unión PN
- 6 El Transistor MOSFET



# Enlaces Iónicos

- Los electrones están fuertemente ligados a los átomos  $\Rightarrow$  **aislantes**.

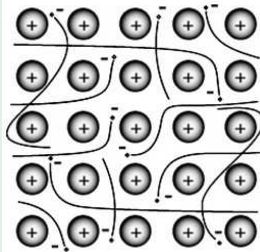
Ejemplo:  $\text{ClNa}$



# Enlaces Metálicos

- Los electrones exteriores están desligados de los átomos, formando una nube electrónica distribuida en todo el sólido y que sirve de unión entre los núcleos atómicos.
- Los electrones exteriores no están ligados a ningún átomo en concreto, por lo que pueden moverse libremente bajo la acción de un campo eléctrico  $\Rightarrow$  **conductores**.

## Ejemplo

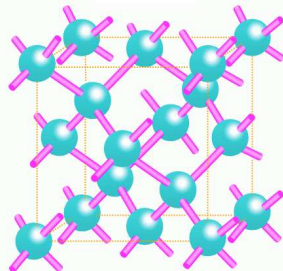


# Enlaces Covalentes

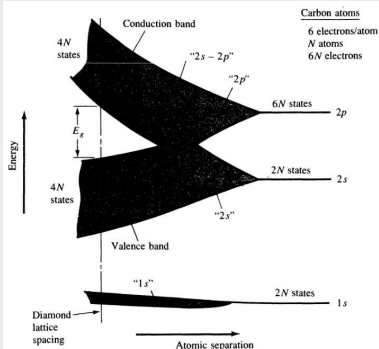
- Los electrones de la capa más externa de cada átomo se comparten con otros átomos, formando un enlace entre ellos.
- Cada par de electrones forma un enlace entre átomos.
- Por ejemplo, el silicio tiene cuatro electrones en su capa más externa  $\Rightarrow$  forma cuatro enlaces covalentes con otros tantos átomos de silicio.

- En principio (cierto a  $T = 0\text{ K}$ ), los electrones que forman el enlace se comparten por dos átomos y no pueden desplazarse por el cristal bajo la acción de un campo eléctrico  $\Rightarrow$  **aislante**.
- Al aumentar  $T$ , se rompen algunos enlaces liberándose electrones que pueden moverse bajo la acción de un campo eléctrico  $\Rightarrow$  **conductor**.

## Ejemplo: Silicio



## Bandas en un cristal de diamante

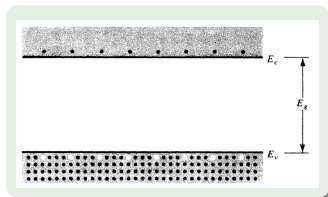




- 1 Introducción
- 2 Modelo atómico
- 3 Materiales sólidos
- 4 Semiconductores**
- 5 La unión PN
- 6 El Transistor MOSFET

# Portadores: electrones y huecos

- Al aumentar  $T$ , se rompen algunos enlaces liberándose electrones que pueden moverse bajo la acción de un campo eléctrico  $\Rightarrow$  **Formación de par electrón-hueco.**



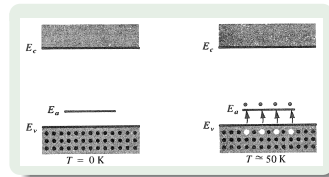
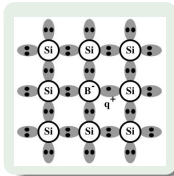
- Los huecos también participan en el proceso de conducción:  $\sigma = qn\mu_n + qp\mu_p$ . ( $\sigma$  es la conductividad,  $n$  es la concentración de electrones,  $p$  la de huecos y  $\mu_n$  y  $\mu_p$  las movilidades de electrones y huecos.)
- En general, un semiconductor tiene pocos portadores libres por eso su conductividad es baja.
- ¿Qué puedo hacer para aumentar la conductividad?** Incrementar el número de portadores.

# Tipos de Semiconductores

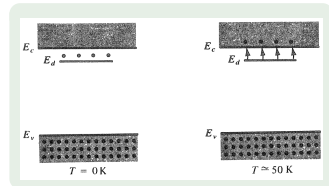
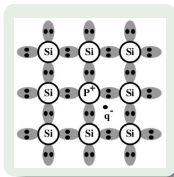
- **Intrínsecos**

- **Extrínsecos (dopados)**

- 1 **Tipo P** (con impurezas aceptadoras, materiales de la columna III)



- 2 **Tipo N** (con impurezas donadoras, materiales de la columna V)



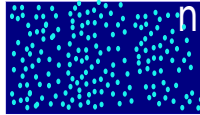
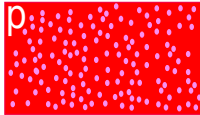


- 1 Introducción
- 2 Modelo atómico
- 3 Materiales sólidos
- 4 Semiconductores
- 5 La unión PN**
- 6 El Transistor MOSFET

# Unión PN



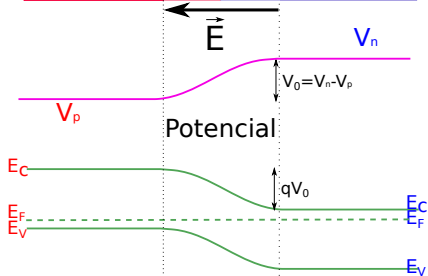
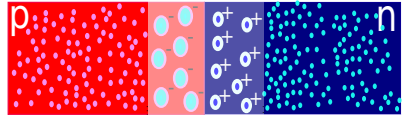
## Unión PN



- hueco
- electrón
- átomo con un hueco ocupado por un  $e^-$
- $+$  átomo que ha perdido un  $e^-$



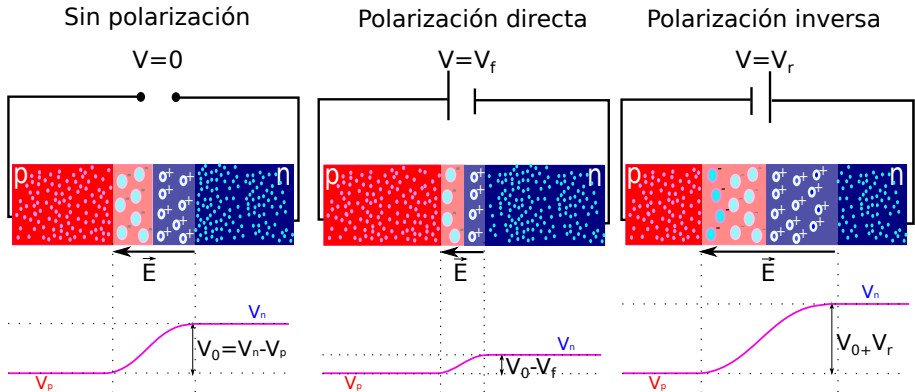
Estructura de Bandas



Estructura de Bandas

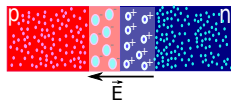
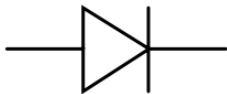
# Unión PN

¿Se puede hacer algo para modificar la barrera que ven electrones y huecos?



# El Diodo

- Es un dispositivo de dos terminales.
- Símbolo



- Relación voltaje/intensidad:

$$I_d = I_S \left( e^{\frac{qV_d}{k_B T}} - 1 \right) \quad (3)$$

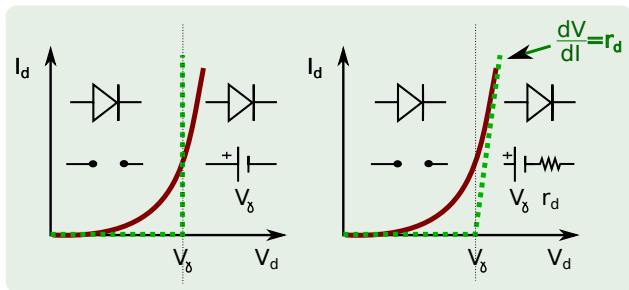
donde  $I_d$  es la intensidad que atraviesa el diodo,  $I_S$  es la corriente inversa de saturación,  $q$  es la carga del electrón,  $V_d$  la diferencia de potencial entre los extremos del diodo,  $k_B$  la constante de Boltzmann y  $T$  la temperatura.

- Tipos de diodos: Zener, LEDs,...

# El Diodo

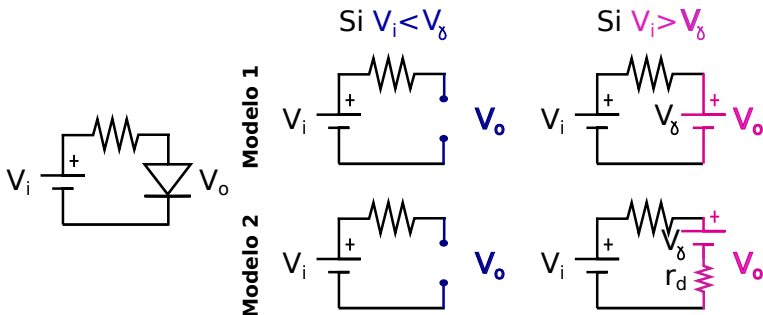
¿Cómo se trabaja en un circuito con diodos? Hay que hacer aproximaciones.

- **Modelo 1.** Suponemos que hay una tensión a partir de la cual el diodo conduce ( $V_\gamma$ ) y una vez que entra en conducción puede conducir cualquier valor de corriente. El diodo se comportan entonces como una fuente de tensión de valor  $V_\gamma$
- **Modelo 2.** Suponemos que hay una tensión a partir de la cual el diodo conduce ( $V_\gamma$ ) como en el modelo anterior. Sin embargo, consideramos que existe una resistencia asociada ( $r_d$ ), de manera que el diodo se comporta en conducción como una fuente de tensión  $V_\gamma$  en serie con esa resistencia.



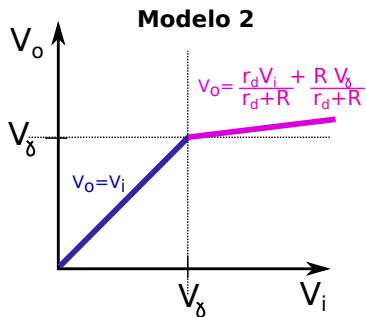
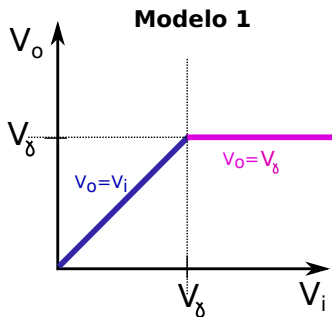
# El Diodo

**Característica de transferencia:** es la representación de la salida de un circuito en función de la entrada. (**No** confundir con función de transferencia)



# El Diodo

**Característica de transferencia:** es la representación de la salida de un circuito en función de la entrada. (**No** confundir con función de transferencia)

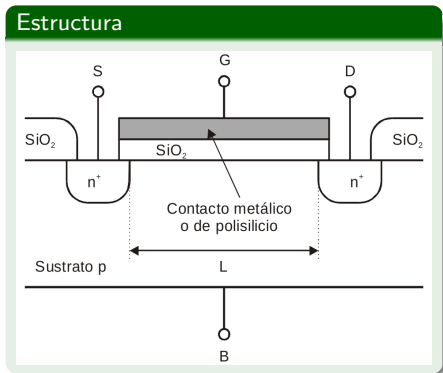




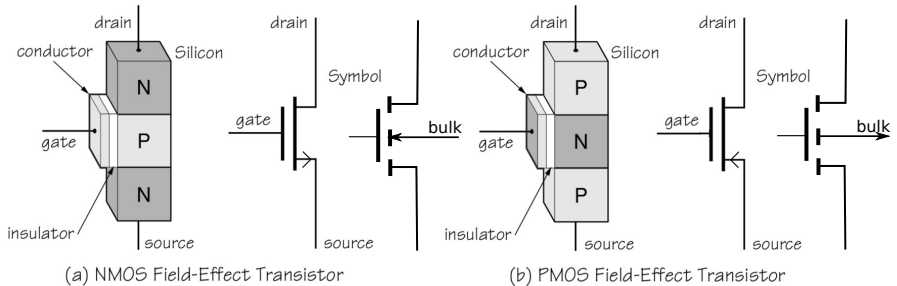
- 1 Introducción
- 2 Modelo atómico
- 3 Materiales sólidos
- 4 Semiconductores
- 5 La unión PN
- 6 El Transistor MOSFET**

# El transistor de efecto campo

- Es un dispositivo electrónico de tres terminales llamados puerta (G, *gate*), drenador (D, *drain*) y fuente (S, *source*).
- La corriente fluye entre la fuente y el drenador y se controla con la tensión aplicada en la puerta.
- Sus aplicaciones fundamentales son:
  - ① Digitales: conmutadores.
  - ② Analógicas: amplificadores.
- El más importante es el **MOSFET** (*Metal oxide semiconductor field effect transistor*).
- Tipos:
  - n-MOSFET
  - p-MOSFET

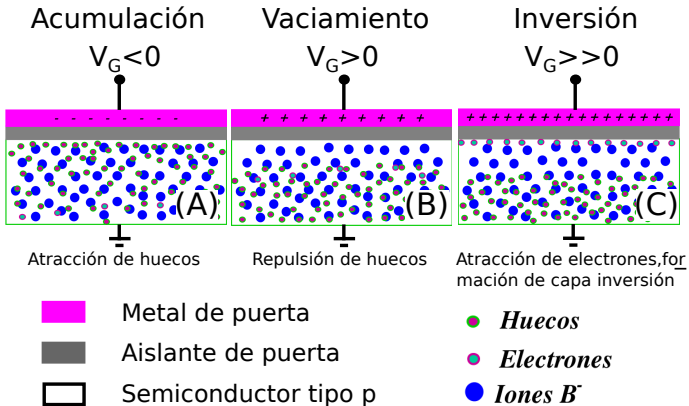


# Tipos de MOSFET



# Flujo de portadores en el MOSFET

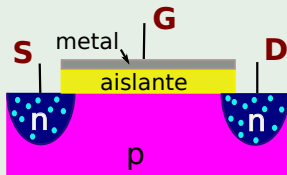
- La unión Metal-Aislante-Semiconductor (MIS) se comporta como un condensador:



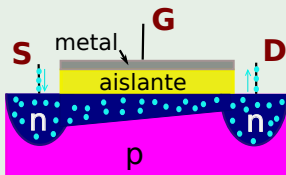
# Modos de funcionamiento del n-MOSFET

- Para caracterizar el comportamiento del dispositivo definimos una *tensión umbral* ( $V_T$  es la diferencia de potencial entre puerta y sustrato a la que comienza a formarse el canal).
- Distinguimos las siguientes regiones de comportamiento en función de la polarización drenador-fuente:
  - a.  $V_G - V_S = V_{GS} < V_T$ . No hay canal.
  - b.  $V_{GS} > V_T$  y  $V_{DS} < (V_{GS} - V_T)$ . Hay canal en toda la zona entre D y S.
  - c.  $V_{GS} > V_T$  y  $V_{DS} > (V_{GS} - V_T)$ . Hay canal pero no ocupa toda la zona entre D y S.

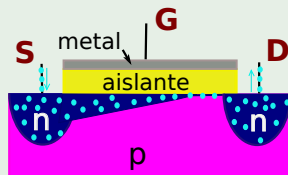
## CORTE



## LINEAL



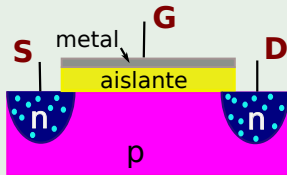
## SATURACIÓN



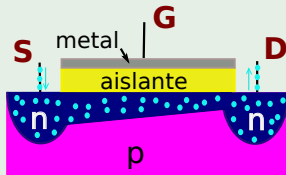
# Modos de funcionamiento del n-MOSFET: corte

- **Objetivo:** que los electrones circulen desde S a D  $\Rightarrow V_D > V_S$ .
- En **corte:**  $V_G - V_S = V_{GS} < V_T$ .
- Si  $V_G - V_S = V_{GS} < V_T \Rightarrow$  No hay capa de inversión en S.
- Si  $V_G - V_S = V_{GS} < V_T \Rightarrow$  Como  $V_D > V_S \Rightarrow V_G - V_D = V_{GD} < V_T \Rightarrow$  No hay capa de inversión en D.
- Como no hay capa de inversión ni en S ni en D, no hay canal entre ellos.

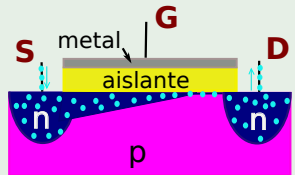
## CORTE



## LINEAL



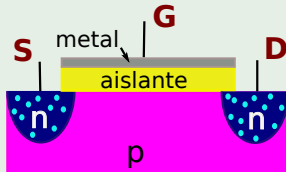
## SATURACIÓN



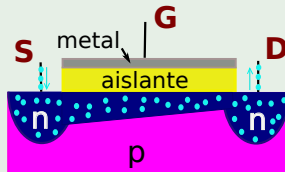
# Modos de funcionamiento del n-MOSFET: lineal

- **Objetivo:** que los electrones circulen desde S a D  $\Rightarrow V_D > V_S$ .
- En **lineal:**  $V_{GS} > V_T$  y  $V_{DS} < (V_{GS} - V_T)$ .
- Si  $V_G - V_S = V_{GS} > V_T \Rightarrow$  Hay capa de inversion en S.
- Si  $V_D - V_S < (V_G - V_S - V_T) \Rightarrow V_T < V_G - V_D = V_{GD} \Rightarrow$  Hay capa de inversion en D.
- Como hay capa de inversión en S y en D, hay canal entre ellos y los electrones van desde S a D.

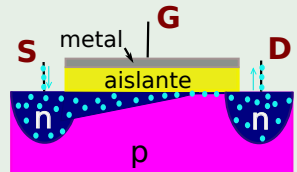
## CORTE



## LINEAL



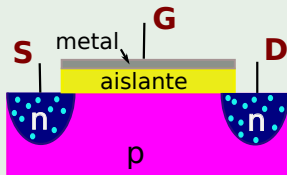
## SATURACIÓN



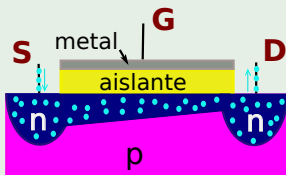
# Modos de funcionamiento del n-MOSFET: saturación

- **Objetivo:** que los electrones circulen desde S a D  $\Rightarrow V_D > V_S$ .
- En **saturación:**  $V_{GS} > V_T$  y  $V_{DS} > (V_{GS} - V_T)$ .
- Si  $V_G - V_S = V_{GS} > V_T \Rightarrow$  Hay capa de inversion en S.
- Si  $V_D - V_S > (V_G - V_S - V_T) \Rightarrow V_T > V_G - V_D = V_{GD} \Rightarrow$  No hay capa de inversion en D.
- La capa de inversión que hay en S se hace cada vez más estrecha al acercamos a D. A pesar de que el canal no ocupa toda la zona entre S y D, los electrones van de S a D.

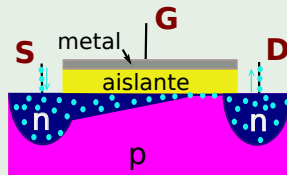
## CORTE



## LINEAL



## SATURACIÓN





# Modos de funcionamiento del n-MOSFET

## 1 Región de Corte:

- Ocurre si  $V_{GS} \leq V_T$
- El transistor está OFF porque no hay canal.
- No hay conducción entre drenador y fuente ( $I_D = 0$ ).
- $I_G = 0$ .
- Corriente de fuga.

## 2 Región lineal, óhmica o triodo:

- Ocurre si  $V_{GS} > V_T$  y  $V_{DS} < (V_{GS} - V_T)$ .
- El transistor está ON.
- $I_G = 0$ .
- Hay conducción entre drenador y fuente:

$$I_D = \frac{k}{2} [2(V_{GS} - V_T) V_{DS} - V_{DS}^2] \quad (4)$$

**Nota:**  $k$  es la **transconductancia** de valor  $k = \mu C_{ox} \frac{W}{L}$  donde  $\mu$  es la movilidad de los portadores,  $C_{ox}$  la capacidad del óxido de puerta y  $W$  y  $L$  son la anchura y longitud del canal respectivamente.

# Modos de funcionamiento del n-MOSFET

## 1 Región de Corte:

- Ocurre si  $V_{GS} \leq V_T$
- El transistor está OFF porque no hay canal.
- No hay conducción entre drenador y fuente ( $I_D = 0$ ).
- $I_G = 0$ .
- Corriente de fuga.

## 2 Región lineal, óhmica o triodo:

- Ocurre si  $V_{GS} > V_T$  y  $V_{DS} < (V_{GS} - V_T)$ .
- El transistor está ON.
- $I_G = 0$ .
- Hay conducción entre drenador y fuente:

$$I_D = \frac{k}{2} [2(V_{GS} - V_T) V_{DS} - V_{DS}^2] \quad (5)$$

**Nota:**  $k$  es la **transconductancia** de valor  $k = \mu C_{ox} \frac{W}{L}$  donde  $\mu$  es la movilidad de los portadores,  $C_{ox}$  la capacidad del óxido de puerta y  $W$  y  $L$  son la anchura y longitud del canal respectivamente.

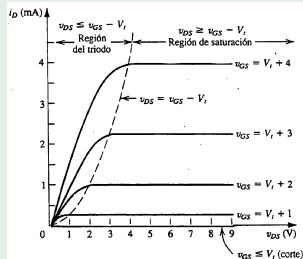
# Modos de funcionamiento del n-MOSFET

## 3 Región de saturación:

- Ocurre si  $V_{GS} > V_T$  y  $V_{DS} > (V_{GS} - V_T)$ .
- El transistor está ON.
- $I_G = 0$ .
- Hay conducción entre drenador y fuente:

$$I_D = \frac{k}{2} (V_{GS} - V_T)^2 \quad (6)$$

Curva  $I_D$ - $V_{DS}$  nMOSFET



# Modos de funcionamiento del p-MOSFET

## 1 Región de Corte:

- Ocurre si  $V_{GS} \geq V_T$  ( $|V_{GS}| \leq |V_T|$ )
- El transistor está OFF porque no hay canal.
- $I_G = 0$ .
- No hay conducción entre drenador y fuente ( $I_D = 0$ ).

## 2 Región lineal u óhmica:

- Ocurre si  $V_{GS} < V_T$  ( $|V_{GS}| > |V_T|$ ) y  $V_{SD} < (V_{SG} - |V_T|)$  ( $|V_{DS}| < (|V_{GS}| - |V_T|)$ ).
- El transistor está ON.
- $I_G = 0$ .
- Hay conducción entre drenador y fuente:

$$I_D = \frac{k}{2} [2 (V_{SG} - |V_T|) V_{SD} - V_{SD}^2] \quad (7)$$

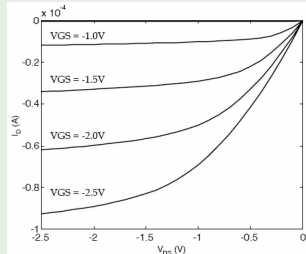
# Modos de funcionamiento del p-MOSFET

## 3 Región de saturación:

- Ocurre si  $V_{GS} < V_T$  ( $|V_{GS}| > |V_T|$ ) y  $V_{SD} > (V_{SG} - |V_T|)$  ( $|V_{DS}| > (|V_{GS}| - |V_T|)$ ).
- El transistor está ON.
- $I_G = 0$ .
- Hay conducción entre drenador y fuente:

$$I_D = \frac{k}{2} (V_{SG} - |V_T|)^2 \quad (8)$$

Curva I-V pMOSFET

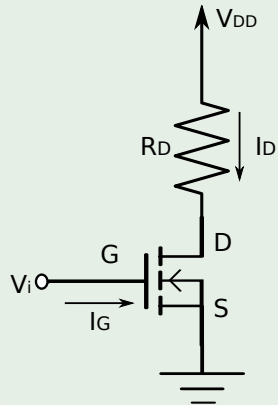


## Ejemplos de resolución de problemas con MOSFETs. I

Determinar la región de operación del transistor y calcular  $I_D$  para el circuito del Ejemplo 4

- $V_{DD} = 15V$
- $R_D = 1k\Omega$
- $V_i = 15V$
- $V_T = 2V$
- $k = 40 \cdot 10^{-6} \frac{A}{V^2}$

Ejemplo 4

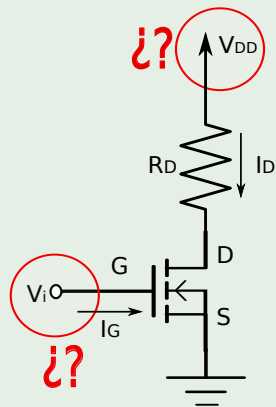


## Ejemplos de resolución de problemas con MOSFETs. I

Determinar la región de operación del transistor y calcular  $I_D$  para el circuito del Ejemplo 4

- $V_{DD} = 15V$
- $R_D = 1k\Omega$
- $V_i = 15V$
- $V_T = 2V$
- $k = 40 \cdot 10^{-6} \frac{A}{V^2}$

Ejemplo 4

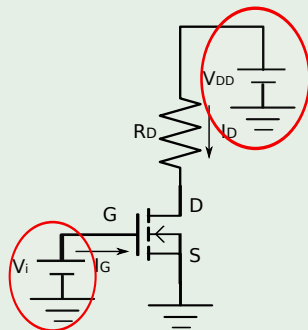


## Ejemplos de resolución de problemas con MOSFETs. I

Determinar la región de operación del transistor y calcular  $I_D$  para el circuito del Ejemplo 4

- $V_{DD} = 15V$
- $R_D = 1k\Omega$
- $V_i = 15V$
- $V_T = 2V$
- $k = 40 \cdot 10^{-6} \frac{A}{V^2}$

Ejemplo 4



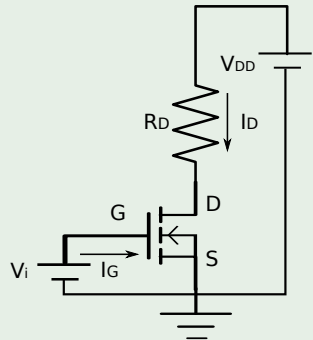


## Ejemplos de resolución de problemas con MOSFETs. I

Determinar la región de operación del transistor y calcular  $I_D$  para el circuito del Ejemplo 4

- $V_{DD} = 15V$
- $R_D = 1k\Omega$
- $V_i = 15V$
- $V_T = 2V$
- $k = 40 \cdot 10^{-6} \frac{A}{V^2}$

Ejemplo 4



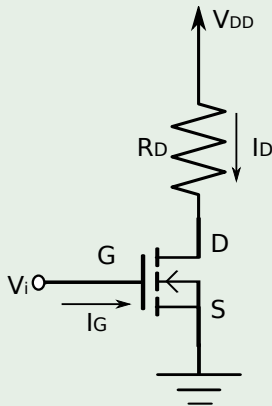
# Ejemplos de resolución de problemas con MOSFETs.

- ① Comenzamos calculando  $V_{GS}$  para saber si el transistor está conduciendo o no.

$$V_{GS} = V_G - V_S \Rightarrow \text{necesitamos } V_G \text{ y } V_S$$

- ¿Cuánto vale  $V_G$ ? A la puerta sólo tenemos conectada una fuente, de manera que  $V_G = V_i = 15V$ .
- ¿Cuánto vale  $V_S$ ? La fuente está conectada a tierra, por tanto  $V_S = 0V$ .
- Entonces  
 $V_{GS} - V_T = 15V - 2V = 13V > 0 \Rightarrow$   
**nMOSFET ON.**
- ¿Lineal o Saturación?

## Ejemplo 4



## Ejemplos de resolución de problemas con MOSFETs. I

2 Suponemos **saturación**.

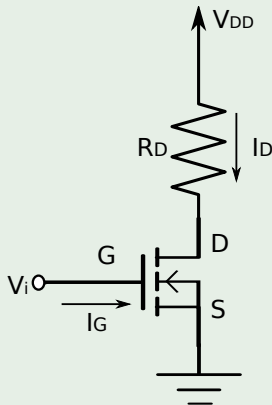
- Resolvemos usando la ecuación para la intensidad  $I_D$  en saturación:

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

$$I_D = \frac{40 \cdot 10^{-6} \frac{A}{V^2}}{2} (15V - 2V)^2$$

$$I_D = 3,38 \cdot 10^{-3} A$$

Ejemplo 4



## Ejemplos de resolución de problemas con MOSFETs. I

3 **Compruebo** si mi suposición es correcta.

- Para comprobar si la suposición que hice es correcta tengo que ver si se cumple la condición de saturación:

$$V_{DS} > (V_{GS} - V_T) = 15V - 2V = 13V$$

- ¿Cuánto vale  $V_{DS}$ ?

$V_{DS} = V_D - V_S \Rightarrow$  necesito saber  $V_D$ . Para calcular  $V_D$  aplico la ley de Ohm a la resistencia  $R_D$ :

$$V_{DD} - V_D = I_D R_D$$

$$V_D = V_{DD} - I_D R_D$$

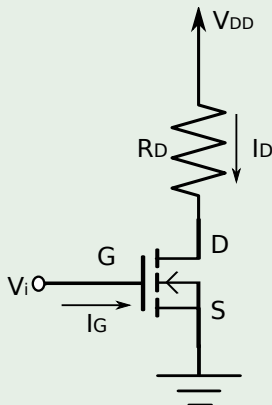
$$V_D = 15V - 3,38 \cdot 10^{-3} A \cdot 1k\Omega$$

$$V_D = 11,62V$$

$$V_{DS} = V_D - V_S = 11,62V - 0V = 11,62V$$

- Como  $V_{DS} = 11,62V < (V_{GS} - V_T) = 13V$   
**SUPOSICIÓN INCORRECTA** ☹

## Ejemplo 4



## Ejemplos de resolución de problemas con MOSFETs. I

4 Supongo **lineal**.

- Resolvemos utilizando la ecuación para  $I_D$  en la región lineal:

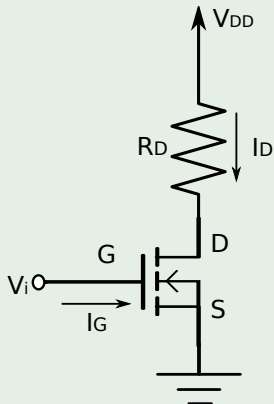
$$I_D = \frac{k}{2} \left[ 2(V_{GS} - V_T) V_{DS} - V_{DS}^2 \right]$$

$$I_D = \frac{40 \cdot 10^{-6} \frac{A}{V^2}}{2} \left[ 2(15V - 2V) V_{DS} - V_{DS}^2 \right]$$

- Para calcular  $I_D$  necesito  $V_{DS}$
- ¿Cuánto vale  $V_{DS}$ ?  
 $V_{DS} = V_D - V_S \Rightarrow$  necesito saber  $V_D$ . Para calcular  $V_D$  aplico la ley de Ohm a la resistencia  $R_D$ :

$$\begin{aligned} V_{DD} - V_D &= I_D R_D \\ V_D &= 15V - I_D 10^3 \Omega \end{aligned}$$

## Ejemplo 4



## Ejemplos de resolución de problemas con MOSFETs. I

4 Supongo **lineal**.

- Sustituyendo la expresión de  $I_D$  en la fórmula para  $V_D$  queda:

$$V_D = 15V - \frac{40 \cdot 10^{-6} \frac{A}{V^2}}{2} \left[ 2(15V - 2V) V_D - V_D^2 \right] 10^3 \Omega$$

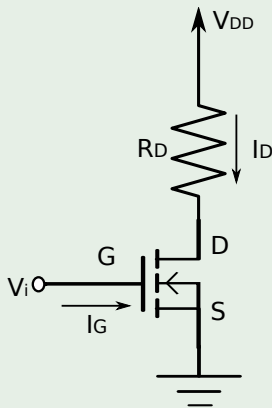
- La ecuación anterior tiene dos soluciones:

$$V_{DS1} = 64,33V$$

$$V_{DS2} = 11,68V$$

- ¿Son las dos soluciones correctas? Una solución será correcta si está de acuerdo con mi suposición. En este caso, si cumple que  $V_{DS} < V_{GS} - V_T = 13V$ . Por tanto, sólo  $V_{DS2}$  es correcta.

Ejemplo 4

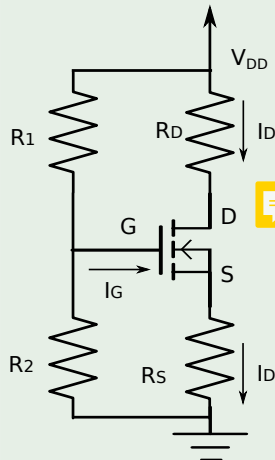


## Ejemplos de resolución de problemas con MOSFETs. II

Determinar la región de operación del transistor y calcular  $I_D$  para el circuito del Ejemplo 5

- $V_{DD} = 15V$
- $R_D = 40k\Omega$
- $R_S = 5k\Omega$
- $R_1 = 150k\Omega$
- $R_2 = 100k\Omega$
- $V_T = 2V$
- $k = 40 \cdot 10^{-6} \frac{A}{V^2}$

Ejemplo 5



## Ejemplos de resolución de problemas con MOSFETs. II

- 1 Comenzamos calculando  $V_G$  para saber si el MOSFET conduce o no. Para ello, tenemos en cuenta que:

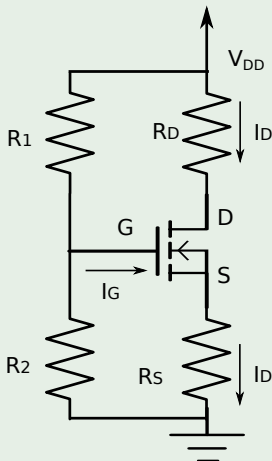
- $I_G = 0$
- La parte de la izquierda del circuito es un divisor de tensión:

$$I_1 = \frac{15V}{150k\Omega + 100k\Omega}$$

$$V_G = I_1 100k\Omega = \frac{15V}{250k\Omega} 100k\Omega = 6V$$

- Como  $V_G - V_T > 0 \Rightarrow$  **nMOSFET ON**
- ¿Pero no era  $V_{GS}$ ? ¿Por qué uso  $V_G$ ?
- ¿Lineal o Saturación?

## Ejemplo 5





## Ejemplos de resolución de problemas con MOSFETs. II

2 Suponemos saturación:

- Ecuaciones generales:

$$\begin{aligned} V_{DD} &= I_D R_D + V_{DS} + I_D R_S \\ V_G &= V_{GS} + I_D R_S \end{aligned}$$

- Saturación:  $I_D = \frac{k}{2} (V_{GS} - V_T)^2$
- Sustituimos:

$$15V = I_D 45k\Omega + V_{DS} \quad (9)$$

$$6V = V_{GS} + I_D 5k\Omega \quad (10)$$

$$I_D = 20 \cdot 10^{-6} \frac{A}{V^2} (V_{GS}^2 + 4 - 4V_{GS}) \quad (11)$$

- Despejando e igualando:

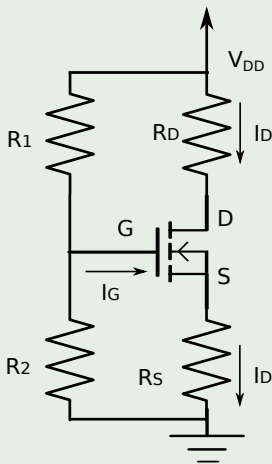
$$\frac{6 - V_{GS}}{R_S} = 20 \cdot 10^{-6} (V_{GS}^2 + 4 - 4V_{GS})$$

$$V_{GS}^2 + 6V_{GS} - 56 = 0$$

$$V_{GS1} = 5,06V \Rightarrow I_D = 0,18mA \Rightarrow V_{DS} = 6,54V$$

$$V_{GS2} < 0 \Rightarrow \text{IMPOSIBLE}$$

## Ejemplo 5



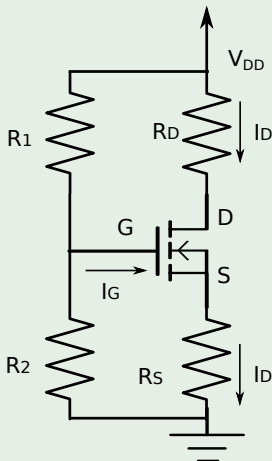
## Ejemplos de resolución de problemas con MOSFETs. II

3 Comprobamos que la suposición es correcta:

- ¿ $V_{DS} > V_{GS} - V_T$ ?
- $6,54V > 5,06V - 2V = 3,06V \Rightarrow$

**SUPOSICIÓN CORRECTA 😊**

Ejemplo 5

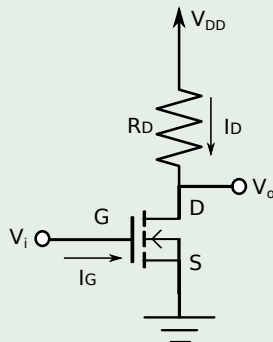


## Ejemplos de resolución de problemas con MOSFETs. III

Pintar la característica de transferencia para el circuito del Ejemplo 6

- $V_{DD} = 15V$
- $R_D = 0,1k\Omega$
- $V_T = 2V$
- $k = 40 \cdot 10^{-3} \frac{A}{V^2}$

Ejemplo 6

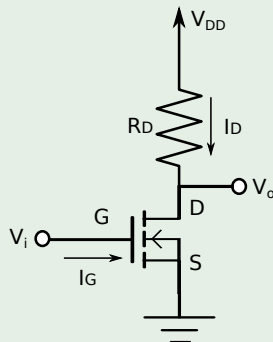


## Ejemplos de resolución de problemas con MOSFETs. III

## Ecuaciones generales

- $V_{DD} = I_D R_D + V_{DS}$
- $V_{GS} = V_i$
- $V_{DS} = V_o \Rightarrow V_{DD} = I_D R_D + V_o$

## Ejemplo 6



## Ejemplos de resolución de problemas con MOSFETs. III

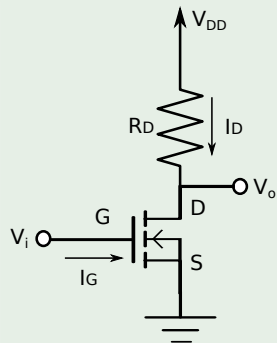
## Corte

$$V_{GS} < V_T \Rightarrow V_i < 2V$$

$$I_D = 0 \Rightarrow V_{DD} = 0 \cdot R_D + V_o$$

$$V_{DD} = V_o \Rightarrow V_o = 15V$$

## Ejemplo 6



## Ejemplos de resolución de problemas con MOSFETs. III

## Saturación

$$V_{GS} > V_T \Rightarrow V_i > 2V$$

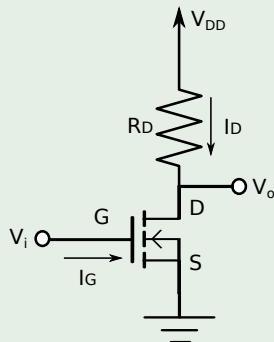
$$V_{DS} > V_{GS} - V_T \Rightarrow V_o > V_i - 2V$$

$$I_D = \frac{k}{2} (V_{GS} - V_T)^2 \Rightarrow I_D = \frac{k}{2} (V_i - 2V)^2$$

$$V_{DD} = I_D R_D + V_o$$

$$V_o = 15V - 2(V_i - 2V)^2$$

## Ejemplo 6



## Ejemplos de resolución de problemas con MOSFETs. III

## Lineal

$$V_{GS} > V_T \Rightarrow V_i > 2V$$

$$V_{DS} < V_{GS} - V_T \Rightarrow V_o < V_i - 2V$$

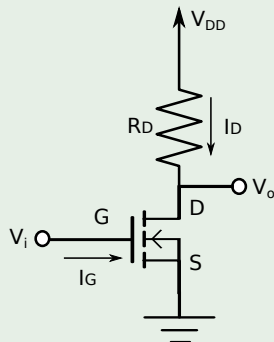
$$I_D = \frac{k}{2} [2(V_i - 2V)V_o - V_o^2]$$

$$V_{DD} = I_D R_D + V_o$$

$$V_o = \frac{(4V_i - 7) \pm \sqrt{(4V_i - 7)^2 - 120}}{4}$$

Para  $V_i$  grandes,  $V_o \rightarrow 0V$

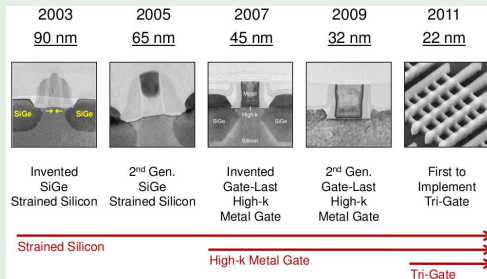
## Ejemplo 6



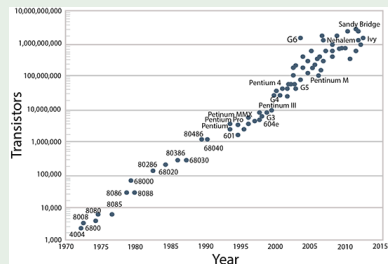
# Transistores en la industria

- Escalado de los MOSFETs.

## Escalado



## Ley de Moore



- ¿Por qué es interesante el escalado? Reducción de la velocidad de los circuitos integrados debida a la disminución de la capacidad del MOSFET  $\Rightarrow$  Mismas prestaciones en menor espacio o mayores prestaciones en el mismo espacio.
- Ley de Moore. (¿Límite entre 3nm-0.3nm?)



# Transistores en la industria

- **Evolución:** 10  $\mu\text{m}$  en 1971 (Intel 4004), 3  $\mu\text{m}$  en 1975 (Intel 8085), 1.5  $\mu\text{m}$  en 1982 (Intel 80286), 1  $\mu\text{m}$  en 1985 (Intel 80386)...., 65 nm en 2006 (Intel Pentium 4, Pentium D, Celeron, Core, Core 2, Xeon, AMD Athlon 64, Turion 64 X2, Phenom, Xbox 360 con Falcon, Opus, Jasper CPUs), 45 nm en 2008 (Intel Core i7 y i5 750, AMD Deneb, Shanghai ..., Xenon en Xbox 360S, PlayStation 3 Slim,...), 32 nm en 2010 (Intel Core i3 y i5 Arrandale y Clarkdale, i7 980x, ..), 22 nm en 2011 (Intel Ivy Bridge (2011), Intel Haswell (2013)), 14 nm en 2014-2015 (Intel Core M), 10 nm en 2016-2017
- **Problemas:** en el control de la fabricación, en el control de las características de los dispositivos, problemas de modelado, aumenta la conducción subumbral, aumentan las fugas entre óxido y puerta, aumento del calor (problemas de disipación),...
- **Soluciones:** dispositivos multipuerta, strain, nuevos materiales, high K, etc...

