

Fundamentos Físicos y Tecnológicos

Tema 4. Dispositivos Semiconductores

J.L. Padilla

Departamento de Electrónica y Tecnología de Computadores
Universidad de Granada

jluispt@ugr.es

Curso 2018-2019

- 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 de forma sencilla añadiendo impurezas.
- Los semiconductores pueden ser excelentes sensores ya que su conductividad puede controlarse por distintos mecanismos (campos eléctricos o 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	 John Dalton	Durante el s.XVIII y principios del XIX algunos científicos habían investigado distintos aspectos de las reacciones químicas, obteniendo las llamadas leyes clásicas de la Química . 	La imagen del átomo expuesta por Dalton en su teoría atómica , para explicar estas leyes, es la de minúsculas partículas esféricas, indivisibles e inmutables, iguales entre sí en cada elemento químico. 
1897	 J.J. Thomson	Demostó que dentro de los átomos hay unas partículas diminutas, con carga eléctrica negativa, a las que se llamó electrones . 	De este descubrimiento dedujo que el átomo debía de ser una esfera de materia cargada positivamente, en cuyo interior estaban incrustados los electrones. (Modelo atómico de Thomson.) 
1911	 E. Rutherford	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 núcleo . 	Dedujo que el átomo debía estar formado por una corteza con los electrones girando alrededor de un núcleo central cargado positivamente. (Modelo atómico de Rutherford.) 
1913	 Niels Bohr	Espectros atómicos 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. (Modelo atómico de Bohr.) 

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

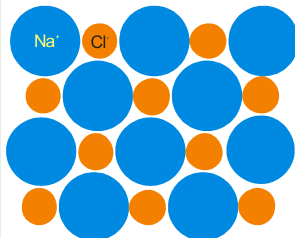
$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi(r, t) + V(r) \Psi(r, t) = E \Psi(r, t) \quad (2)$$

- 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**.

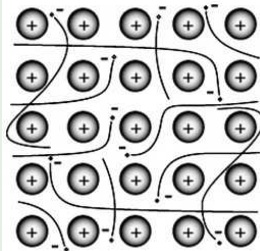
Ejemplo: ClNa



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

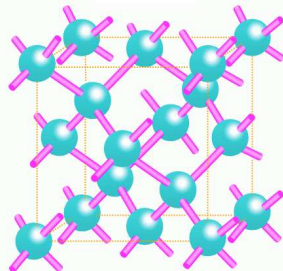


Enlaces Covalentes

- 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

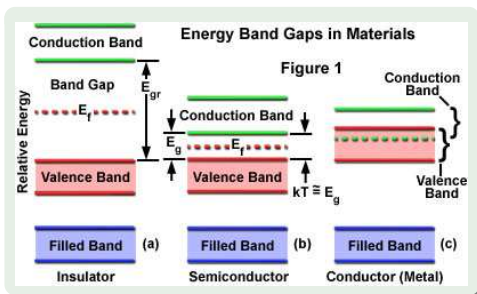


Cuando una serie de átomos se unen para formar un sólido los niveles de energía de los átomos individuales forman bandas continuas de energía.



Clasificación de materiales

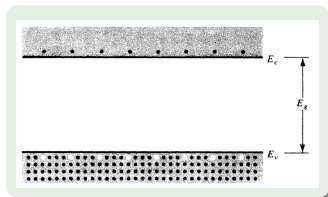
- 1 Aislantes
- 2 Semiconductores
- 3 Conductores



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

Portadores: electrones y huecos

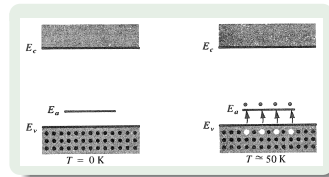
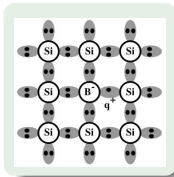
- Al aumentar T , se rompen algunos enlaces liberándose electrones que pueden moverse bajo la acción de un campo eléctrico \Rightarrow **Formación de par electrón-hueco.**



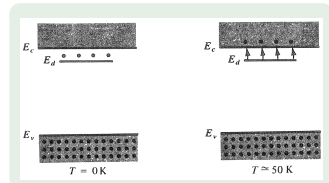
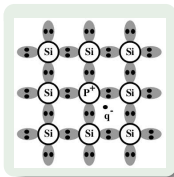
- Los huecos también participan en el proceso de conducción: $\sigma = qn\mu_n + qp\mu_p$. (σ es la conductividad, n es la concentración de electrones, p la de huecos y μ_n y μ_p las movilidades de electrones y huecos.)
- En general, un semiconductor tiene pocos portadores libres por eso su conductividad 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)

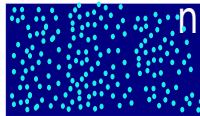
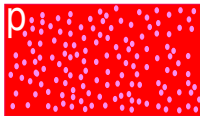


- 1 Introducción
- 2 Modelo atómico
- 3 Materiales sólidos
- 4 Semiconductores
- 5 La unión PN**
- 6 El Transistor MOSFET

Unión PN



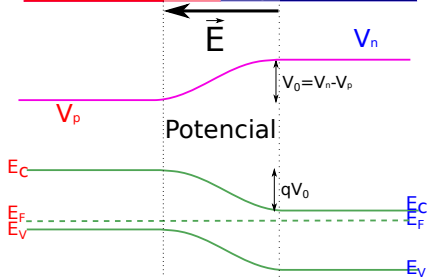
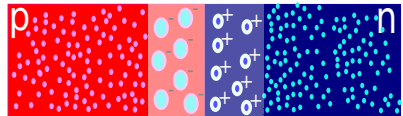
Unión PN



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



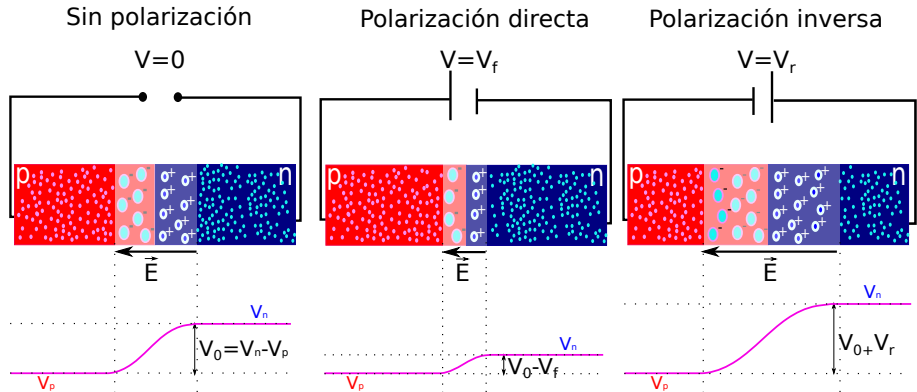
Estructura de Bandas



Estructura de Bandas

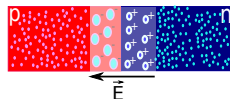
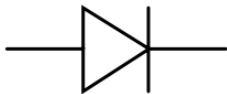
Unión PN

¿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:

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

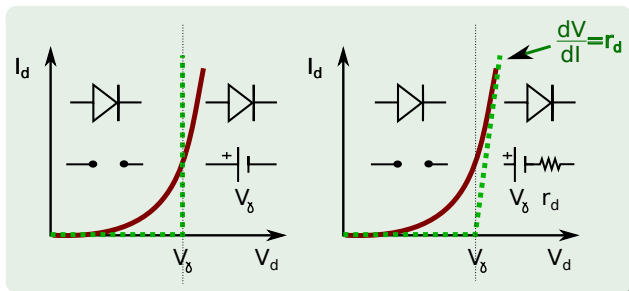
donde I_d es la intensidad que atraviesa el diodo, I_S es la corriente inversa de saturación, q es la carga del electrón, V_d la diferencia de potencial entre los extremos del diodo, k_B la constante de Boltzmann y T la temperatura.

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

El Diodo

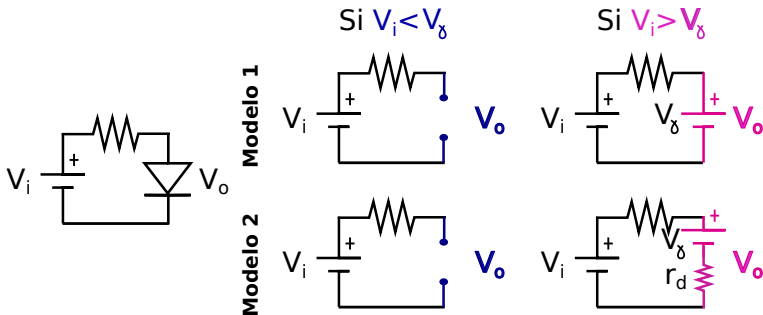
¿Cómo se trabaja en un circuito con diodos? Hay que hacer aproximaciones.

- Modelo 1.** Suponemos que hay una tensión a partir de la cual el diodo conduce (V_γ) 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_γ
- Modelo 2.** Suponemos que hay una tensión a partir de la cual el diodo conduce (V_γ) 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_δ en serie con esa resistencia.



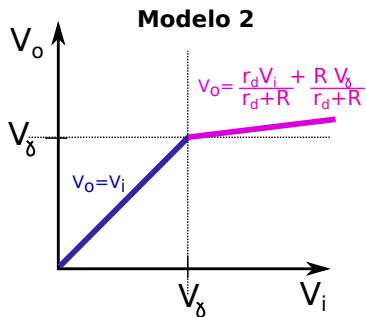
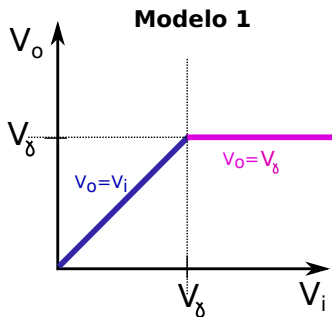
El Diodo

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

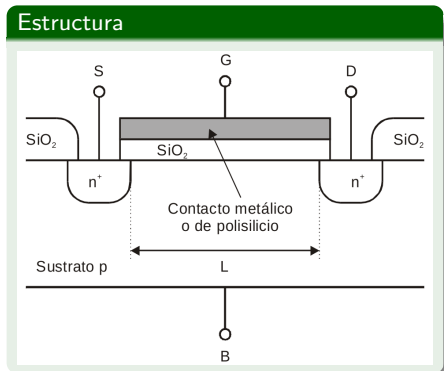
Característica de transferencia: es la representación de la salida de un circuito en función de la entrada. (**No** confundir con función de transferencia)



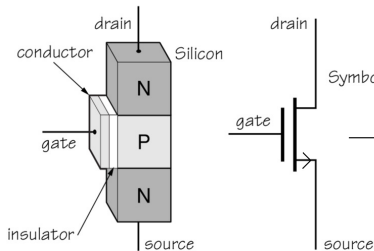
- 1 Introducción
- 2 Modelo atómico
- 3 Materiales sólidos
- 4 Semiconductores
- 5 La unión PN
- 6 El Transistor MOSFET**

El transistor de efecto campo

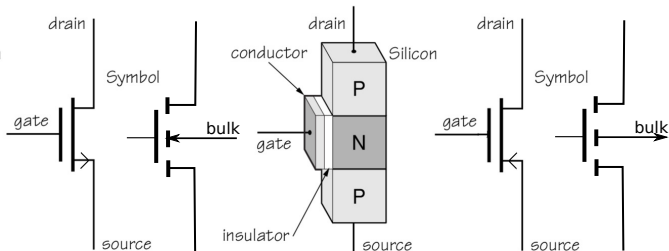
- Es un dispositivo electrónico de tres terminales llamados puerta (G, *gate*), drenador (D, *drain*) y fuente (S, *source*).
- La corriente fluye entre la fuente y el drenador y se controla con la tensión aplicada en la puerta.
- Sus aplicaciones fundamentales son:
 - 1 Digitales: conmutadores.
 - 2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



Tipos de MOSFET



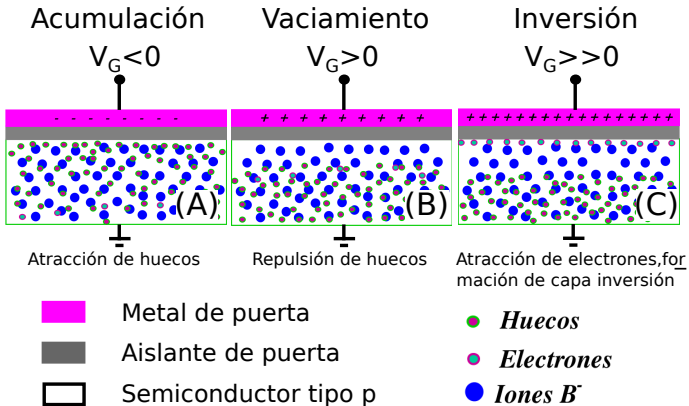
(a) NMOS Field-Effect Transistor



(b) PMOS Field-Effect Transistor

Flujo de portadores en el MOSFET

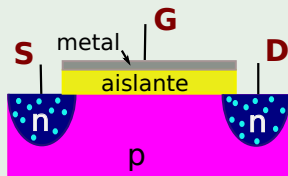
- La unión Metal-Aislante-Semiconductor (MIS) se comporta como un condensador:



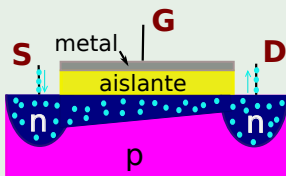
Modos de funcionamiento del n-MOSFET

- 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.

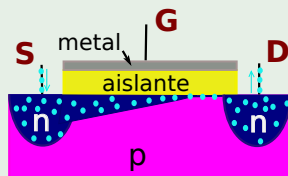
CORTE



LINEAL



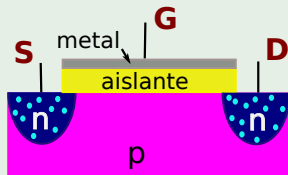
SATURACIÓN



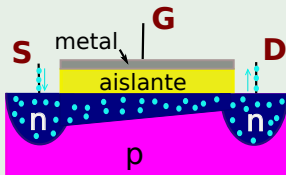
Modos de funcionamiento del n-MOSFET: corte

- **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 inversion 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 inversion en D.
- Como no hay capa de inversión ni en S ni en D, no hay canal entre ellos.

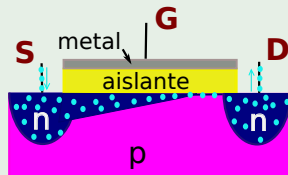
CORTE



LINEAL



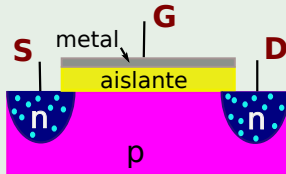
SATURACIÓN



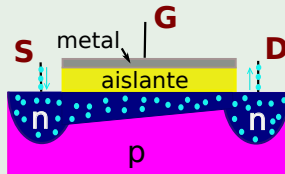
Modos de funcionamiento del n-MOSFET: lineal

- **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.

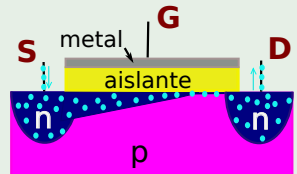
CORTE



LINEAL



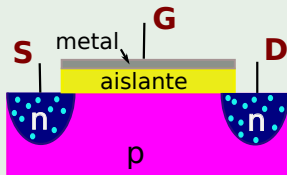
SATURACIÓN



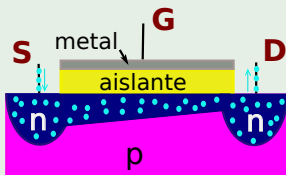
Modos de funcionamiento del n-MOSFET: saturación

- **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.

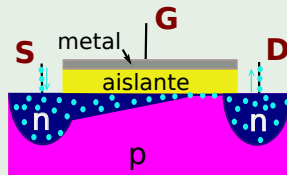
CORTE



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 μ 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 μ 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.

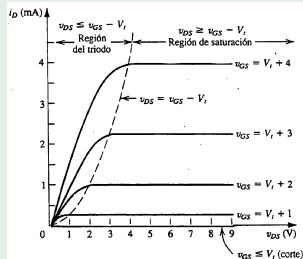
Modos de funcionamiento del n-MOSFET

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:

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

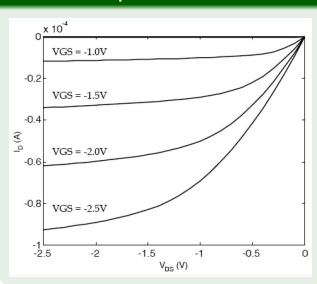
Modos de funcionamiento del p-MOSFET

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

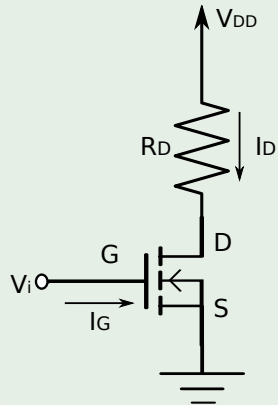


Ejemplos de resolución de problemas con MOSFETs. I

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

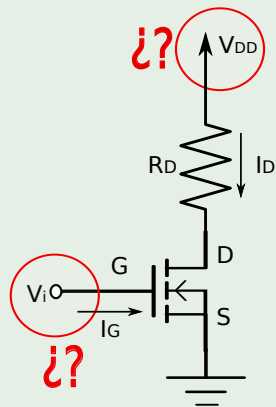


Ejemplos de resolución de problemas con MOSFETs. I

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

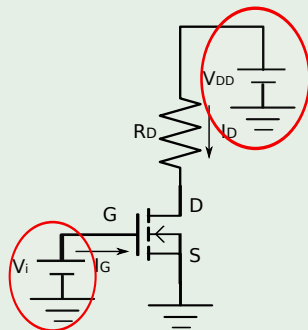


Ejemplos de resolución de problemas con MOSFETs. I

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

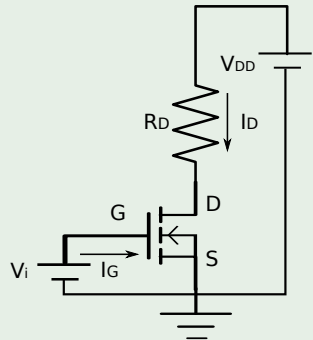


Ejemplos de resolución de problemas con MOSFETs. I

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



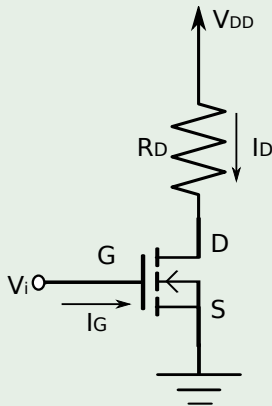
Ejemplos de resolución de problemas con MOSFETs.

- 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**.

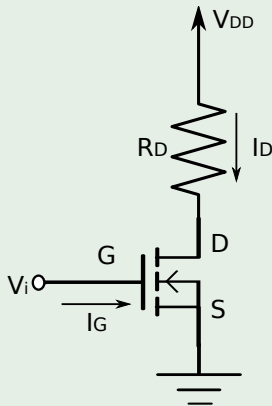
- Resolvemos usando la ecuación para la intensidad I_D en saturación:

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

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

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

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 :

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

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

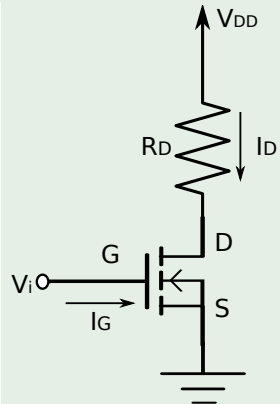
$$V_D = 15V - 3,38 \cdot 10^{-3} A \cdot 1k\Omega$$

$$V_D = 11,62V$$

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

- 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:

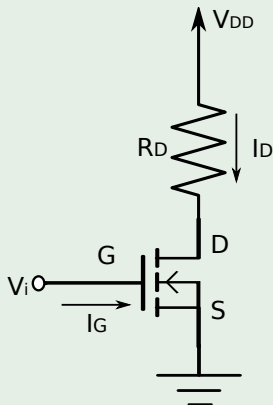
$$I_D = \frac{k}{2} \left[2(V_{GS} - V_T) V_{DS} - V_{DS}^2 \right]$$

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

- 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:

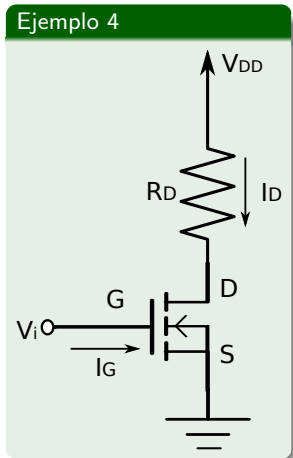
$$V_D = 15V - \frac{40 \cdot 10^{-6} \frac{A}{V^2}}{2} \left[2(15V - 2V) V_D - V_D^2 \right] 10^3 \Omega$$

- 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.

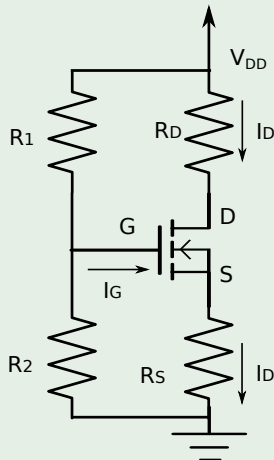


Ejemplos de resolución de problemas con MOSFETs. II

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:

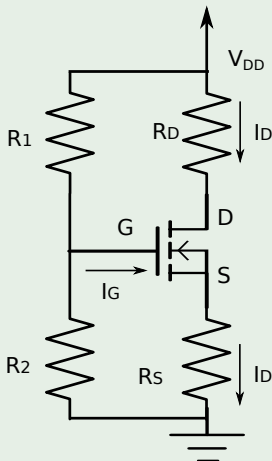
- $I_G = 0$
- La parte de la izquierda del circuito es un divisor de tensión:

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

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

- 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:

$$V_{DD} = I_D R_D + V_{DS} + I_D R_S$$

$$V_G = V_{GS} + I_D R_S$$

- 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:

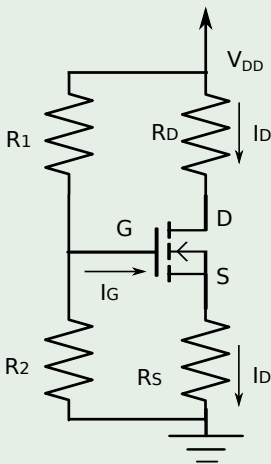
$$\frac{6 - V_{GS}}{R_S} = 20 \cdot 10^{-6} (V_{GS}^2 + 4 - 4V_{GS})$$

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

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

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

Ejemplo 5



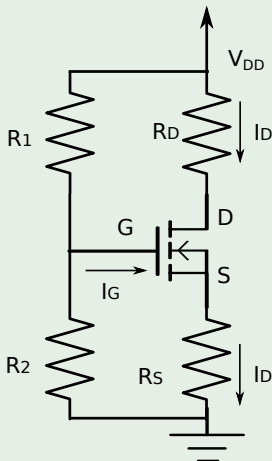
Ejemplos de resolución de problemas con MOSFETs. II

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

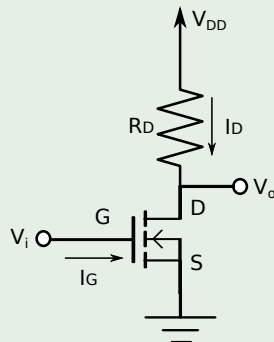


Ejemplos de resolución de problemas con MOSFETs. III

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

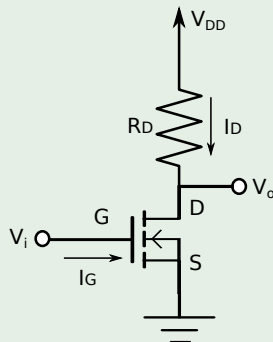


Ejemplos de resolución de problemas con MOSFETs. III

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

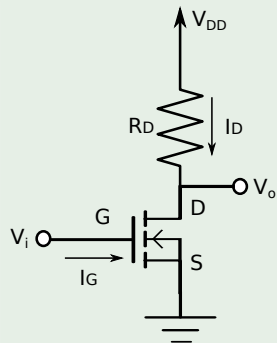
Corte

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

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

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

Ejemplo 6



Ejemplos de resolución de problemas con MOSFETs. III

Saturación

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

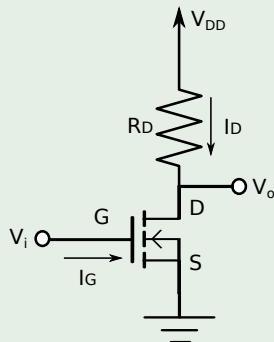
$$V_{DS} > V_{GS} - V_T \Rightarrow V_o > V_i - 2V$$

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

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

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

Ejemplo 6



Ejemplos de resolución de problemas con MOSFETs. III

Lineal

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

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

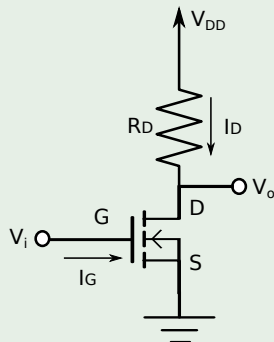
$$I_D = \frac{k}{2} [2(V_i - 2V)V_o - V_o^2]$$

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

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

Para V_i grandes, $V_o \rightarrow 0V$

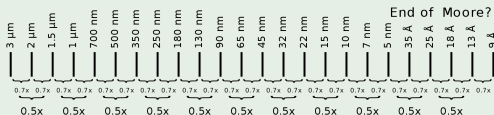
Ejemplo 6



Transistores en la industria

- Escalado de los MOSFETs.

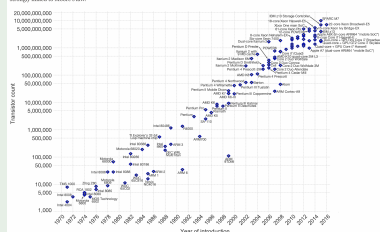
Escalado



Ley de Moore

Moore's Law – The number of transistors on integrated circuit chips (1971-2016)

Moore's law describes the empirical regularity that the number of transistors on integrated circuit dies doubles approximately every two years. This advancement is important in other aspects of technological progress – such as processing speed or the price of electronic products – and is strongly linked to Moore's Law.



Data source: Wikipedia (https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor_count)
The data visualization is available at OurWorldInData.org. There you find more visualizations and research on this topic.
Licensed under CC-BY-SA by the author Max Roser

- ¿Por qué es interesante el escalado? 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 μm en 1971 (Intel 4004), 3 μm en 1976 (Intel 8085), 1.5 μm en 1982 (Intel 80286), 1 μm 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...), 32 nm en 2010 (Intel Core i3 y i5 Arrandale y Clarkdale, i7 980x, ..), 22 nm en 2012 (Intel i7 Ivy Bridge (2012), Intel i7 Haswell (2014)), 14 nm en 2014 (Intel i7 Skylake (2015), Intel i7 Broadwell (2015)), 10 nm en 2016 (Apple A11 Bionic (2017)), 7 nm en 2018 (Apple A12 (2018)).
- **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...

