

Tema 4. Unión Metal-Aislante-Semiconductor

Componentes y Circuitos Electrónicos

Grado en Ingeniería en Tecnologías de Telecomunicación



Francisco Jiménez Molinos, Carlos Sampedro Matarín

Departamento de Electrónica y Tecnología de Computadores
Universidad de Granada



CONTENIDOS

- 1 Introducción
- 2 Estructura MIS en equilibrio térmico
- 3 Estructura MIS polarizada
- 4 Capacidad de una estructura MIS
- 5 Tensión umbral



Introducción

Unión Metal Semiconductor

- Las uniones metal-semiconductor se utilizan para:
 - Obtener uniones rectificadoras (diodos)
 - Obtener contactos óhmicos (no rectificadores). Conexión de dispositivos semiconductores con metales.
- Diagramas de bandas diferentes. Se usa como referencia común E_0 para comparar la posición del nivel de Fermi en ambos materiales.
- Definición de funciones trabajo:

$$q\phi_m = E_0 - E_{Fm} \qquad q\phi_s = E_0 - E_{Fs}$$

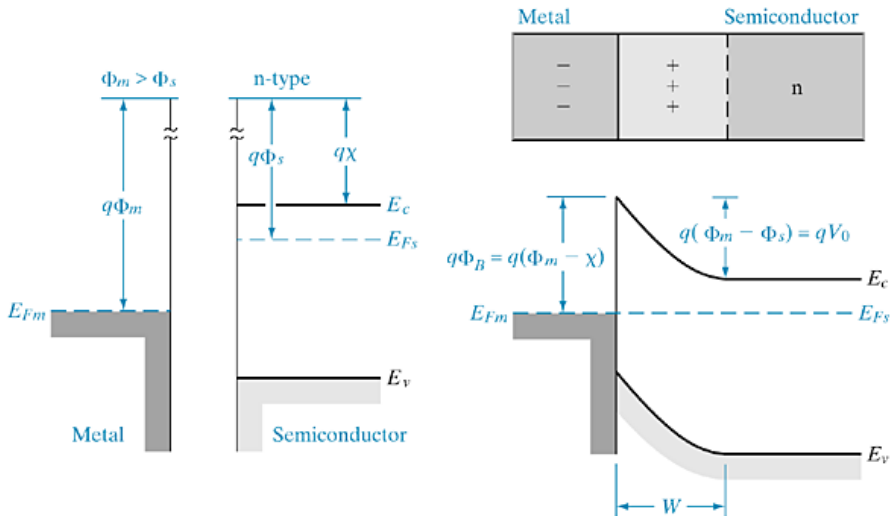
- Definición de afinidad electrónica:

$$q\chi_s = E_0 - E_c$$



Introducción

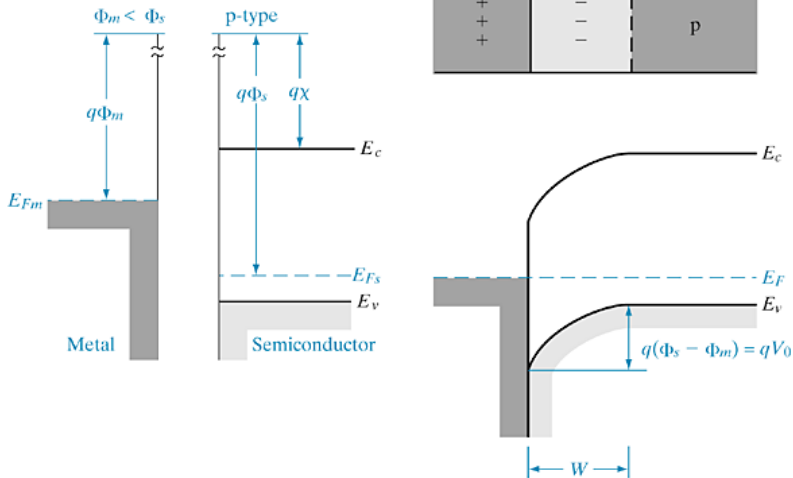
Unión Metal Semiconductor tipo N





Introducción

Unión Metal Semiconductor tipo P





Introducción

Unión Metal Semiconductor. Unión rectificadora

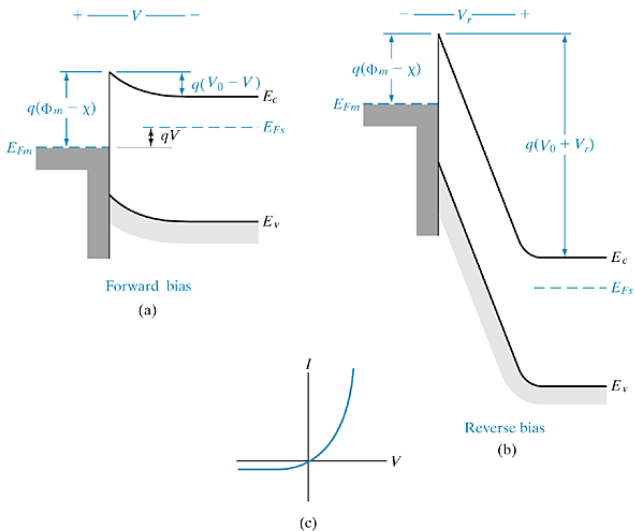
- Se forman dos barreras de potencial
 - BC semiconductor y el metal de valor $\phi_m - \phi_s$
 - E_{Fm} del metal y la BC del Semiconductor de valor $\phi_m - \chi_s$
- Si se aplica una tensión positiva en el metal respecto del semiconductor, se reduce la barrera y pueden circular electrones para $\phi_m > \phi_s$
- Si se aplica en sentido contrario, aumentan las barreras de potencial y se bloquea el paso de electrones (no circula corriente).
- Se obtiene una característica I-V similar a la de una unión PN.
- El mismo comportamiento se obtiene con un semiconductor tipo P si $\phi_m < \phi_s$.
- En ambos casos, hay deplexión del semiconductor

$$I_0 \propto e^{-q\Phi_B/kT} \quad (1)$$



Introducción

Unión Metal Semiconductor. Unión rectificadora

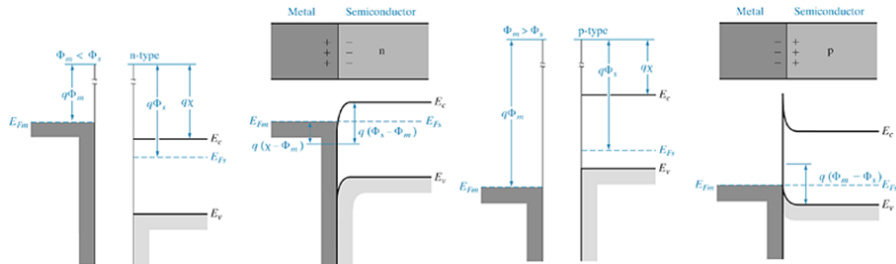




Introducción

Unión Metal Semiconductor. Contacto Óhmico

- Con el SC en acumulación las barreras son pequeñas
 - $\phi_m < \phi_s$ para semiconductores N
 - $\phi_m > \phi_s$ para semiconductores P
- Los electrones no encuentran prácticamente dificultad para pasar de un lado al otro tanto con polarización positiva como negativa.
- Por tanto, esta unión es no rectificadora (contacto óhmico)
- Se consiguen contactos óhmicos con un SC muy dopado que tiene una zona de deplexión delgada \Rightarrow corriente en inversa túnel.

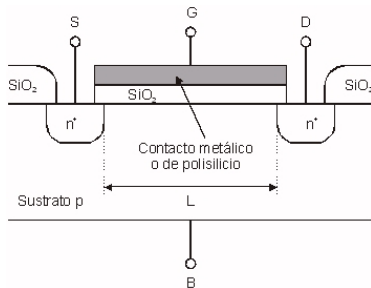




Introducción

Transistores MOSFET

- Los transistores de efecto campo (FET) son dispositivos electrónicos con, al menos, tres terminales, llamados puerta (G, gate), drenador (D, drain) y fuente.(S, source)
- La corriente que fluye entre la fuente y el drenador se controla con la tensión aplicada en la puerta.
- MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)
- En (B, bulk) se establece una tensión fija de referencia.





CONTENIDOS

- 1 Introducción
- 2 Estructura MIS en equilibrio térmico
- 3 Estructura MIS polarizada
- 4 Capacidad de una estructura MIS
- 5 Tensión umbral



Estructura MIS en equilibrio térmico

Introducción

- Si hacemos un corte transversal debajo del terminal de puerta se tiene una estructura MIS (Metal Insulator Semiconductor)
- Se puede considerar equivalente a un condensador de láminas plano-paralelas
- Debido al aislante, en dicha estructura no circula corriente
- Vamos a calcular la dependencia entre la carga almacenada y la tensión aplicada entre puerta y sustrato
- Para ello nos fijaremos en la estructura de bandas de la unión en diferentes casos

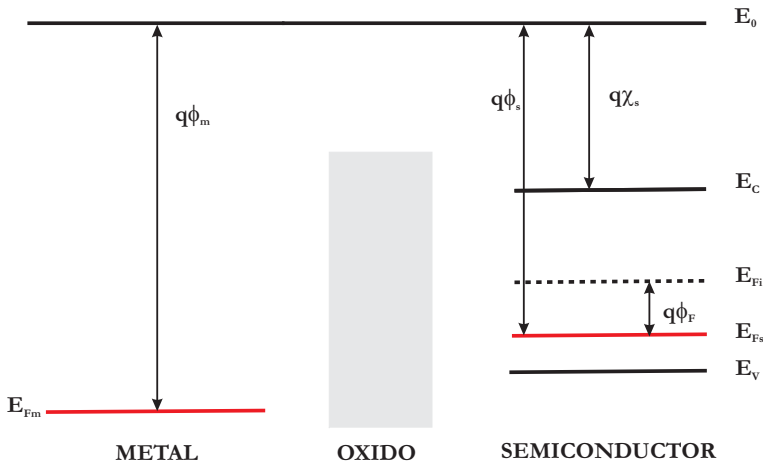


Estructura MIS en equilibrio térmico

Materiales por separado

Ejemplo:

Semiconductor P y función trabajo menor que la del metal ($E_{Fs} > E_{Fm}$)

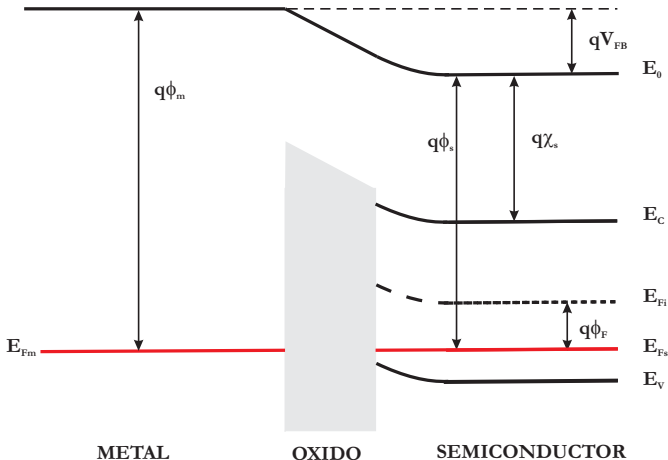




Estructura MIS en equilibrio térmico

Diagrama de bandas de la unión

- En esta situación se dice que el semiconductor está en acumulación, pues tiene más portadores mayoritarios que cuando está aislado.





CONTENIDOS

- 1 Introducción
- 2 Estructura MIS en equilibrio térmico
- 3 Estructura MIS polarizada**
- 4 Capacidad de una estructura MIS
- 5 Tensión umbral



Estructura MIS polarizada

Acumulación

- Vamos a estudiar el comportamiento de la estructura MIS al aplicar una tensión en la puerta respecto del sustrato
- Seguiremos suponiendo sustrato P y $\phi_m > \phi_s$
- Al no haber corriente, se puede seguir hablando de niveles de Fermi (por tanto, constantes) a cada lado del aislante
- Al aplicar una tensión a la puerta, éstos se separan en un valor qV_G , produciéndose la variación dentro del óxido (zona sin carga) ya que la corriente es nula.

Acumulación

- Si se aplica una tensión V_G negativa, se atraen más huecos en el semiconductor hacia la superficie de separación con el óxido
- La misma carga negativa se formará en el lado del metal
- La situación es parecida a la de equilibrio térmico pero concentraciones mayores de portadores mayoritarios



Estructura MIS polarizada

Tensión de Banda Plana

- Supongamos que aplicamos una tensión V_G positiva
- Los huecos se alejan de la interfaz silicio-aislante, disminuyendo su número.
- Si esta tensión es suficiente, se pueden alejar todos los huecos, llegándose a una situación sin exceso de huecos.
- Se denomina tensión de banda-plana a la tensión necesaria para lograr esto

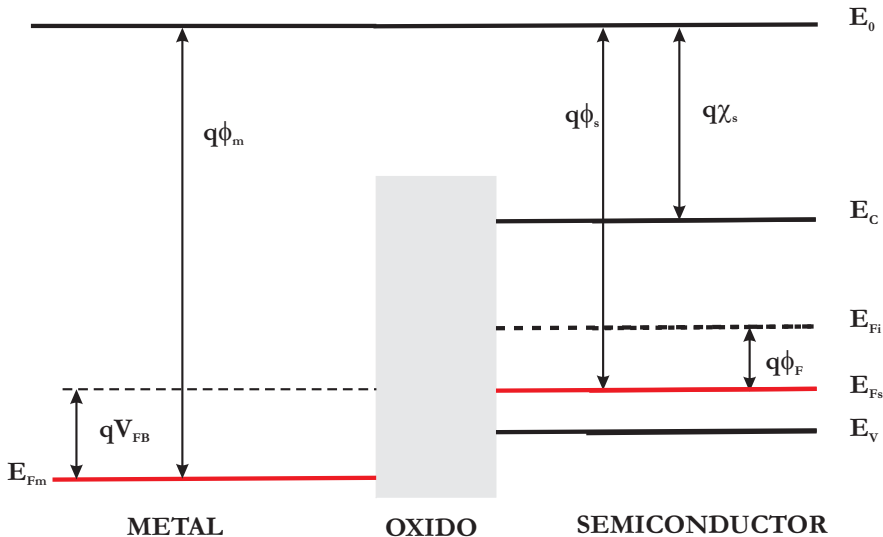
$$V_{FB} = \frac{1}{q}(\phi_m - \phi_s) \quad (2)$$

- Obsérvese que la tensión de banda plana proporciona la energía suficiente para volver al diagrama de bandas correspondiente a la situación en la que los materiales están separados



Estructura MIS polarizada

Tensión de Banda Plana





Estructura MIS polarizada

Tensión de Banda Plana

- La tensión de banda plana podría verse alterada si existiesen cargas atrapadas en el interior del óxido.
- Normalmente estas cargas están en la interfaz entre el semiconductor y el aislante y modifican la tensión de banda plana según la siguiente expresión:

$$V_{FB} = \phi_m - \phi_s \mp \frac{qN_{ox}}{C_{ox}}$$

- N_{ox} es la concentración de carga atrapada por unidad de área
- C_{ox} es la capacidad del óxido, también por unidad de área
- El signo - se usa si la carga es positiva y el signo + si es negativa.



Estructura MIS polarizada

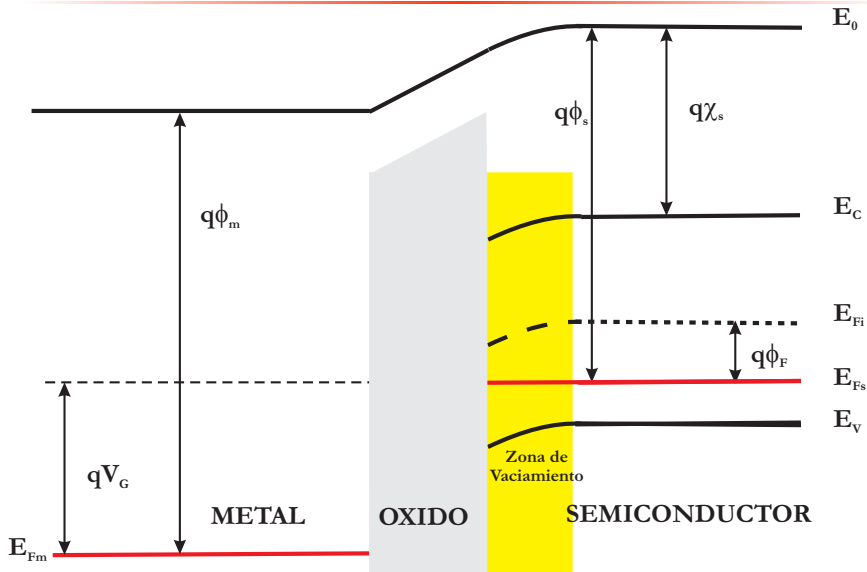
Vaciamiento o deplexión

- Si se sigue aumentando la tensión de puerta y se supera la tensión de banda plana
 - Se siguen repeliendo huecos disminuyendo su concentración cerca de la interfaz
 - Puede suceder que sea incluso menor que la concentración correspondiente al semiconductor aislado (N_A)
 - Por otro lado, en el lado del metal aparecerá una densidad de carga positiva.
- El nombre de vaciamiento o deplexión viene por el hecho de no haber portadores
- Las cargas negativas en el lado del semiconductor las proporcionan las impurezas aceptadoras ionizadas
- La curvatura de las bandas se denomina potencial de superficie y se expresa como $q\Psi_s$.



Estructura MIS polarizada

Vaciamiento o depleción





Estructura MIS polarizada

Inversión

- Al seguir aumentando la tensión de puerta se producen dos efectos
 - Se siguen repeliendo huecos
 - Se atraen electrones
- De este modo, la carga negativa la proporcionan los electrones (móviles y ubicados, por tanto, junto a la interfaz con el óxido) y las impurezas ionizadas (fijas)
- La curvatura de las bandas es mayor.
- La condición que separa las regiones de depleción y de inversión es que la curvatura de las bandas sea:

$$q\Psi_s = 2q\phi_F \quad (3)$$

donde ϕ_F es el potencial de Fermi del semiconductor aislado ($q\phi_F = (E_{Fi}(\infty) - E_F)$).

- La concentración de electrones en la interfaz con el óxido es la misma que de huecos en el semiconductor neutro.

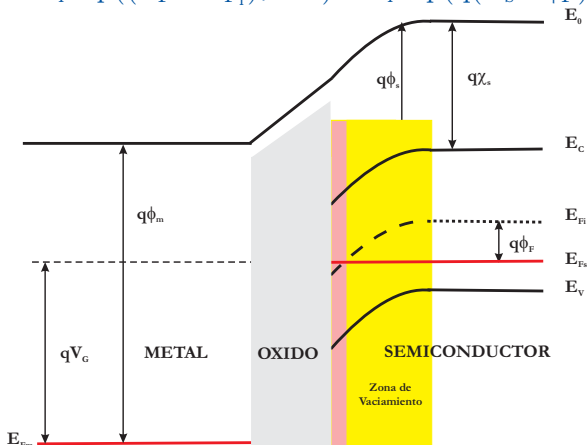


Estructura MIS polarizada

Inversión

- Inversión: en la proximidad del óxido el semiconductor tiene alta concentración de los minoritarios correspondientes al sustrato.

$$n = n_i \exp((E_F - E_{Fi})/KT) = n_i \exp(q(\Psi_s - \phi_F)/KT)$$





Estructura MIS polarizada

RESUMEN

- Obsérvese que la estructura MIS es básicamente una capacidad
- Esta capacidad tiene carga almacenada cuando $V_G = 0$. La carga almacenada es nula cuando $V_G = V_{FB}$
- Pueden darse cuatro casos:

Semiconductor	Funciones trabajo	Con $V_G = 0 \dots$	V_{FB}
Tipo P	$\phi_m > \phi_s$	Acumulación	> 0
Tipo P	$\phi_m < \phi_s$	Depleción ó inver.	< 0
Tipo N	$\phi_m > \phi_s$	Depleción o inver.	> 0
Tipo N	$\phi_m < \phi_s$	Acumulación	< 0



CONTENIDOS

- 1 Introducción
- 2 Estructura MIS en equilibrio térmico
- 3 Estructura MIS polarizada
- 4 Capacidad de una estructura MIS
- 5 Tensión umbral



Capacidad de una estructura MIS

Acumulación

- Los cambios en la tensión V_G producen variaciones en la concentración de mayoritarios acumulados.
- Debido a la dependencia exponencial de la concentración de mayoritarios con el potencial de superficie (Ψ_S), éste apenas tiene que cambiar para dar cuenta del incremento de portadores ΔQ .
- Por tanto, todo el incremento de tensión ΔV_G se produce en el óxido y la capacidad por unidad de área es:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta V_G} \approx \frac{\Delta Q}{\Delta V_{\text{ox}}} = C_{\text{ox}} = \frac{\epsilon_{\text{ox}}}{t_{\text{ox}}} \quad (4)$$

donde ϵ_{ox} es la constante dieléctrica del óxido y t_{ox} su espesor.

- En esta región, la capacidad es independiente de la polarización V_G .



Capacidad de una estructura MIS

Deplexión

- El cambio en la carga almacenada se debe al cambio en la anchura de la zona de deplexión. También hay una ligera variación en la concentración de minoritarios.
- La variación de tensión se reparte entre el óxido y la zona de deplexión (cambia la curvatura de las bandas) \Rightarrow hay una capacidad adicional a la del óxido:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{\text{ox}}} + \frac{1}{C_d} \quad (5)$$

- C_d (y por tanto C) es dependiente de V_G



Capacidad de una estructura MIS

Inversión

- Cambios en la tensión V_G producen variaciones en la concentración de portadores en inversión
- Debido a la dependencia exponencial de la concentración de portadores con el potencial de superficie (Ψ_S), éste apenas tiene que cambiar para dar cuenta del incremento de portadores ΔQ .
- Por tanto, todo el incremento de tensión ΔV_G se produce en el óxido y al igual que en acumulación:

$$C \approx C_{\text{ox}} \quad (6)$$

(la tensión en el semiconductor apenas cambia y, por tanto, $C_d \rightarrow \infty$).

- En esta región, la capacidad es independiente de la polarización V_G .



CONTENIDOS

- 1 Introducción
- 2 Estructura MIS en equilibrio térmico
- 3 Estructura MIS polarizada
- 4 Capacidad de una estructura MIS
- 5 Tensión umbral



Tensión umbral

- Sabemos que la inversión se produce a partir de que $q\Psi_s = 2q\phi_F$
- ¿Cómo relacionar esta condición con la tensión V_G aplicada al metal?
- Se define la tensión umbral (V_T) como aquella para la cual se verifica la condición de inversión $q\Psi_s = 2q\phi_F$.
- Viene dada por:

$$V_T = V_{FB} + 2\phi_F + \frac{|Q_d|}{C_{ox}} \quad (7)$$

donde Q_d es la carga en depleción (por unidad de área).

- Origen de cada sumando:
 - Tensión para poner en banda plana
 - Tensión para llegar a inversión
 - Tensión para mantener la carga en depleción



- Podemos expresar Q_d en función de ϕ_F también. Para ello:

$$Q_d = -qN_A W_d \quad (8)$$

donde W_d es el ancho de la zona de carga espacial, que tiene una expresión análoga a la de una unión PN^+ :

$$W_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(2\phi_F)}{qN_A}}. \quad (9)$$

Luego:

$$Q_d = -\sqrt{2\epsilon_s q N_A (2\phi_F)} \quad (10)$$



Tensión umbral

- Recordando:

$$V_T = V_{FB} + 2\phi_F + \frac{|Q_d|}{C_{ox}} \quad (11)$$

- Finalmente:

$$V_T = V_{FB} + 2\phi_F + \gamma\sqrt{2\phi_F} \quad (\text{substrato tipo P}) \quad (12)$$

donde γ se denomina factor body y vale:

$$\gamma = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A}}{C_{ox}} \quad (13)$$

- Para substrato tipo N:

$$V_T = V_{FB} - 2\phi_F - \gamma\sqrt{2\phi_F} \quad (\text{substrato tipo N}) \quad (14)$$