

CURSO DE MICROELECTRÓNICA PARTE II

TEMA 1 LA ESTRUCTURA MOS

Dr. Yoanlys Hernández Barrios

Sección de Electrónica del Estado Sólido (SEES)

Departamento de Ingeniería Eléctrica (DIE)

CINVESTAV

CURSO DE MICROELECTRÓNICA II - TEMARIO

I- *Teoría de la estructura Metal-Dieléctrico-Semiconductor*

1. Estructura MOS de dos electrodos. Diodo MOS ideal.
2. Zona de carga espacial
3. Densidad de cargas
4. Distribución de potencial y de campo eléctrico
5. Distribución de cargas en el semiconductor
6. ZCE superficial con la aproximación de empobrecimiento
7. Factores que influyen en el modelo ideal
 - Diferencia de trabajos de extracción
 - Cargas eléctricas en el aislador
 - Cargas eléctricas en la interfaz óxido-semiconductor
8. Estructura MOS de tres electrodos. Diodo controlado por compuerta

CURSO DE MICROELECTRÓNICA II - TEMARIO

II- Teoría del transistor MOS

1. Introducción al transistor MOS: principio de operación.
2. Formación del canal: distribución de potenciales y de las cargas.
3. Cálculo de la corriente: voltaje de umbral.
4. Regiones de operación: lineal, saturación y subumbral.
5. Expresiones de primera aproximación.
6. Capacitancias intrínsecas y parásitas: velocidad de operación.
7. Movilidad de los portadores.
8. Reducción de las dimensiones: escalado.
9. Efectos de canal corto: saturación de la velocidad; voltaje umbral; pendiente subumbral y DIBL.
10. Efectos de canal estrecho.
11. Rupturas.
12. Otros tipos de transistores MOS y estructuras actuales.

CURSO DE MICROELECTRÓNICA II - TEMARIO

III- La modelación del transistor MOS

1. Introducción.
2. La simulación circuital: programas tipo SPICE.
3. Tipos de modelos utilizados.
4. Modelos introductorios: nivel 1; nivel 2 y nivel 3.
5. Modelos actuales continuos y compactos para los nuevos TMOS.
6. La extracción de parámetros.

CURSO DE MICROELECTRÓNICA I

<https://github.com/hernandez-gh/CURSO-DE-MICROELECTRONICA-MATERIAL-DE-ESTUDIO-.git>

BIBLIOGRAFÍA DE LA PARTE I

1. A. S. Grove, "Physics and Technology of Semiconductor Devices", 1967.
2. A. Escobosa, M. Estrada "Procesos Tecnológicos de Fabricación de Microcircuitos: aspectos básicos", SEES, www.cinvestav.mx 2006.
3. A. Cerdeira, "Notas de clase de Microelectrónica", SEES, 2022
4. S.M. Sze and K.K. Ng, "Physics of Semiconductor Devices", Wiley, 2007
5. Y. P. Tsividis, "Operation and Modeling of the MOS Transistor", 2d ed., McGraw-Hill, 1999
1. J.J. Liou, A. Ortiz-Conde, F. García-Sánchez, "Analysis and Design of MOSFETs", Kluwer Academic Pub. 1998.

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

En la Primera Parte de este curso se toman como base los aspectos de la fabricación de las estructuras Metal-Óxido-Semiconductor (MOS) y los transistores MOS basados en las mismas vistas en cursos previos (Tecnología de Semiconductores I y II).

Como el óxido de la compuerta de esta estructura puede ser diferente del SiO_2 , para generalizar el nombre de estructura se usa el de Metal-Dieléctrico-Semiconductor (MDS) o la de Metal-Aislador-Semiconductor (*MIS – Metal-Insulator-Semiconductor*)

Como se explicó en detalle, generalmente se convierte en la estructura real analizada el dieléctrico de la compuerta con un **espesor real**, en un dieléctrico de **compuerta de espesor equivalente**, como si solo fuera de SiO_2 con la constante dieléctrica de 3.9, y se le llama **Espesor de Óxido Equivalente EOT (Equivalent Oxide Thickness)**.

$$X_{eq} = X_{real} \frac{k_{\text{SiO}_2}}{k_{real}}$$

INTRODUCCIÓN

Para el estudio de la estructura MOS se utilizaron tres magnitudes básicas que permiten calcular las características eléctricas de esta estructura. Estas son:

- Voltaje de Banda Plana, V_{FB} (Flat Band Voltage)
- Voltaje de umbral, V_T (Threshold Voltage)
- Capacitancia de compuerta en función del voltaje aplicado (Capacitance-Voltage C-V characteristic)

Mediante múltiples ejemplos y ejercicios se mostró y se calculó como afectaban a estas magnitudes los diferentes parámetros de la estructura y la de tecnología de fabricación.

INTRODUCCIÓN

Esta Parte del curso está dirigida a explicar cómo **calcular** la característica corriente-voltaje de los transistores de efecto de campo con estructuras MOS, MOSFET.

En la misma utilizaremos todos estos resultados obtenidos, tanto del comportamiento, como de los valores de los parámetros calculados.

Para poder utilizar los mismos resumiremos las expresiones obtenidas y las pondremos en la forma que serán utilizadas, aclarando algunas diferencias en las notaciones utilizadas, para evitar confusiones en el contenido.

INTRODUCCIÓN

Voltaje de banda plana

$$V_{FB} = \Phi_{GS} - \frac{Q_{ss} + Q_{cf} + Q_i}{C_i}$$

TS II

V_{FB} – Voltaje de banda plana

Φ_{GS} - diferencia de potencial de contacto entre la compuerta y el semiconductor;

Q_{ss} - densidad de carga debida a estados superficiales localizados en la interfaz;

Q_{cf} - densidad de carga debida a carga fija localizada en la interfaz o en el dieléctrico cercano a ella;

Q_i - densidad de carga debida a carga móvil que se encuentra en el interior del dieléctrico;

C_i - capacitancia por unidad de área de la estructura debida a la capa de dieléctrico.

μE

$$V_{FB} = \phi_{ms} - \frac{Q_{ss}}{C_o}$$

Expresión que utilizaremos

ϕ_{ms} Diferencia de trabajos de extracción entre el Metal, o conductor de la compuerta, y el silicio

Q_{ss} - Densidad total de las cargas dentro del dieléctrico de compuerta, y en la interfaz, que se denominan así Q_{ss}

INTRODUCCIÓN

Voltaje de umbral

TS II

$$V_T = V_{FB} + \frac{Q_B}{C_i} + 2\psi_F$$

donde Q_B es la carga en la zona de carga espacial del Semiconductor y ψ_F es el potencial de Fermi del semiconductor

μE

$$V_T = V_{FB} + 2\phi_f + \gamma \sqrt{2\phi_f + |V_B|}$$

En esta expresión el tercer término corresponde la carga en la zona de carga especial (ZCE), o sea Q_B/C_i , y el potencial de Fermi ψ_F se escribe como ϕ_f .
Se demostrará posteriormente.

INTRODUCCIÓN

Para poder calcular analíticamente estas expresiones y calcular las corrientes, se requiere realizar el cálculo y análisis de las distribuciones de carga, potencial y de campo eléctrico en el interior del semiconductor de la estructura MOS (MIS o MDS).

Con el objetivo de simplificar la notación matemática en estos cálculos se introdujo una variación de notaciones, utilizando expresiones normalizadas.

$$\begin{aligned}\phi t &= \frac{kT}{q} & \beta &= \frac{q}{kT} = \frac{1}{\phi t} & \beta\Psi &= \frac{\phi}{\phi t} \\ u &= \frac{\phi}{\phi t}; & v &= \frac{V}{\phi t}; & u_f &= \frac{\phi_f}{\phi t}\end{aligned}$$

Se modificó la notación a la de los potenciales normalizados u , v y u_f , pero sin modificar las expresiones básicas de las cargas, los potenciales y los campos.

INTRODUCCIÓN

Campo eléctrico F en la notación de **TS II**

$$F^2 = \left(\frac{d\Psi}{dx} \right)^2 = \left(\frac{2kT}{q} \right)^2 \frac{q\beta p_{p0}}{2k_s \epsilon_0} \left[(e^{-\beta\psi} + \beta\psi - 1) + \frac{n_{p0}}{p_{p0}} (e^{\beta\psi} - \beta\psi - 1) \right]$$

$$n_{p0} = n_i e^{-\beta\Psi_F} = n_i e^{-u_f}$$

$$p_{p0} = n_i e^{\beta\Psi_F} = n_i e^{u_f}$$

$$F = \left(\frac{d\Psi}{dx} \right) = \sqrt{\frac{2q}{\beta k_s \epsilon_0}} [p_{p0}(e^{-\beta\psi} + \beta\psi - 1) + n_{p0}(e^{\beta\psi} - \beta\psi - 1)]^{\frac{1}{2}}$$

$$L_{Di} = \sqrt{\frac{\phi t k_s \epsilon_0}{2q n_i}}$$

Campo eléctrico E_s en la notación de μE

$$E_s = -\frac{du}{dt} \cdot \phi t = -\frac{\phi t}{L_{Di}} (e^{u_f}(e^{-u} + u - 1) + e^{-u_f}(e^u - u - 1))^{\frac{1}{2}}$$

Se utilizaron los potenciales normalizados u , v y u_f

INTRODUCCIÓN

Podemos decir que ambas notaciones describen exactamente igual las magnitudes físicas, solo se introducen para recalcar una u otra magnitud.

El análisis de la característica capacitancia-voltaje C-V se realizó en TS II.

Utilizando el mismo procedimiento que al estudiar la unión P-N, para los MOSFETs se desarrollará el cálculo de la *distribución de cargas*, la *distribución de campo eléctrico* dentro del semiconductor, en función del potencial aplicado a la estructura MOS. Esto es necesario para calcular la corriente eléctrica a lo largo de la estructura.

Solo se utilizarán las expresiones para el MOSFET de canal N, el de canal P tiene expresiones semejantes solo cambiando los signos y los valores de los parámetros.

ESTRUCTURAS METAL-OXIDO-SEMICONDUTOR (MOS)

REPASO DE LA ESTRUCTURA MOS IDEAL

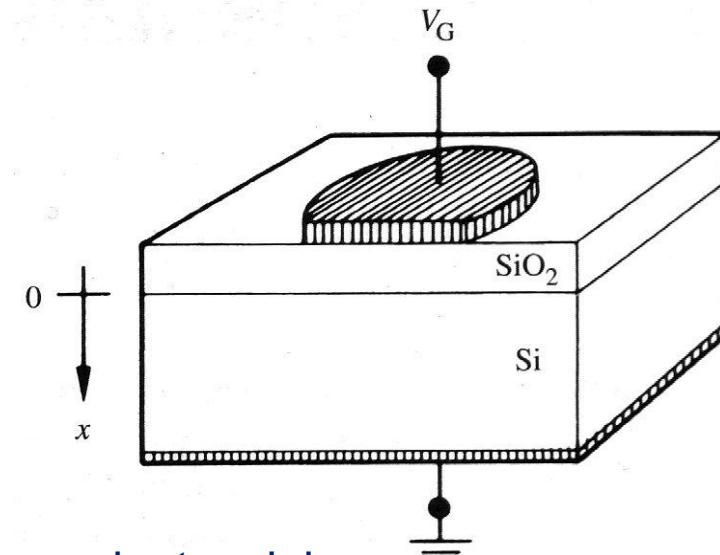
ESTRUCTURAS METAL-OXIDO-SEMICONDUTOR (MOS)

- Estructura MOS de *dos electrodos*. Diodo MOS ideal.
- Zona de carga espacial
- Densidad de cargas
- Distribución de potencial y de campo eléctrico
- Distribución de cargas en el semiconductor
- ZCE superficial con la aproximación de empobrecimiento
- Factores que influyen en el modelo ideal
- Diferencia de trabajos de extracción
- Cargas eléctricas en el aislador
- Cargas eléctricas en la interfaz óxido-semiconductor
- Estructura MOS de *tres electrodos*. Diodo controlado por compuerta

ESTRUCTURA MOS IDEAL

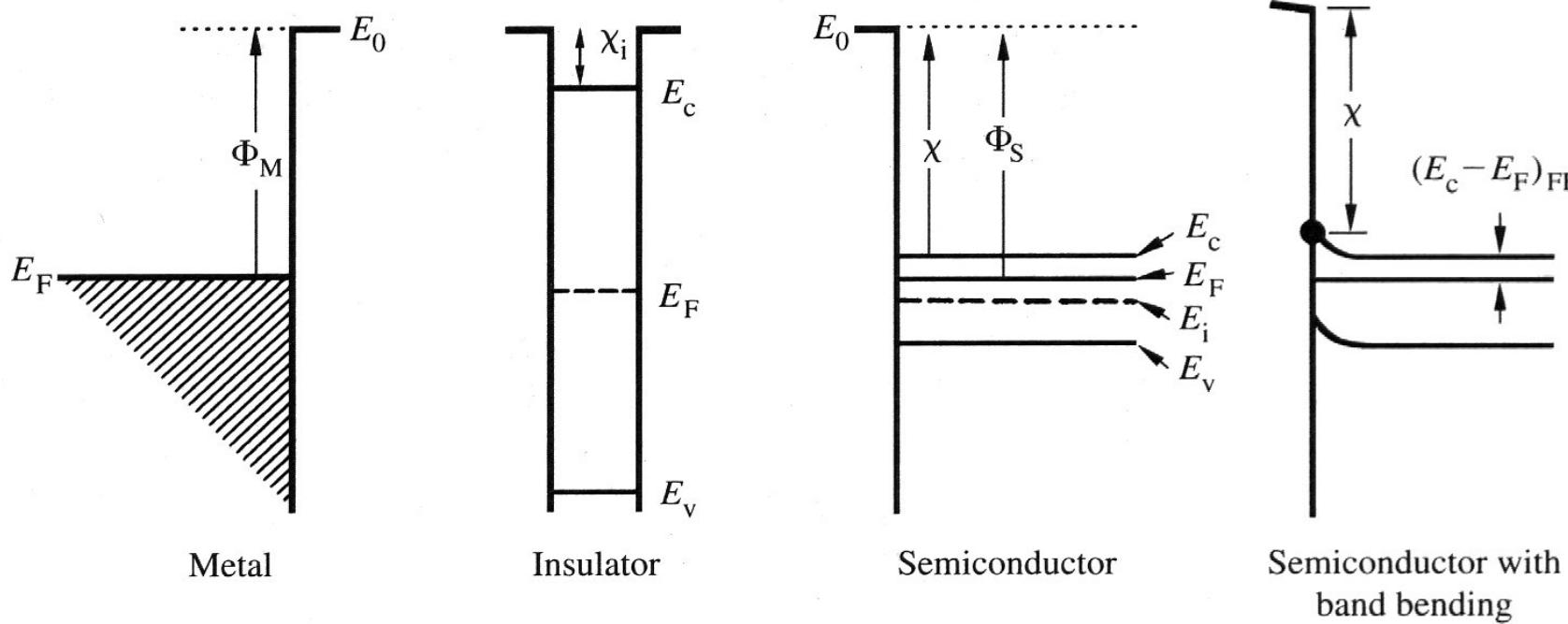
1. Modelo unidimensional
2. El aislador es ideal
3. Voltaje aplicado en los extremos de la estructura es cero
4. Iguales niveles de Fermi de los tres materiales
5. No hay curvatura de las bandas.

Esta es la llamada **condición de banda plana** (“flat-band”).



Suposiciones Claves:

1. Metal es una región equipotencial
2. Óxido es un aislante perfecto con flujo de corriente cero.
3. Ni óxido ni interfaz óxido/semit conductor tienen centros de carga.
4. Semiconducto r es uniformemente dopado.
5. Se ha establecido un contacto óhmico en la parte trasera de la oblea.
6. El semiconducto r es lo suficientemente fino para tener una región quasi-neutra (donde el campo eléctrico es 0 y todas las bandas de energía son planas)
7. Existe cierta relación de energía: $\Phi_M = \Phi_S = \chi + (E_C - E_F)_{FB}$

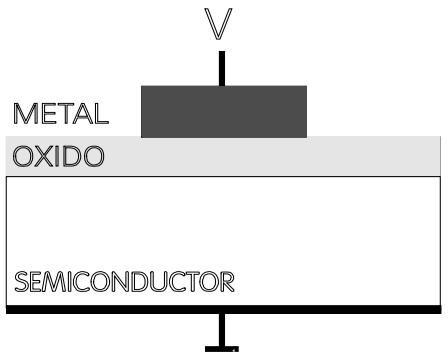


E_0 = Nivel de energía del vacío (La mínima energía que debe tener un electrón para liberarse del material)

Φ_M = Función de trabajo del metal (diferencia de energía desde el nivel de Fermi de un electrón en el metal al nivel de energía del vacío).

Φ_S = Función de trabajo del semiconductor (diferencia de energía desde el nivel de Fermi de un electrón en el semiconductor al nivel de energía del vacío. Depende del dopaje.)

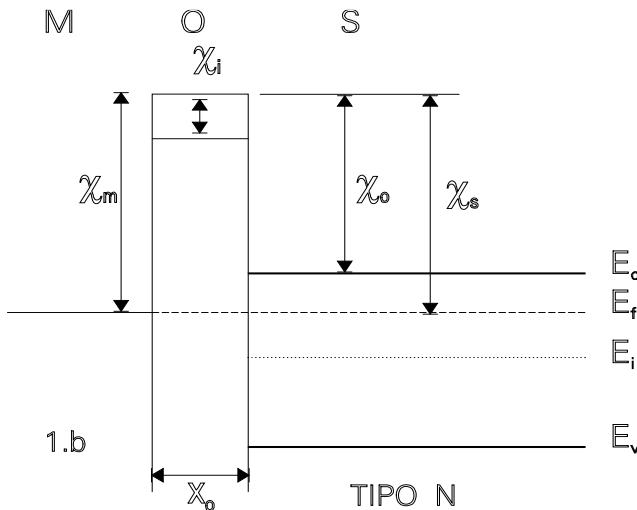
χ = afinidad del electrón del semiconductor (Diferencia de energía desde la BC en el semiconductor al nivel de energía del vacío. NO depende del dopaje)



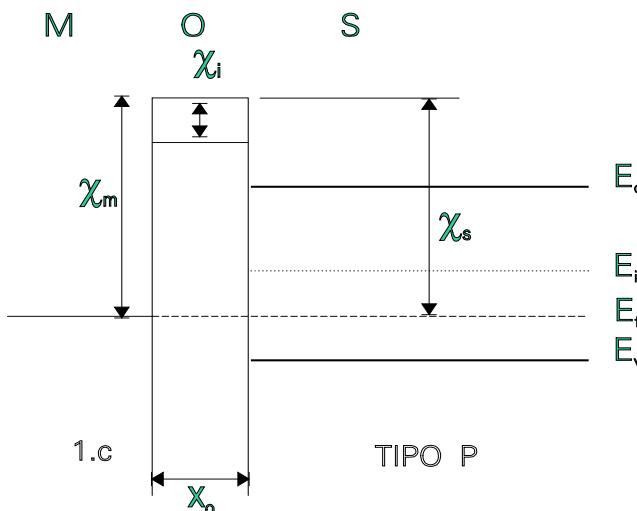
1.a

Fig.1.1 Estructura MOS ideal

- a) Diagrama típico de una estructura Metal-Oxido-Semiconductor
- b) Caso ideal de banda plana para semiconductor tipo N.
- c) Caso ideal de banda plana para semiconductor tipo P.

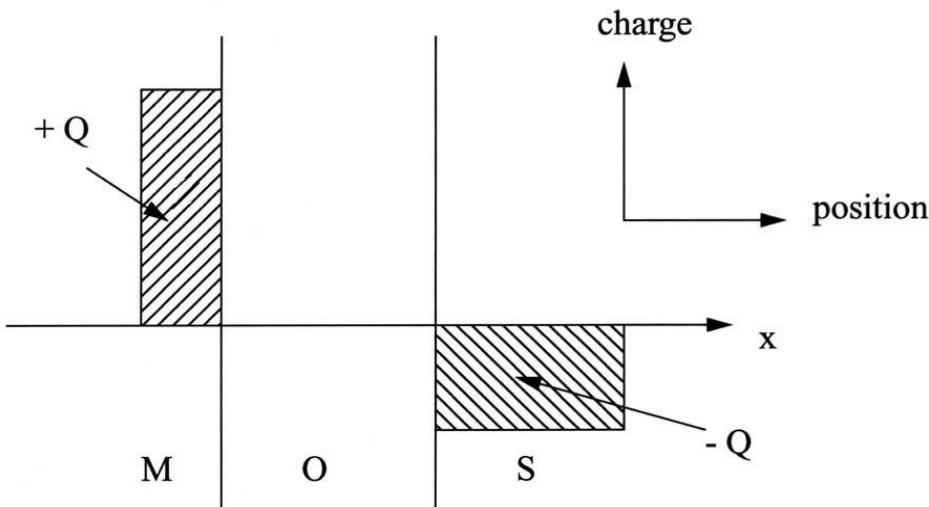


1. Ya que el aislador es ideal, al poner los materiales juntos el nivel de Fermi debe ser plano e igual para todos.
2. Asimismo, si no se almacenan cargas en las placas (regiones de metal y semiconductor cerca del aislante), las bandas no se doblan en el semiconductor.
3. Notar que la suposición de que el metal es una superficie equipotencial indica que un conductor perfecto no puede aportar un campo eléctrico



Estructura MOS polarizada

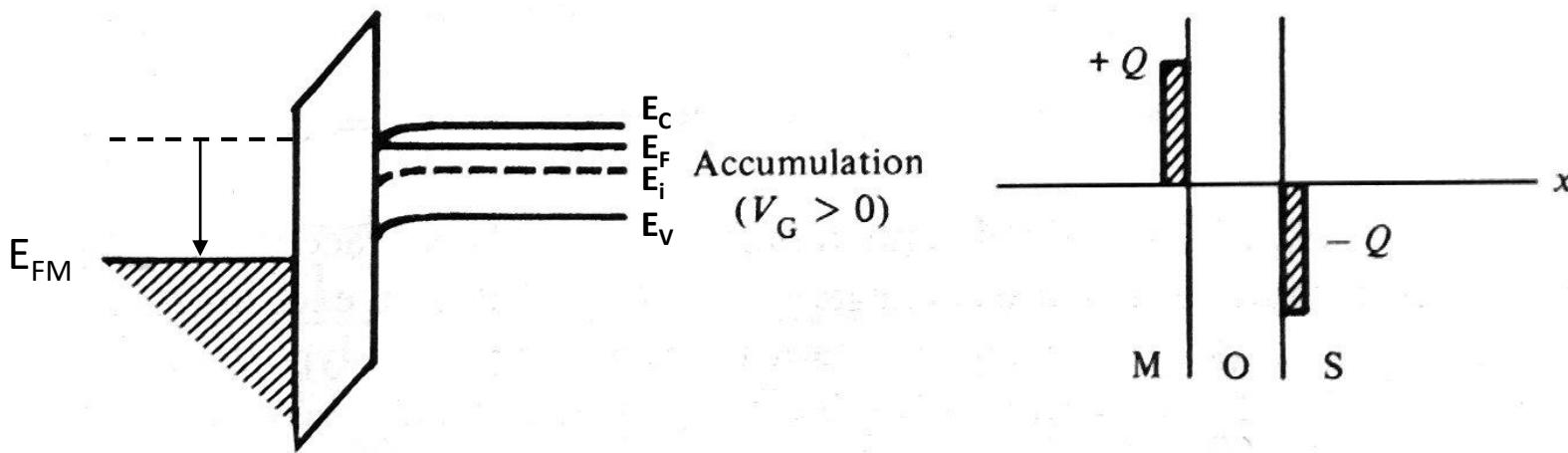
Charge Block Diagram:



(Note: a positive bias has been applied to the metal)

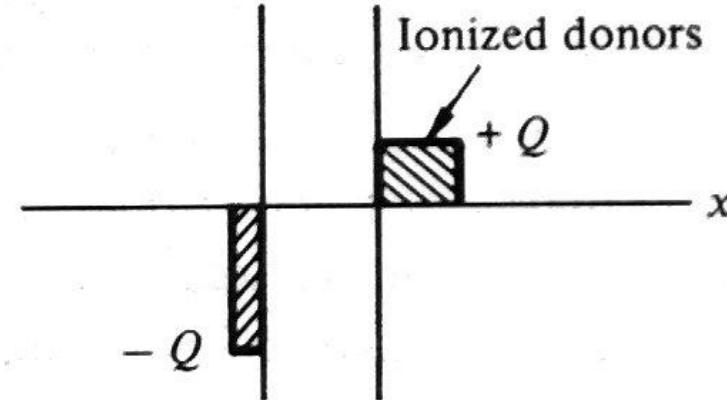
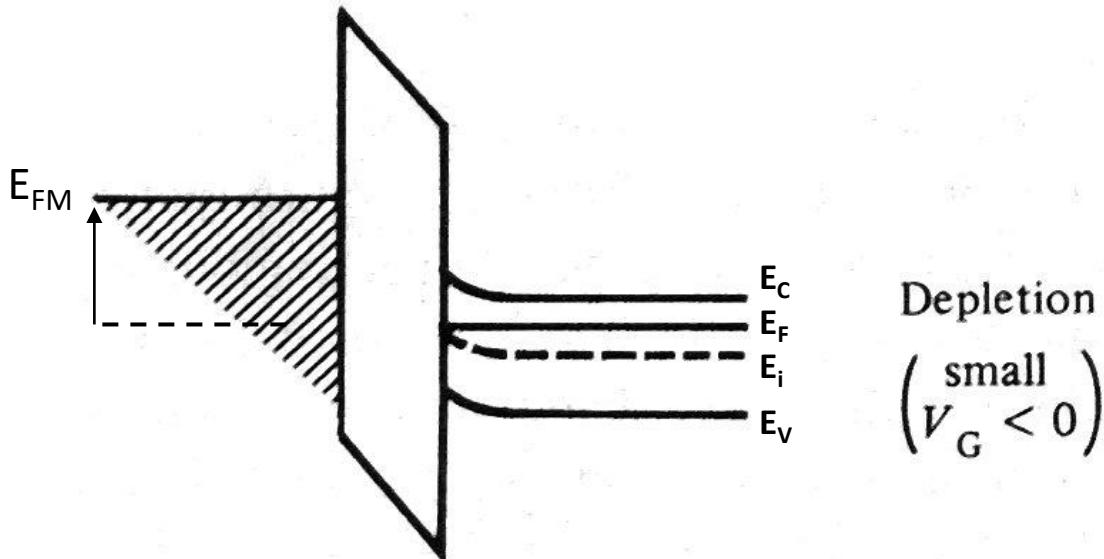
1. Un voltaje positivo en el metal induce una carga positiva. La ley de Gauss fuerza la formación de una carga negativa igual cerca de la interfaz aislante/semiconductor.
2. Cargas separadas por una distancia implica un campo eléctrico a través del aislante.
3. Para todo voltaje aplicado el nivel de Fermi en cada capa permanece constante (plano) ya que no fluye corriente por la estructura.
4. El voltaje aplicado separa los niveles de Fermi del metal y el semiconductor en qV : $E_F(\text{metal}) - E_F(\text{sem}) = -qV$.
5. Si el semiconductor es puesto a GND, entonces el nivel de Fermi del metal se mueve hacia abajo si $V > 0$, y se mueve hacia arriba si $V < 0$.

Estructura MOS polarizada para semiconductor tipo-N



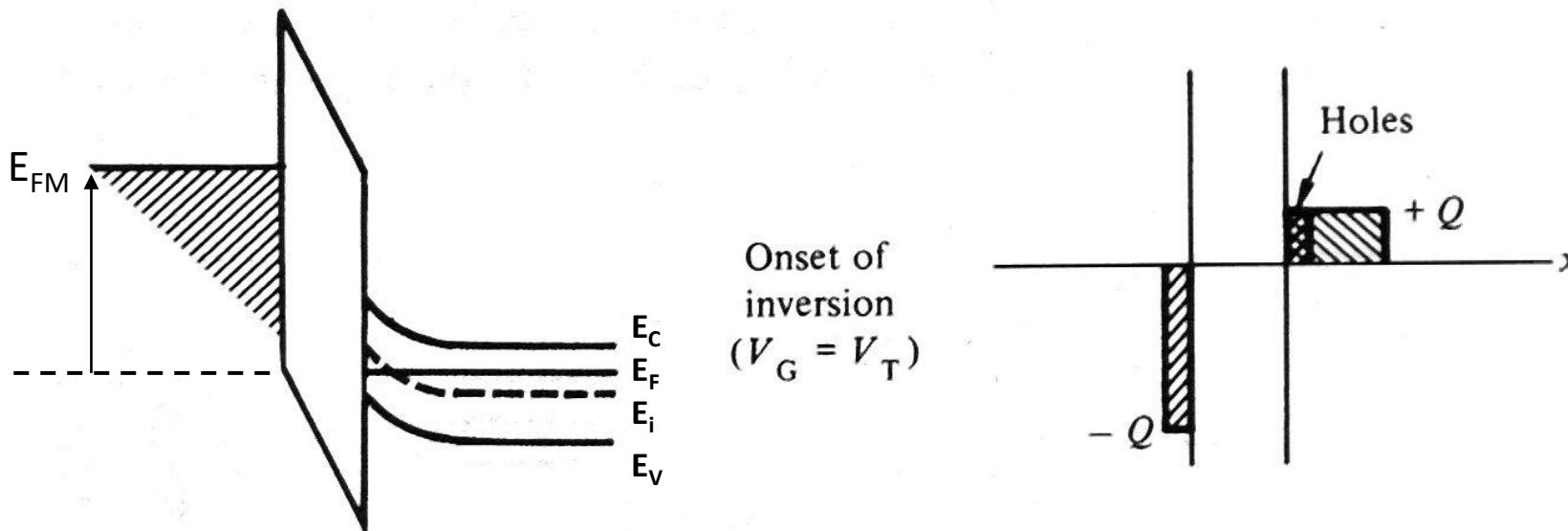
1. Cuando $V_G > 0$, la energía de fermi del metal disminuye ($E = -qV$), el aislante presenta un campo eléctrico que termina casi inmediatamente en el metal casi perfectamente conductor, pero a una distancia finita en el semiconductor de "resistividad finita".
2. El modelo de carga indica que debe crearse una carga negativa en el semiconductor cerca de la interfaz. Esta carga está en forma de electrones.
3. Dado que $n = n_i \exp[(E_F - E_i)/kT]$, la concentración de electrones en el semiconductor cerca de la interfaz aumenta.
4. Esto se denomina **acumulación**.

Estructura MOS polarizada para semiconductor tipo-N



1. Cuando $V_G < 0$, la energía de Fermi del metal aumenta ($E = -qV$), el aislante tiene un campo eléctrico que lo atraviesa y termina casi inmediatamente en el metal casi perfectamente conductor, pero a una distancia finita en el semiconductor de "resistividad finita".
2. El modelo de carga indica que debe crearse una carga positiva en el semiconductor cerca de la interfaz. Esta carga se presenta en forma de donantes ionizados.
3. Dado que $n = n_i \exp[(E_F - E_i)/kT]$, la concentración de electrones en el semiconductor cerca de la interfaz disminuye.
4. Esto se denomina **agotamiento o empobrecimiento**.

Estructura MOS polarizada para semiconductor tipo-N

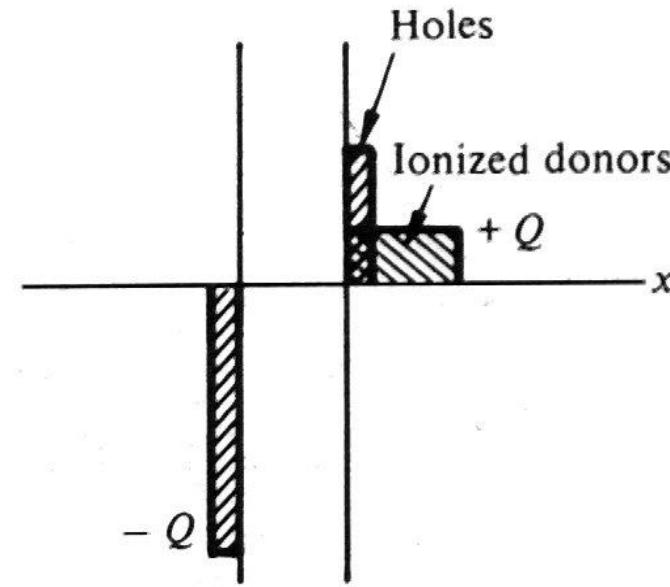
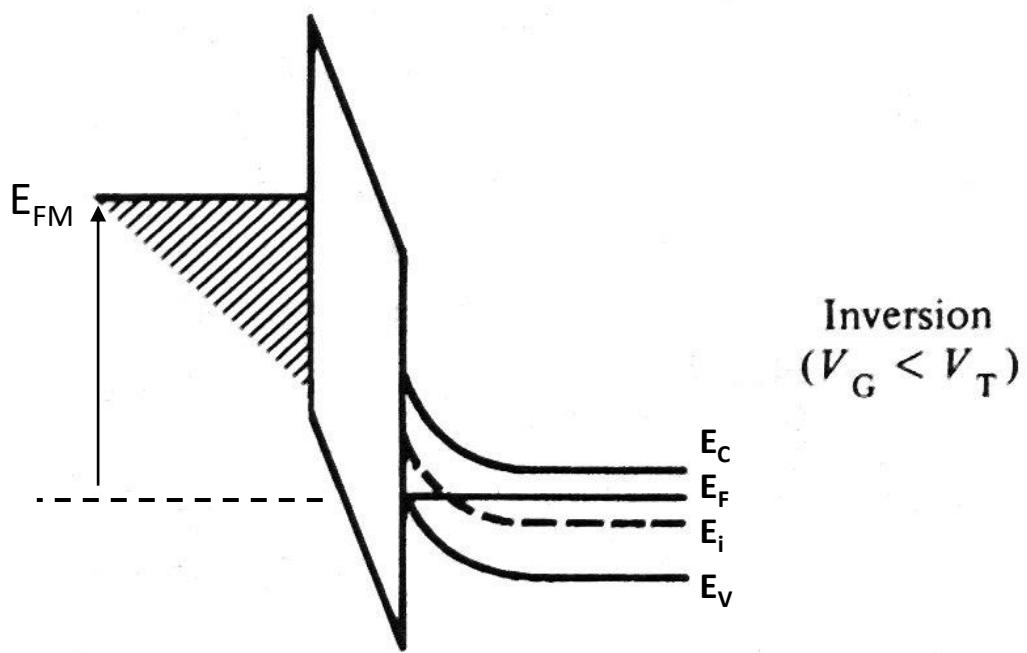


1. Para magnitudes de polarización mayores ($V_G < 0$), la energía de Fermi cerca de la interfaz cruza la energía intrínseca y el tipo de material cambia de tipo n a tipo p (solo localmente cerca de la interfaz).
2. El modelo de carga indica que debe crearse carga positiva en el semiconductor cerca de la interfaz. Esta carga se presenta en forma de donantes ionizados y huecos.
3. La concentración de huecos cerca de la interfaz debe ser igual a la concentración de donadores. Por tanto:

$$p_{int} = N_D = n_i e^{\left(\frac{E_{i-int}-E_F}{kT}\right)} = n_i e^{\left(\frac{E_F-E_{i-vol}}{kT}\right)}$$

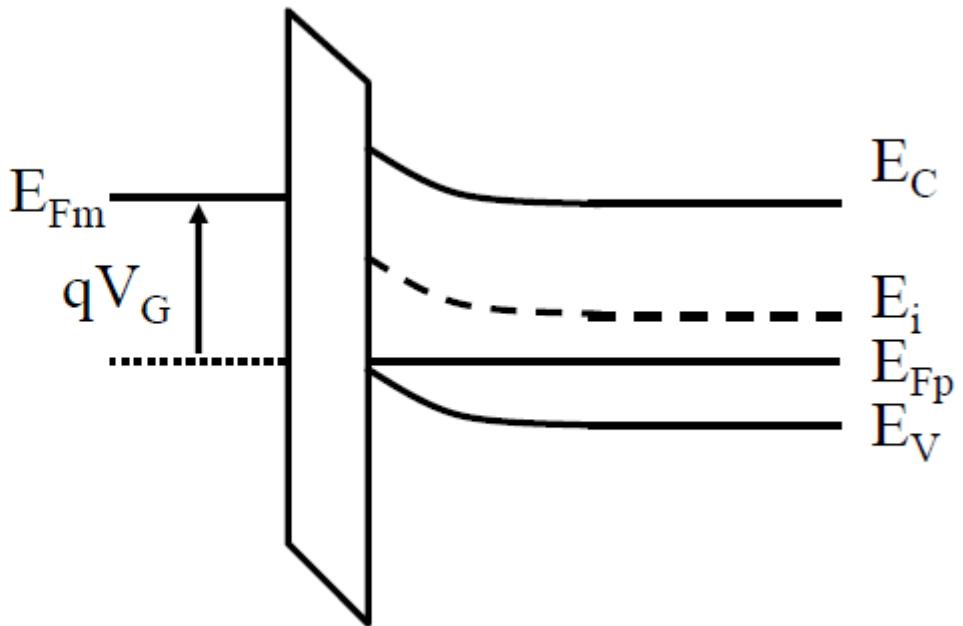
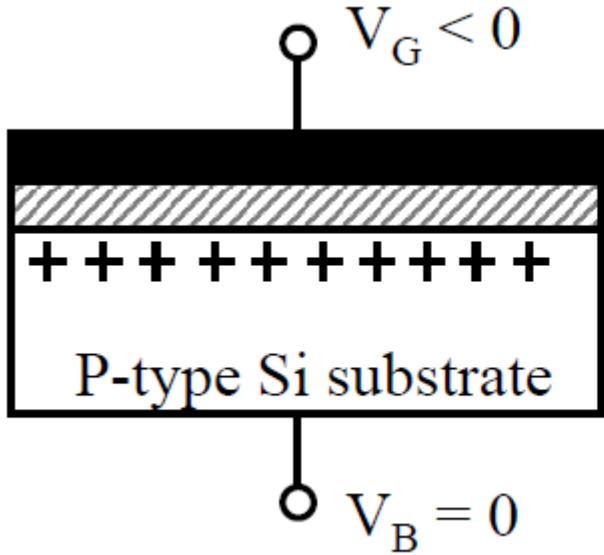
4. Este proceso es llamado inversión. Ocurre para un voltaje denominado voltaje de umbral.
5. La inversión ocurre cuando: $E_{i-int} - E_{i-vol} = 2(E_F - E_{i-vol})$

Estructura MOS polarizada para semiconductor tipo-N



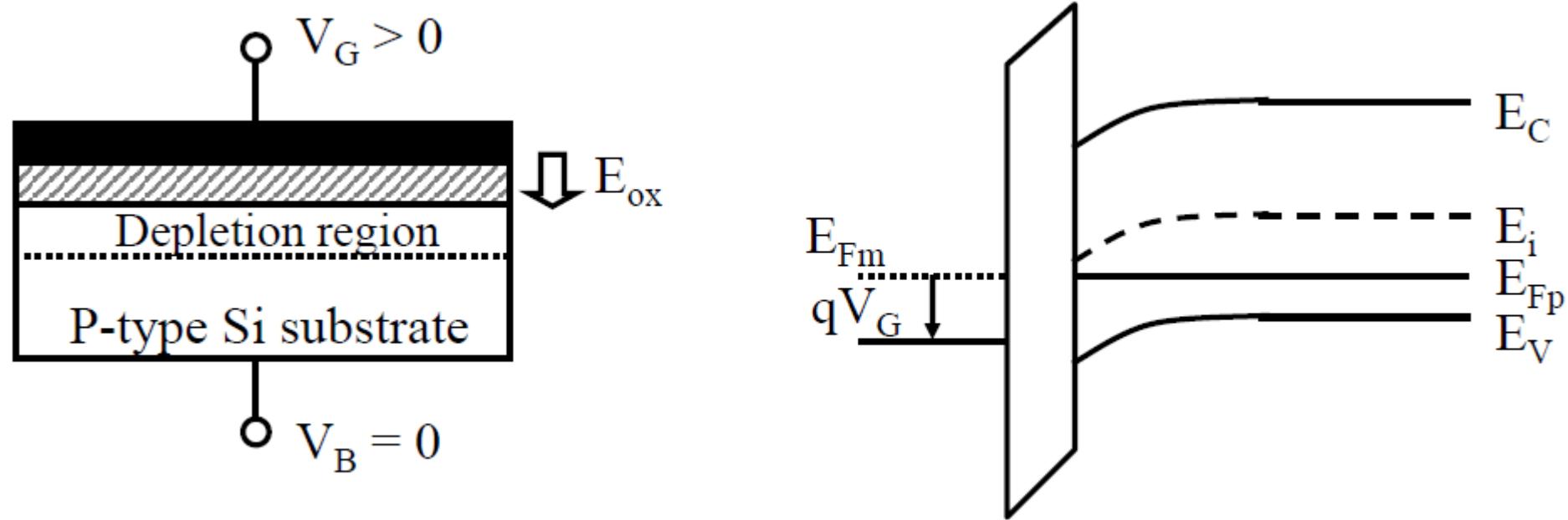
1. Para magnitudes de polarización aún mayores ($V_G \ll 0$), la concentración de huecos continúa aumentando, lo que resulta en una concentración muy alta de huecos cerca de la interfaz.
2. Esto se conoce como inversión fuerte.

Estructura MOS polarizada para semiconductor tipo-P



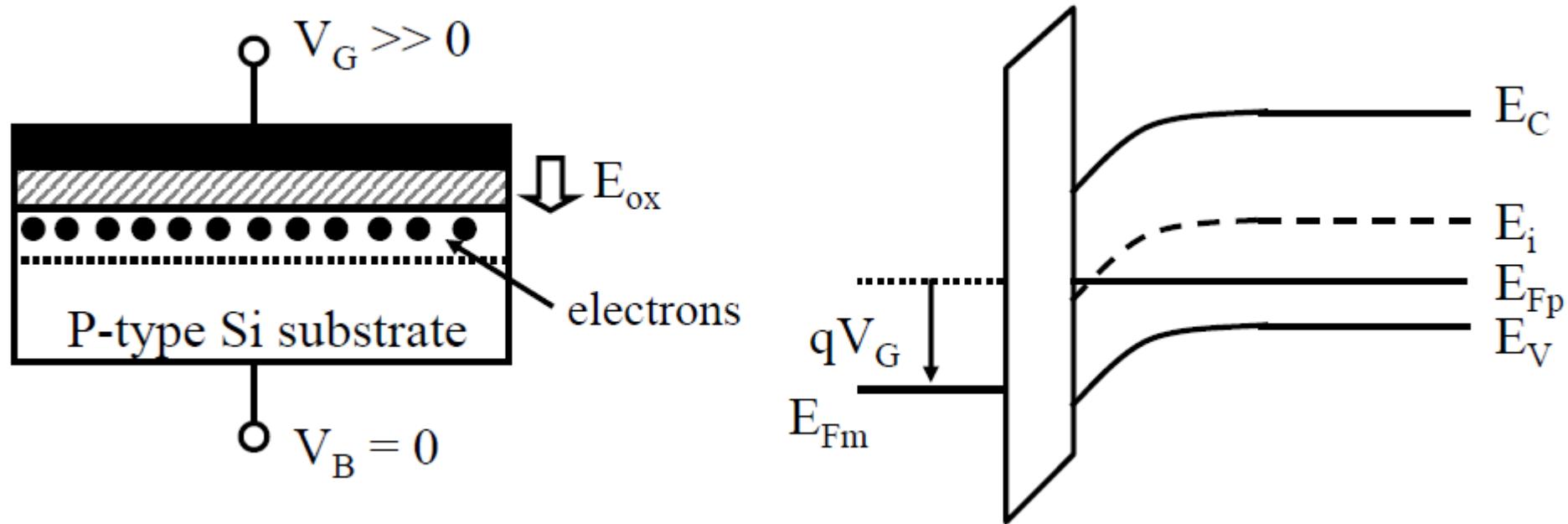
1. $V_G < 0$, atrae a los huecos hacia el óxido (interfaz).
2. Ese ACUMULAN huecos en la interfaz (la superficie del semiconductor en la interfaz es más fuertemente tipo-P)
3. Los electrones se empujan más profundo dentro del sustrato (semiconductor)

Estructura MOS polarizada para semiconductor tipo-P



1. $V_G > 0$, repele a los huecos hacia el sustrato, lejos de la interfaz.
2. Se forma una región de empobrecimiento (de huecos) en la superficie, debido al campo eléctrico directo desde la compuerta al sustrato
3. Se doblan las bandas en el sustrato (semiconductor), cerca dela superficie, se convierte menos fuertemente tipo-P (nivel de fermi cerca de E_i)

Estructura MOS polarizada para semiconductor tipo-P



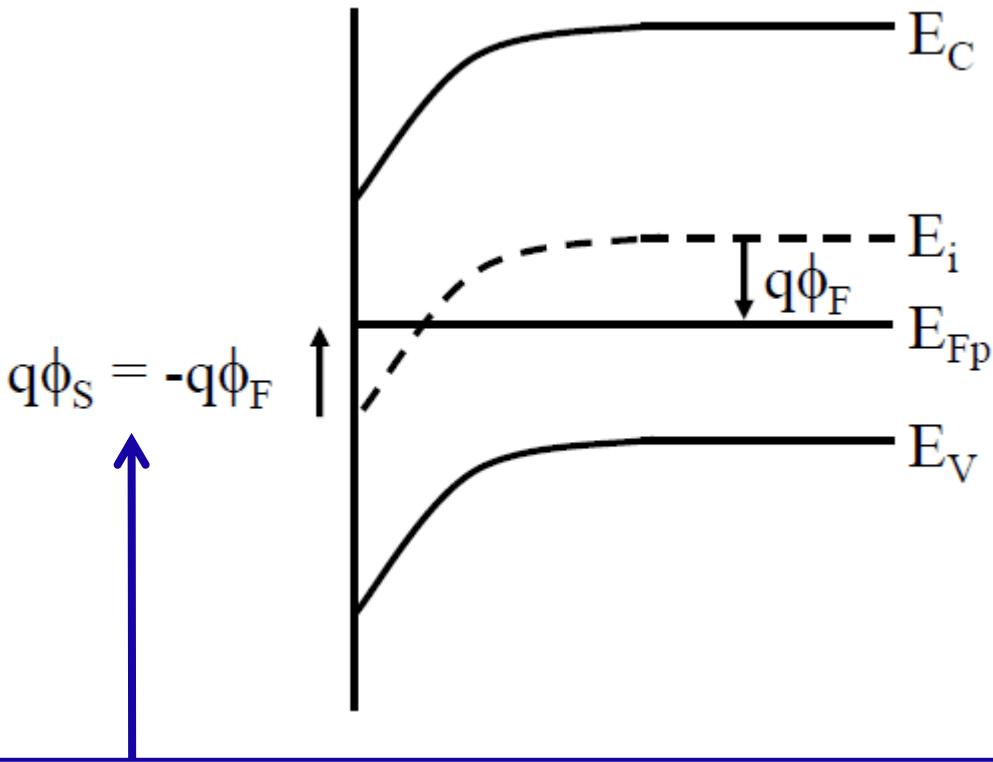
1. $V_G >> 0$, las bandas en el sustrato se doblan aún más.
2. Se atraen los portadores minoritarios (electrones) del sustrato a la superficie, se invierte la capa.
3. La superficie se convierte tipo-N

Inversión

Remember:

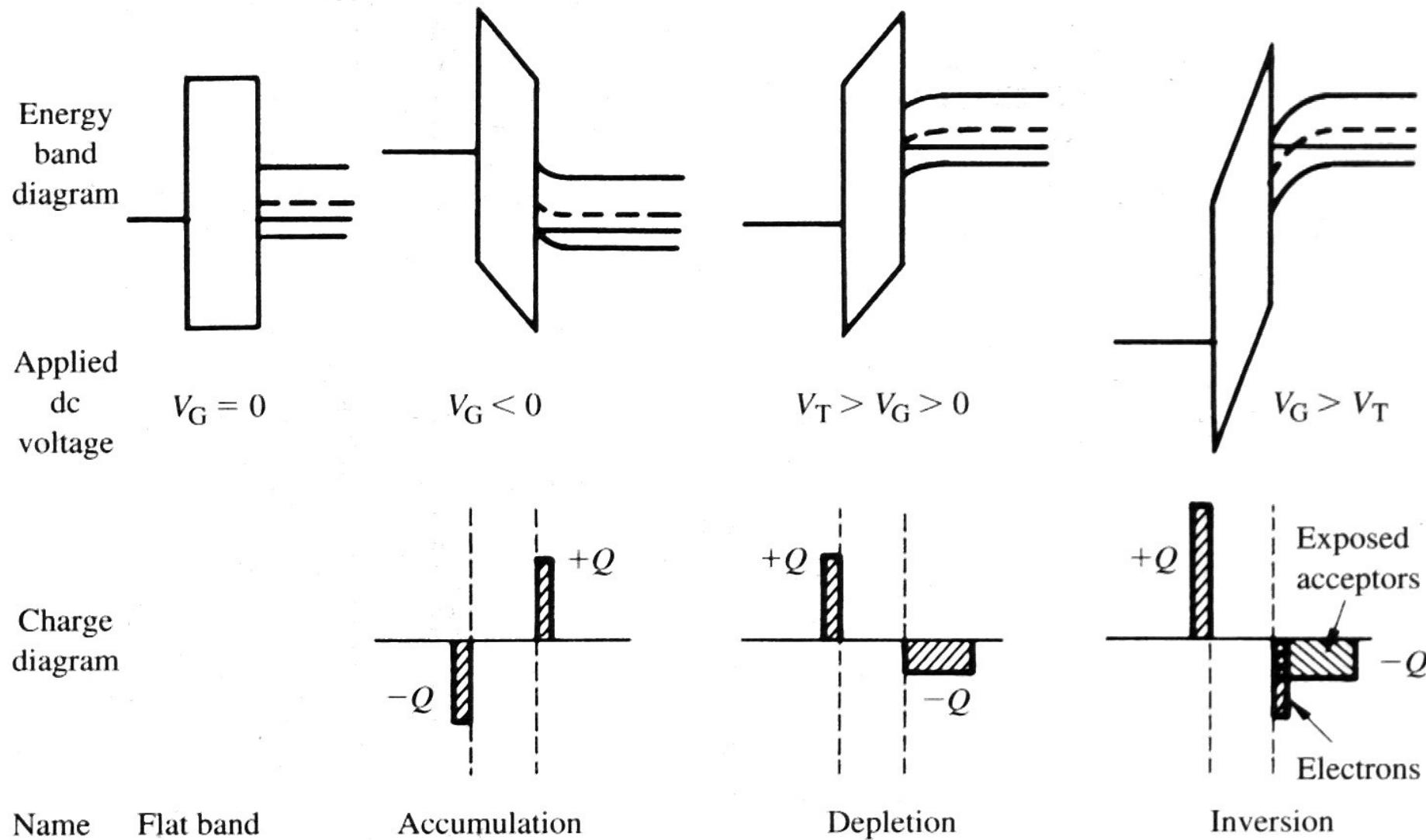
$$q\phi_F = E_F - E_i$$

(VOLUMEN)

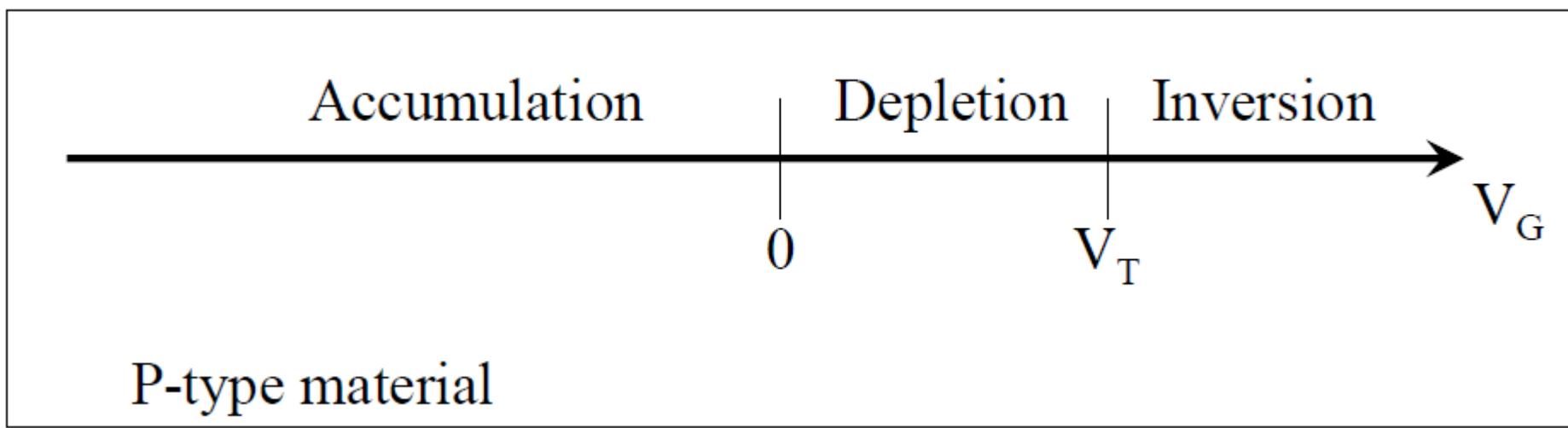
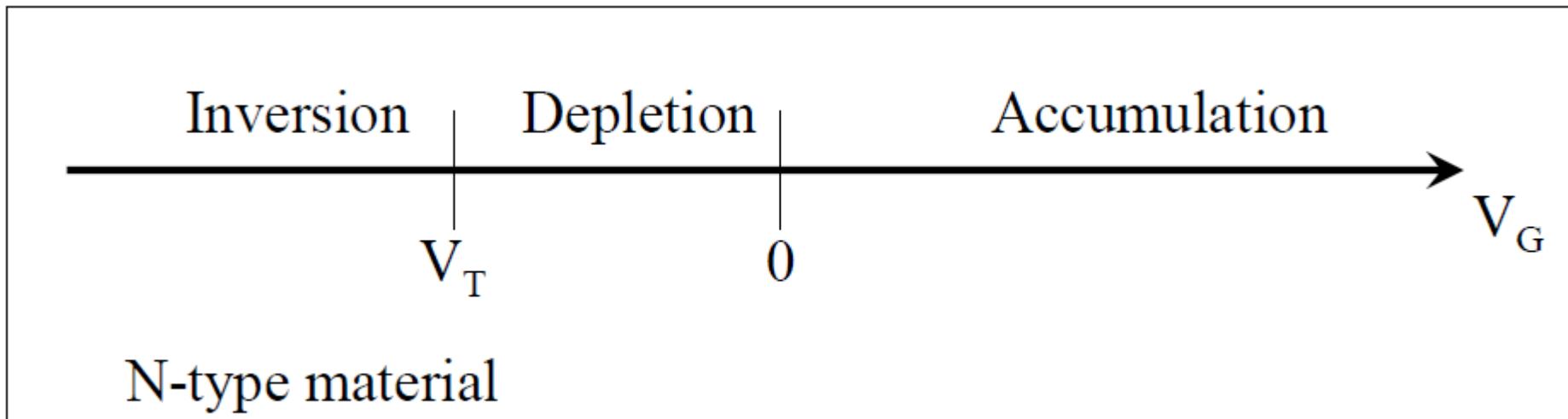


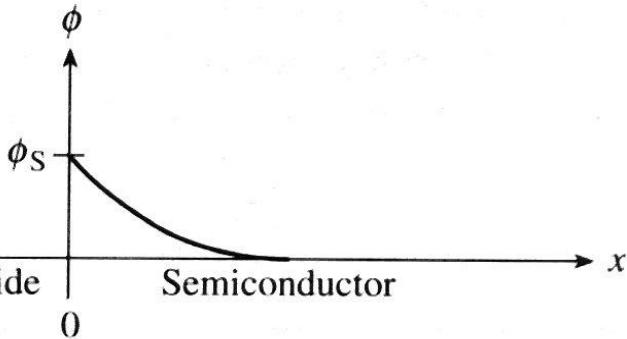
1. Punto en el cual la densidad de electrones en la superficie se iguala a la densidad de huecos en el sustrato ó volumen.
2. El potencial superficial es el mismo que el potencial de Fermi pero de signo contrario

Estructura MOS polarizada para semiconductor tipo-P



Estructura MOS polarizada: RESUMEN



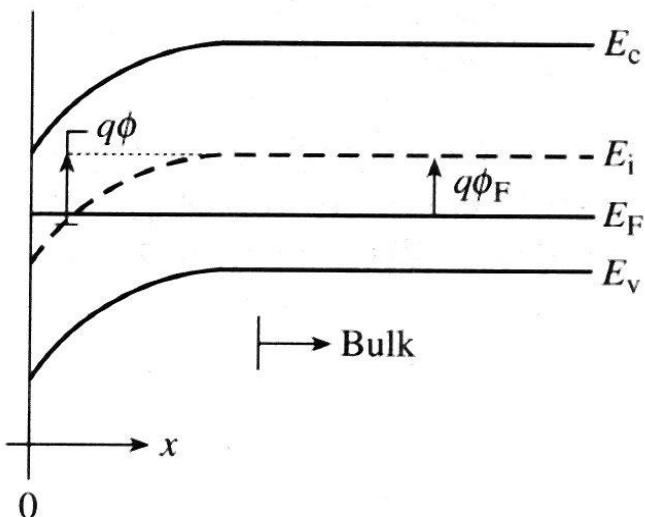


Hagamos $\phi(x)$ como el potencial electrostático dentro del semiconductor a una profundidad o distancia x (medida desde la interfaz con el aislante).

$$\phi(x) = \frac{1}{q} [E_{i-vol} - E_i(x)]$$

$$\phi_s = \frac{1}{q} [E_{i-vol} - E_{i-int}]$$

$$\phi_F = \frac{1}{q} [E_{i-vol} - E_F]$$



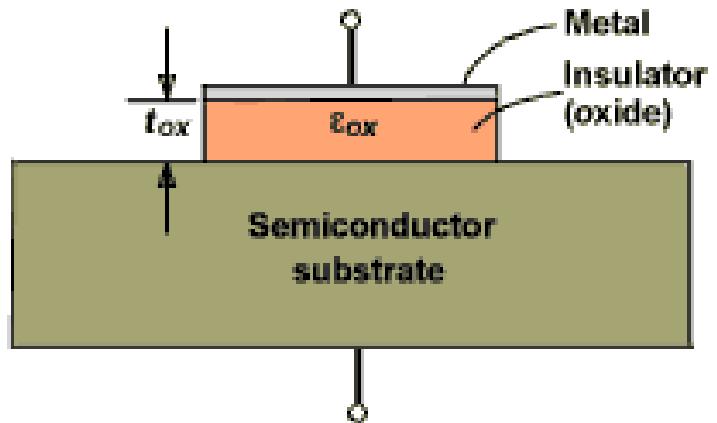
$$p_{vol} = N_A = n_i e^{\left(\frac{E_{i-vol}-E_F}{kT}\right)} \quad n_{vol} = N_D = n_i e^{\left(\frac{E_F-E_{i-vol}}{kT}\right)}$$

$$\phi_F = \begin{cases} \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) & \text{for a p-type semiconductor} \\ -\frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right) & \text{for a n-type semiconductor} \end{cases}$$

Thus,

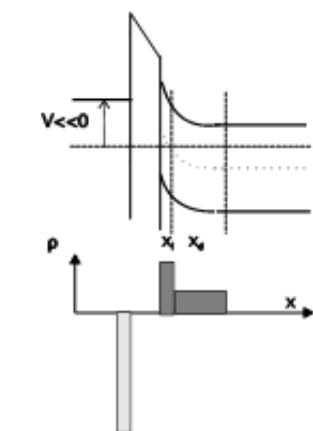
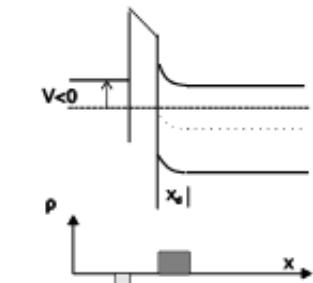
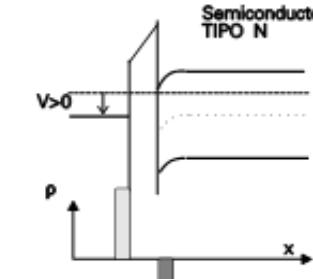
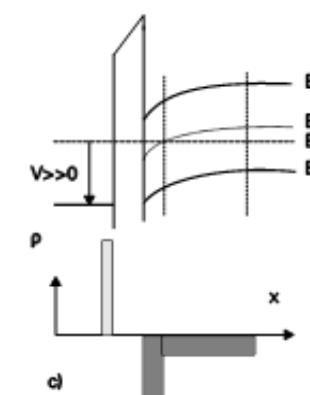
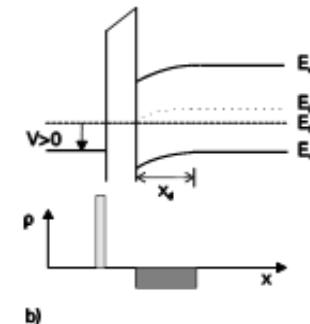
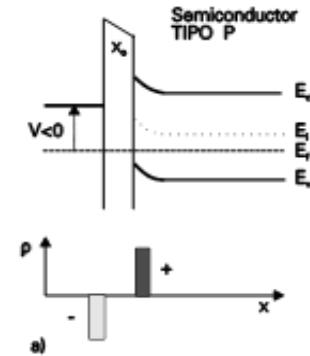
$$\phi_s = 2\phi_F \quad \text{at the depletion-inversion transition point, } V_G = V_T$$

ESTRUCTURA MOS IDEAL



Potencial superficial a partir del voltaje externo aplicado:

- $\varphi_s < 0$ - acumulación;
- $0 < \varphi_s < \varphi_f$ - empobrecimiento;
- $2\varphi_f > \varphi_s > \varphi_f$ - inversión débil;
- $\varphi_s > 2\varphi_f$ - inversión fuerte.

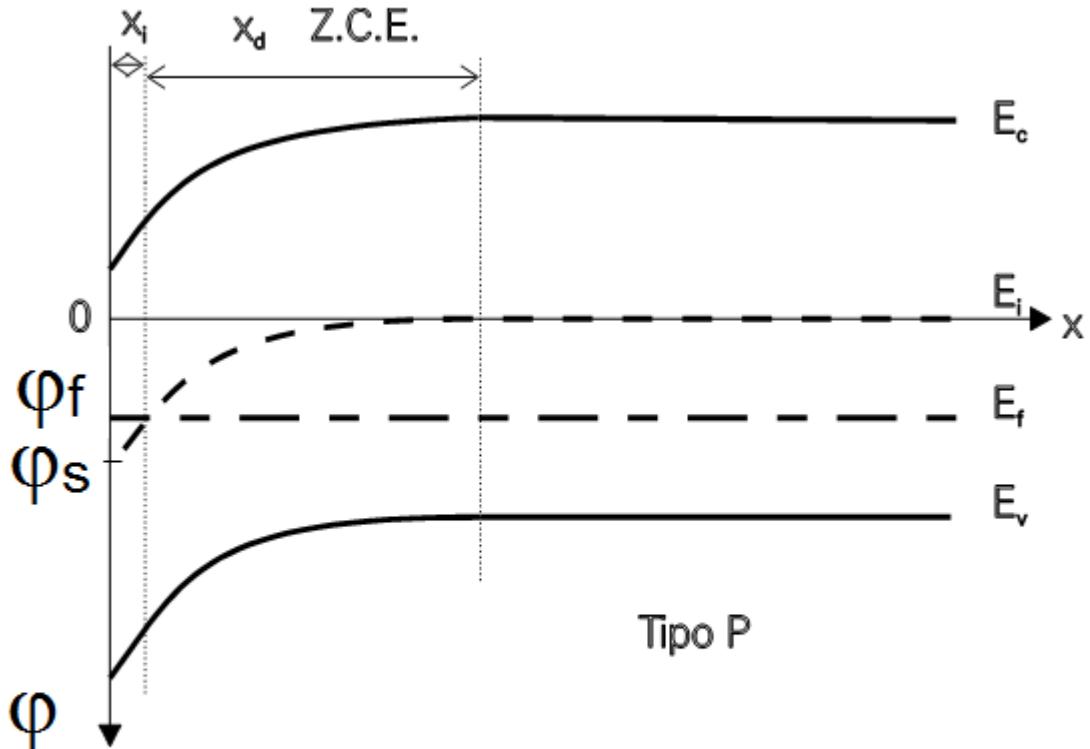


ESTRUCTURA MOS IDEAL

Variación del potencial superficial φ_s con el voltaje externo aplicado:

- $\varphi_s < 0$ - acumulación;
- $0 < \varphi_s < \varphi_f$ - empobrecimiento;
- $2\varphi_f > \varphi_s > \varphi_f$ - inversión débil;
- $\varphi_s > 2\varphi_f$ - inversión fuerte.

Zona de carga espacial (**ZCE**),
es la zona de **empobrecimiento**;
o de deserción;
o de “depleción”, etc.



Modelo unidimensional del diagrama de bandas en la superficie del semiconductor tipo P de una estructura MOS.

Zona de empobrecimiento: Solución Cuantitativa – Aproximación de empobrecimiento asumiendo material tipo p

$$\rho = q(p - n + N_D - N_A) \cong -qN_A \rightarrow (0 \leq x \leq W)$$

Se desprecian las cargas excepto la de dopantes ionizados con W como el ancho de la zona de empobrecimiento (ZCE)

Aplicando Poisson usando como condición de frontera que el campo eléctrico es 0 en el borde de la región de empobrecimiento:

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{-qN_A}{k_s \epsilon_0} \rightarrow E(x) = -\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{qN_A}{k_s \epsilon_0} (W - x)$$

Finalmente el potencial electrostático puede ser obtenido integrando usando una condición de frontera de que el potencial se hace 0 en el borde de la zona de empobrecimiento:

$$\phi = \frac{qN_A}{k_s \epsilon_0} (W - x)^2 \rightarrow W = \sqrt{\frac{k_s \epsilon_0}{qN_A} \phi_s}$$

Zona de empobrecimiento: Solución Cuantitativa – Aproximación de empobrecimiento asumiendo material tipo p

El ancho de la zona de empobrecimiento en la transición de empobrecimiento a inversión, W_T puede ser encontrado haciendo $\phi_S = 2\phi_F$

$$W_T = \sqrt{\frac{k_s \varepsilon_0}{q N_A} 2\phi_F} = \sqrt{\frac{k_s \varepsilon_0 2kT}{q^2 N_A} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)}$$

NOTA: para obtener las ecuaciones para substratos tipo N, se repite simplemente todo el procedimiento reemplazando N_A con $-N_D$

POTENCIAL Y CAMPO ELÉCTRICO

Cálculo de concentraciones de carga, potenciales y campo eléctrico

Densidad de cargas

$$\rho(x) = q[p(x) - n(x) + N_d^+ - N_a^-]$$

Balance de cargas (móviles e ionizadas)

$$p_{po} - n_{po} = N_d^+ - N_a^-$$

Potencial térmico $\phi t = kT/q$

Potencial normalizado

$$u = \frac{\phi}{\phi t}$$

$$n_p(x) = n_i \cdot e^{-\frac{E_i(x)-E_f}{kT}} = n_i \cdot e^{\frac{\phi_i(x)-\phi_f}{\phi t}} = n_{po} \cdot e^{\frac{\phi(x)}{\phi t}} = n_{po} \cdot e^{u(x)}$$

Concentraciones de cargas móviles – portadores

$$p_n(x) = n_i \cdot e^{\frac{E_i(x)-E_f}{kT}} = n_i \cdot e^{-\frac{\phi_i(x)-\phi_f}{\phi t}} = p_{po} \cdot e^{-\frac{\phi(x)}{\phi t}} = p_{po} \cdot e^{-u(x)},$$

$$\rho(x) = q[p_{po}(e^{-u(x)} - 1) - n_{po}(e^{u(x)} - 1)].$$

Densidad de cargas en función del potencial y su variación en el semiconductor tipo P

POTENCIAL Y CAMPO ELÉCTRICO

Relación del campo eléctrico, el potencial y la densidad de carga: caso de semiconductor tipo P, o sea, $u_f > 0$, el potencial en el substrato es la referencia (0).

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{d^2\phi}{dx^2} = \frac{\rho}{k_s \varepsilon_0},$$

Ecuación de Poisson

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = \frac{d}{dx} \left(\frac{d\phi}{dx} \right) = \frac{d}{d\phi} \left(\frac{d\phi}{dx} \right) \frac{d\phi}{dx},$$
$$\int \frac{d\phi}{dx} d\left(\frac{d\phi}{dx} \right) = -\frac{1}{k_s \varepsilon_0} \int \rho(\phi) d\phi;$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{du}{dx} \right)^2 = \frac{1}{\phi t k_s \varepsilon_0} \int \rho(u) du + C,$$

Cambio de variables:
de posición x al potencial ϕ

El paso clave: multiplicar por $\frac{d\phi}{dx}$:

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{d\phi}{dx} \right)^2 \right) = \frac{d^2\phi}{dx^2} \frac{d\phi}{dx} = -\frac{\rho(\phi)}{\varepsilon} \frac{d\phi}{dx}$$

$$E_s = -\frac{du}{dx} \cdot \phi t = -\phi t \sqrt{\frac{2qn_i}{\phi t k_s \varepsilon_0}} (e^{u_f}(e^{-u} + u - 1) + e^{-u_f}(e^u - u - 1))^{\frac{1}{2}}$$

Campo eléctrico superficial

POTENCIAL Y CAMPO ELÉCTRICO

Campo eléctrico superficial

$$E_s = -\frac{du}{dx} \cdot \phi t = -\phi t \sqrt{\frac{2qn_i}{\phi t k_s \epsilon_0}} (e^{u_f}(e^{-u} + u - 1) + e^{-u_f}(e^u - u - 1))^{\frac{1}{2}}$$

$$E_s(x) = \pm \frac{\phi t}{L_{Di}} F(u, u_f)$$

Si L_{Di} es la longitud de Debye intrínseca

$$L_{Di} = \sqrt{\frac{\phi t k_s \epsilon_0}{2qn_i}}$$

y se define la función F como

$$F_p(u, u_f) \equiv \left[e^{u_f} (e^{-u} + u - 1) + e^{-u_f} (e^u - u - 1) \right]^{\frac{1}{2}}$$

Distribución del potencial – coordenada

$$|x| = L_{Di} \int \frac{du}{F(u, u_f)}$$

La longitud de Debye fue definida por Shockley en 1949 como la longitud del campo localizado dentro del semiconductor, y es igual a:

$$L_D = \sqrt{\frac{\phi t k_s \epsilon_0}{q(n+p)}}$$

POTENCIAL Y CAMPO ELÉCTRICO

Aproximaciones de la función F y de E_s

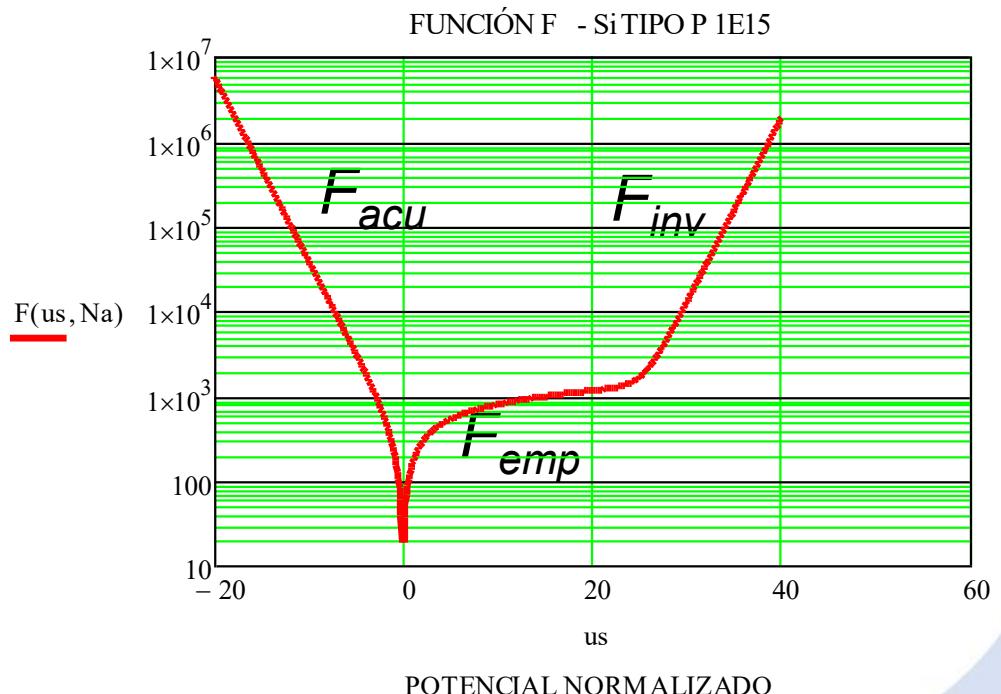
$$E_s(x) = \pm \frac{\phi t}{L_{Di}} F(u, u_f)$$

$$F(u, u_f) \equiv [e^{u_f}(e^{-u} + u - 1) + e^{-u_f}(e^u - u - 1)]^{\frac{1}{2}}$$

$$F_{acu} \cong e^{\frac{u_f}{2}} [e^{|u|} - |u| - 1]^{\frac{1}{2}} \cong e^{\frac{u_f + |u|}{2}}$$

$$F_{emp} \cong e^{\frac{u_f}{2}} [u - 1 + e^{-u}]^{\frac{1}{2}} \cong e^{\frac{u_f}{2}} \sqrt{u}$$

$$F_{inv} \cong e^{\frac{u_f}{2}} [u + e^{u - 2u_f}]^{\frac{1}{2}} \cong e^{\frac{u - u_f}{2}}$$



POTENCIAL Y CAMPO ELÉCTRICO

$$|x| = L_{Di} \cdot \int \frac{du}{F(u, u_f)}$$

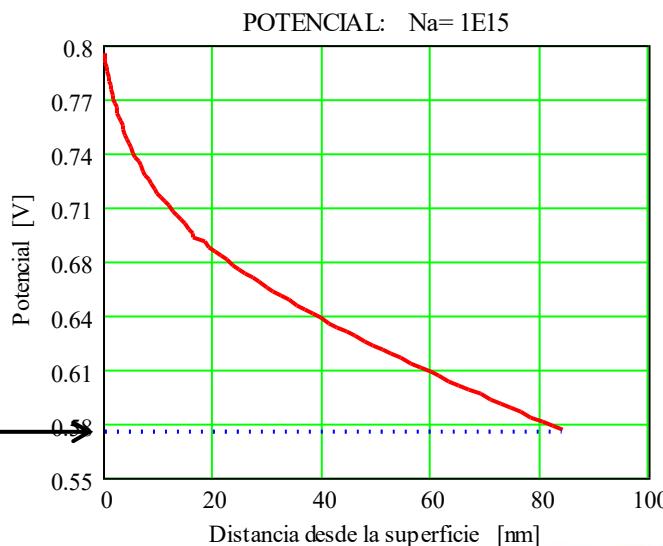
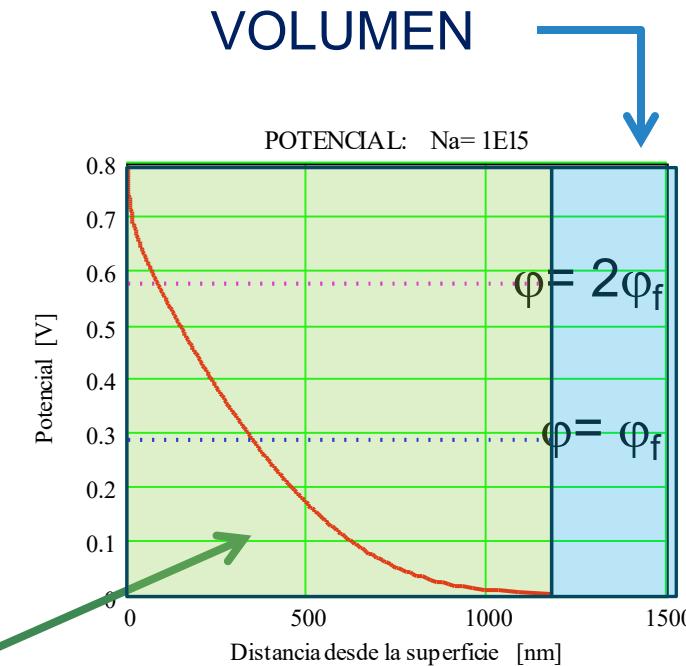
Inversión fuerte →

Inversión débil →

Empobrecimiento →

Toda la zona de carga espacial (ZCE)

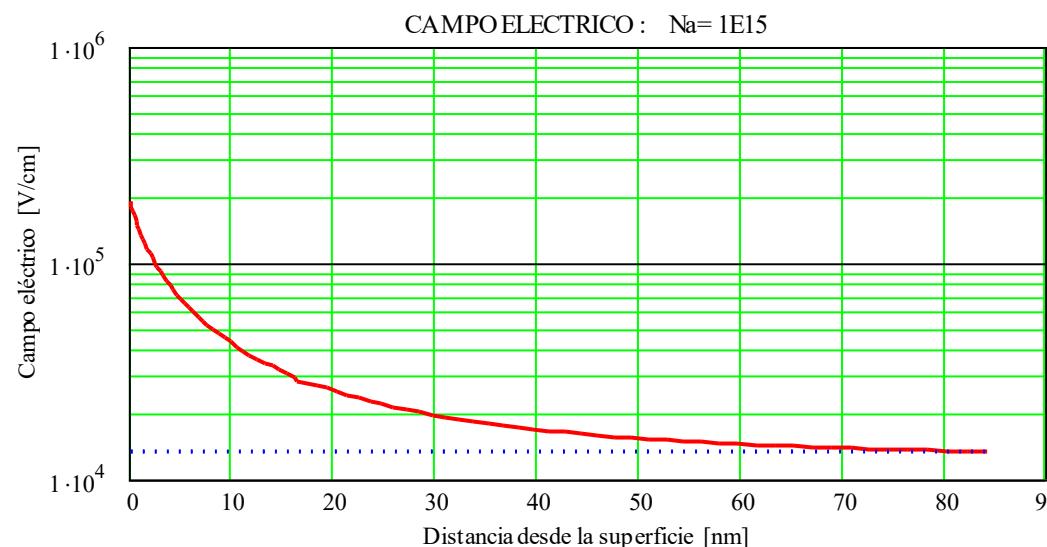
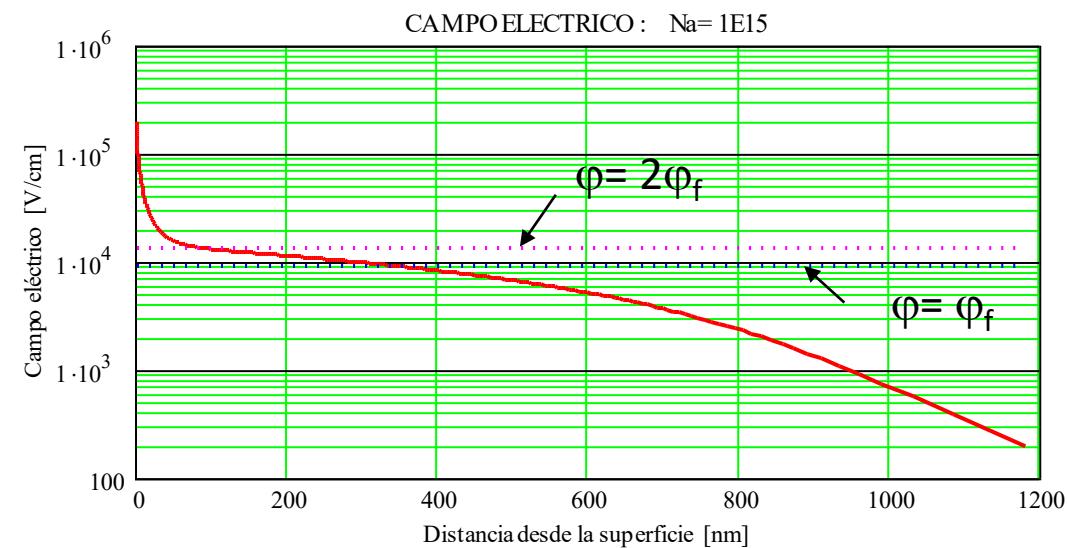
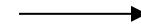
De la superficie a la inversión fuerte: $\varphi=2\varphi_f$ →



POTENCIAL Y CAMPO ELÉCTRICO

Campo eléctrico para el máximo potencial superficial, cuando alcanza el nivel de la banda de conducción E_C

Para $\varphi > 2\varphi_f$



POTENCIAL Y CAMPO ELÉCTRICO

Teorema de Gauss

El flujo del campo eléctrico a través de cualquier superficie cerrada \mathbf{S} es igual a la carga Q_{tot} contenida dentro de la superficie, dividida por la constante dieléctrica ($k \epsilon_0$).

$$\Phi_E = \oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{Q_{tot}}{k_s \epsilon_0}$$

$$\Phi_E = E_S S = \frac{Q_{tot}}{k_s \epsilon_0}$$

Si consideramos la superficie de un semiconductor como una superficie infinita con un campo eléctrico constante la integral del flujo se simplifica considerando que Q_{sem} es la carga total por unidad de área dentro del semiconductor.

$$E_S = \frac{Q}{S} \frac{1}{k_s \epsilon_0} = -\frac{Q_{sem}}{k_s \epsilon_0}$$

POTENCIAL Y CAMPO ELÉCTRICO

Integrando la ecuación de Poisson llegamos a igual resultado que por el teorema de Gauss

Condiciones de frontera

$$\begin{aligned}x = 0, \quad E = E_s; \quad u = u_s, \\x = \infty, \quad E = 0; \quad u = 0.\end{aligned}$$

$$E_s = \int_0^{\infty} \frac{\rho}{k_s \epsilon_0} dx = \frac{1}{k_s \epsilon_0} \int_0^{\infty} \rho(x) dx = -\frac{Q_{sem}}{k_s \epsilon_0} \quad \longrightarrow \quad E_s = \frac{Q}{S u} \frac{1}{k_s \epsilon_0} = -\frac{Q_{sem}}{k_s \epsilon_0}$$

CARGAS

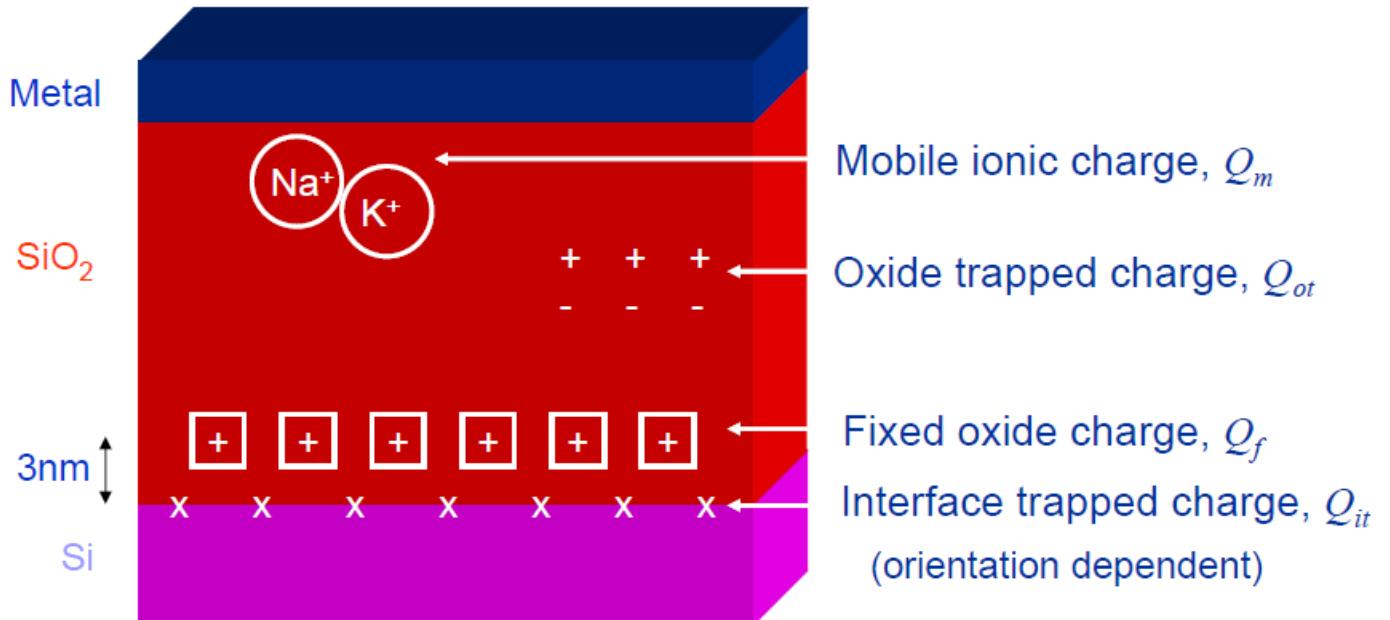
Carga total en el semiconductor

$$Q_{sem} = -k_s \epsilon_0 E_s = \frac{k_s \epsilon_0 \phi t}{L_{Di}} F(u_s, u_f)$$

Carga móvil para huecos y electrones

$$Q_p = \int_0^{\infty} [p(x) - p_{p0}] dx = p_{p0} \int_0^{\infty} (e^{-u} - 1) dx = L_{Di} p_{p0} \int_{u_s}^0 \frac{e^{-u} - 1}{F(u, u_f)} du$$

$$Q_n = \int_0^{\infty} [n(x) - n_{p0}] dx = n_{p0} \int_0^{\infty} (e^u - 1) dx = L_{Di} n_{p0} \int_{u_s}^0 \frac{e^u - 1}{F(u, u_f)} du$$



CARGAS

Q_{sem} en función del potencial superficial normalizado u_s

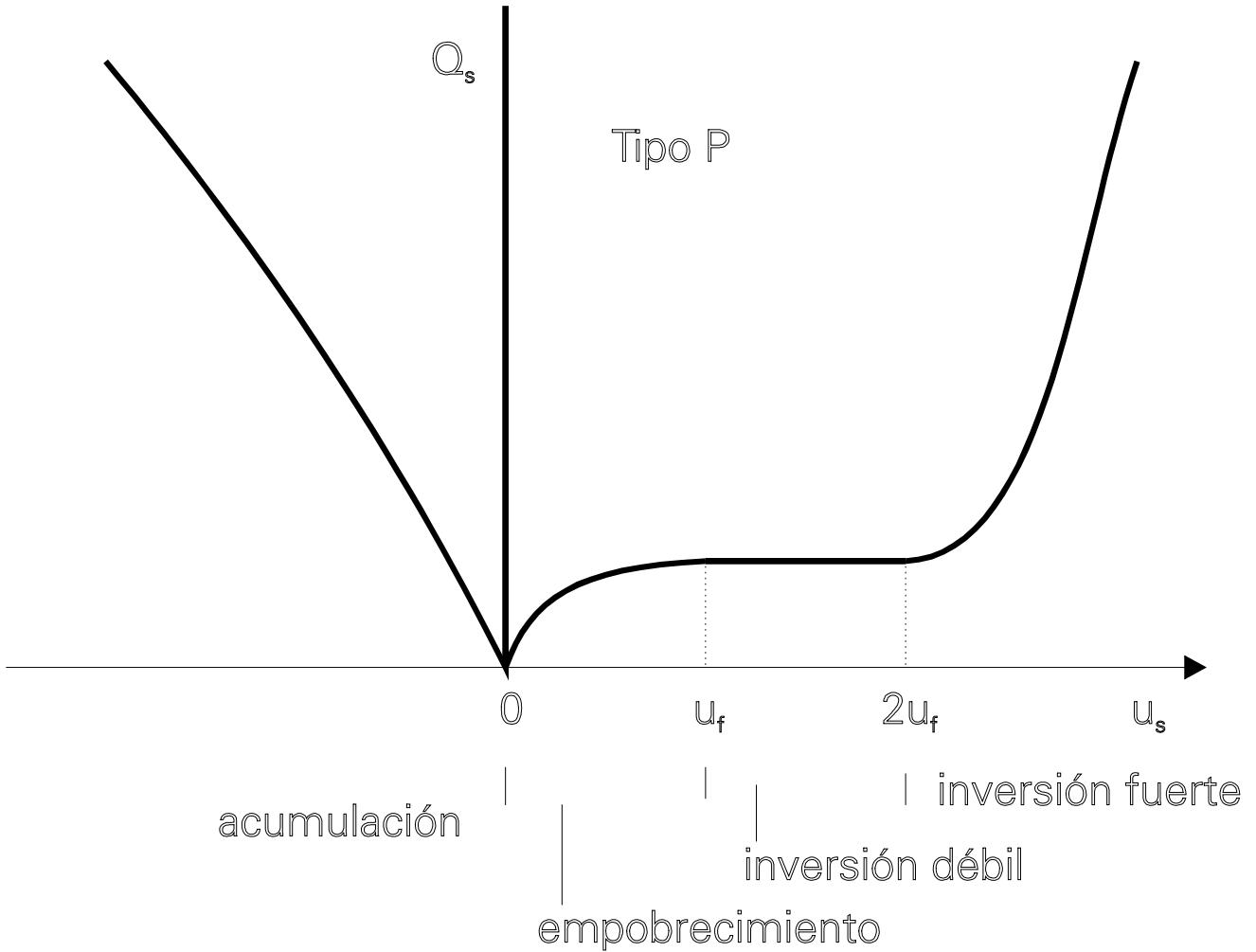


Fig.1.4 Dependencia de la carga total en el semiconductor Q_s del potencial superficial u_s .

CARGAS

Q_{sem} - Concentración de carga total por unidad de área,

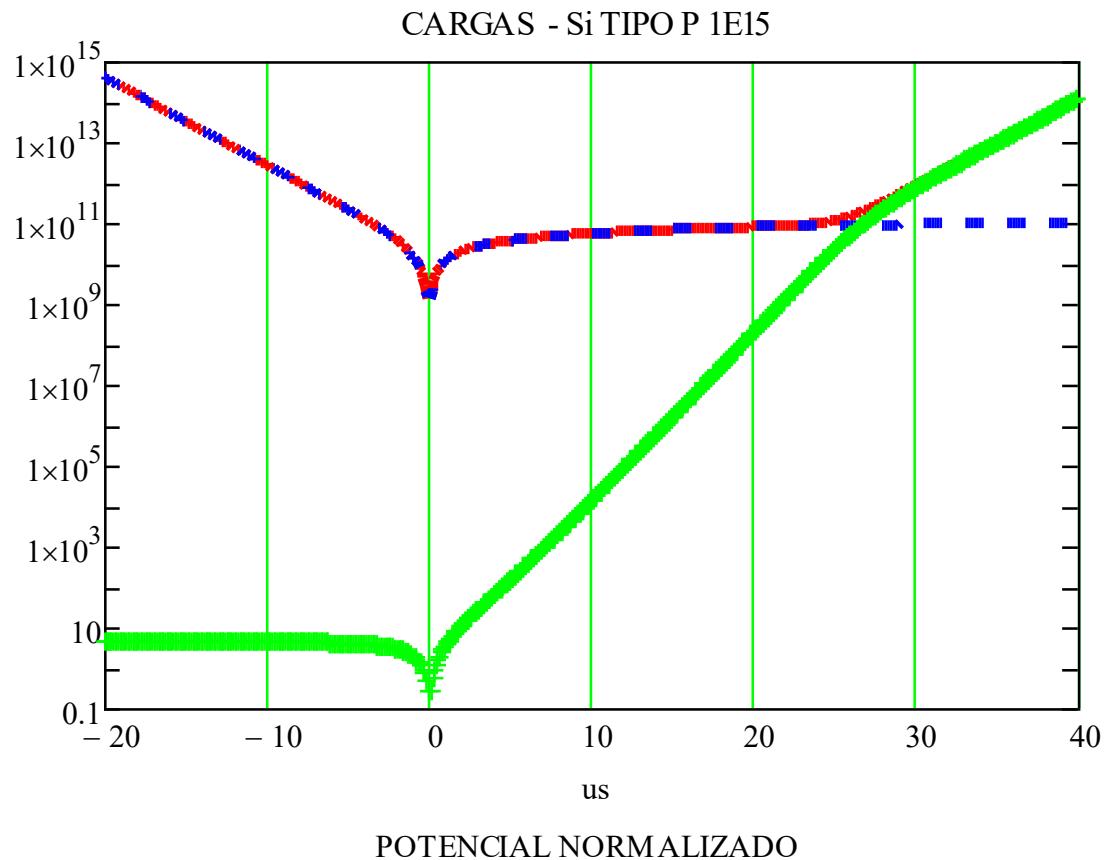
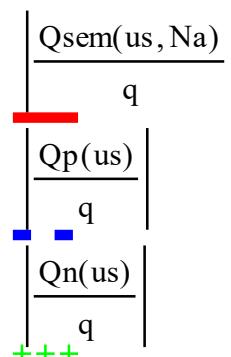
Q_n - Carga de electrones

Q_p - Carga de huecos

para $Na = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

$$u_{2\phi f} = 22.28$$

$$u_{\phi f} = 11.14$$



APROXIMACIÓN DE EMPOBRECIMIENTO

Esta aproximación para el cálculo de las cargas en el semiconductor considera que en la zona de carga espacial (ZCE) solamente hay cargas fijas de los iones del semiconductor, [$\rho = -qN_a$].

Las cargas móviles en esa región de desprecian.

Las cargas **móviles** se consideran **solamente** en la región de **inversión** junto a la interfaz óxido-semiconductor.

Campo eléctrico de la superficie al centro

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{d^2\phi}{dx^2} = \frac{\rho}{k_s \epsilon_0} = \frac{-qN_a}{k_s \epsilon_0},$$



$$E_s(x) = \frac{qN_a x_d}{k_s \epsilon_0} \left(1 - \frac{x}{x_d} \right)$$

Campo eléctrico y potenciales

Variación de potencial superficie-centro

$$\phi(x) = \frac{qN_a x_d^2}{2k_s \epsilon_0} \left(1 - \frac{x}{x_d}\right)^2$$

donde la profundidad máxima de la **ZCE** para $\phi_s = 2\phi_f$ es igual a:

$$x_{d\max} = \sqrt{\frac{2k_s \epsilon_0}{qN_a} (2\phi_f)}$$

Carga fija

$$Q_B = -qN_a x_{d\max}$$

Carga móvil

$$Q_n = Q_{sem} - Q_B$$

Modelo real de la estructura MOS

Modelo real de la estructura MOS

DEFINICIONES

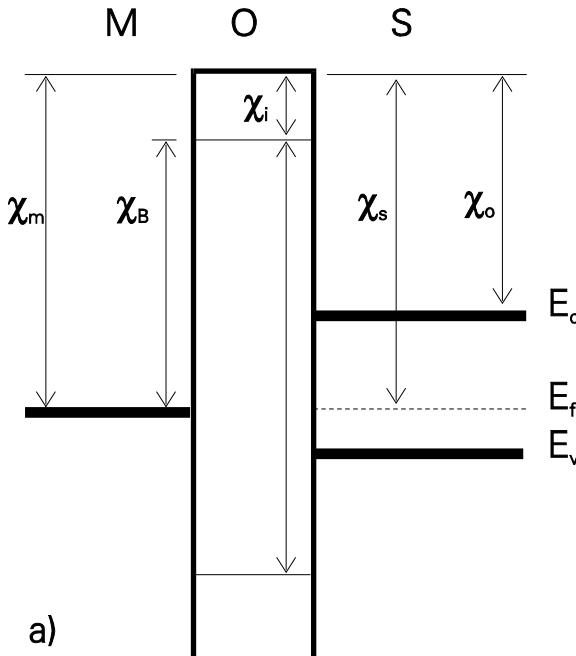
χ_m - trabajo de extracción del metal;
(4.1 eV para Al)

χ_i - trabajo de extracción del aislador;

χ_s - trabajo de extracción del semiconductor, desde E_f ; (4.96 eV para 10^{16} cm^{-3})

χ_o - afinidad del electrón;
(4.05 eV en el Si)

χ_B - barrera de potencial para los electrones en el metal.



a)

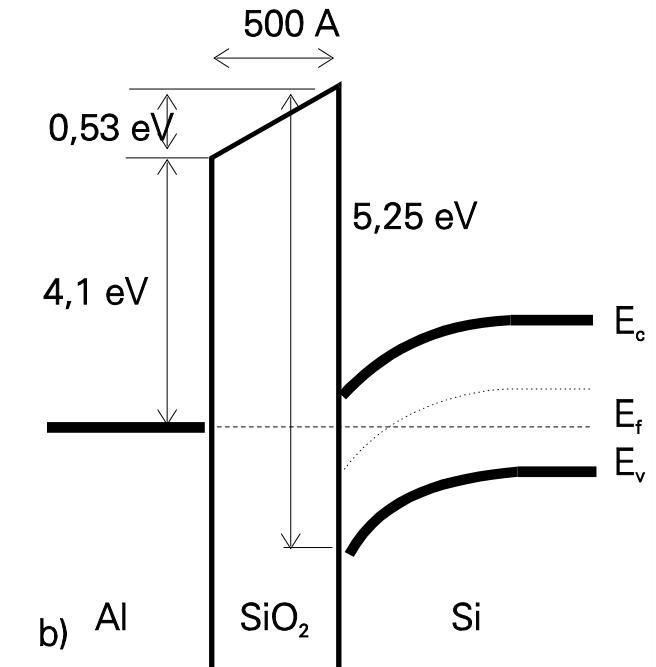


Fig. 1.8 Trabajo de extracción: a) definiciones; b) ejemplo de Al-SiO₂-Si P (10^{16})

1. Diferencia de trabajos de extracción entre el metal y el semiconductor, ϕ_{ms}

$$V_{FB1} = \phi_{ms}$$

Modelo real de la estructura MOS

2. Cargas eléctricas dentro del aislador

Carga **Q** situada en x_q

$$V_{FB2} = E_x x_q = \frac{Q}{k_s \epsilon_0} x_q = -\frac{Q}{C_o x_{ox}} x_q$$

Si **Q** está junto a la interfaz **M-O**, $V_{FB2}=0$

Si **Q** está junto a la interfaz **O-S**, el V_{FB2} es máximo

Carga $\rho(x)$ distribuida

$$V_{FB2} = -\frac{1}{C_o x_{ox}} \int_0^{x_0} x \rho(x) dx$$

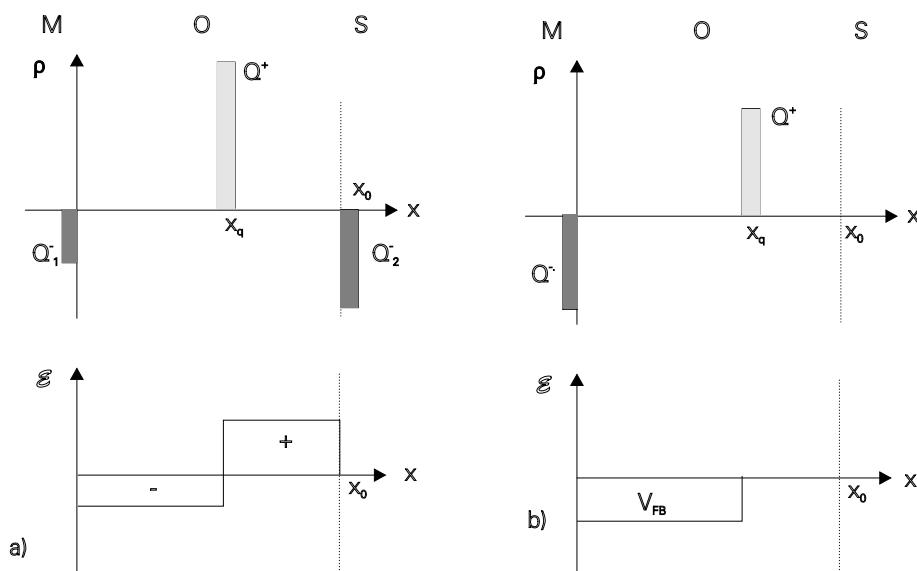
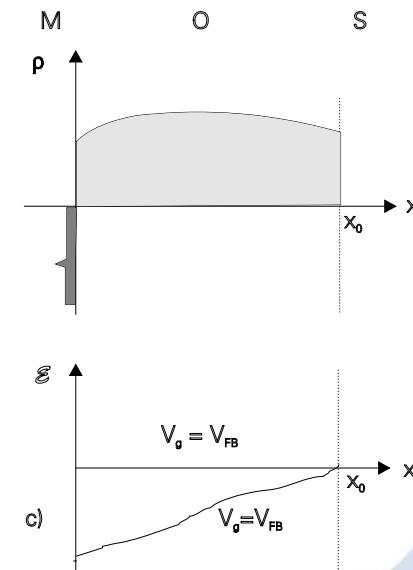


Fig. 1.9 Cargas en el óxido (aislador)

- a) localizadas en el punto x_q
- b) localizadas en la profundidad x_q ;
- c) localizadas en todo el espesor.



Modelo real de la estructura MOS

3. Cargas en la interfaz O-S

- 1) Cargas fijas (iones), Q_f
- 2) Cargas de estados superficiales, Q_{ss} (depende del voltaje de compuerta y puede alterar la característica C-V)

$$V_{FB3} = -\frac{Q_{int \, erfaz}}{C_o}$$

Generalmente se consideran las cargas fijas y móviles despreciables, y en forma convencional se la llama a esta carga como Q_{ss} , o sea, $Q_{interfaz} \approx Q_{ss}$.

$$Q_{int \, erfaz} = Q_f + Q_{ss} | \phi_s = 0$$

$$Q_{int \, erfaz} = Q_f + Q_{ss} | \phi_s = 2\phi_f$$

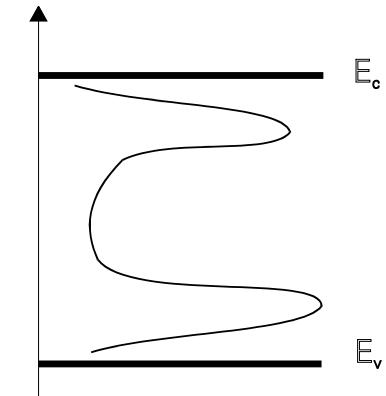


Fig. 1.10 Distribución de estados superficiales en la banda prohibida

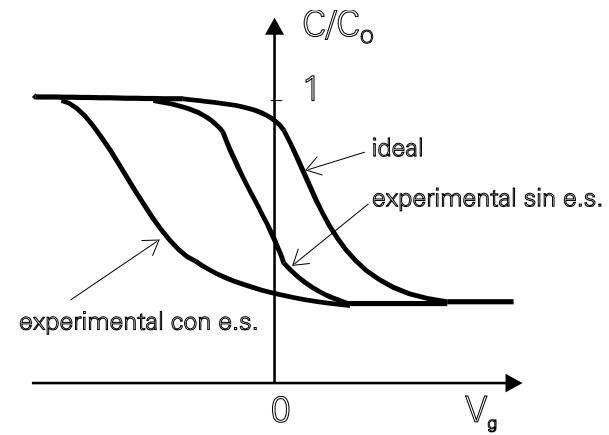


Fig. 1.11 Afectación de la curva C-V por los estados superficiales.

Modelo real de la estructura MOS

Efectos en la estructura MOS que modifican el voltaje de banda plana, V_{FB}

1. Diferencia de trabajos de extracción entre el metal y el semiconductor, φ_{ms} , siempre está presente.
2. Cargas eléctricas dentro del aislador, fijas o móviles, generalmente se consideran despreciables, o sea, ≈ 0 .
3. Cargas en la interfaz O-S que se denominan en forma convencional como Q_{ss} .

$$V_{FB1} = \phi_{ms}$$

$$V_{FB2} = -\frac{1}{C_0 x_{ox}} \int_0^{x_0} x \rho(x) dx$$

$$V_{FB3} = -\frac{Q_{interfaz}}{C_0} = -\frac{Q_{ss}}{C_0}$$

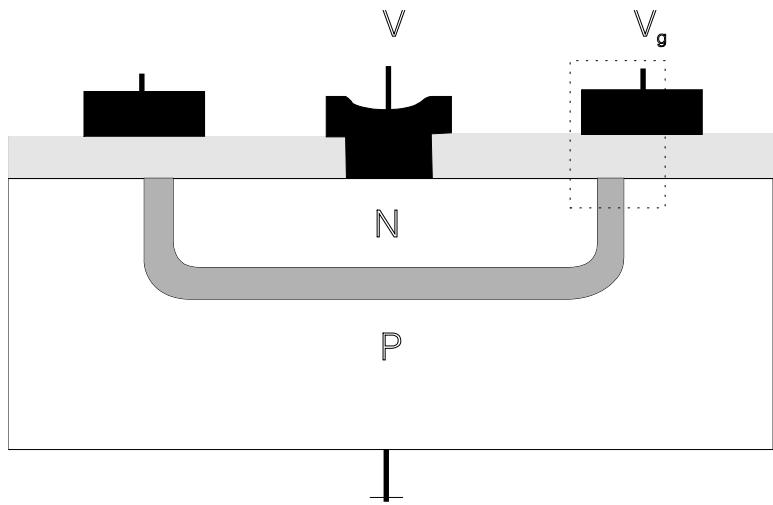
El voltaje total de banda plana V_{FB} será igual a:

$$V_{FB} = \phi_{ms} - \frac{Q_{ss}}{C_0}$$

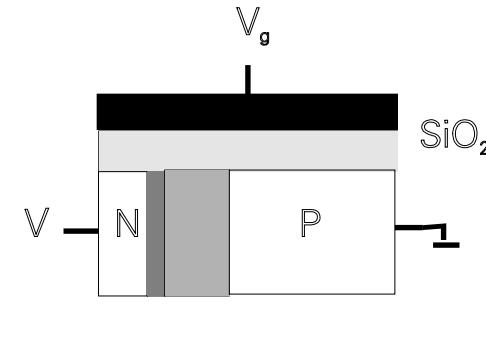


Estructura MOS de tres electrodos ó Diodo controlado por compuerta

Estructura MOS de tres electrodos



a)



b)

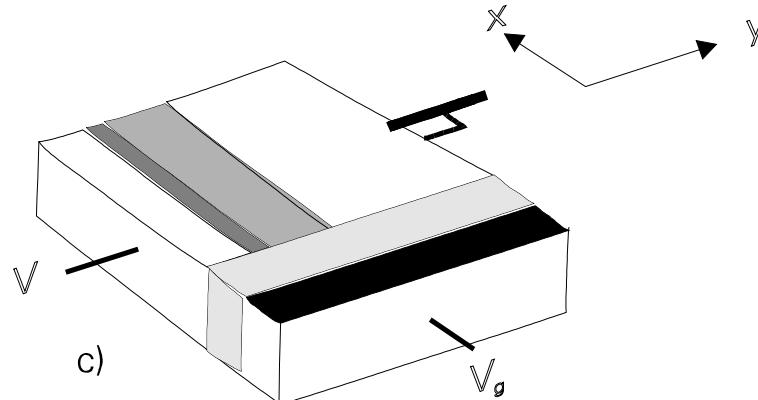


Fig. 1.12 Diodo controlado por compuerta
a) Diagrama general.
b) Ampliación de la zona de juntura
junto a la superficie.
c) Proyección de la zona ampliada.

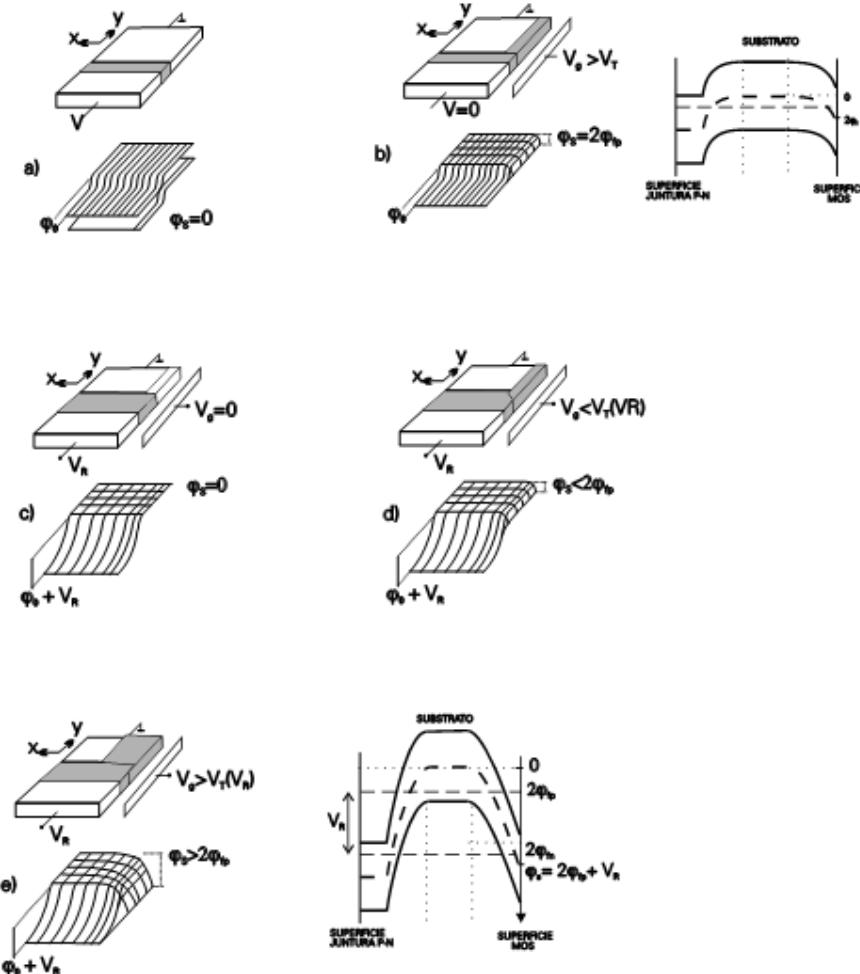
Estructura MOS de tres electrodos

Comportamiento de la unión P-N controlado por una compuerta MOS:

El potencial superficial con la inversión queda interconectado con la región N de la unión, se igualan los niveles de Fermi, caso en equilibrio (b)

$$\phi(x) = \phi_s \left(1 - \frac{x}{x_d}\right)^2; \quad \phi_s = \frac{qN_a x_d^2}{2k_s \varepsilon_o}; \quad x_d = \sqrt{\frac{2k_s \varepsilon_o (2\phi_f + V_R)}{qN_a}}$$

$$\varphi_s \cong 2\phi_f + V_R$$



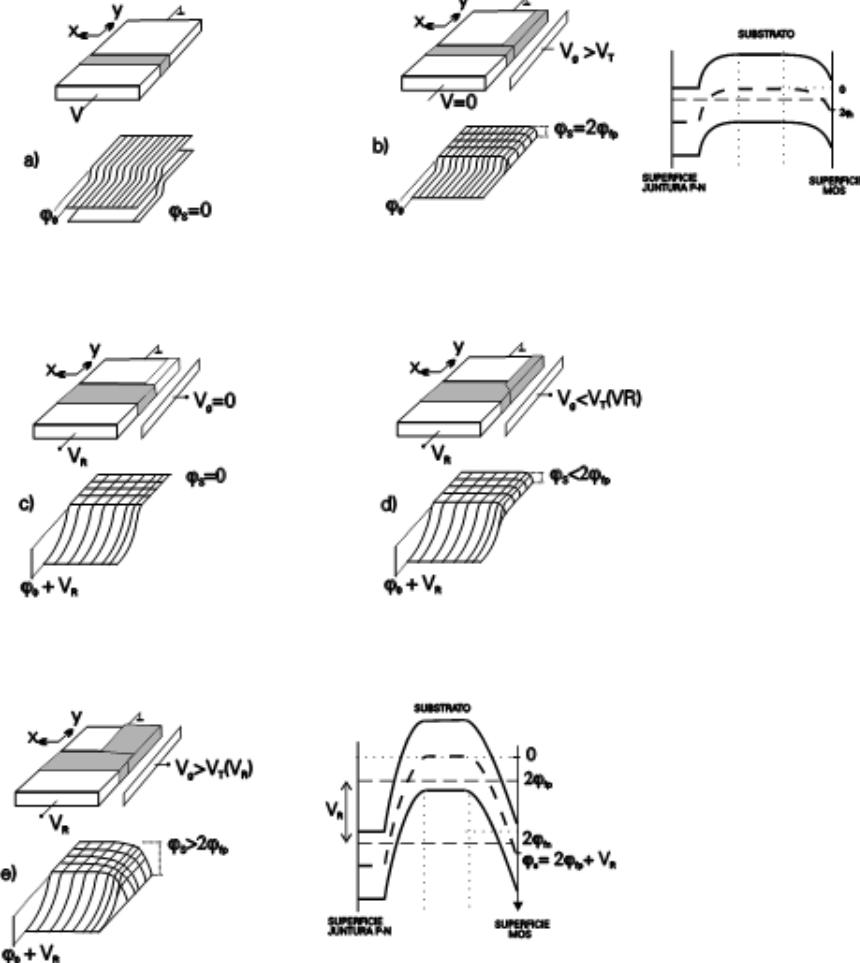
Estructura MOS de tres electrodos

Cuando la compuerta esta invertida y la unión P-N tiene un voltaje aplicado en inversa V_R , o sea, el sistema no esta en equilibrio, se igualan los cuasi-niveles de Fermi como se ve en (e). Esto obliga al potencial superficial, y a la región empobrecida bajo la compuerta x_d , a incrementarse con el mismo valor que V_R .

Como veremos, este efecto es de gran importancia en el funcionamiento del transistor MOS.

$$\varphi_s \cong 2\varphi_f + V_R$$

$$\phi(x) = \frac{qN_a x_d^2}{2k_s \varepsilon_o} \left(1 - \frac{x}{x_d}\right)^2; \quad x_d = \sqrt{\frac{2k_s \varepsilon_o (2\varphi_f + V_R)}{qN_a}}$$





FIN DEL TEMA I