

Clase 9 ¹ - Electrostática de la estructura Metal-Óxido-Semiconductor (I)

Contenido:

1. Introducción a la estructura MOS
2. Electrostática de la estructura MOS sin polarización
3. Electrostática de la estructura MOS con polarización

Lectura recomendada:

Howe and Sodini, Ch. 3, §§3.7-3.8

P. Julian, Introducción a la Microelectrónica, Cap. 4

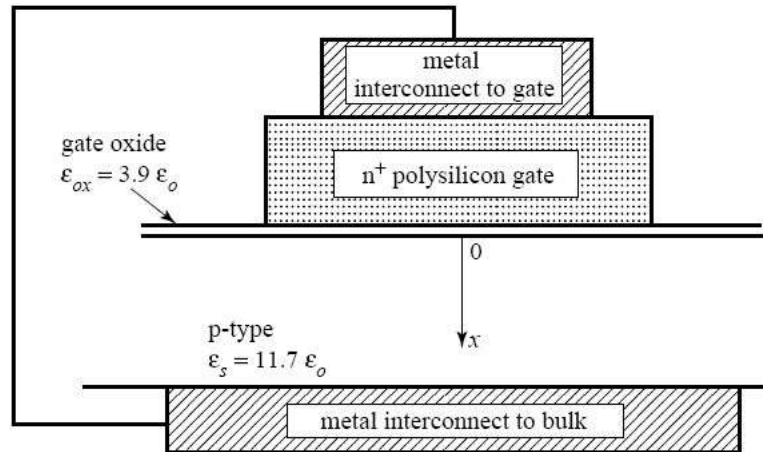
¹Esta clase es una traducción, realizada por los docentes del curso "Dispositivos Semiconductores - FI-UBA", de la correspondiente hecha por el prof. Jesús A. de Alamo para el curso "6.012 - Microelectronic Devices and Circuits" del MIT. Cualquier error debe adjudicarse a la traducción.

Preguntas disparadoras

- ¿Por qué es tan importante estudiar la estructura MOS?
- ¿Cómo es la electrostática de la estructura MOS sin polarización aplicada?
- ¿Cómo se modifica la electrostática de la estructura MOS al aplicar una tensión entre sus terminales?

1. Introducción

Estructura Metal-Óxido-Semiconductor:

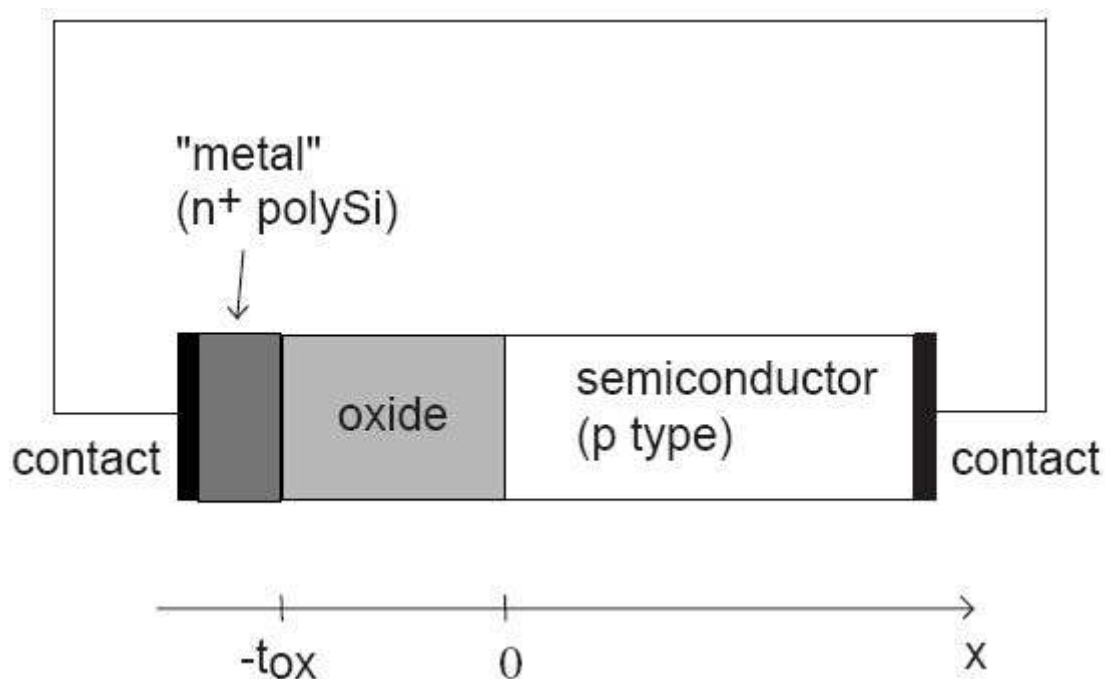


La estructura MOS esta en el corazón de la revolución de la electrónica

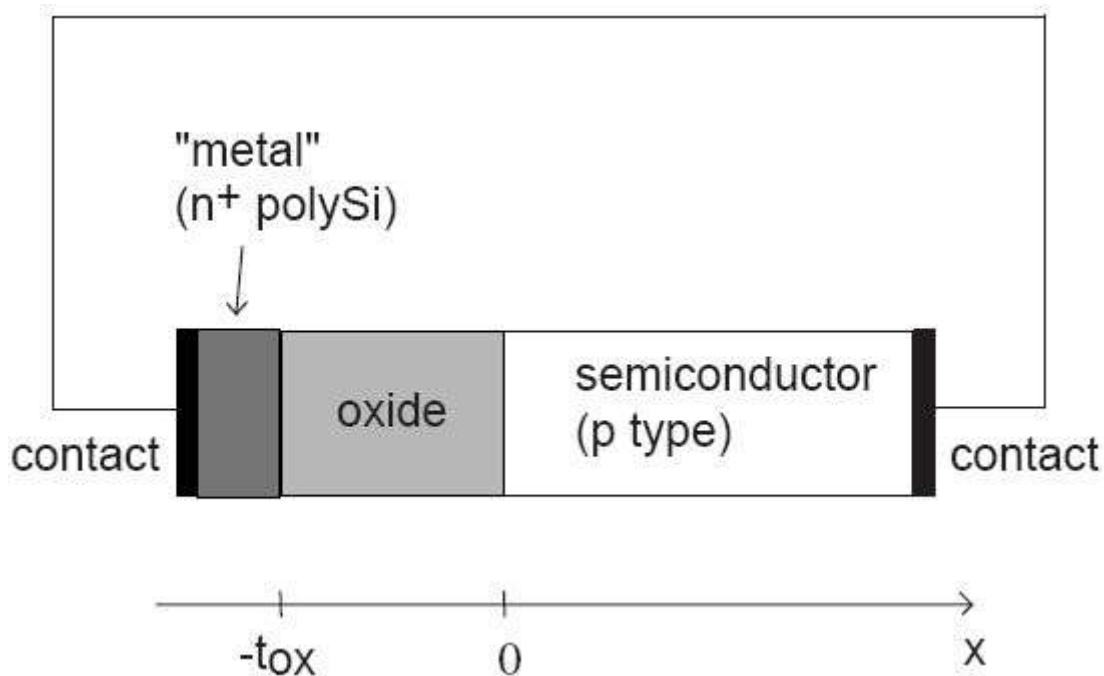
- *Aplicaciones analógicas y digitales:* El transistor MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) es el elemento fundamental de la tecnología CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor)
- *Memorias:* DRAM (Dynamic Random Access Memory), E²PROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) y Flash
- *Imágenes:* Cámaras CCD (Charge-Couple Device) y CMOS
- *Displays:* Pantallas LCD (Liquid-Crystal Displays)

2. Electrostática de la estructura MOS sin polarización

Estructura 1D idealizada:

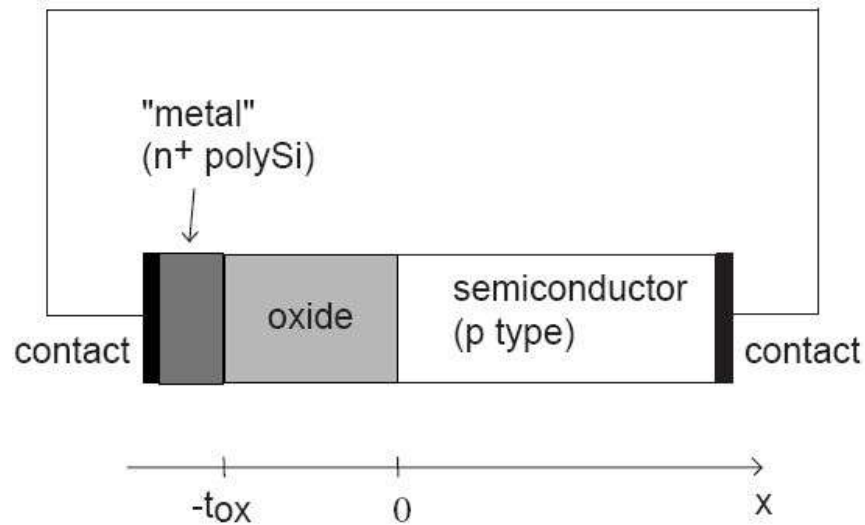


- Metal: no soporta carga en volumen \Rightarrow la carga sólo puede existir en su superficie
- Óxido: es aislante \Rightarrow no soporta carga en volumen (no hay portadores, ni dopantes)
- Semiconductor: soporta carga en volumen

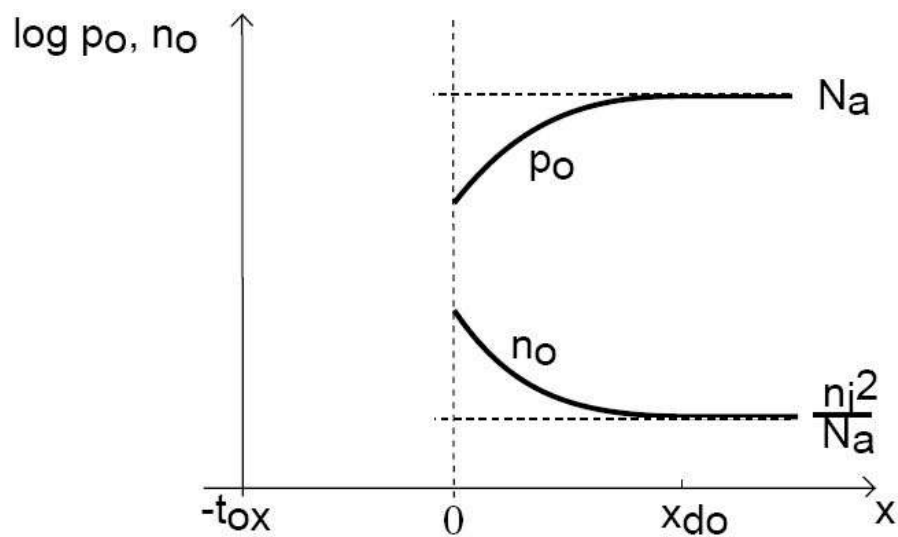


Observaciones:

- La condición de equilibrio no puede establecerse a través del óxido; se requiere de un cable para permitir el movimiento de carga entre el metal y el semiconductor.
- La estructura MOS es un sandwich de 3 materiales con potenciales diferentes \Rightarrow campo eléctrico \Rightarrow acomodamiento de carga \Rightarrow aparece una región de carga espacial.
- La mayoría de los metales al ser colocados sobre p-Si, alcanzan el equilibrio térmico a partir de la difusión de electrones desde el metal hacia el semiconductor y huecos desde el semiconductor hacia el metal.



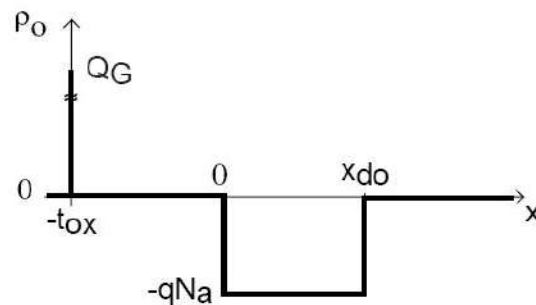
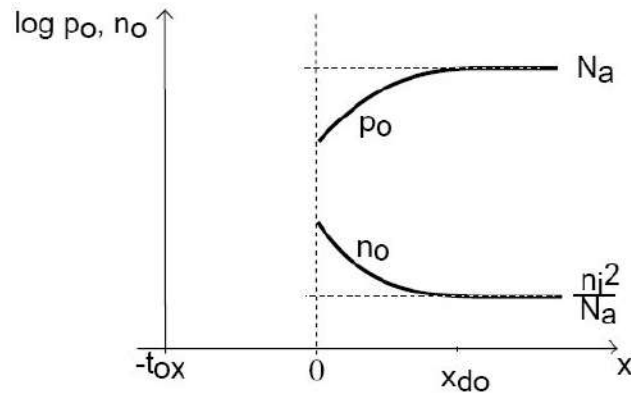
De éste reacomodamiento de carga resulta:



Recordar: $n_o p_o = n_i^2$.

Pocos huecos cerca de la interfaz Si/SiO₂ \Rightarrow quedan expuestos aceptores ionizados y se genera una zona de carga espacial en volumen (SCR) o zona desierta de portadores.

□ DENSIDAD DE CARGA ESPACIAL



- En el semiconductor: La región de carga espacial está próxima a la interfaz Si/SiO₂ \Rightarrow aplicamos *aproximación de vaciamiento*
- En el metal: capa de carga en la interfaz metal/SiO₂
- Neutralidad global de carga eléctrica

$$\begin{array}{ll}
 x \leq -t_{ox} & \rho_o(x) = Q_G \delta(-t_{ox}) \\
 -t_{ox} < x < 0 & \rho_o(x) = 0 \\
 0 < x < x_{do} & \rho_o(x) = -qN_a \\
 x_{do} < x & \rho_o(x) = 0
 \end{array}$$

□ CAMPO ELÉCTRICO

Integramos la Ecuación de Gauss:

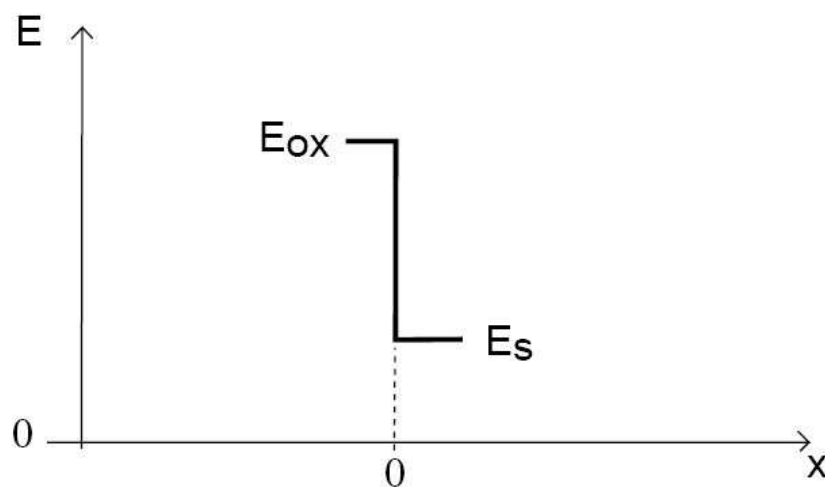
$$E_o(x_2) - E_o(x_1) = \frac{1}{\epsilon} \int_{x_1}^{x_2} \rho_o(x) dx$$

En la interfaz óxido-semiconductor:

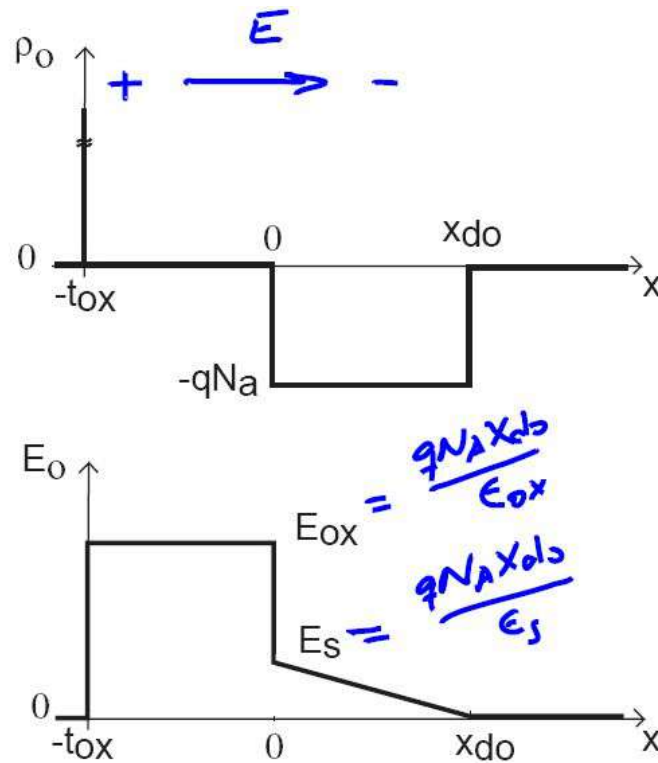
Cambio de permitividad \Rightarrow Cambio en el campo eléctrico

$$\epsilon_{ox} E_{ox} = \epsilon_s E_s$$

$$\frac{E_{ox}}{E_s} = \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{ox}} \simeq 3$$



Integramos desde muy adentro en el semiconductor:



$$x_{do} < x \quad E_o(x) = 0$$

$$0 < x < x_{do} \quad E_o(x) = -\frac{qN_a}{\epsilon_s}(x - x_{do})$$

$$-t_{ox} < x < 0 \quad E_o(x) = \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{ox}} E_o(x = 0^+) = \frac{qN_a x_{do}}{\epsilon_{ox}}$$

$$x < -t_{ox} \quad E_o(x) = 0$$

□ POTENCIAL ELECTROSTÁTICO

$$\phi = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_o}{n_i} \qquad \phi = -\frac{kT}{q} \ln \frac{p_o}{n_i}$$

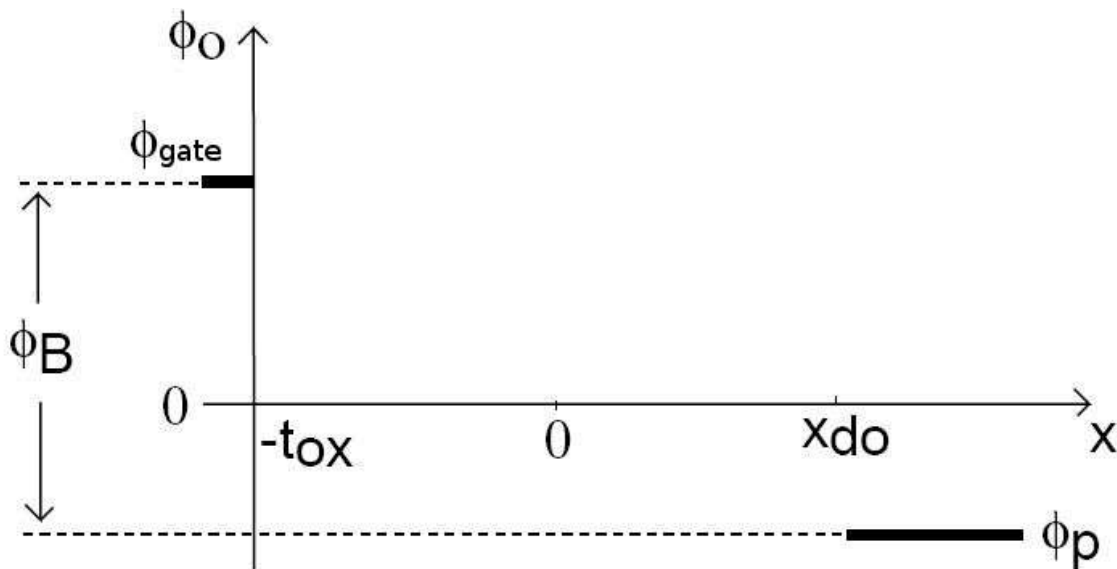
En las regiones QNR, n_o y p_o son conocidos \Rightarrow podemos determinar ϕ .

En el gate (polysilicio dopado tipo n):

$$n_o = N_d \Rightarrow \phi_{gate} = 550mV$$

En semiconductor (sustrato), region QNR tipo p:

$$p_o = N_a \Rightarrow \phi_{sust} = -\frac{kT}{q} \ln \frac{N_a}{n_i}$$

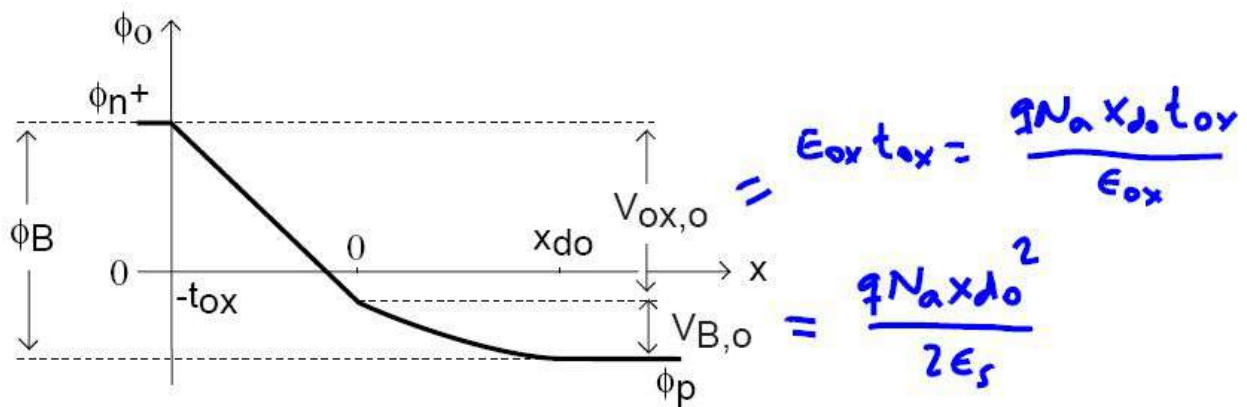
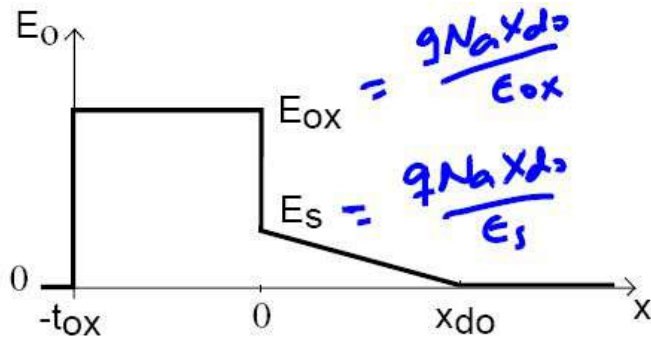


Potencial de juntura:

$$\phi_B = \phi_{gate} - \phi_{sust} = 550mV + \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a}{n_i}$$

Para obtener $\phi_o(x)$ integramos $E_o(x)$; comenzamos desde muy adentro en el semiconductor:

$$\phi_o(x_2) - \phi_o(x_1) = - \int_{x_1}^{x_2} E_o(x) dx$$



$$x_{do} < x \quad \phi_o(x) = \phi_p$$

$$0 < x < x_{do} \quad \phi_o(x) = \phi_p + \frac{qN_a}{2\epsilon_s}(x - x_{do})^2$$

$$-t_{ox} < x < 0 \quad \phi_o(x) = \phi_p + \frac{qN_a x_{do}^2}{2\epsilon_s} + \frac{qN_a x_{do}}{\epsilon_{ox}}(-x)$$

$$x < -t_{ox} \quad \phi_o(x) = \phi_{n+}$$

□ Aún no conocemos $x_{do} \Rightarrow$ necesitamos una ecuación más:

La diferencia de potencial a lo largo de la estructura debe ser ϕ_B :

$$\phi_B = V_{B,o} + V_{ox,o} = \frac{qN_a x_{do}^2}{2\epsilon_s} + \frac{qN_a x_{do} t_{ox}}{\epsilon_{ox}}$$

Resolvemos la ecuación cuadrática:

$$x_{do} = \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{ox}} t_{ox} \left[\sqrt{1 + \frac{2\epsilon_{ox}^2 \phi_B}{\epsilon_s q N_a t_{ox}^2}} - 1 \right]$$

Si consideramos las siguientes definiciones:

Capacidad por unidad de área de óxido [unidades: F/cm^2]:

$$C'_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}$$

y γ (*body factor coefficient*) [unidades: $V^{1/2}$]:

$$\gamma = \frac{1}{C'_{ox}} \sqrt{2\epsilon_s q N_a}$$

Nos queda:

$$x_{do} = \frac{\epsilon_s}{C'_{ox}} \left[\sqrt{1 + \frac{4\phi_B}{\gamma^2}} - 1 \right]$$

□ Ejemplo numérico:

$$N_d = 10^{20} \text{ cm}^{-3}, \quad N_a = 10^{17} \text{ cm}^{-3}, \quad t_{ox} = 8 \text{ nm}$$

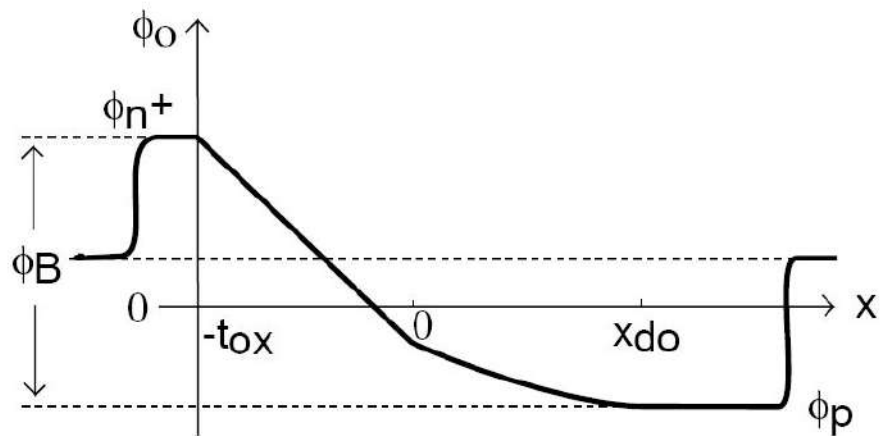
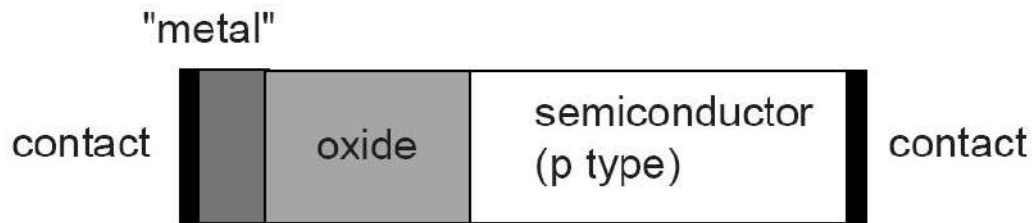
$$\phi_B = 550 \text{ mV} + 420 \text{ mV} = 970 \text{ mV}$$

$$C'_{ox} = 4.3 \times 10^{-7} \text{ F/cm}^2$$

$$\gamma = 0.43 \text{ V}^{1/2}$$

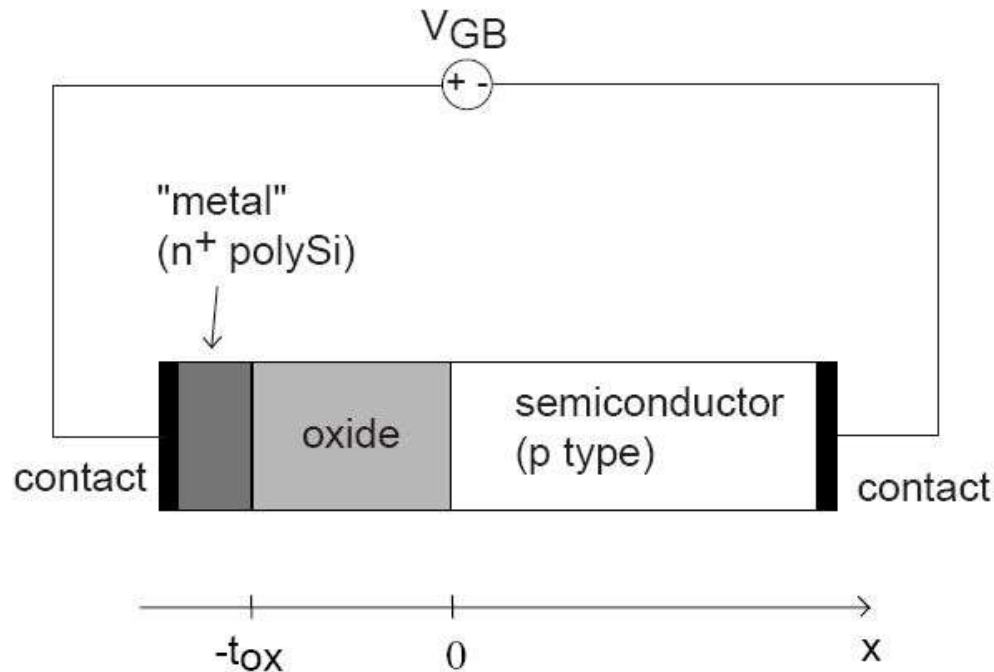
$$x_{do} = 91 \text{ nm}$$

Al considerarse los *potenciales de contacto* de las metalizaciones se tiene que la diferencia de potencial entre contacto y contacto es cero.



3. Electrostática de la estructura MOS con polarización

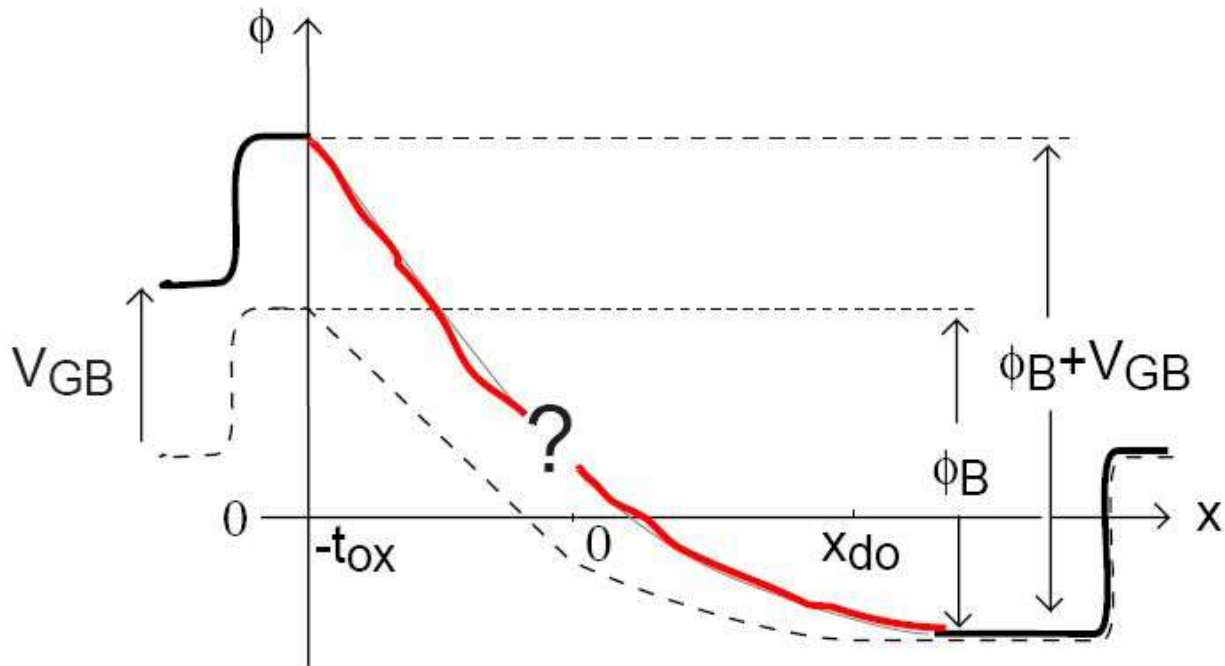
Aplicamos al gate una tensión ligeramente positiva respecto del sustrato semiconductor:



La electrostática del MOS se ve afectada \Rightarrow la diferencia de potencial a lo largo de la estructura ahora es $\neq 0$.

¿Cómo se distribuye la caída de potencial?

La diferencia de potencial se manifiesta a lo largo del óxido y de la región SCR (zona desierta):



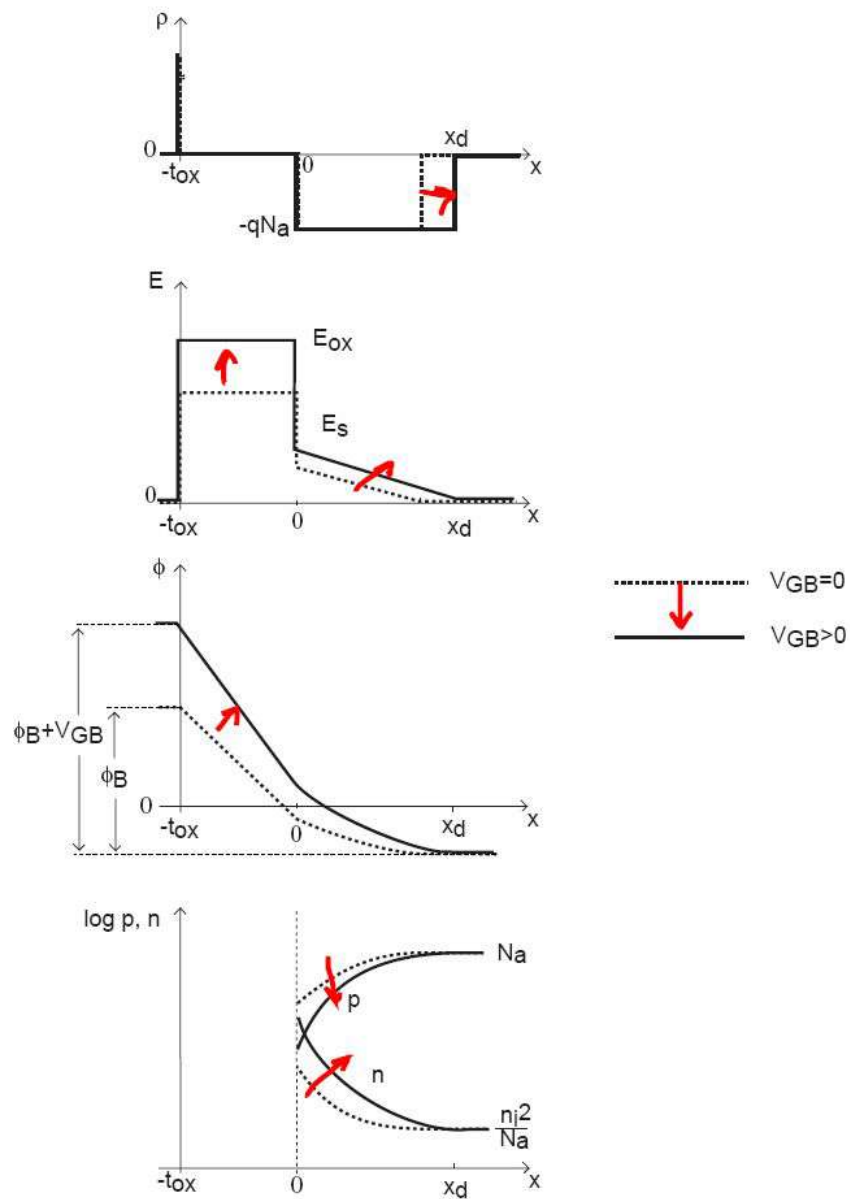
El óxido es un aislante \Rightarrow no hay corriente en la estructura

En la SCR, prevalece una situación de cuasi-equilibrio

\Rightarrow nuevo balance entre las corrientes de arrastre y difusión

- la electrostática es cualitativamente idéntica que sin polarización (pero *la cantidad de carga distribuida es diferente*)
- $n_0 p_0 = n_i^2$

Si V_{GB} es ligeramente > 0 : la diferencia de potencial de la estructura aumenta \Rightarrow mayor dipolo de carga \Rightarrow la SCR debe expandirse:



Cuantitativamente, la física no se modifica cuando V_{GB} es ligeramente > 0 .

Empleamos las mismas ecuaciones que sin polarización, pero:

$$\phi_B \rightarrow \phi_B + V_{GB}$$

Por ejemplo,

$$x_d(V_{GB}) = \frac{\epsilon_s}{C'_{ox}} \left[\sqrt{1 + \frac{4(\phi_B + V_{GB})}{\gamma^2}} - 1 \right]$$

$$V_{GB} \uparrow \rightarrow x_d \uparrow$$

Principales Conclusiones

- La distribución de cargas en una estructura MOS sin polarizar:
 - Región de carga espacial en el semiconductor
 - Potencial de juntura a lo largo de la estructura MOS.
- En la mayoría de los casos podemos hacer la aproximación de vaciamiento en el semiconductor.
- Al aplicar una tensión se modula la extensión de la región de vaciamiento, pero no circula corriente.