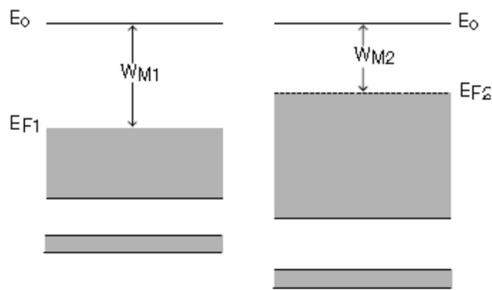
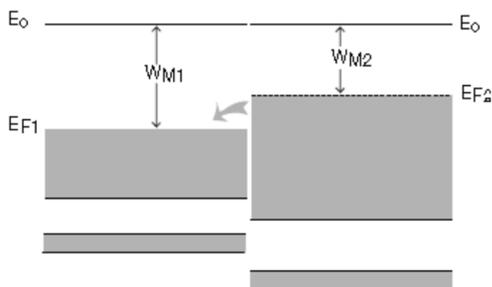


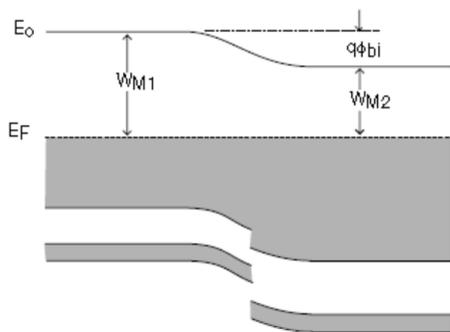
Giunzione metallo – metallo: situazione ideale semplificata



Due metalli lontani l'uno dall'altro



Due metalli subito prima del contatto



Due metalli dopo il contatto:

Livello di vuoto localmente diverso
(Cfr. estrazione fotoelettrica: $h\nu$ diversi)

E_0 livello del vuoto

E_F livello di Fermi

W_{M1}, W_{M2} funzioni di lavoro dei metalli

(En. necessaria a staccare un elettrone dal cristallo)

→ Comparsa di una *differenza di potenziale di contatto*

$\phi_{bi} = W_{M1} - W_{M2}$ potenziale built-in

Origine della discontinuità nel potenziale al confine fra i due metalli:

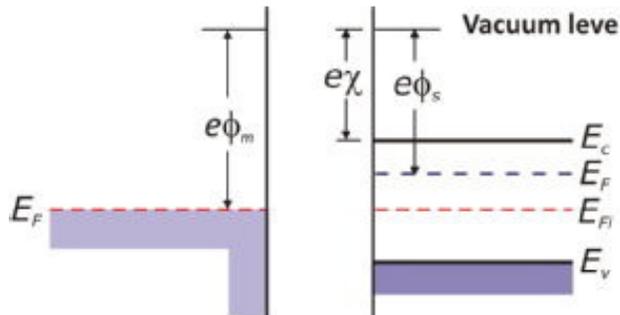
Flusso iniziale di elettroni dal metallo con W minore a quello

con W maggiore → Carica spaziale $+va$ e $-va$

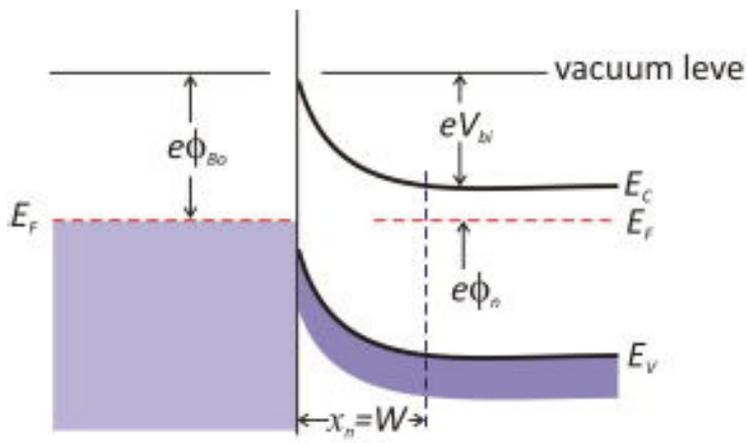
→ Doppio strato → Discontinuità

Giunzione metallo – semiconduttore

Giunzione Schottky : $\phi_m > \phi_s$



Metallo e semiconduttore n
lontani l'uno dall'altro



Metallo e semiconduttore n
in contatto

Differenza fra funzioni di lavoro:

$$V_{bi} = \phi_m - \phi_s \quad \text{potenziale built-in}$$

$$\chi \text{ affinita' chimica} = \phi_s - (E_C - E_F) = \phi_s - \phi_n$$

$$\rightarrow \phi_{Bo} = \phi_m - \chi \quad \text{Barriera di Schottky}$$

$\phi_{Bo} \neq \phi_n$: Band bending a causa dell'unicita' del livello di Fermi

$$\rightarrow \phi_{Bo} = V_{Bi} + \phi_n$$

$$\phi_{Bo} \sim 0.3 \div 0.8 \text{ V}$$

Elettrostatica della giunzione Schottky (analoga a giunzione pn)

Densita' di carica:

$$x_d \equiv x_n$$

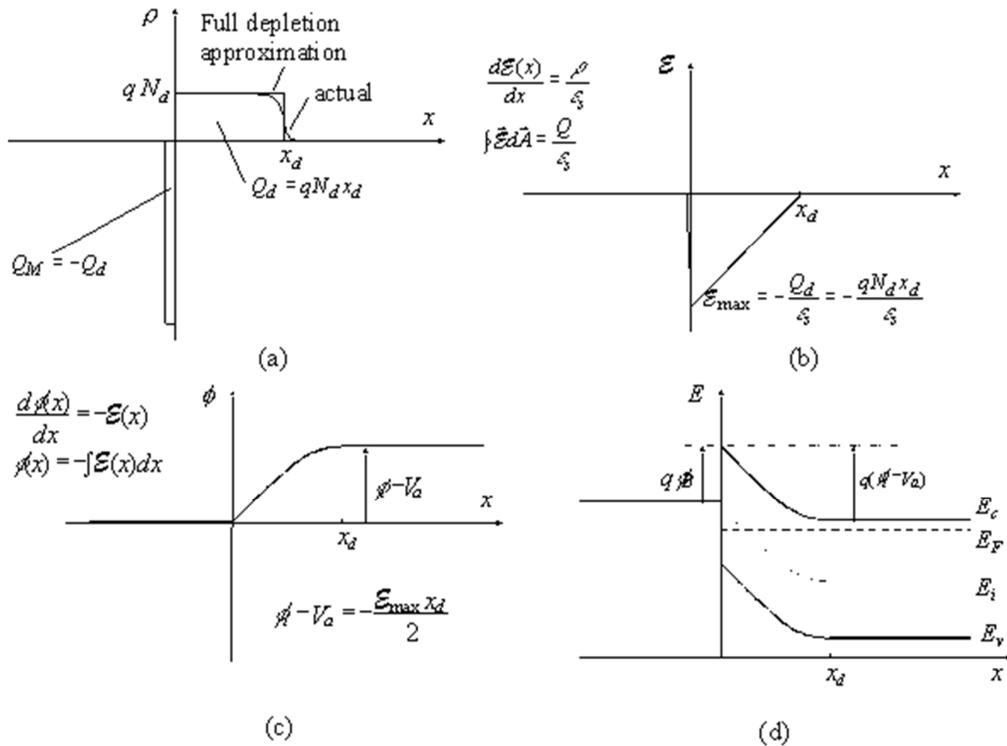
$$\rho(x) \approx \begin{cases} qN_D & 0 \leq x \leq x_d \\ 0 & x > x_d \end{cases}$$

C. elettrico:

$$E(x) \approx \begin{cases} \frac{qN_D}{\epsilon} (x - x_d) & 0 \leq x \leq x_d \\ 0 & x > x_d \end{cases}$$

Pot. elettrostatico

$$\phi(x) \approx \begin{cases} \frac{qN_D}{2\epsilon} (x^2 - 2xx_d + x_d^2) & 0 \leq x \leq x_d \\ 0 & x > x_d \end{cases}, \phi = 0 \text{ nel metallo}$$



$$\phi(0) = -\phi_{bi}$$

$$\rightarrow x_d = \sqrt{\frac{2\varepsilon\phi_{bi}}{qN_D}} \text{ larghezza strato di svuotamento}$$

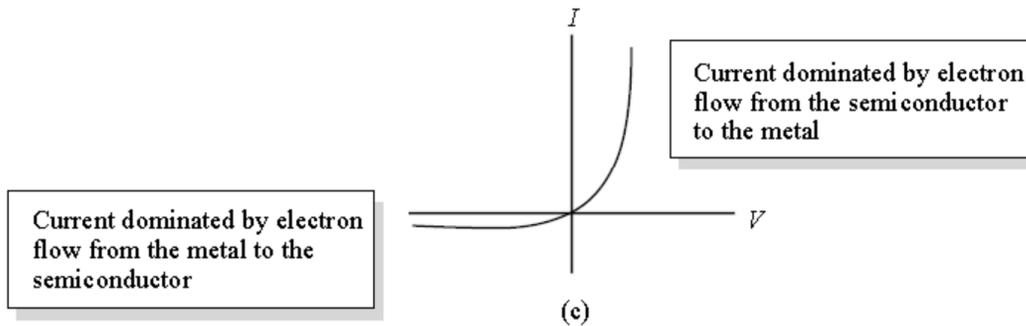
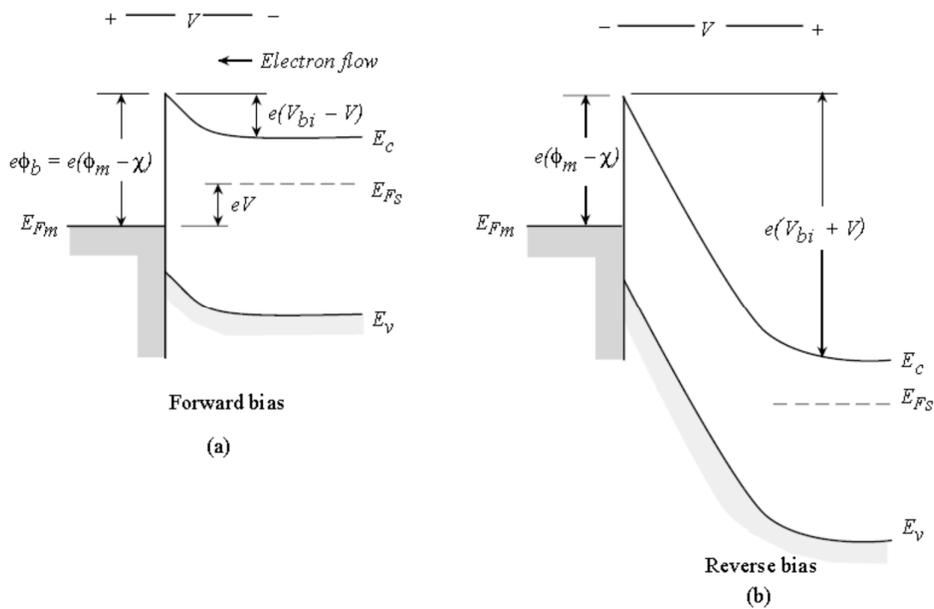
$$E_{\max} = \frac{qN_D x_d}{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2qN_D\phi_{bi}}{\varepsilon}} \text{ c. elettrico max}$$

$$n_0(x) = N_D e^{\frac{q\phi(x)}{kT}} \text{ concentrazione all'equilibrio}$$

$$\rightarrow n_0(0) = N_D e^{-\frac{q\phi_{bi}}{kT}}$$

Effetto di una polarizzazione esterna: simile a giunzione *pn*

Tuttavia, meccanismo di trasporto diverso: tunneling invece di diffusione



Rel. corrente-tensione:

$$I = I_s (e^{V/V_T} - 1) \rightarrow \text{Proprietà' rettificanti simili a giunzione } pn$$

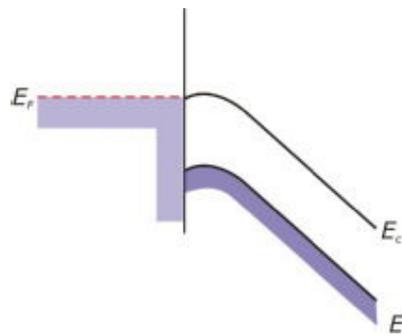
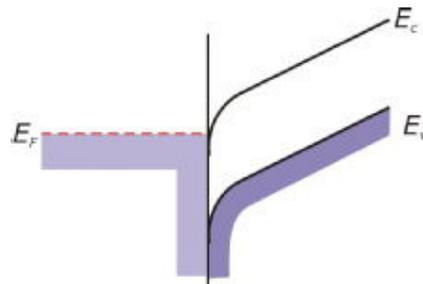
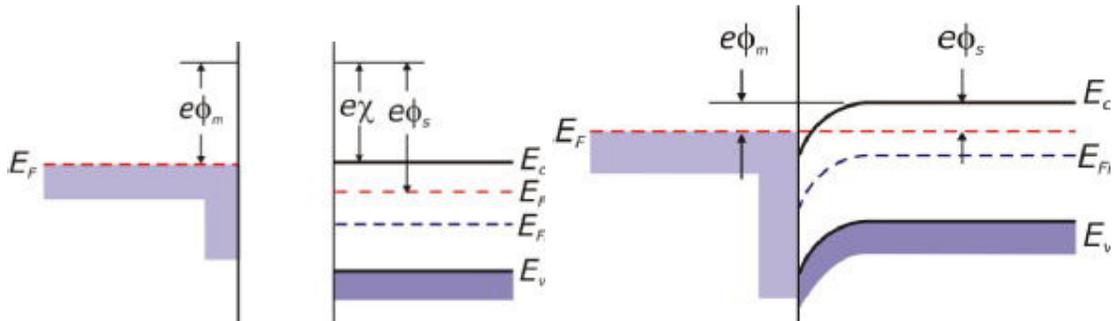
$$I_s = A \frac{m^* e k^2}{2\pi^2 h^3} T^2 e^{-\phi_b/V_T}, \quad A \text{ area giunzione}$$

Corrente inversa: *Non* dovuta ad attivazione termica di portatori

Meccanismo di *tunneling* simile a emissione termoionica da metallo riscaldato

Giunzione metallo – semiconduttore

Giunzione ohmica: $\phi_m < \phi_s$

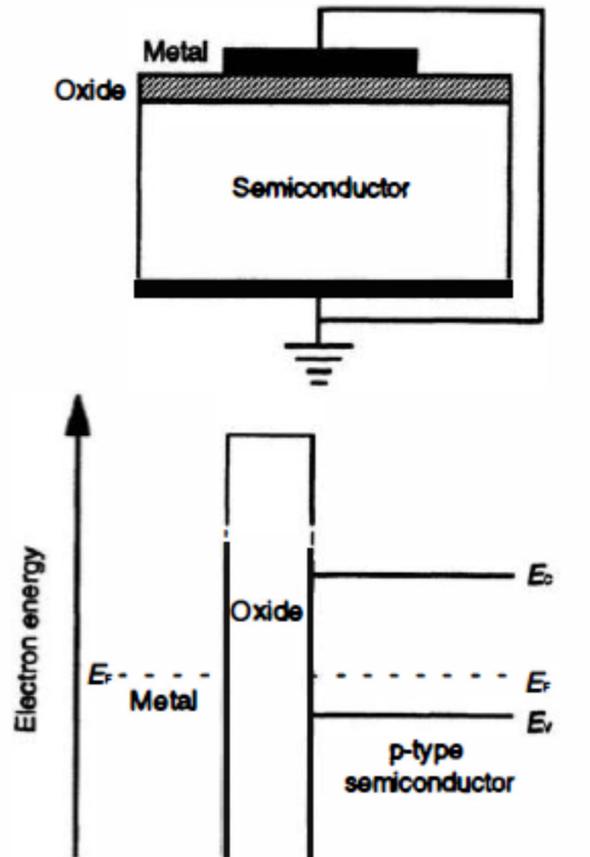


→ Assenza di proprietà rettificanti

Giunzione Metallo – Ossido (=isolante) – Semiconduttore :

Realizzata sotto forma di *condensatore MOS*

Situazione all'equilibrio:



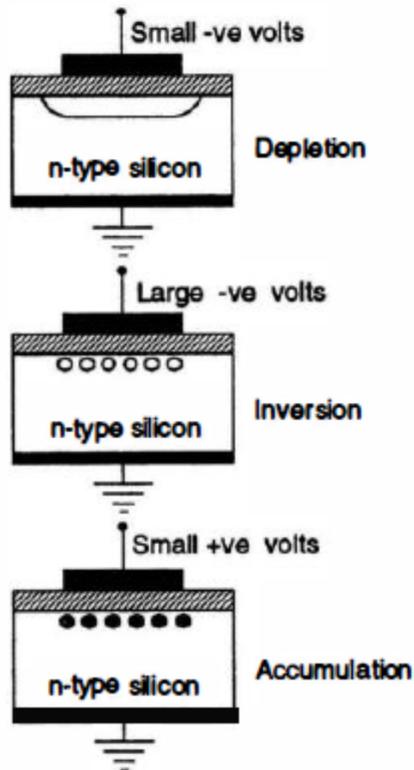
Gap nell'ossido $\sim 10 \text{ eV} \gg$ Gap nel semiconduttore

Situazione fuori equilibrio:

Tensione sul gate:

-va → Svuotamento, Inversione

+va → Accumulazione



Carica -va sul gate → Repulsione elettrostatica

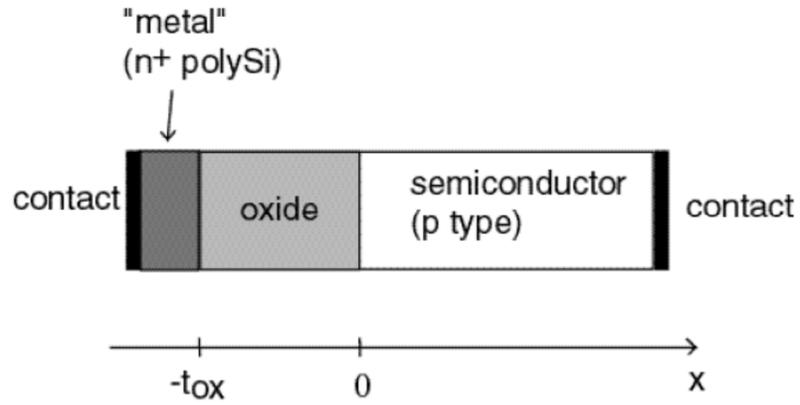
Strato di svuotamento si allarga con V_G

→Capacita' equivalente

Carica --va sul gate → Energeticamente favorita raccolta di *lacune* all'interfaccia

Carica +va sul gate → Repulsione elettrostatica

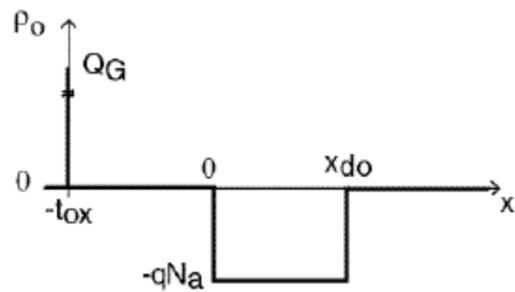
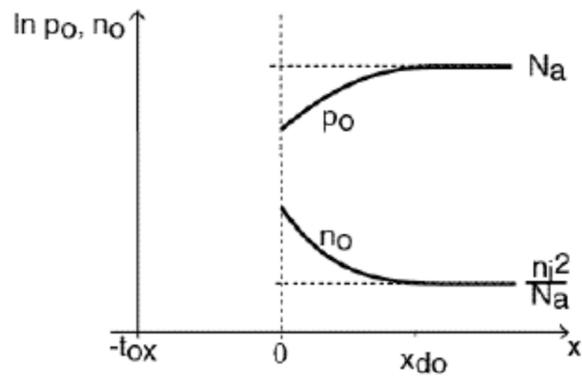
→ Accumulazione di *elettroni* all'interfaccia



Contatto ohmico fra M e S

→ Trasferimento di elettroni $M \rightarrow S$, lacune $S \rightarrow M$

→ Carica spaziale



$$\sigma = Q_G \quad x = -t_{ox} \quad \text{carica superficiale sul metallo}$$

$$\rho_0(x) = 0 \quad -t_{ox} < x < 0$$

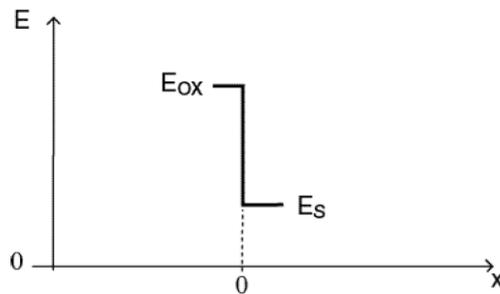
$$\rho_0(x) = -qN_A \quad 0 < x < x_{d0}$$

$$\rho_0(x) = 0 \quad x > x_{d0}$$

$$E_0(x_2) - E_0(x_1) = \frac{1}{\epsilon} \int_{x_1}^{x_2} \rho_0(x') dx' \quad \text{c. elettrico}$$

$$\epsilon_{ox} E_{ox} = \epsilon_s E_s \quad \text{cons. componente normale di } \mathbf{E} \text{ fra due mezzi}$$

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



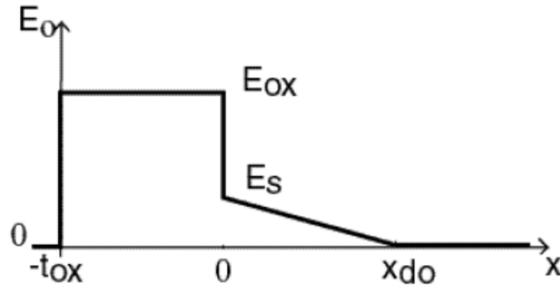
→ C. elettrico vs x:

$$E_0(x) = 0 \quad x < -t_{ox}$$

$$E_0(x) = \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{ox}} E_0(x=0^+) = \frac{qN_A x_{d0}}{\epsilon_{ox}} \quad -t_{ox} < x < 0$$

$$E_0(x) - E_0(x_{d0}) = \frac{1}{\epsilon_s} \int_{x_{d0}}^x (-qN_A) dx' = -\frac{qN_A}{\epsilon_s} (x - x_{d0}) \quad 0 < x < x_{d0}$$

$$E_0(x) = 0 \quad x > x_{d0}$$



Valori limite del potenziale nel metallo e nel semiconduttore:

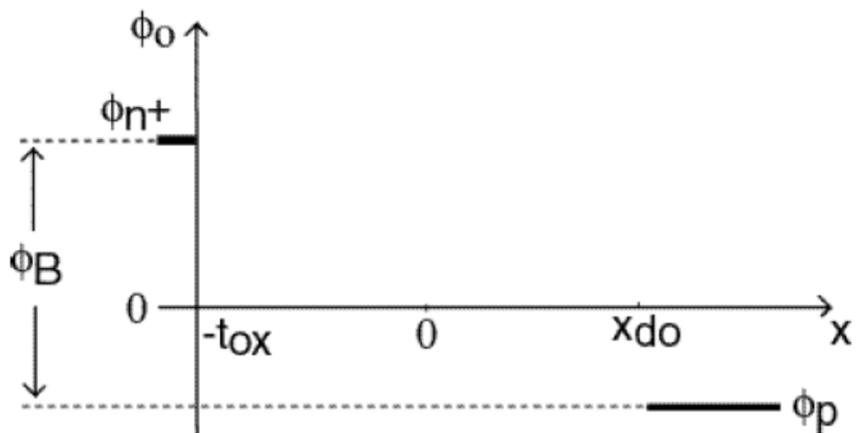
$$\phi = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_0}{n_i} \quad \text{metallo}$$

$$n_0 = N_D^+ \rightarrow \phi_{n^+} = \phi_G = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_D^+}{n_i}$$

$$\phi = -\frac{kT}{q} \ln \frac{p_0}{n_i} \quad \text{semiconduttore}$$

$$p_0 = N_A \rightarrow \phi_p = -\frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i}$$

$$\rightarrow \phi_G - \phi_p = \phi_{n^+} + \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} \equiv \phi_{bi} \quad (\equiv \phi_B \text{ nei grafici})$$



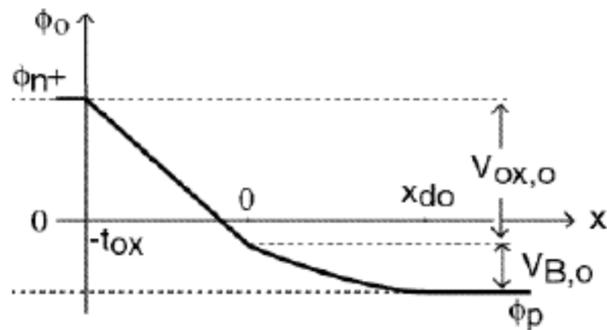
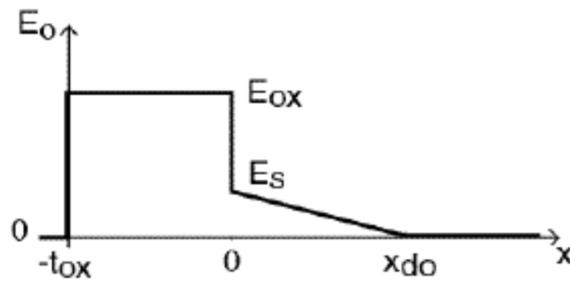
$$\phi_0(x) = \phi_{n^+} \quad x < -t_{ox}$$

$$\phi_0(x) = \phi_p + \frac{qN_A}{2\epsilon_s} x_{d0}^2 + \frac{qN_A x_{d0}}{\epsilon_{ox}} (-x) \quad -t_{ox} < x < 0$$

$$\phi_0(x) - \phi_0(x_{d0}) = - \int_{x_{d0}}^x - \frac{qN_A}{\epsilon_s} (x' - x_{d0}) dx'$$

$$\rightarrow \phi_0(x) = \phi_p + \frac{qN_A}{2\epsilon_s} (x - x_{d0})^2 \quad 0 < x < x_{d0}$$

$$\phi_0(x) = \phi_p \quad x > x_{d0}$$



Per determinare x_{0d} :

$$\rightarrow \phi_B = V_{sc} + V_{ox} = \frac{qN_A x_{0d}^2}{2\epsilon_s} + \frac{qN_A t_{ox} x_{0d}}{\epsilon_{ox}}$$

$$\rightarrow x_{0d} = \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{ox}} t_{ox} \left(\sqrt{1 + \frac{2\epsilon_{ox}^2 \phi_B}{q\epsilon_s N_A t_{ox}^2}} - 1 \right)$$

Definendo

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \quad \text{capacita'/unita' di superficie}$$

$$\rightarrow x_{0d} = \frac{\epsilon_s}{C_{ox}} \left(\sqrt{1 + \frac{2C_{ox}^2 \phi_B}{q\epsilon_s N_A}} - 1 \right)$$

