

Dispositivi Elettronici

Il sistema MOS

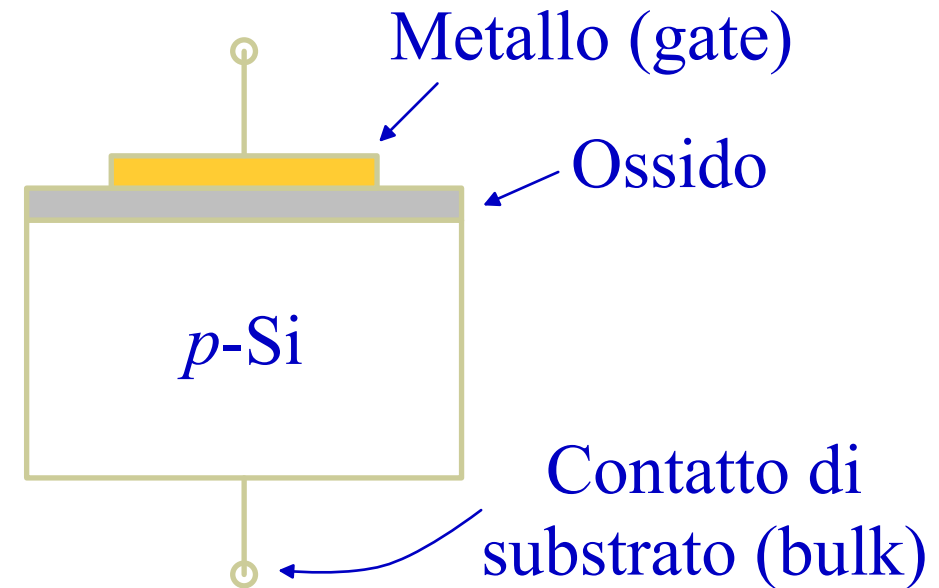
Il sistema MOS - substrato p

■ *Il sistema MOS è formato dalla giunzione di*

- ◆ metallo
- ◆ ossido
- ◆ semiconduttore

■ *Nei processi di fabbricazione MOS attualmente in produzione:*

- ◆ l'ossido è SiO_2
- ◆ l'ossido è molto sottile ($\leq 40 \text{ \AA}$)
- ◆ il metallo è sostituito con silicio policristallino drogato n^+ (**poly**)

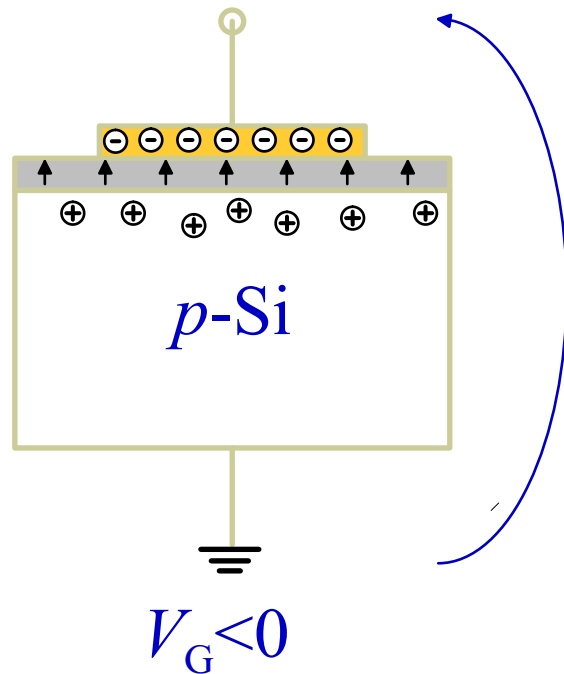


Analisi qualitativa

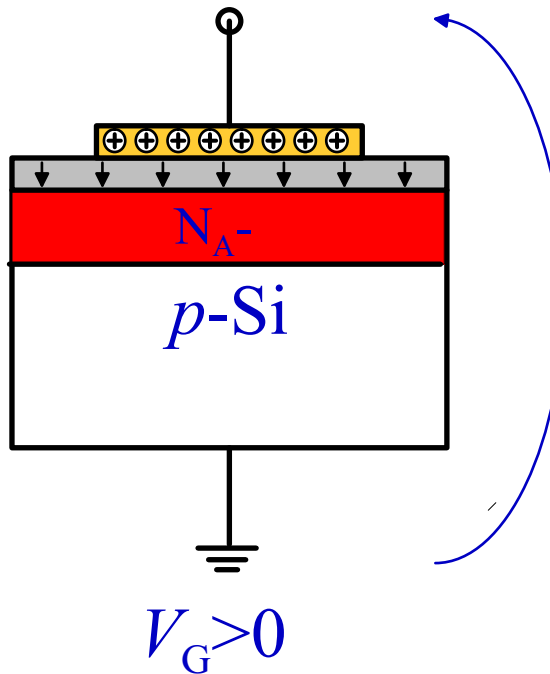
- *Il sistema MOS si può interpretare come un condensatore*
 - ◆ una armatura è costituita dal metallo mentre l'altra è costituita dal semiconduttore drogato p
 - ◆ applicando la tensione V_G tra il metallo e il substrato le armature si caricano
- *Si hanno tre regioni di funzionamento*
 - ◆ $V_G < 0$ accumulo
 - ◆ $V_G > 0$ svuotamento
 - ◆ $V_G \gg 0$ inversione

Analisi qualitativa

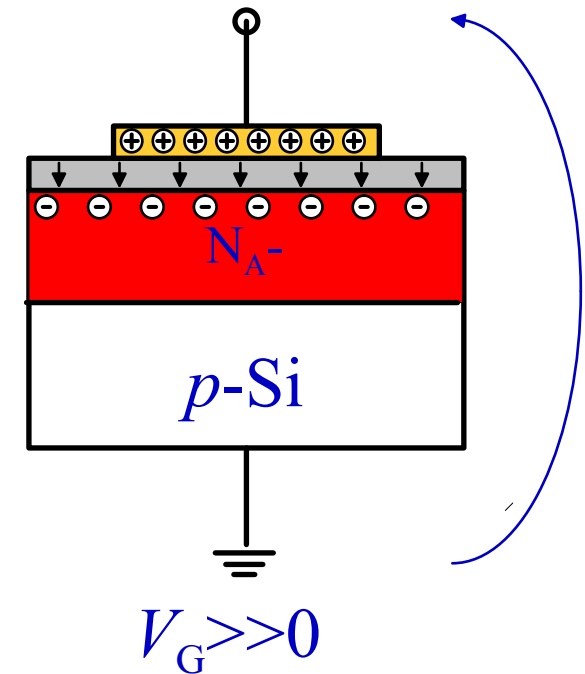
Accumulo di lacune



Svuotamento di lacune



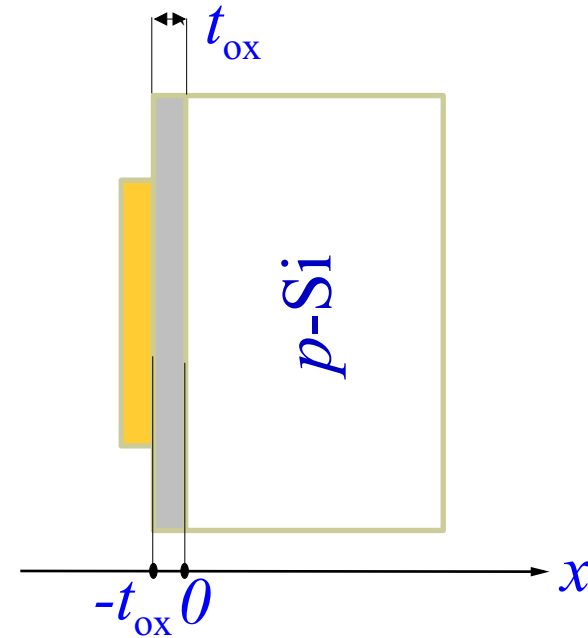
Inversione



- *in regime di inversione si crea uno strato di **elettroni liberi** all'interfaccia tra ossido e semiconduttore*

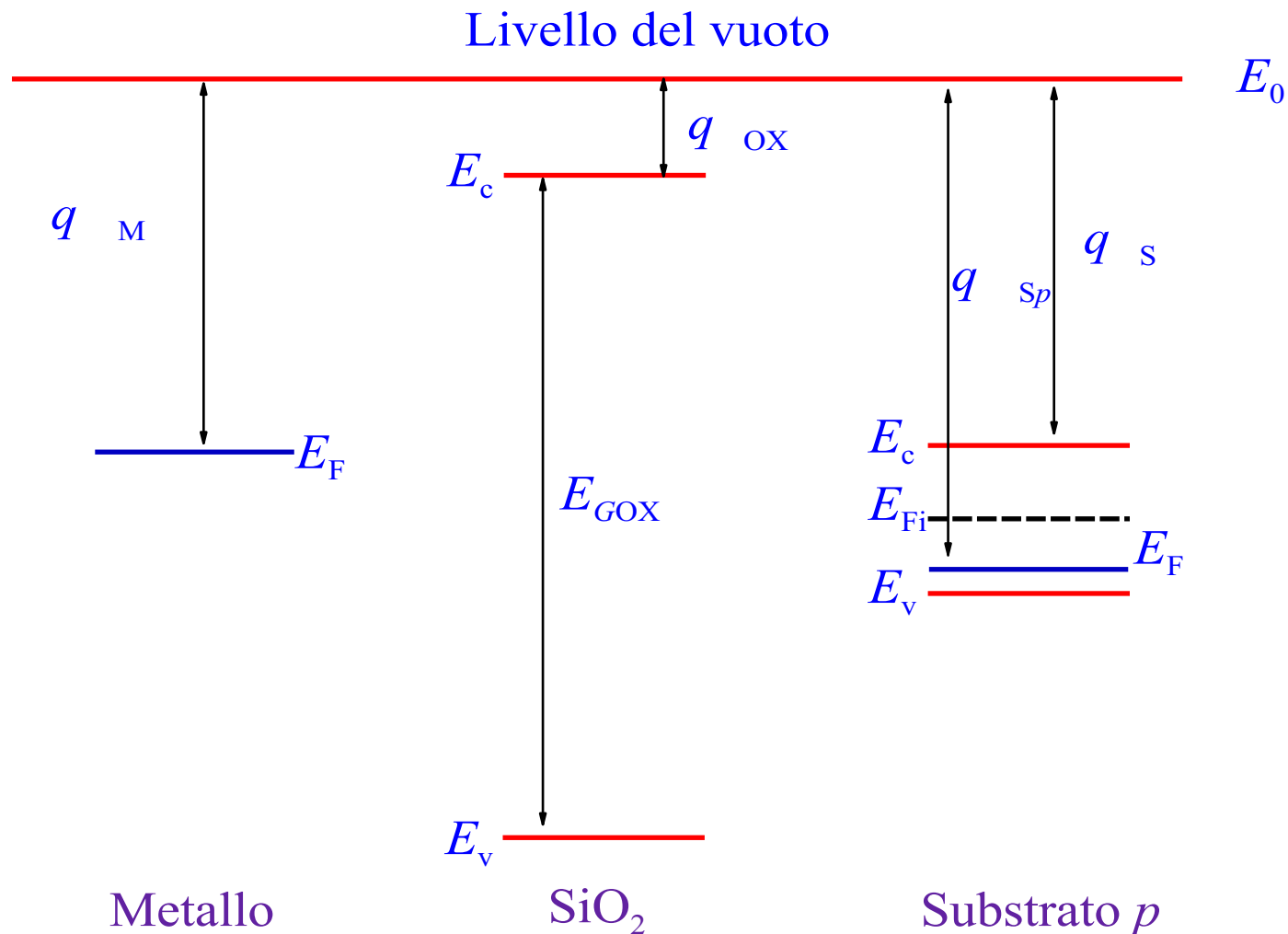
Analisi quantitativa

- Consideriamo il sistema **MOS con substrato drogato di tipo p** .
- Si consideri per primo il caso dell'equilibrio termodinamico ($V_G = 0$)
- Si definisce t_{ox} lo spessore dell'ossido e si sceglie l'asse x con origine all'interfaccia **OX-SEM**



Struttura a bande

- *La struttura a bande dei materiali separati è:*



Lavoro di estrazione

■ *Nel lato del semiconduttore*

$$q\Phi_{Sp} = q\chi_s + E_g - (E_F - E_v) = q\chi_s + E_g - k_B T \ln \frac{N_v}{N_A}$$

- ◆ Per un substrato p con drogaggio $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ si ha $q\Phi_{Sp} \simeq 5 \text{ eV}$.

■ *Il lavoro di estrazione del metallo è:*

- ◆ $q\Phi_M \simeq 4.1 \text{ eV}$ se si utilizza alluminio
- ◆ $q\Phi_M \simeq q\chi_s = 4.05 \text{ eV}$ se si utilizza n^+ -poly

■ *Alla formazione della giunzione **il livello di Fermi deve essere costante***

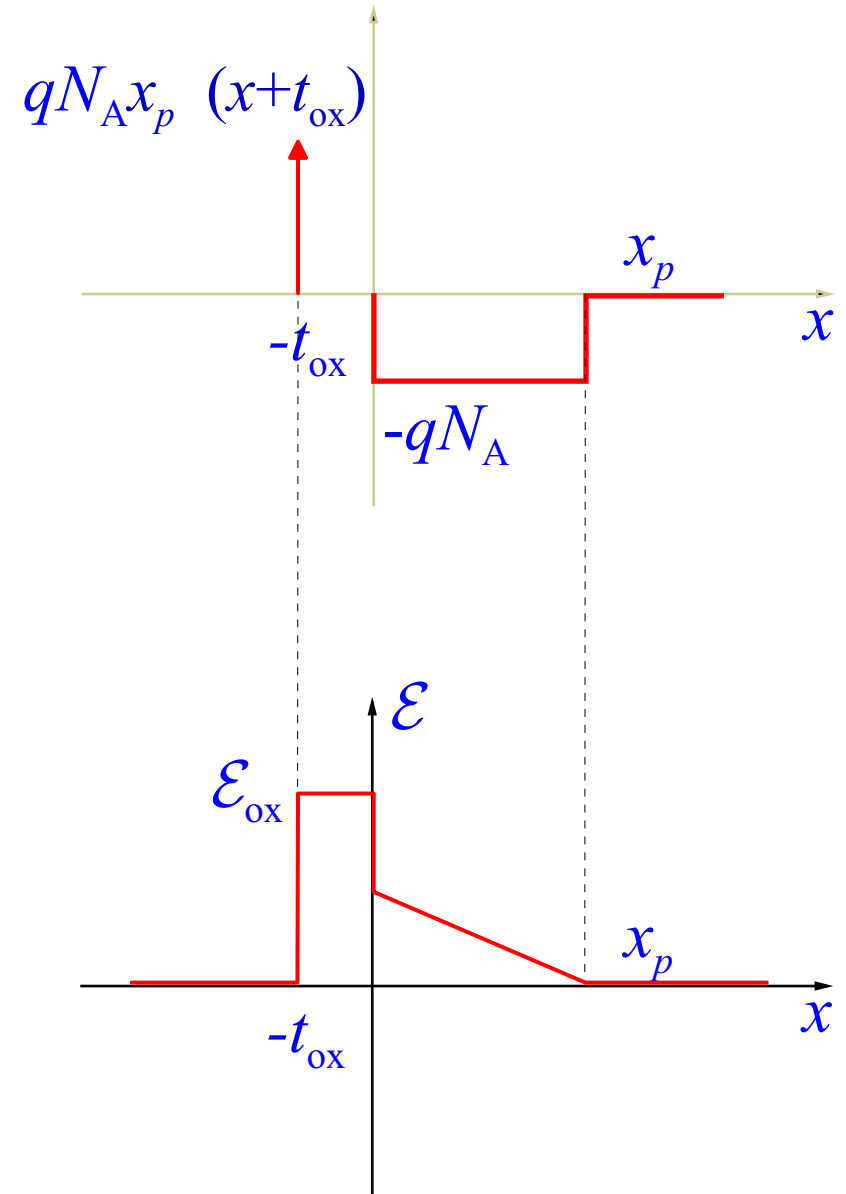
- ◆ tra il metallo e il lato p si ha $\Delta E = q\Phi_M - q\Phi_{Sp} \simeq -0.9 \text{ eV}$

Carica di equilibrio

- *La differenza dei lavori di estrazione $q\Phi_M - q\Phi_{Sp}$ è **negativa***
- *Si ha un trasferimento di elettroni dal metallo al semiconduttore (o equivalentemente di lacune nel verso opposto)*
 - ◆ Nel semiconduttore si forma una regione svuotata caricata negativamente dagli accettori ionizzati
 - ◆ Nel metallo si forma uno strato svuotato di elettroni (carica positiva)
 - un metallo ideale è equipotenziale, quindi la carica si distribuisce solo **sulla superficie**
 - ◆ Nell'ossido ideale (dielettrico) la carica è nulla

Campo elettrico

- *La carica sul metallo è rappresentata da una funzione “delta” di Dirac*
- *Il campo elettrico*
 - ◆ nell'ossido è costante pari al valore \mathcal{E}_{ox}
 - ◆ all'interfaccia M-OX è discontinuo (strato di cariche)
 - ◆ all'interfaccia OX-SEM è discontinuo (differenza di costante dielettrica)



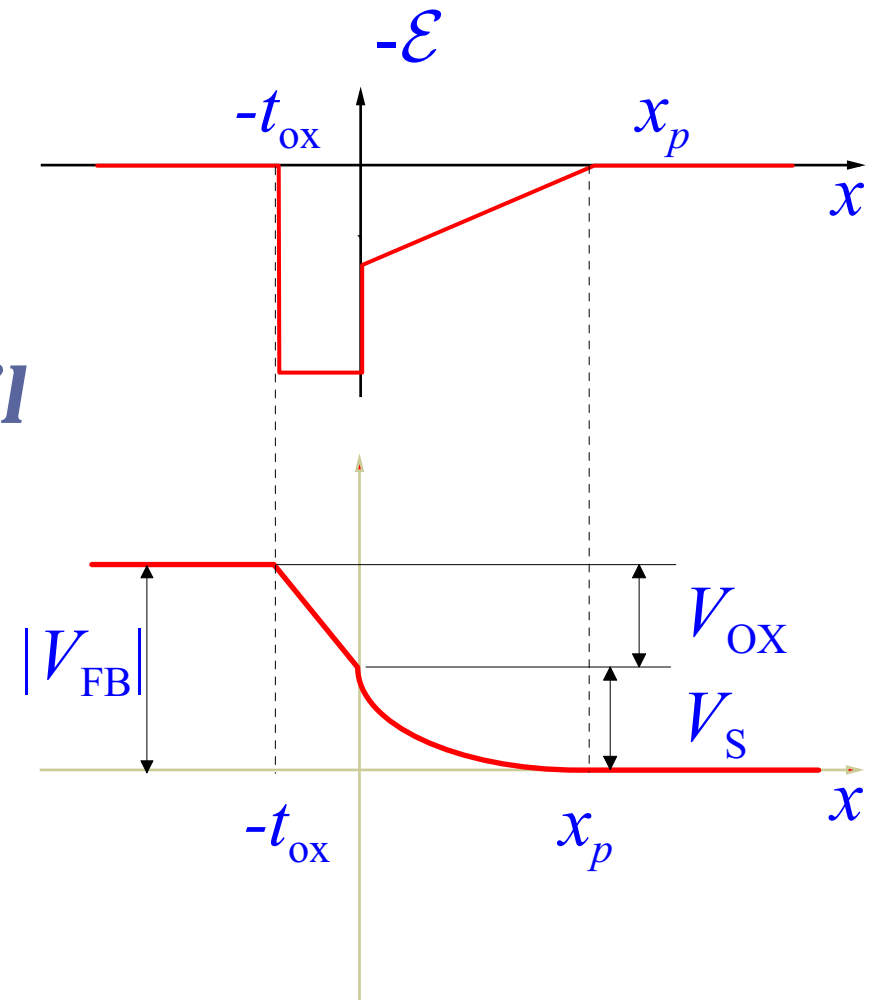
Potenziale

- *Il potenziale è lineare nell'ossido e parabolico nel semiconduttore*
- *il potenziale è continuo*
- *la differenza di potenziale tra il metallo e il lato p è:*

$$|V_{\text{FB}}| = V_{\text{ox}} + V_{\text{s}}$$

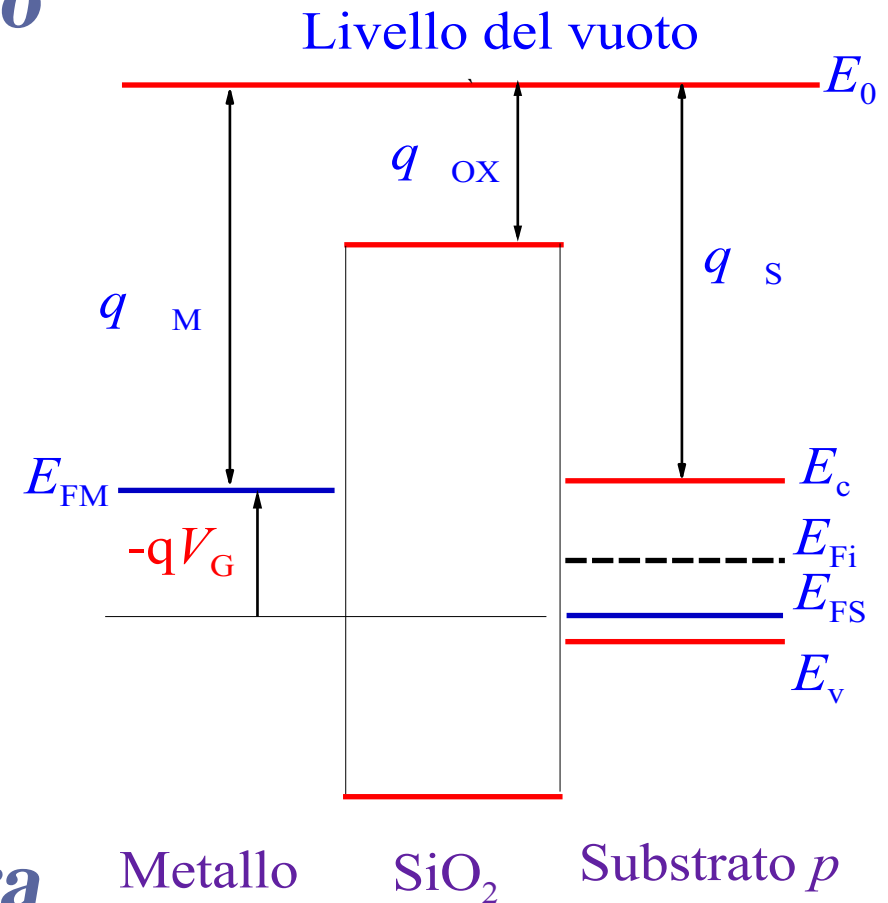
- V_{FB} è detta **tensione di banda piatta**

- $V_{\text{FB}} = \Phi_{\text{M}} - \Phi_{\text{Sp}}$ è **negativa**



Polarizzazione

- Applicando **una tensione V_G tra il metallo e il substrato**, il livello di Fermi non è più costante nella giunzione
- Il livello di Fermi nel metallo viene traslato rispetto a quello del semiconduttore della quantità $-qV_G$
- In particolare se $V_G = V_{FB}$ il salto di potenziale sulla struttura si annulla e **le bande sono piatte**



Regioni di funzionamento

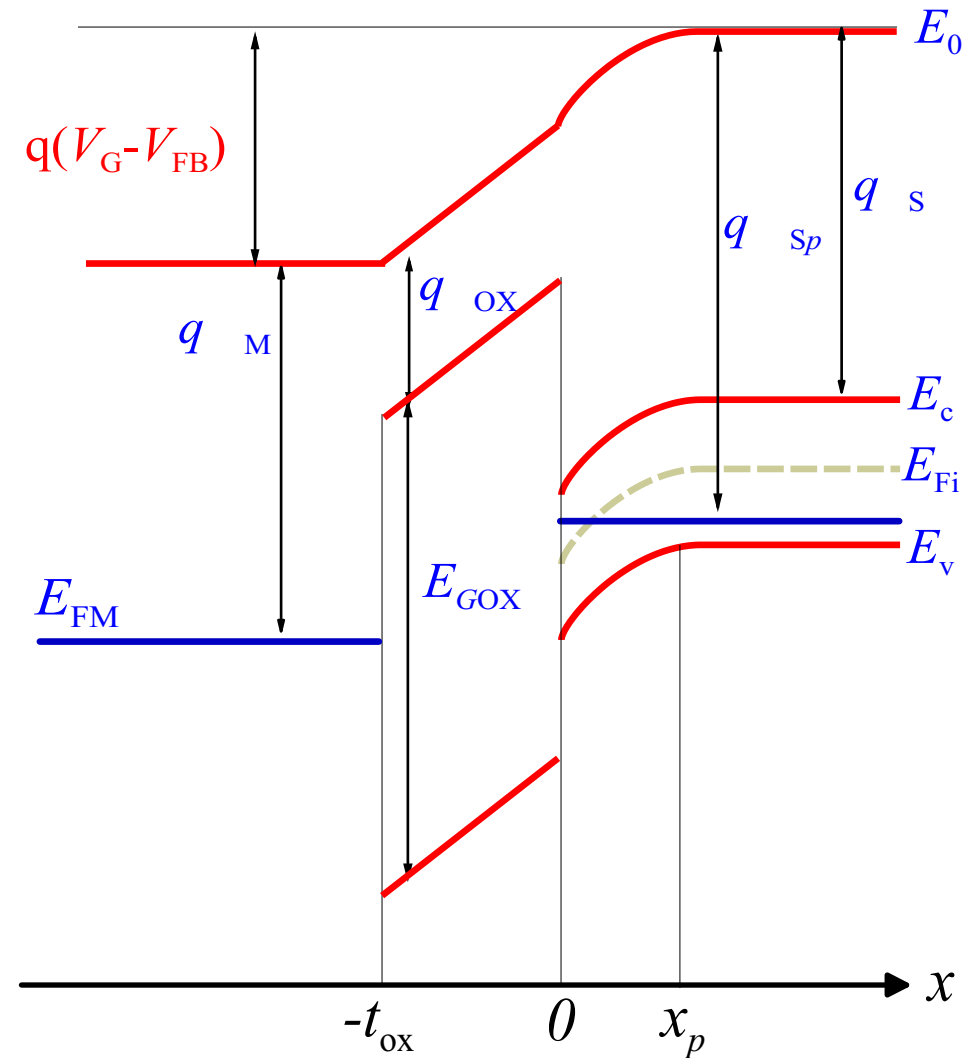
■ *Dalla analisi svolta le regioni di funzionamento del sistema MOS reale sono*

- ◆ **Banda piatta:** $V_G = V_{FB}$. La carica sulle armature è nulla.
- ◆ **Accumulo di lacune:** $V_G < V_{FB}$. Le lacune sono attratte alla interfaccia OX-SEM
- ◆ **Svuotamento di lacune:** $V_G > V_{FB}$. Le lacune sono respinte dall'interfaccia e si crea una regione svuotata carica negativamente (comprende $V_G = 0$)
- ◆ **Inversione:** $V_G \gg V_{FB}$ ($V_G \gg 0$). Alla interfaccia OX-SEM si forma un sottile strato di elettroni

Inversione

■ $V_G \gg 0$

- ◆ $E_{Fi} < E_F$ all'interfaccia OX-SEM
- ◆ il semiconduttore ha una concentrazione di elettroni $> n_i$ (**inversione di popolazione**)
- ◆ la carica Q_n dovuta agli elettroni (**carica di inversione**) cresce con V_G



Cariche in inversione

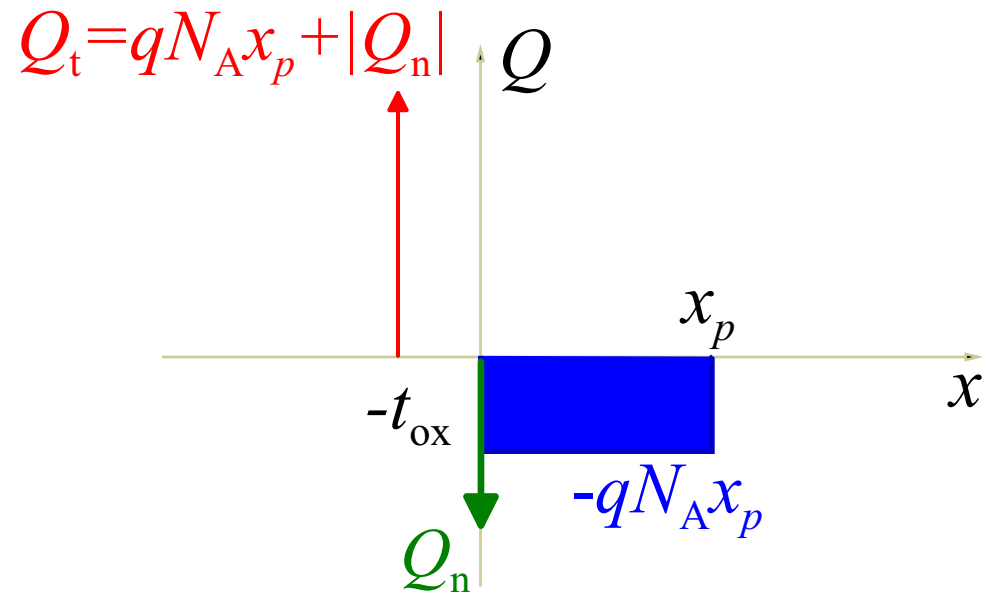
■ Carica *per unità di area* nel sistema MOS all'inversione

- ◆ carica negativa nella regione svuotata

$$Q_d = -qN_A x_p$$

- ◆ carica di inversione Q_n

- ◆ carica positiva Q_t sull'armatura del metallo



condizione di neutralità $\Rightarrow Q_t = -Q_n - Q_d$

- **La condizione di inversione si instaura gradualmente al crescere di V_G .**

Condizione di forte inversione

- Si definisce la condizione di **forte inversione**

$$n(x = 0) = p(x = +\infty) \approx N_A$$

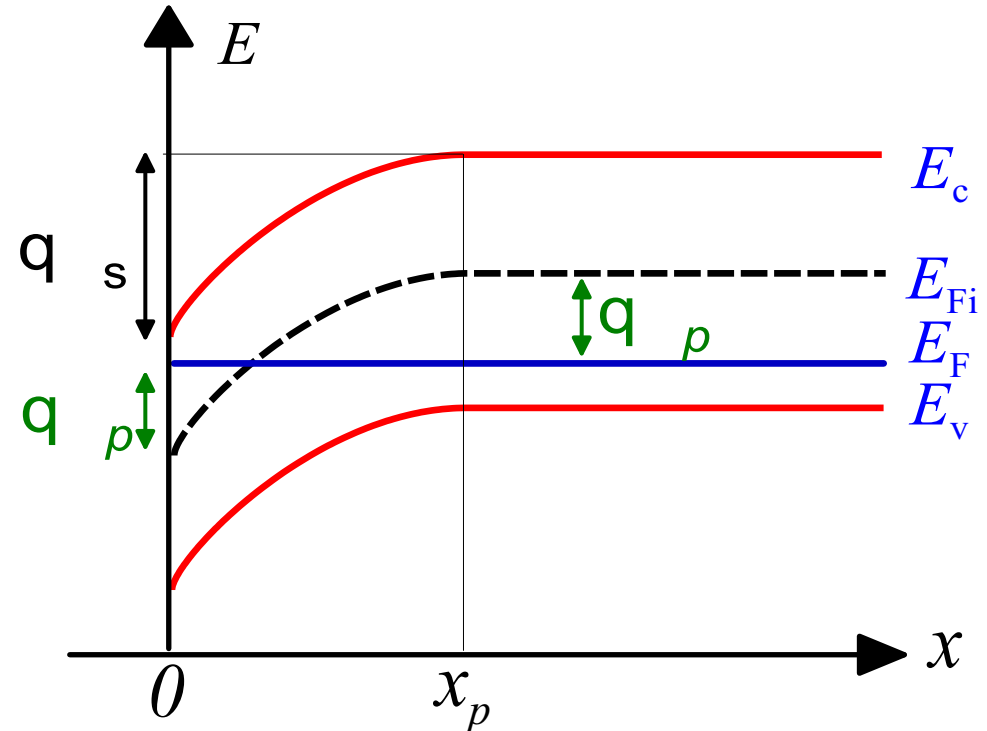
per cui:

$$E_F - E_{Fi}(x = 0) = E_{Fi}(x = +\infty) - E_F$$

- Dalla equazione di Shockley in $x = \infty$:

$$E_{Fi} - E_F = k_B T \ln \frac{N_A}{n_i}$$

$$\phi_p = V_T \ln \frac{N_A}{n_i}$$

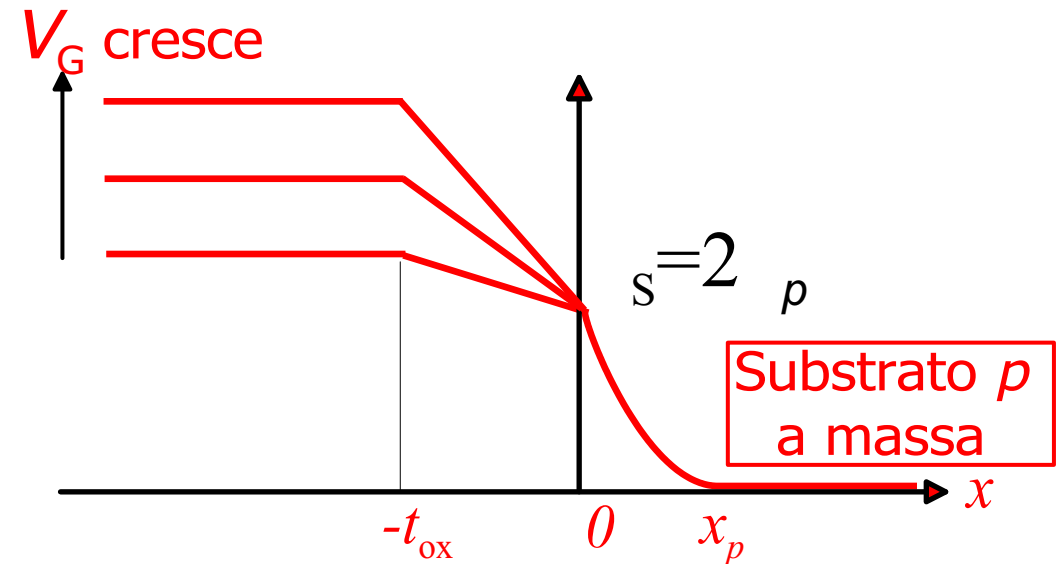


Potenziale superficiale

- ϕ_S rappresenta **il potenziale superficiale riferito al substrato**
- È la caduta di potenziale V_S sulla zona svuotata

- Nella regione di forte inversione ϕ_S è **circa costante**

$$\phi_S = 2\phi_p$$



- Se V_G cresce \Rightarrow cresce la tensione ai capi dell'ossido: $V_{ox} = V_G - V_{FB} - \phi_S$

Carica Q_d

- *In inversione ϕ_s è circa costante ($= 2\phi_p$). La carica fissa nella regione svuotata è costante*

$$Q_d = -qN_Ax_p$$

- *Poiché:*

$$\phi_s = \frac{qN_Ax_p^2}{2\epsilon} \implies x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon\phi_s}{qN_A}}$$

per $\phi_s = 2\phi_p$:

$$Q_d = -\sqrt{2q\epsilon N_A} \sqrt{2\phi_p}$$

Carica Q_t

- *La carica totale per unità di area Q_t vale:*

$$Q_t = C_{\text{ox}} V_{\text{ox}}$$

- C_{ox} è la *capacità per unità di superficie dell'ossido:*

$$C_{\text{ox}} = \frac{\epsilon_{\text{ox}}}{t_{\text{ox}}}$$

- V_{ox} è la *tensione applicata all'ossido:*

$$V_{\text{ox}} = V_G - V_{\text{FB}} - \phi_S = V_G - V_{\text{FB}} - 2\phi_p$$

- *da cui:*

$$Q_t = C_{\text{ox}} (V_G - V_{\text{FB}} - 2\phi_p)$$

Carica di inversione Q_n

- Ricordando la condizione di neutralità:

$$Q_t = -Q_n - Q_d \implies Q_n = -Q_t - Q_d$$

- sostituendo le espressioni di Q_d e Q_t si ricava la legge di controllo di carica lineare

$$Q_n = -C_{ox}(V_G - V_{FB} - 2\phi_p) + \sqrt{4q\epsilon N_A\phi_p}$$

- la carica indotta nello strato di inversione dipende linearmente dalla tensione di pilotaggio V_G

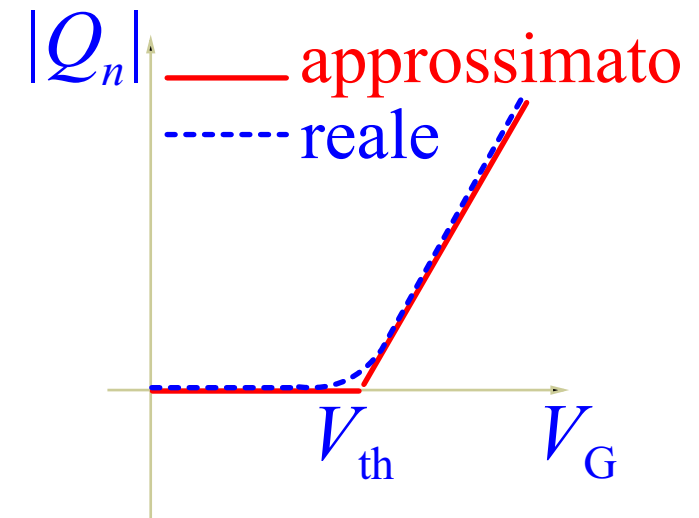
Tensione di soglia V_{th}

- Si definisce **tensione di soglia** V_{th} la tensione V_G per cui:

$$Q_n = 0$$

- In realtà la carica di inversione non si annulla bruscamente

- ◆ si considera che l'inversione inizi per $V_G = V_{th}$
- ◆ si trascura la carica di inversione per $V_G < V_{th}$: $Q_n = 0$



Tensione di soglia

- *Dalla legge di controllo di carica, $Q_n = 0$ implica*

$$V_{th} = V_{FB} + 2\phi_p + \frac{\sqrt{4q\epsilon N_A \phi_p}}{C_{ox}}$$

- *introducendo il coefficiente di substrato γ_B*

$$\gamma_B = \frac{\sqrt{2q\epsilon N_A}}{C_{ox}}$$

- *la tensione di soglia si riduce a:*

$$V_{th} = V_{FB} + 2\phi_p + \gamma_B \sqrt{2\phi_p}$$

- *la tensione di soglia è solitamente **positiva***

Controllo di carica

- *Sostituendo V_{th} nella espressione di Q_n la legge di controllo di carica diventa:*

$$Q_n = -C_{ox}(V_G - V_{th})$$

- ◆ per $V_G > V_{th}$ si ha una carica di inversione **linearmente crescente con V_G**
- ◆ per $V_G < V_{th}$ si esce dalla regione di inversione e si entra nella regione di svuotamento, per la quale Q_n **si annulla**
- ◆ La relazione lineare deriva dalla **ipotesi di forte inversione** e non è valida per tensioni $V_G \simeq V_{th}$

Potenziale di substrato

- *Se il substrato è portato al potenziale V_B , si dimostra che la tensione di soglia varia*

$$V_{th} = V_{FB} + 2\phi_p + \gamma_B \sqrt{(2\phi_p - V_B)}$$

- *Indicando con V_{th0} la corrispondente tensione di soglia con $V_B = 0$, si scrive*

$$V_{th} = V_{th0} + \gamma_B \left[\sqrt{(2\phi_p - V_B)} - \sqrt{2\phi_p} \right]$$

- *La variazione della tensione di soglia è proporzionale a γ_B (**effetto di substrato o body effect**)*

Sistema MOS- substrato n

- *Tutte le analisi finora svolte si riferiscono ad un sistema MOS con substrato **tipo p***
- *Per un sistema MOS con substrato di **tipo n** , si possono ricavare dei risultati **scambiando il ruolo di elettroni e lacune e i segni delle tensioni.***
- *lo strato di inversione è formato da **lacune libere** con concentrazione per unità di area Q_p*
 - ◆ Per $V_G < V_{th}$ la carica di inversione Q_p cresce linearmente con V_G
 - ◆ Per $V_G > V_{th}$ la carica di inversione Q_p si annulla

Controllo di carica- substrato n

- **la tensione di soglia per $V_B = 0$ risulta:**

$$V_{th0} = V_{FB} - 2\phi_n - \gamma_B \sqrt{2\phi_n}$$

- ◆ dove:

$$\phi_n = V_T \ln \frac{N_D}{n_i} \quad \text{e} \quad \gamma_B = \frac{\sqrt{2q\epsilon N_D}}{C_{ox}}$$

- ◆ la tensione di soglia V_{th0} è solitamente negativa
- ◆ Se $V_B \neq 0$

$$V_{th} = V_{th0} - \gamma_B \left[\sqrt{(2\phi_n - V_B)} - \sqrt{2\phi_n} \right]$$

- **La legge di controllo di carica lineare è :**

$$Q_p = -C_{ox}(V_G - V_{th})$$

Effetti di non idealità

- ***Lo stato di ossido è molto sottile e non ideale***
 - ◆ I difetti cristallini comportano una presenza di carica intrappolata all'interno dell'ossido
 - ◆ L'interfaccia tra ossido e semiconduttore può avere difetti reticolari che comportano la presenza di carica intrappolata superficiale
- ***Questi effetti comportano una variazione***
 - ◆ della carica totale presente nel sistema MOS
 - ◆ della tensione di banda piatta
- ***Sono descritti globalmente mediante una variazione della tensione di soglia***