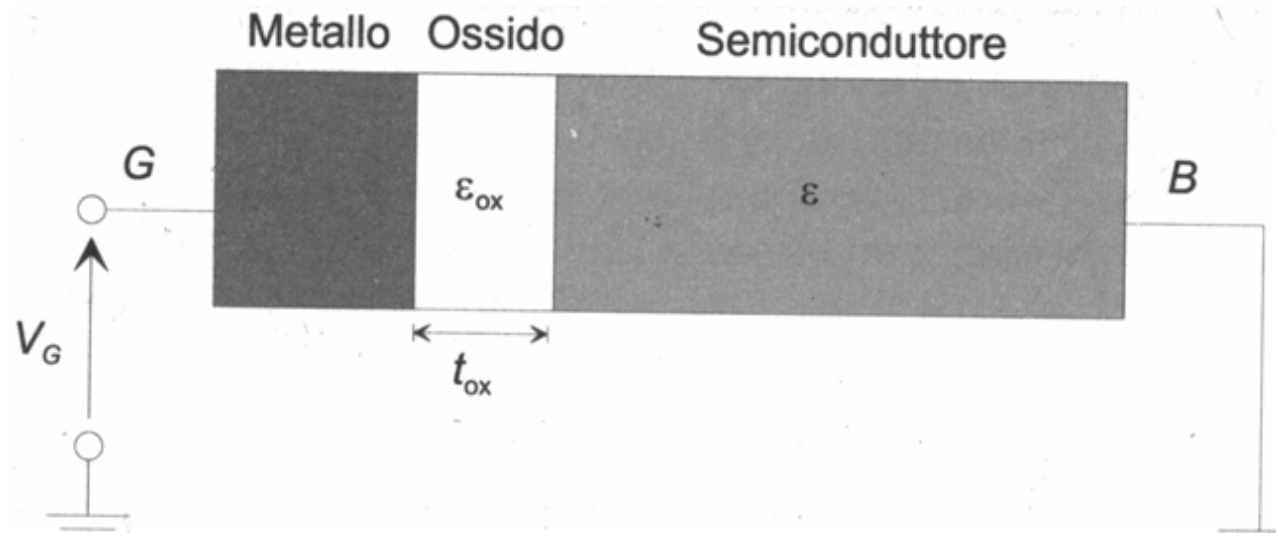


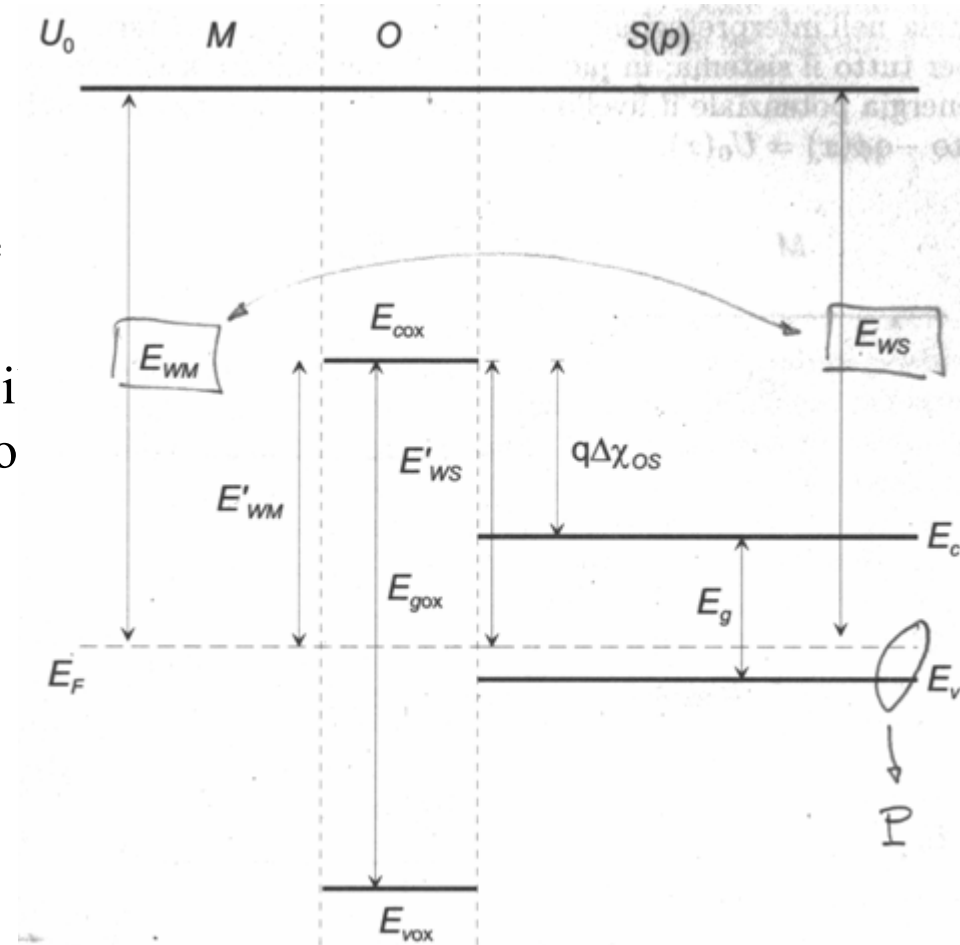
# Il Sistema Metallo Ossido Semiconduttore (MOS)

- E' una struttura simile ad un condensatore, con queste differenze:
  - A polarizzazione nulla la concentrazione dei portatori nel semiconduttore è assai minore di quella nel metallo
  - I portatori di maggioranza nel SC possono essere elettroni o lacune
  - Si ha un 'quarto stato' di funzionamento ovvero l'inversione dovuta ad una forte polarizzazione tale da richiamare portatori minoritari tali da prevalere su quelli di maggioranza



# Il Sistema N-MOS ideale

- Polarizzazione nulla - bande piatte:
  - Il semiconduttore è di tipo P
  - Si hanno gli stessi lavori di estrazione per Me e SC  $E_{WM} = E_{WS}$
  - Durante la formazione della giunzione i diagramma a bande è identico a quello delle singole parti isolate
  - Non si hanno passaggi di cariche a causa dell'ossido, il raggiungimento dell'equilibrio è raggiunto grazie ai collegamenti di gate e di bulk



# Il Sistema N-MOS ideale

## ■ Accumulo di Lacune $V_g < 0$ :

- Le lacune vengono attratte verso la superficie del SC-P
- Si ha accumulo superficiale nel Me
- I due accumuli sono molto sottili (Debye)  $\rightarrow$  tutto il potenziale cade sull'Ox.

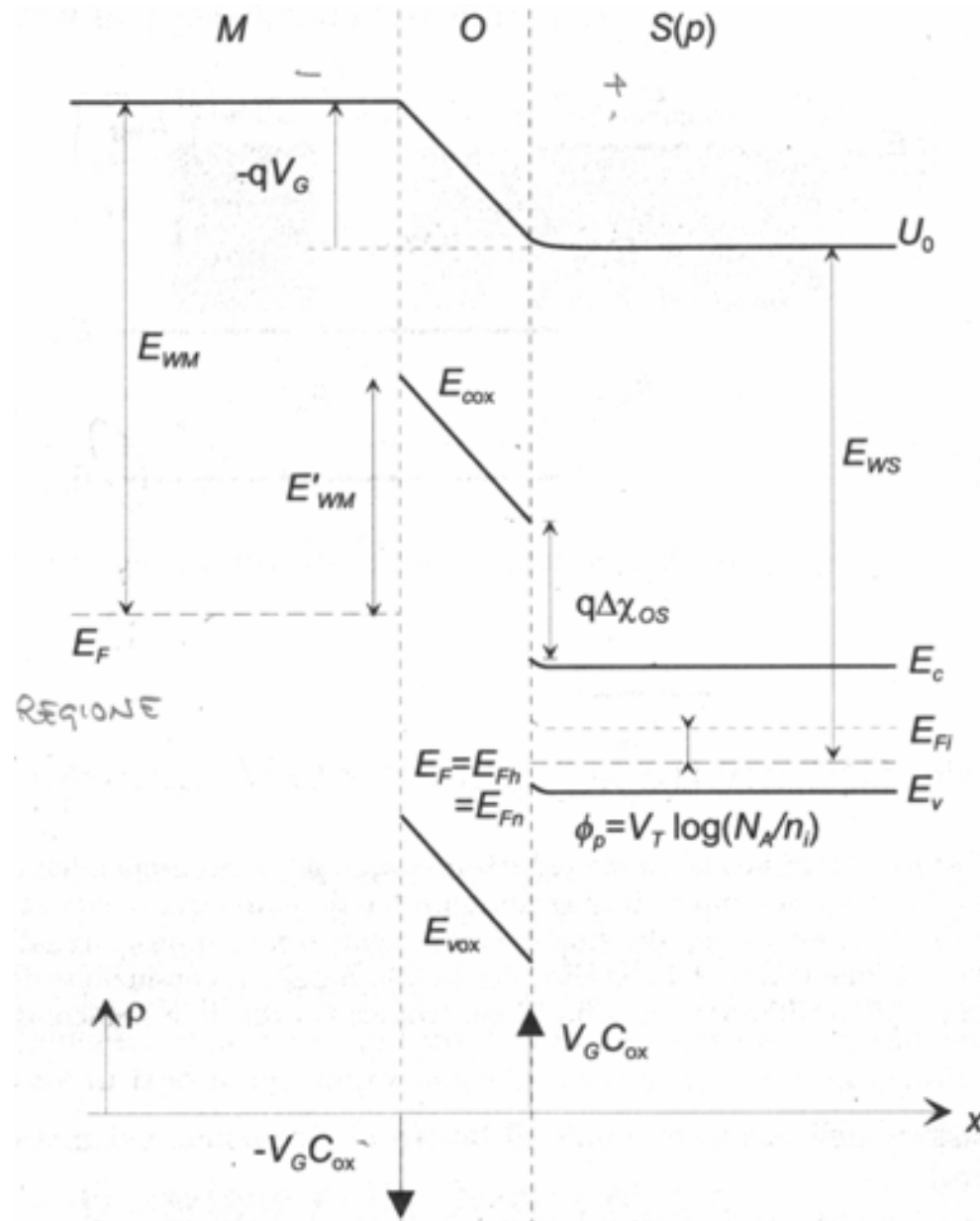
- La capacità e la carica accumulata sono:

$$C_{ox} = \epsilon_{ox} / t_{ox} \quad Q_t = C_{ox} V_G$$

- All'interfaccia Ox-SC si ha la condizione:

$$\epsilon_{ox} \mathcal{E}_{ox} = \epsilon_s \mathcal{E}_s + Q_s$$

$$\epsilon_s / \epsilon_{ox} \approx 3$$



# Il Sistema N-MOS ideale

## ■ Svuotamento di Lacune $V_g > 0$ :

- Le lacune vengono respinte determinando una regione di svuotamento  $Q_d = -qN_A d$
- Per i potenziali sulle varie sezioni si ha: -

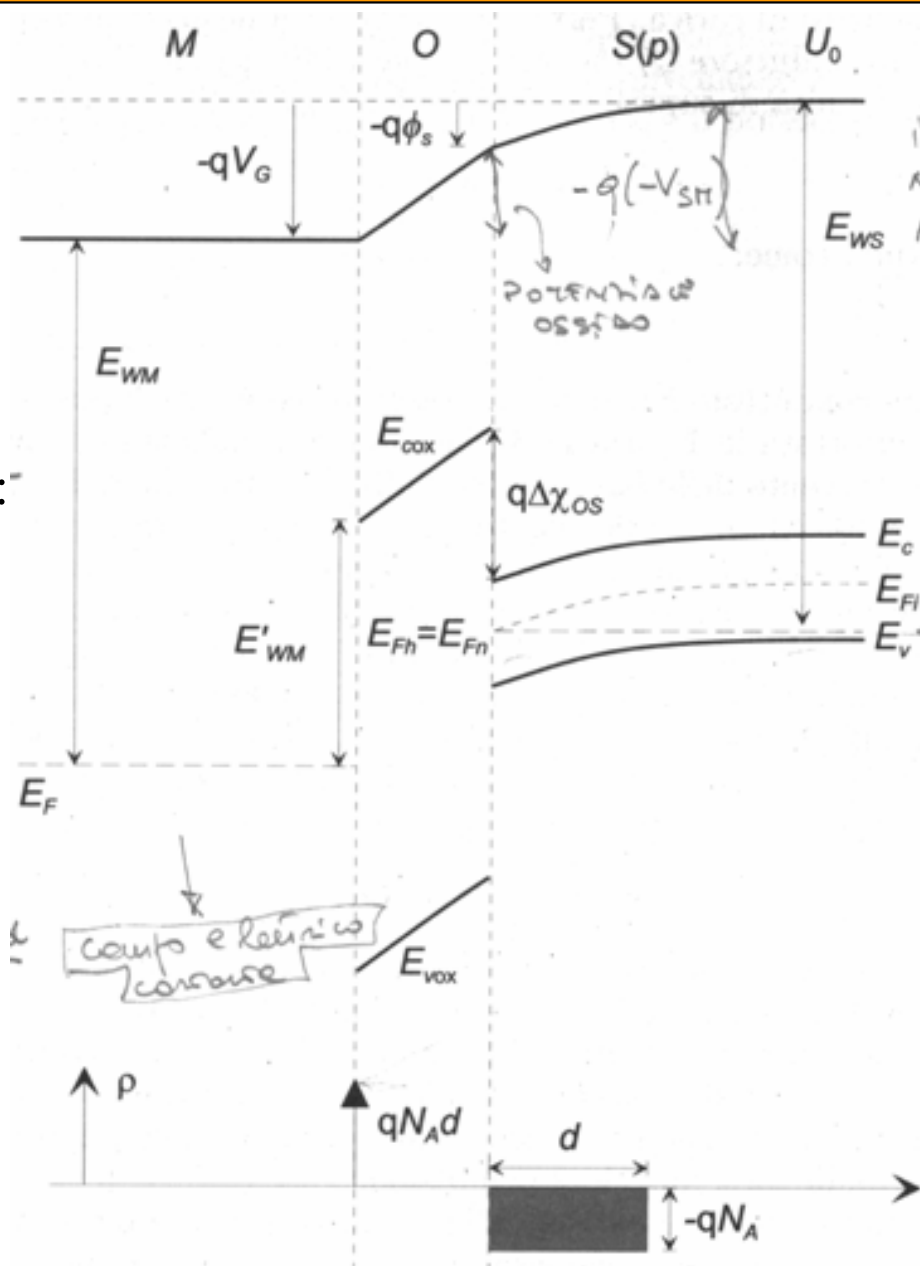
$$\phi_{ox} = qN_A d \frac{t_{ox}}{\epsilon_{ox}} = \frac{Q_d}{C_{ox}}$$

$$\phi_s = \frac{qN_A d^2}{2\epsilon_{sc}}$$

- Legandole al potenziale si ha

$V_G = \phi_{ox} + \phi_{sc}$  da cui:

$$\frac{d}{t_{ox}} = -\frac{\epsilon_{sc}}{\epsilon_{ox}} + \sqrt{\frac{\epsilon_{sc}^2}{\epsilon_{ox}^2} + \frac{2V_G \epsilon_{sc}}{qN_A t_{ox}^2}}$$



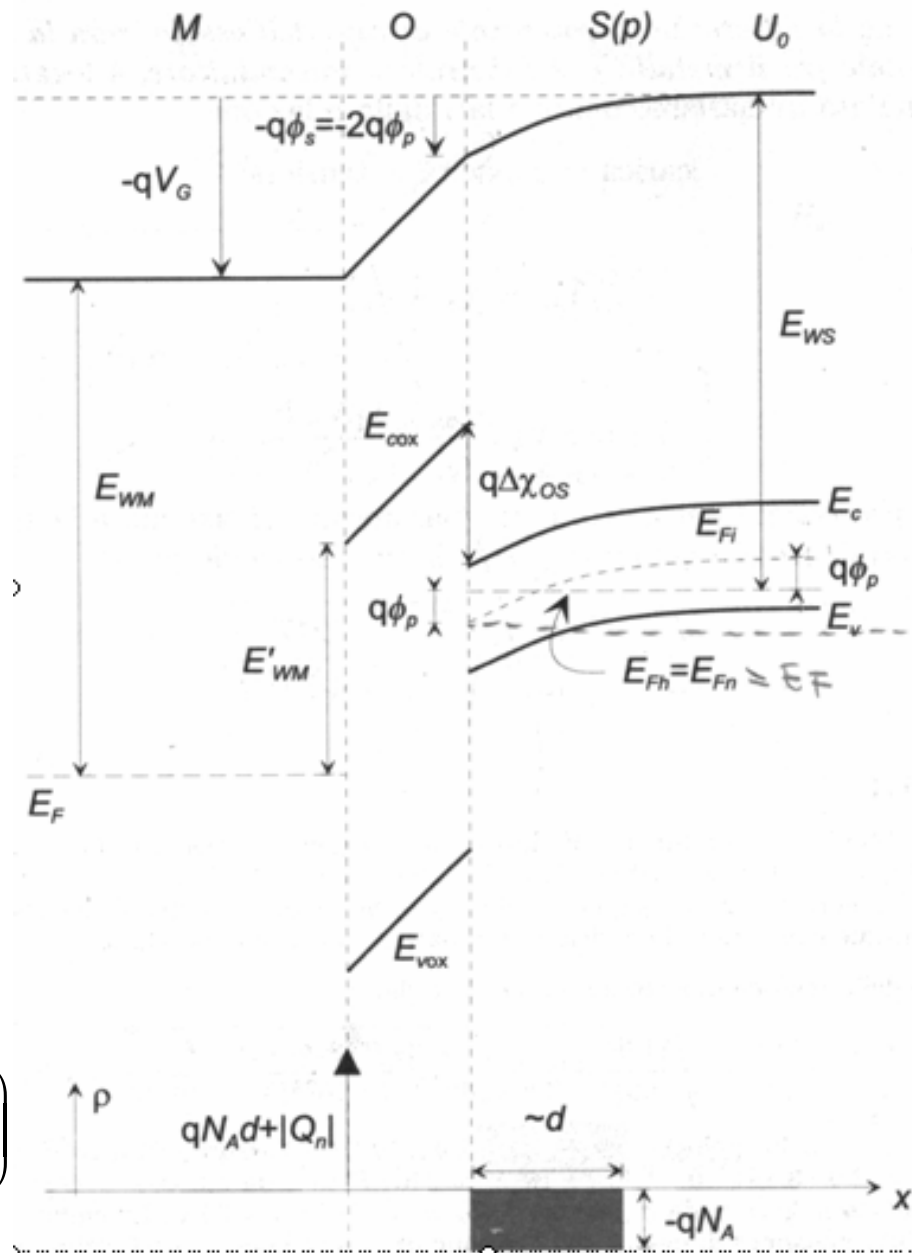
# Il Sistema N-MOS ideale

- Inversione di Lacune  $V_g \gg 0$ :
  - Aumentando ulteriormente la polarizzazione, alla superficie si ha l'inversione tra il quasi-livello di Fermi e quello intrinseco.
  - Si crea un canale indotto di tipo n; elettroni che diventano portatori di maggioranza  $\rightarrow$  inversione della popolazione.
  - Si definisce soglia,  $V_{T0}$ , quando si verifica la condizione:

$$n(t_{ox}) = N_A$$

- da cui:

$$N_A = n_i \exp\left(\frac{E_{Fi}(\infty) - E_F}{K_B T}\right) = n_i \exp\left(\frac{q\phi_P}{V_T}\right)$$



## Il Sistema N-MOS ideale: determinazione della $V_{TO}$

- La concentrazione di elettroni è:

$$n(t_{ox}) = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_{Fi}(t_{ox})}{K_B T}\right)$$

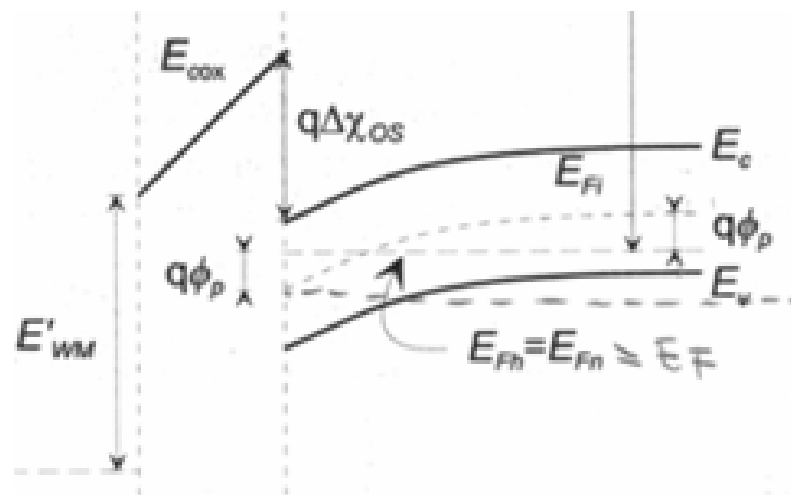
- Imponendo la condizione di innesco:

$$E_F - E_{Fi}(t_{ox}) = q\phi_p$$

- Si trova il potenziale sul SC:

$$\frac{E_{Fi}(\infty) - E_{Fi}(t_{ox})}{q} = \phi_S = 2\phi_p$$

- A causa dell'andamento esponenziale della carica nel semiconduttore in funzione del potenziale, si può assumere che raggiunta la soglia, il potenziale  $\phi_S$  resti bloccato a  $2\phi_p$ , conseguentemente la regione svuotata resta costante.



## Il Sistema N-MOS ideale: determinazione della $V_{TO}$

- Con queste ipotesi si calcola la carica del canale, scrivendo la carica totale come:  $Q_t = Q_n + Q_d = -C_{ox} (V_G - \phi_S)$
- Mentre la carica dello strato di inversione :  $Q_d = -qN_A d$
- Per il potenziale si ha:  $\phi_S = 2\phi_p = \frac{qN_A d^2}{2\epsilon}$

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

- Infine possiamo calcolare la carica come:

$$Q_n = Q_t - Q_d = -C_{ox} (V_G - 2\phi_p) - \sqrt{2q\epsilon N_A 2\phi_p}$$

- Sebbene in modo non tutto autoconsistente la carica totale all'inversione è prevalentemente quella fissa, ovvero  $Q_n \sim 0$ , cioè trascurabile rispetto a  $Q_d$ . Questo permette di scrivere →

## Il Sistema N-MOS ideale: determinazione della $V_{T0}$

- L'espressione della soglia:

$$V_{T0} = 2\phi_p + \frac{\sqrt{2q\epsilon N_A 2\phi_p}}{C_{ox}}$$

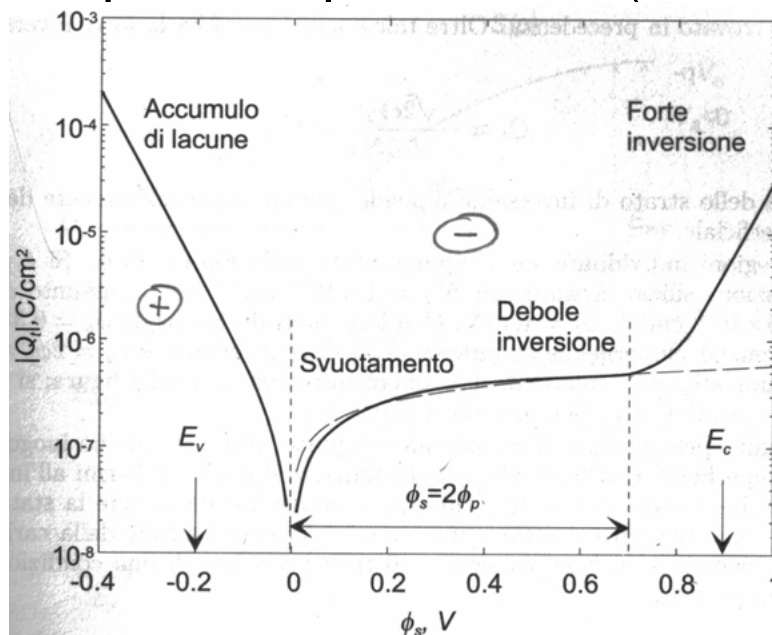
- Per il potenziale si ha:  $\phi_p = V_T \log\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$
- E per  $V_G > V_{T0}$  si ha la legge di controllo della carica:

$$Q_n = -C_{ox} (V_G - V_{T0})$$

- Per tensioni sopra soglia la carica indotta nel canale dipende linearmente dal potenziale applicato.

## Il Sistema N-MOS: analisi esatta in funzione di $\phi_S$

- Carica totale, calcolata in modo esatto (curva continua) e con il metodo approssimato esposto in precedenza (curva tratteggiata):



- Per forte inversione la carica risulta:

$$Q_t \approx - \frac{\sqrt{2}\epsilon V_T n_i}{L_D N_A} e^{\phi_s / 2V_T}$$

## Effetto di polarizzazione di canale e substrato

- Ai fini del funzionamento del MOSFET la giunzione *canale-substrato* (N/P) deve essere polarizzata inversamente, in modo che vi sia una barriera di potenziale per gli elettroni verso il substrato.
- In presenza di un potenziale di canale  $\phi_{ch}$  canale e di substrato  $V_B$ , la carica totale è:

$$Q_n = Q_n - Q_d = -C_{ox} (V_G - 2\phi_p - \phi_{ch}) - \sqrt{2q\epsilon N_A (2\phi_p - V_B)}$$

- La nuova tensione si soglia si calcola ponendo  $\phi_{ch} = 0$  e  $Q_n = 0$ :

$$V_T = 2\phi_p + \frac{\sqrt{2q\epsilon N_A (2\phi_p - V_B)}}{C_{ox}}$$

NB: l'assenza del pedice '0'

## Effetto di polarizzazione di canale e substrato

- Pertanto si conclude che la presenza di un potenziale di substrato cambia la tensione di soglia:

$$V_T = V_{T0} + \gamma_B \left[ (2\phi_p - V_B)^{1/2} - (2\phi_p)^{1/2} \right]$$

- Dove  $\gamma_B$  è il body factor:

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

- In presenza di un potenziale di canale e di pol. di substrato la relazione del controllo di carica si scrive come:

$$Q_n = -C_{ox} (V_G - \phi_{ch} - V_T) + \gamma_B C_{ox} \left[ (2\phi_p - V_B + \phi_{ch})^{1/2} - (2\phi_p - V_B)^{1/2} \right]$$

## Effetti di non-idealità nei MOS

- Differenza della funzione di lavoro tra metallo e SC  $E_{WM} \neq E_{SC}$ 
  - Se  $E_{WM} - E_{SC} = E_{MS} > 0$  si ha passaggio di elettroni dal SC al Me dando luogo ad un accumulo di carica da entrambe le parti

$$|Q_{in}| = C_{ox} E_{MS} / q$$

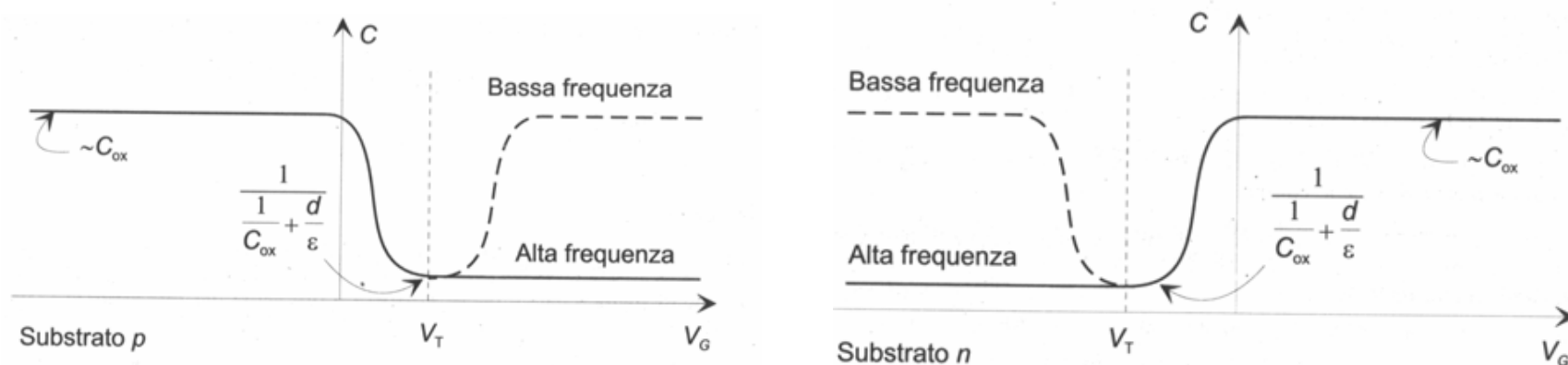
- Cariche nell'ossido
  - Possono essere di diverso tipo: fissa tra Ox-SC di solito positiva, intrappolata durante la realizzazione, carica ionica mobile.
- Le cariche globalmente danno luogo ad una carica indotta nel canale di tipo negativo, quindi il PMOS è vicino all'inversione, il potenziale dovuto per riallineare le bande è  $V_{fb}$ .
- La nuova tensione di soglia diventa:

$$V_{T0} = 2\phi_p + \frac{\sqrt{2q\epsilon N_A 2\phi_p}}{C_{ox}} + V_{fb}$$

## Caratteristica CV

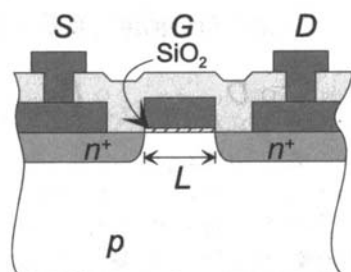
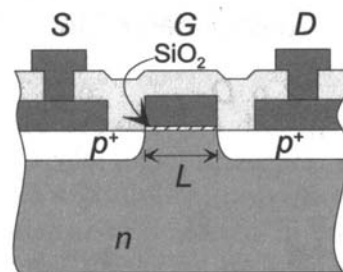
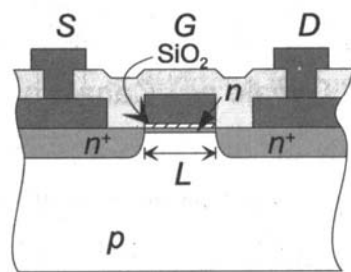
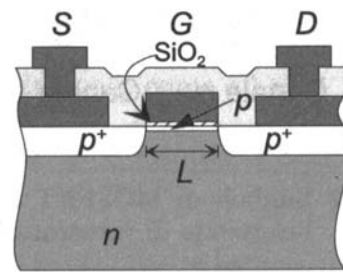
- Nel sistema PMOS per  $V_G < 0$ , si ha accumulo con sottile strato la capacità è:  $C = A \cdot C_{ox}$ . Questa è una capacità di portatori di maggioranza quindi la capacità non dipende dalla frequenza.
- Al crescere della polarizzazione per  $V_G > 0$  si passa verso una situazione di SC intrinseco sino ad una serie tra  $C_{ox}$  e dovuta allo strato di svuotamento

$$\frac{A}{C} = \frac{t_{ox}}{\epsilon_{ox}} + \frac{d}{\epsilon_{sc}}$$



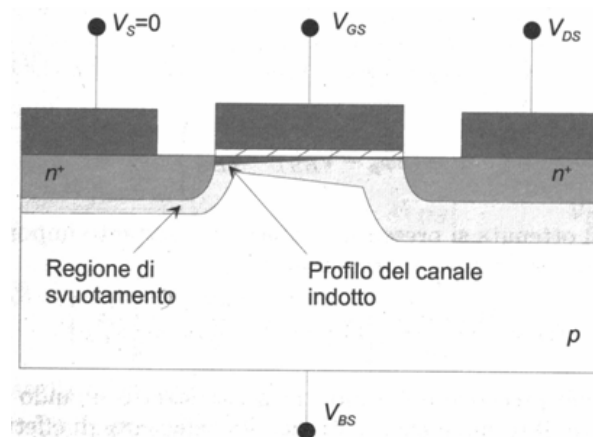
# IL MOS Field Effect Transistor (MOSFET)

- MOSFET a canale n: substrato di tipo P e strato di inversione formato da elettroni
- MOSFET a canale p: substrato di tipo n e strato di inversione formato da lacune

Canale  $n$ , normalmente OFFCanale  $p$ , normalmente OFFCanale  $n$ , normalmente ONCanale  $p$ , normalmente ON

## Caratteristica statica del NMOS

- Distribuzione di carica in un NMOS polarizzato oltre la tensione di saturazione
  - La carica nel canale varia passando dal source al drain in quanto la ddp attraverso il canale si riduce, il max si ha in corrispondenza del source.



$$I_D(x) = W \mu_n Q_n(V_{GS}, V_{BS}, \phi_{ch}) \frac{d\phi_{ch}}{dx}$$

$$I_D = -\frac{W \mu_n}{L} \int_0^{V_{ds}} Q_n(V_{GS}, V_{BS}, \phi_{ch}) d\phi_{ch}$$

## Caratteristica statica del NMOS

- Inserendo l'equazione del controllo di carica si ottiene:

$$I_D = \frac{W \mu_n C_{ox}}{L} \int_0^{V_{ds}} (V_{GS} - \phi_{ch} - V_T) d\phi_{ch} +$$

$$- \gamma_B \frac{W \mu_n C_{ox}}{L} \int_0^{V_{ds}} \left[ (2\phi_p - V_{BS} + \phi_{ch})^{1/2} - (2\phi_p - V_{BS})^{1/2} \right] d\phi_{ch}$$

- Si riconosce un primo contributo dovuto alla componente lineare del controllo di carica ed il secondo che dipende dalla tensione di canale e di substrato in ogni sezione del canale. Integrando si ottiene:

$$I_D = \frac{W \mu_n C_{ox}}{L} \left[ (V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right] - \gamma_B \frac{W \mu_n C_{ox}}{L} \times$$

$$\left\{ \frac{2}{3} \left[ (2\phi_p - V_{BS} + V_{DS})^{3/2} - (2\phi_p - V_{BS})^{3/2} \right] - (2\phi_p - V_{BS})^{1/2} V_{DS} \right\}$$

## Caratteristica statica del NMOS

- Una versione approssimata della precedente è valida solo quando il body factor è piccolo:

$$I_D = \frac{W \mu_n C_{ox}}{L} \left[ (V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right]$$

- Si noti che questa relazione è valida solo per  $V_{DS} \leq V_{GS} - V_T$

$$I_D = \begin{cases} \frac{W \mu_n C_{ox}}{L} \left[ (V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right] & V_{DS} \leq V_{GS} - V_T = V_{DSS} \\ \frac{W \mu_n C_{ox}}{2L} \left[ (V_{GS} - V_T)^2 \right] [1 + \lambda V_{DS}] & V_{DS} > V_{GS} - V_T = V_{DSS} \end{cases}$$

- Dove  $\lambda$  tiene conto della riduzione del canale per  $V_{DS} > V_{DSS}$

# Caratteristica statica del MOSFET

- Sommario delle caratteristiche elettriche delle varie tipologie di MOSFET



## Circuito equivalente del MOSFET

- Il circuito dinamico del MOSFET è simile a quello di un FET convenzionale, nell'ipotesi di contatto di bulk connesso con il source.
- La limitazione maggiore è dovuta alla presenza del gruppo  $R_g$ - $C_{gs}$  che limita il comportamento in frequenza.

