

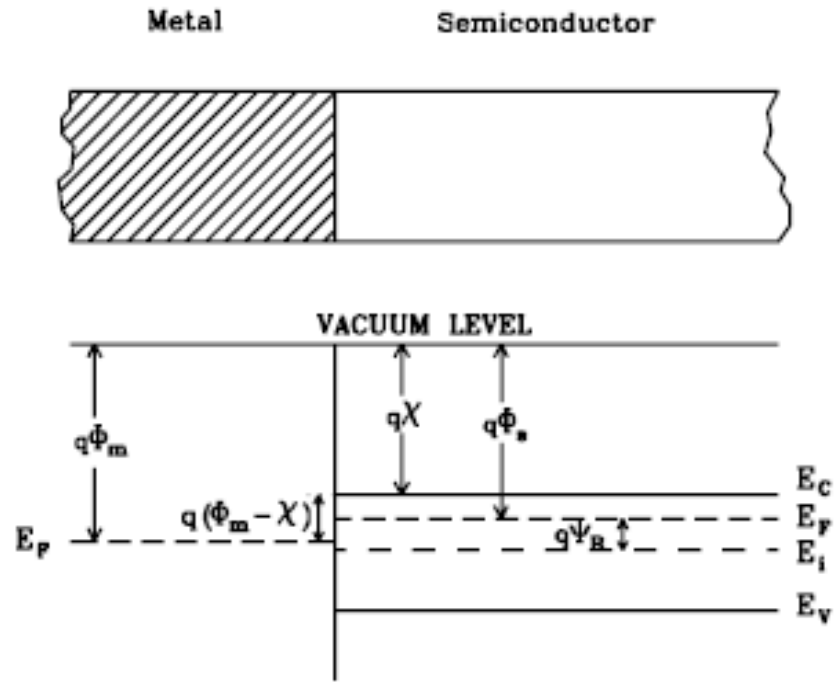


# Rivelatori e Apparati

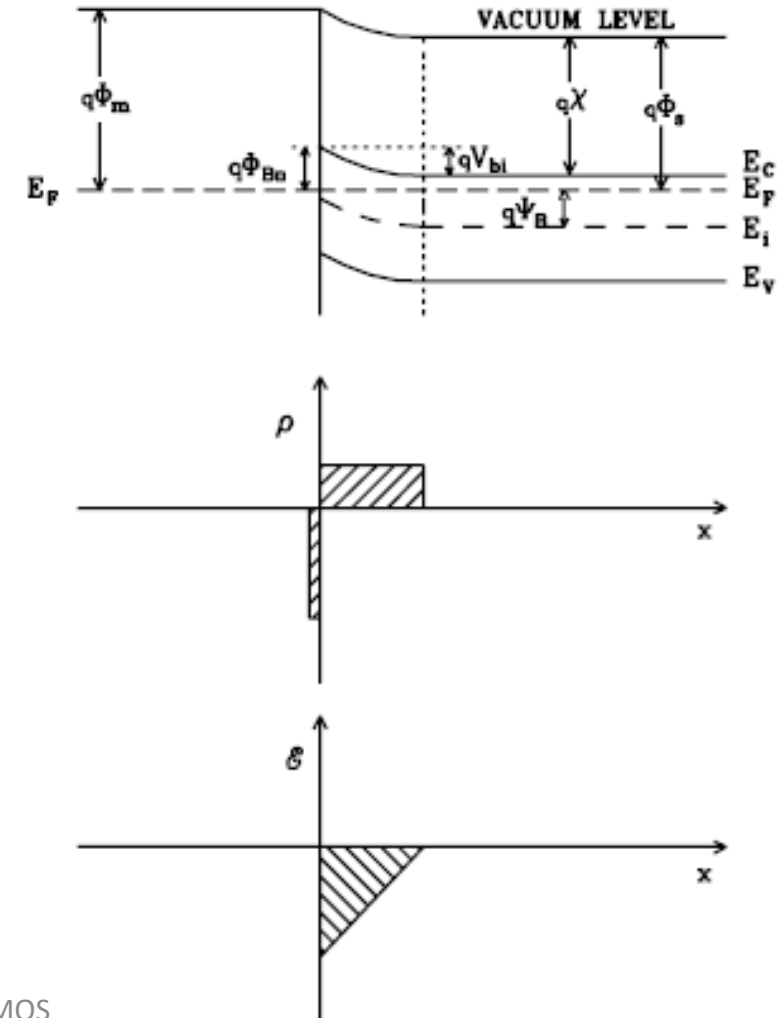
MS & MOS

# Metallo-Semiconduttore MS

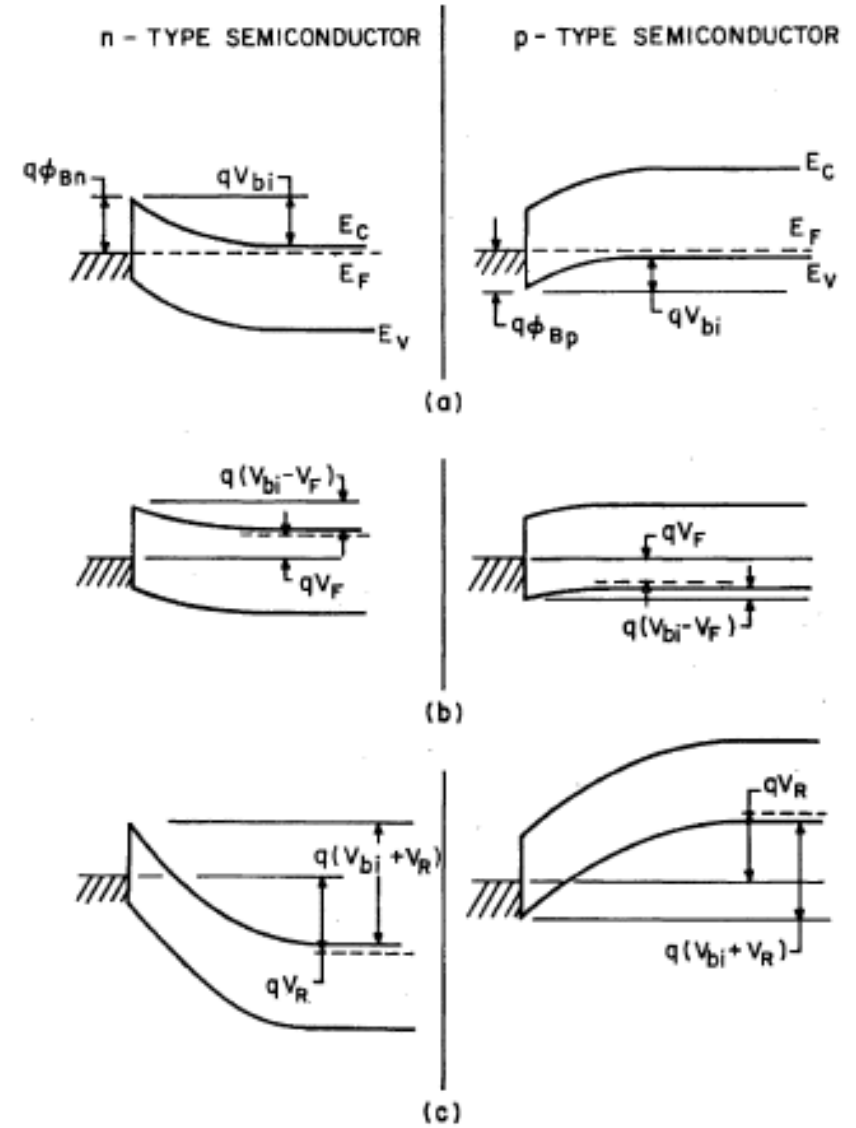
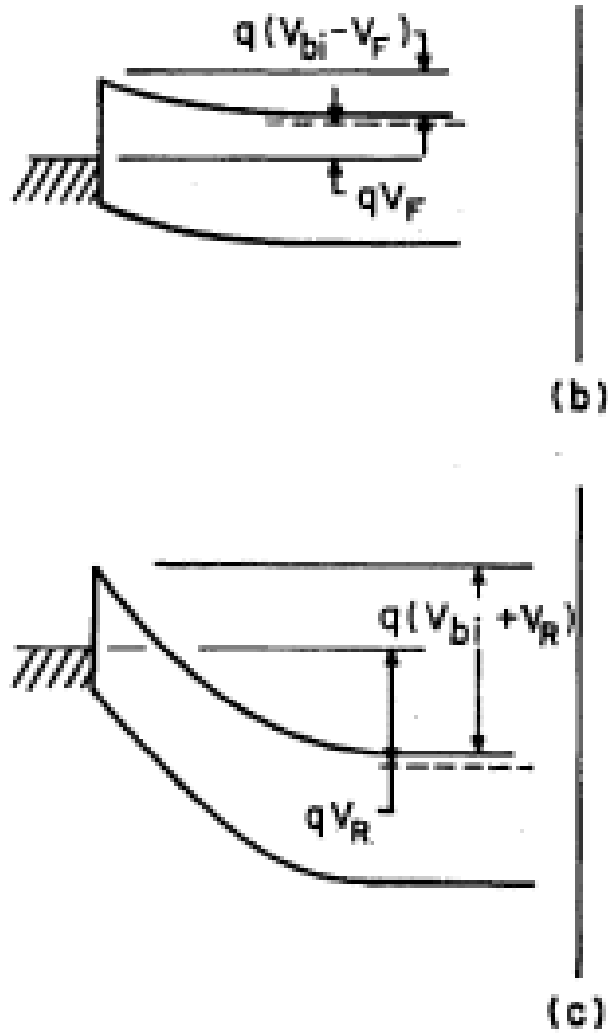
In contatto



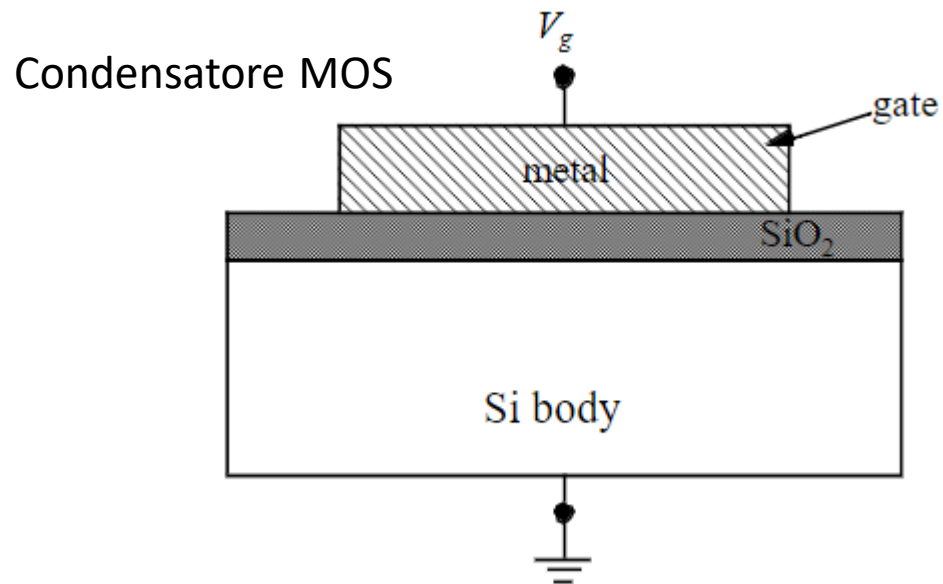
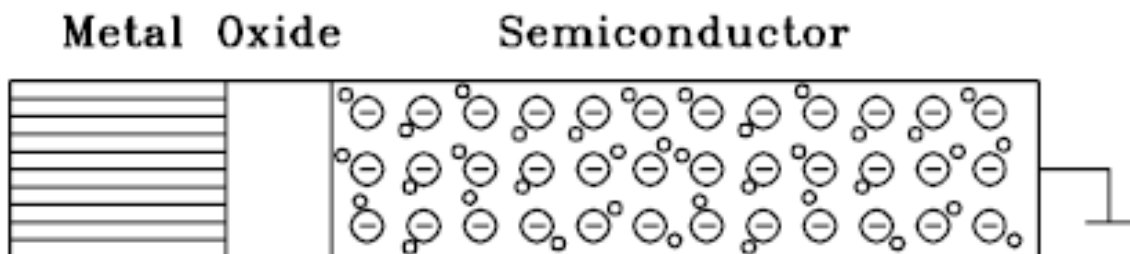
Separati



# MS polarizzati

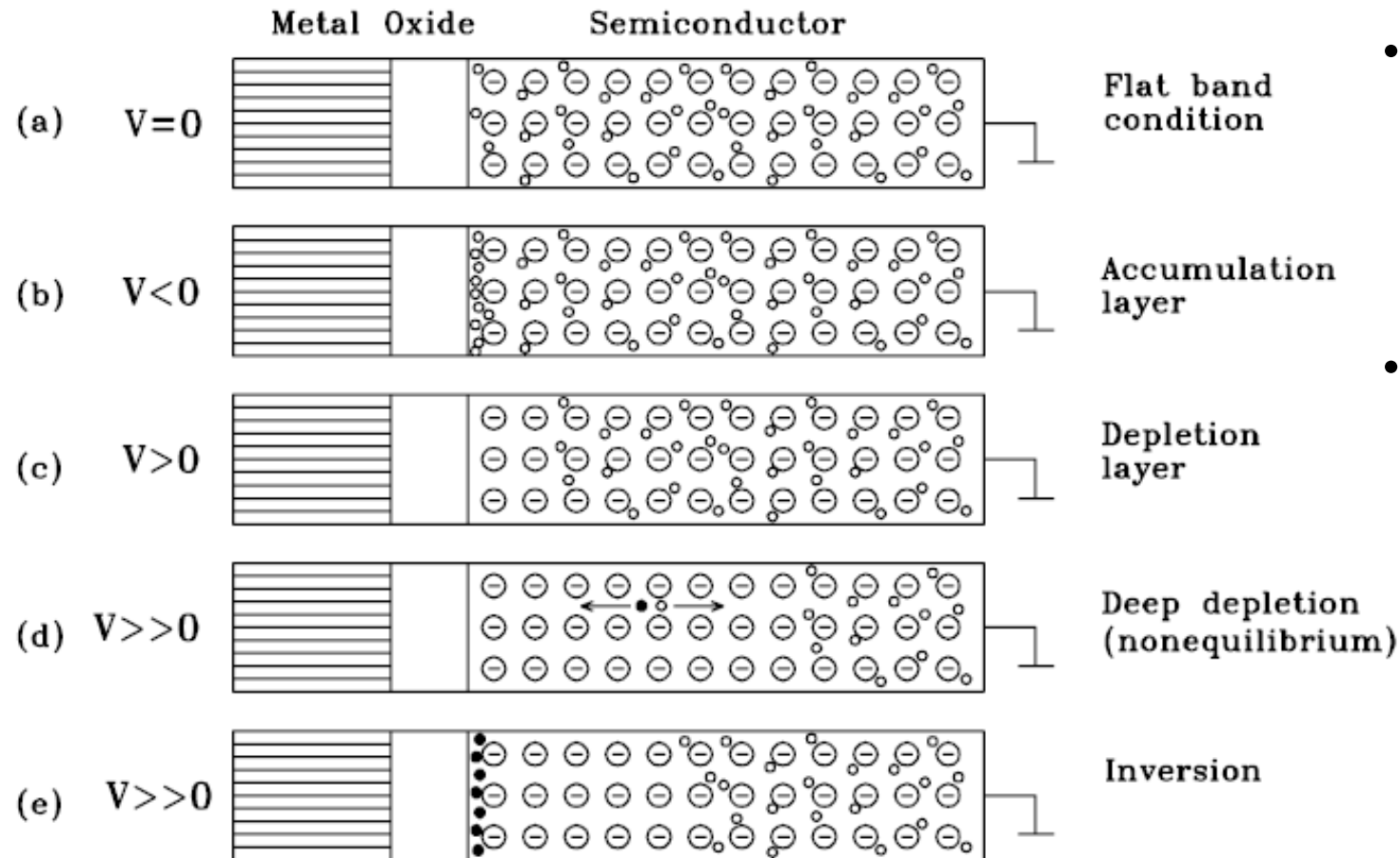


# Metal-Oxide-Semiconductor (MOS)



- Struttura formata con l'aggiunta di un sottile strato di ossido tra metallo e semiconduttore
- Si forma una doppia giunzione: il trasferimento di elettroni dal metallo con funzione lavoro minore di quella del semiconduttore. Trasferimento di elettroni dal metallo al semiconduttore non avviene attraverso l'ossido ma attraverso allontanamento di cariche sull'interfaccia metallo-ossido, che creano addensamento di cariche sull'interfaccia ossido-semiconduttore
- E' come un condensatore con differenza di potenziale ai capi dell'ossido

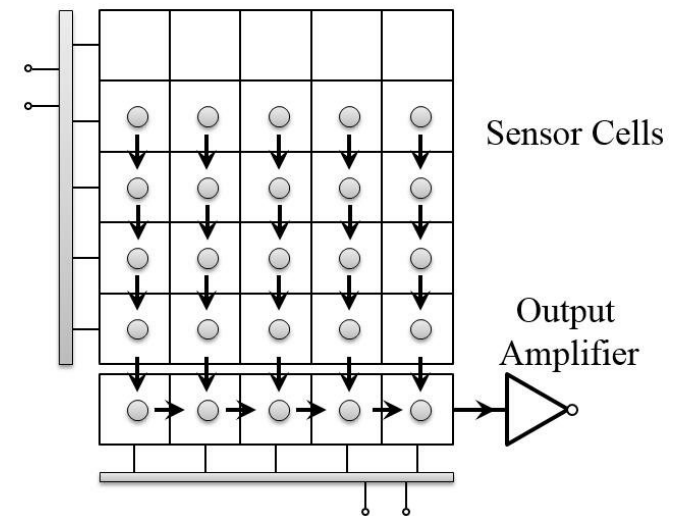
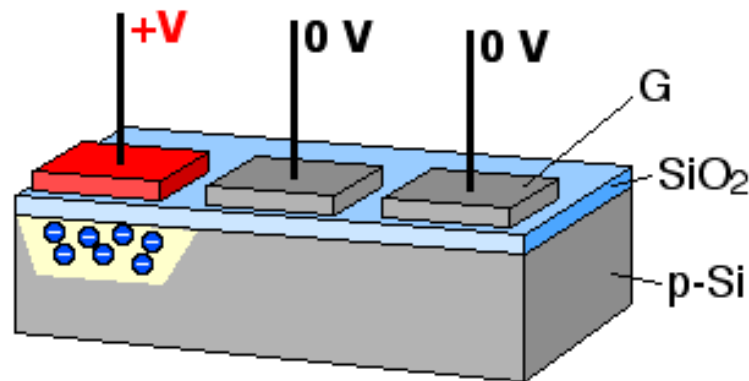
# MOS – Condizioni in p-type – caso ideale



- P-type caso ideale (semplificato):
  - **No cariche nell'ossido**
  - **Funzioni lavoro identiche per metallo e semiconduttore ( $V_{FB} = 0$ )**
- In condizione di svuotamento, puo' essere usato come rivelatore:
  - Carica indotta all'interfaccia metallo-ossido e' proporzionale a quella raccolta all'interfaccia ossido-semiconduttore
  - Oppure la carica puo' essere trasferita lateralmente e letta, come nei sistemi CCD

# Charge coupled devices (CCD)

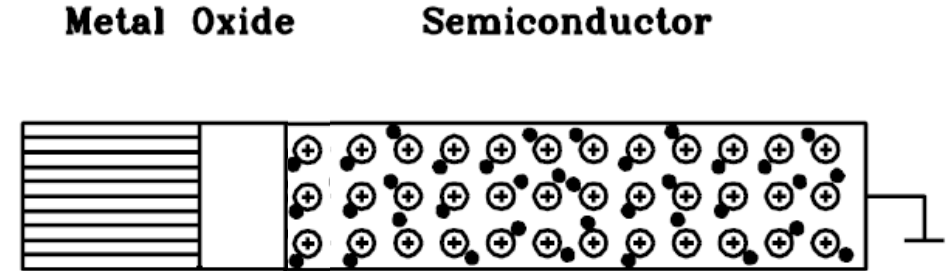
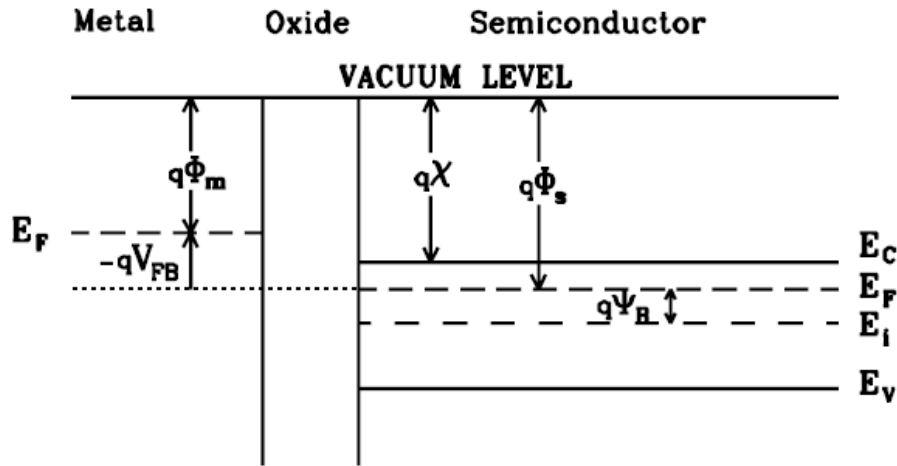
- Matrici di condensatori MOS ad alta densità usati come rivelatori ottici e memorie
- Contatti metallici segmentati e alimentati separatamente controllano il MOS
- Le cariche accumulate in inversione sotto l'ossido vengono:
  1. Immagazzinate ponendo un potenziale inferiore ai MOS vicini (memoria)
  2. Trasferite lateralmente cambiando in successione i potenziali dei MOS successivi (trasferimento)



# Condizioni in n-type piu' realistico

## MOS – Banda piatta

Condizione banda piatta:  $V = V_{FB}$



- Funzione di lavoro  $\phi$ : quanta energia e' mediamente necessaria per strappare un  $e^-$  dal materiale (tra livello di fermi e vuoto). Generalmente diversa tra metallo e semiconduttore. Nel caso del semiconduttore dipende dal drogaggio
- Affinita' elettronica  $\chi$ : energia per passare da banda di conduzione a vuoto, indipendente dal drogaggio, specifica per il semiconduttore usato
- Assumo zero cariche nell'ossido: quindi senza campo, e il livello di vuoto costante.
- Un potenziale  $V_{FB}$  uguale alla differenza tra funzioni lavoro deve essere presente per mantenere questa condizione: condizione di FLAT BAND – banda piatta

A partire da:

$$n = n_i e^{\frac{E_F - E_i}{kT}}$$

$$p = n_i e^{\frac{E_i - E_F}{kT}}$$

Si ottiene il liv di Fermi espresso come distanza dal liv F intrinseco:

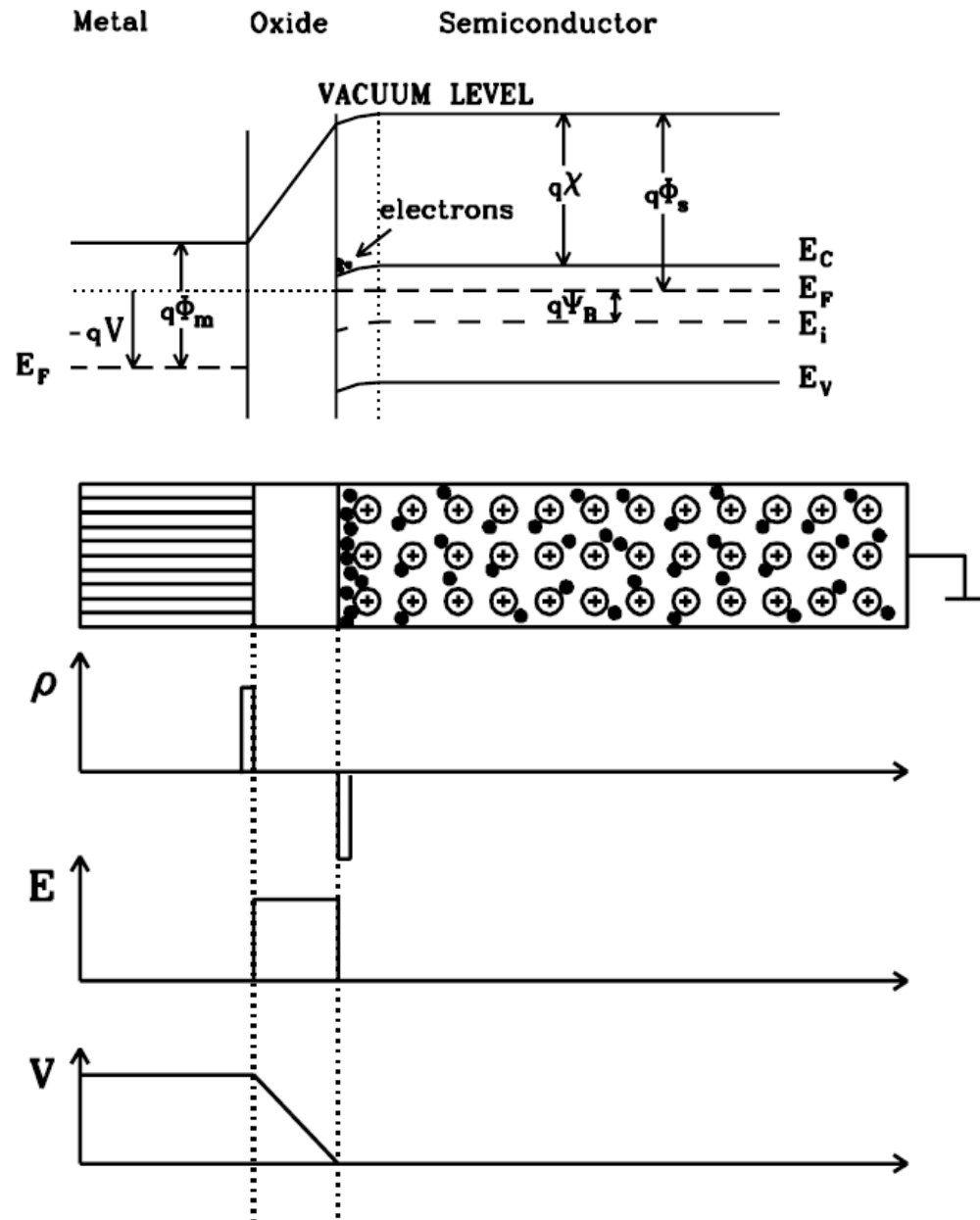
$$q\Psi_{Bn} = E_F - E_i = kT \ln \frac{N_D}{n_i}$$

$$q\Psi_{Bp} = E_i - E_F = kT \ln \frac{N_A}{n_i}$$

Da cui:

$$q\Phi_s = q\chi + E_C - E_i - kT \ln \frac{N_D}{n_i} \quad \text{N-type}$$

$$q\Phi_s = q\chi + E_C - E_i + kT \ln \frac{N_A}{n_i} \quad \text{P-type}$$



# MOS: accumulazione

- $V > V_{FB}$  Applicazione di tensioni positive all'elettrodo metallico: mentre il  $E_F$  si avvicina a  $E_C$ , gli elettroni del semiconduttore  $n$  vengono attratti ma si fermano all'interfaccia con l'ossido, invalicabile, e formano uno strato di carica sottile. Effetto condensatore piano.

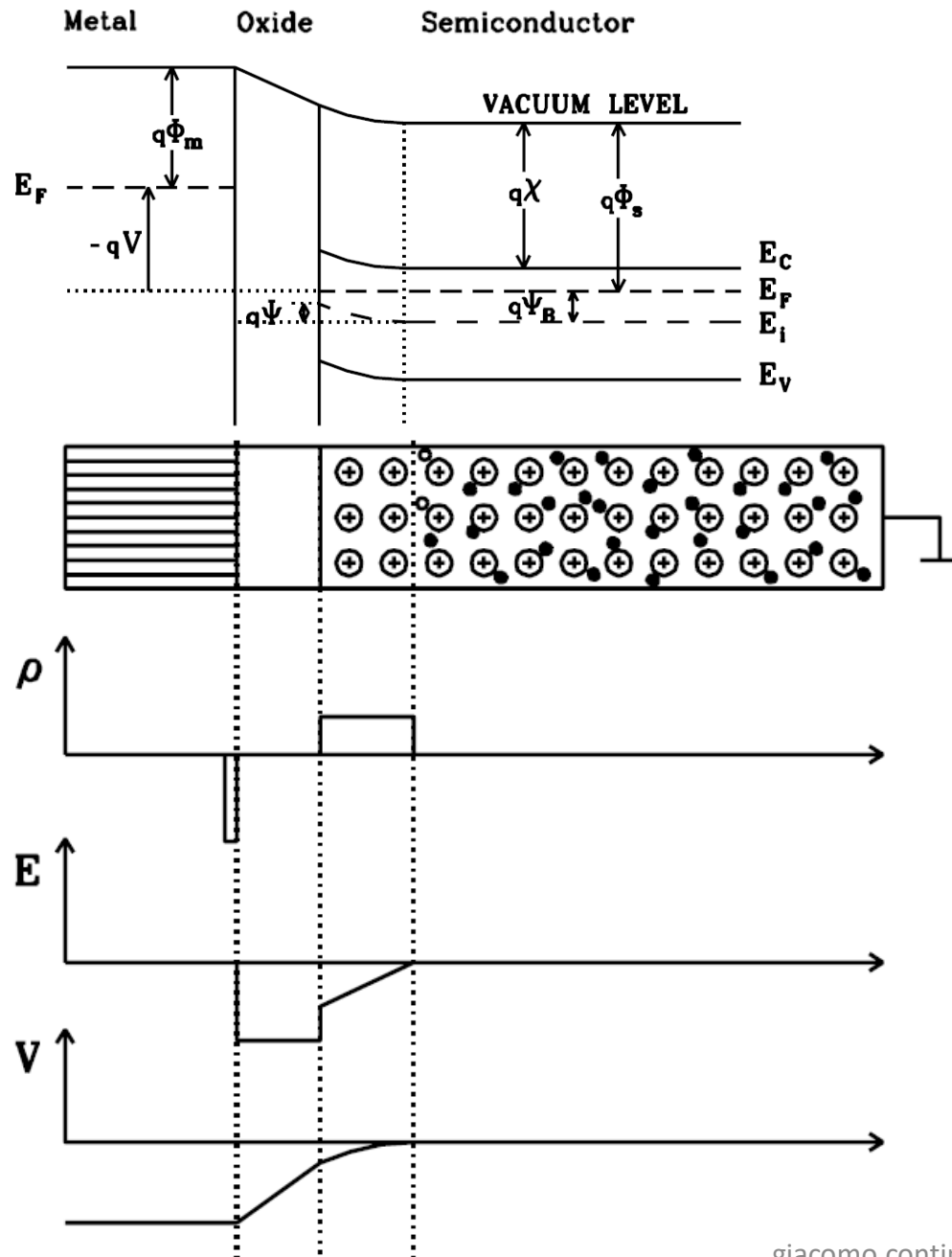
$$Q_{acc} = -\epsilon_{ox}\epsilon_0 \frac{V - V_{FB}}{d_{ox}} = -C_{ox}(V - V_{FB})$$

$$E_{ox} = -\frac{Q_{acc}}{\epsilon_{ox}\epsilon_0}$$

$$V - V_{FB} = E_{ox}d_{ox}$$

$$= -Q_{acc} \frac{d_{ox}}{\epsilon_{ox}\epsilon_0} = -\frac{Q_{acc}}{C_{ox}}$$





# MOS: svuotamento

- $V < V_{FB}$
- Applicazione di tensione negativa all'elettrodo metallico: il semiconduttore n si trova a potenziale positivo, gli elettroni si allontanano dall'interfaccia e migrano verso il bulk neutro, lasciando carica spaziale positiva nello strato svuotato
- Eventuali buche si accumulano all'interfaccia ossido-silicio

$$E_s = -\frac{qN_D}{\epsilon_s \epsilon_0} d_s \quad \text{alla superficie del s.c., con } d_s = \text{spessore svuotato}$$

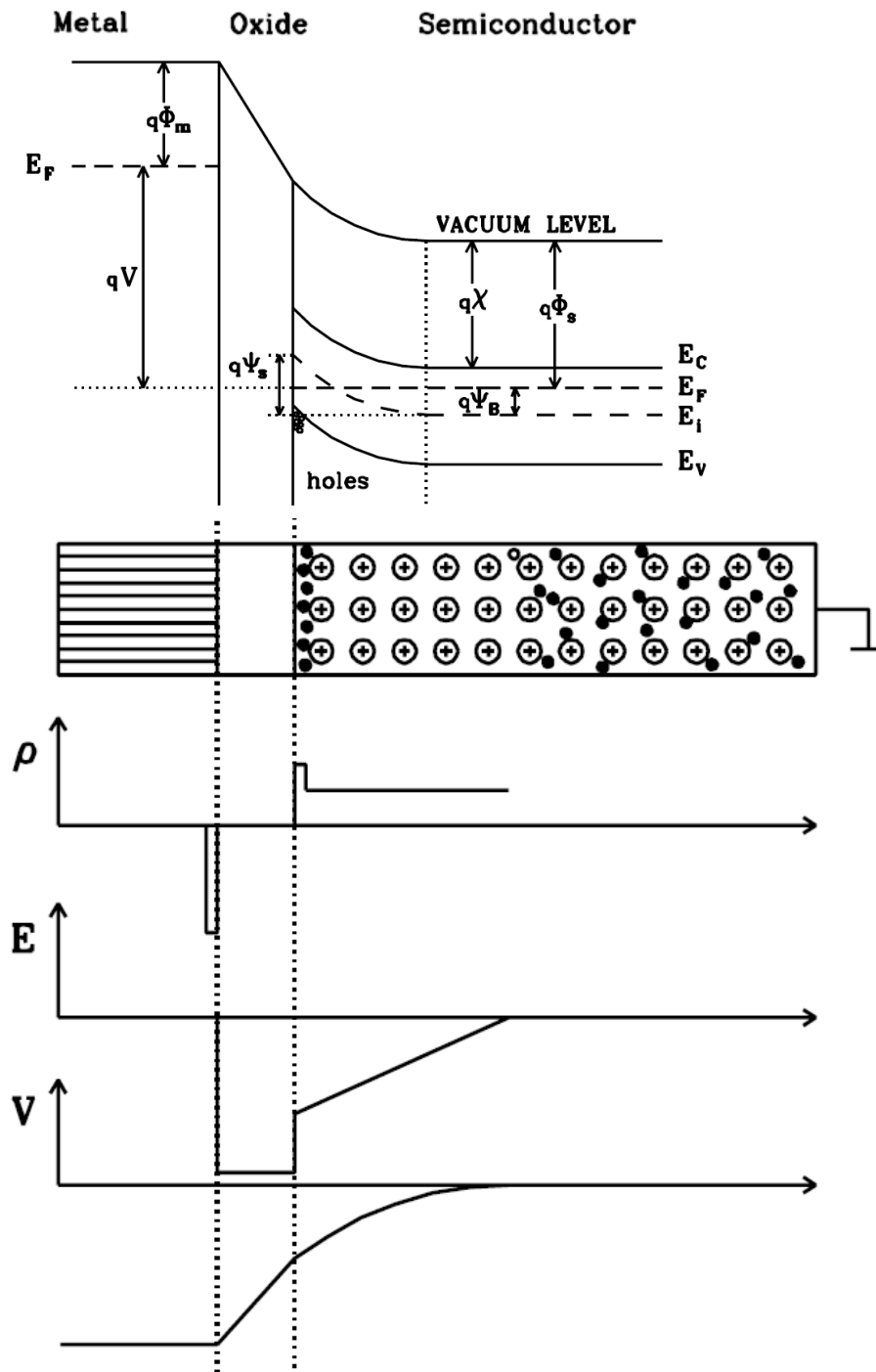
$$\psi_s = -\frac{qN_D}{\epsilon_s \epsilon_0} \frac{d_s^2}{2}$$

$$E_{ox} = -\frac{qN_D}{\epsilon_{ox} \epsilon_0} d_s$$

$$V - V_{FB} = -\frac{qN_D d_s}{\epsilon_0} \left( \frac{d_s}{2\epsilon_s} + \frac{d_{ox}}{\epsilon_{ox}} \right)$$

$$d_s = \sqrt{\frac{\epsilon_s \epsilon_0}{qN_D} (V_{FB} - V) + \left( \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{ox}} d_{ox} \right)^2} - \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{ox}} d_{ox}$$

# MOS: inversione



- Applicazione di tensione molto negativa all'elettrodo metallico: il livello di Fermi intrinseco vicino all'interfaccia sorpassa il livello di Fermi nel semiconduttore
- Se l'energia del livello di Fermi  $E_{FS}$  e' > del Livello di Fermi intrinseco all'interfaccia ossido-silicio ho INVERSIONE DEBOLE
- Se aumento ancora la tensione fino ad avere la distanza  $(E_{FS}-E_V)_{interfaccia} < (E_C-E_{FS})_{bulk}$ , allora vado in condizione di FORTE INVERSIONE: la concentrazione di buche all'interfaccia diventa maggiore della concentrazione di elettroni nel bulk
- Il semiconduttore si svuota fino a un certo spessore. Per  $V$  maggiori (in modulo) il layer di inversione diventa piu' forte ma non svuota spessore maggiore:

$$d_{max} = \sqrt{\frac{4\epsilon_s\epsilon_0\Psi_B}{qN_D}} \quad \mathcal{E}_s = -\frac{qN_D}{\epsilon_s\epsilon_0}d_{max} = -\sqrt{\frac{4qN_D\Psi_B}{\epsilon_s\epsilon_0}}$$

# SiO<sub>2</sub>-Si MOS

Presenza cariche nel bulk dell'ossido e all'interfaccia s.c. – ossido:

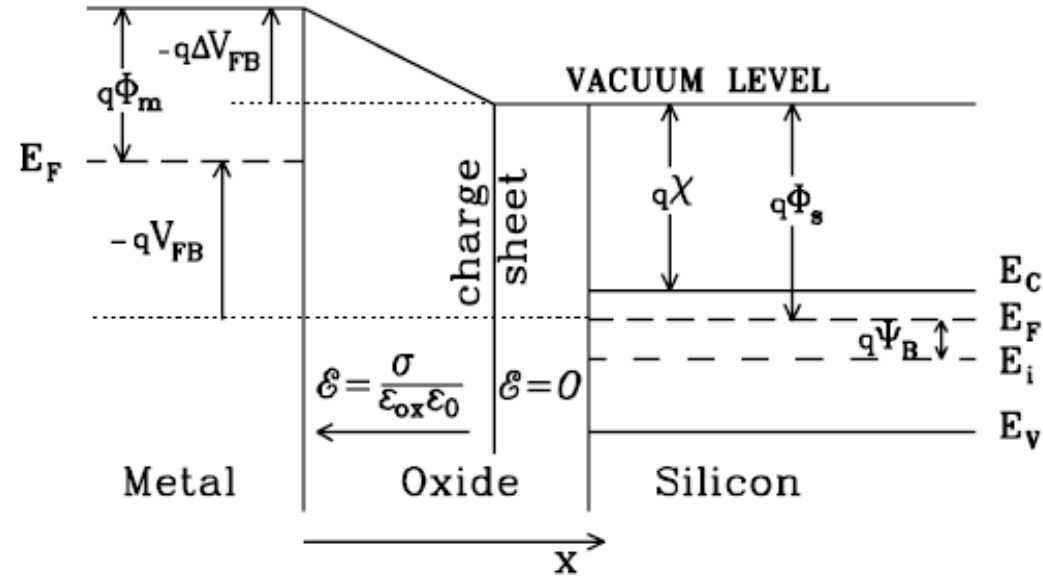
- Basterà considerare le variazioni al  $V_{FB}$  portate da queste cariche, il resto rimane come prima
- Un foglio di cariche con densità  $\sigma$  a distanza  $x$  dal metallo causa la variazione  $\Delta V_{FB} = -\frac{\sigma x}{\epsilon_{ox} \epsilon_0}$   
Sommato all'effetto delle cariche nel bulk dell'ossido otteniamo:

$$\Delta V_{FB} = -\frac{1}{\epsilon_{ox} \epsilon_0} \left[ \sigma_{int} d_{ox} + \int_{x=0}^{d_{ox}} \rho(x) x dx \right] \text{ che va a sommarsi alla differenza di funzioni lavoro tra metallo e semiconduttore}$$

L'integrale è la densità di carica superficiale all'interfaccia

Origine delle cariche nell'ossido:

1. Buche intrappolate dai difetti dell'ossido, fisse nello spazio
  - Specialmente all'interfaccia Si-SiO<sub>2</sub> dove le distorsioni al reticolo sono grandi
  - Quando sono molto vicini al Si e ammettono il tunneling possono catturare buche e elettroni
2. Ioni + e – distribuiti nell'ossido che possono muoversi grazie al campo elettrico, in funzione della temperatura



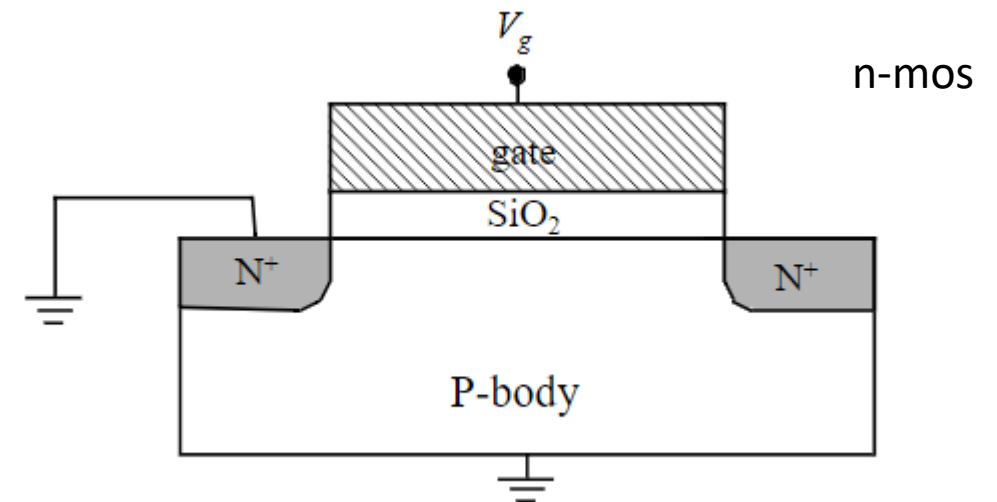
# Conclusioni e applicazione MOS transistor

La superficie del semiconduttore puo' essere:

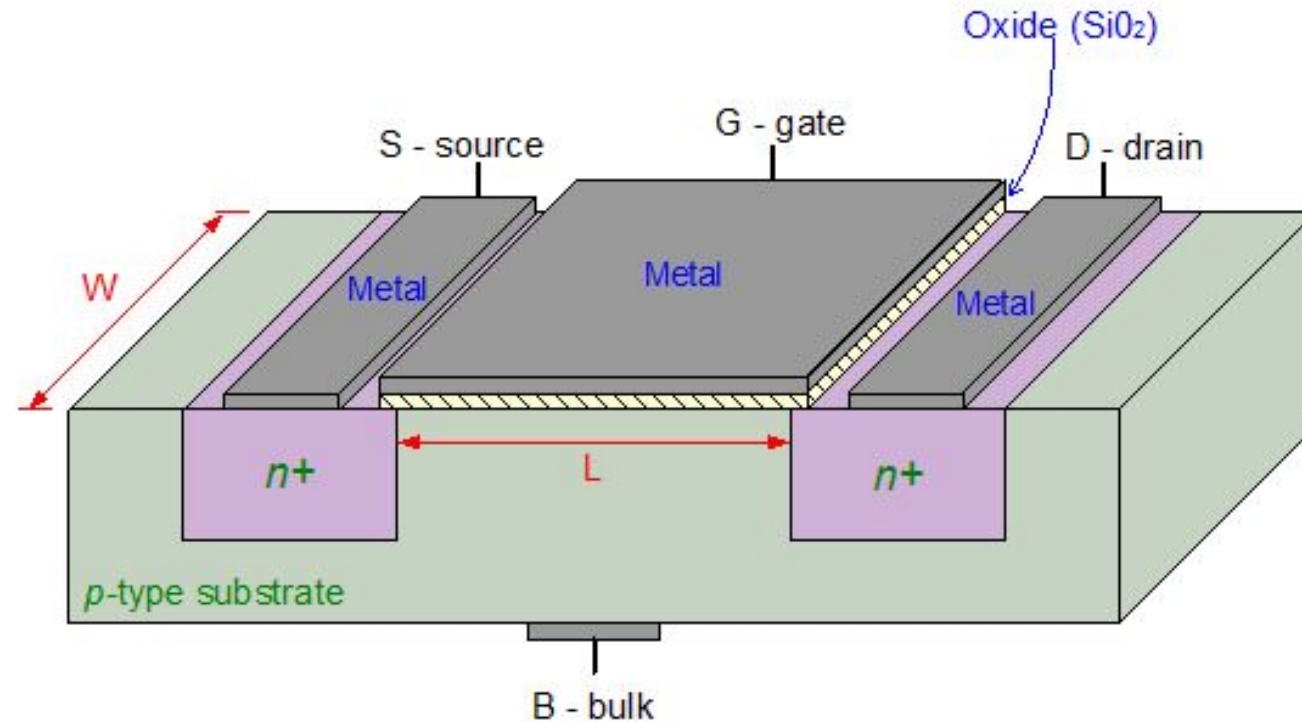
1. Molto conduttiva e connessa al volume in accumulazione
2. Molto isolante in svuotamento
3. Molto conduttiva e non connessa al volume in inversione

## Transistor MOS

- Posso sfruttare il canale per mettere in comunicazione due impianti di tipo opposto al bulk e controllare il contatto via potenziale applicato al **Gate** metallico, e ai due impianti (**Source** e **Drain**)



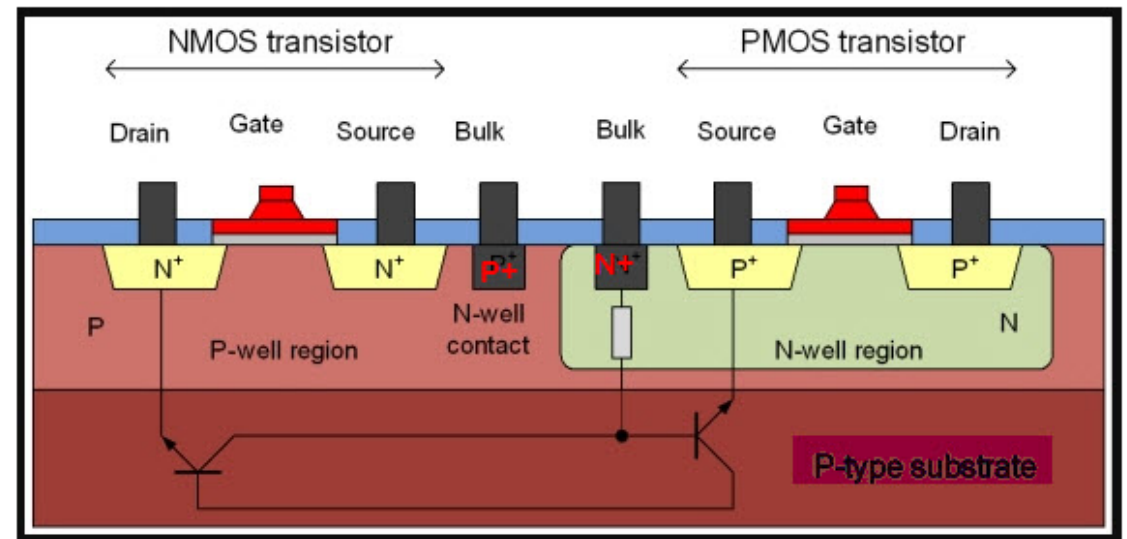
# Lunghezza del canale $L$



$L$  connota la tecnologia CMOS e la possibilita' di addensare transistor per unita' di superficie

# Complementary MOS: nmos + pmos

- I due transistor sono associate e controllati dagli stessi potenziali, in modo che quando uno e' OFF l'altro e' ON e viceversa
- Usati per switch logici, invertitori, AND, OR e negazioni
- Consumo corrente limitatissimo, solo durante la fase di switching



CMOS Transistor