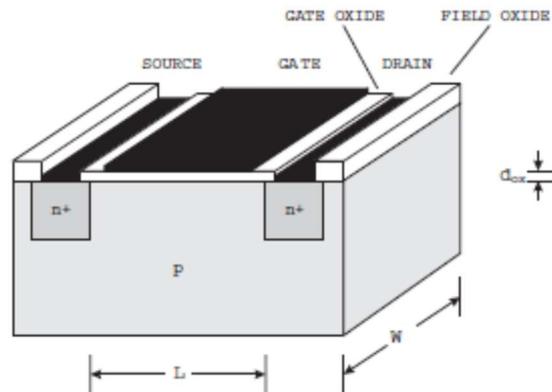


23 - Transistor MOS

MOSFET = Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor



Canale: In assenza di polarizzazione = p , come substrato

Gate: isolato dal canale da strato di ossido ($\text{SiO}_2 \sim$ vetro \rightarrow Isolante)

\rightarrow Accoppiamento *capacitivo* gate-canale

Meccanismo (non del tutto ovvio):

Formazione di uno *strato conduttivo* (\leftarrow concentrazione di portatori liberi) nel canale con applicazione di una tensione ($+va$ o $-va$) sul gate

Substrato $p \rightarrow$ Canale $n \rightarrow$ NMOS

Substrato $n \rightarrow$ Canale $p \rightarrow$ PMOS

\rightarrow Situazione esaminata: canale normalmente assente, presente per $V_{GS} > V_T$ (MOS ad arricchimento)

Possibile formare canale in modo 'permanente' per $V_{GS}=0$, con scomparsa in presenza di opportuna tensione esterna (MOS a svuotamento)

Tipi di MOSFET

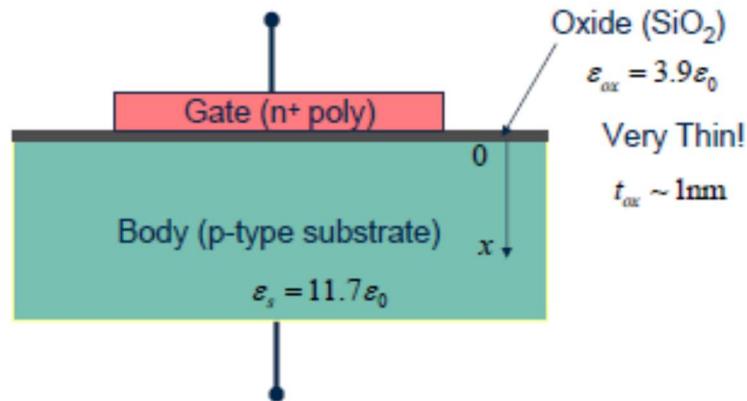
NMOS

| TIPO | SEZIONE TRASVERSALE | CARATTERISTICHE D'USCITA |
|---|---------------------|--------------------------|
| CANALE n AD ARRICCHIMENTO (NORMALMENTE CHIUSO) | | |
| CANALE n A SVUOTAMENTO (NORMALMENTE APERTO) | | |
| CANALE p AD ARRICCHIMENTO (NORMALMENTE CHIUSO) | | |
| CANALE p A SVUOTAMENTO (NORMALMENTE APERTO) | | |

NMOS

PMOS

PMOS



Equilibrio (come visto prima):

$$n_0^+ = n_i e^{V_{n^+}/V_T} \simeq N_D \rightarrow V_{n^+} \simeq V_T \ln \frac{N_D}{n_i}$$

$$p_0 = n_i e^{-V_p/V_T} \simeq N_A \rightarrow V_p \simeq -V_T \ln \frac{N_A}{n_i}$$

$$V_{n^+} > V_p \rightarrow V_{n^+p} = V_T \left(\ln \frac{N_D}{n_i} + \ln \frac{N_A}{n_i} \right)$$

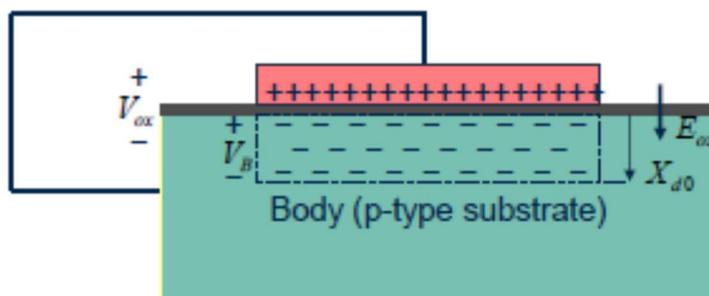
$$V_{n^+} \sim 0.55 V \text{ per } N_D \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

$$V_p \sim -??? V \text{ per } N_A \sim 10^{??} \text{ cm}^{-3}$$

Tensione → Campo elettrico

→ Spopolamento di lacune dal substrato vicino all'isolante

→ Accumulo di carica spaziale -va (accettori)



Tensione fra n^+ e p senza passaggio di corrente (← isolante)

In p : gradiente di potenziale

Origine: Carica spaziale, causata da strato di svuotamento

Carica sul gate: +va

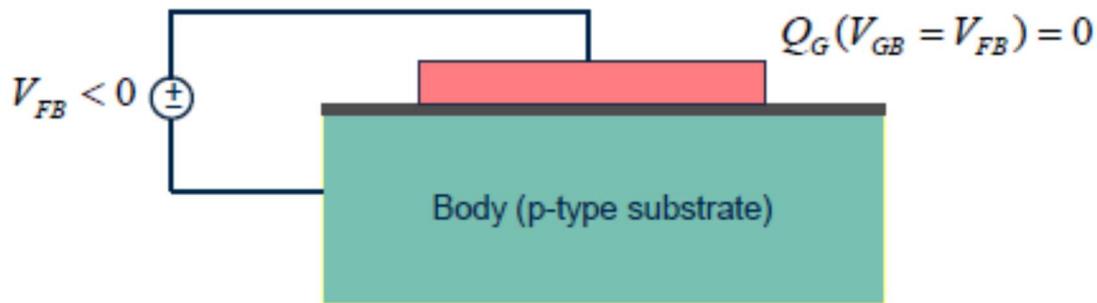
Tensione esterna negativa: Svuotamento

→ Riduzione larghezza strato di svuotamento

Tensione esterna piu' negativa: Compensazione

→ 'Banda piatta' → Nessuno strato di svuotamento

$$V_{GB} = -V_{np} \equiv V_{FB} < 0$$

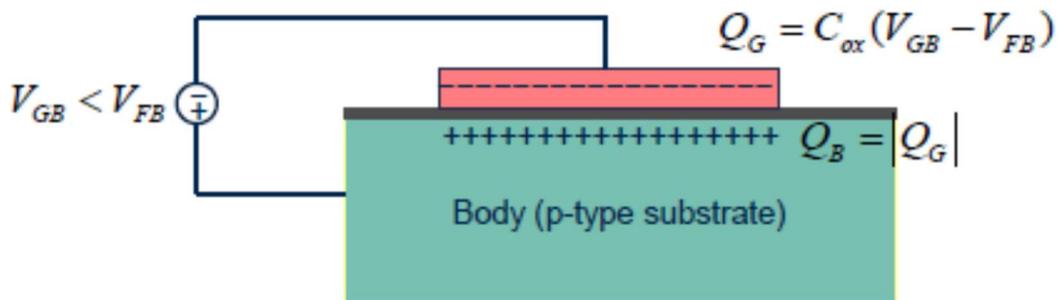


Tensione esterna ancora piu' negativa: $V_{GB} < V_{FB} < 0$

→ 'Banda ≠ piatta'

Accumulazione

→ ~ Capacita' MOS: carica disponibile sulle due 'armature'



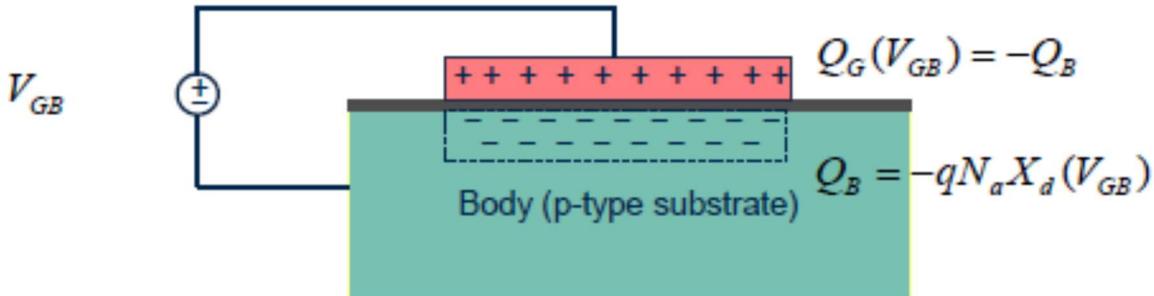
Campo elettrico diretto da substrato verso gate

→ Accumulo di lacune sotto il gate

Tensione positiva: Svuotamento

→ Allargamento strato di svuotamento

→ Carica spaziale negativa nel substrato (come all'equilibrio)



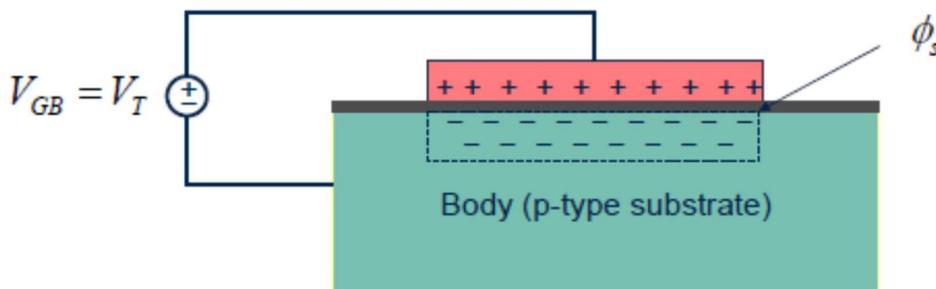
Quando $V_{GB} = V_T > 0$:

Pot. alla superficie → Concentraz. elettroni = N_A

$$n_s = n_i e^{\frac{V_s}{V_T}} = N_A \rightarrow V_s = -V_P$$

→ Strato di svuotamento non aumenta piu'

→ Carica in piu' consiste in elettroni vicini alla superficie



Tensione di soglia:

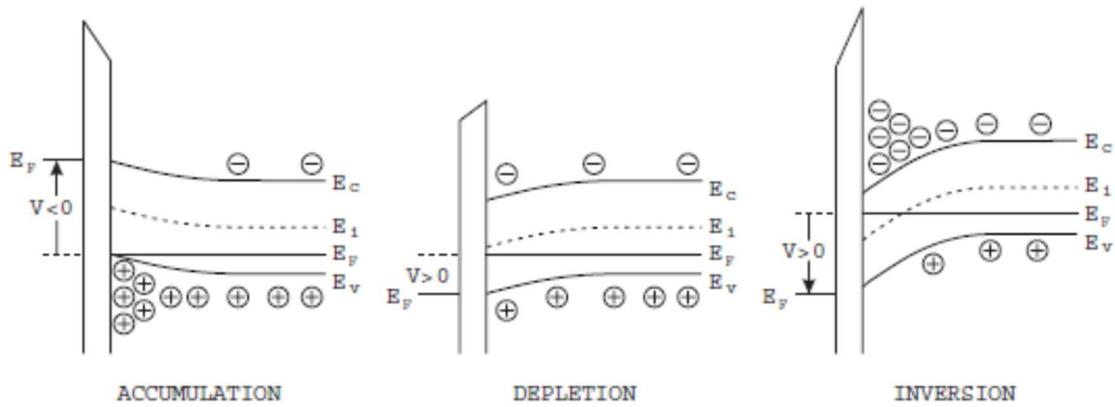
V_{GB} t.c. vicino alla superficie portatori cambiano da p a n

→ Inversione

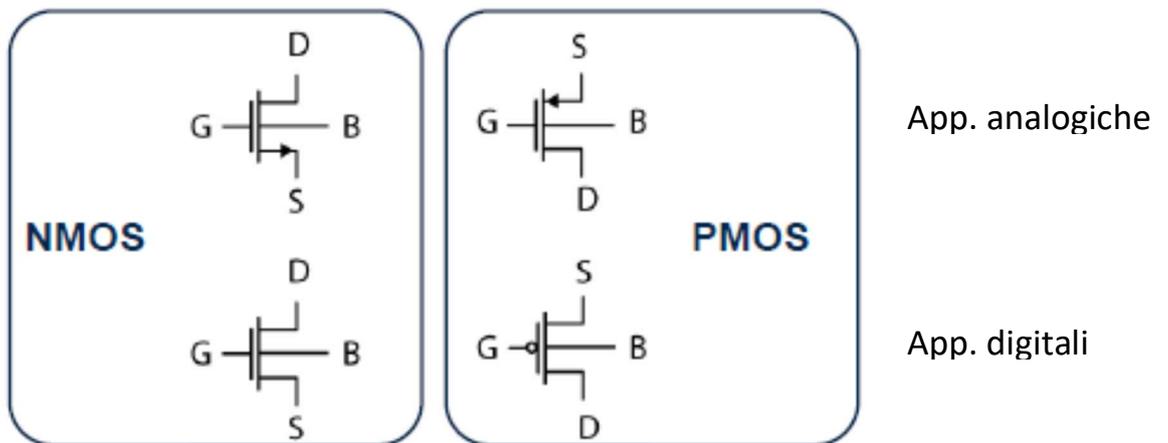
Si puo' dimostrare che:

$$V_T = V_{FB} - 2V_P + \frac{2\sqrt{-q\epsilon N_A V_P}}{C_{ox}}$$

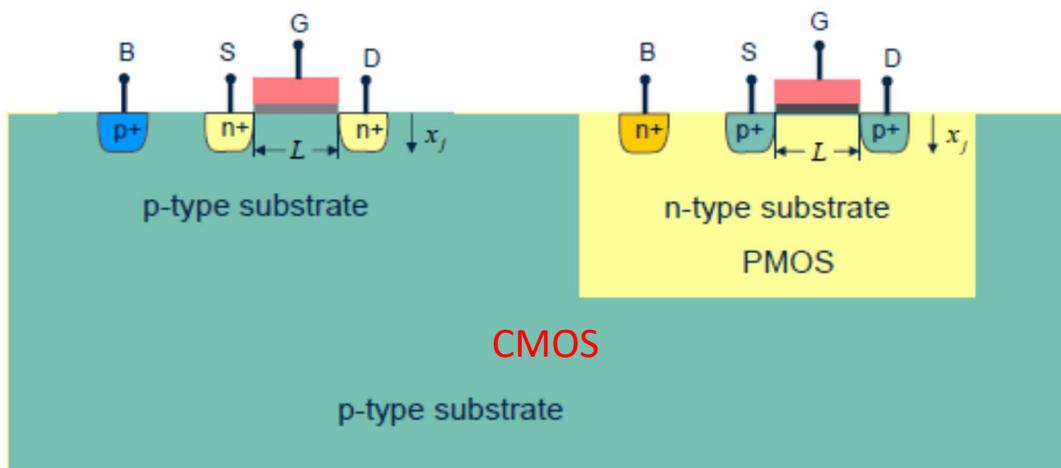
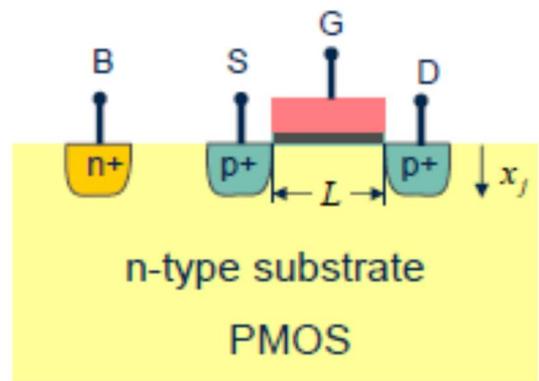
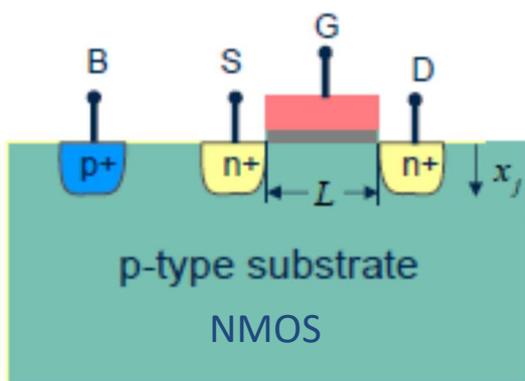
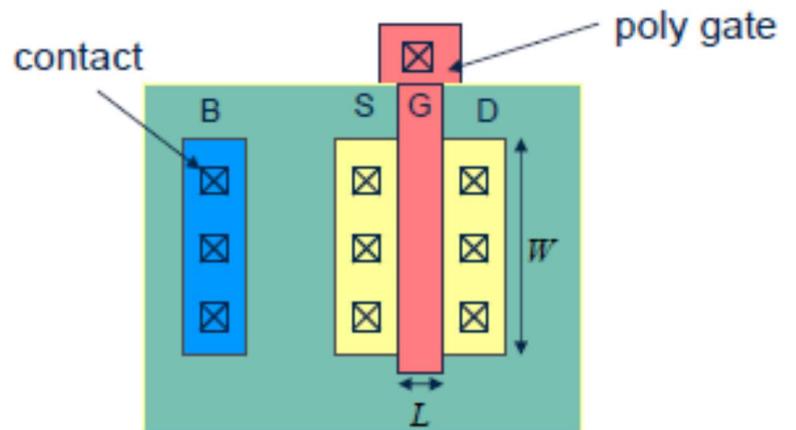
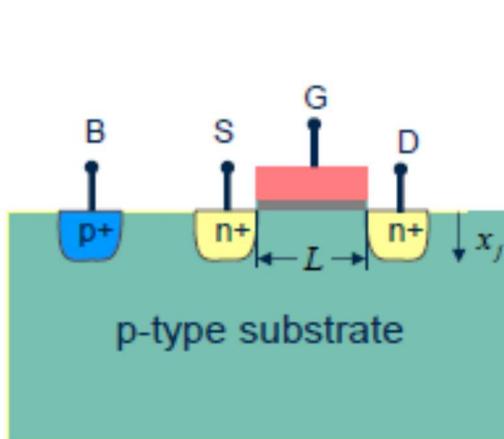
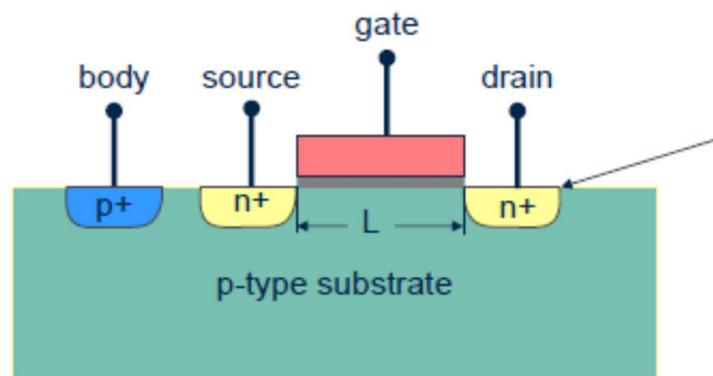
Visualizzazione intuitiva:



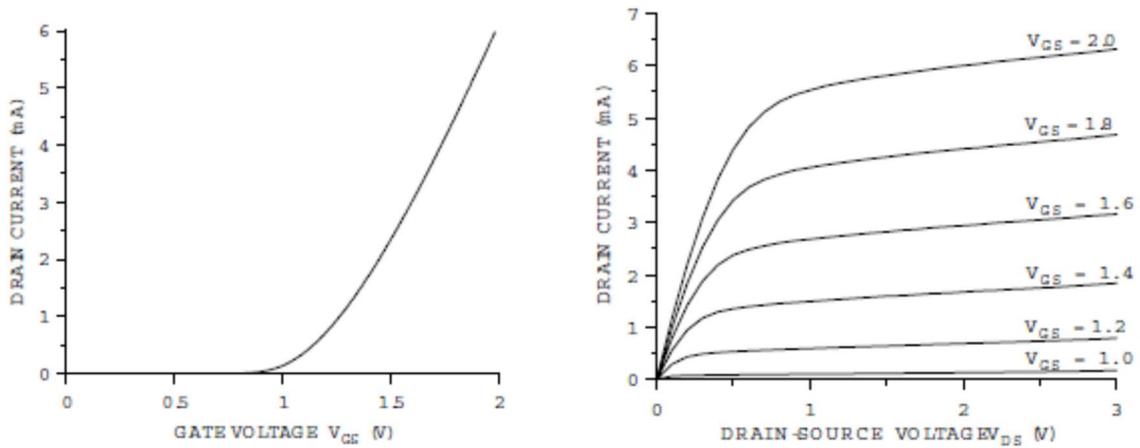
MOSFET: Simboli circuitali



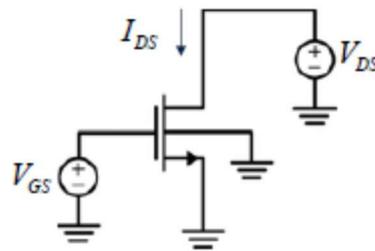
Schema & Layout



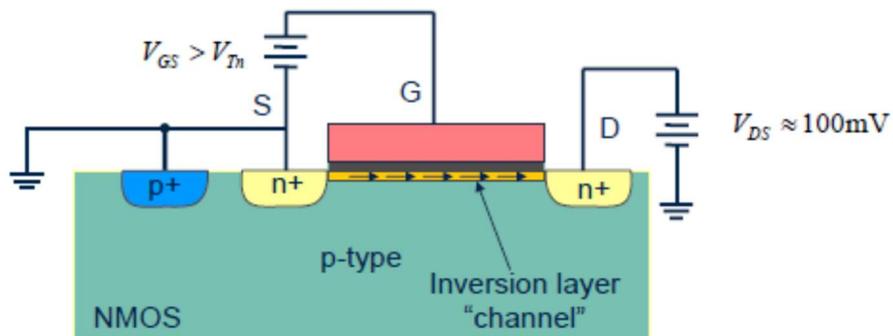
Caratteristiche di un MOS:



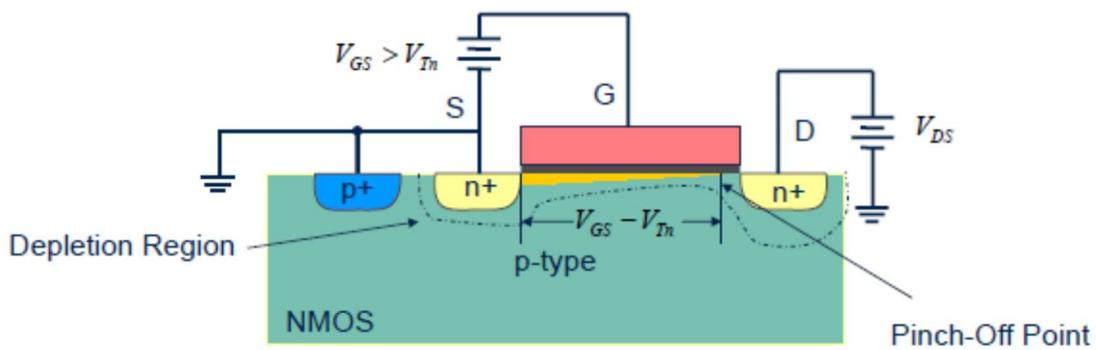
V_T



Reg. 'ohmica':



Reg. di 'pinch-off':



Caratteristica del MOS: parte iniziale

$$I_D = \frac{dQ}{dt} = \frac{dQ}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{dQ}{dx} v \quad \text{Corrente nello strato di inversione}$$

$\frac{dQ}{dx}$ densità lineare di carica, C_{ox} cap. per unità di superficie del gate

$$\rightarrow \frac{dQ}{dx} = WC_{ox} [V_{GS} - V(x) - V_{TH}]$$

$$v = \frac{dx}{dt} = \mu_n E = \mu_n \frac{dV}{dx}$$

$$\rightarrow I_D = WC_{ox} [V_{GS} - V(x) - V_{TH}] \mu_n \frac{dV}{dx}$$

$$\rightarrow \int_0^L I_D dx = \int_{V_S}^{V_D} WC_{ox} [V_{GS} - V_{TH}] \mu_n dV - \int_{V_S}^{V_D} WC_{ox} V(x) \mu_n dV$$

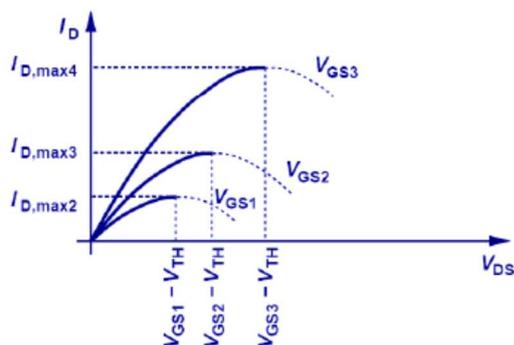
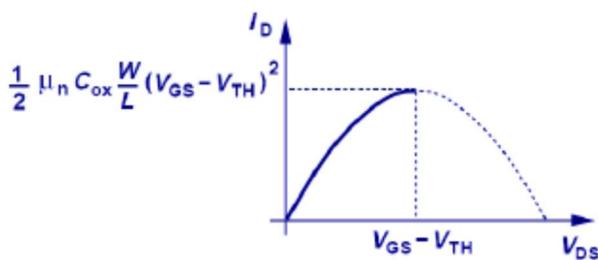
I_D in principio funzione di x , in pratica costante

$$\rightarrow I_D L = WC_{ox} \mu_n [V_{GS} - V_{TH}] V_{DS} - \frac{1}{2} WC_{ox} \mu_n V_{DS}^2$$

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

Andamento parabolico:

$$\rightarrow I_D^{\max} = \frac{1}{2} \frac{W}{L} C_{ox} \mu_n [(V_{GS} - V_{TH})^2]$$

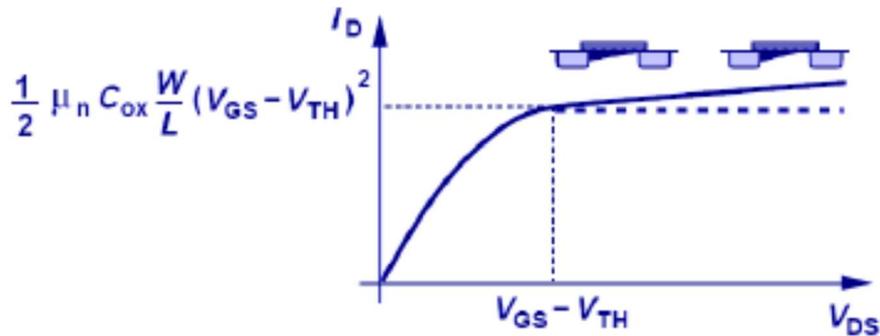


Caratteristica del MOS: parte di saturazione

Corrente di drain \sim costante

Correzione dovuta alla dipendenza di L da V_{DS} :

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{TH})^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

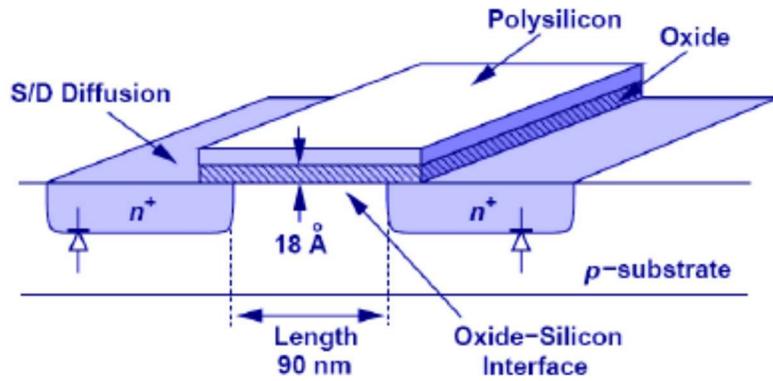


Confronto BJT vs MOS:

| Bipolar Transistor | MOSFET |
|---|---|
| <p>Exponential Characteristic Active: $V_{CB} > 0$ Saturation: $V_{CB} < 0$ Finite Base Current Early Effect Diffusion Current -</p> | <p>Quadratic Characteristic Saturation: $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$ Triode: $V_{DS} < V_{GS} - V_{TH}$ Zero Gate Current Channel-Length Modulation Drift Current Voltage-Dependent Resistor</p> |

Note tecnologiche:

a) Stato dell'arte ca. 2010 AD; oggi (2020) lunghezza minima ca. 10 nm



Realisticamente:

