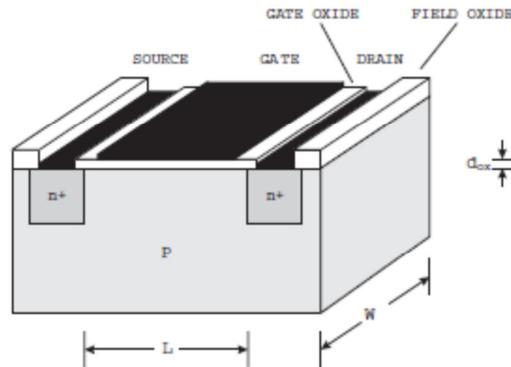


Transistor MOS (MOSFET = Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)



Struttura ~ simile a quella del JFET, ma:

Canale *non* formato al momento della costruzione

→ In assenza di polarizzazione = p , come substrato

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

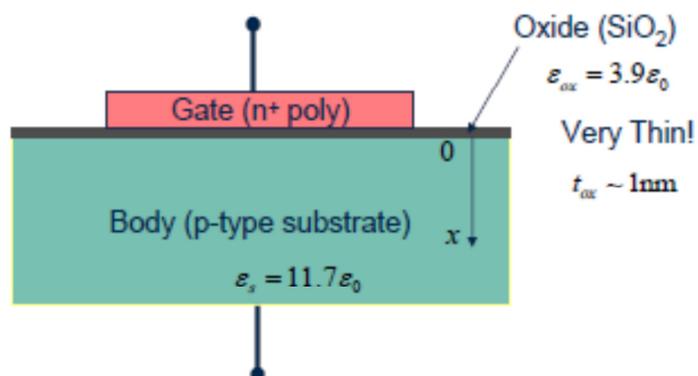
→ Accoppiamento *capacitivo* gate-canale

Meccanismo (non del tutto ovvio):

Formazione di uno *strato conduttivo* (← concentrazione di elettroni liberi) nel canale con applicazione di una tensione (+ v_a o - v_a) sul gate

Punto di partenza:

Elettrostatica dei semiconduttori → Capacità MOS



Substrato $p \rightarrow$ NMOS

Substrato $n \rightarrow$ PMOS

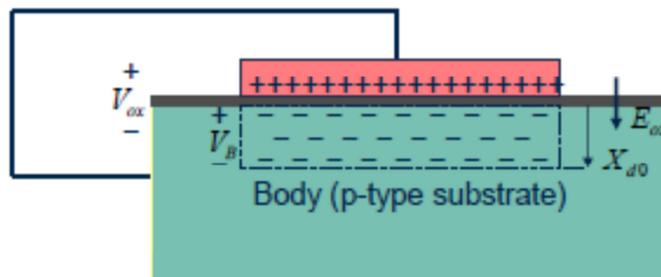
Equilibrio (come visto prima):

$$n_0 = n_i e^{V_n/V_T} \simeq N_D \rightarrow V_n \simeq V_T \ln \frac{N_D}{n_i} \sim 0.55 \text{ V per } N_D \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

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

$$V_n > V_p \rightarrow V_{np} = 0.55 \text{ V} + V_T \ln \frac{N_A}{n_i}$$

Tensione \rightarrow Campo elettrico \rightarrow Accumulo di carica!



Notare:

Tensione fra n e p senza passaggio di corrente (\leftarrow isolante)

Carica sul gate: +va

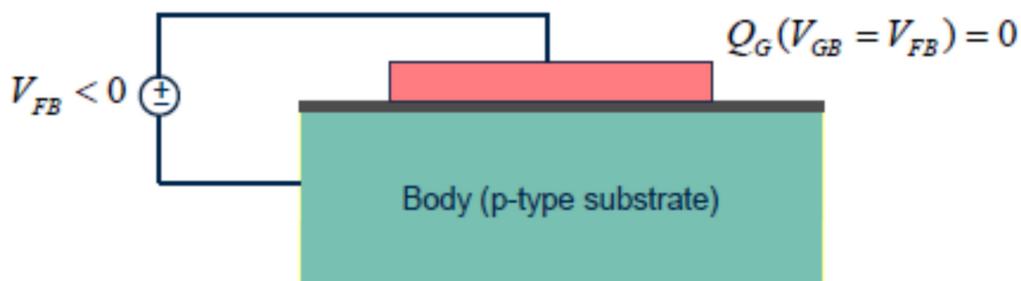
Origine:

Carica spaziale, causata da strato di svuotamento

Tensione esterna negativa: compensazione

\rightarrow 'Banda piatta' \rightarrow Nessuno strato di svuotamento

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

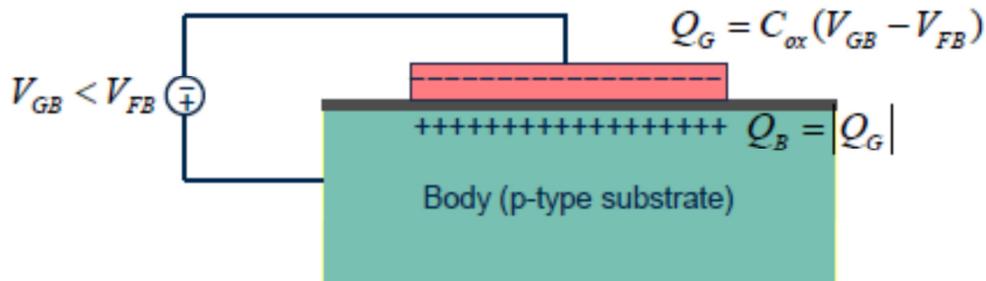


Tensione esterna ancora piu' negativa:

→ 'Banda ≠ piatta'

$$V_{GB} < V_{FB} < 0$$

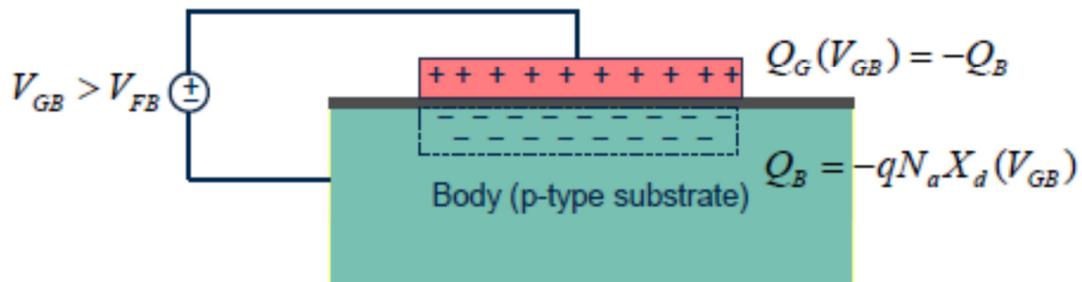
→ ~ Capacita' MOS: carica disponibile sulle due 'armature'



Lacune si accumulano sotto il gate

Tensione positiva:

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



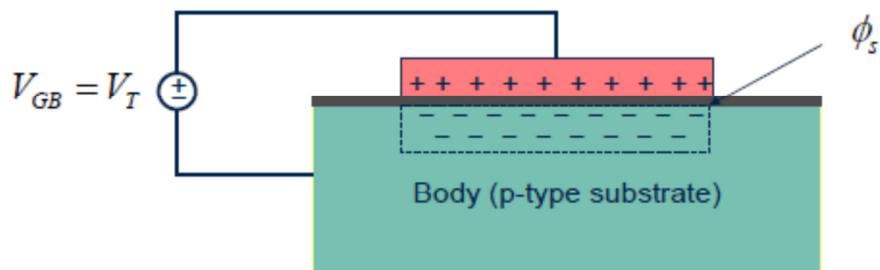
Quando $V_{GB} = V_T > 0$:

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:

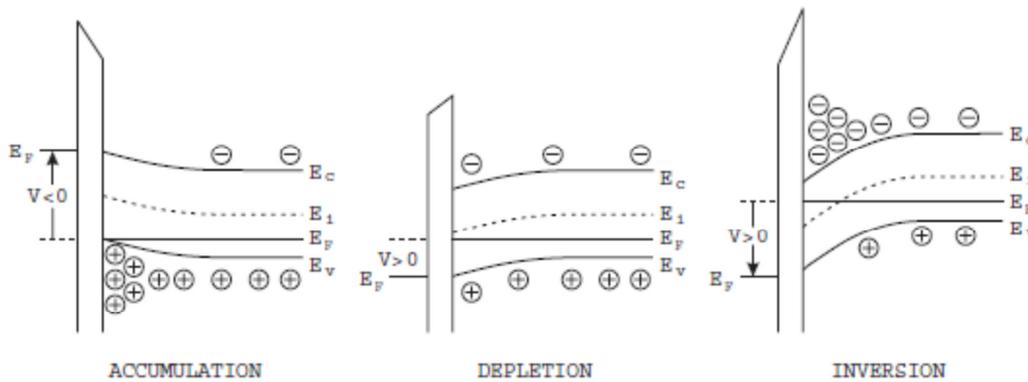
V_{GB} t.c. vicino alla superficie portatori cambiano da p a n

→ Inversione

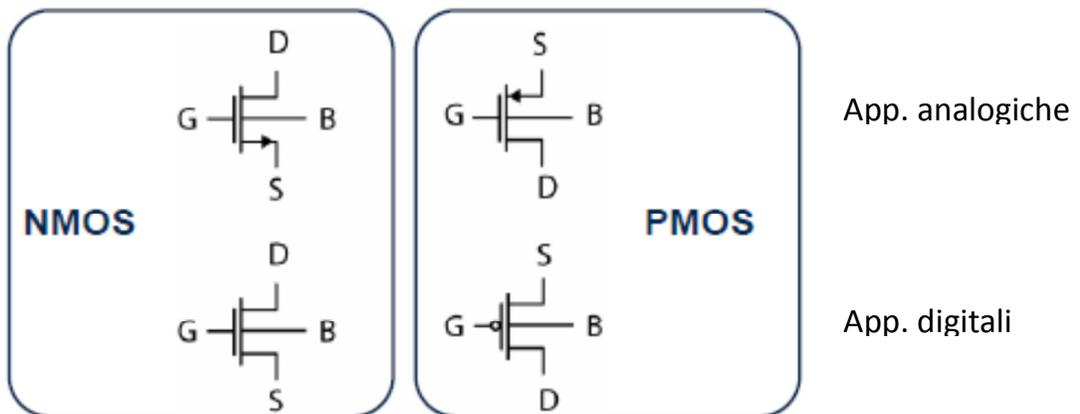
Si può dimostrare che:

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

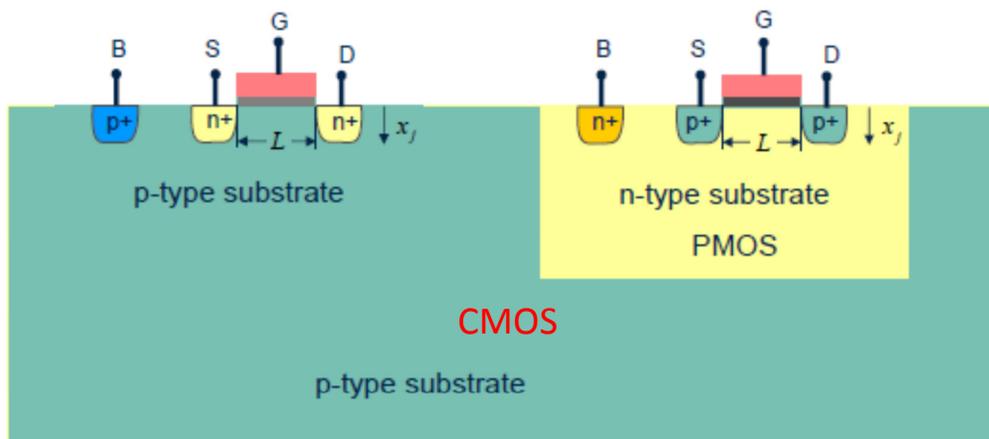
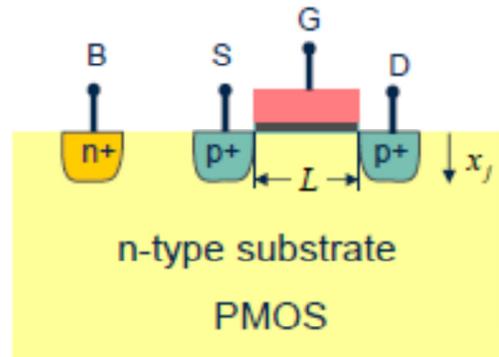
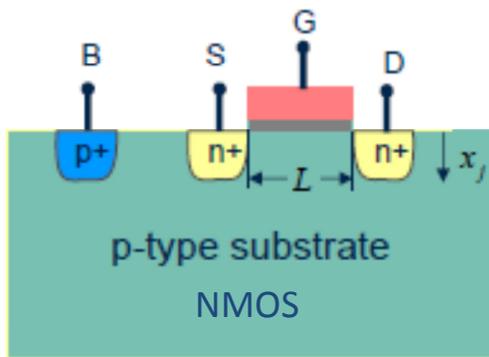
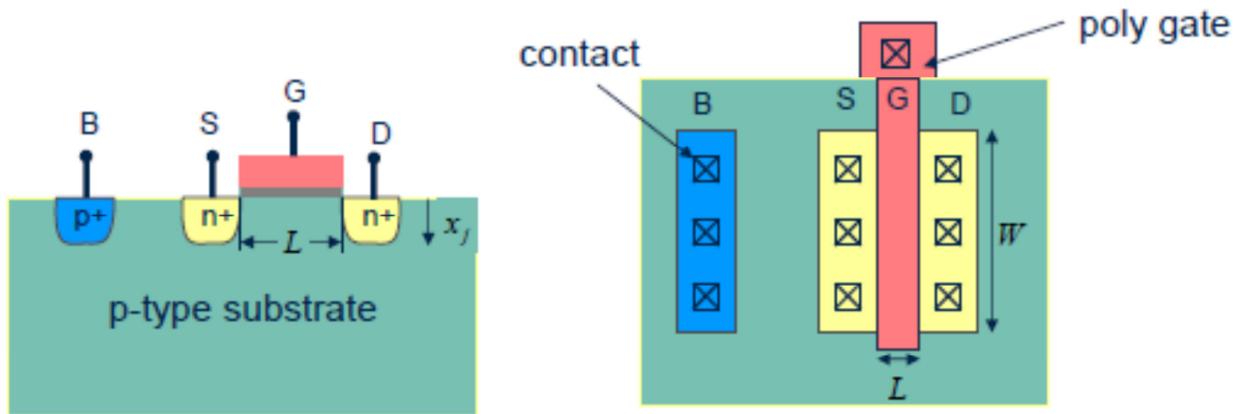
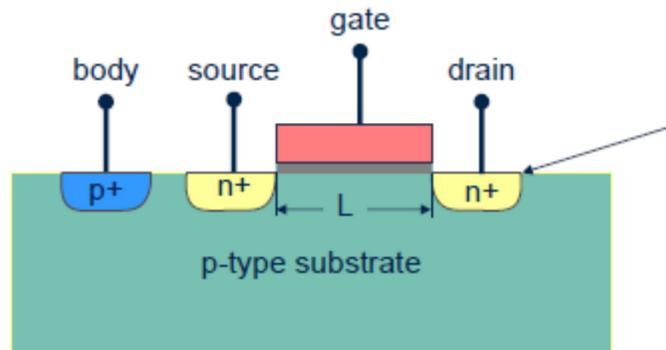
Visualizzazione intuitiva:



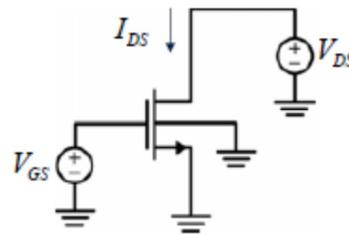
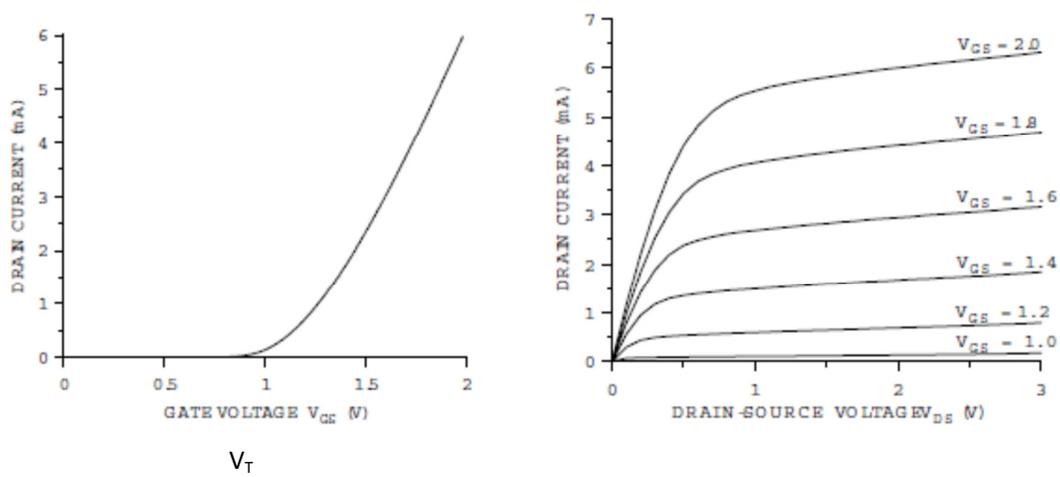
MOSFET: Simboli circuitali



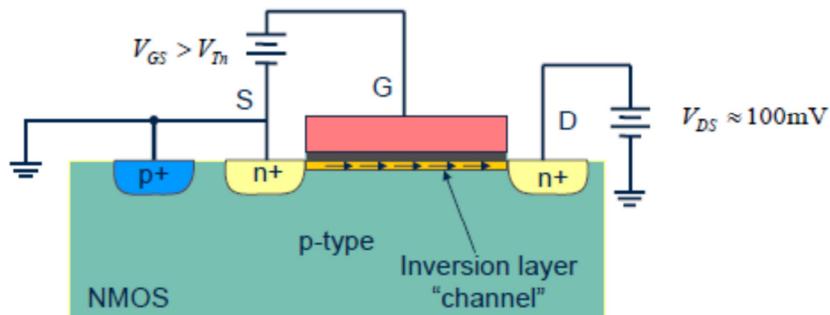
Schema & Layout



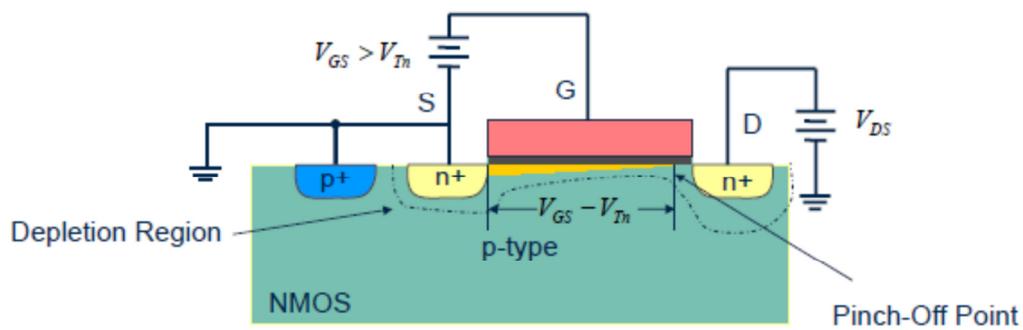
Caratteristiche di un MOS:



Reg. 'ohmica':



Reg. di 'pinch-off':



Ricostruzione caratteristica del MOS:

$I_D = Qv$ Corrente nello strato di inversione, funzione di x

$Q(x)$ densita' lineare di carica, C_{ox} cap. per unita' di superficie del gate

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

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

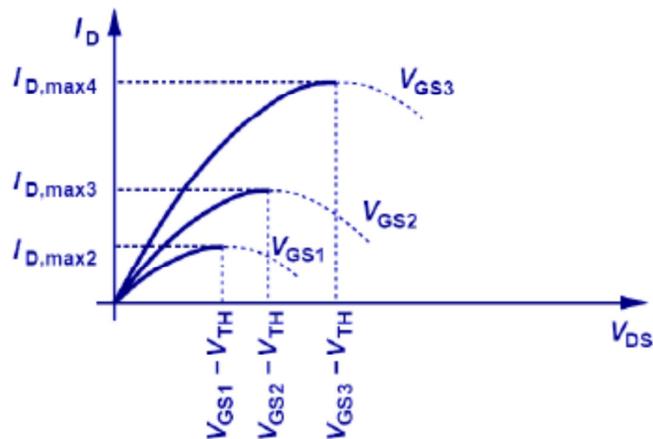
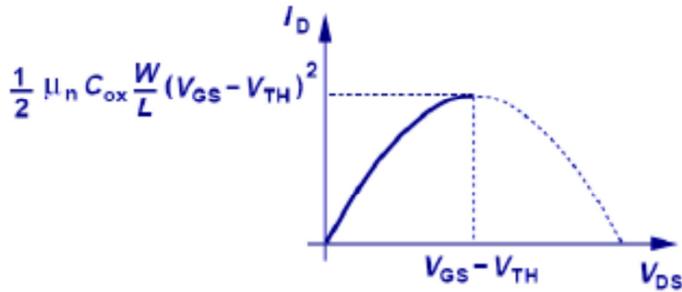
$$\rightarrow I_D = WC_{ox} [V_{GS} - V(x) - V_{TH}] \mu_n \frac{dV}{dx}$$

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

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

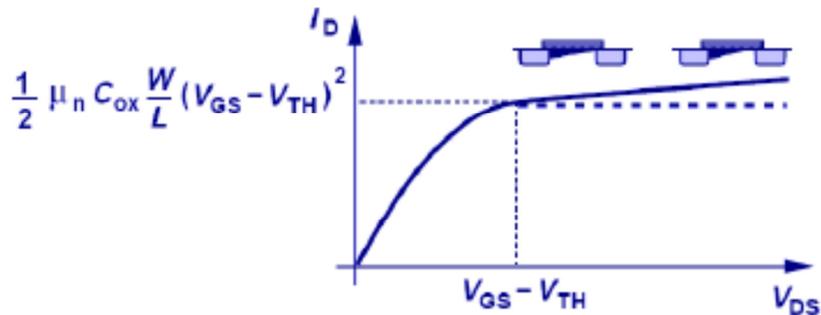
$$\rightarrow I_D = \frac{1}{2} \frac{W}{L} C_{ox} \mu_n [2(V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} - V_{DS}^2]$$

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



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

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

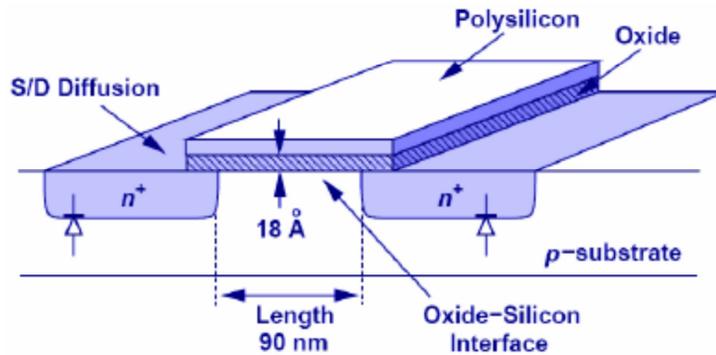


Confronto BJT vs MOS:

Bipolar Transistor	MOSFET
Exponential Characteristic Active: $V_{CB} > 0$ Saturation: $V_{CB} < 0$ Finite Base Current Early Effect Diffusion Current -	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

Note tecnologiche:

a) Stato dell'arte



b) Zoologia

Tipi di MOSFET

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

b) Layout 'realistico'

