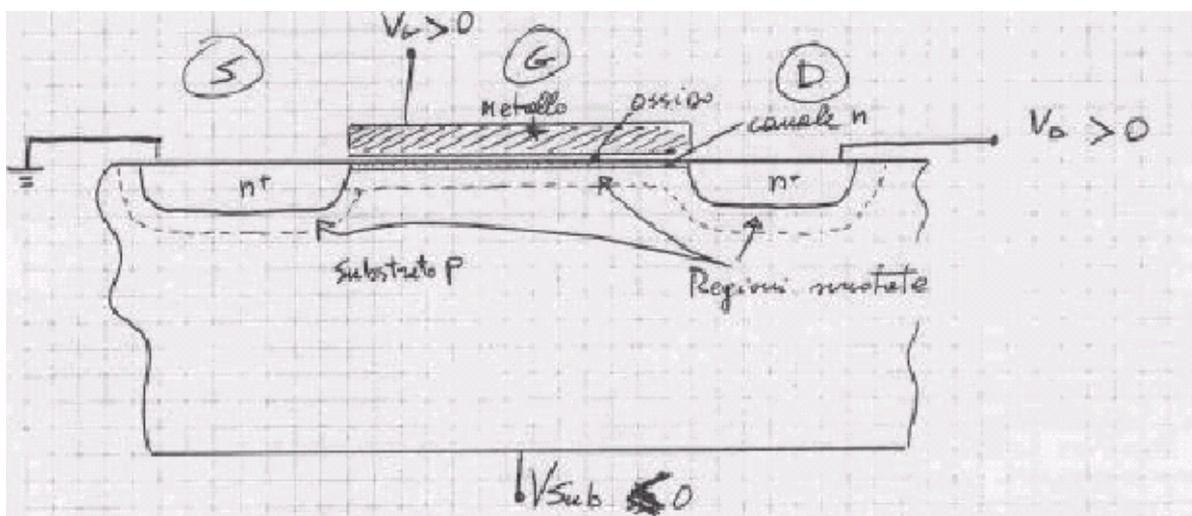


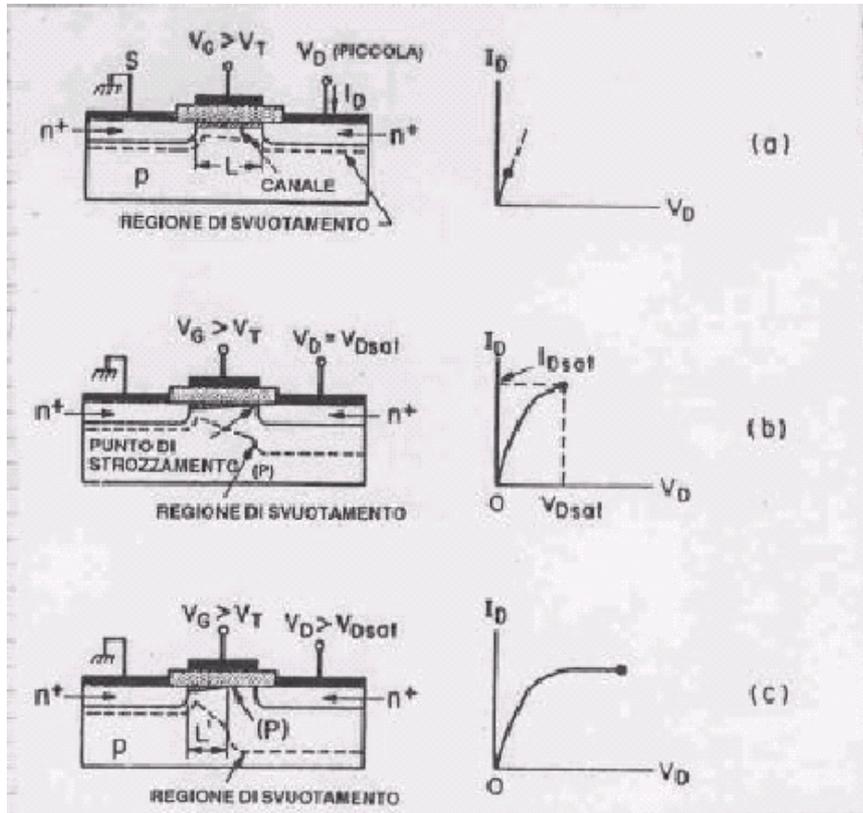
Il sistema MOSFET

Il MOSFET è un FET che utilizza come canale la regione di inversione che si crea in una struttura MOS opportunamente polarizzata. Il contatto di gate del transistor coincide con il Metallo della struttura MOS. Esso è elettricamente isolato dal resto della struttura attraverso l'ossido della struttura MOS. La struttura viene completata realizzando sul substrato di semiconduttore due diffusioni con drogaggio opposto a quello del bulk, in modo che il canale, una volta formatosi, vada a collegare elettricamente tali regioni ai cui capi viene applicata una opportuna differenza di potenziale. Rispetto al MOS, perciò, la struttura ha due ulteriori contatti, SOURCE e DRAIN, mentre il contatto del bulk di solito (ma non obbligatoriamente) viene eliminato. Come tutti i FET, questo sistema viene polarizzato mantenendo il source collegato a massa, ovvero viene adottata una configurazione "a source comune"



Caratteristiche I-V

Qualitativamente, la caratteristica di uscita di un MOSFET è la seguente:



Partendo dalla condizione in cui $V_G > V_T$, ovvero purchè il canale sia formato, per V_D piccoli, il canale ha un comportamento ohmico e nella caratteristica si osserva una regione lineare. Man mano che V_D aumenta, il canale diventa sempre meno simmetrico e si restringe verso il drain. La resistenza equivalente del canale aumenta e la corrente aumenta meno rapidamente di prima \rightarrow zona sublineare. Aumentando ancora V_D fino a V_{Dsat} , il canale si strozza (pinch-off), la corrente diventa costante. Ogni ulteriore aumento di V_D fa sì che il punto di pinch-off si sposti verso il source che mantiene sempre lo stesso potenziale V_{dsat} rispetto al source.

Caratteristiche I-V

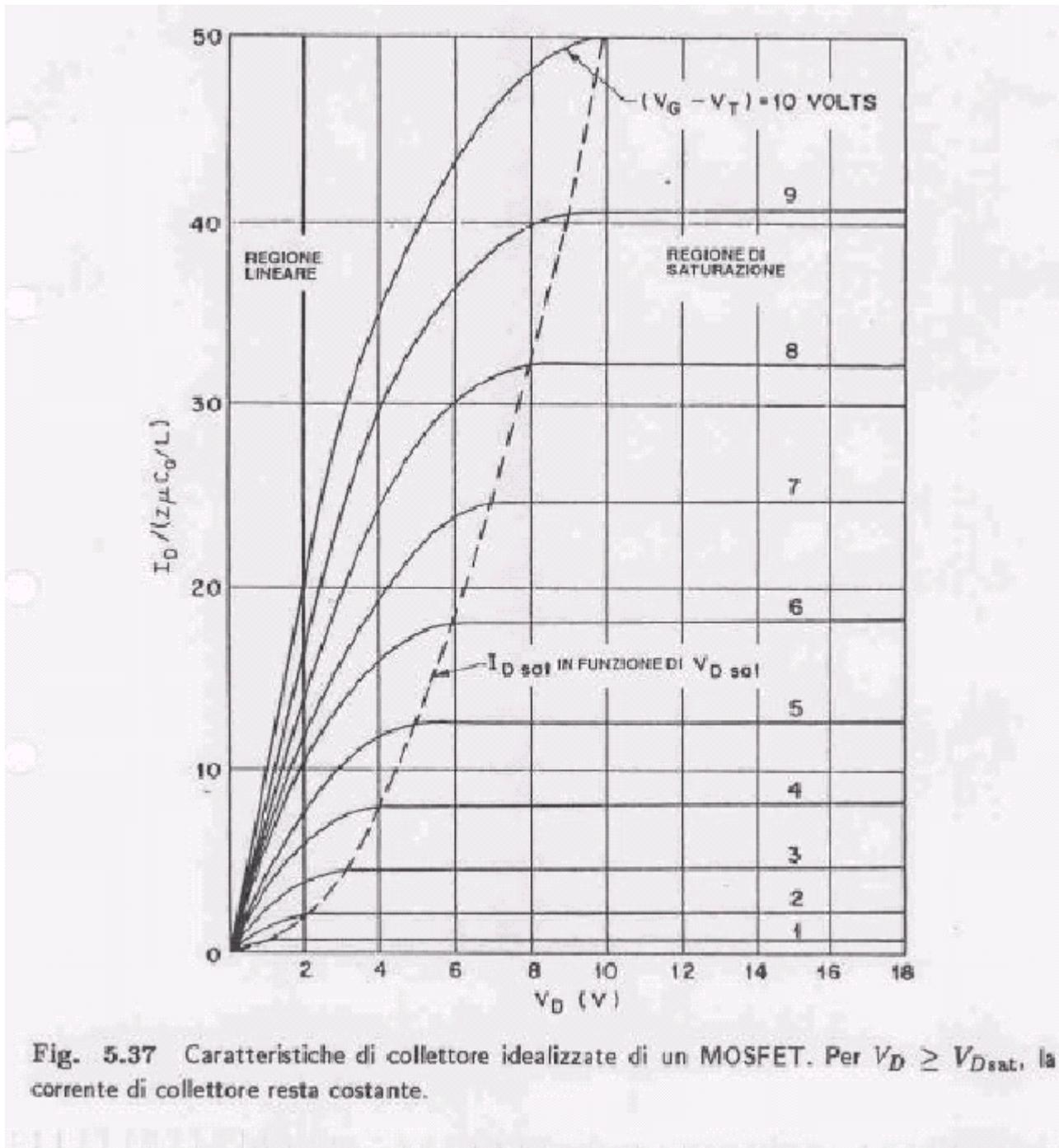


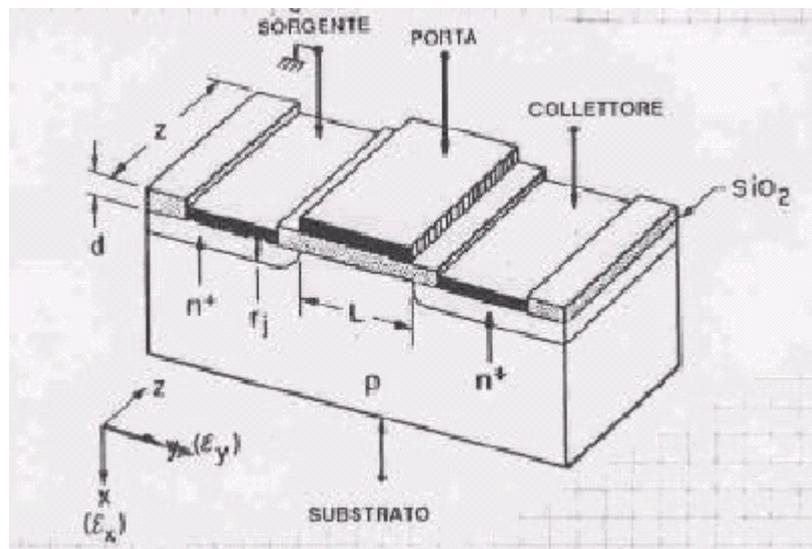
Fig. 5.37 Caratteristiche di collettore idealizzate di un MOSFET. Per $V_D \geq V_{Dsat}$, la corrente di collettore resta costante.

Caratteristiche I-V

Nel MOSFET la conduttanza del canale dipende dalla tensione applicata al gate. E' la concentrazione di elettroni pronti a condurre corrente attraverso il canale, ad essere modulata dalla tensione di gate. Quando si applica una tensione al drain, questa carica comincia a fluire nel canale, in modo costante in ogni sua sezione. In ogni punto del canale, allora, la relazione tra tensione e corrente pu' essere espressa dalla relazione:

$$dV = I_D dR$$

Pertanto, una volta trovata una opportuna espressione per R, andremo a ricavare la corrente integrando la quantita' precedente rispetto agli estremi del canale, ovvero tra le coordinate $y=0$ (corrispondente a $V=0$) e $y=L$ (corrispondente a $V=V_D$). Per procedere, consideriamo un sistema con la seguente geometria:



Caratteristiche I-V

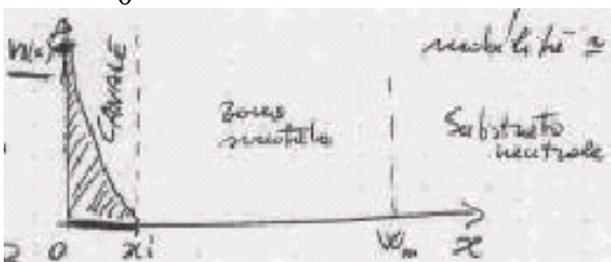
Per ricavare dR , dobbiamo prima ricavare la resistività, intesa come inverso della conducibilità

$$\sigma(x) = qn(x)\mu_n(x)$$

Si noti come σ sia una funzione della coordinata x (verticale) in quanto: la concentrazione degli elettroni è una funzione stretta di x dal momento che è il campo elettrico sulla verticale a determinare la formazione del canale stesso; anche la mobilità è una funzione di x (più debole però) in quanto all'interfaccia con l'ossido la mobilità può risentire di effetti di bordo. In prima approssimazione, è possibile ignorare la dipendenza della mobilità da x e assumere che questa sia costante. Come conseguenza, la conduttanza di uno strato di semiconduttore di spessore x_i e dimensioni planari Z e L , si trova come:

$$g = \int_0^{x_i} \sigma(x) \frac{Z dx}{L} = \frac{Z}{L} \int_0^{x_i} \sigma(x) dx = \frac{Z}{L} \int_0^{x_i} qn(x)\mu_n(x) dx =$$

$$= \frac{Z}{L} \mu_n \int_0^{x_i} qn(x) dx = \frac{Z}{L} \mu_n |Q_n| \text{ carica totale presente nel canale}$$



per unità di area

Caratteristiche I-V

Come conseguenza:

$$dR = \frac{dy}{Z\mu_n|Q_n|} \Rightarrow dV = I_D \frac{dy}{Z\mu_n|Q_n|}$$

Occorre pertanto essere in grado di calcolare Q_n . Si ottiene questa quantità ricordando che la carica totale del semiconduttore è pari a Q_n sommata alla quantità di carica presente nella regione di svuotamento.

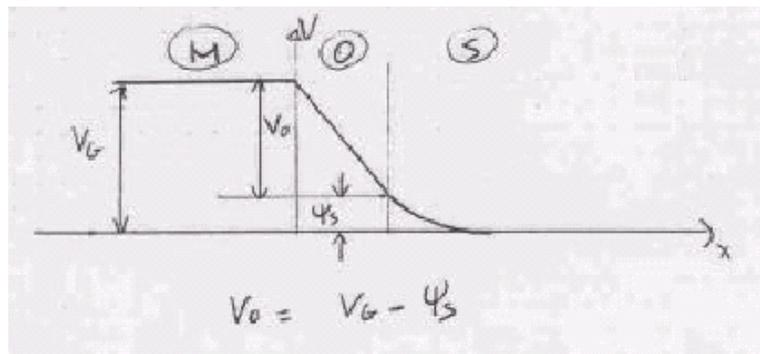
$$Q_s = Q_n + Q_{sc} = Q_n - qN_A W_m$$

D'altronde Q_s è pari in modulo e opposta in segno alla carica del gate, che è sua volta legata alla caduta di potenziale attraverso l'ossido dalla relazione:

$$V_{ox} = \frac{Q_s}{C_{ox}}$$

E ricordando che:

$$V_G + V_{ox} + V_S = 0$$



Caratteristiche I-V

$$W_m = \sqrt{\frac{2\varepsilon_S}{qN_A} (2\psi_B + V(y))}$$

ove si è evidenziato che in inversione la caduta di potenziale sulla regione svuotata eccede $2\psi_B$ di una quantità che può dipendere da y (ovvero dalla tensione applicata tra drain e source)

Da cui:

$$Q_n(y) = -[V_G - 2\psi_B - V(y)]C_{ox} + \sqrt{2\varepsilon_S q N_A [2\psi_B + V(y)]}$$

E quindi:

$$\begin{aligned} dV &= I_D dR = \frac{I_D dy}{Z\mu_n |Q_n(y)|} \\ \int_0^L I_D dy &= \int_{V(0)}^{V(L)} Z\mu_n |Q_n(y)| dV = Z\mu_n \int_{V(0)}^{V(L)} |Q_n(y)| dV = \\ &= Z\mu_n \int_{V(0)}^{V(L)} \left\{ [V_G - 2\psi_B - V] C_{ox} - \sqrt{2\varepsilon_S q N_A [2\psi_B + V]} \right\} dV \\ \Rightarrow I_D &= \frac{Z\mu_n}{L} C_{ox} \left\{ \left[V_G - 2\psi_B - \frac{V_D}{2} \right] V_D + \right. \\ &\quad \left. - \frac{2}{3} \frac{\sqrt{2\varepsilon_S q N_A}}{C_{ox}} \left[(2\psi_B + V_D)^{3/2} - (2\psi_B)^{3/2} \right] \right\} \end{aligned}$$

Caratteristiche I-V

La precedente espressione è ricavata ipotizzando che il canale esista, pertanto è valida fino a che V_D vale V_{Dsat} . Oltre questa condizione, I_D resta costante al valore I_{Dsat} .

Ricordiamo ora l'espressione di V_T .

$$V_T = \frac{qN_A W_m}{C_{ox}} + \psi_{inv} = \frac{\sqrt{2q\epsilon_S N_A (2\psi_B)}}{C_{ox}} + 2\psi_B$$

A questo punto, se V_D è piccolo rispetto a $2\psi_B$:

$$\begin{aligned} I_D &= \frac{Z\mu_n}{L} C_{ox} \left\{ \left[V_G - 2\psi_B - \frac{V_D}{2} \right] V_D + \right. \\ &\quad \left. - \frac{2}{3} \frac{\sqrt{2\epsilon_S q N_A}}{C_{ox}} \left[(2\psi_B + V_D)^{3/2} - (2\psi_B)^{3/2} \right] \right\} \\ &\cong \frac{Z\mu_n}{L} C_{ox} \left[V_G - 2\psi_B - \frac{\sqrt{2\epsilon_S q N_A (2\psi_B)}}{C_{ox}} - \frac{V_D}{2} \right] V_D = \\ &= \frac{Z\mu_n}{L} C_{ox} \left[V_G - V_T - \frac{V_D}{2} \right] V_D \end{aligned}$$

Se ora V_D è piccolo anche rispetto a $V_G - V_T$:

$$\begin{aligned} I_D &\cong \frac{Z\mu_n}{L} C_{ox} [V_G - V_T] V_D \\ \Rightarrow g_D &= \frac{\partial I_D}{\partial V_D} \Big|_{V_G=\text{cost}} = \frac{Z\mu_n}{L} C_{ox} [V_G - V_T] \\ g_m &= \frac{\partial I_D}{\partial V_G} \Big|_{V_D=\text{cost}} = \frac{Z\mu_n}{L} C_{ox} V_D \end{aligned}$$

Caratteristiche I-V

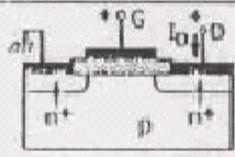
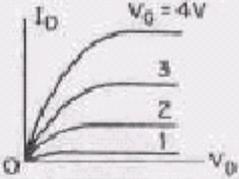
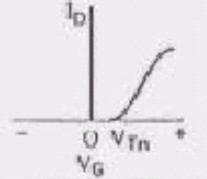
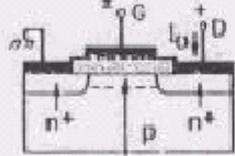
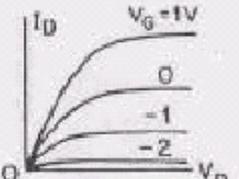
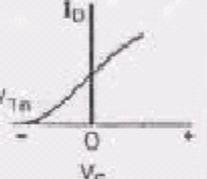
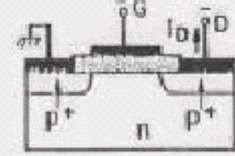
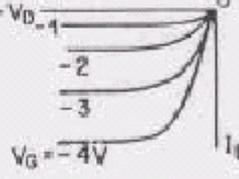
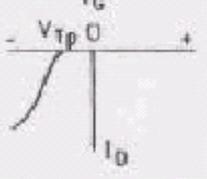
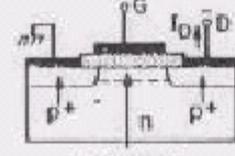
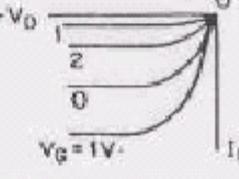
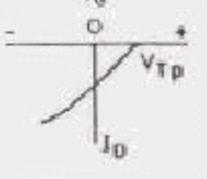
In regione di saturazione, $Q_n = 0$, o equivalentemente,
 $I_D = \max$

$$I_D = \max \Rightarrow \frac{\partial I_D}{\partial V_D} = 0 \Rightarrow V_D = V_{Dsat} = V_G - V_T$$

$$\Rightarrow I_{Dsat} = \frac{Z\mu_n}{2L} C_{ox} (V_G - V_T)^2$$

$$\Rightarrow g_{msat} = \frac{Z\mu_n}{L} C_{ox} (V_G - V_T) = g_{dlin}$$

Tipi di MOSFET

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

A seconda che il semiconduttore sia di tipo p o di tipo n e a seconda del valore della tensione di soglia, si possono ottenere diversi tipi di dispositivi che si distinguono in base al fatto che a $V=0$, il canale sia o meno formato e al tipo di conduzione (tramite elettroni o tramite lacune).