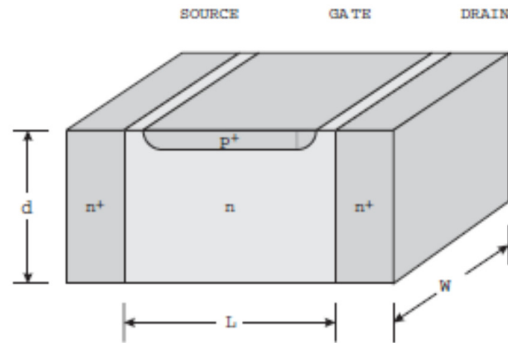


## Transistor JFET (Junction Field Effect Transistor)



Canale tipo  $n$  (lunghezza  $L$ ), annegato in un substrato di tipo  $p$ :

Source - Channel - Drain

$n^+$        $n$        $n^+$

Gate: Strato  $p^+$

→ Giunzione fra gate e canale, usata  $\sim$  sempre in pol. inversa

$V_{GS} = 0$ :

$$I_D = I_D(V_D) \rightarrow \begin{array}{ll} \text{Reg. 'ohmica':} & I_D \propto V_D \\ \text{Reg. 'saturazione':} & I_D \approx \text{costante} \end{array} \quad \begin{array}{l} V_{DS} < |V_P| \\ V_{DS} > |V_P| \end{array}$$

$-|V_P| < V_{GS} < 0$ :

$$I_D = I_D(V_D) \rightarrow \begin{array}{ll} \text{Reg. 'ohmica':} & I_D \propto V_D \\ \text{Reg. 'saturazione':} & I_D \approx \text{costante} \end{array} \quad \begin{array}{l} V_{DS} < |V_{GS} - V_P| \\ V_{DS} > |V_{GS} - V_P| \end{array}$$

$V_{GS} = -|V_P|$ : Tensione di *pinch-off*

→ Canale completamente svuotato  $\rightarrow I_D = 0$

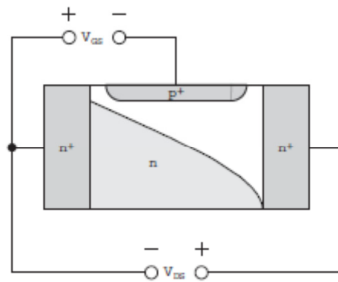
$V_P \equiv V_{pinch-off} \sim$  Alcuni Volt

← Pot. che garantisce completo svuotamento del canale per  $V_{GS} = 0$

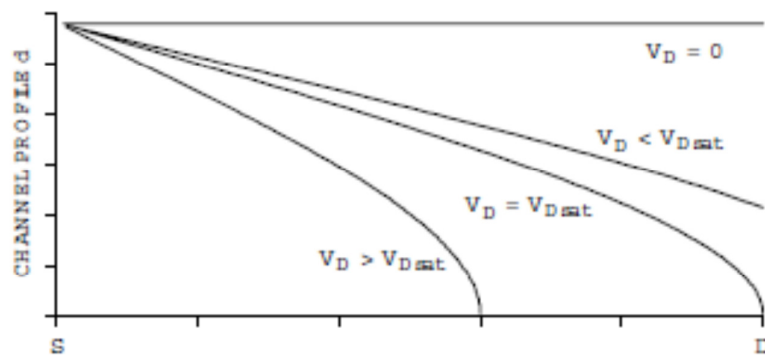
$V_{bi}$  = Pot. 'built-in'  $\leq 1$  V per Si

← Pot. giunzione in assenza di polarizzazione esterna

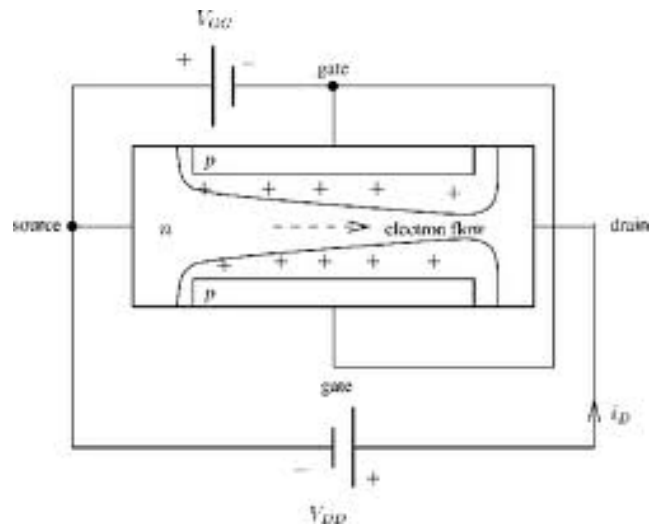
Profilo di concentrazione nel canale per  $V_{GS}$  generica  $< 0$



Forma del profilo in funzione di  $V_{DS}$  per  $V_{GS} = 0$ :



In realta', struttura 2D nella maggior parte dei casi:



→2 giunzioni → 2 strati di svuotamento

Caratteristica del JFET:

$I_D$  vs  $V_D$  normalizzate a  $I_P, V_P$

Ricostruzione:

Potenziale lungo il canale: funzione di  $y$ , fra 0 e  $V_{DS}$

$$\rightarrow x = \sqrt{\frac{2\varepsilon V(y)}{eN_d}} \text{ larghezza strato svuotato per ognuna delle 2 giunzioni}$$

$$\rightarrow d = 2(a - x) \text{ larghezza canale}$$

$$\rightarrow I = -2eN_d\mu_n \frac{dV}{dy} W(a - x), \text{ valida nella regione 'ohmica'}$$

$$\rightarrow \int_0^L I(y) dy = -2eN_d\mu_n W \int_0^L (a - x) \frac{dV}{dy} dy = -2eN_d\mu_n Wa \int_{V_{SG}}^{V_{DG}} \left(1 - \frac{x}{a}\right) dV$$

$$x = \sqrt{\frac{2\varepsilon V(y)}{eN_d}} \rightarrow a = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_P}{eN_d}}, \quad V_P \text{ tensione gate-canale per } x = a$$

$$\rightarrow \sqrt{\frac{V(y)}{V_P}} = \frac{x}{a}$$

$$\rightarrow I = -\frac{2eN_d\mu_n Wa}{L} \int_{V_{SG}}^{V_{DG}} \left(1 - \frac{x}{a}\right) dV = -\frac{2eN_d\mu_n Wa}{L} \int_{V_{SG}}^{V_{DG}} \left(1 - \sqrt{\frac{V(y)}{V_P}}\right) dV$$

$$\rightarrow I = -\frac{2eN_d\mu_n Wa}{L} \left[ V_{DG} - V_{SG} - \frac{2}{3} \frac{V_{DG}^{\frac{3}{2}} - V_{SG}^{\frac{3}{2}}}{V_P^{\frac{1}{2}}} \right]$$

$$\rightarrow I = -\frac{2eN_d\mu_n Wa}{3L} \left[ 3(V_{DG} - V_{SG}) - 2 \frac{V_{DG}^{\frac{3}{2}} - V_{SG}^{\frac{3}{2}}}{V_P^{\frac{1}{2}}} \right]$$

$$I_P = -\frac{2}{3} \frac{eN_d\mu_n WaV_P}{L}$$

$$\rightarrow I = 3I_P \left[ \left( \frac{V_{DG} - V_{SG}}{V_P} \right) - \frac{2}{3} \frac{V_{SG}^{\frac{3}{2}} - V_{DG}^{\frac{3}{2}}}{V_P^{\frac{3}{2}}} \right] = 3I_P \left[ \frac{V_{DS}}{V_P} - \frac{2}{3} \frac{V_{SG}^{\frac{3}{2}} - V_{DG}^{\frac{3}{2}}}{V_P^{\frac{3}{2}}} \right]$$

$I_p$  = Corrente di *pinch-off*

Notazione standard:

$$\left\{ \begin{aligned} I_{DSS} \equiv I_p &= -\frac{2 e N_d \mu_n W a V_p}{3 L} = -\frac{V_p}{\underbrace{\frac{L}{aW}}_A \underbrace{3 \left( \frac{1}{2 e N_d \mu_n} \right)}_p} \sim -\frac{V_p}{R_{cham}} \end{aligned} \right.$$

$$V_p = \frac{e N_d a^2}{2 \epsilon}$$

$$\rightarrow I_{DSS} = -\frac{2 e^2 N_d^2 \mu_n W a^3}{3 L}$$

Regione 'ohmica':

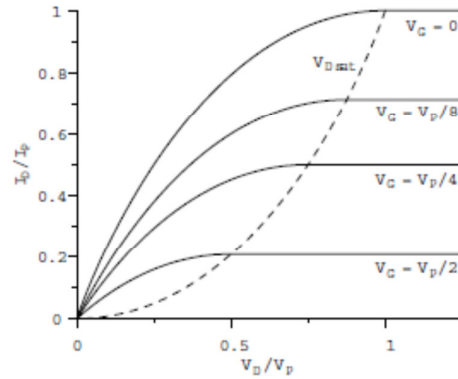
$$I = 3I_p \left[ \frac{V_{DS}}{V_p} - \frac{2}{3} \frac{V_{SG}^{\frac{3}{2}} - V_{DG}^{\frac{3}{2}}}{V_p^{\frac{3}{2}}} \right] = 3I_p \left[ 1 - \frac{2}{3} \frac{V_{SG}^{\frac{3}{2}} - V_{DG}^{\frac{3}{2}}}{V_p^{\frac{3}{2}}} \frac{V_p}{V_{DS}} \right] \frac{V_{DS}}{V_p}$$

$$\rightarrow I = 3I_p \left[ 1 - \frac{2}{3} \frac{V_{SG}^{\frac{3}{2}} - V_{DG}^{\frac{3}{2}}}{V_p^{\frac{3}{2}}} \frac{1}{V_{DS}} \right] \frac{V_{DS}}{V_p} = 3I_p \left[ 1 + \frac{2}{3} \left( \frac{V_{SG}}{V_p} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\left( \frac{V_{DG}}{V_{SG}} \right)^{\frac{1}{2}} V_{DG} - V_{SG}}{V_{DS}} \right] \frac{V_{DS}}{V_p}$$

$$V_{DG} \ll V_{GS} \rightarrow I \approx 3I_p \left[ 1 + \frac{2}{3} \left( \frac{V_{SG}}{V_p} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\left( \frac{V_{DG}}{V_{SG}} \right)^{\frac{3}{2}} - 1}{\frac{V_{DG}}{V_{SG}} + 1} \right] \frac{V_{DS}}{V_p}$$

$$\rightarrow I_D \approx 3I_p \left[ 1 - \frac{2}{3} \left( \frac{V_{GS}}{V_p} \right)^{1/2} \right] \frac{V_D}{V_p}$$

→ Resistenza controllata dalla tensione  $V_{GS}$



Regione di saturazione:

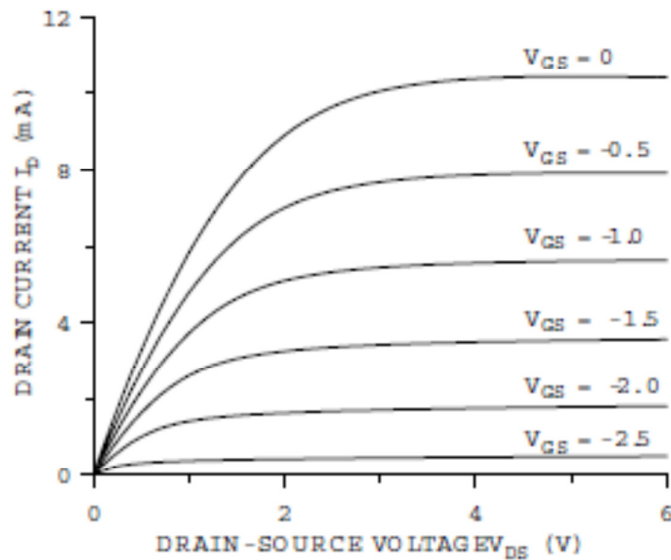
Per ogni dato  $V_{GS}$ , esiste tensione  $V_{DS}$  oltre la quale  $I_D \sim cost$

$$I_D^{sat} = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2 \quad \text{corrente di saturazione}$$

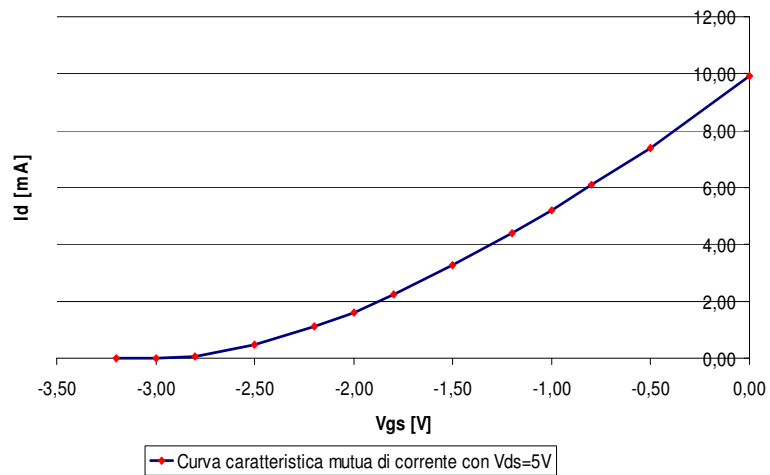
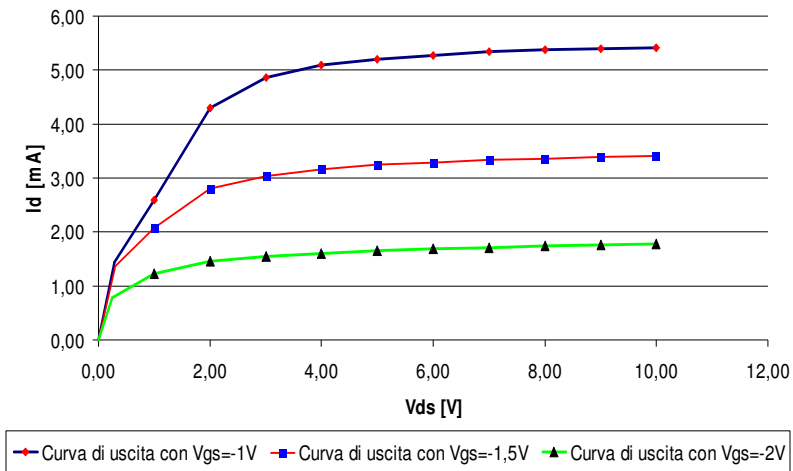
Caratteristiche simili a quelle di un *BJT* → OK per amplificazione

Controllo in tensione ( $V_{GS}$ ) invece che in corrente ( $I_B$ )

Impedenza di ingresso *molto* elevata ( ← giunzione pol. inversamente)



Caratteristiche rilevate da uno studente ~ 20 anni fa:  
JFET 2N4416



Modello del *JFET* per piccoli segnali:

$$g_m = \frac{dI_D}{dV_{GS}} \quad \text{transconduttanza}$$

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$$

$$\rightarrow \frac{dI_D}{dV_{GS}} = -2I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right) \frac{1}{V_P} = -2 \frac{I_{DSS}}{V_P} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)$$

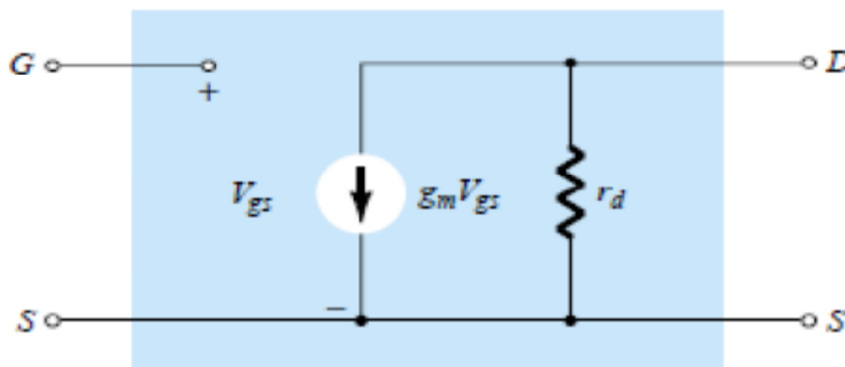
$$g_m^{max} = -2 \frac{I_{DSS}}{V_P} \rightarrow g_m = g_m^{max} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)$$

A bassa frequenza:

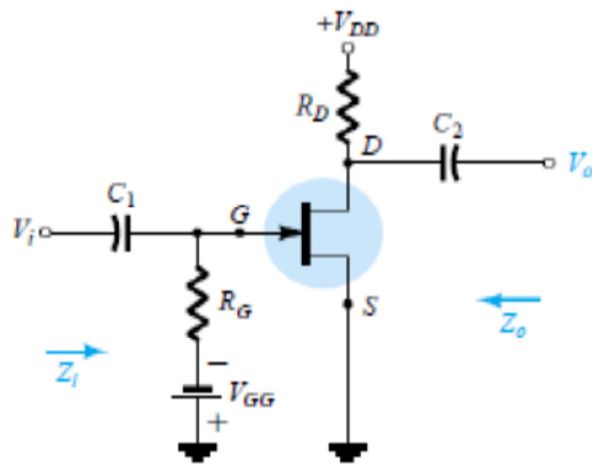
$$Z_{in} \sim \infty \quad \text{giunzione polarizzata inversamente}$$

$$Z_{out} \sim r_D = \frac{dV_{DS}}{dI_D} \quad \text{non idealita' del drain come gen. di corrente}$$

Circuito equivalente per piccoli segnali:



Schema piu' semplice per polarizzazione:



$$Z_{in} = R_G$$

$$Z_{out} = r_d \parallel R_D \approx R_D E \quad r_d \gg R_D$$

$$A_V = -g_m r_d \parallel R_D \approx -g_m R_D \quad \text{c.s.}$$

Comportamento ad alta frequenza dominato da:

capacita' giunzioni

(tutte polarizzate inversamente: niente cap. di diffusione)

+

parassitici

(layout)