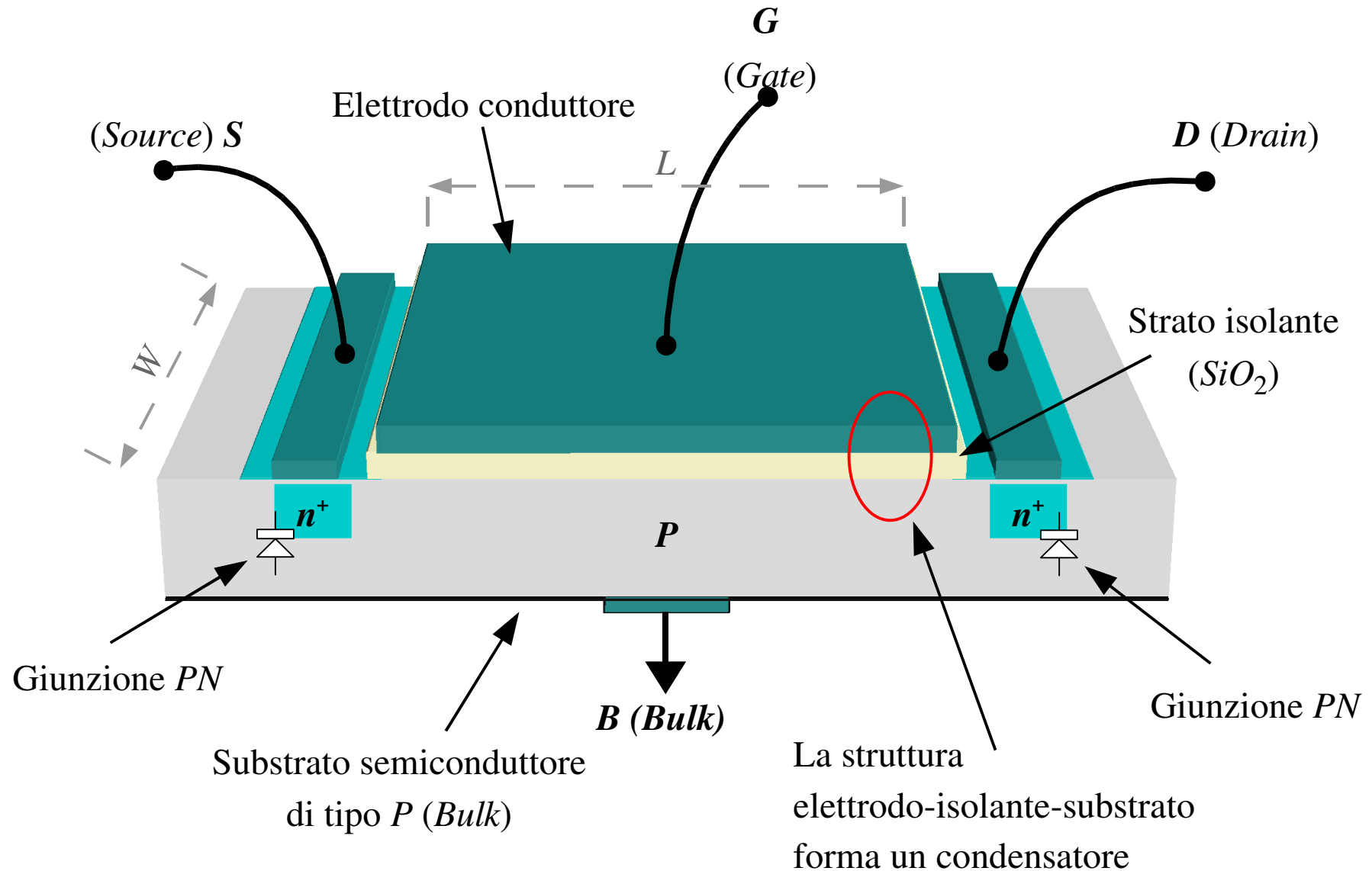
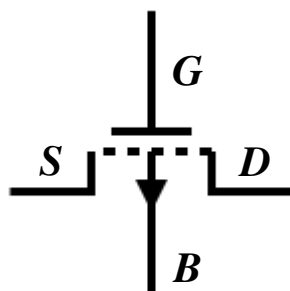
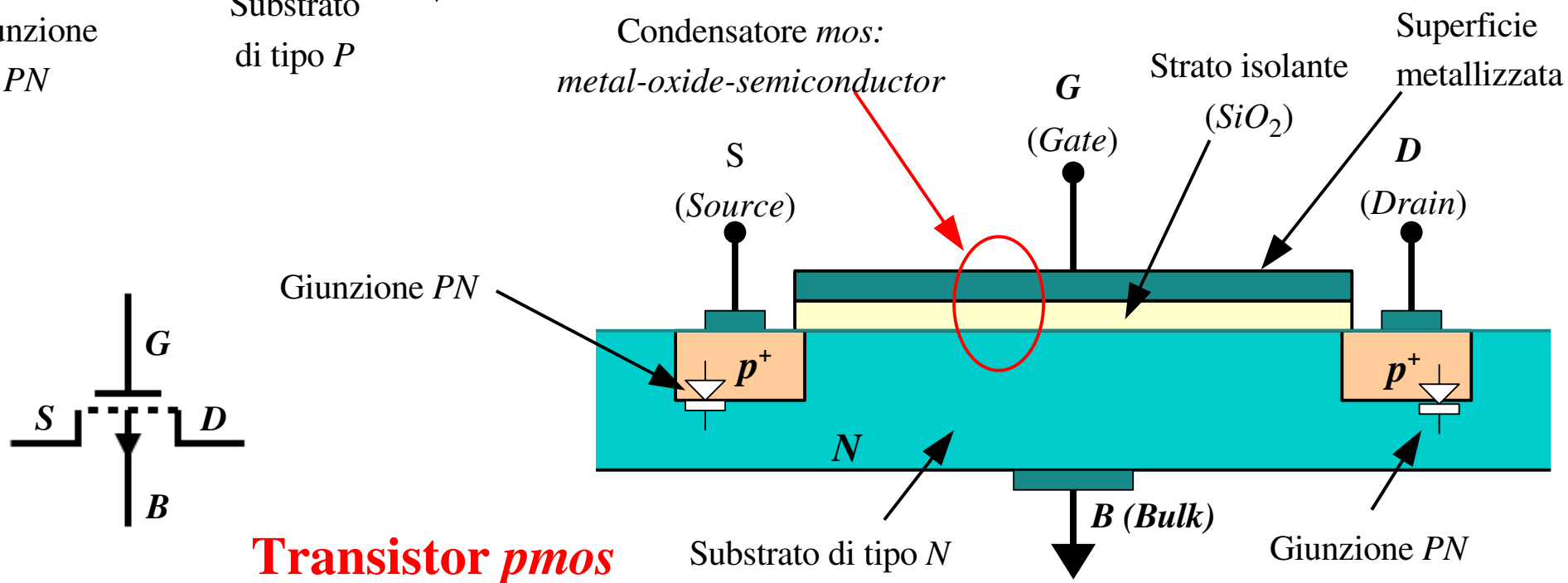
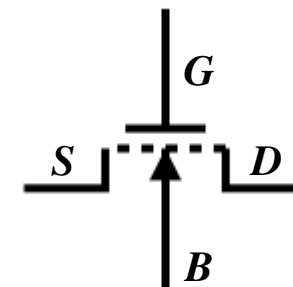
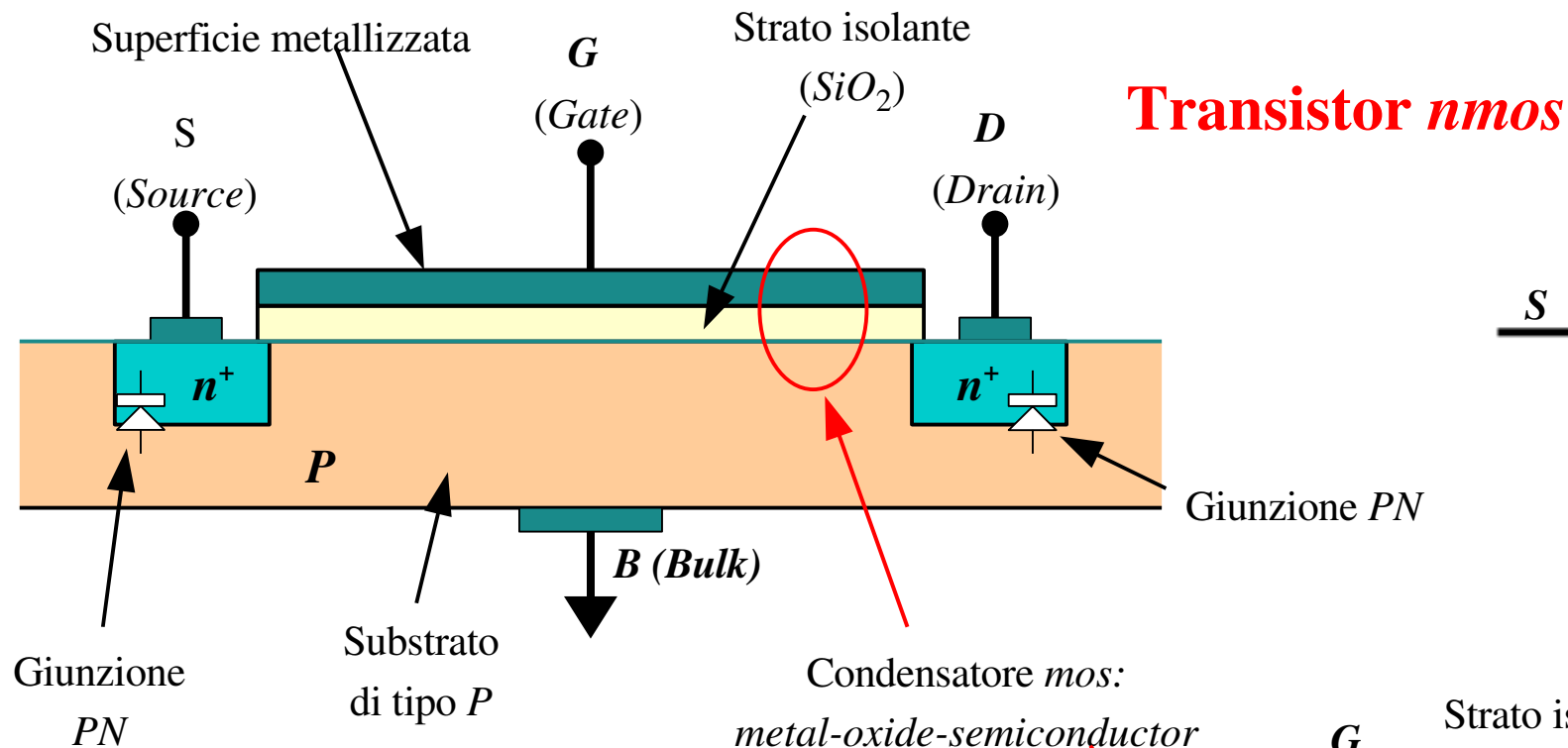


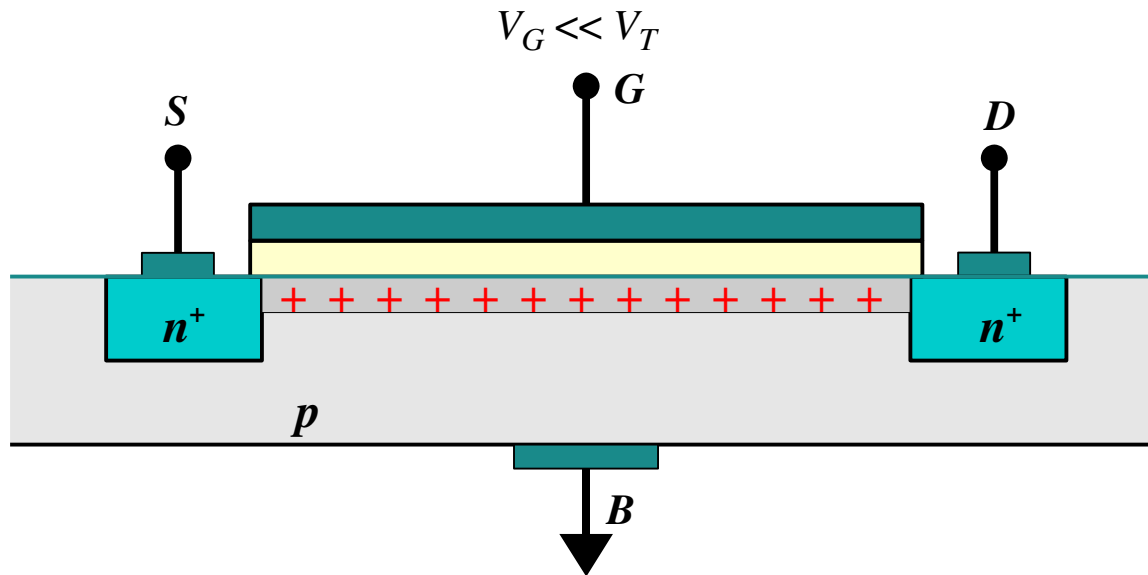
## Struttura del transistor *n-mos fet*

(*n channel - metal - oxide - semiconductor field - effect - transistor*)





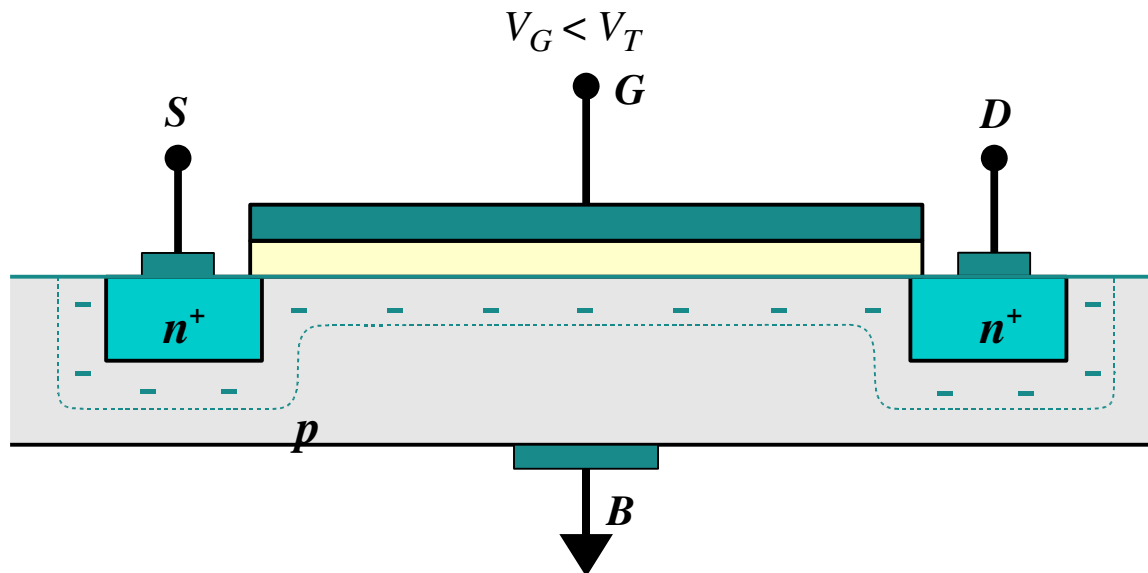
## Regime di *accumulo* e *svuotamento* nel transistor *nmos*



### *Accumulo*

Una polarizzazione negativa del *gate* (rispetto a *source* e *substrato*) porta ad un accumulo dei portatori positivi della regione *p* in un sottile strato superficiale.

Non c'è conduzione tra *source* e *drain*.



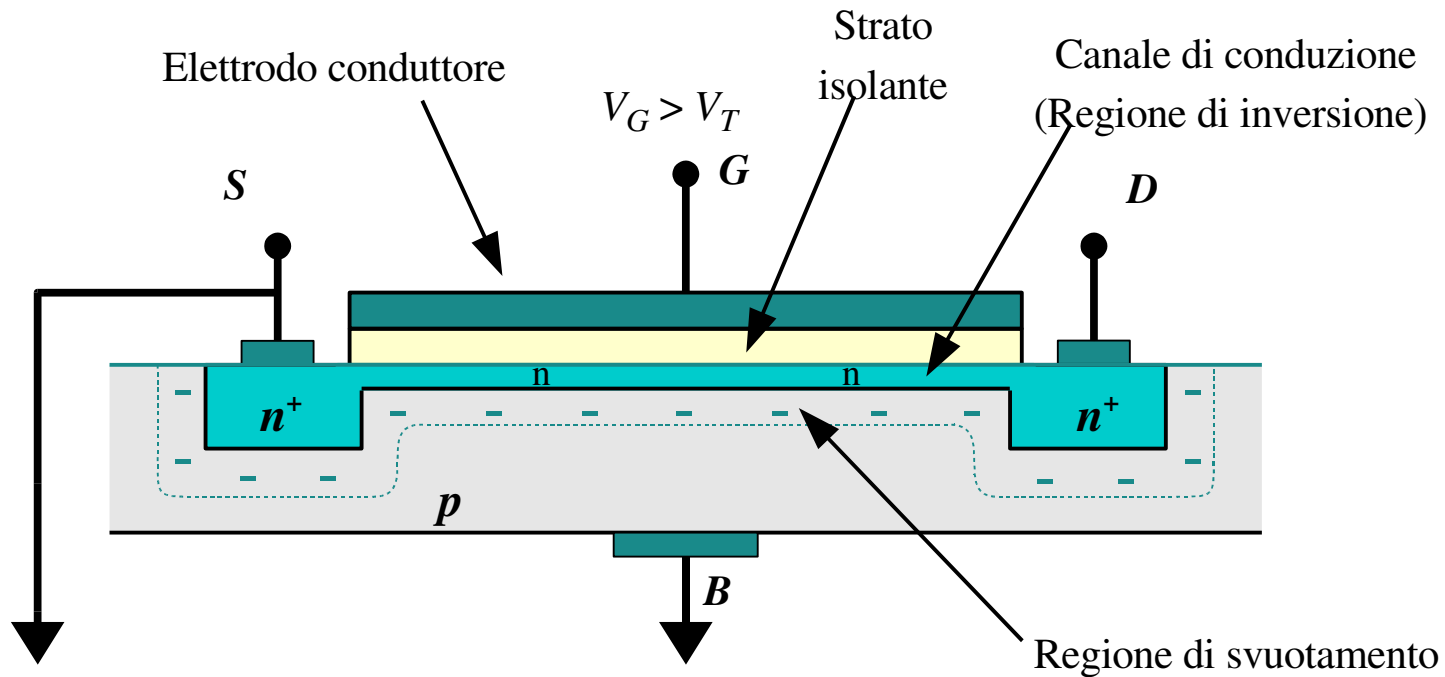
$V_T$  = tensione di soglia (*Threshold*)

### *Svuotamento*

Una polarizzazione lievemente positiva del *gate* porta alla formazione di una zona superficiale di svuotamento priva di portatori (cariche negative fisse del reticolo).

Non c'è conduzione tra *source* e *drain*.

## Regime di *inversione* Formazione del *canale*



### *Inversione*

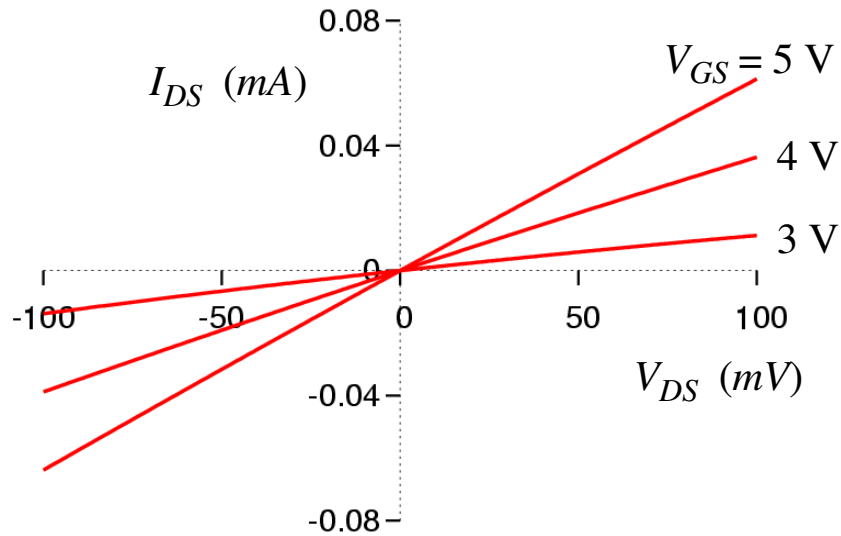
Una polarizzazione sufficientemente positiva ( $V_G > V_T$ ) del *gate*  $G$  rispetto a substrato e source porta alla formazione di uno strato superficiale di portatori negativi (minoritari nel semiconduttore di tipo  $p$ ) con concentrazione *in eccesso* dei maggioritari: localmente il semiconduttore ha subito una inversione da tipo  $p$  a tipo  $n$ .

Si e' formato un canale di conduzione tra *source* e *drain*.

La tensione  $V_T$  e' la *tensione di soglia* ( $T = threshold$ ): il valore minimo di tensione  $V_{GS}$  a cui comincia a formarsi lo strato di inversione.

## Il transistor *n-mos* come resistenza variabile

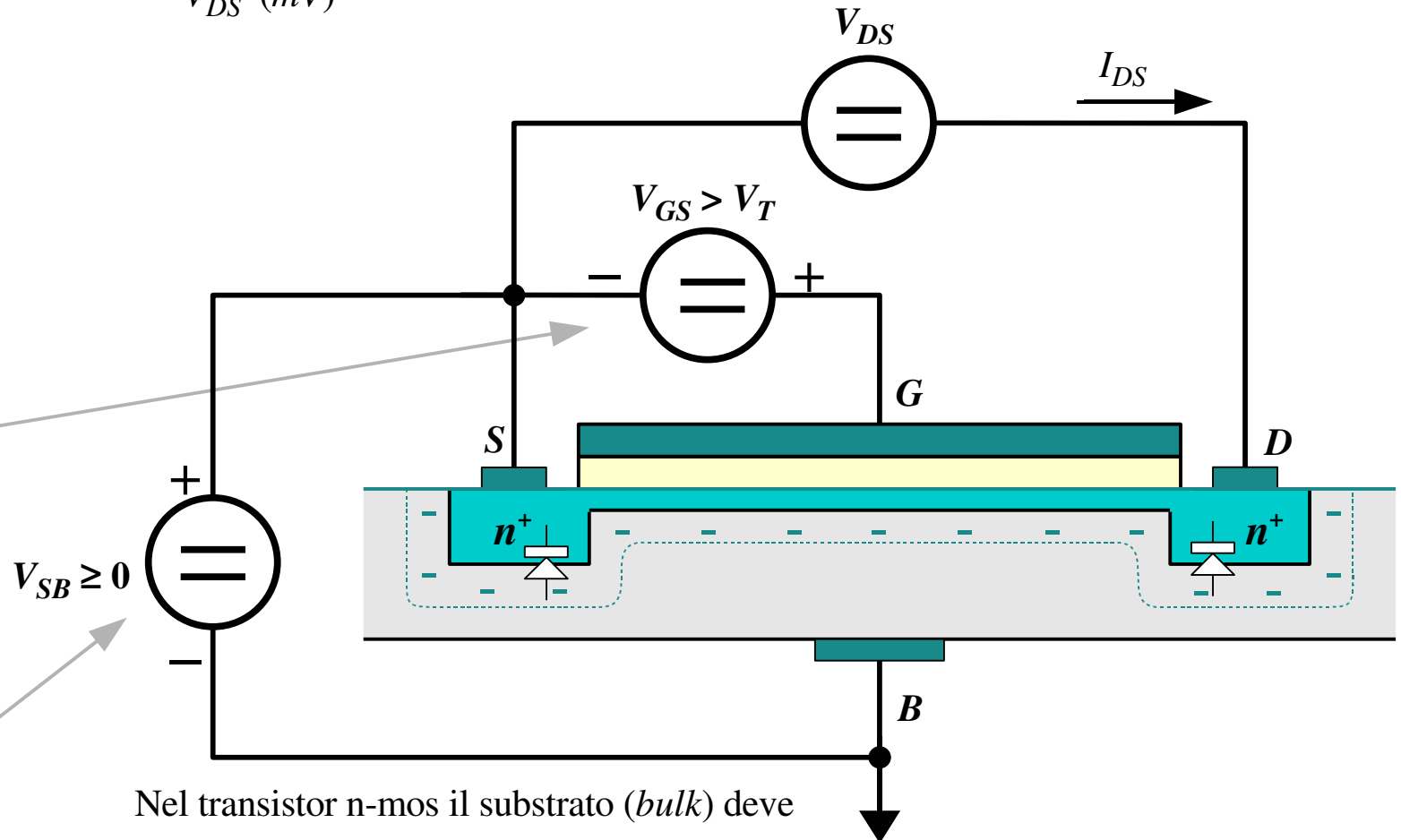
### Regione lineare



Applicando una tensione tra *drain* e *source* si ha passaggio di corrente. Per tensioni  $|V_{DS}| \ll V_{GS}$  il canale si comporta come una resistenza (ohmica).

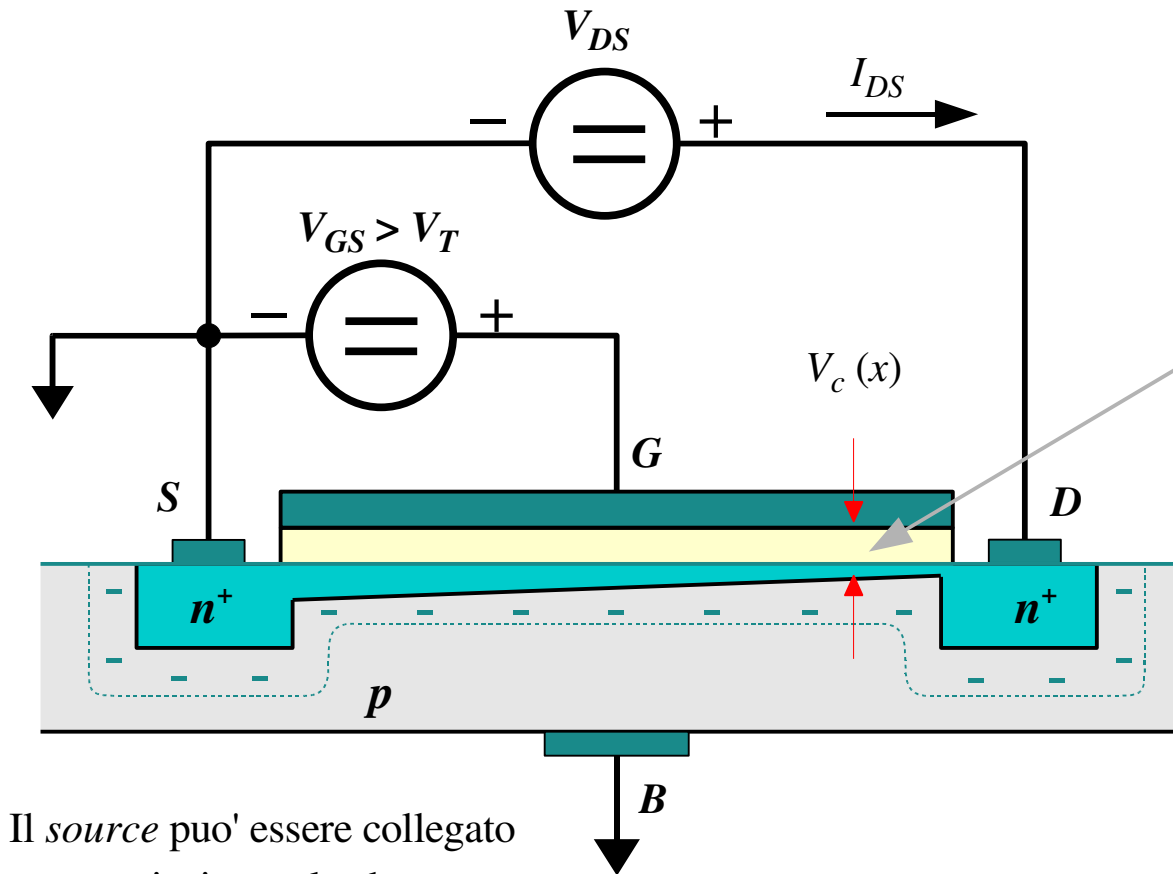
Il *gate* si deve trovare ad un potenziale positivo sufficiente alla formazione del canale ( $V_{GS} > V_T$ ).

Le due giunzioni tra *source* e substrato e tra *drain* e substrato devono rimanere contropolarizzate.



Nel transistor *n-mos* il substrato (*bulk*) deve essere il punto a potenziale più basso.

## Modulazione del canale

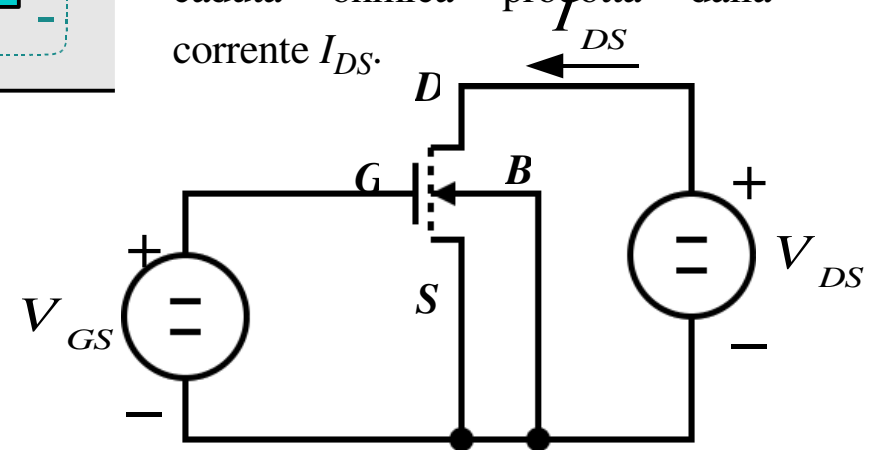


Il *source* puo' essere collegato a massa insieme al substrato, purché  $V_{DS} \geq 0$  V.

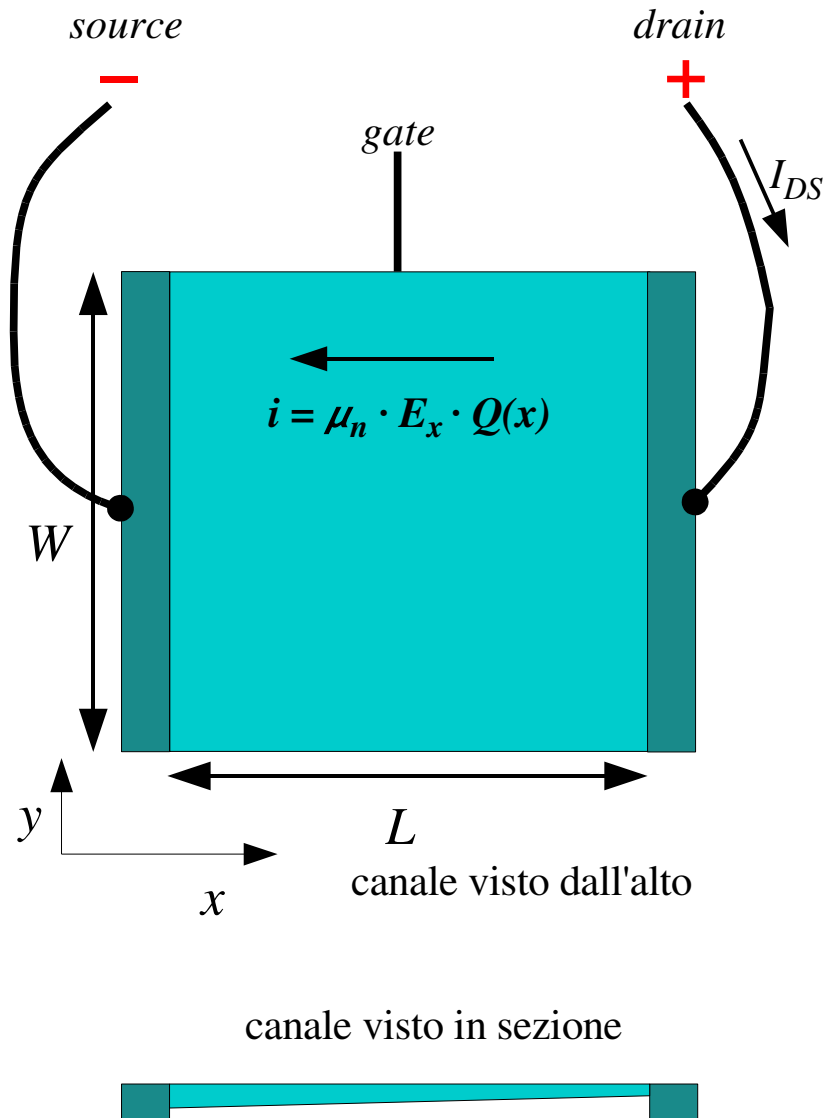
La tensione tra *drain* e *source* modula la consistenza del canale. Localmente la tensione che induce l'accumulo della carica mobile nel canale e':

$$V_c(x) = V_{GS} - V_T - V(x)$$

$V(x)$  e' la tensione lungo il canale, rispetto al *source*, dipendente dalla caduta ohmica prodotta dalla corrente  $I_{DS}$ .



## Transistor *n-mos* - Modulazione del canale



Il canale e' una sottile lamina di carica mobile tra *source* e *drain*. Dopo la formazione, in ogni punto si ha una densita' superficiale di carica  $Q$

$$Q(x) = C [V_{GS} - V_T - V(x)]$$

Il sistema e' omogeneo lungo l'asse  $y$ ;  $C$  e' la capacita' per unita' di superficie del condensatore *gate-canale*. La corrente tra *source* e *drain* e'

$$\begin{aligned} I_{DS} &= -\mu_n \cdot E_x \cdot Q(x) \cdot W \\ &= -\mu_n \cdot E_x \cdot C \cdot [V_{GS} - V_T - V(x)] \cdot W \\ &= \mu_n \cdot C \cdot W \cdot [V_{GS} - V_T - V(x)] \cdot \frac{dV}{dx} \end{aligned}$$

ed e' costante lungo tutta la lunghezza  $L$  (non c'e' corrente attraverso il *gate* a causa dello strato isolante ne' attraverso il substrato, separato dal canale da una regione di svuotamento).

Integrando su tutta la lunghezza  $L$  del canale:

$$I_{DS} = \mu_n \cdot C \cdot \frac{W}{L} \cdot \left( V_{GS} - V_T - \frac{V_{DS}}{2} \right) \cdot V_{DS}$$

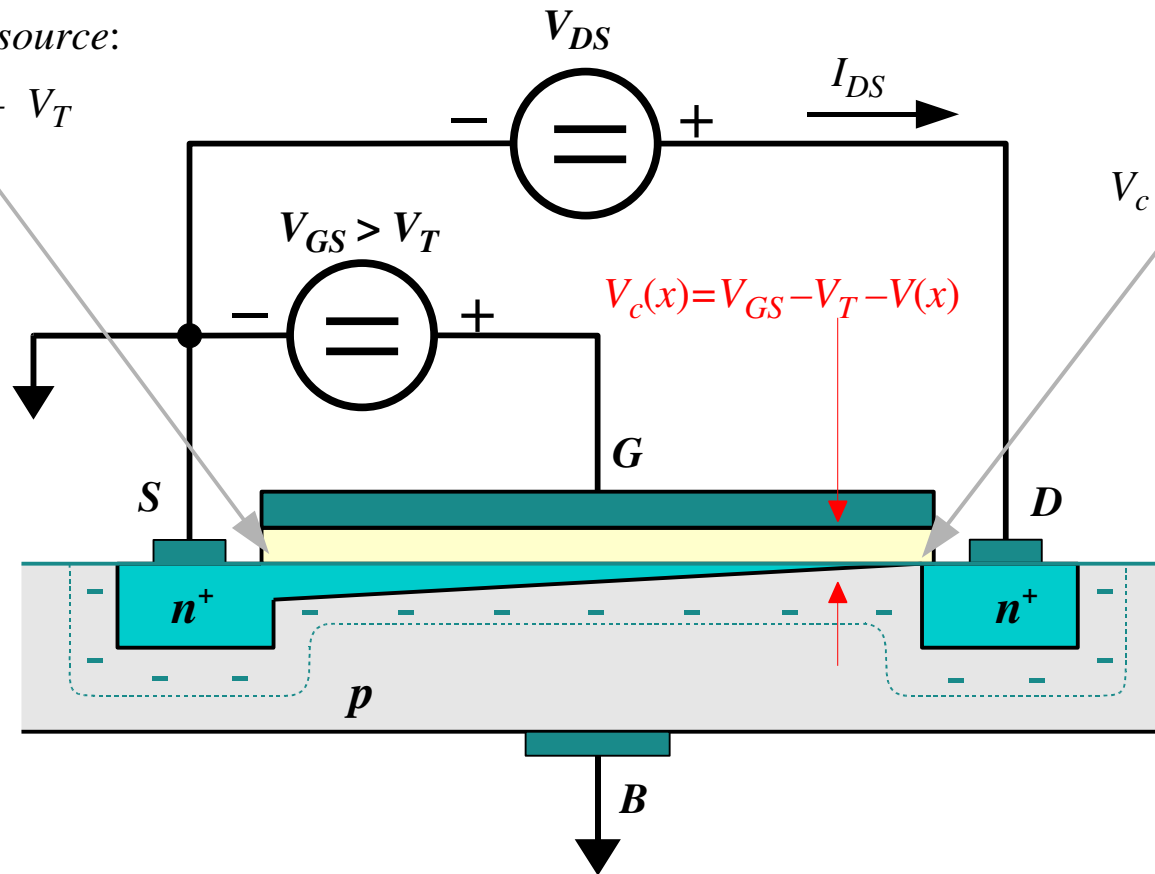
## Saturazione del canale - *pinch-off*

Aumentando la tensione  $V_{DS}$  fino al valore  $V_{DS} = V_{GS} - V_T$  il canale arriva a scomparire in prossimità del *drain*.

*Pinch-off*: strozzamento (del canale).

In prossimità del *source*:

$$V_c(0) = V_{GS} - V_T$$



In prossimità del *drain*:

$$V_c(L) = V_{GS} - V_T - V(x) = 0$$



## Curve caratteristiche del transistor n-mos

L'equazione  $I_{DS} = K_n \cdot \left( V_{GS} - V_T - \frac{V_{DS}}{2} \right) \cdot V_{DS}$

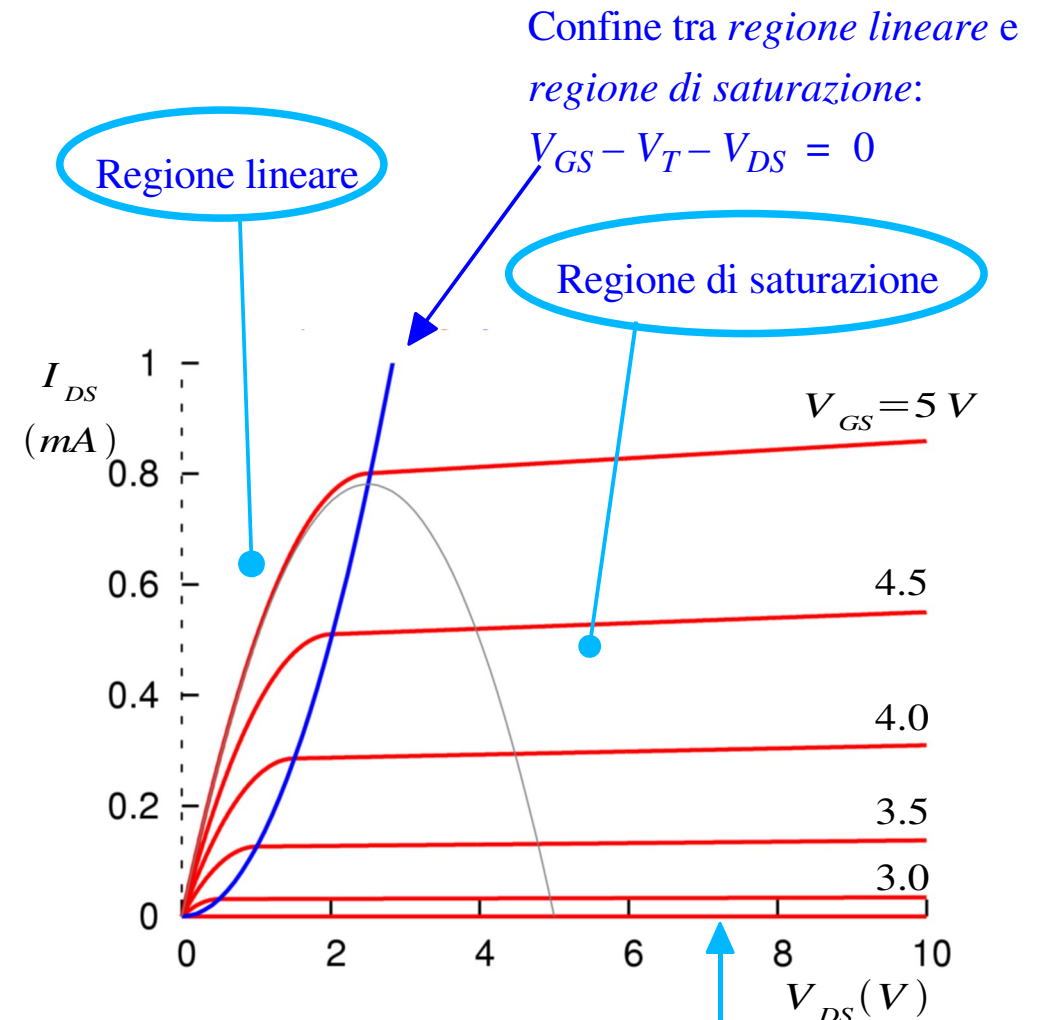
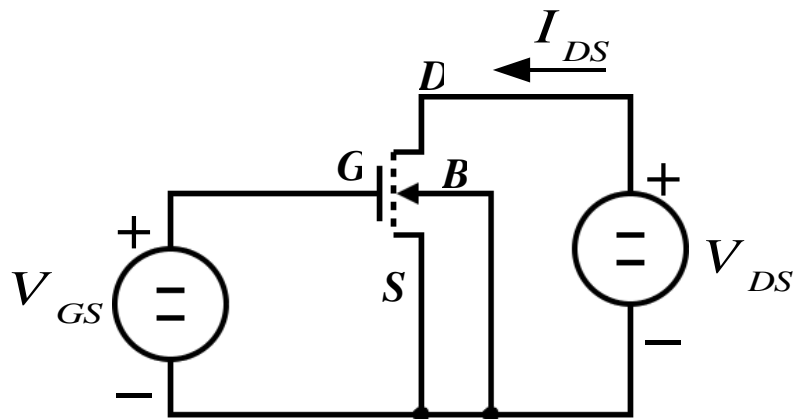
con  $K_n = \mu_n \cdot C \cdot \frac{W}{L}$

descrive il comportamento del mosfet nella regione lineare, cioè per  $V_{GS} - V_T - V_{DS} > 0$ .

Oltre questo limite l'equazione prevede l'andamento indicato in figura dalla parabola grigia. Il transistor entra nella regione di saturazione e l'equazione non è più valida. La corrente di saturazione è:

$$I_{DS} = \frac{K_n}{2} \cdot (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

Il coefficiente  $\lambda$  è il parametro di modulazione della lunghezza del canale (l'analogo del coefficiente di Early  $1/V_A$  nel bjt).

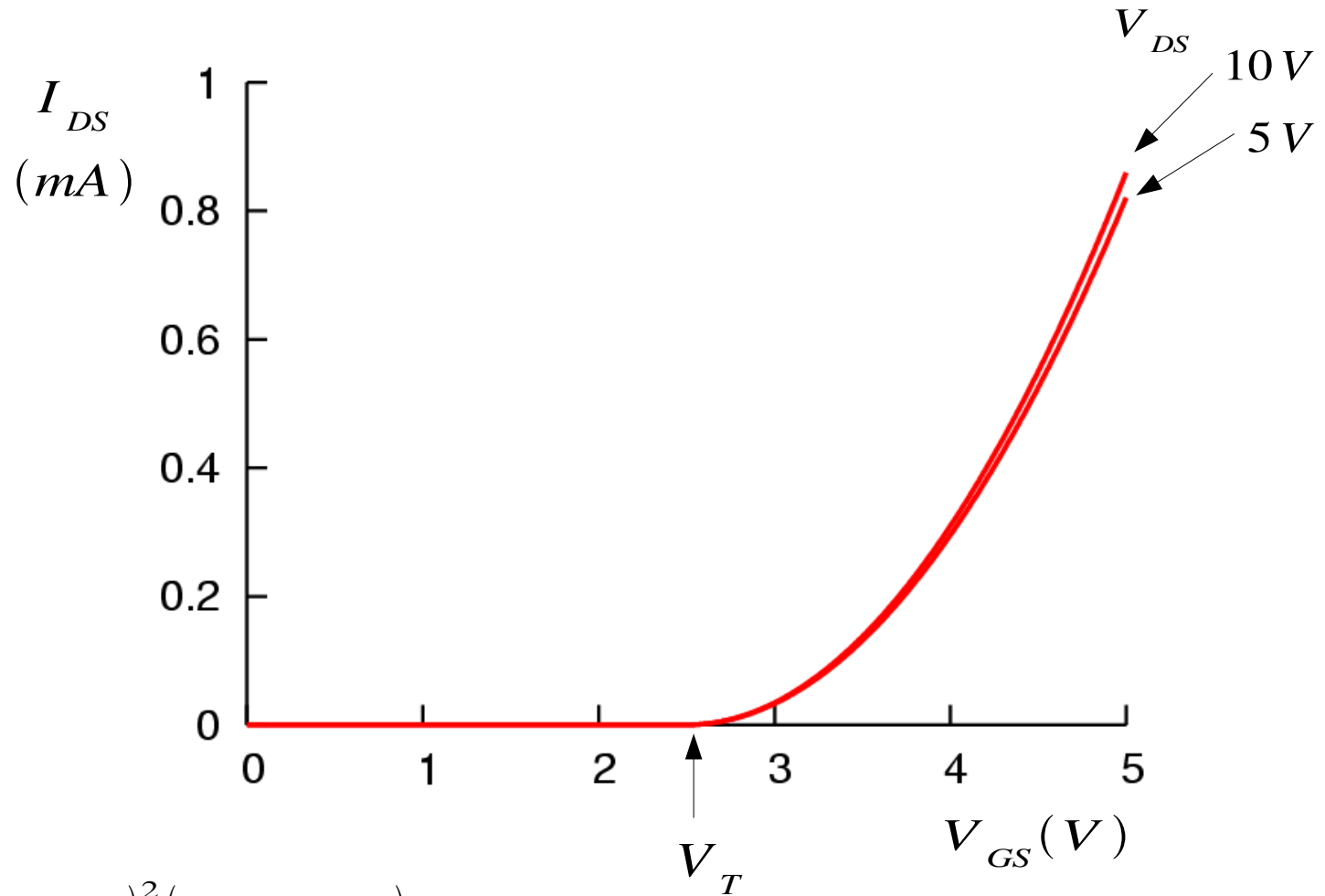


$$K_n = 0.25 \text{ mA/V}^2$$

$$V_T = 2.5 \text{ V}$$

Per  $V_{GS} < V_T$  non si ha formazione di canale e  $I_{DS} = 0$ . Il transistor è spento (cutoff)

Curve  $I_{DS}(V_{GS})$  del transistor *nmos* ad “arricchimento”  
(regione di saturazione).

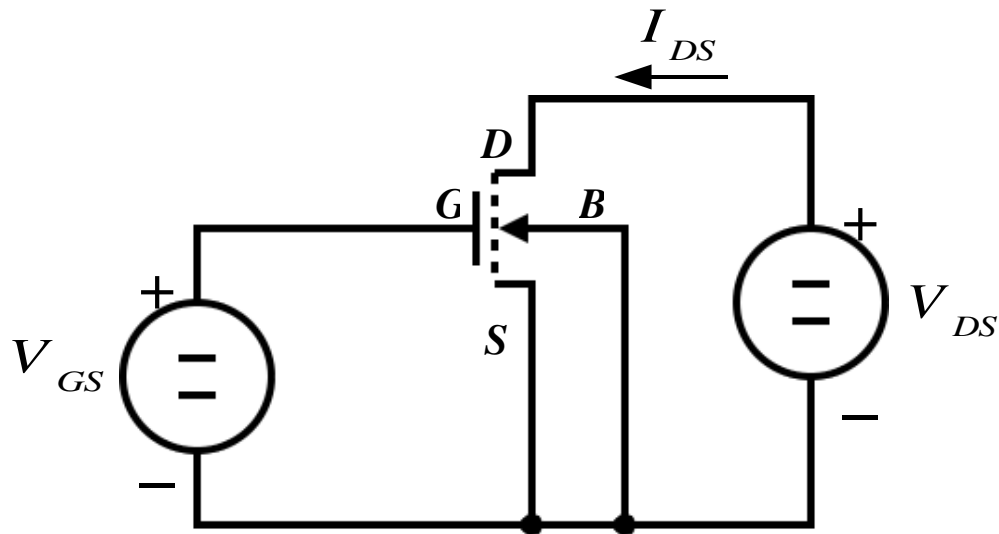


$$I_{DS} = \frac{K_n}{2} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

## Transistor mosfet complementari

E' possibile realizzare transistor mosfet che hanno le medesime caratteristiche ( $V_T$ ,  $K_n$ ,  $\lambda$ ), ma opposta polarita' del canale.

Sono denominati transistor mosfet complementari o *cmos*.

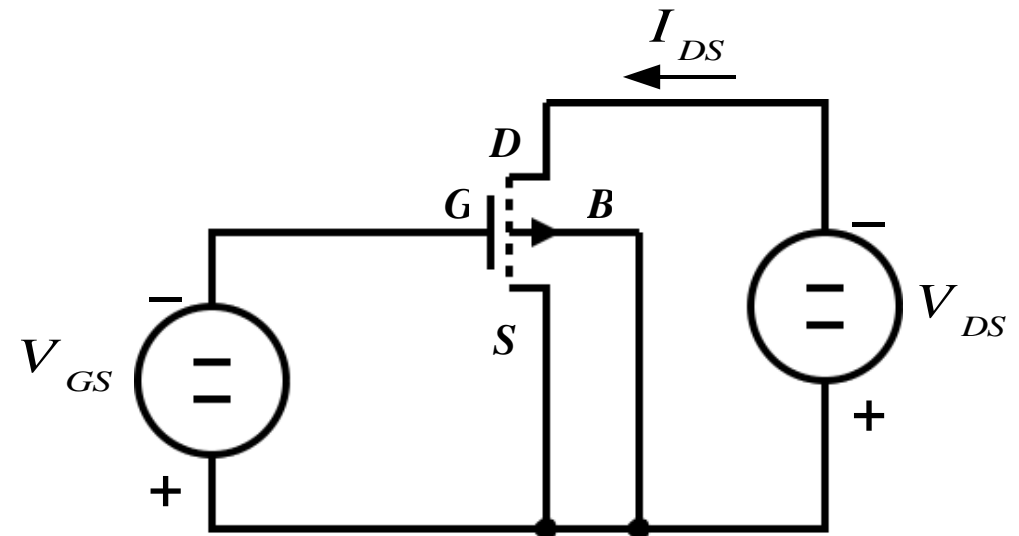


mosfet a canale *n* (*nmos*)

$$V_T > 0 \quad V_{GS} > 0 \quad V_{DS} > 0$$

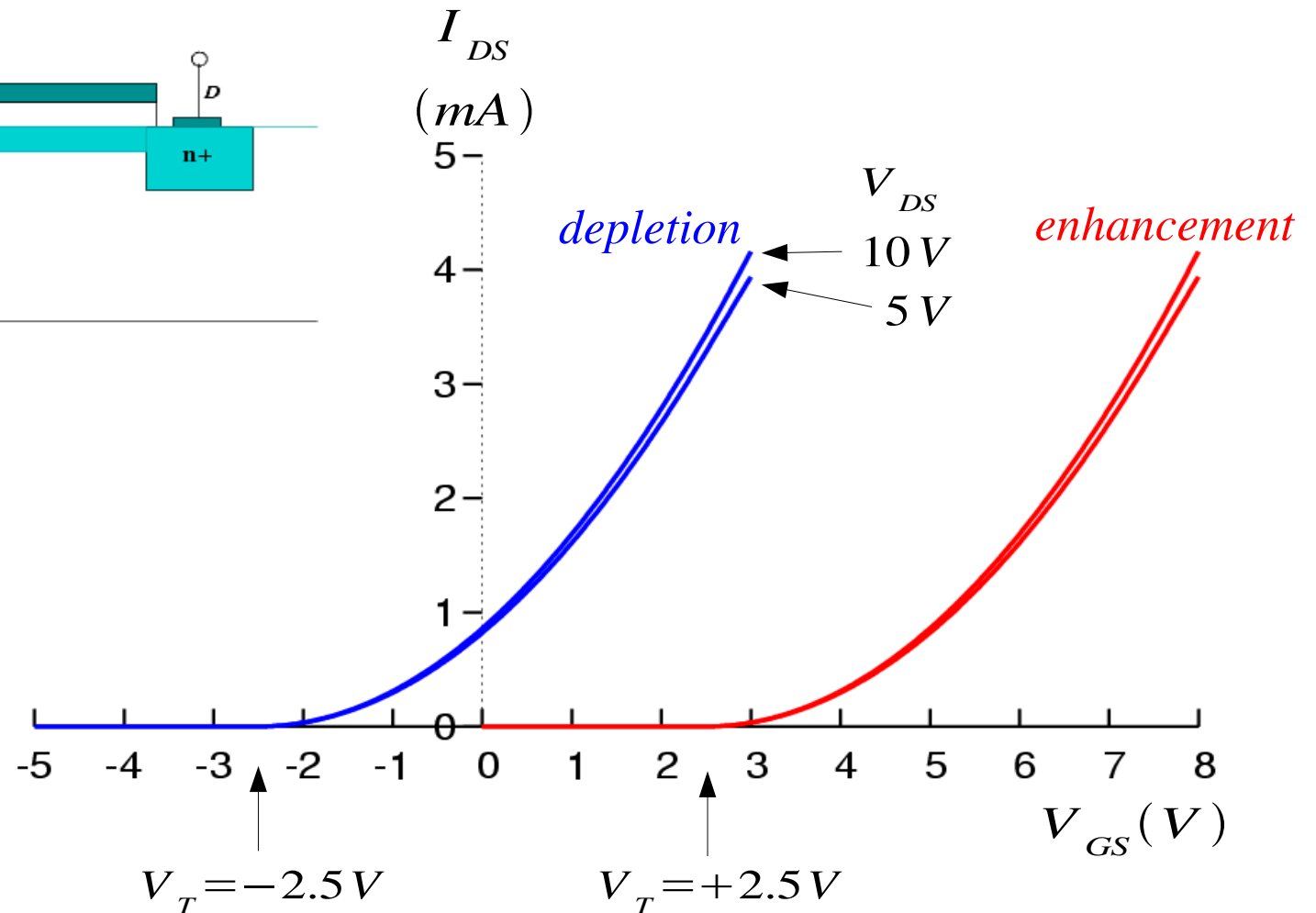
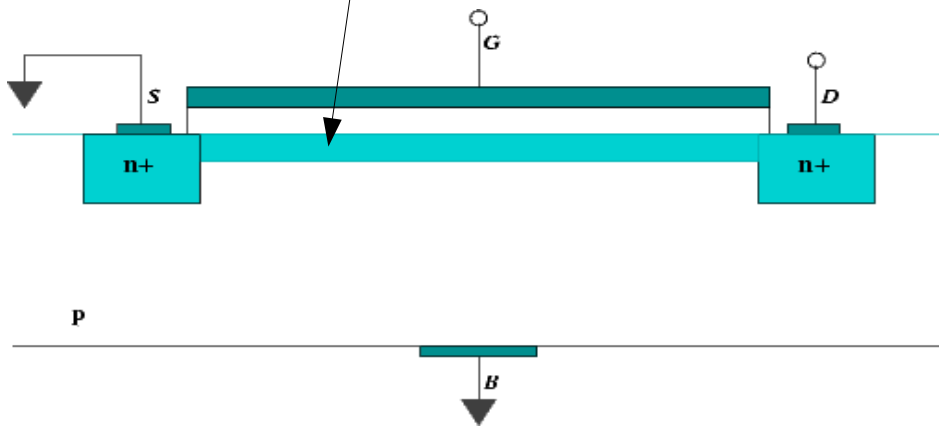
mosfet a canale *p* (*pmos*)

$$V_T < 0 \quad V_{GS} < 0 \quad V_{DS} < 0$$



## Transistor mosfet di tipo *depletion* (ad impoverimento)

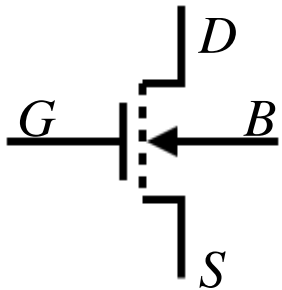
Canale di portatori  $n$  “impiantato”  
in corrispondenza del *gate*



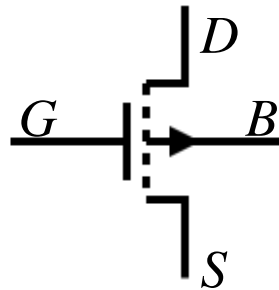
## Varieta' di transistor mosfet

*enhancement*

*nmos*

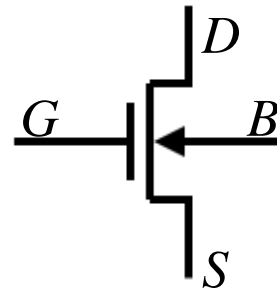


*pmos*

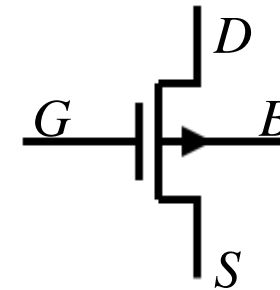


*depletion*

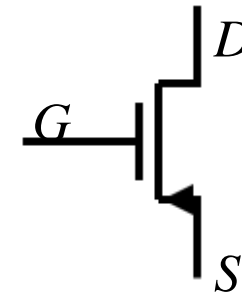
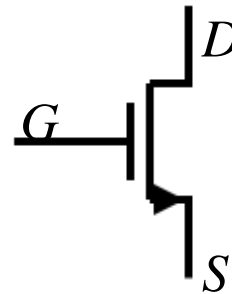
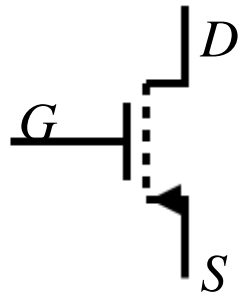
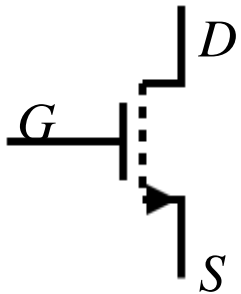
*nmos*



*pmos*

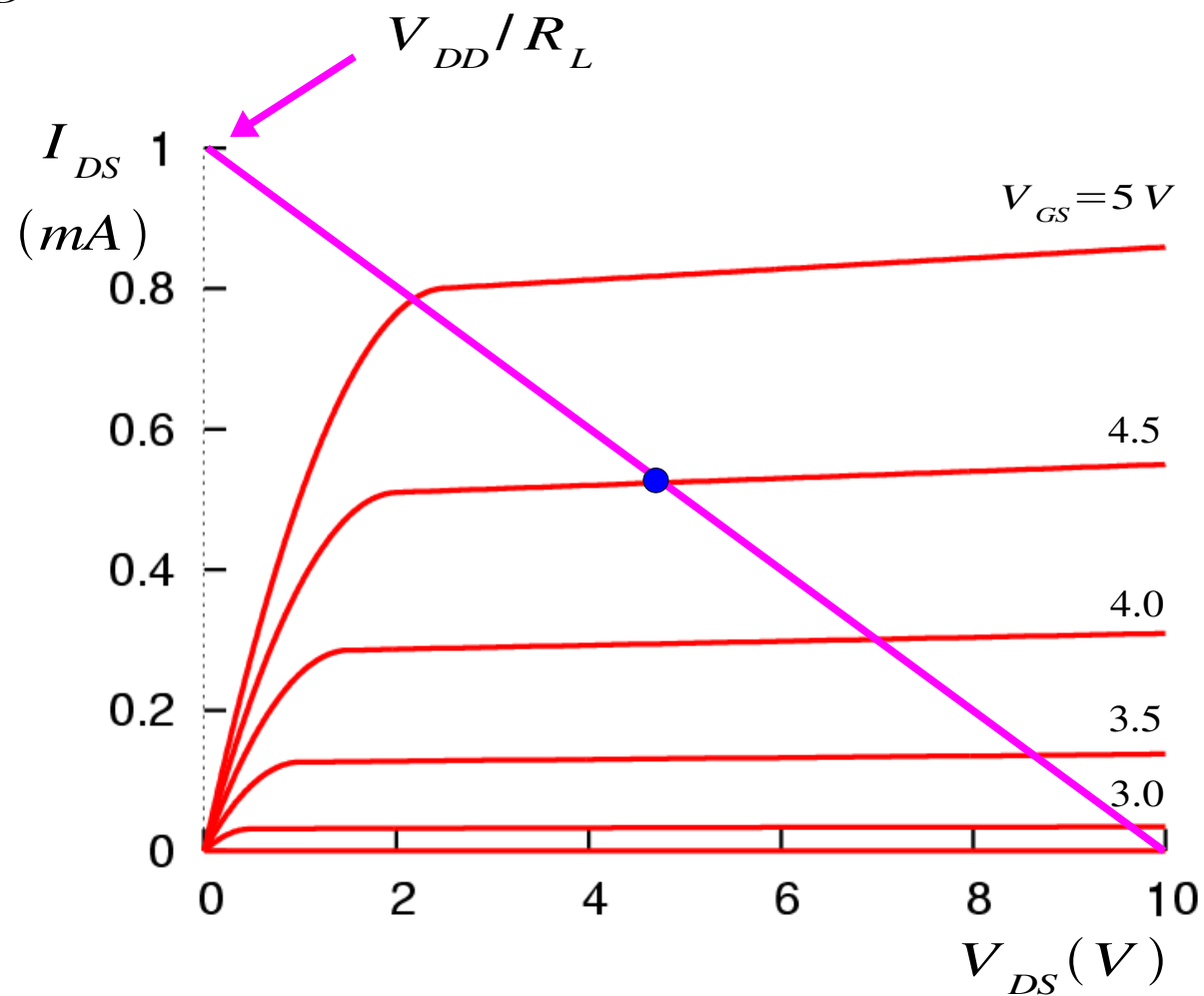
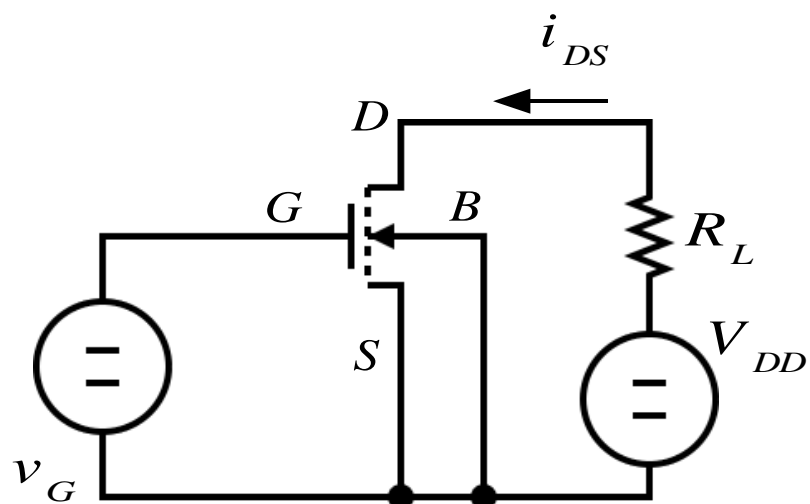


*Source e Bulk*  
(substrato)  
non connessi  
internamente

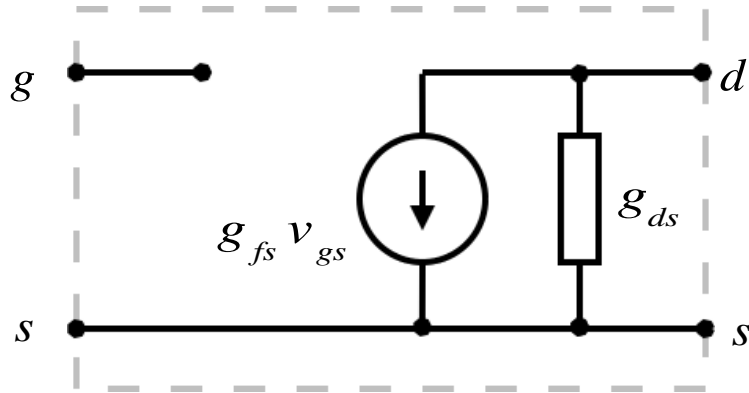


*Source e Bulk*  
(substrato)  
connessi  
internamente

## Amplificatore *common source*



## Modello lineare per piccoli segnali per i transistor *mosfet*



Modello lineare del mosfet per corrente continua e bassa frequenza. I parametri  $g$  sono i più opportuni.

$g_{fs}$ : conduttanza di trasferimento diretto

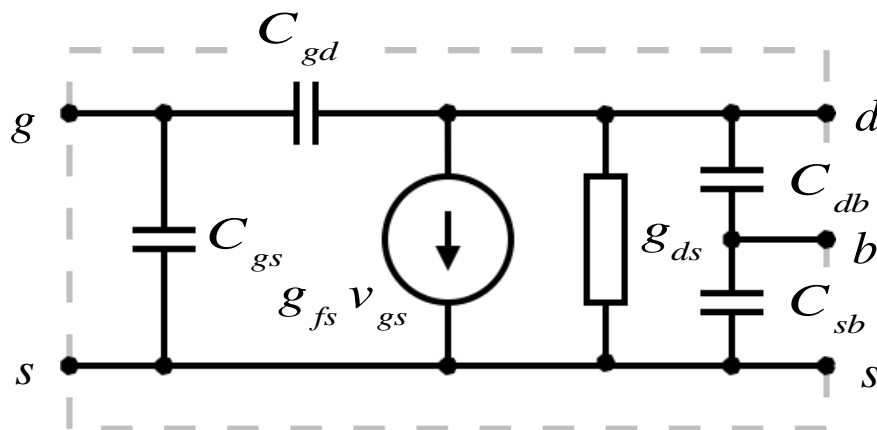
$g_{ds}$ : conduttanza di uscita

$C_{gs}$ : capacità gate – source

$C_{gd}$ : capacità gate – drain

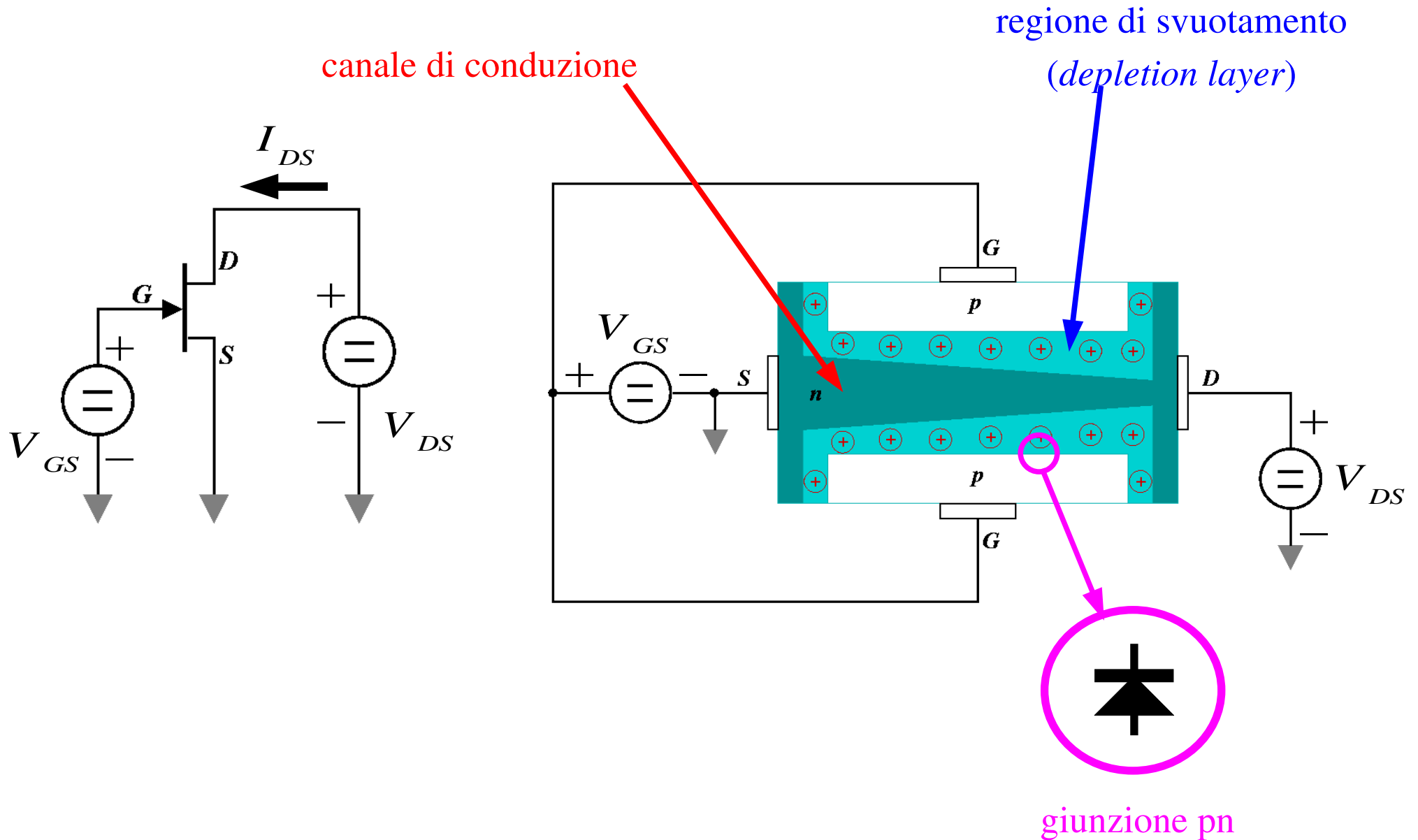
$C_{sb}$ : capacità source – substrato

$C_{db}$ : capacità drain – substrato



Modello lineare del mosfet per alta frequenza. Al circuito in corrente continua vengono aggiunte le capacità tra *source*, *drain* e *gate* e le capacità delle giunzioni *PN* tra *source*, *drain* e *bulk*.

## Transistor *jfet* (a canale *n*)

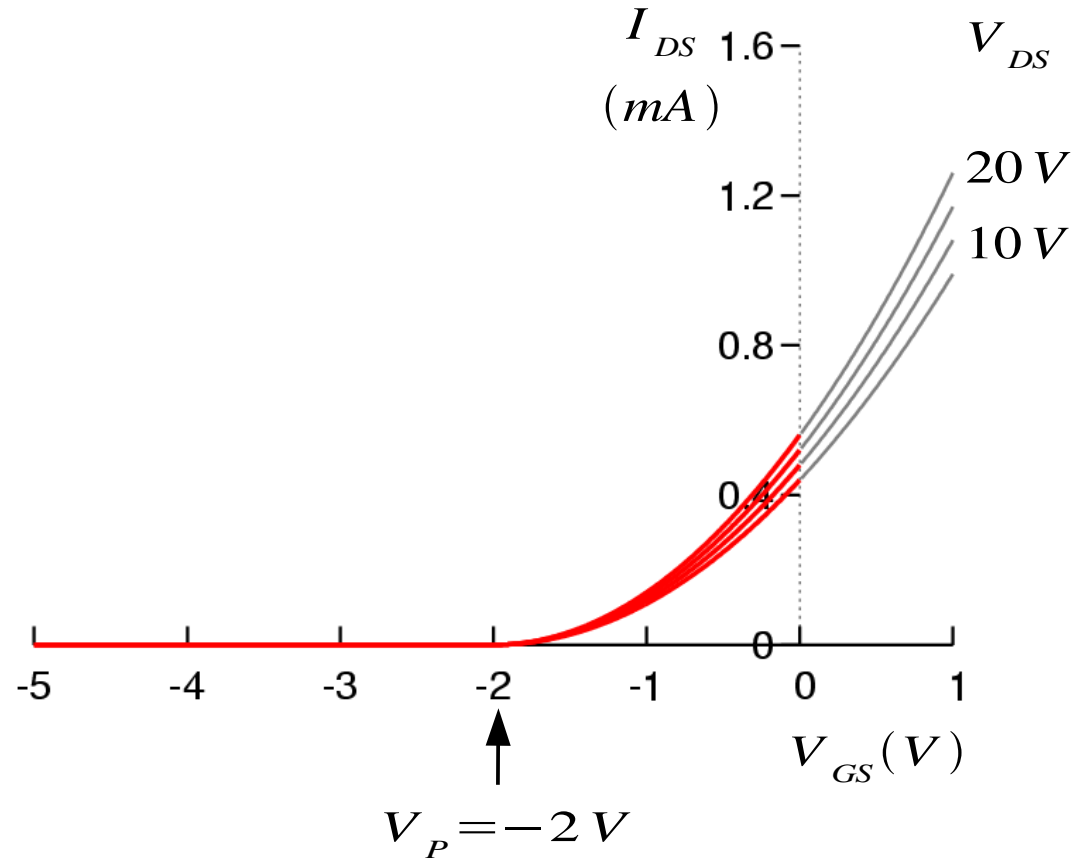




## Curve caratteristiche del transistor *jfet* a canale *n*

$V_P$  = tensione di pinch-off ( $V_T$ )

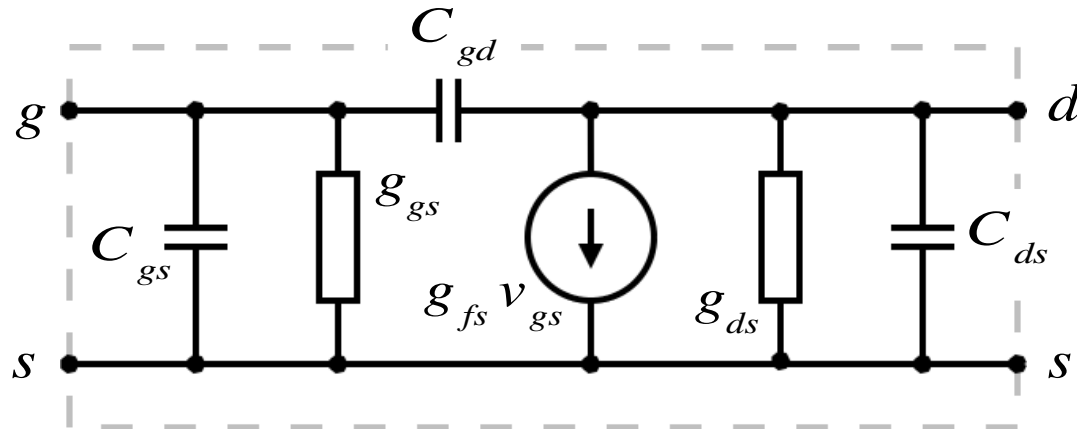
$$I_{DSS} = \frac{K_n}{2} V_P^2$$



$$I_{DS} = \frac{2 I_{DSS}}{V_P^2} \left( V_{GS} - V_P - \frac{1}{2} V_{DS} \right) V_{DS} \quad \text{per } V_{GS} - V_P \geq V_{DS} \geq 0 \quad \text{regione lineare}$$

$$I_{DS} = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2 (1 + \lambda V_{DS}) \quad \text{per } V_{DS} \geq V_{GS} - V_P \quad \text{regione di saturazione}$$

## Modello lineare per piccoli segnali per i transistor *jfet*



$g_{fs}$  : conduttanza di trasferimento diretto

$g_{ds}$  : conduttanza di uscita

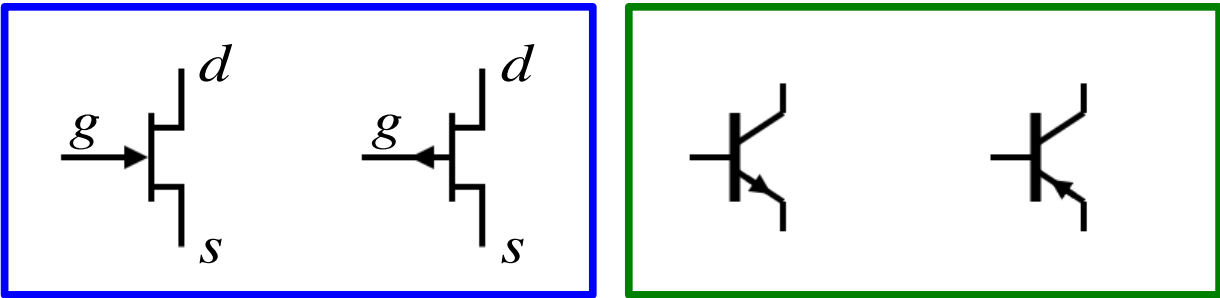
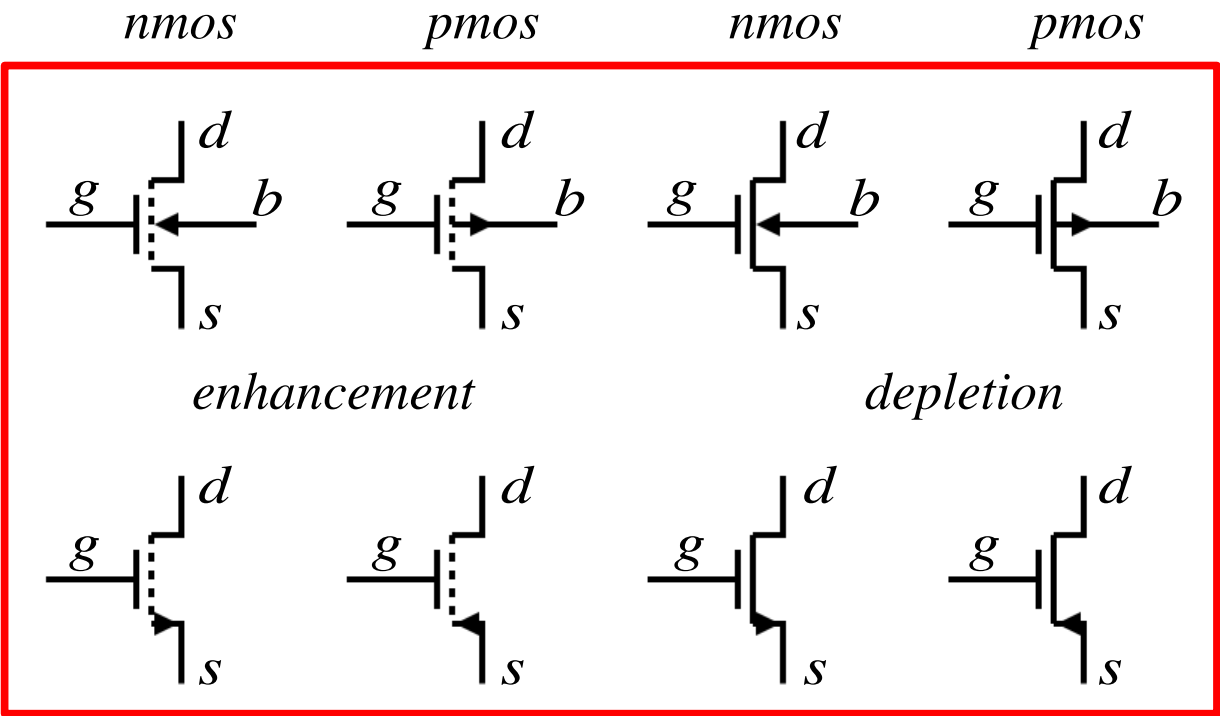
$g_{gs}$  : conduttanza di ingresso

$C_{gs}$  : capacita' gate — source

$C_{gd}$  : capacita' gate — drain

$C_{ds}$  : capacita' drain — source

Simboli circuitali per transistor bjt, jfet e mosfet



*n - jfet*

*p - jfet*

*nnp - bjt*

*pnp - bjt*