

Dispositivi e Tecnologie Elettroniche

Il transistor MOS

Il transistor MOS

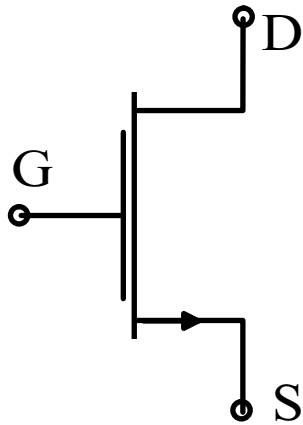
- *La struttura MOS a due terminali vista può venire utilizzata per costruire un **condensatore integrato***
- *È la struttura base del **transistore MOSFET***
- ***MOSFET: Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor***
- *Si tratta di un transistor in cui la corrente*
 - ◆ *scorre tra due terminali (**source** e **drain**) controllata dal **campo elettrico** dovuto alla **tensione di controllo** sul terzo terminale (**gate**)*
 - ◆ *è dovuta a **un solo tipo di portatori (monopolare)***

La famiglia dei MOS

- **Esistono 4 tipi di transistori MOS**
 - 2 a canale n e 2 a canale p
- **I transistori MOSFET a canale n (n MOS) sono realizzati su un substrato di tipo p**
 - n MOS **ad arricchimento** (enhancement) o **normalmente off**
 - n MOS **a svuotamento** (depletion) o **normalmente on**
- **I transistori MOSFET a canale p (p MOS) sono realizzati su un substrato di tipo n**
 - p MOS **ad arricchimento** (enhancement) o **normalmente off**
 - p MOS **a svuotamento** (depletion) o **normalmente on**

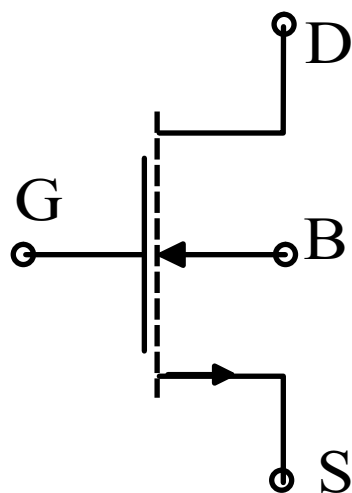
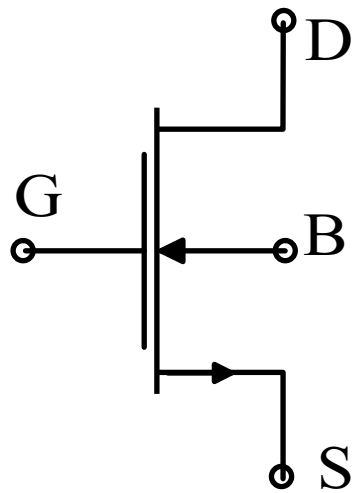
Simboli circuitali

*n*MOS

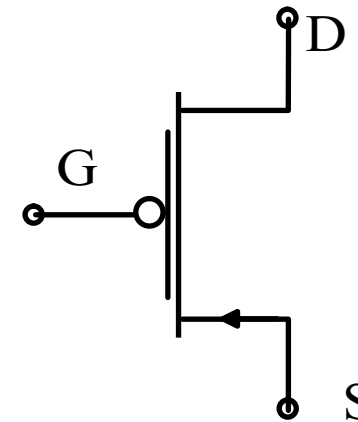


ad arricchimento
o a svuotamento

ad arricchimento

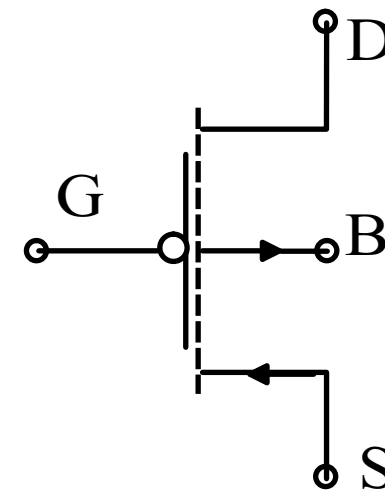
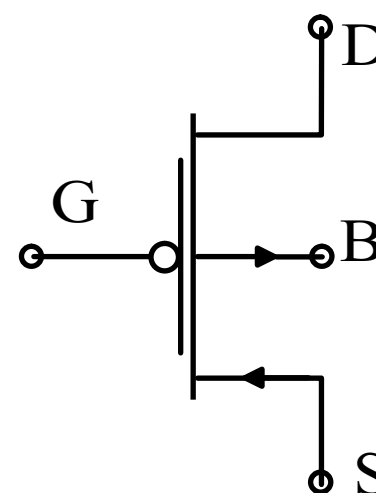


*p*MOS



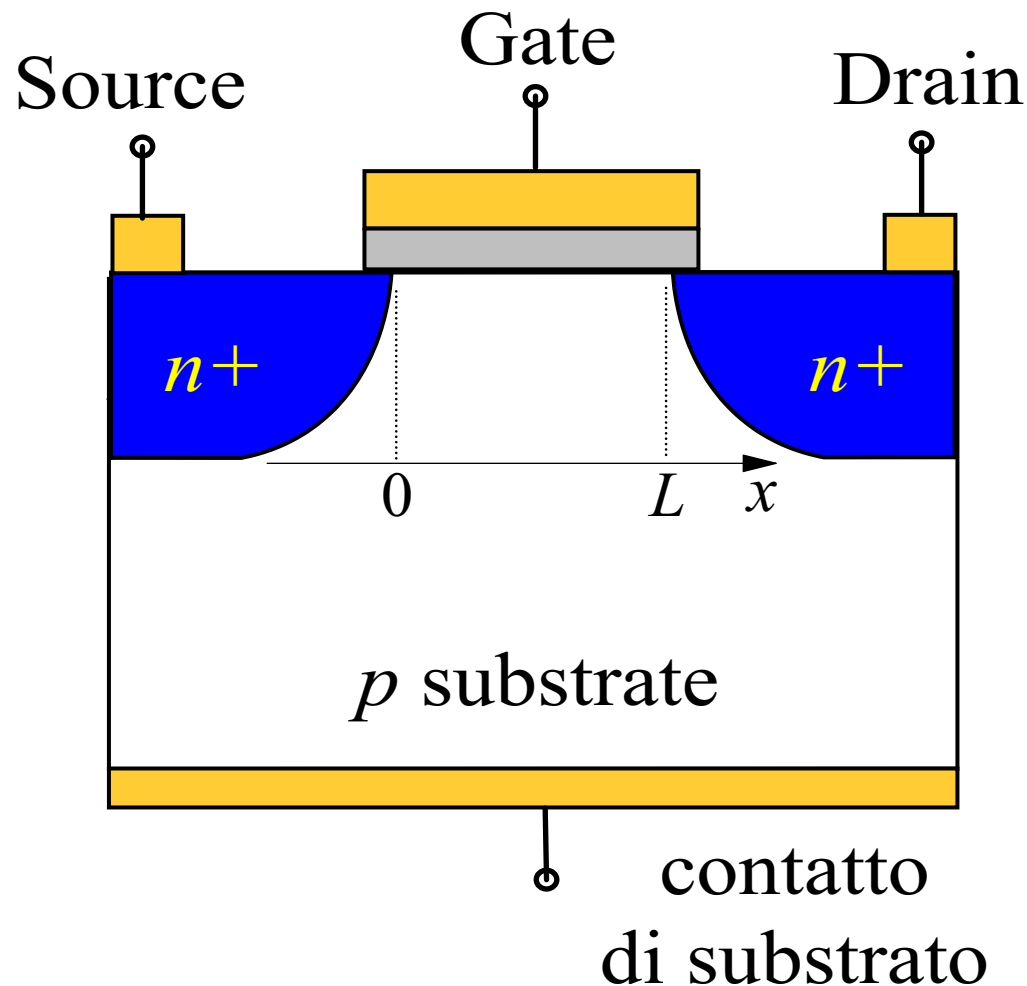
ad arricchimento
o a svuotamento

ad arricchimento



n MOS ad arricchimento

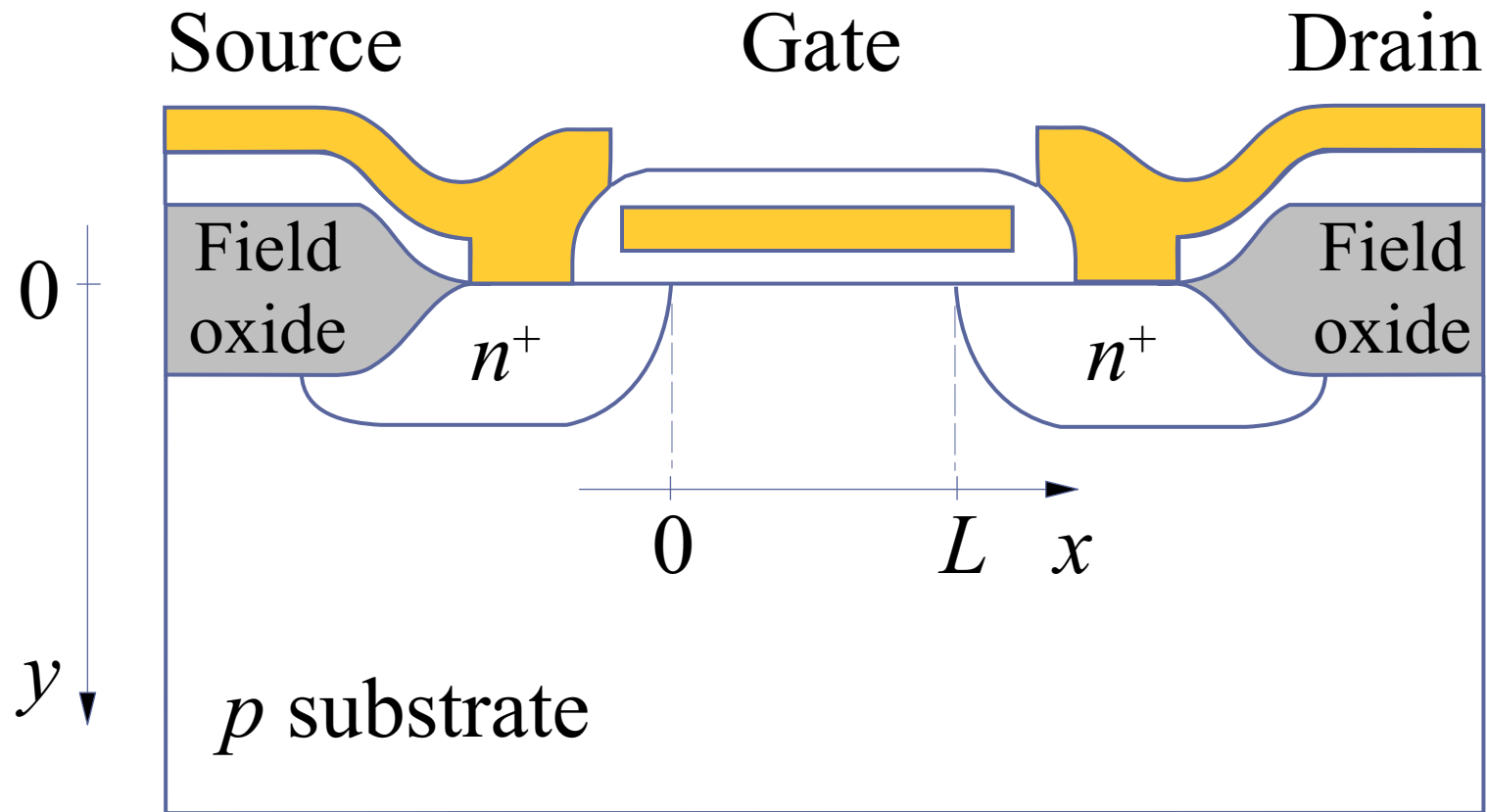
■ *Il MOSFET a canale n ad arricchimento ha la seguente struttura*



- *Le zone n^+ devono essere il più possibile allineate ai lati del gate*
- *L è la lunghezza di canale*
- *Corrente di elettroni tra il source e il drain*

*n*MOS: tecnologia

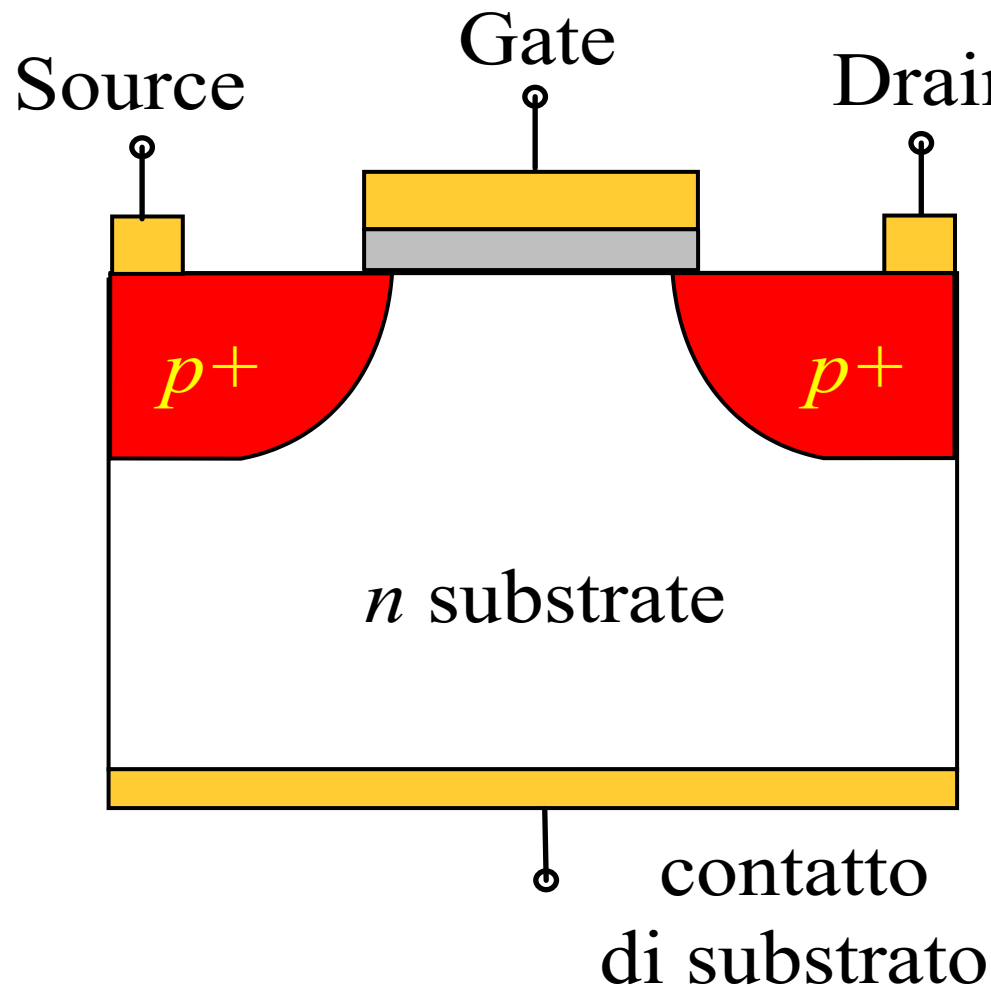
■ Una sezione più realistica di un *n*MOS



■ *il contatto di substrato è realizzato mediante una diffusione *p*⁺ di fianco al source o al drain*

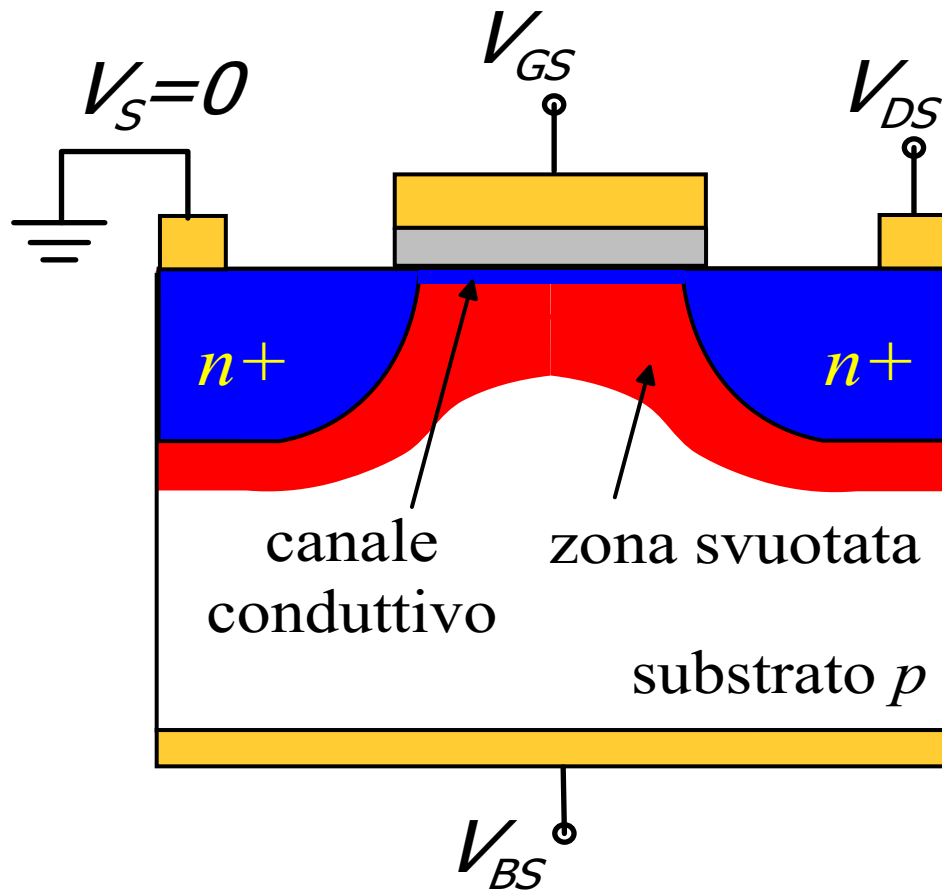
*p*MOS ad arricchimento

- *Il pMOS ad arricchimento ha drogaggio simmetrico rispetto al nMOS*



- ◆ **Corrente di lacune** tra il source e il drain
- ◆ Studieremo il *n*MOS e ricaveremo i risultati sul *p*MOS per simmetria
⇒ **scambiando il segno delle correnti e delle tensioni**

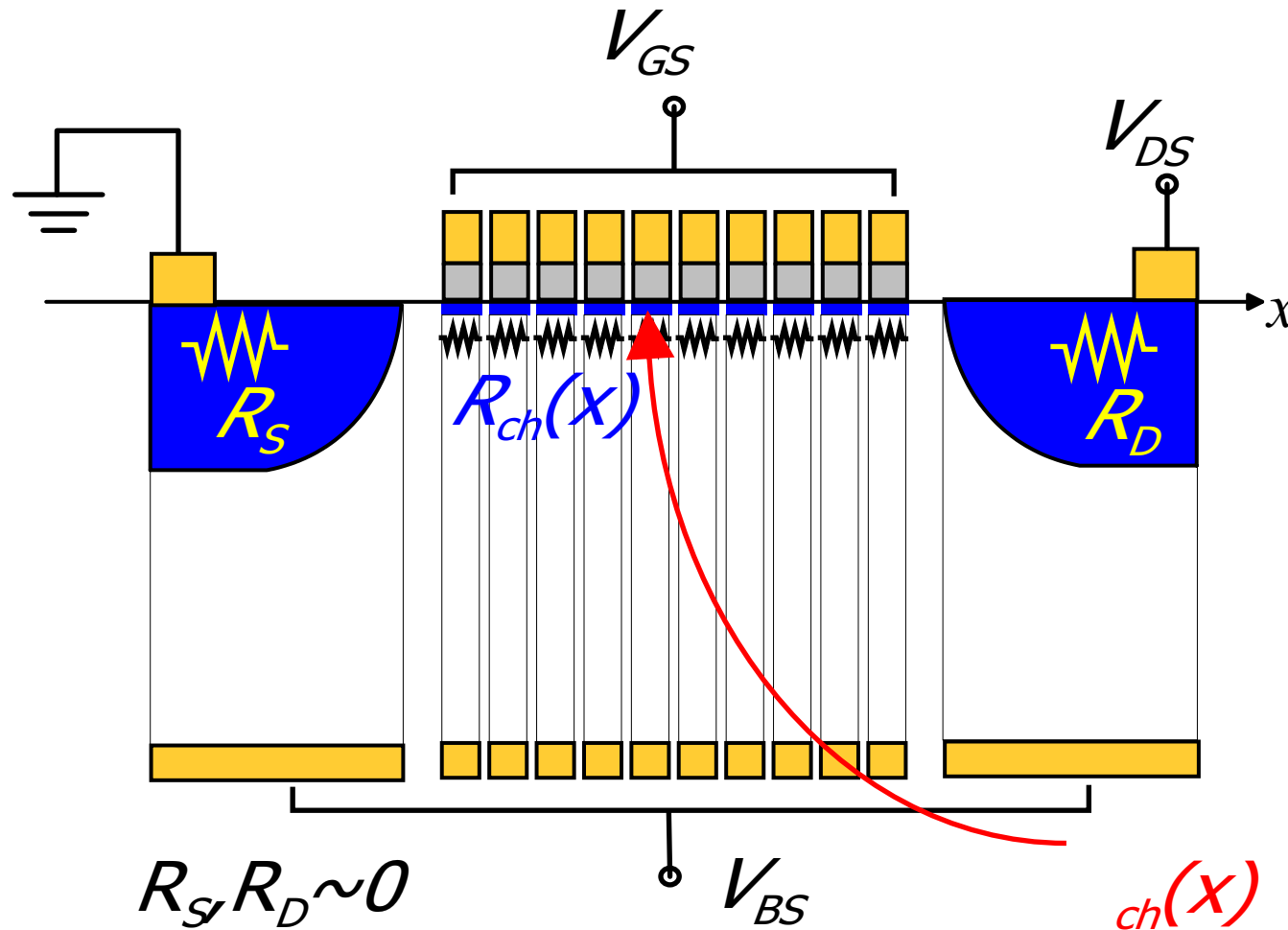
*n*MOS: Funzionamento



- ◆ $V_{GS} > V_{th}$: si forma il canale conduttivo tra drain e source
- ◆ $V_{DS} > 0$: $I_{DS} \neq 0$ positiva entrante nel drain
- ◆ **La corrente di gate è nulla** in condizioni stazionarie
- ◆ V_{BS} e V_{BD} devono essere negative o nulle

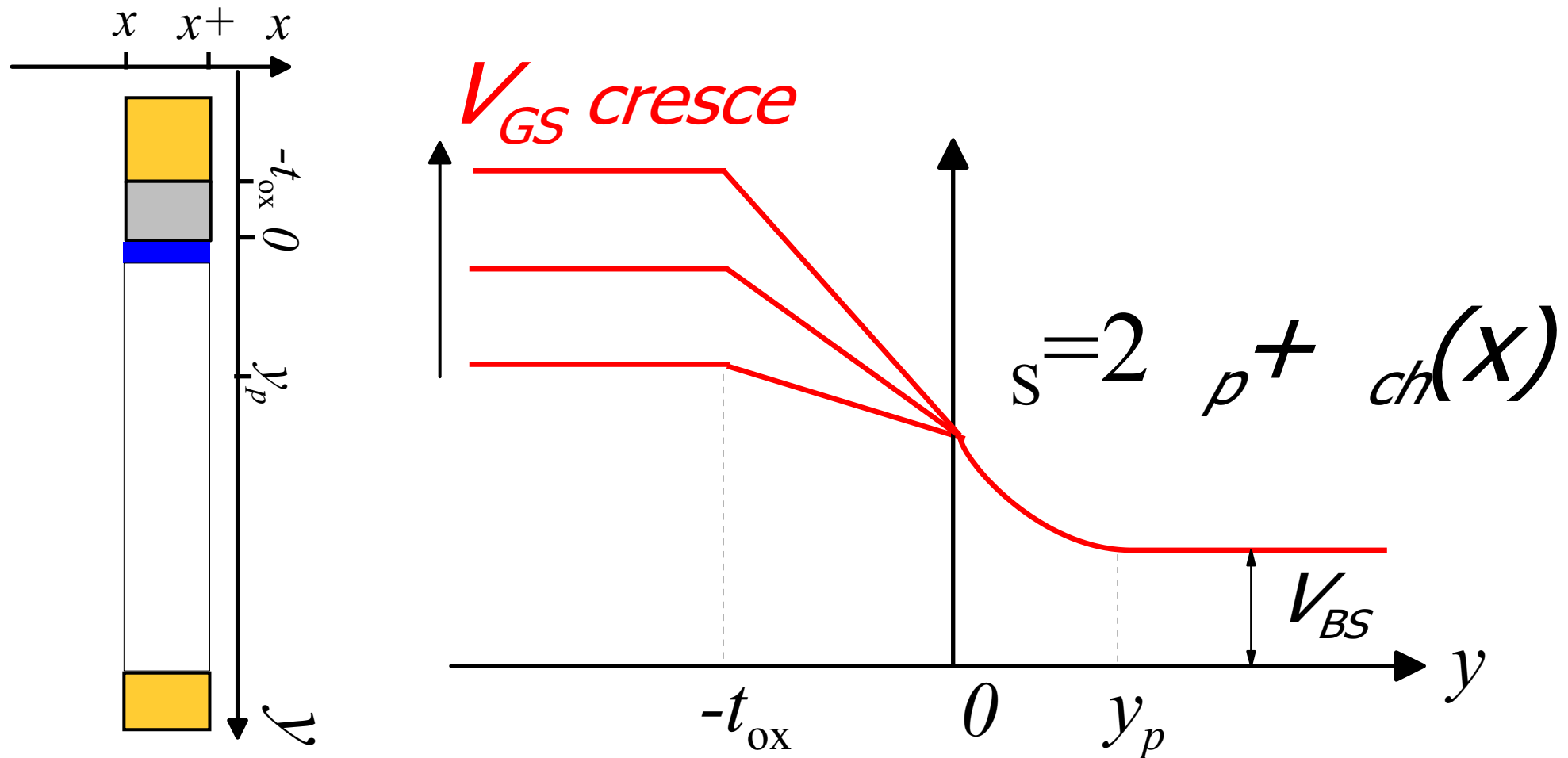
■ *Le tensioni sono riferite al source*

*n*MOS: Modello distribuito



- ◆ Il potenziale di canale $\phi_{ch}(x)$ è riferito al source
- ◆ $\phi_{ch}(0) = 0$ (source) e $\phi_{ch}(L) = V_{DS}$ (drain)

Potenziale alla sezione x



- ◆ La tensione sull'ossido $V_{ox} = V_{GS} - V_{FB} - \phi_s$ dipende solo da V_{GS} e dal **potenziale di canale** (tensione V_{DS})

Carica $Q_t(x)$

- **La carica totale alla sezione x , $Q_t(x)$ vale:**

$$Q_t(x) = C_{\text{ox}} V_{\text{ox}}(x)$$

- **La tensione sull'ossido V_{ox} dipende dalla posizione x lungo il canale conduttivo attraverso $\phi_{\text{ch}}(x)$:**

$$V_{\text{ox}}(x) = V_{\text{GS}} - V_{\text{FB}} - 2\phi_p - \phi_{\text{ch}}(x)$$

- **La carica nella sezione in x vale:**

$$Q_t(x) = C_{\text{ox}} (V_{\text{GS}} - V_{\text{FB}} - 2\phi_p - \phi_{\text{ch}}(x))$$

Carica $Q_d(x)$

- *La carica nella zona svuotata dipende dalla polarizzazione del substrato V_{BS} e dal potenziale di canale.*
- *La tensione che cade sulla zona svuotata risulta pari a $\phi_S - V_{BS}$*
- *In regime di inversione vale $\phi_S = 2\phi_p + \phi_{ch}$*
- *La carica presente nella zona svuotata diventa:*

$$Q_d(x) = -\sqrt{2q\epsilon N_A} \sqrt{2\phi_p + \phi_{ch} - V_{BS}}$$

Carica $Q_n(x)$

- *La carica nello strato di inversione si determina come sempre da:*

$$Q_n(x) = -Q_t(x) - Q_d(x)$$

- *Sostituendo le espressioni di Q_d e Q_t si ricava*

$$Q_n(x) = -C_{ox}(V_{GS} - V_{FB} - 2\phi_p - \phi_{ch}) + \sqrt{2q\epsilon N_A (2\phi_p + \phi_{ch} - V_{BS})}$$

- *Ricordando l'espressione della tensione di soglia di un sistema MOS con substrato di tipo p :*

$$V_{th} = V_{FB} + 2\phi_p + \gamma_B \sqrt{(2\phi_p - V_{BS})}$$

Tensione di soglia

- *l'espressione della carica di canale alla sezione x diventa:*

$$Q_n(x) = -C_{\text{ox}}(V_{\text{GS}} - \phi_{\text{ch}} - V_{\text{th}}) + \gamma_{\text{B}}C_{\text{ox}} \left(\sqrt{2\phi_p + \phi_{\text{ch}} - V_{\text{BS}}} - \sqrt{2\phi_p - V_{\text{BS}}} \right)$$

- *Il primo addendo corrisponde al **controllo di carica lineare***
- *La parte non lineare è **proporzionale a γ_{B}** (effetto body) e può essere trascurata se il drogaggio del substrato è sufficientemente basso*

Tensioni di pilotaggio

■ Con la tensione V_{GS}

◆ aumenta Q_t e non varia $Q_d \Rightarrow$ **aumenta Q_n**

■ Con la tensione V_{BS} (negativa)

◆ aumenta Q_d e non varia $Q_t \Rightarrow$ **decrece Q_n**

■ Con la tensione V_{DS} il potenziale di canale cresce in ogni sezione del canale ($\forall x$)

◆ diminuisce Q_t e aumenta $Q_d \Rightarrow$ **decrece Q_n**

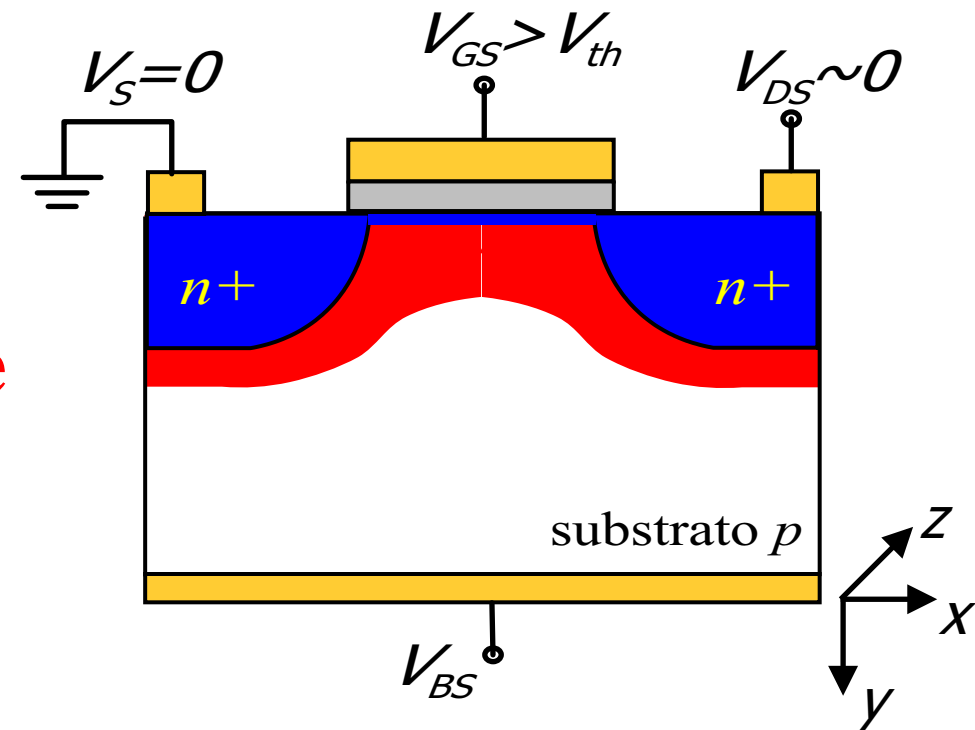
■ La carica di canale al drain è minore che al source: **il canale tende a strozzarsi al drain per V_{DS} crescenti**

Regione lineare

- **Se $V_{DS} \simeq 0$ ($V_{DS} > 0$) il canale conduttivo è popolato in maniera uniforme dal source al drain**
- Il transistorore si comporta come un **resistore**
- **La conduttanza di canale, legata alla carica di canale, è pilotata dalla tensione di gate**

$$G_{ch} = \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} (V_{GS} - V_{th})$$

- **La corrente I_{DS} cresce linearmente con V_{DS}**
($I_{DS} = G_{ch} V_{DS}$)

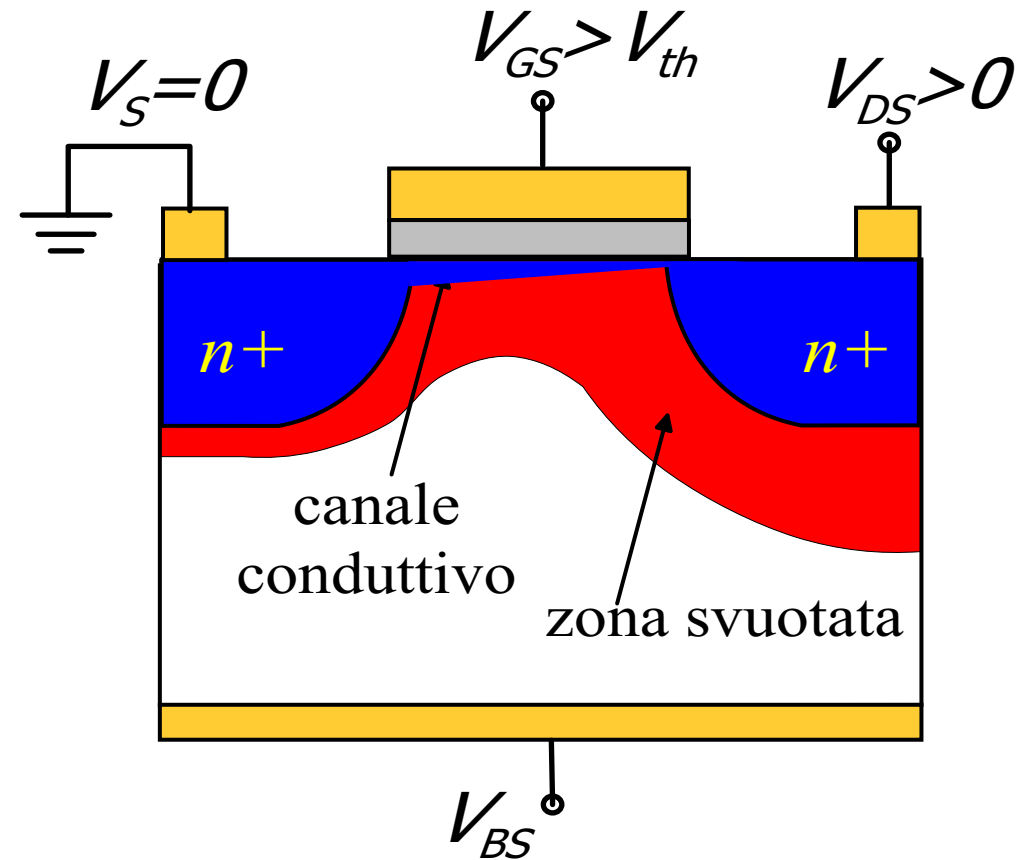


W larghezza di canale (asse z)

Strozzamento del canale

■ Per V_{DS} crescenti il canale si strozza verso il drain mentre la zona svuotata si estende

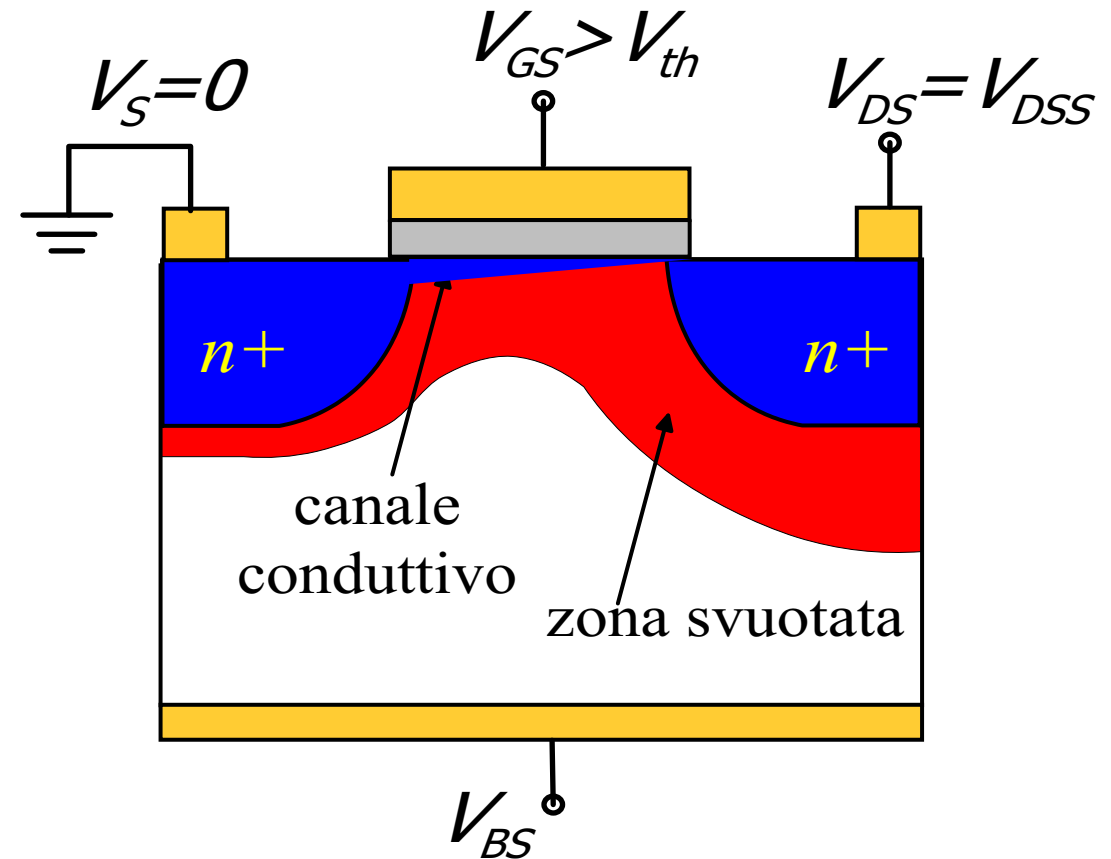
- I_{DS} cresce meno che linearmente con V_{DS}
- **La corrente che scorre tra drain e source è costante in ogni sezione del canale, anche se la carica di canale varia.**



Saturazione

■ Per $V_{DS} = V_{DSS}$ *tensione di saturazione*

- il canale si strozza completamente al drain
- I_{DS} non cresce più al crescere di V_{DS}
- I_{DS} è controllata solo dalla tensione di gate



Corrente I_{DS}

- **La corrente che scorre tra drain e source (positiva entrante nel drain) si calcola come:**

$$I_{DS} = W Q_n(V_{GS}, V_{DS}, V_{BS}, \phi_{ch}) \mu_n \mathcal{E}_x$$

dove:

$$\mathcal{E}_x = -\frac{d\phi_{ch}}{dx}$$

- **Integrando a entrambi i membri lungo il canale:**

$$\int_0^L I_{DS} dx = -W \mu_n \int_0^{V_{DS}} Q_n(V_{GS}, V_{DS}, V_{BS}, \phi_{ch}) d\phi_{ch}$$

- **Poichè I_{DS} è costante, a primo membro ottengo $I_{DS} \cdot L$**

Caratteristica di uscita

- *Sostituendo la relazione del controllo di carica, l'integrale si risolve analiticamente:*

$$I_{\text{DS}} = \frac{W}{L} \mu_n C_{\text{ox}} \left[(V_{\text{GS}} - V_{\text{th}}) V_{\text{DS}} - \frac{1}{2} V_{\text{DS}}^2 \right] - \gamma_{\text{B}} \frac{W}{L} \mu_n C_{\text{ox}} \left\{ \frac{2}{3} \left[\sqrt{(2\phi_p + V_{\text{DS}} - V_{\text{BS}})^3} - \sqrt{(2\phi_p - V_{\text{BS}})^3} \right] - \sqrt{2\phi_p - V_{\text{BS}}} V_{\text{DS}} \right\}$$

- *Il primo addendo deriva dal controllo di carica lineare e fornisce la **caratteristica quadratica** del MOSFET.*
- ***La correzione è proporzionale a γ_{B} e può venire trascurata se il substrato ha drogaggio suff. basso***

Caratteristica quadratica

■ *La relazione*

$$I_{\text{DS}} = \frac{W}{L} \mu_n C_{\text{ox}} \left[(V_{\text{GS}} - V_{\text{th}}) V_{\text{DS}} - \frac{1}{2} V_{\text{DS}}^2 \right]$$

non ha valore per $V_{\text{DS}} > V_{\text{GS}} - V_{\text{th}} = V_{\text{DSS}}$.

■ *Si dimostra che a tale tensione il canale è completamente strozzato al drain.*

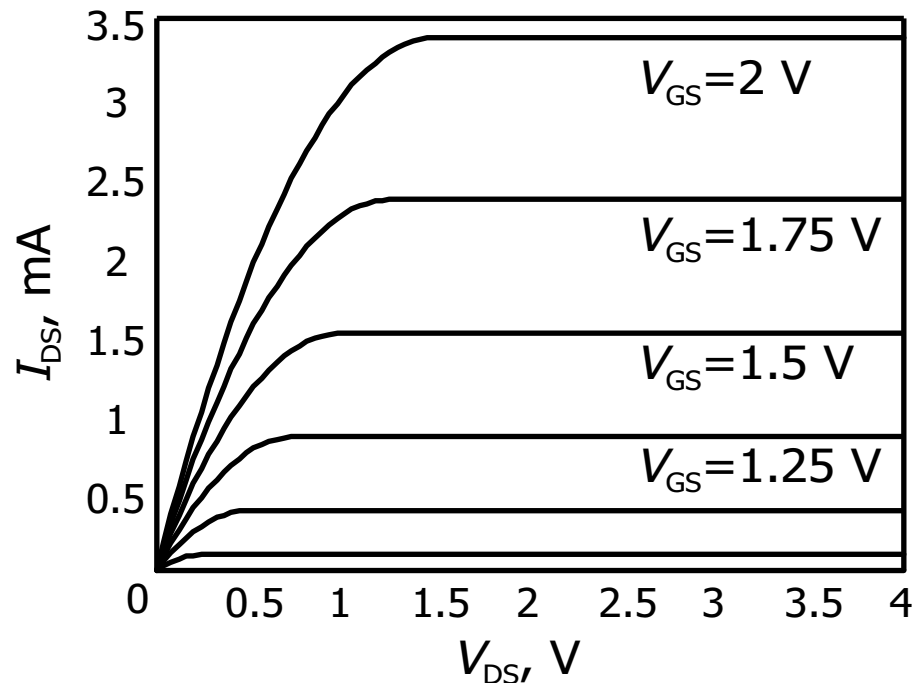
■ *In queste condizioni la corrente non cresce più con la tensione V_{DS} e rimane costante al valore*

$$I_{\text{DS,sat}} = \frac{1}{2} \frac{W}{L} \mu_n C_{\text{ox}} (V_{\text{GS}} - V_{\text{th}})^2$$

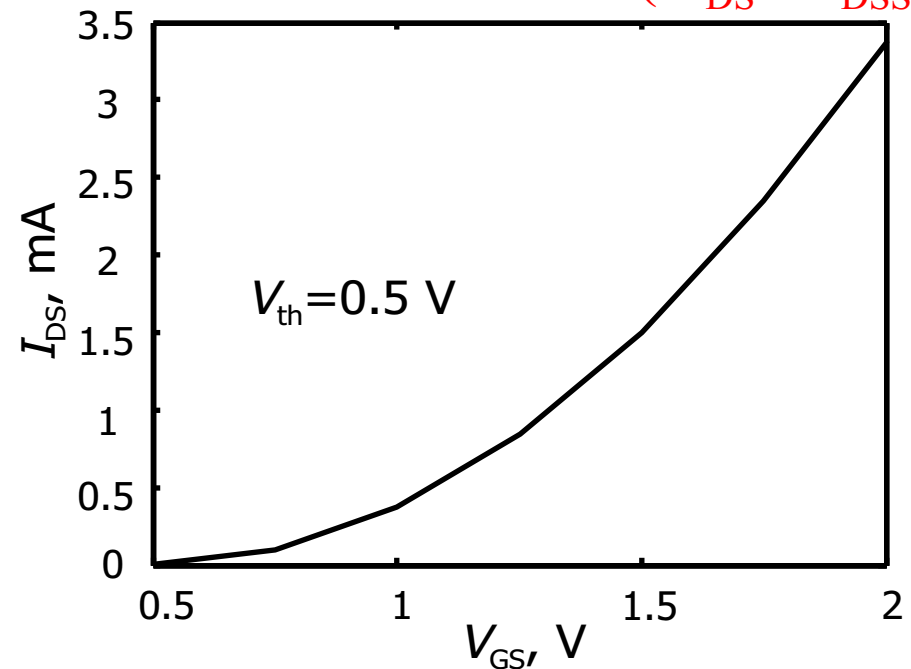
Caratteristiche del n MOS

$$I_{DS} = \begin{cases} \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} \left[(V_{GS} - V_{th}) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right] & V_{DS} < V_{DSS} \\ \frac{1}{2} \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} (V_{GS} - V_{th})^2 & V_{DS} > V_{DSS} \end{cases}$$

caratteristiche di uscita



transcaratteristica ($V_{DS} > V_{DSS}$)



Regioni di funzionamento

■ $V_{DS} \approx 0$ **zona lineare:**

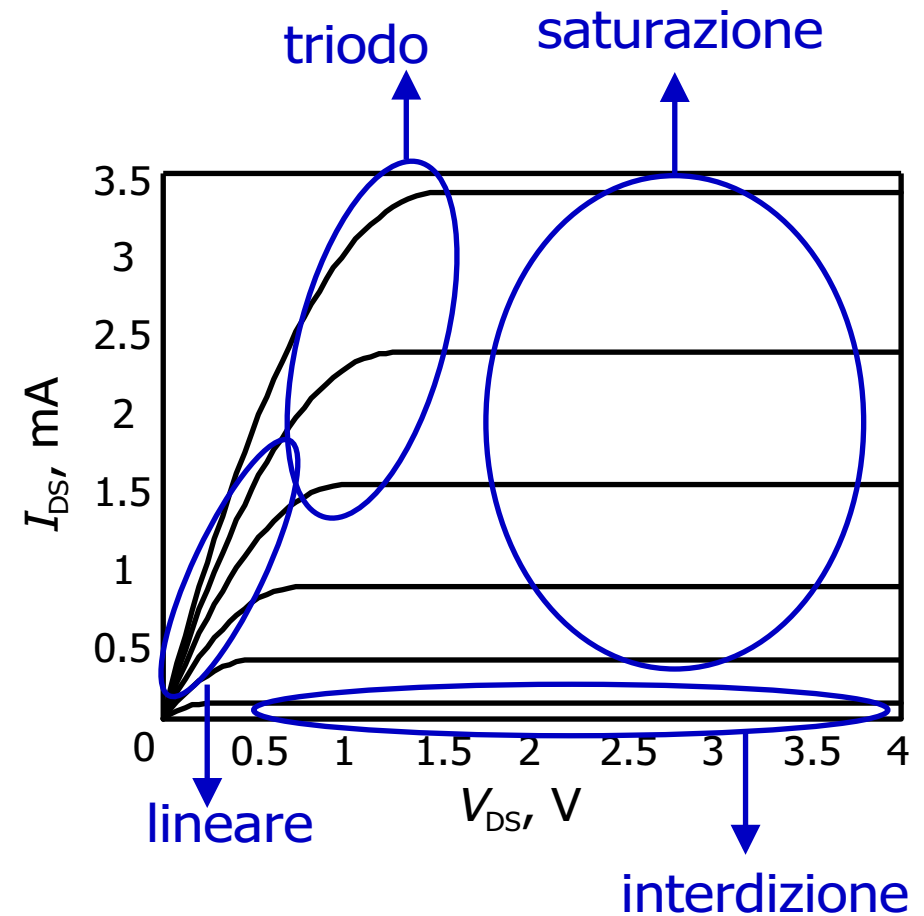
I_{DS} è *proporzionale a* V_{DS}

■ $V_{DS} < V_{DSS}$ **zona triodo:**

I_{DS} *cresce meno che linearmente con* V_{DS}

■ $V_{DS} > V_{DSS}$ **zona di saturazione:** I_{DS} *non dipende da* V_{DS} , *solo da* V_{GS}

■ $V_{GS} < V_{th}$ **zona di interdizione:** $I_{DS} = 0$



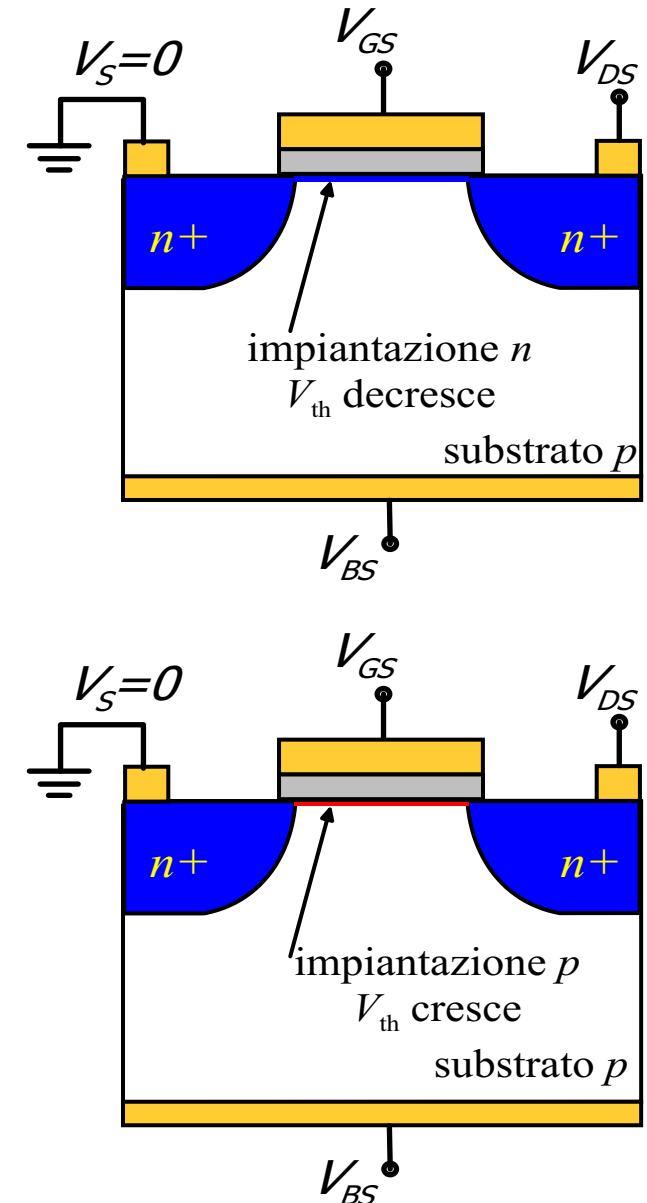
Regolazione di V_{th}

- La tensione di soglia può venire regolata mediante **un impiantazione ionica superficiale di drogante**
- La tensione di banda piatta viene modificata

$$V'_{FB} = V_{FB} - \frac{qN_{dD}}{C_{ox}} + \frac{qN_{dA}}{C_{ox}}$$

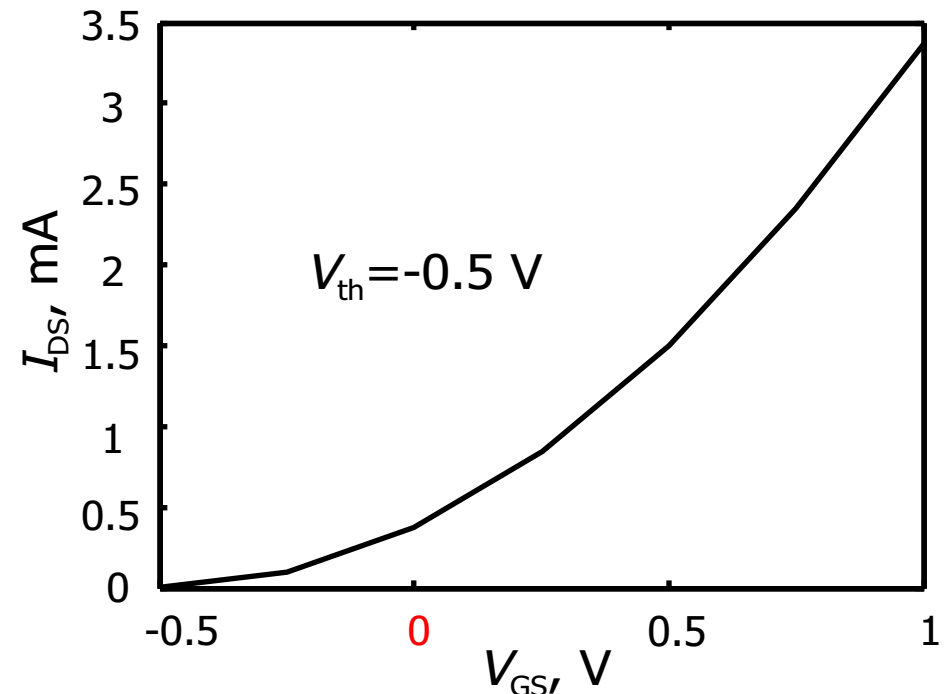
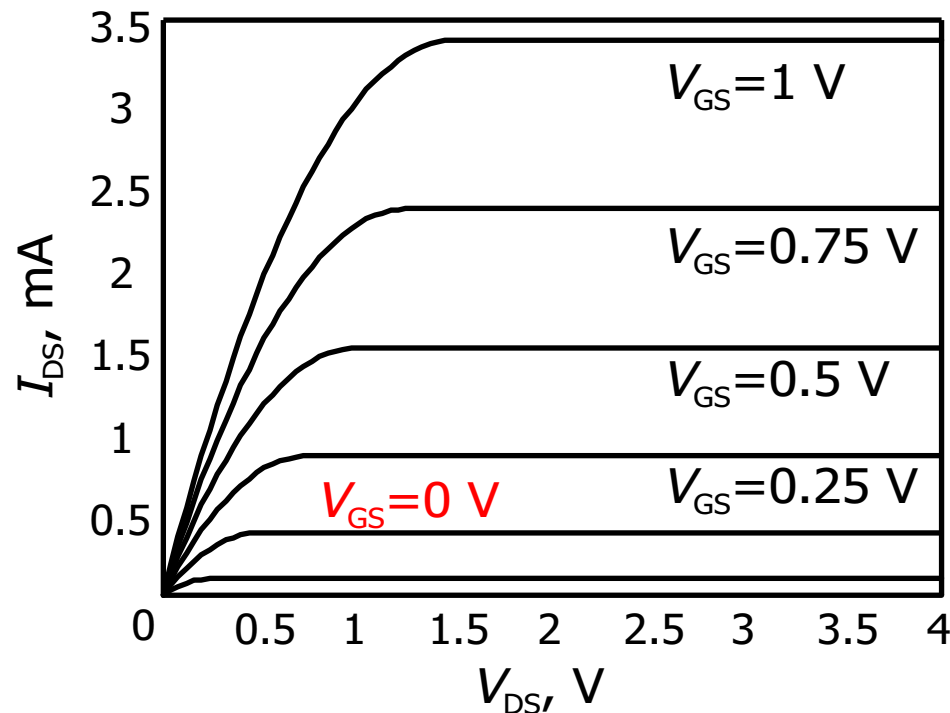
$N_{dD,A}$: concentrazioni impiantate per unità di area (**dose**)

$$\Delta V_{th} = -\frac{qN_{dD}}{C_{ox}} + \frac{qN_{dA}}{C_{ox}}$$



*n*MOS normalmente *on*

- Mediante impiantazione ionica di tipo *n* **la tensione di soglia può diventare negativa**
- In questo caso **il canale è preformato** (*n*MOS a svuotamento o normalmente ON)
- Per $V_{GS} = 0$ il dispositivo è già in conduzione



Transistore p MOS

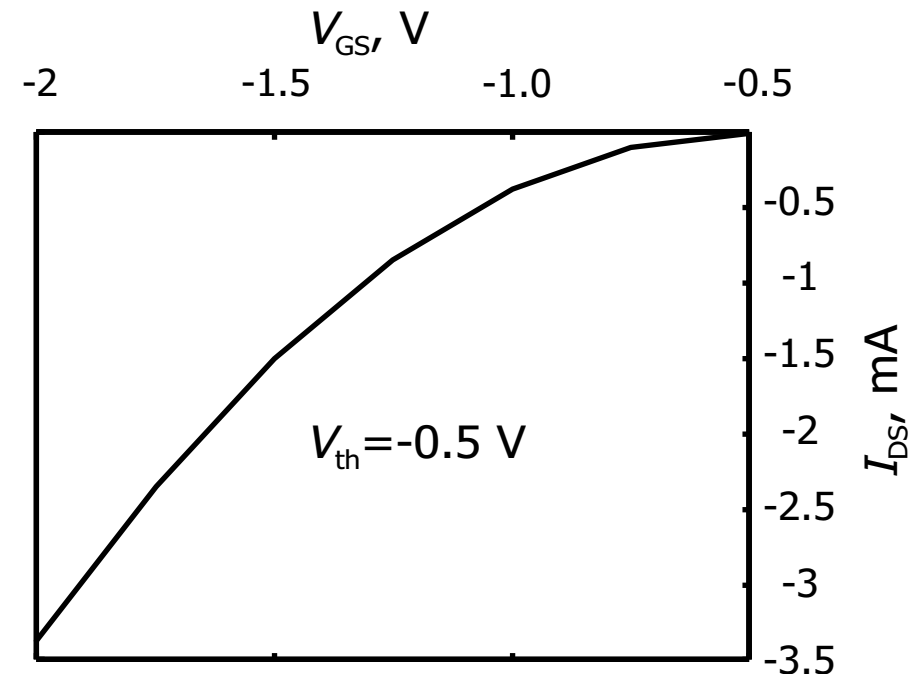
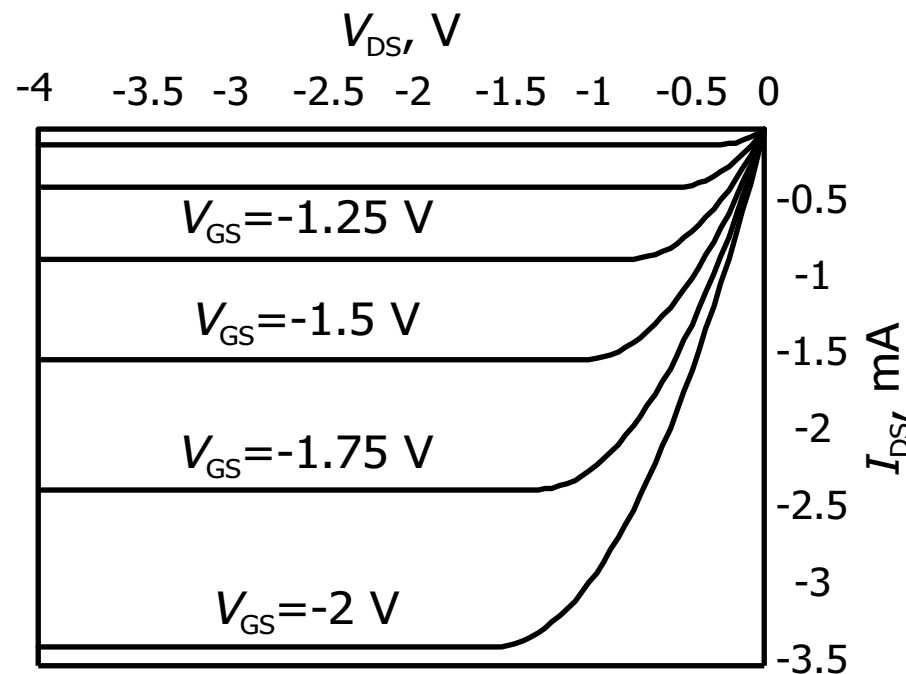
■ Scambiando i segni alle tensioni e alle correnti

- ◆ il canale si forma per $V_{GS} < V_{th}$
- ◆ V_{th} è negativa per il dispositivo normalmente *off* (*cfr. lucidi “Sistema MOS”*)
- ◆ I_{DS} entrante nel drain è negativa per $V_{DS} < 0$
- ◆ $V_{DSS} = V_{GS} - V_{th}$ è negativa

$$I_{DS} = \begin{cases} -\frac{W}{L}\mu_p C_{ox} \left[(V_{GS} - V_{th}) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right] & V_{DS} > V_{DSS} \\ -\frac{1}{2} \frac{W}{L} \mu_p C_{ox} (V_{GS} - V_{th})^2 & V_{DS} < V_{DSS} \end{cases}$$

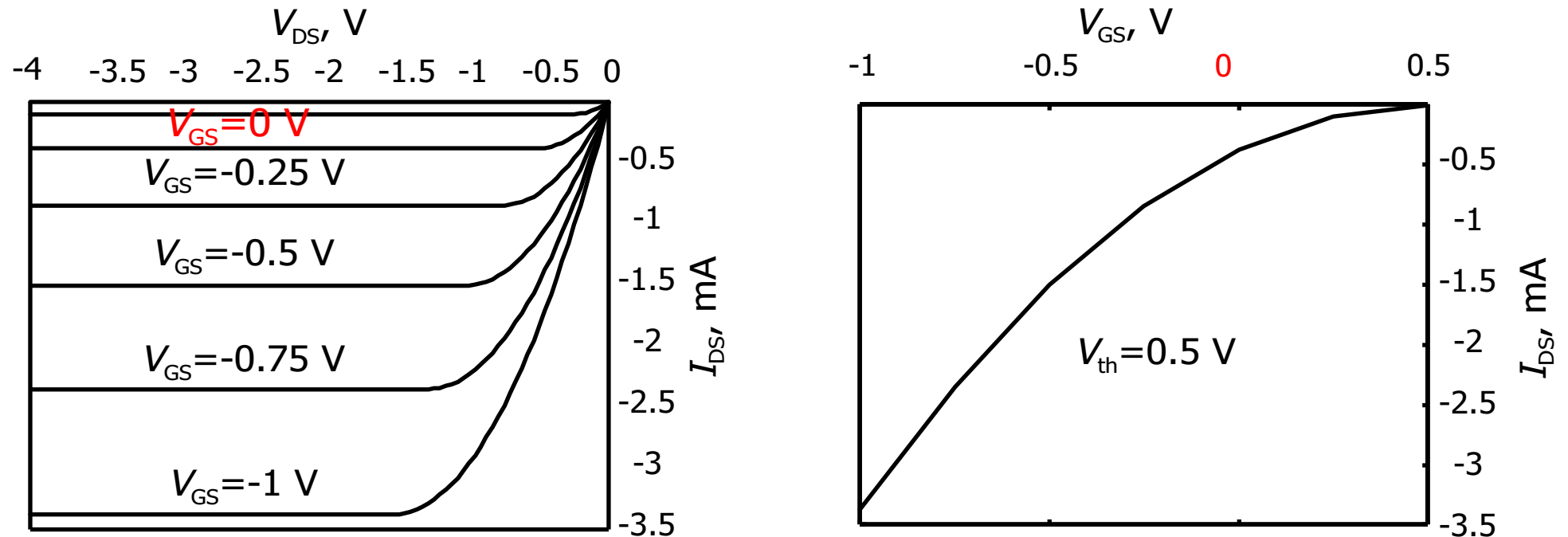
Caratteristiche p MOS

- $V_{DS} \approx 0$ **zona lineare:** I_{DS} è *proporzionale a* V_{DS}
- $V_{DS} > V_{DSS}$ **zona triodo:** I_{DS} *cresce meno che linearmente con* V_{DS}
- $V_{DS} < V_{DSS}$ **zona di saturazione:** I_{DS} *non dipende da* V_{DS} , *solo da* V_{GS}



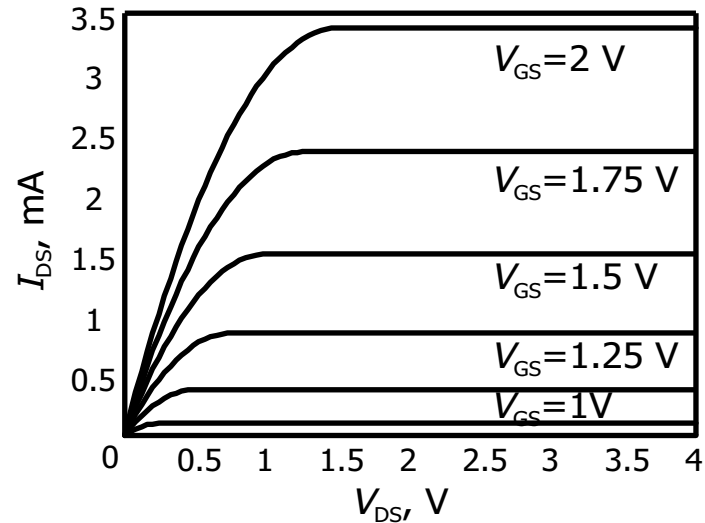
*p*MOS normalmente *on*

- Mediante una impiantazione ionica superficiale **la tensione di soglia del *p*MOS può diventare positiva**
- In questo caso **il canale è preformato** (*p*MOS a svuotamento o normalmente ON)
- Per $V_{GS} = 0$ il dispositivo è già in conduzione

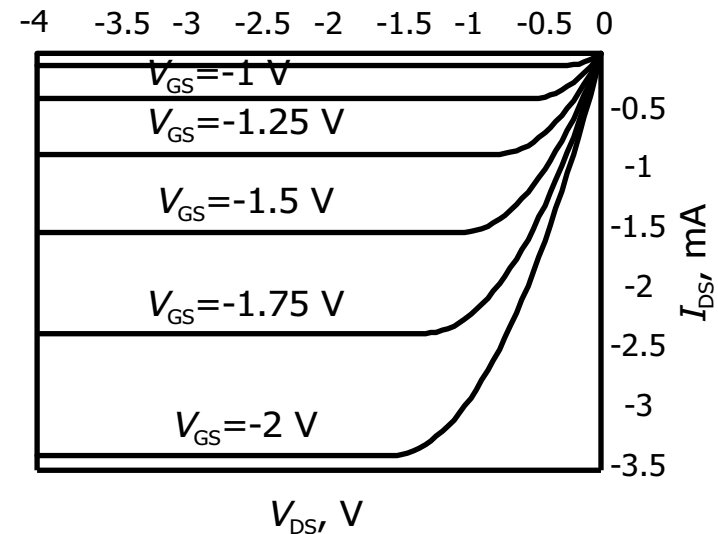


Sintesi transistori MOS

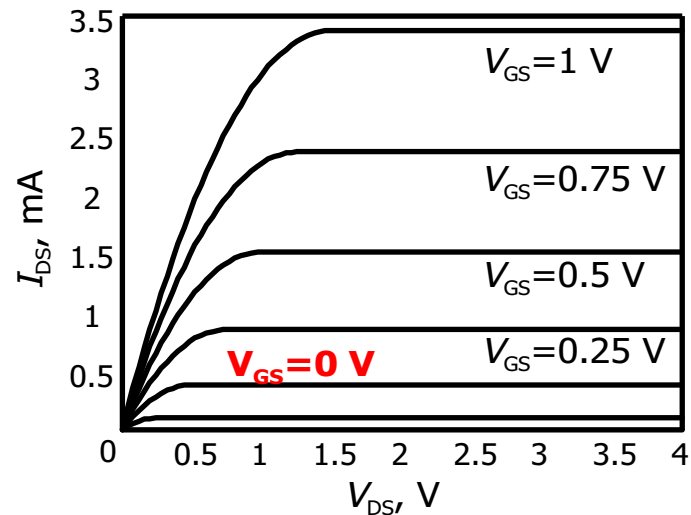
nMOS normalmente off $V_{th}=0.5\text{ V}$



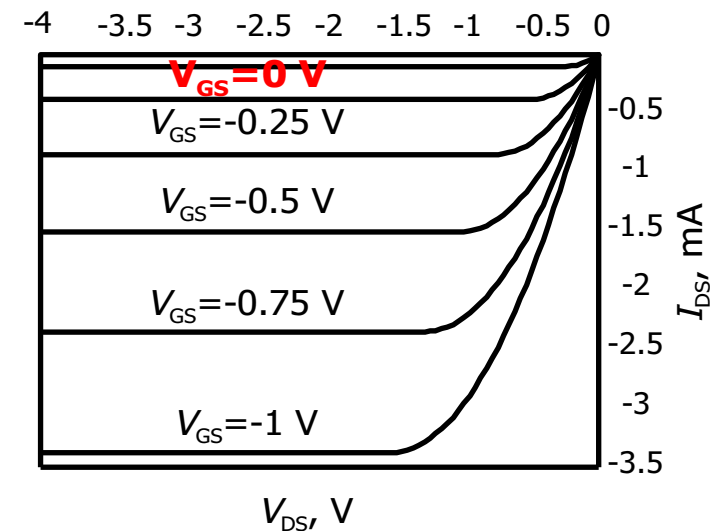
pMOS normalmente off $V_{th}=-0.5\text{ V}$



nMOS normalmente on $V_{th}=-0.5\text{ V}$



pMOS normalmente on $V_{th}=0.5\text{ V}$

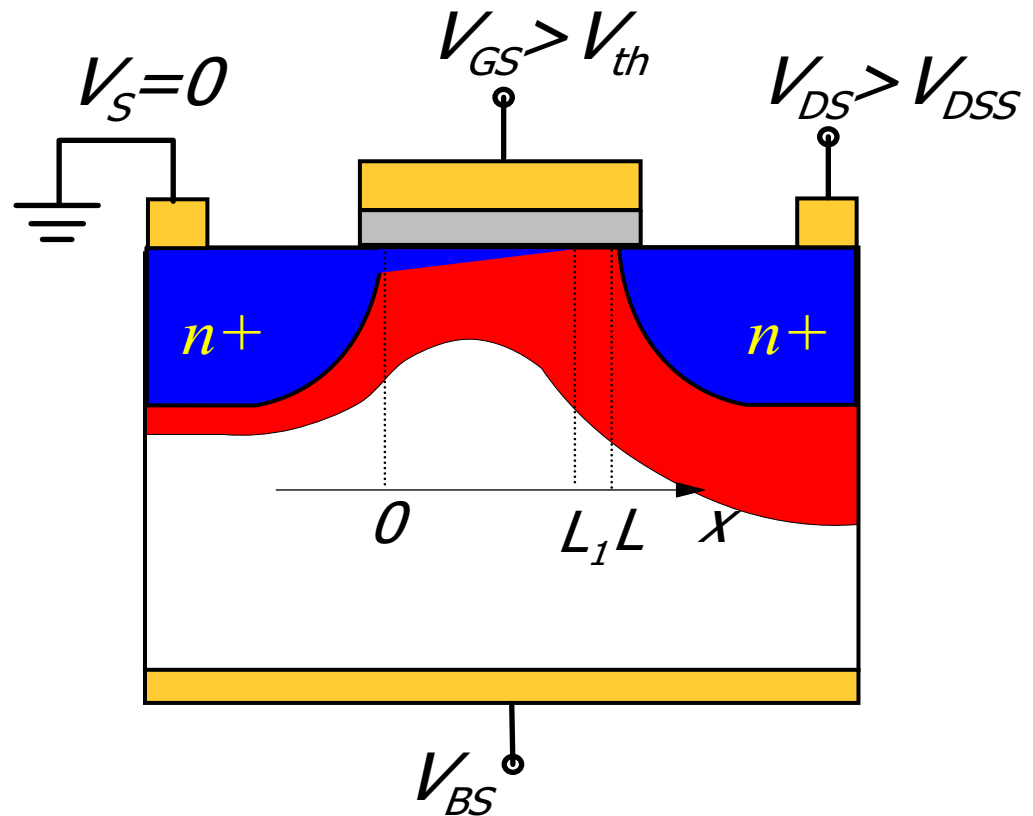


Effetti di non idealità

■ Per $V_{DS} > V_{DSS}$ il punto in cui il canale è strozzato **si sposta verso sinistra**

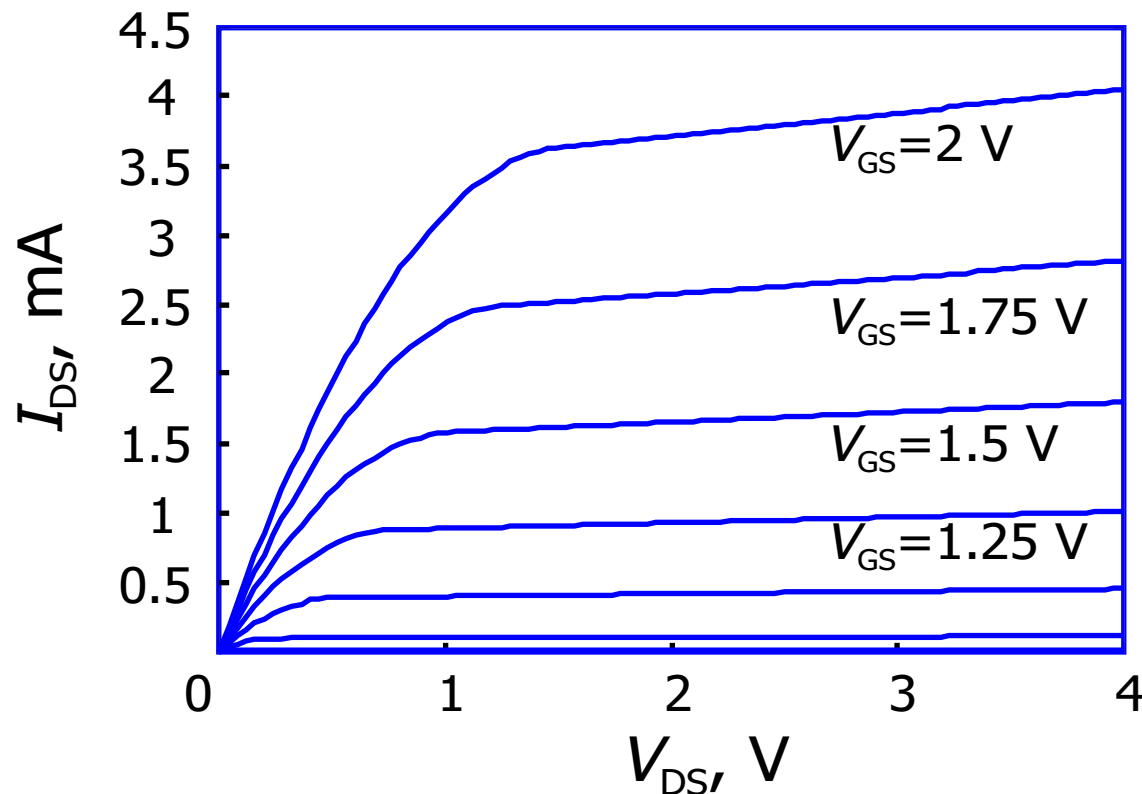
◆ La corrente cresce lentamente con V_{DS} per effetto dell'aumento della conduttanza del canale

◆ Gli elettroni sono trasportati **attraverso la zona svuotata** dal campo elettrico creato da $V_{DS} - V_{DSS}$.



Transistore n MOS reale

$$I_{DS} = \begin{cases} \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} \left[(V_{GS} - V_{th}) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right] & V_{DS} < V_{DSS} \\ \frac{1}{2} \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} (V_{GS} - V_{th})^2 [1 + \lambda (V_{DS} - V_{DSS})] & V_{DS} > V_{DSS} \end{cases}$$

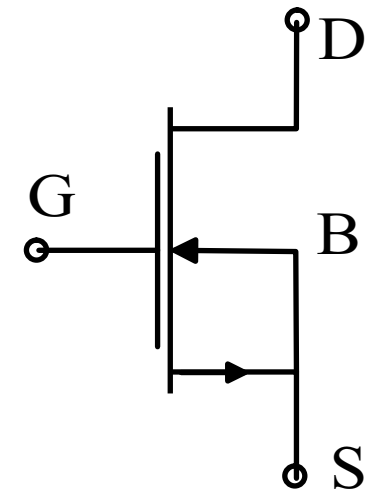


Breakdown

- *Per $V_{DS} \gg 0$ la corrente I_{DS} cresce bruscamente per fenomeni di **breakdown***
 - ◆ Breakdown della giunzione drain-bulk (source-bulk)
 - ◆ Moltiplicazione a valanga per effetto di elettroni ad alta energia nella parte strozzata del canale (campi elettrici elevati)
 - ◆ breakdown dell'ossido ($\mathcal{E}_{ox} > 0.07 \text{ V/\AA}$)
- *I primi due fenomeni sono reversibili se non si crea un danneggiamento del reticolo di Si, mentre il terzo è distruttivo per l'ossido.*

Tensione di substrato

- *In un n MOS deve essere $V_{BS} \leq 0$ per evitare di polarizzare direttamente la giunzione source-bulk.*
- *Per $V_{BS} < 0$ e $|V_{BS}|$ crescente la tensione di soglia cresce*
- *è più difficile pilotare il n MOS in conduzione*
 - **In molte applicazioni il source e il bulk sono collegati tra di loro e il transistor si può studiare come un dispositivo a tre terminali**



Misura della tensione di soglia

- La tensione V_{th} **si misura con il MOS in saturazione**: $V_{DS} = V_{GS} \Rightarrow V_{DS} > V_{GS} - V_{th}$
- $\sqrt{I_{DS}}$ **varia linearmente con $V_{GS} - V_{th}$**

