

Dispositivi elettronici

*Metal-Oxide-Semiconductor
Field Effect Transistor
(MOSFET)*

Sommario

- **Come è fatto un MOSFET a canale n**
- **Principi di funzionamento**
- **Canale di inversione**
- **Calcolo di I_D vs V_{DS}**
- **Curve I_D vs V_{DS} e I_D vs V_{GS}**
- **Modulazione di lunghezza di canale**
- **Simboli circuitali**
- **Circuiti equivalenti in DC**
- **Estensione ai MOSFET a canale p**

INTRODUZIONE

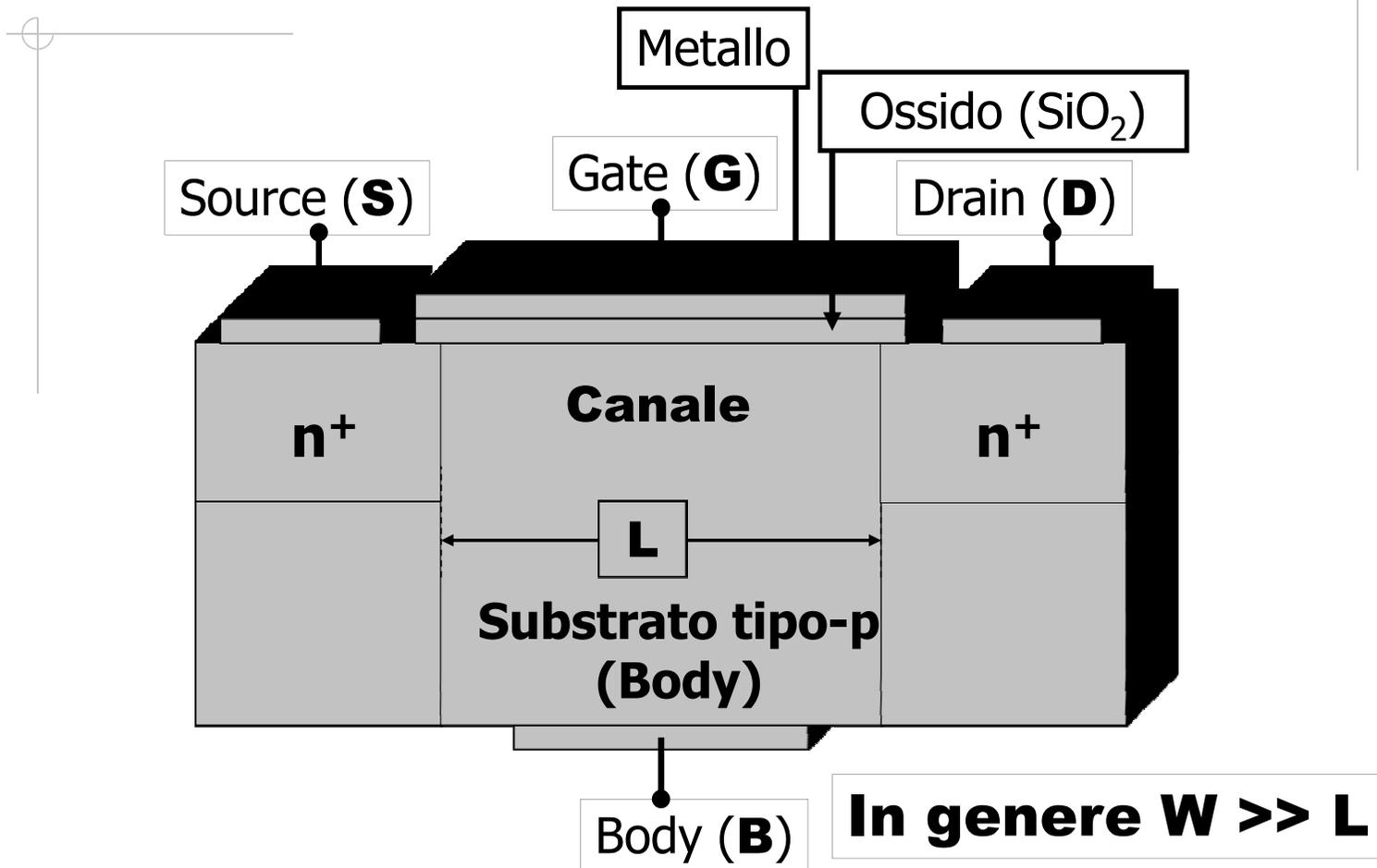
In questa parte iniziale studieremo il MOSFET a canale n ad arricchimento (o Enhancement n-channel MOSFET)

Successivamente si estenderà l'analisi agli altri dispositivi:

**D-nMOSFET (canale n a svuotamento)
E-pMOSFET (canale p ad arricchimento)
D-pMOSFET (canale p a svuotamento)**

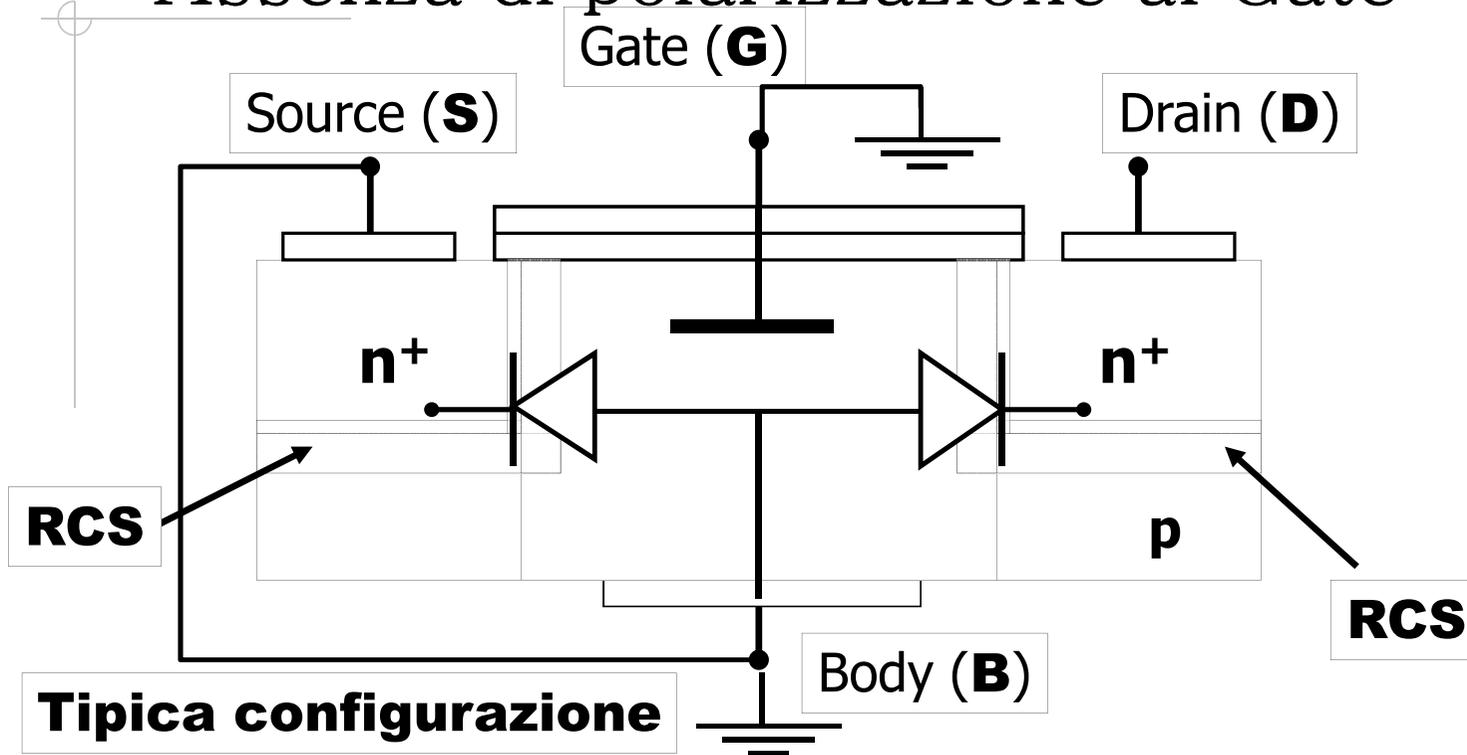
(saranno chiariti in seguito il significato di questi termini).

E-nMOSFET



E-nMOSFET

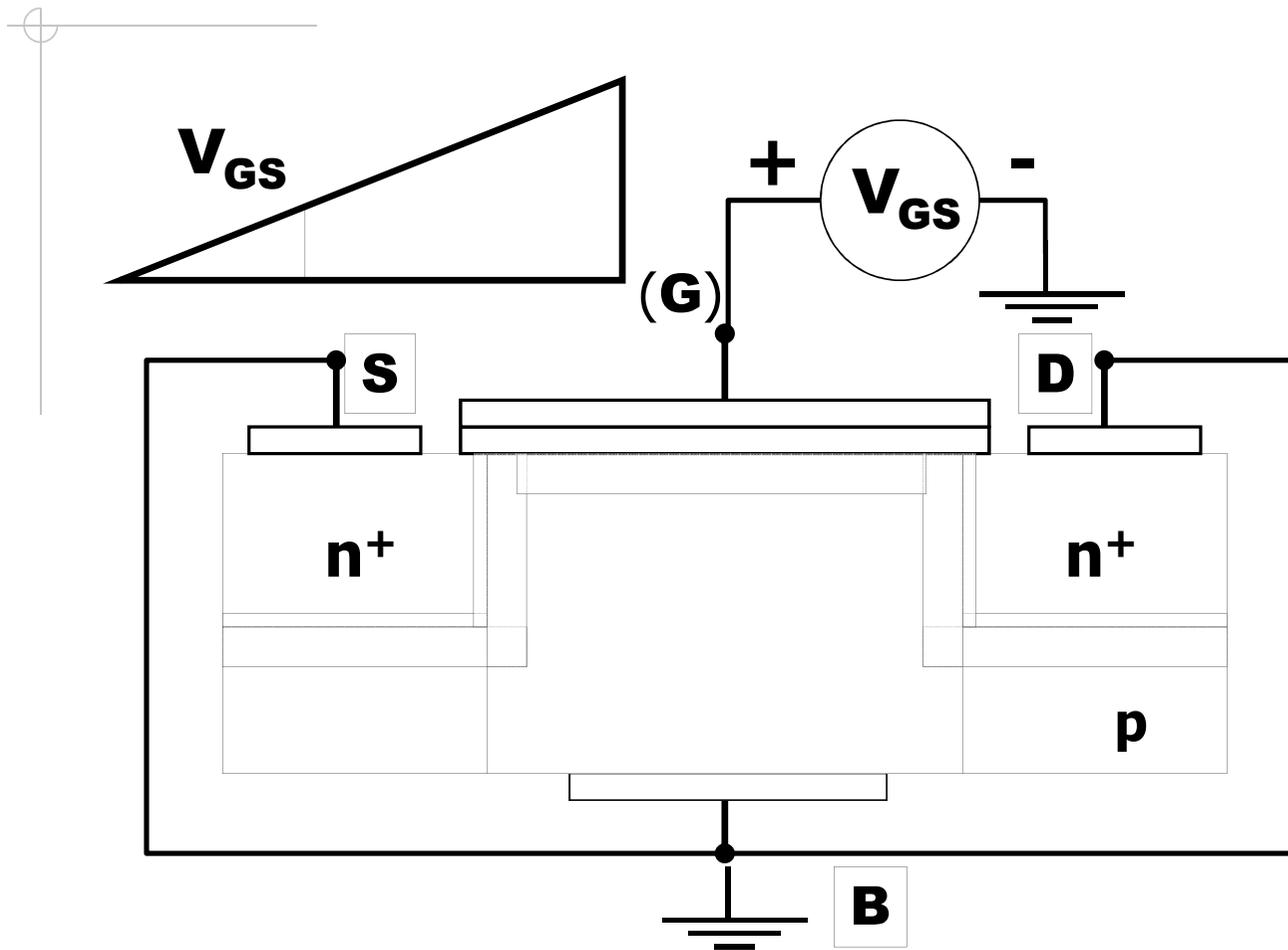
Assenza di polarizzazione al Gate



Per ogni valore di $V_{DS} \geq 0$, non c'è corrente

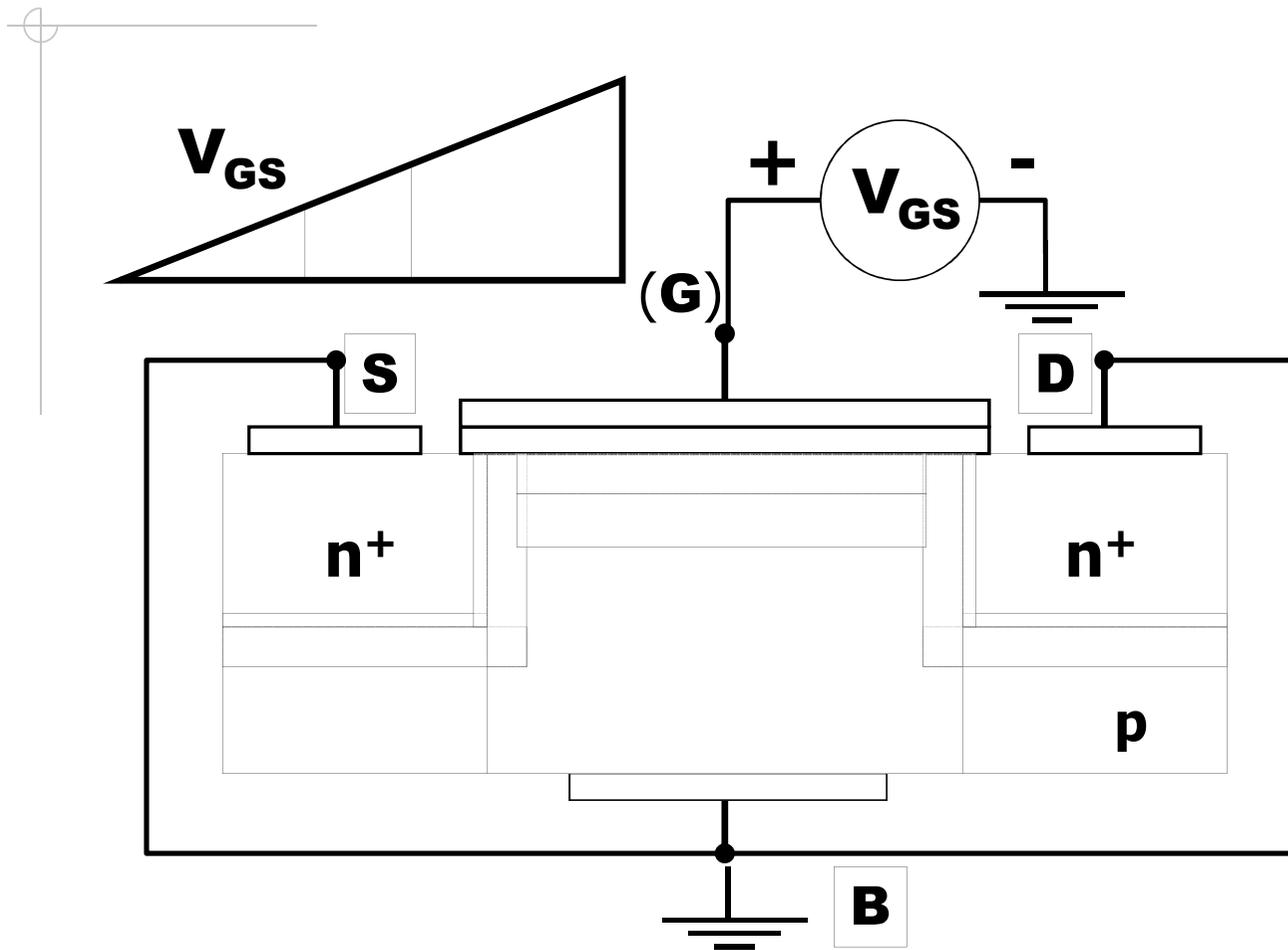
E-nMOSFET

Tensione al Gate



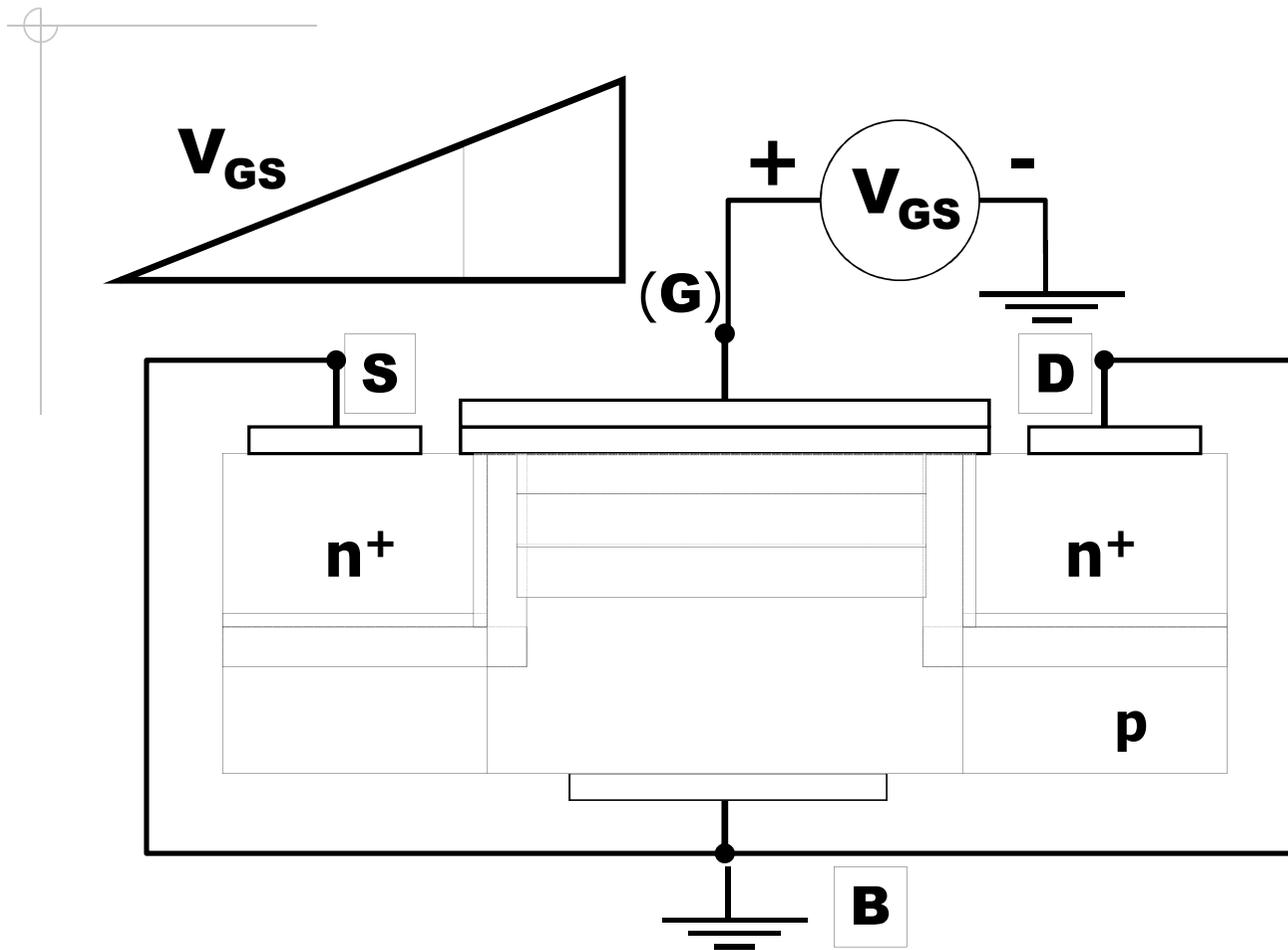
E-nMOSFET

Tensione al Gate



E-nMOSFET

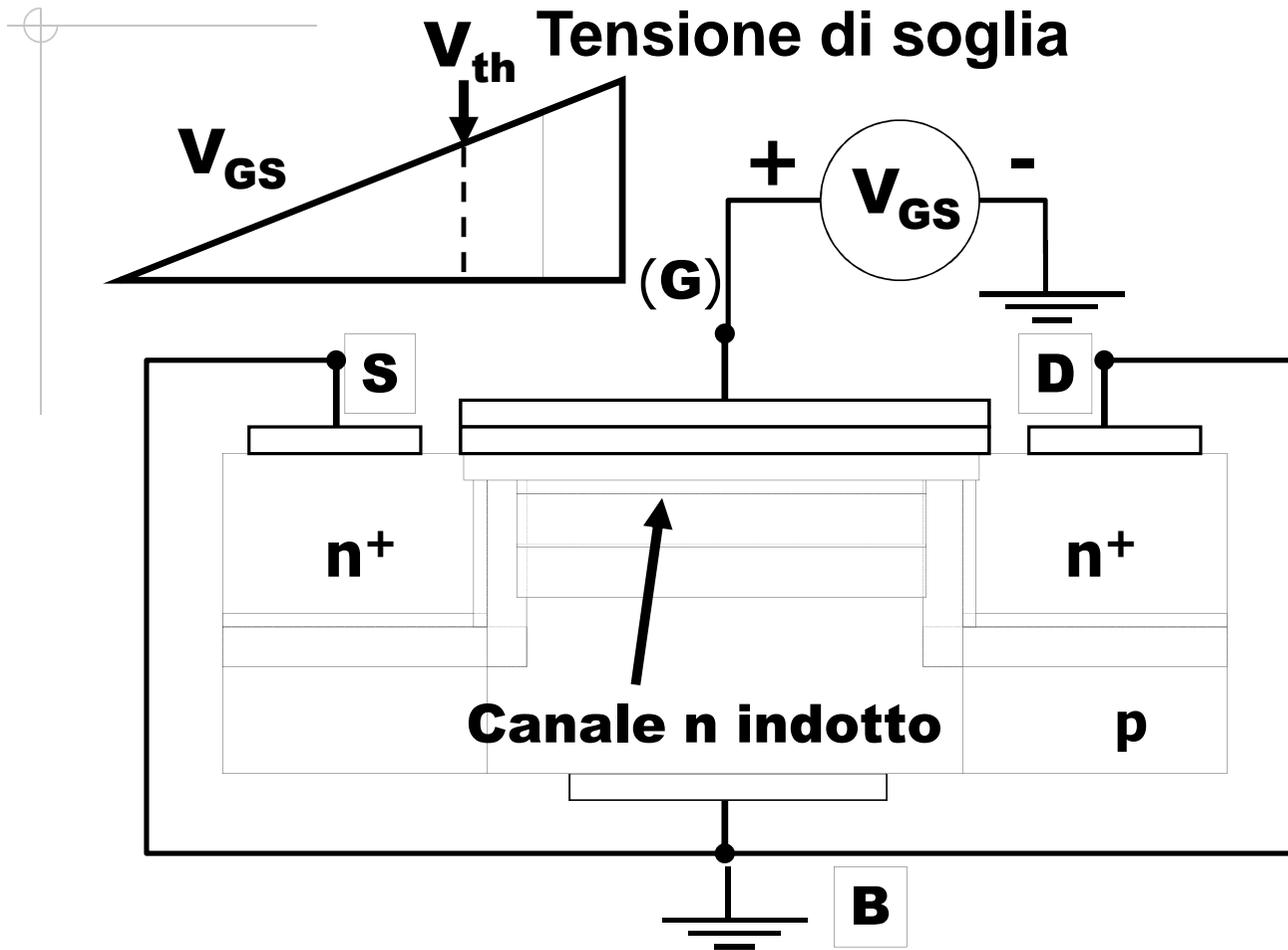
Tensione al Gate



E-nMOSFET

Tensione al Gate

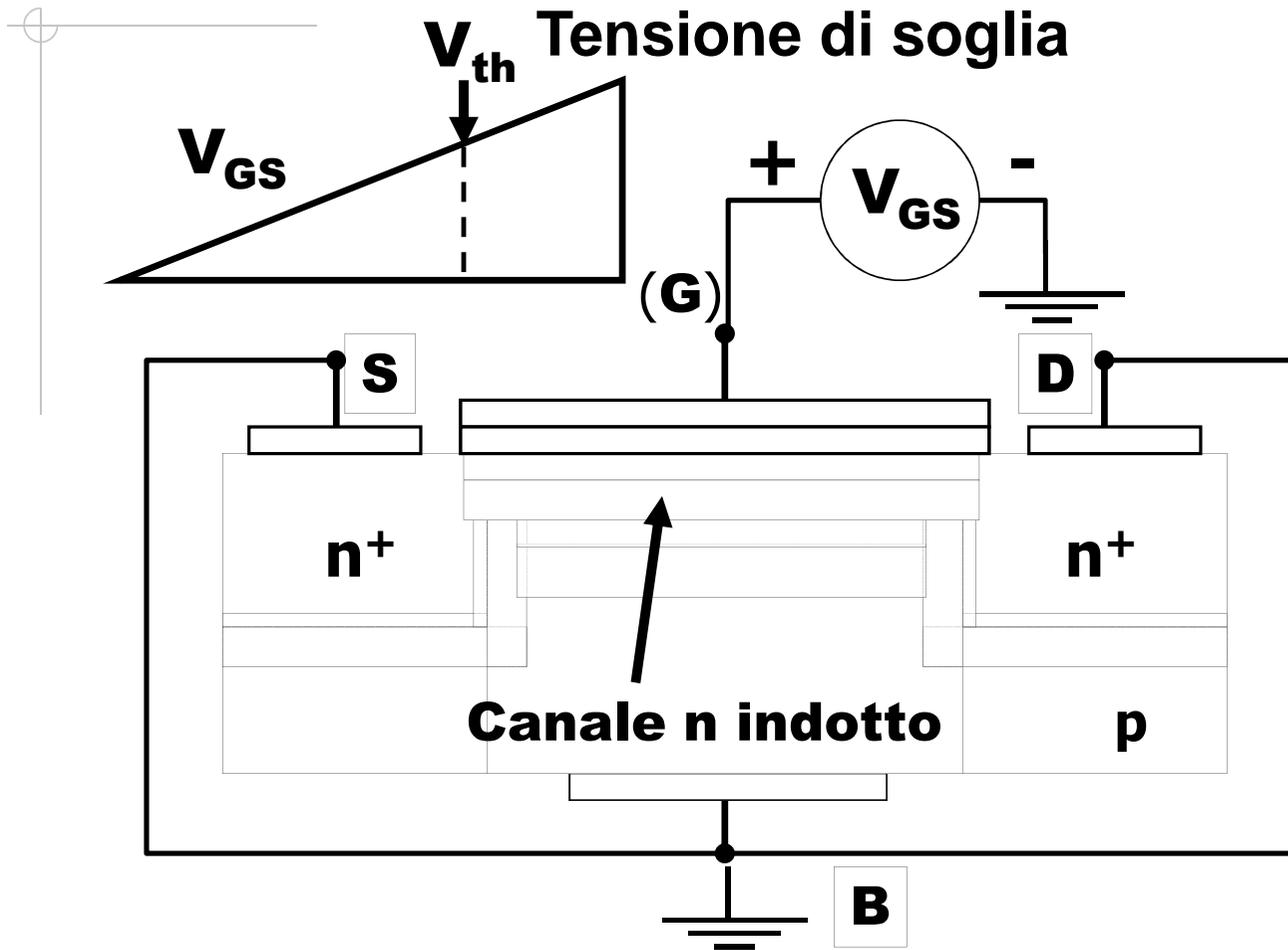
V_{th} Tensione di soglia



E-nMOSFET

Tensione al Gate

V_{th} Tensione di soglia



E-nMOSFET

Tensione al Gate

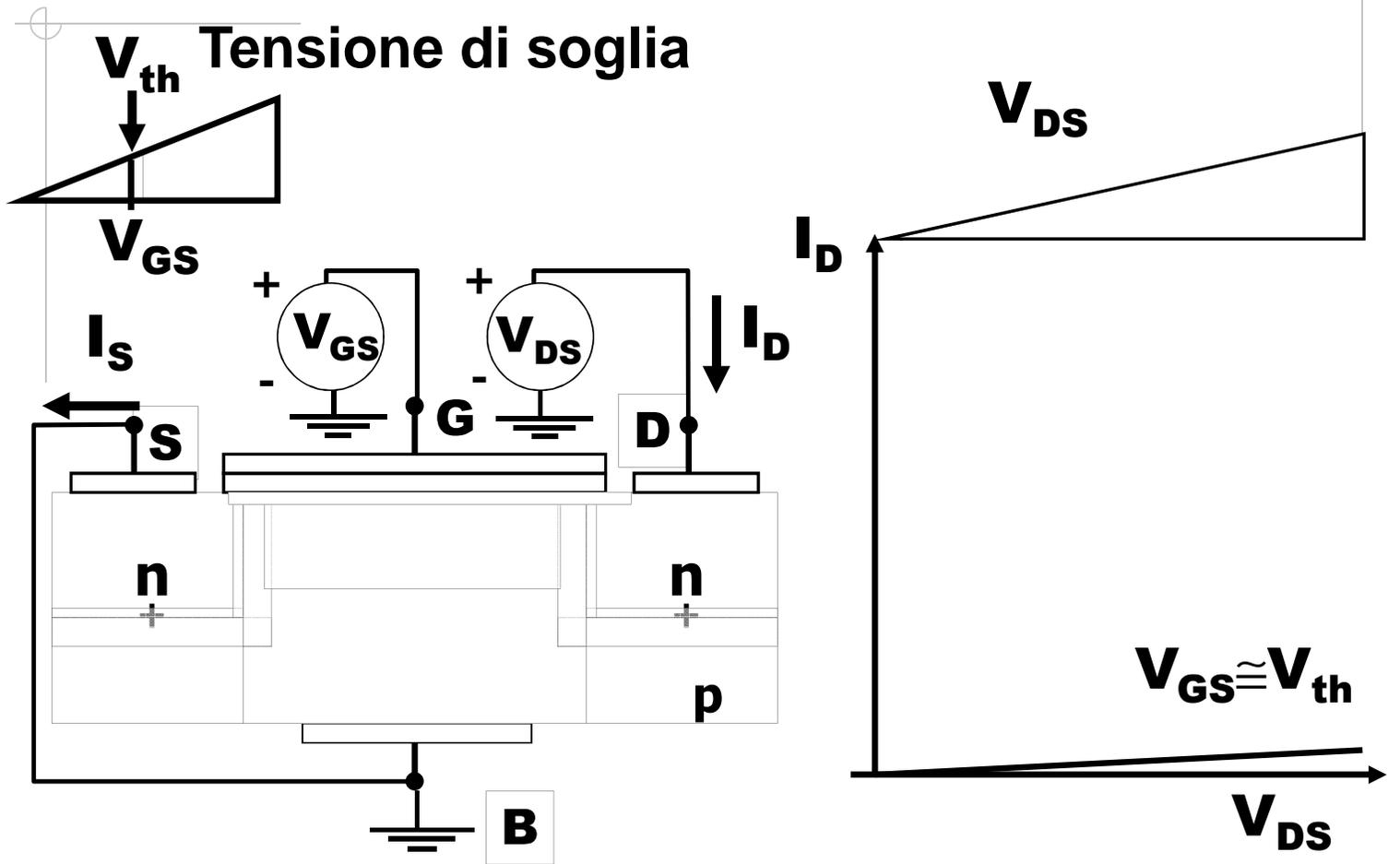
Applicando una tensione positiva al GATE, inizialmente si “respingono” le lacune del semiconduttore “p” e si ha un allargamento della RCS sotto il gate;

Oltre una certa tensione di gate, detta **tensione di soglia**, V_{th} , Il campo elettrico presente sotto il gate riesce a richiamare elettroni “liberi” che tenderanno ad accumularsi sotto il gate, con la formazione di un *canale conduttivo* (**canale n indotto**) che collega il drain con il source.

Aumentando ulteriormente la tensione di gate, V_G , si aumenta la popolazione di elettroni liberi nel **canale n indotto**.

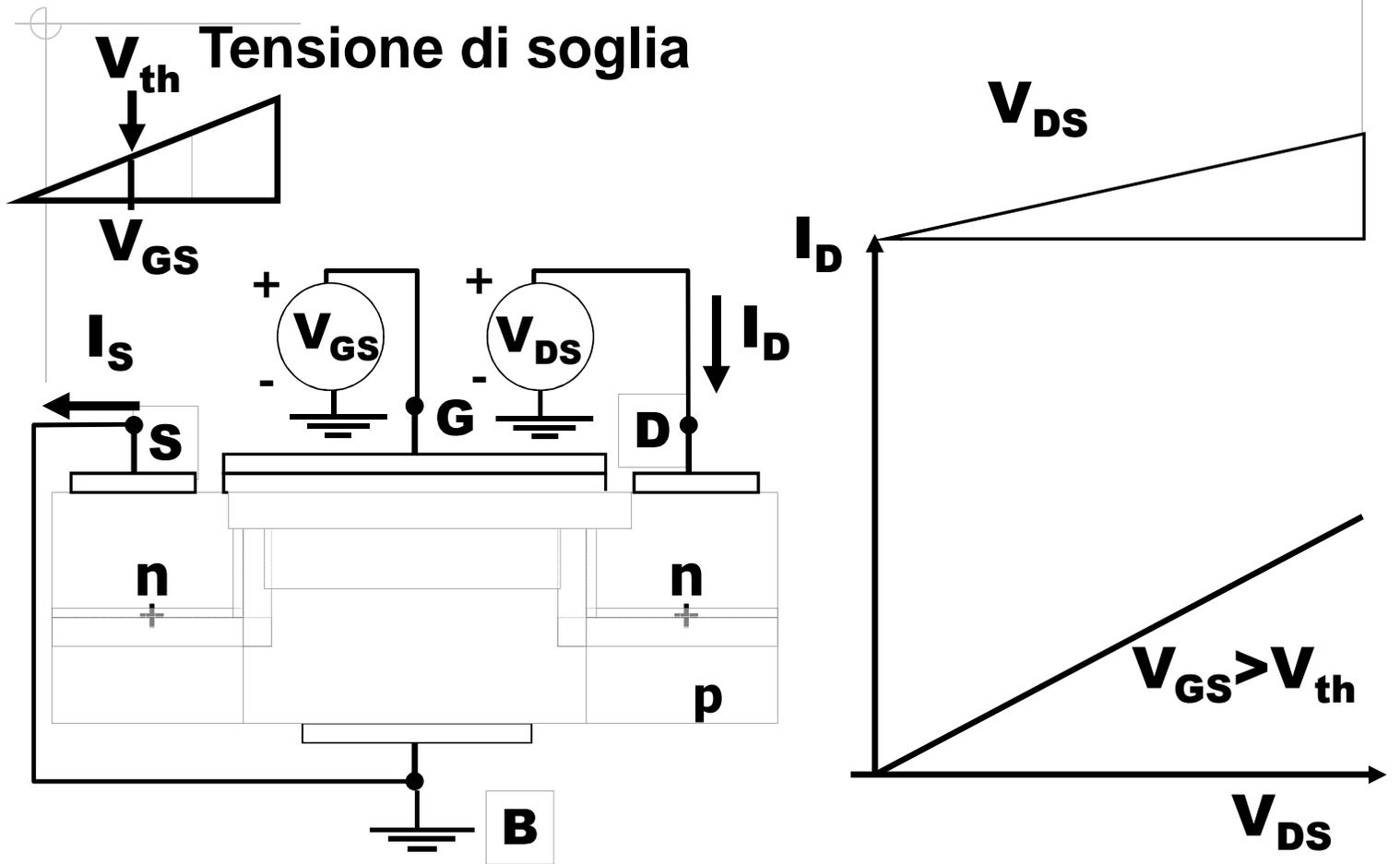
E-nMOSFET

Tensione al Drain (piccola) con $V_{GS} > V_{th}$



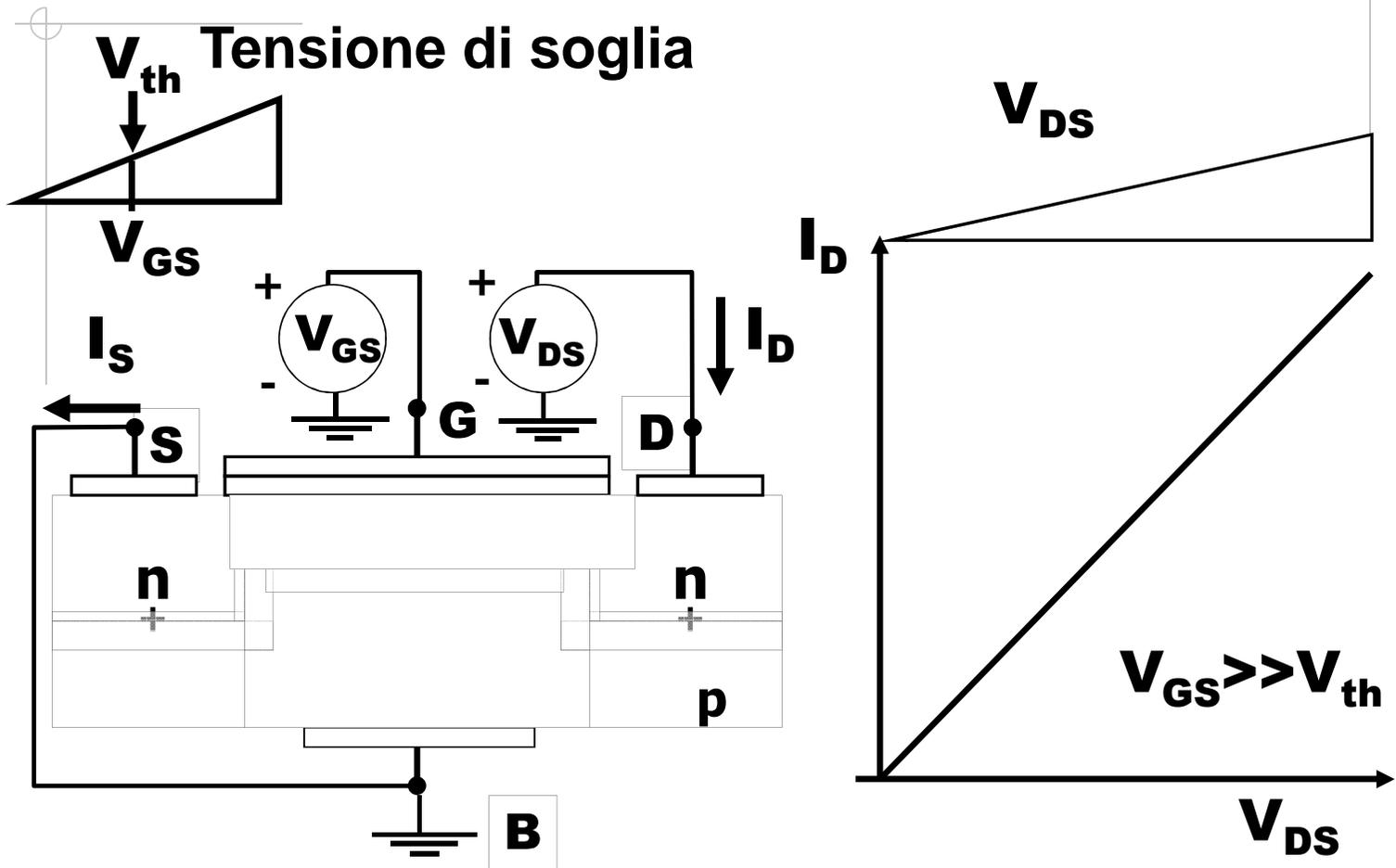
E-nMOSFET

Tensione al Drain (piccola) con $V_{GS} > V_{th}$



E-nMOSFET

Tensione al Drain (piccola) con $V_{GS} > V_{th}$



E-nMOSFET

Tensione al Drain (piccola) con $V_{GS} > V_{th}$

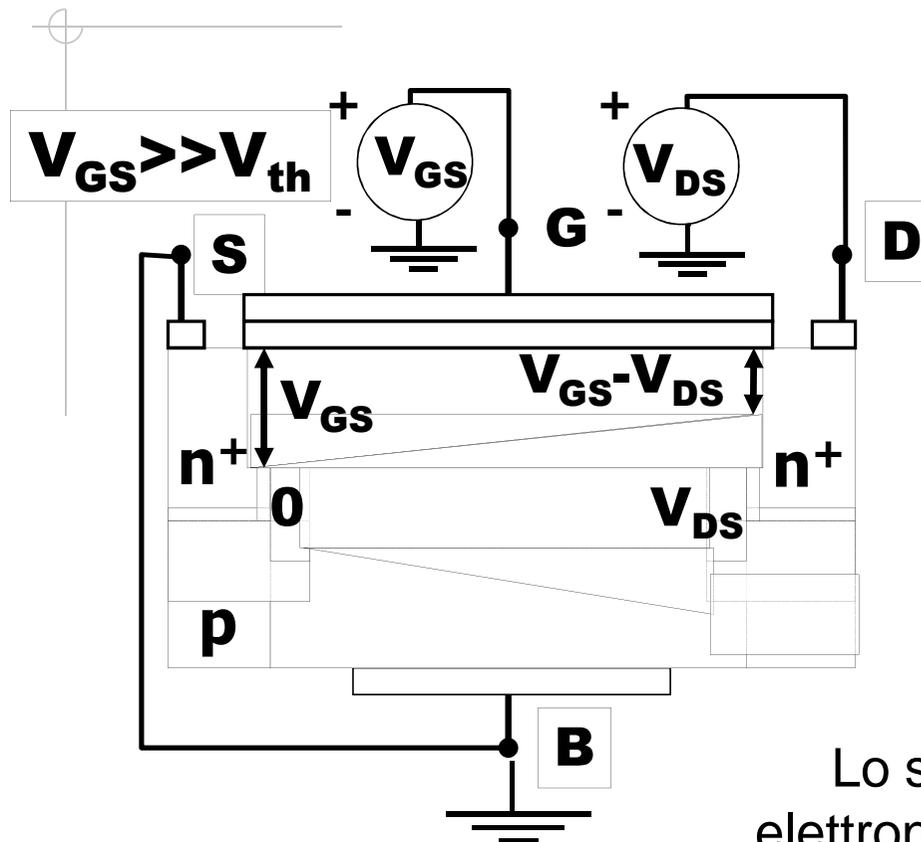
Applicando una tensione positiva (piccola) al drain, con al gate una tensione positiva maggiore della **tensione di soglia**, V_{th} , si ha flusso di elettroni (spinti dal campo elettrico) che danno luogo ad una corrente di drain I_D .

La corrente di drain I_D dipende dalla resistività del canale (ossia dal numero di elettroni liberi nel canale)

Aumentando la tensione di gate, V_G , si aumenta la popolazione di elettroni liberi nel **canale n indotto** (con conseguente riduzione della resistività di canale) e di conseguenza si aumenta la corrente di drain.

E-nMOSFET

Tensione al Drain elevata



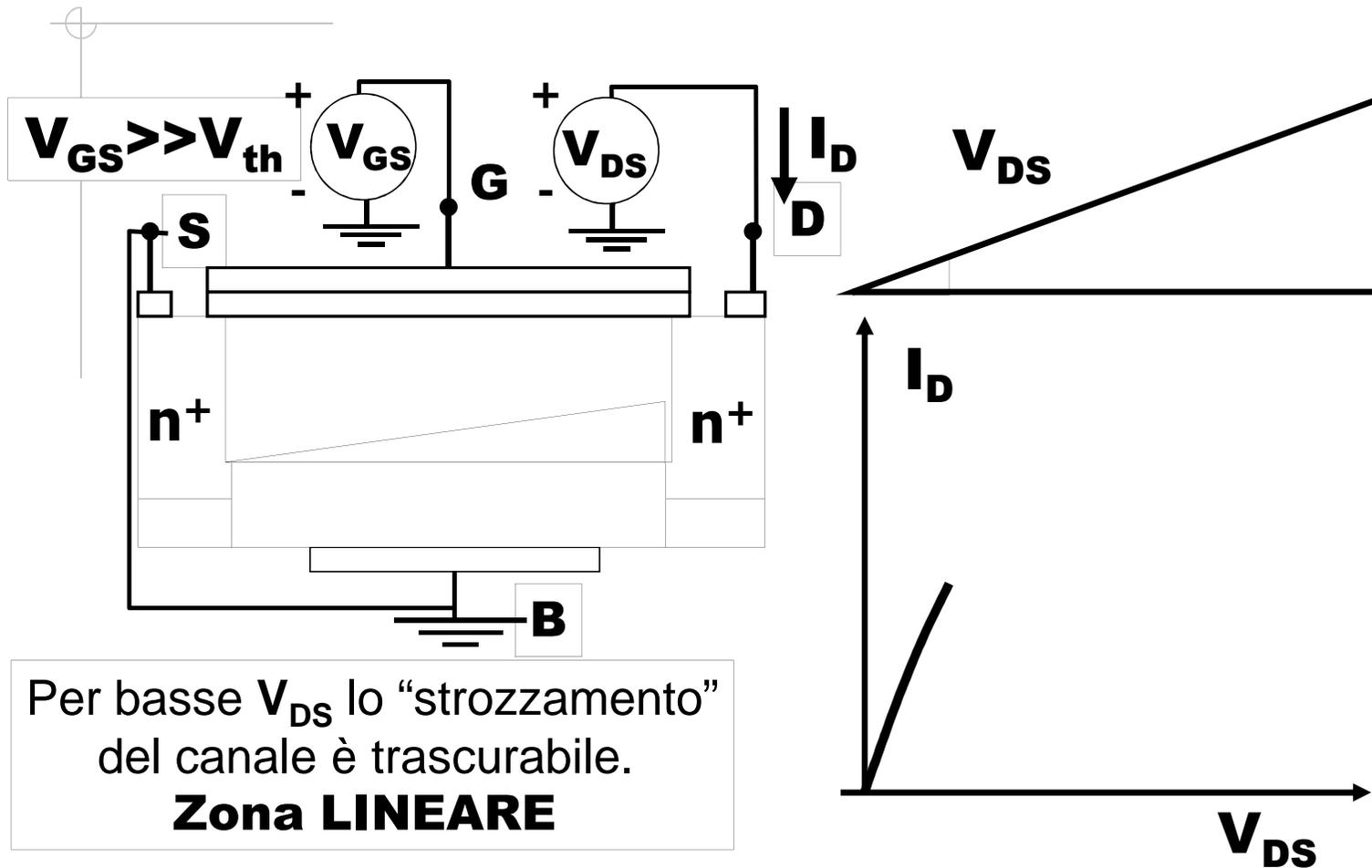
Dal Punto di vista Statico:

Applicando tensione al Drain, si induce una caduta di **tensione lineare nel canale**.
Ciò comporta una riduzione della tensione tra il gate e il substrato lungo il canale.

Lo spessore del canale elettronico tenderà a ridursi in prossimità del drain.

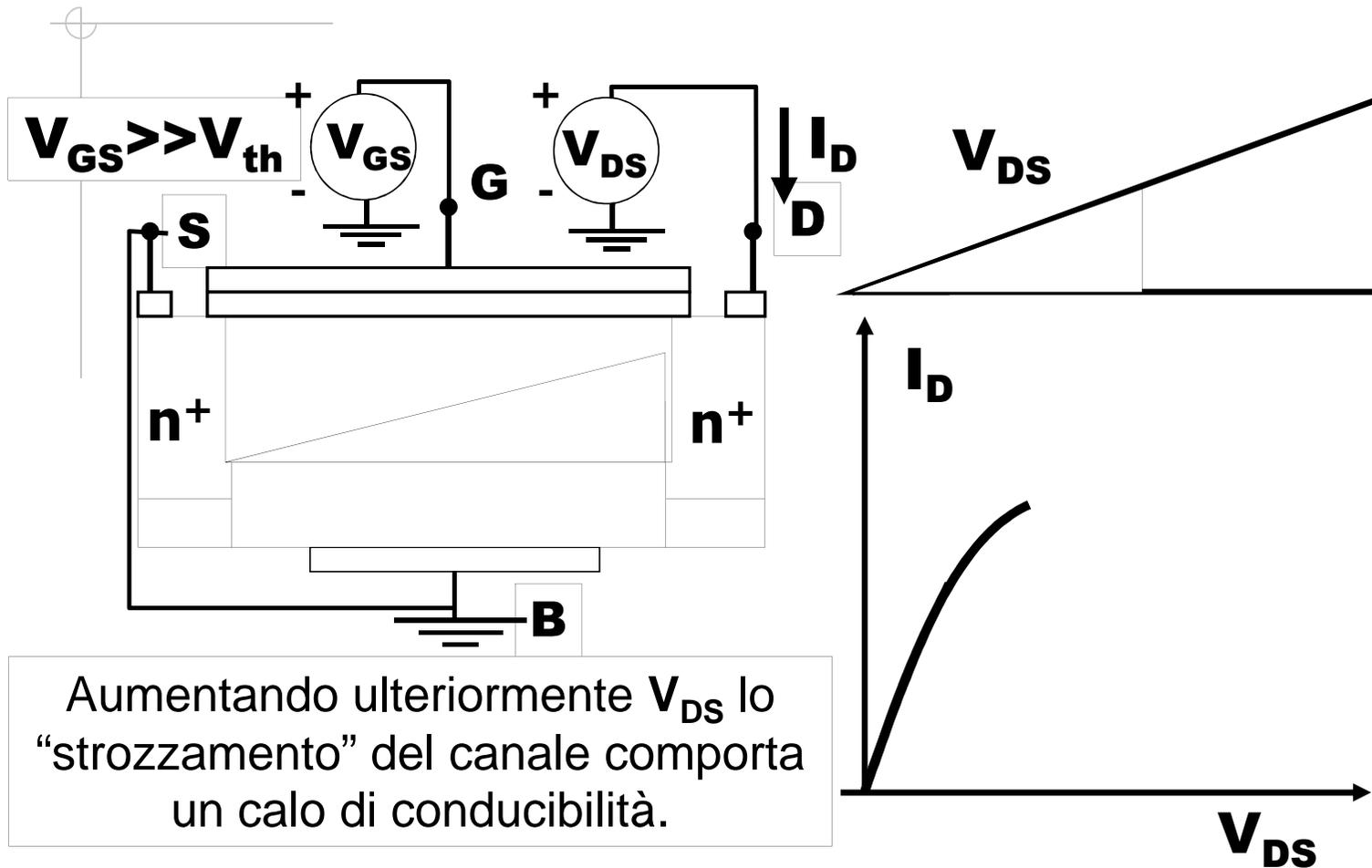
E-nMOSFET

Tensione al Drain elevata



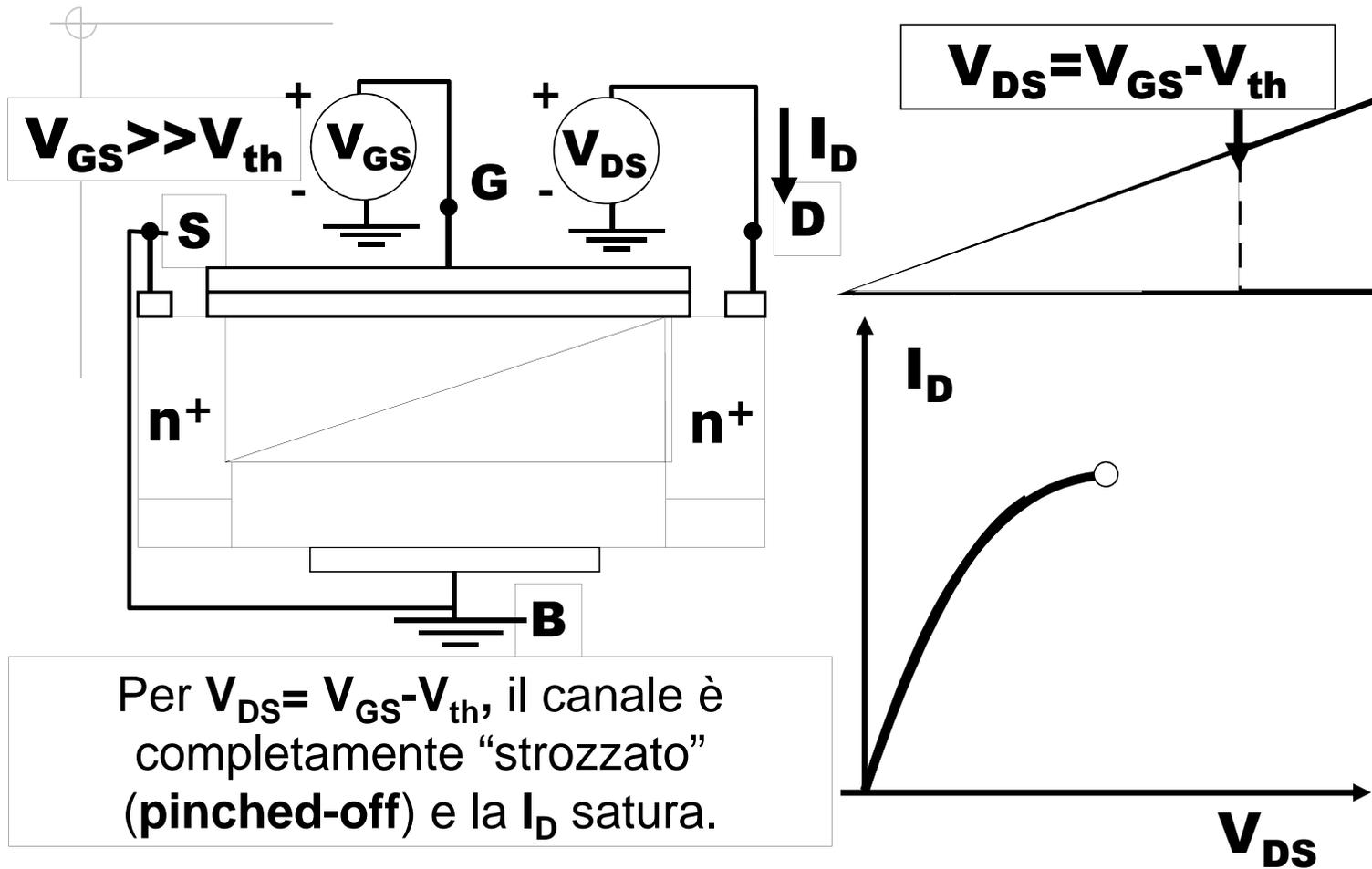
E-nMOSFET

Tensione al Drain elevata



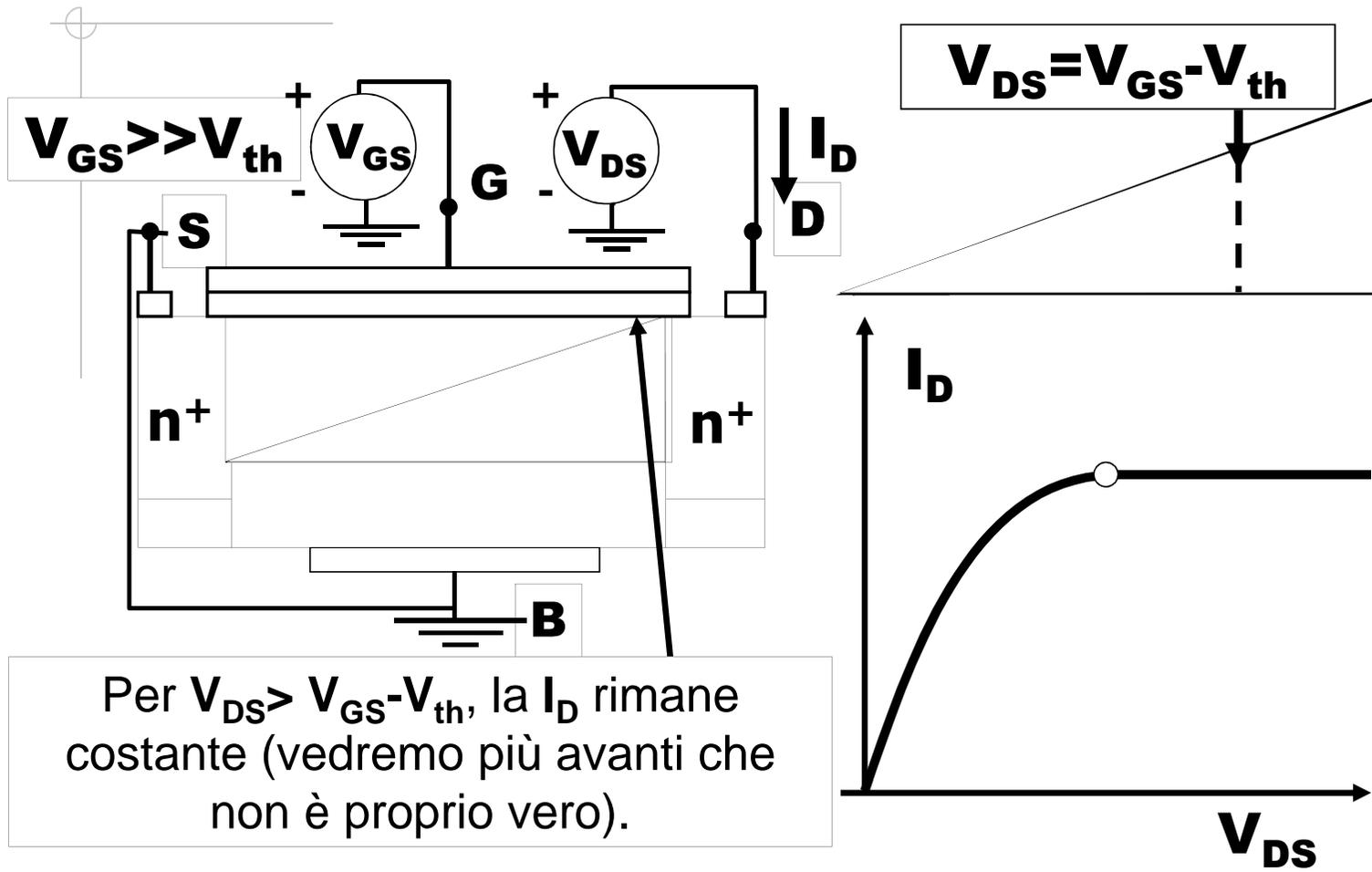
E-nMOSFET

Tensione al Drain elevata



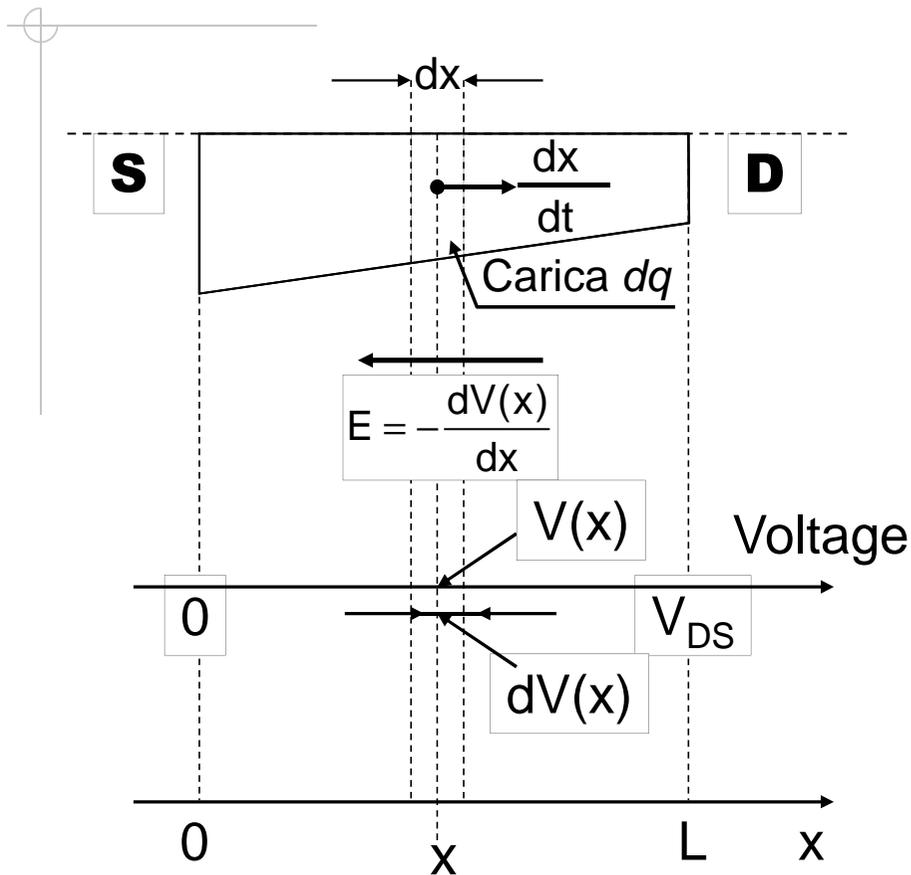
E-nMOSFET

Tensione al Drain elevata



E-nMOSFET

Calcolo delle caratteristiche $I_D - V_{DS}$



Condizioni:

$$V_{GS} > V_{th}$$

$$V_{DS} < V_{GS} - V_{th}$$

(zona lineare)

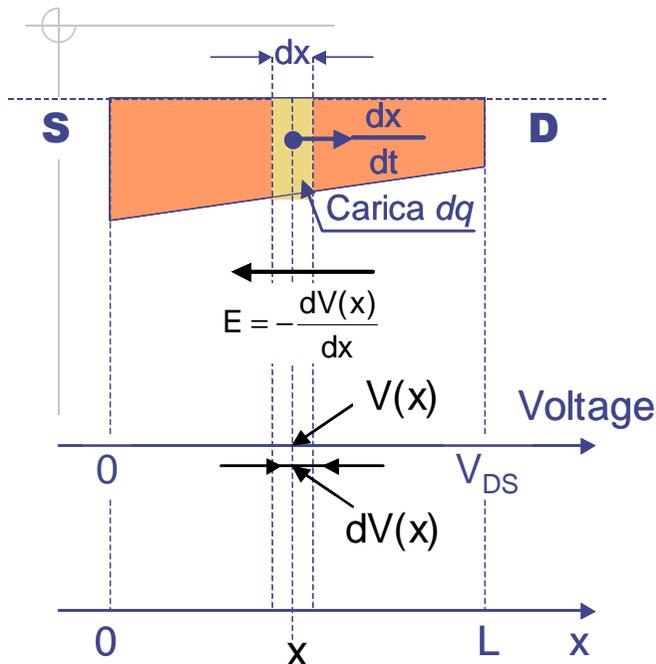
Alla posizione x la tensione tra gate e canale vale:

$$V_{GS} - V(x)$$

con $V(x) \in [0 \div V_{DS}]$

E-nMOSFET

Calcolo delle caratteristiche $I_D - V_{DS}$



La carica elettronica in dx vale:
 $dq(x) = -C_{ox} W dx (V_{GS} - V(x) - V_{th})$

con $C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}$

Il campo elettrico E lungo il canale vale:

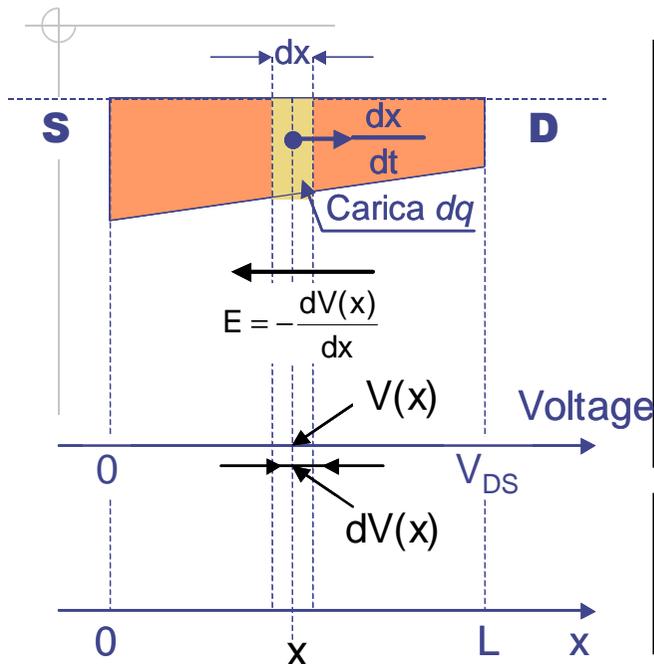
$$E = -\frac{dV(x)}{dx}$$

Il campo elettrico induce una velocità di deriva pari a:

$$\frac{dx}{dt} = -\mu_n E(x) = \mu_n \frac{dV(x)}{dx}$$

E-nMOSFET

Calcolo delle caratteristiche $I_D - V_{DS}$



La corrente di deriva risultante può essere calcolata moltiplicando la carica per unità di lunghezza $(\frac{dq(x)}{dx})$ per la velocità di deriva:

$$I = -\mu_n C_{ox} W (V_{GS} - V(x) - V_{th}) \frac{dV(x)}{dx}$$

Essendo la corrente costante lungo il canale: $I = -I_D$

si può quindi scrivere:

$$I_D dx = \mu_n C_{ox} W (V_{GS} - V(x) - V_{th}) dV(x)$$

E-nMOSFET

Calcolo delle caratteristiche $I_D - V_{DS}$

Integrando lungo il canale:

$$\int_0^L I_D dx = \int_0^{V_{DS}} \mu_n C_{ox} W (V_{GS} - V(x) - V_{th}) dV(x)$$

Si ottiene la relazione valida in **zona lineare**:

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

In **saturation**, ponendo $V_{DS} = V_{GS} - V_t$ si ottiene:

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_{th})^2$$

E-nMOSFET

Calcolo delle caratteristiche $I_D - V_{DS}$

NOTA: in saturazione la corrente non dipende da V_{DS} , SOLO perché lo abbiamo imposto noi!!
Infatti abbiamo supposto che per $V_{DS} > V_{GS} - V_{th}$ la configurazione del canale non cambi e che quindi la corrente, per tali valori di tensione, sia pari a alla corrente calcolata per $V_{DS} = V_{GS} - V_{th}$

La quantità $\mu_n C_{OX}$ è una costante determinata dal processo tecnologico ed è nota come:
transconduttanza di processo:

$$k'_n = \mu_n C_{OX}$$

D-nMOSFET

MOSFET a canale n a svuotamento

Nel E-nMOSFET, con tensione nulla al gate non c'è il canale formato. Bisogna dare tensione positiva al gate, oltre la tensione di soglia (V_{th} positiva), per “arricchire” il canale di elettroni.

Nel D-nMOSFET (canale n a Svuotamento o Depletion), con tensione nulla al gate il canale è già formato. Bisogna dare tensione negativa al gate, inferiore alla tensione di soglia (V_{th} negativa), per svuotare il canale e spegnere il dispositivo.

Per il D-nMOSFET, valgono tutte le relazioni dell' E-nMOSFET con la sola differenza $V_{th} < 0$.

E e D -nMOSFET

In sintesi:

$$V_{GS} < V_{th}$$

Dispositivo **spento**

$$I_D = 0$$

$V_{GS} > V_{th}$ e $V_{DS} < V_{GS} - V_{th}$ Dispositivo acceso
(o $V_{GD} > V_{th}$) in **zona lineare**

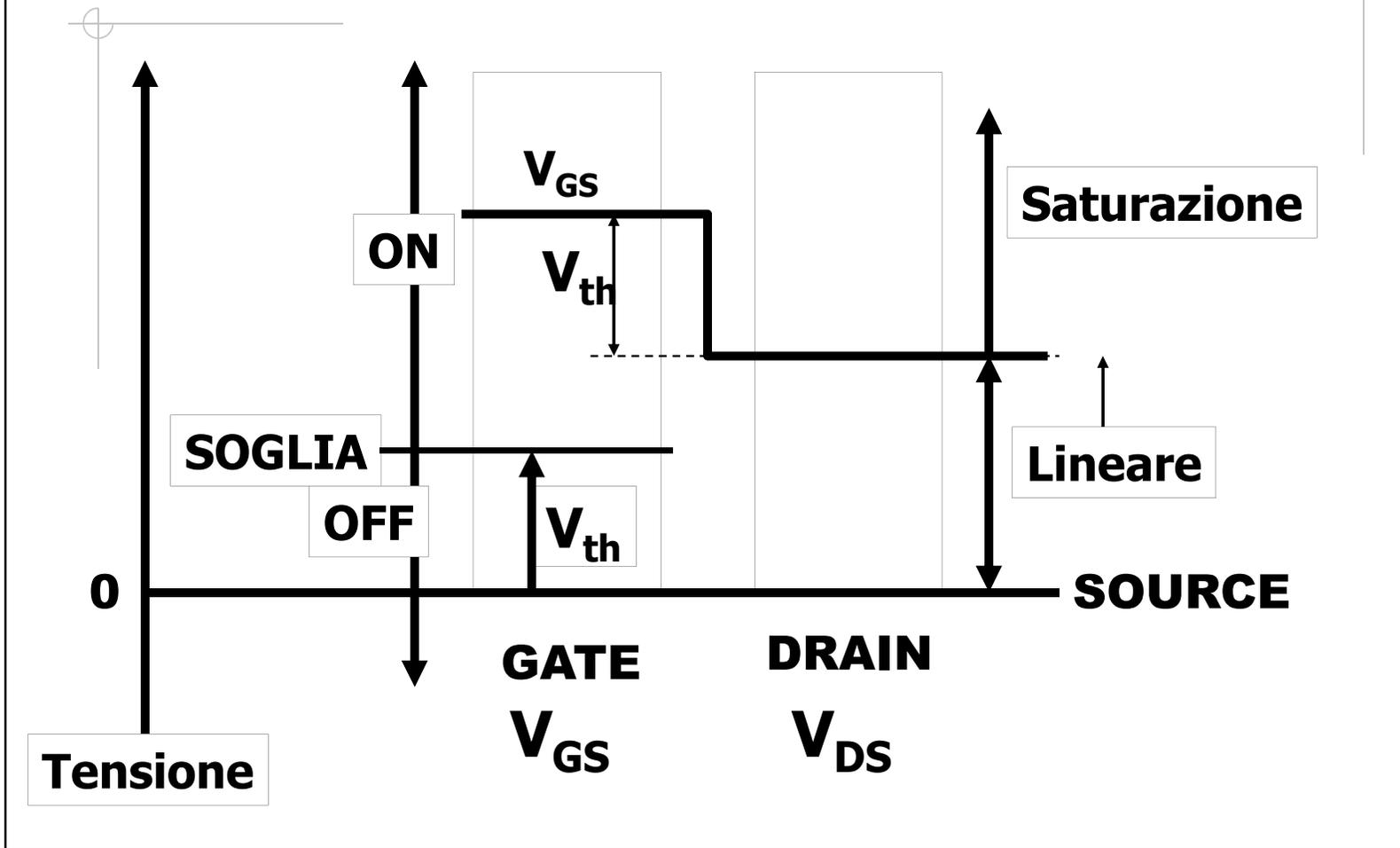
$$I_D = k'_n \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_{th}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

$V_{GS} > V_{th}$ e $V_{DS} > V_{GS} - V_{th}$ Dispositivo acceso
(o $V_{GD} < V_{th}$) in **saturatione**

$$I_D = \frac{1}{2} k'_n \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_{th})^2 = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{th}} \right)^2$$

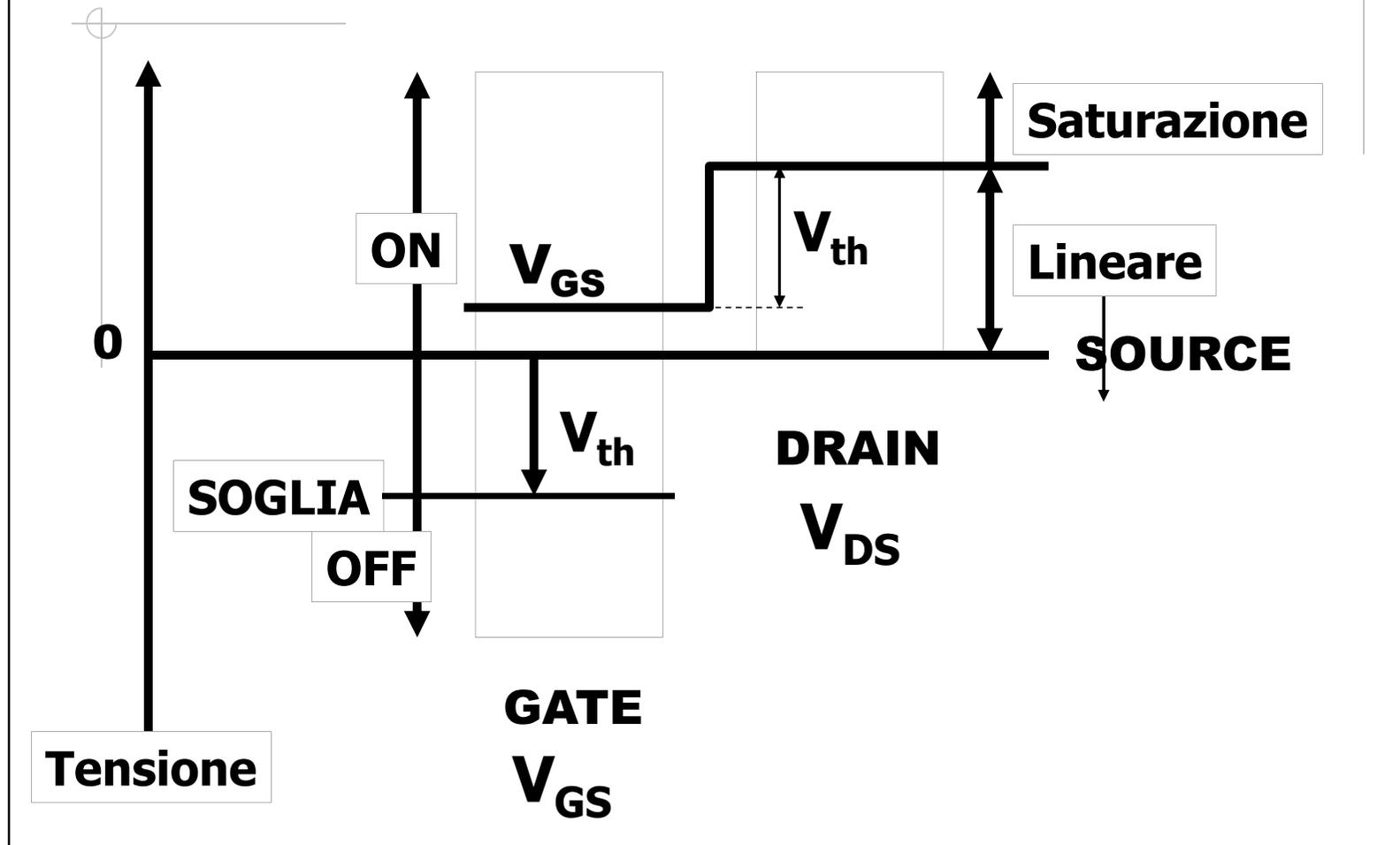
E-nMOSFET

Graficamente:



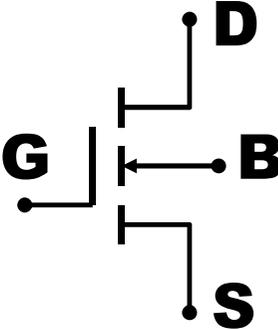
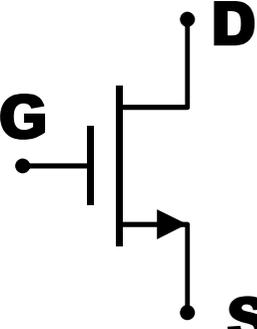
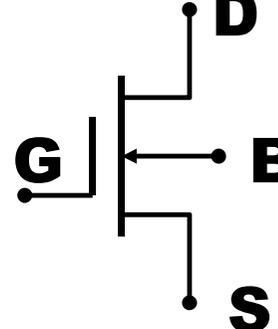
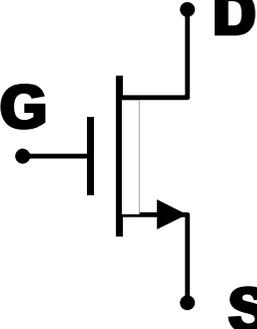
D-nMOSFET

Graficamente:



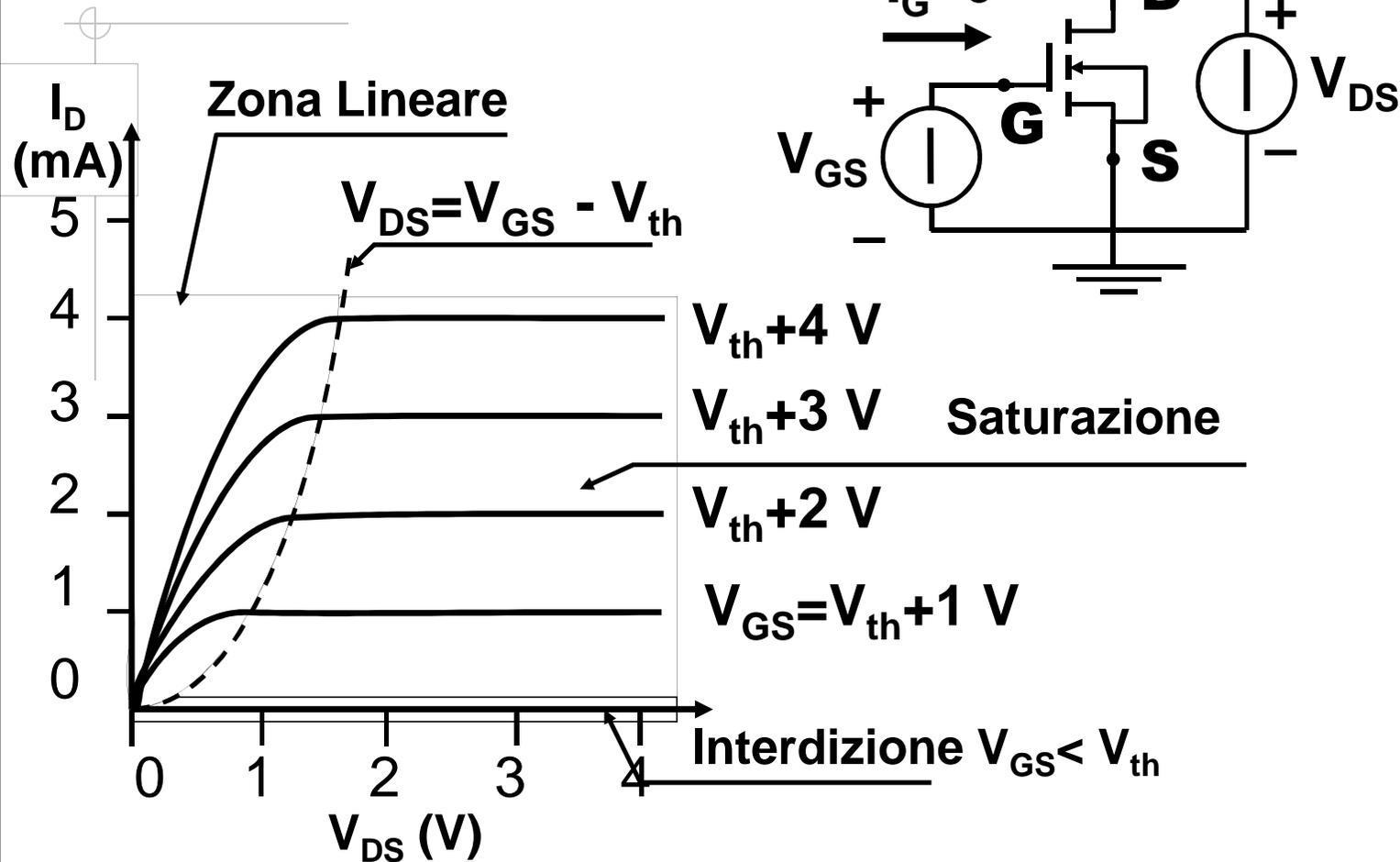
E e D -nMOSFET

Simboli circuitali

E-nMOSFET	 <p>The diagram shows the circuit symbol for an E-nMOSFET. It features a vertical line representing the gate, with a horizontal line extending to the left from its midpoint, labeled 'G'. The gate is connected to a vertical line that branches into two horizontal lines, labeled 'D' (top) and 'S' (bottom). A horizontal line extends to the right from the junction of these two lines, labeled 'B'.</p>	 <p>The diagram shows the circuit symbol for an E-nMOSFET. It features a vertical line representing the gate, with a horizontal line extending to the left from its midpoint, labeled 'G'. The gate is connected to a vertical line that branches into two horizontal lines, labeled 'D' (top) and 'S' (bottom). A horizontal line extends to the right from the junction of these two lines, ending in an arrowhead pointing to the right.</p>
D-nMOSFET	 <p>The diagram shows the circuit symbol for a D-nMOSFET. It features a vertical line representing the gate, with a horizontal line extending to the left from its midpoint, labeled 'G'. The gate is connected to a vertical line that branches into two horizontal lines, labeled 'D' (top) and 'S' (bottom). A horizontal line extends to the right from the junction of these two lines, labeled 'B'.</p>	 <p>The diagram shows the circuit symbol for a D-nMOSFET. It features a vertical line representing the gate, with a horizontal line extending to the left from its midpoint, labeled 'G'. The gate is connected to a vertical line that branches into two horizontal lines, labeled 'D' (top) and 'S' (bottom). A horizontal line extends to the right from the junction of these two lines, ending in an arrowhead pointing to the right.</p>

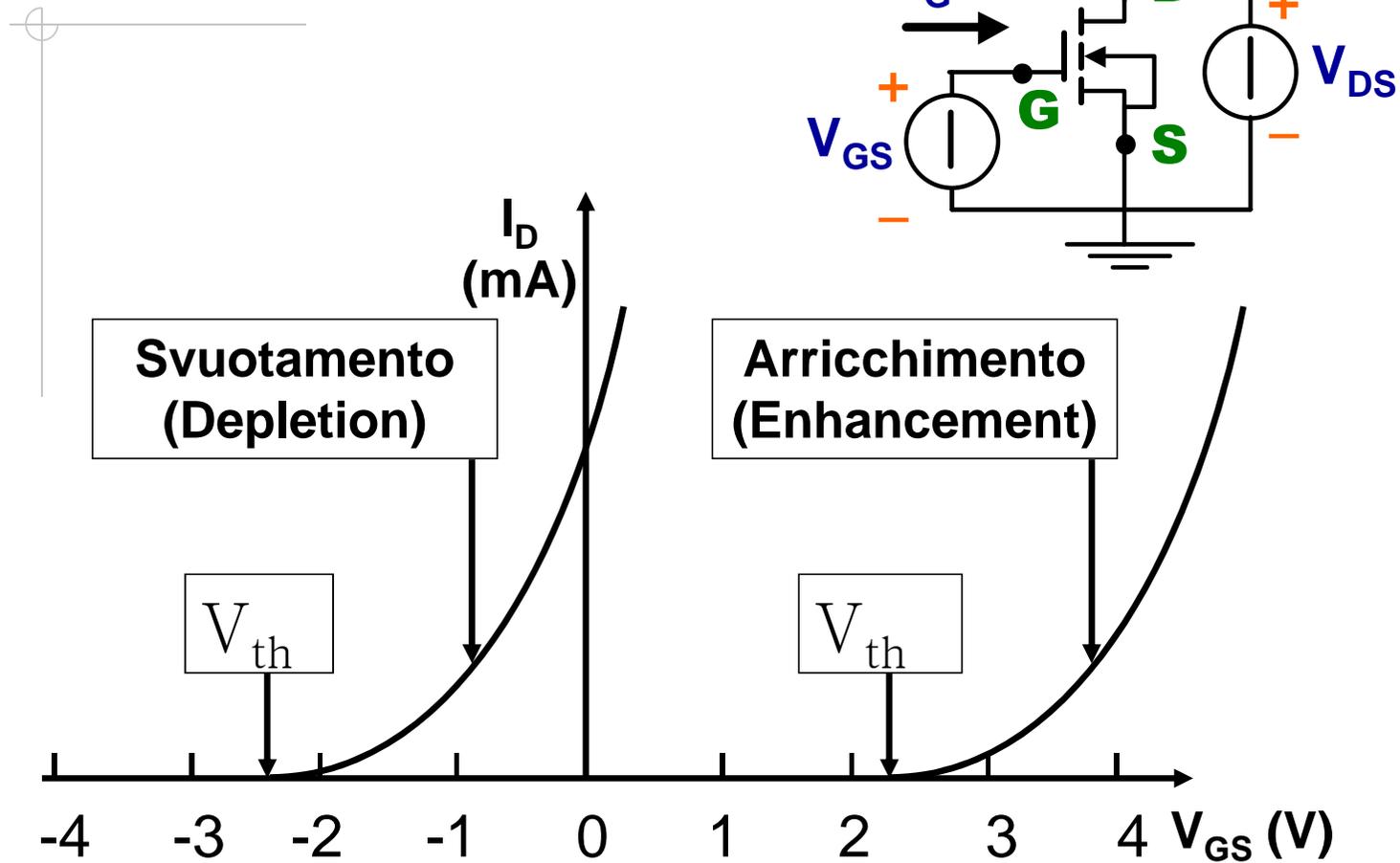
De E- nMOSFET

Caratteristiche $I_D - V_{DS}$



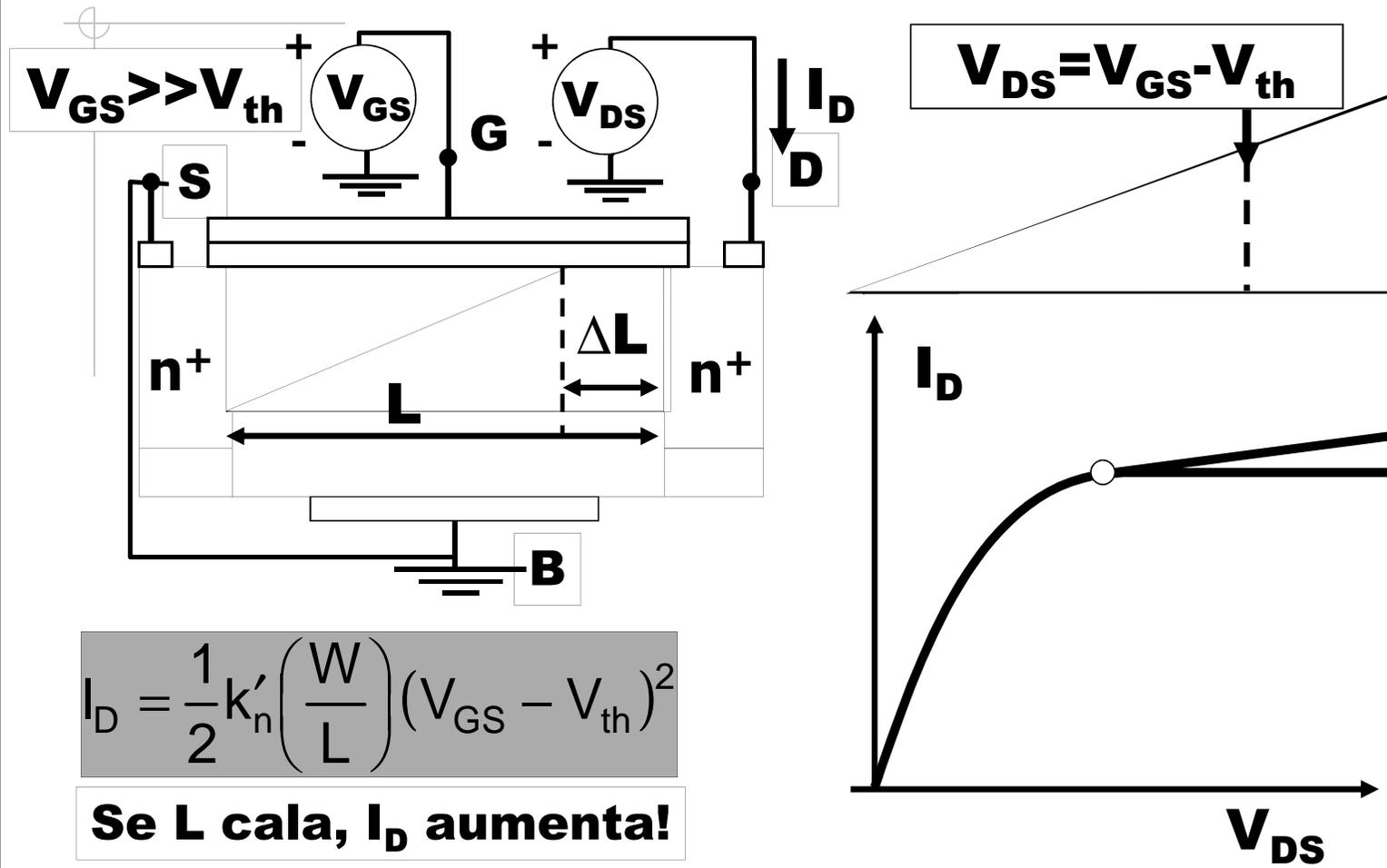
De E- nMOSFET

Caratteristiche $I_D - V_{GS}$



E-nMOSFET

Modulazione di lunghezza di canale



E-nMOSFET

Modulazione di lunghezza di canale

Vediamo come si modificano le equazioni che regolano la corrente nei MOSFET tenendo conto dell'effetto di modulazione della lunghezza di canale:

$$I_D = \frac{1}{2} k'_n \left(\frac{W}{L - \Delta L} \right) (V_{GS} - V_{th})^2 = \frac{1}{2} k'_n \left(\frac{W}{L} \right) \frac{1}{\left(1 - \frac{\Delta L}{L} \right)} (V_{GS} - V_{th})^2$$

Generalmente $\Delta L \ll L$ e quindi:

$$\frac{1}{1 - \frac{\Delta L}{L}} \cong 1 + \frac{\Delta L}{L}$$

E-nMOSFET

Modulazione di lunghezza di canale

La variazione relativa della lunghezza di canale $\Delta L/L$ è pressoché lineare con V_{DS} , quindi nell'analisi circuitale si tiene conto dell'effetto di modulazione della lunghezza di canale, inserendo un nuovo parametro, λ :

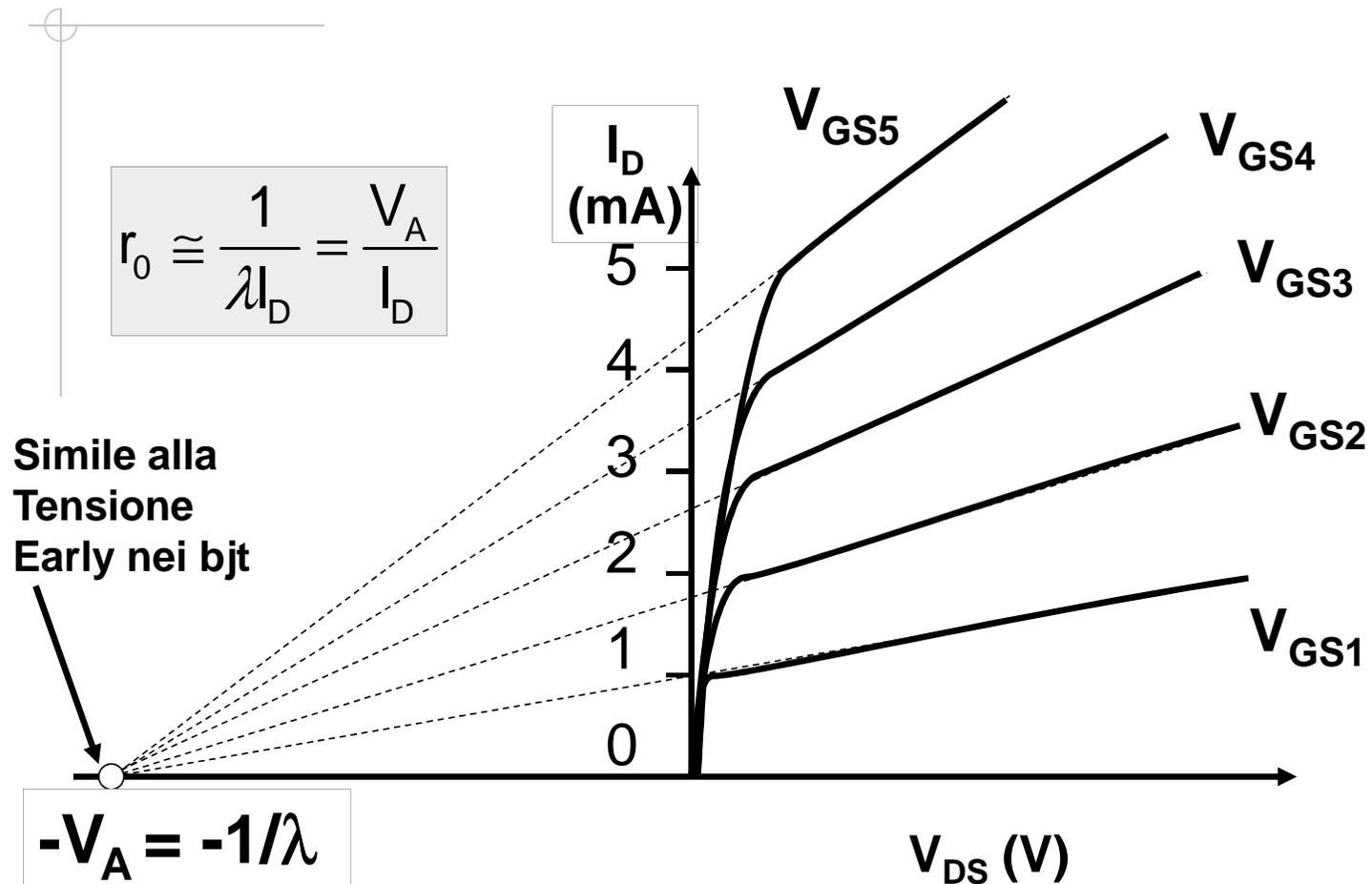
$$I_D = \frac{1}{2} k'_n \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_{th})^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

Questo comporta una “resistenza di uscita” finita:

$$r_o = \left[\frac{\Delta I_D}{\Delta V_{DS}} \right]_{V_{GS}=\text{cost}}^{-1} = \left[\lambda \frac{k'_n}{2} \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_{th})^2 \right]^{-1} \approx \frac{1}{\lambda I_D}$$

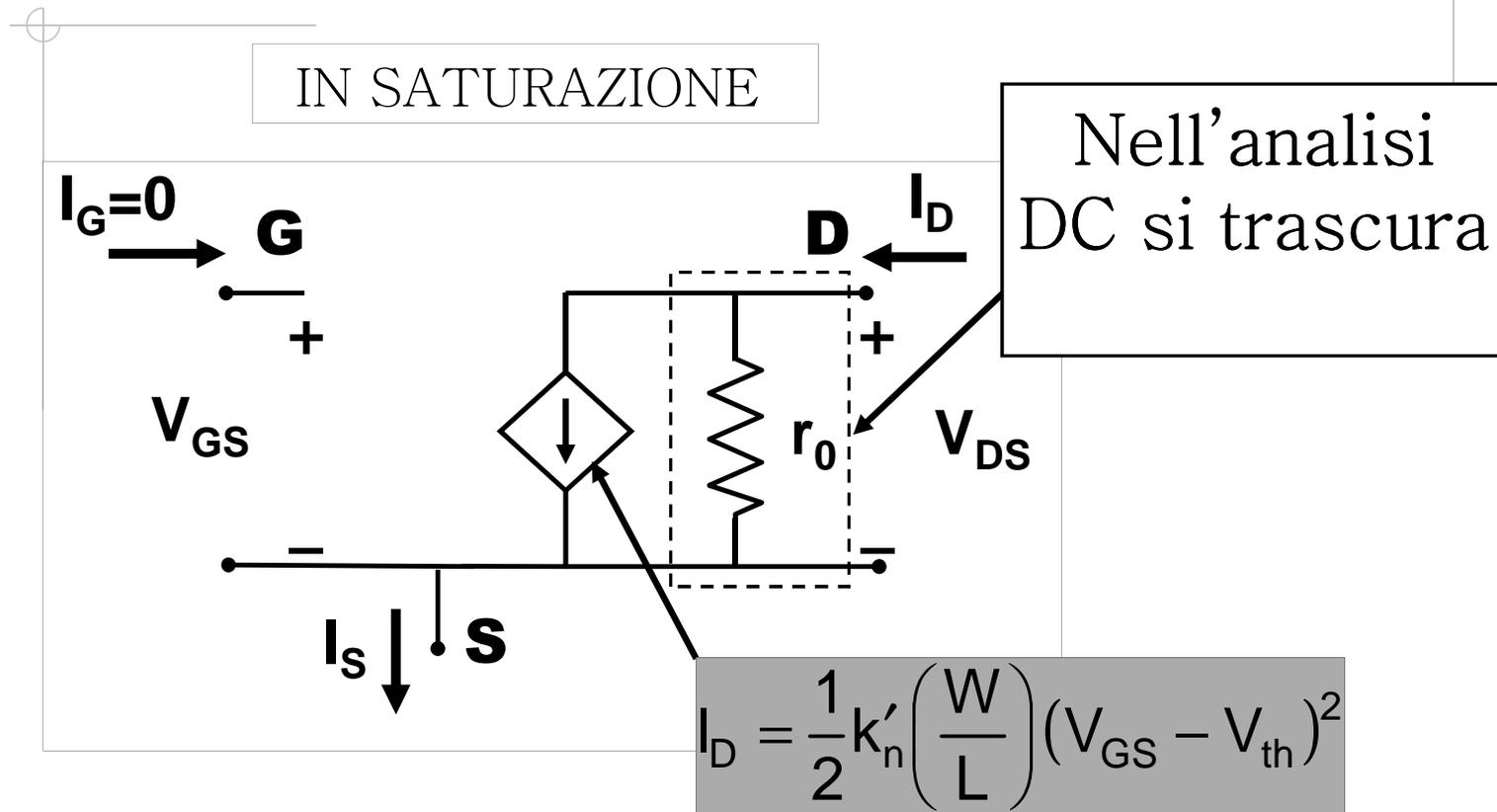
n-MOSFET

Modulazione di lunghezza di canale

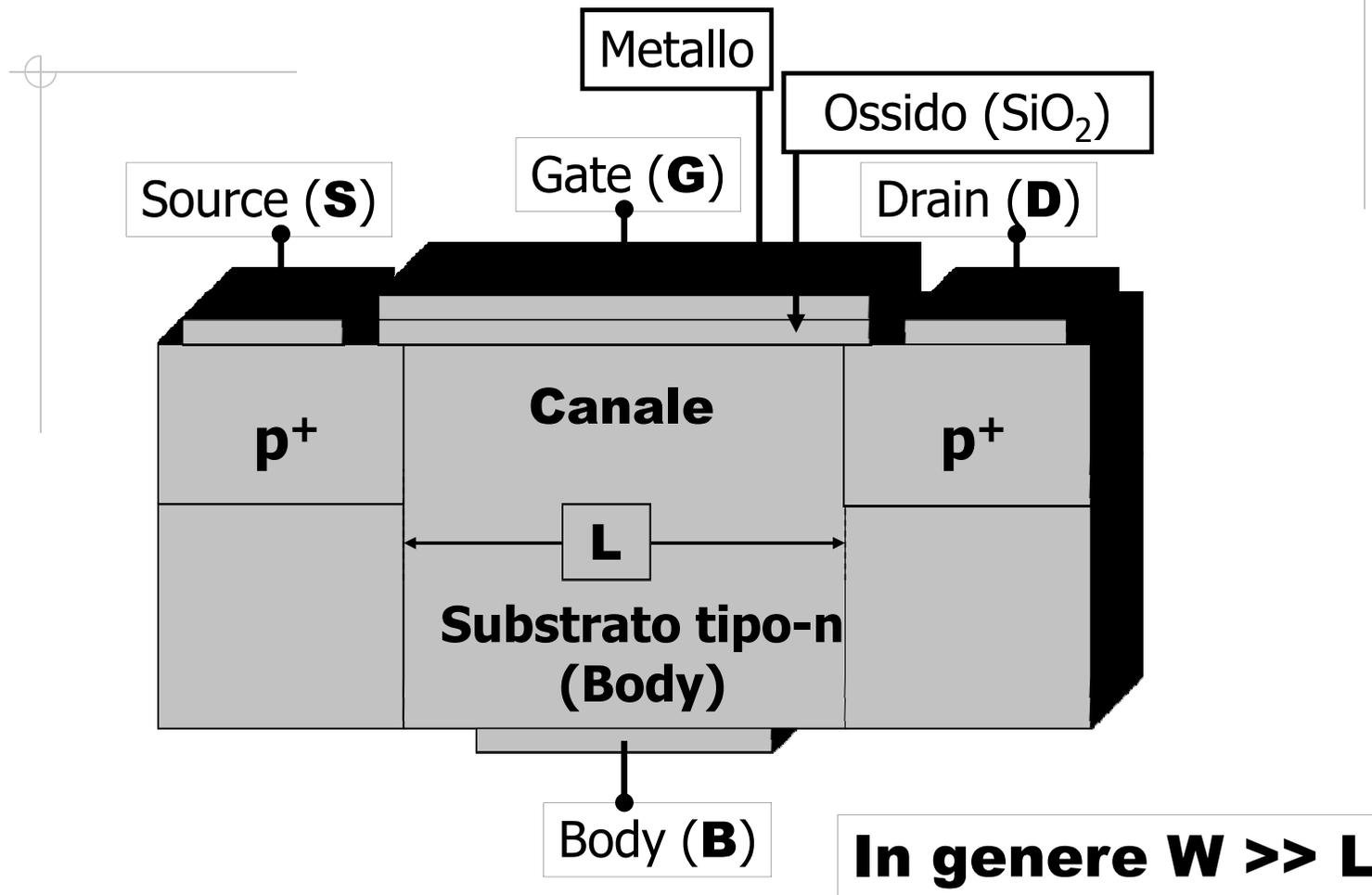


n-MOSFET

Modello circuitale



pMOSFET



pMOSFET

Il pMOSFET funziona, concettualmente, allo stesso modo dell'nMOSFET.

I versi delle tensioni e delle correnti sono invertiti:

I_D esce dal drain,

$V_{DS} < 0$

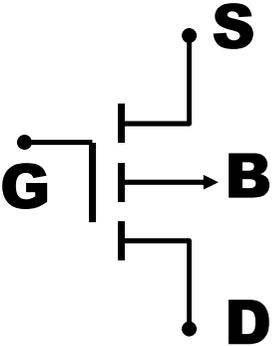
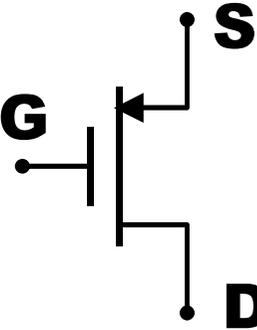
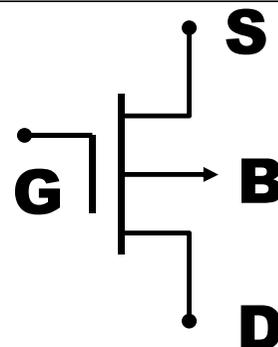
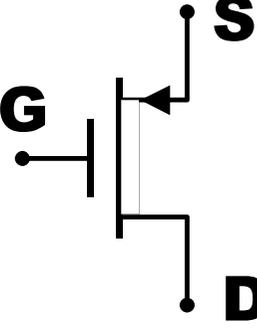
$V_{GS} < V_{th}$ per avere il canale

E-pMOSFET ad arricchimento $V_{th} < 0$

D-pMOSFET a svuotamento $V_{th} > 0$

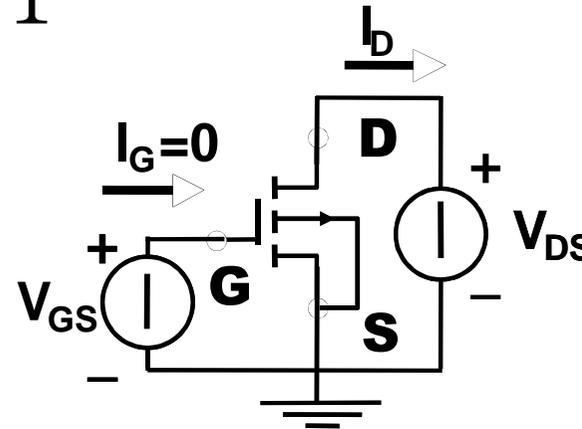
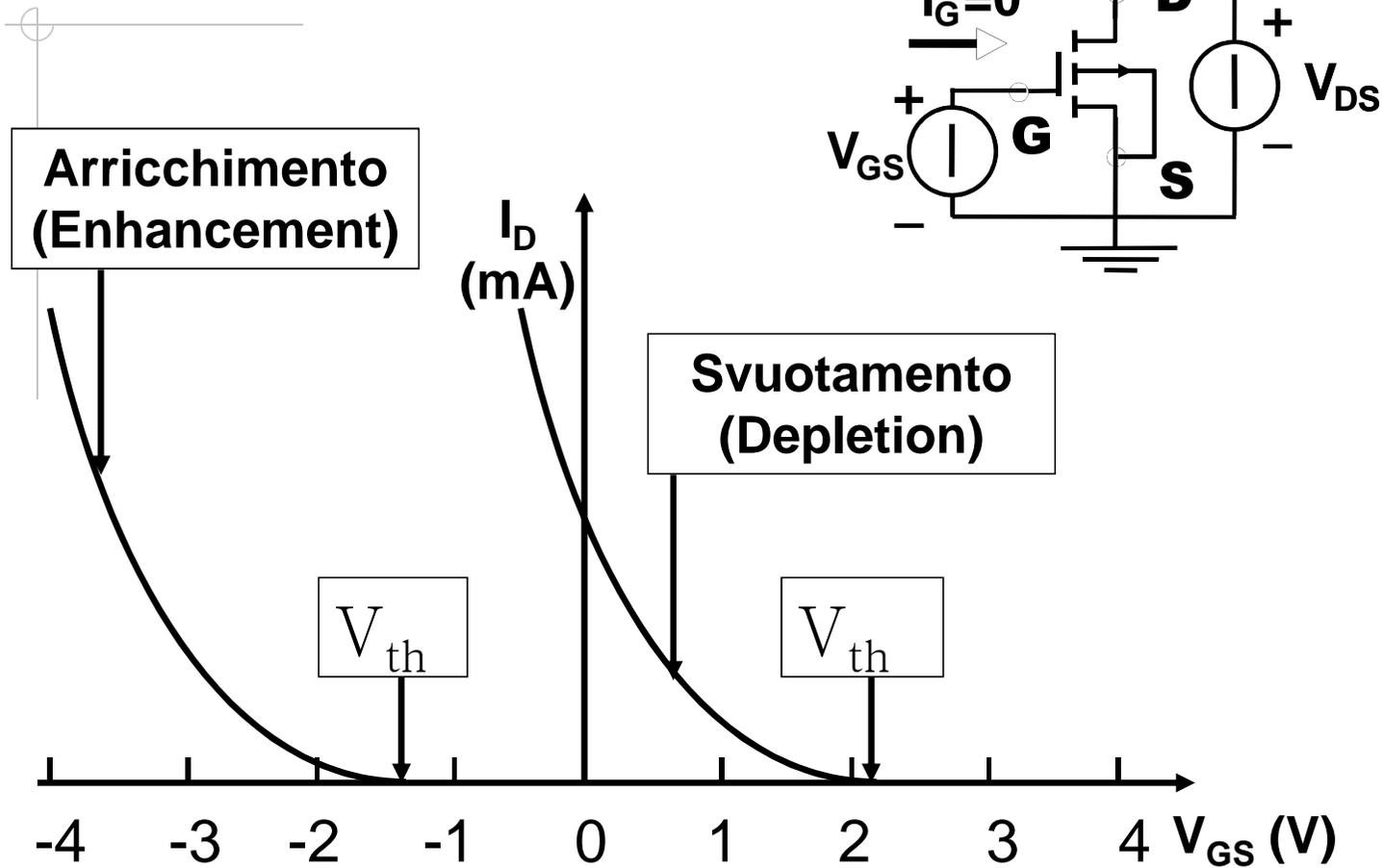
E e D -pMOSFET

Simboli circuitali

E-pMOSFET		
D-pMOSFET		

D e E- pMOSFET

Caratteristiche $I_D - V_{GS}$



E e D -pMOSFET

$$V_{GS} > V_{th}$$

Dispositivo **spento**

$$I_D = 0$$

$V_{GS} < V_{th}$ e $V_{DS} > V_{GS} - V_{th}$ Dispositivo acceso
(o $V_{GD} < V_{th}$) in **zona lineare**

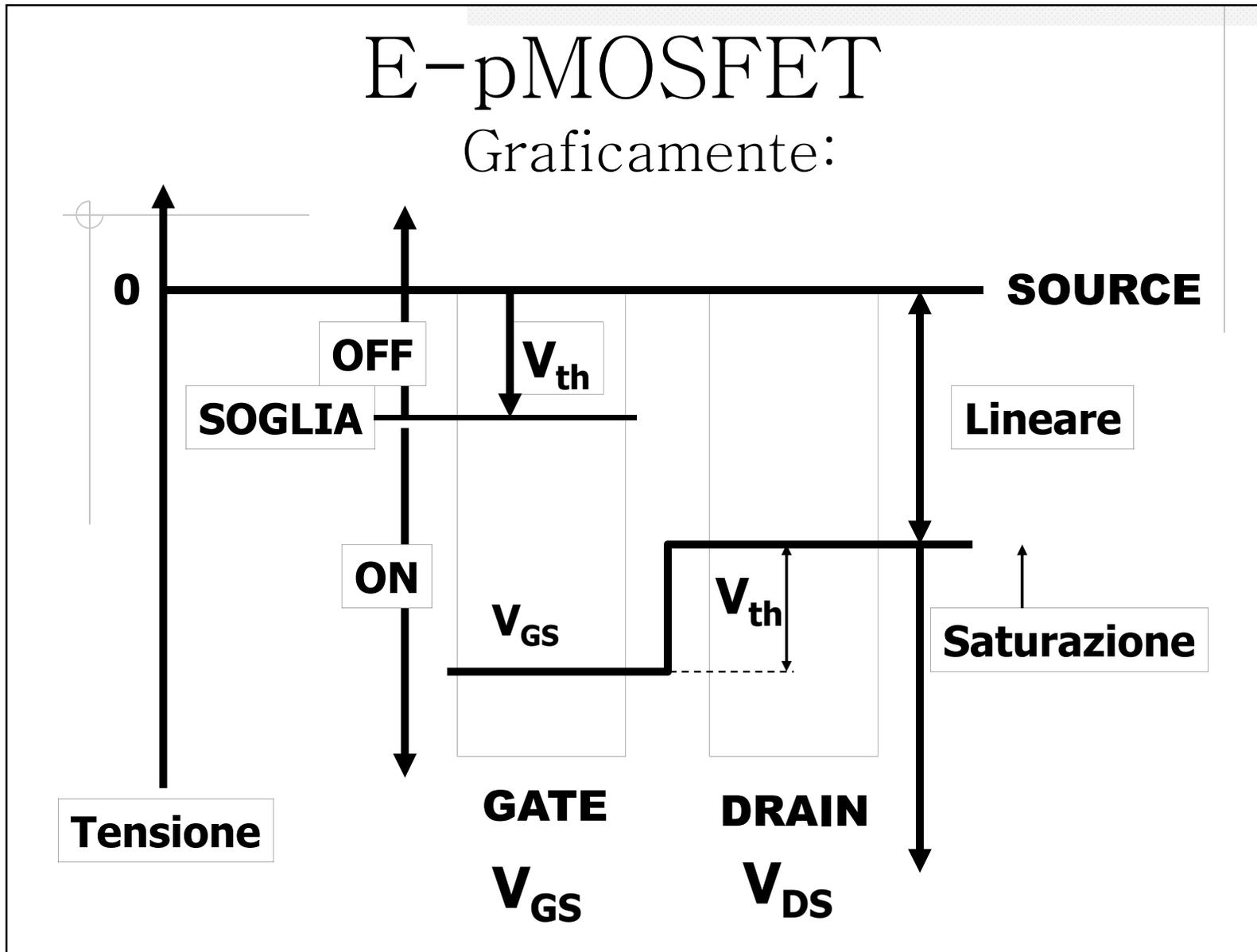
$$I_D = k'_p \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_{th}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

$V_{GS} < V_{th}$ e $V_{DS} < V_{GS} - V_{th}$ Dispositivo acceso
(o $V_{GD} > V_{th}$) in **saturatione**

$$I_D = \frac{1}{2} k'_p \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_{th})^2 = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{th}} \right)^2$$

E-pMOSFET

Graficamente:



D-pMOSFET

Graficamente:

