

Dispositivi elettronici

***Metal-Oxide-Semicond.
Field Effect Trans.
(MOSFET)***

Sommario

come è fatto un nMOSFET
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 pMOSFET

INTRODUZIONE

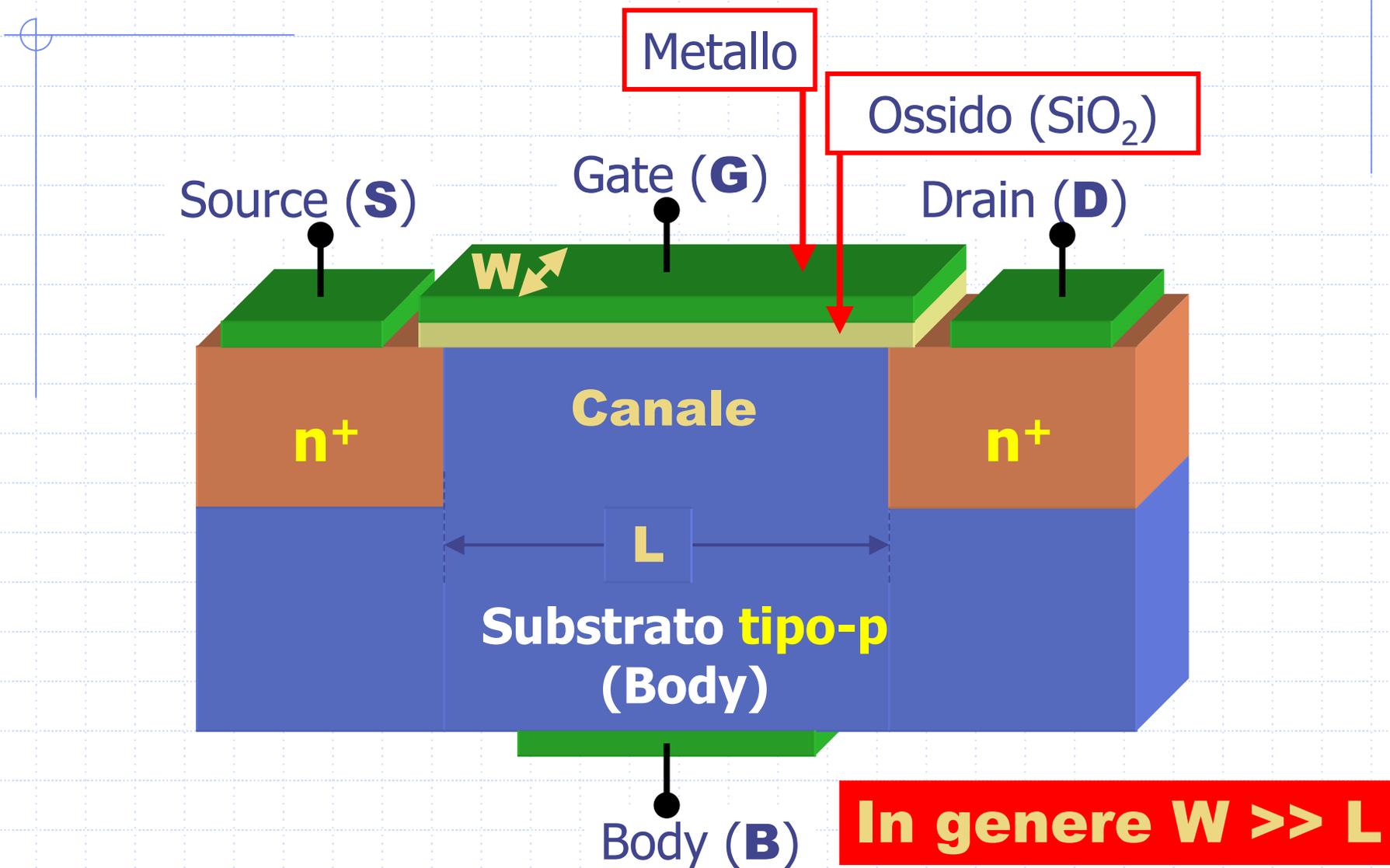
In questa parte iniziale studieremo il
E-nMOSFET
MOSFET a canale n ad arricchimento
(o ad Enhancement)

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)

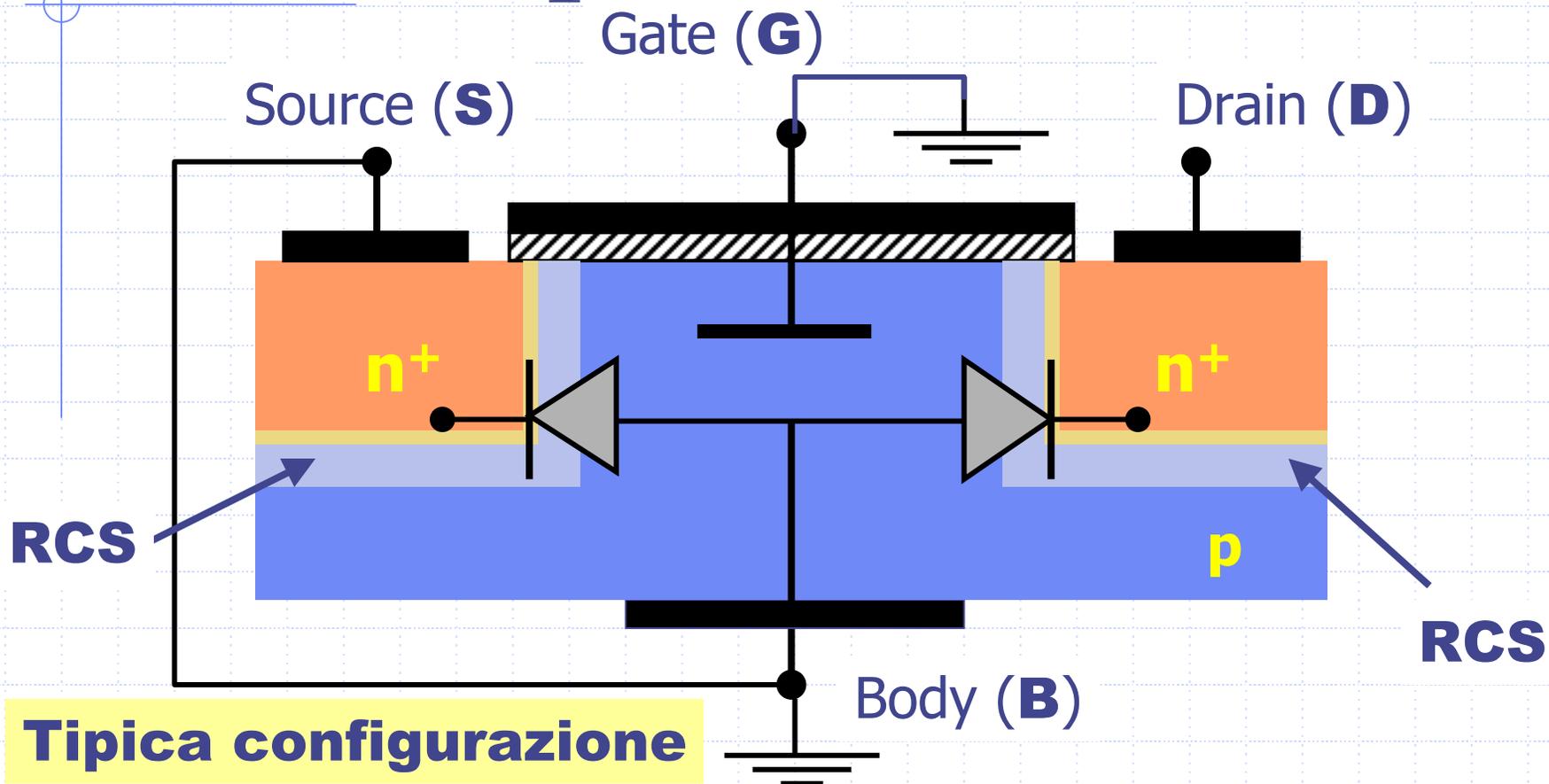
(saranno chiariti in seguito il significato di questi termini).

E-nMOSFET



E-nMOSFET

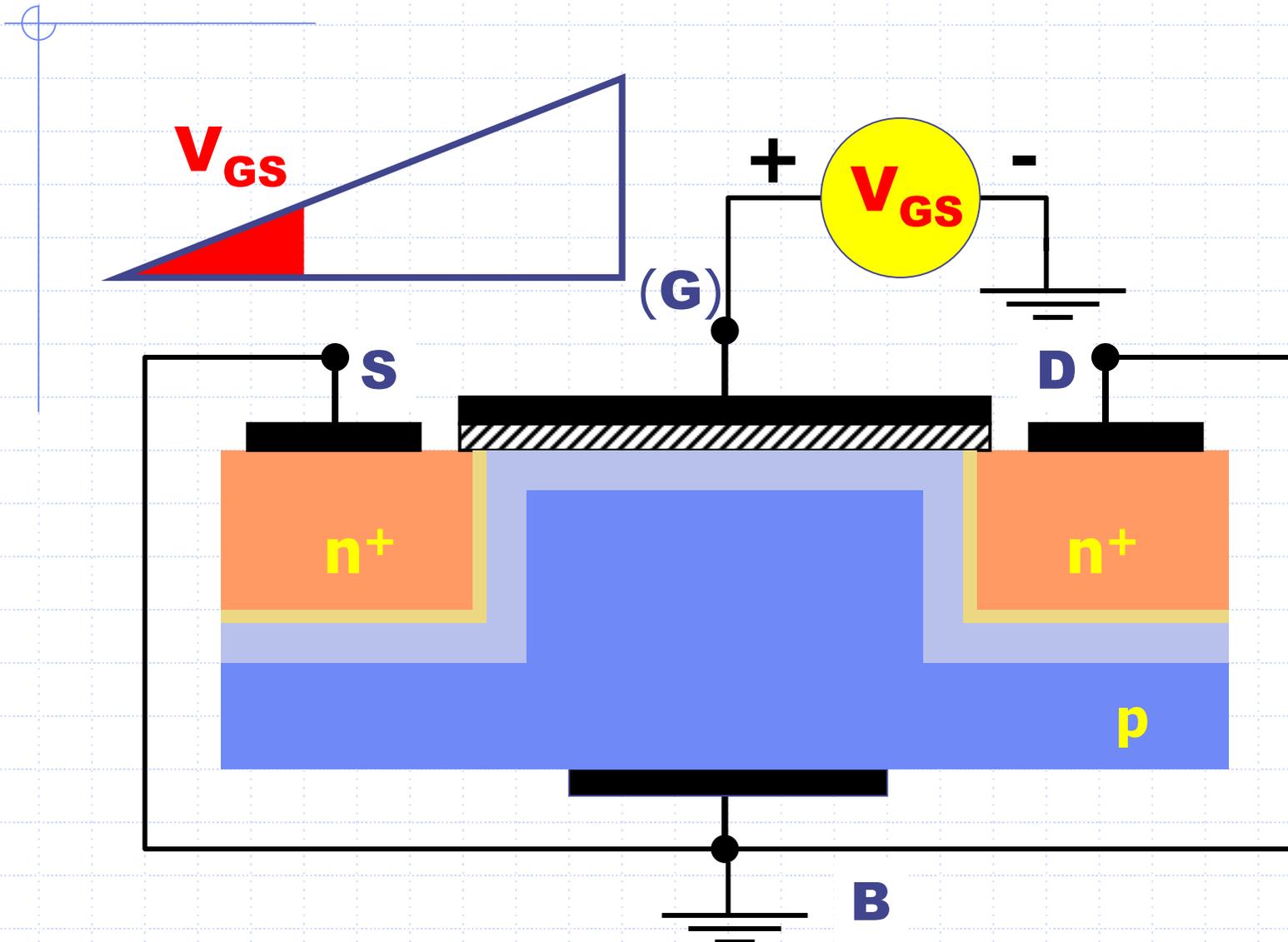
Assenza di polarizzazione al Gate



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

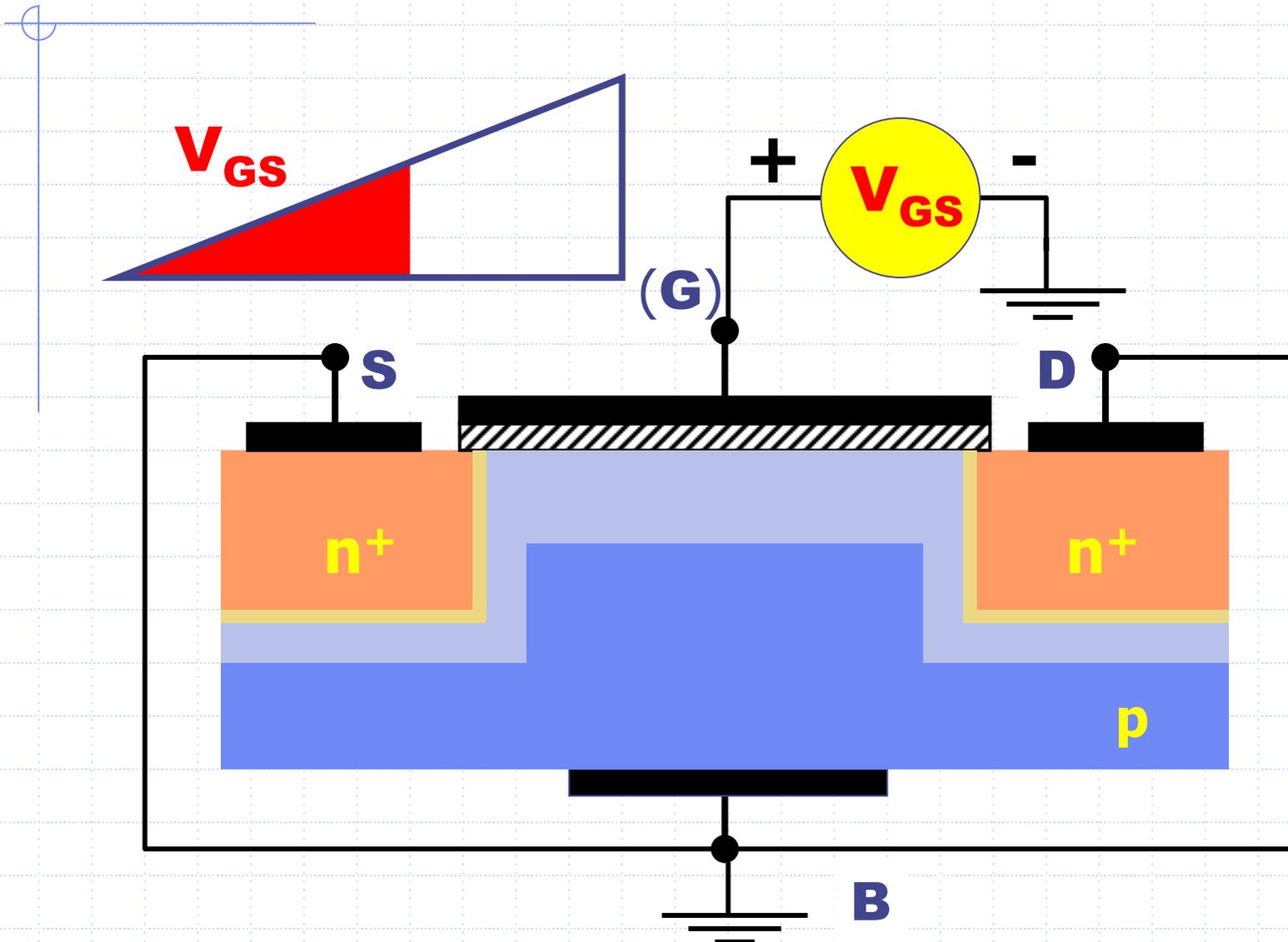
E-nMOSFET

Tensione al Gate



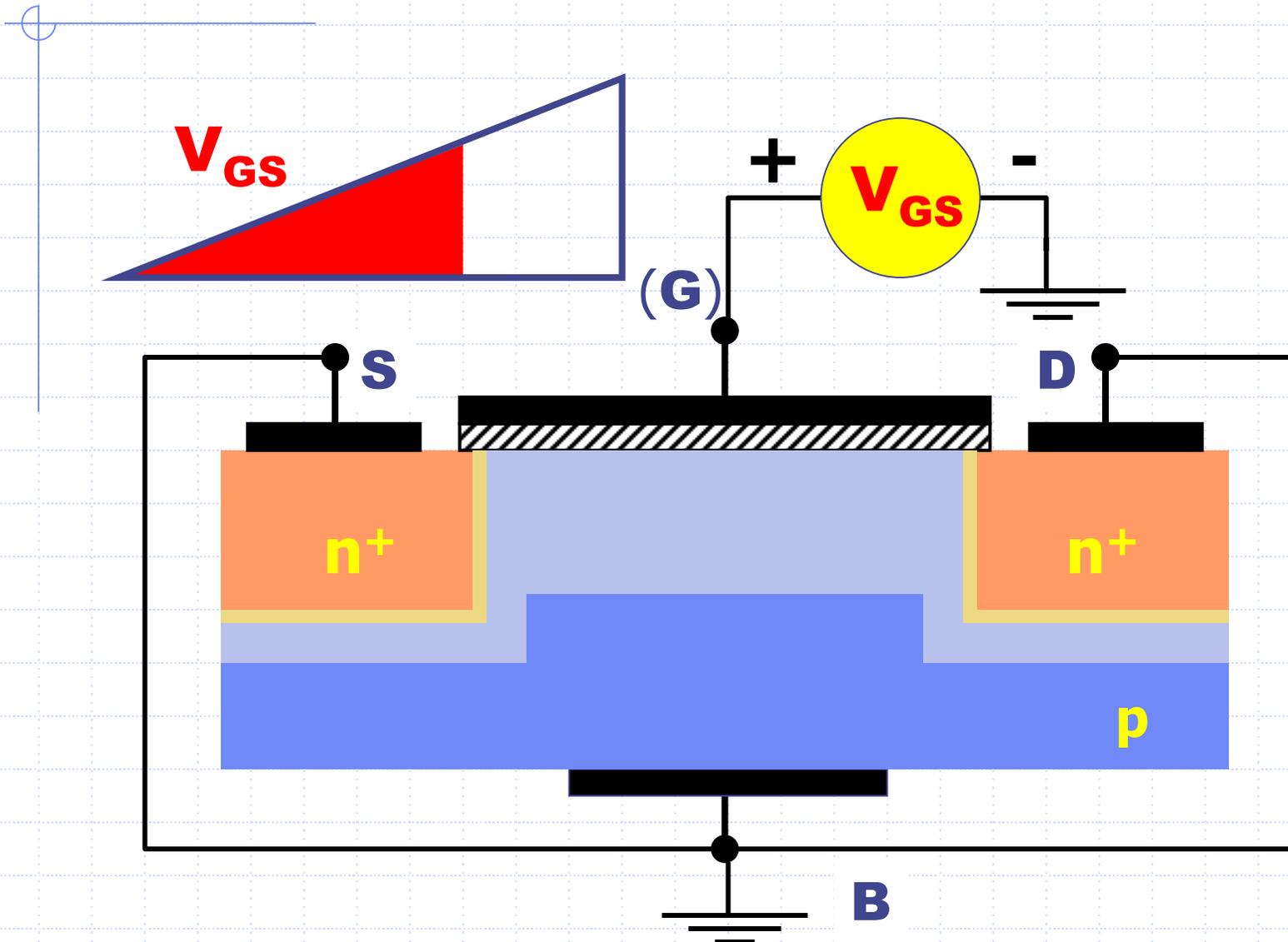
n-MOSFET

Tensione al Gate



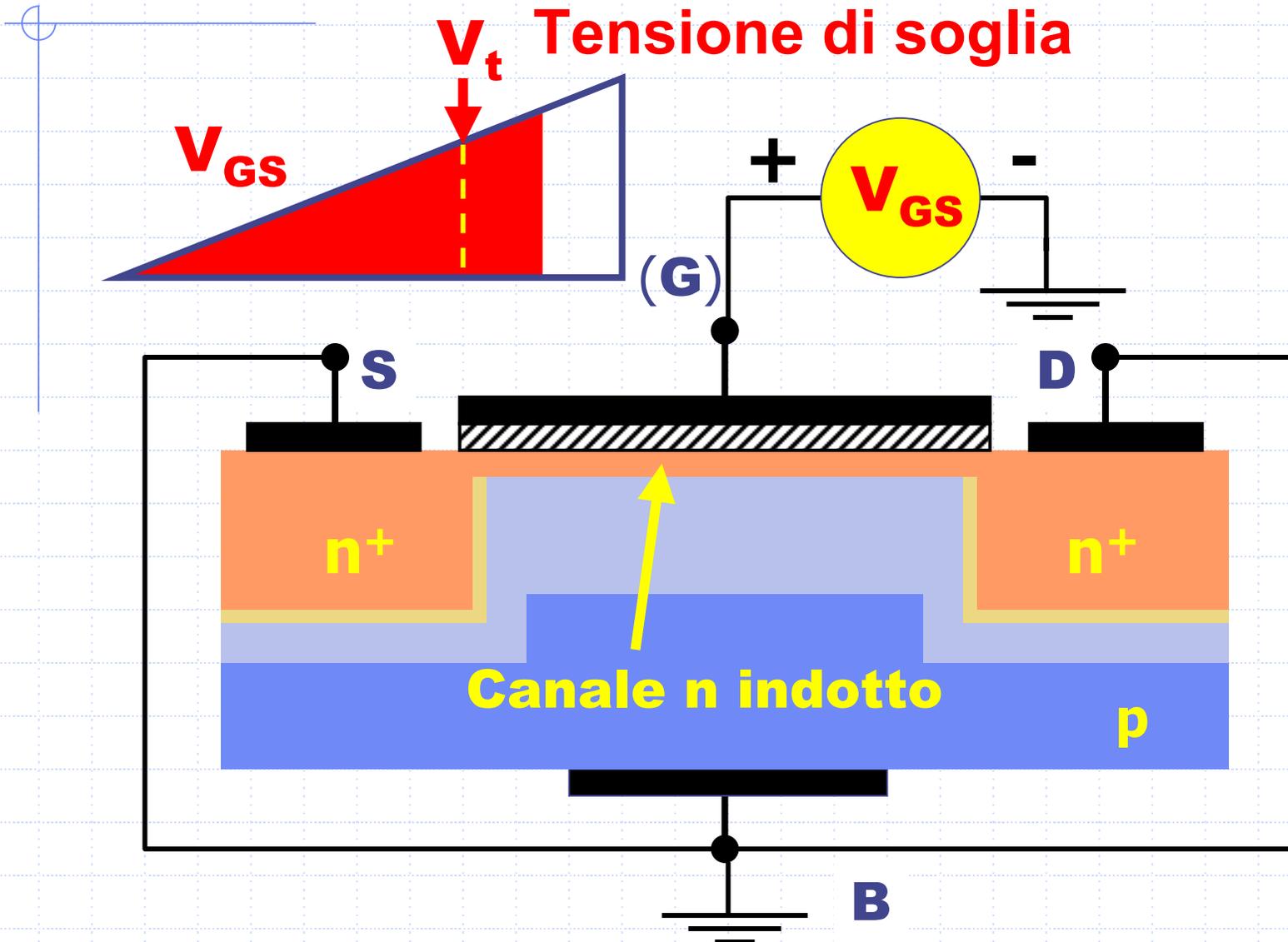
E-nMOSFET

Tensione al Gate



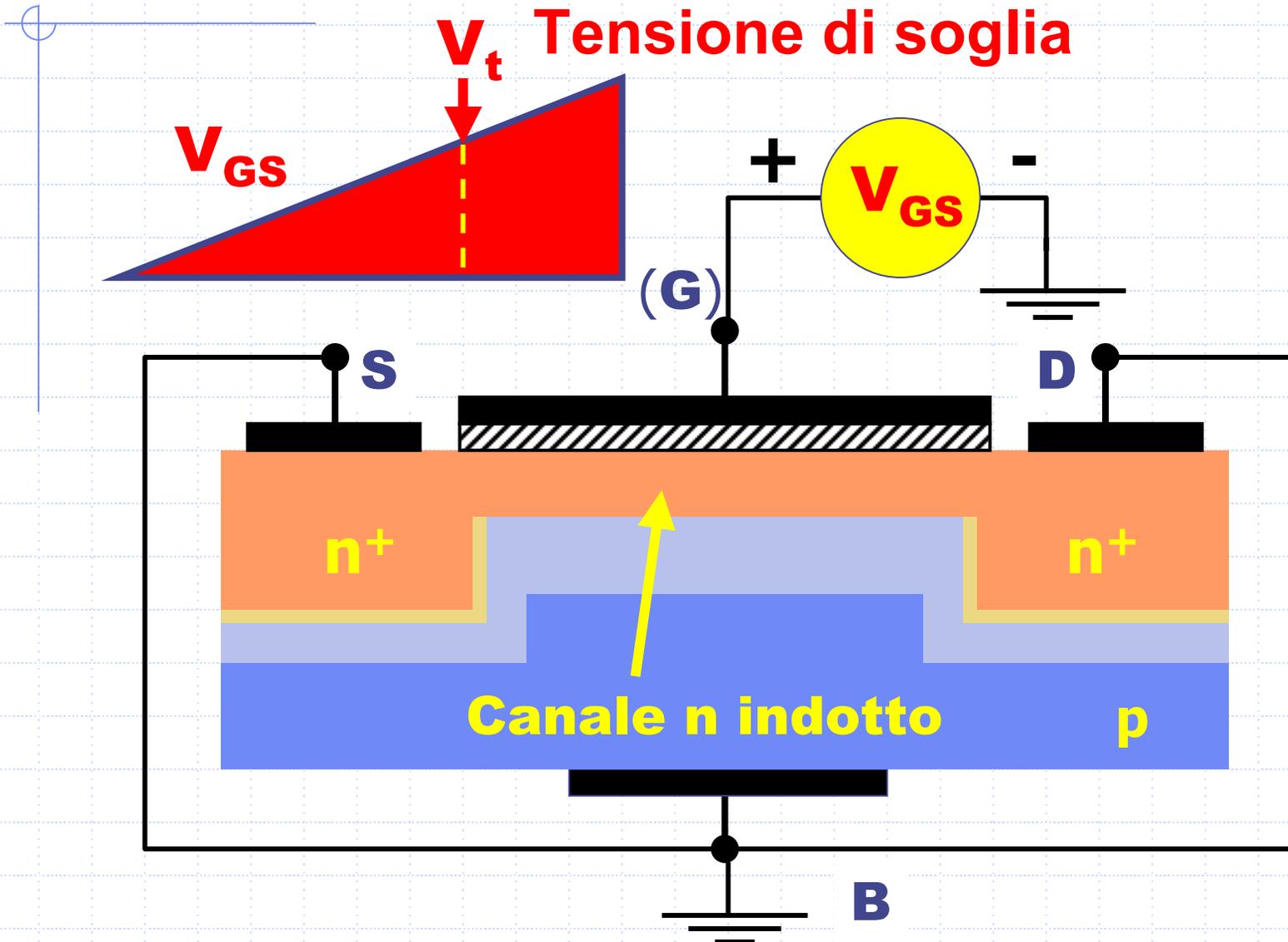
E-nMOSFET

Tensione al Gate



E-nMOSFET

Tensione al Gate



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;

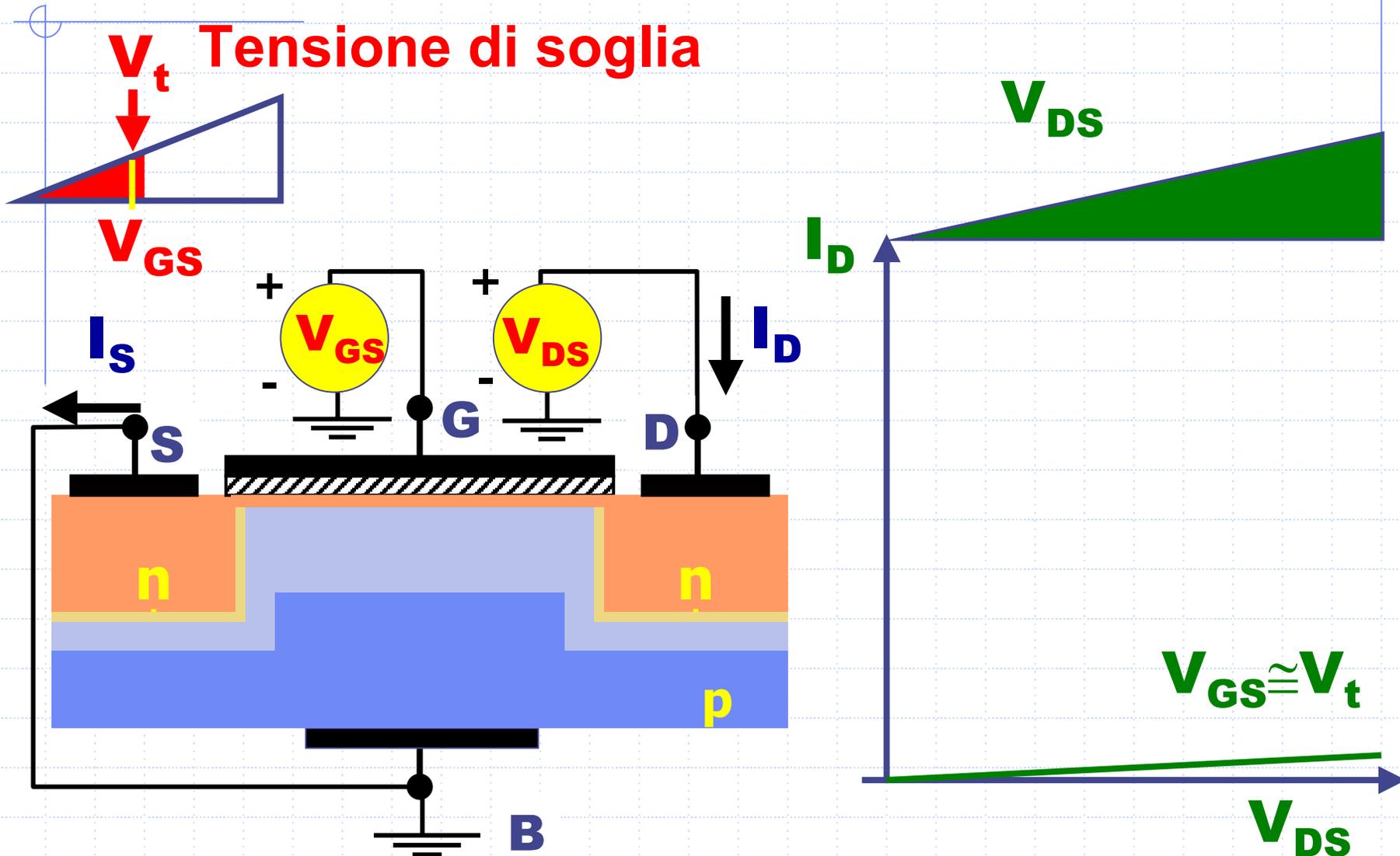
Oltre una certa tensione di gate, detta **tensione di soglia**, V_t , Il campo elettrico presente sotto il gate riesce a richiamare elettroni liberi che tenderanno ad accumularsi sotto il gate, con la formazione di uno strato di elettroni liberi (**canale n indotto**) che collega il drain con il source.

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

NOTA: Tale descrizione (concettualmente corretta) è puramente descrittiva e non ha nessun fondamento fisico. Si rimanda al corso di microelettronica.

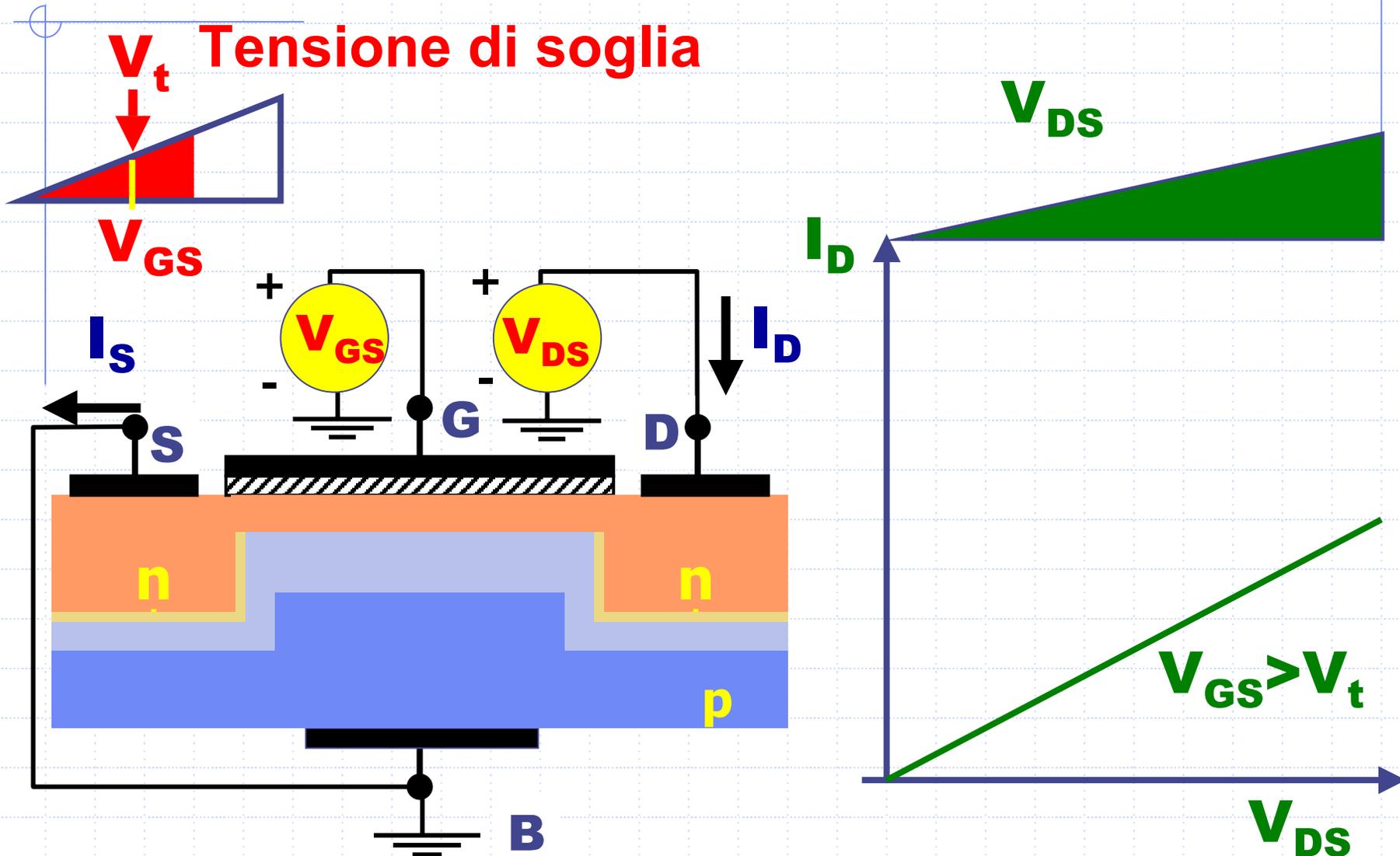
E-nMOSFET

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



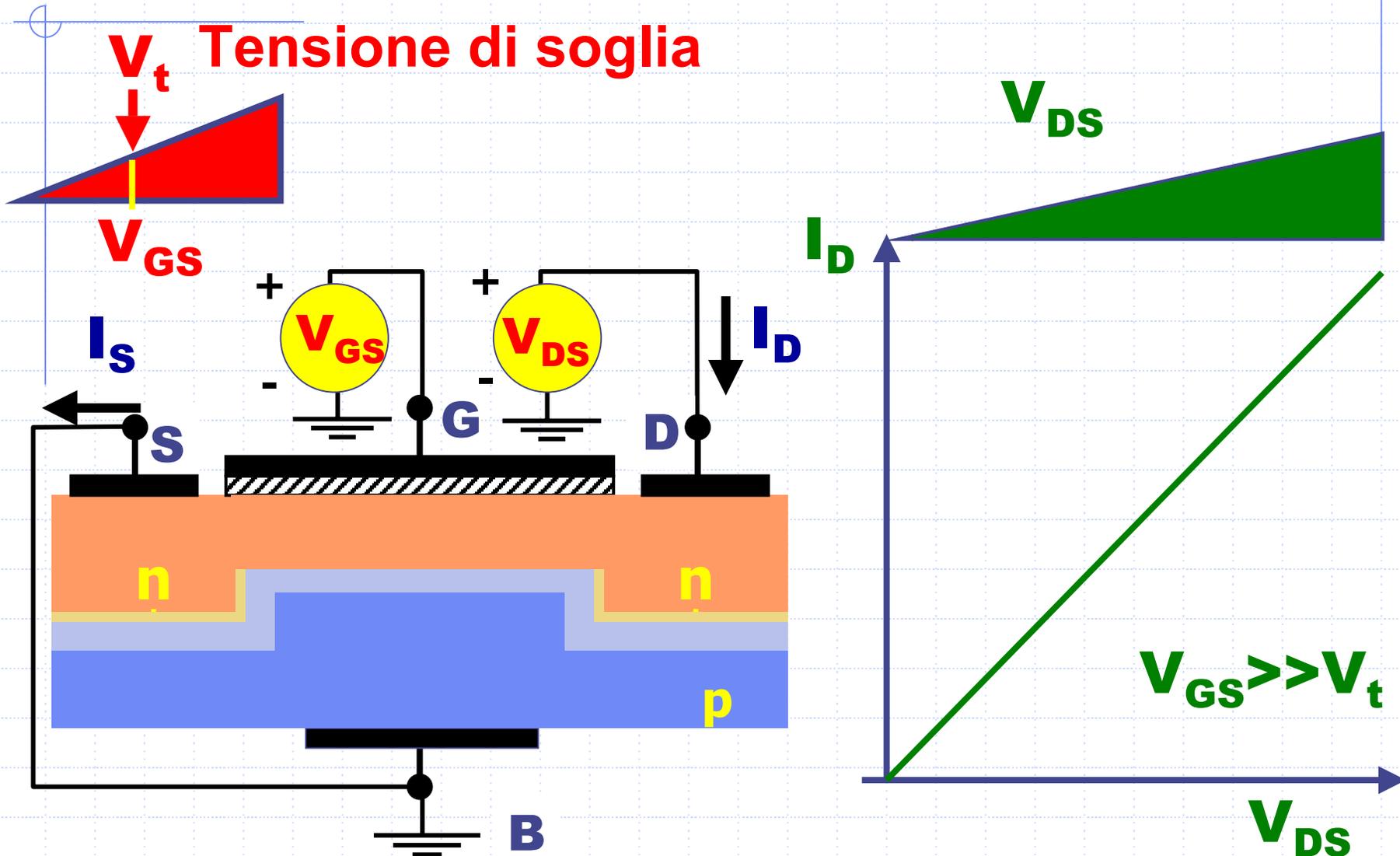
E-nMOSFET

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



E-nMOSFET

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



E-nMOSFET

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

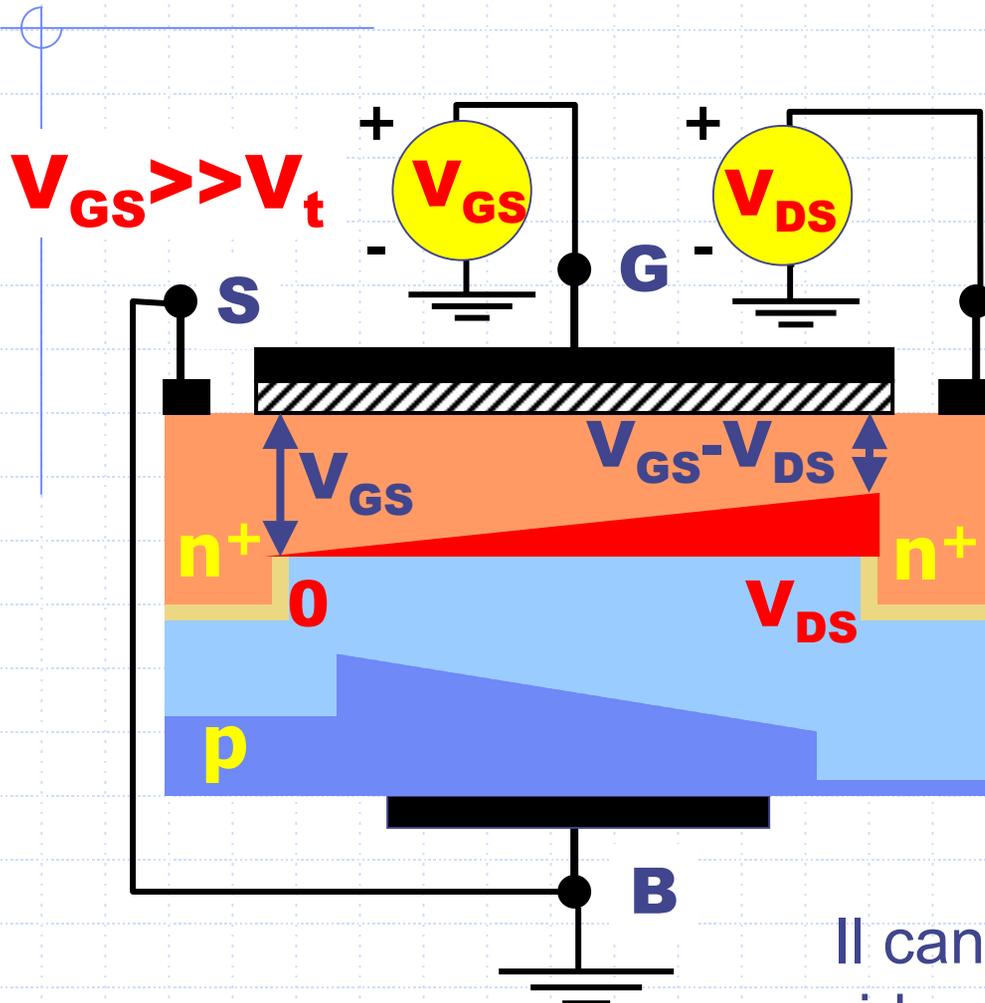
Applicando una tensione positiva (piccola) al drain, con al gate una tensione positiva maggiore della **tensione di soglia**, V_t , si ha flusso di elettroni (spinti dal campo elettrico) che danno luogo ad una corrente di drain I_D .

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 elevate



Dal Punto di
vista Statico:

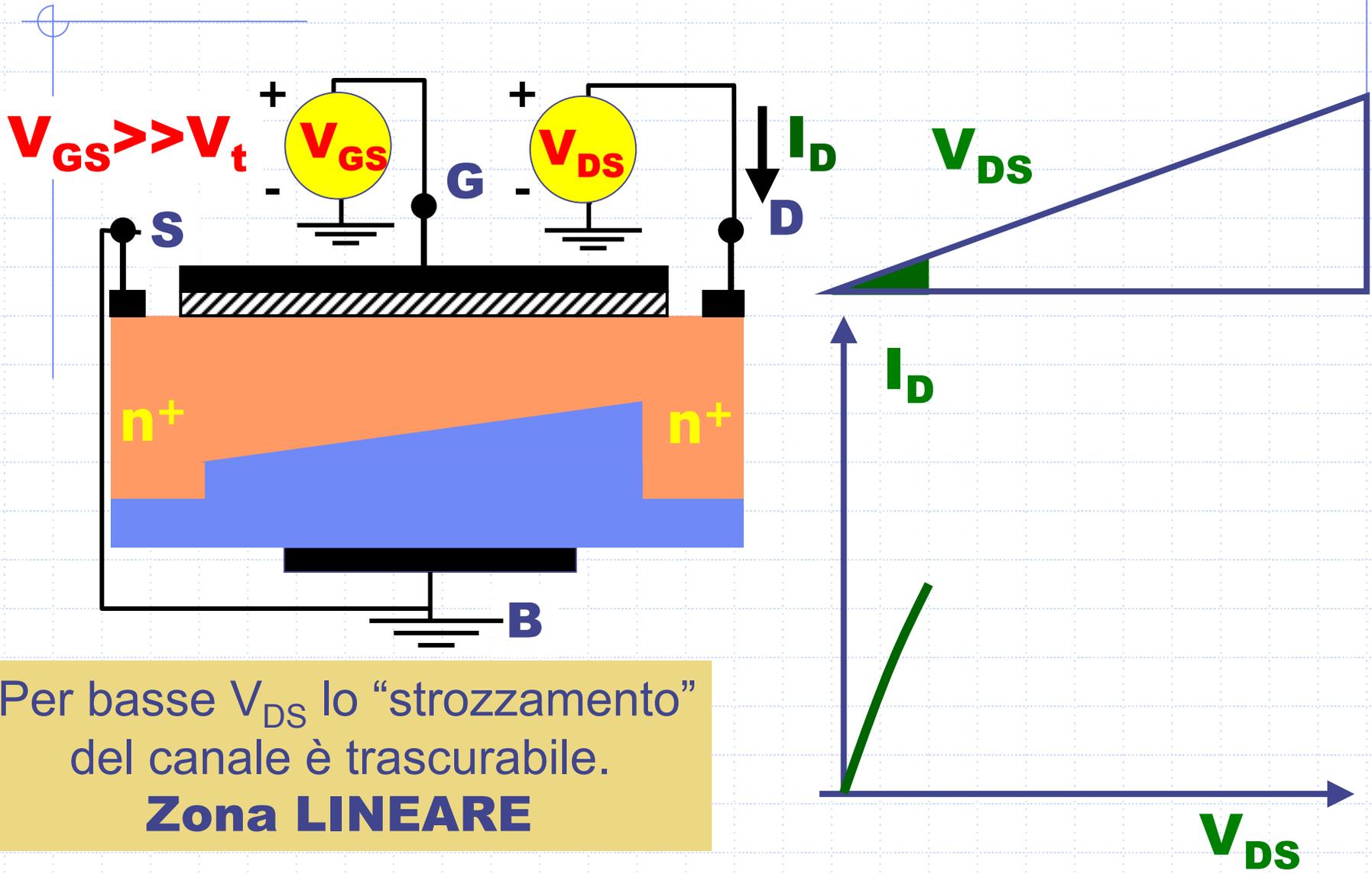
Applicando tensione al
D Drain, si induce una
caduta di **tensione
lineare nel canale.**

Ciò comporta una
riduzione della
tensione tra il gate
e il substrato lungo
il canale.

Il canale elettronico tenderà a
ridursi in prossimità del drain.

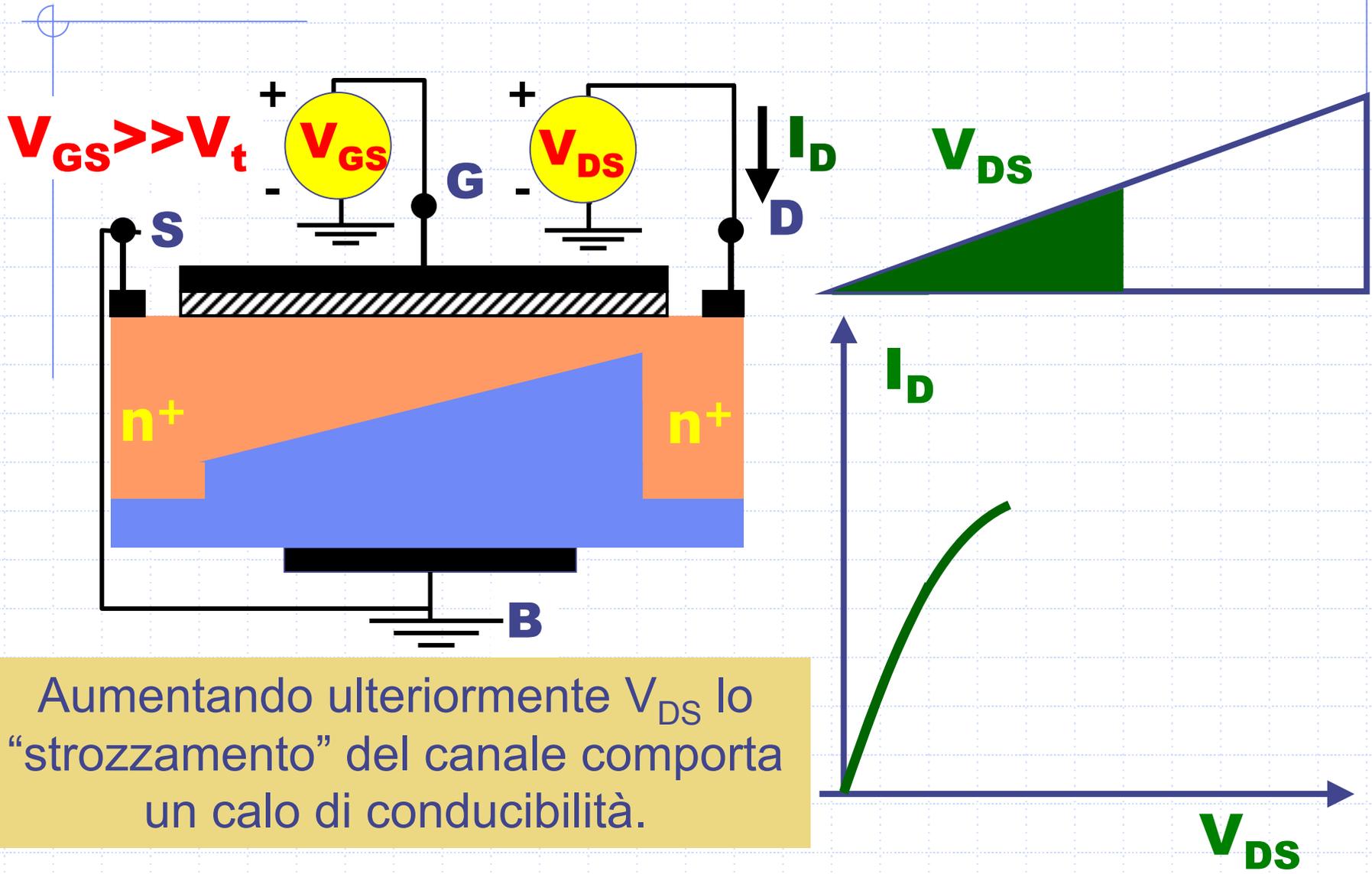
E-nMOSFET

Tensione al Drain elevate



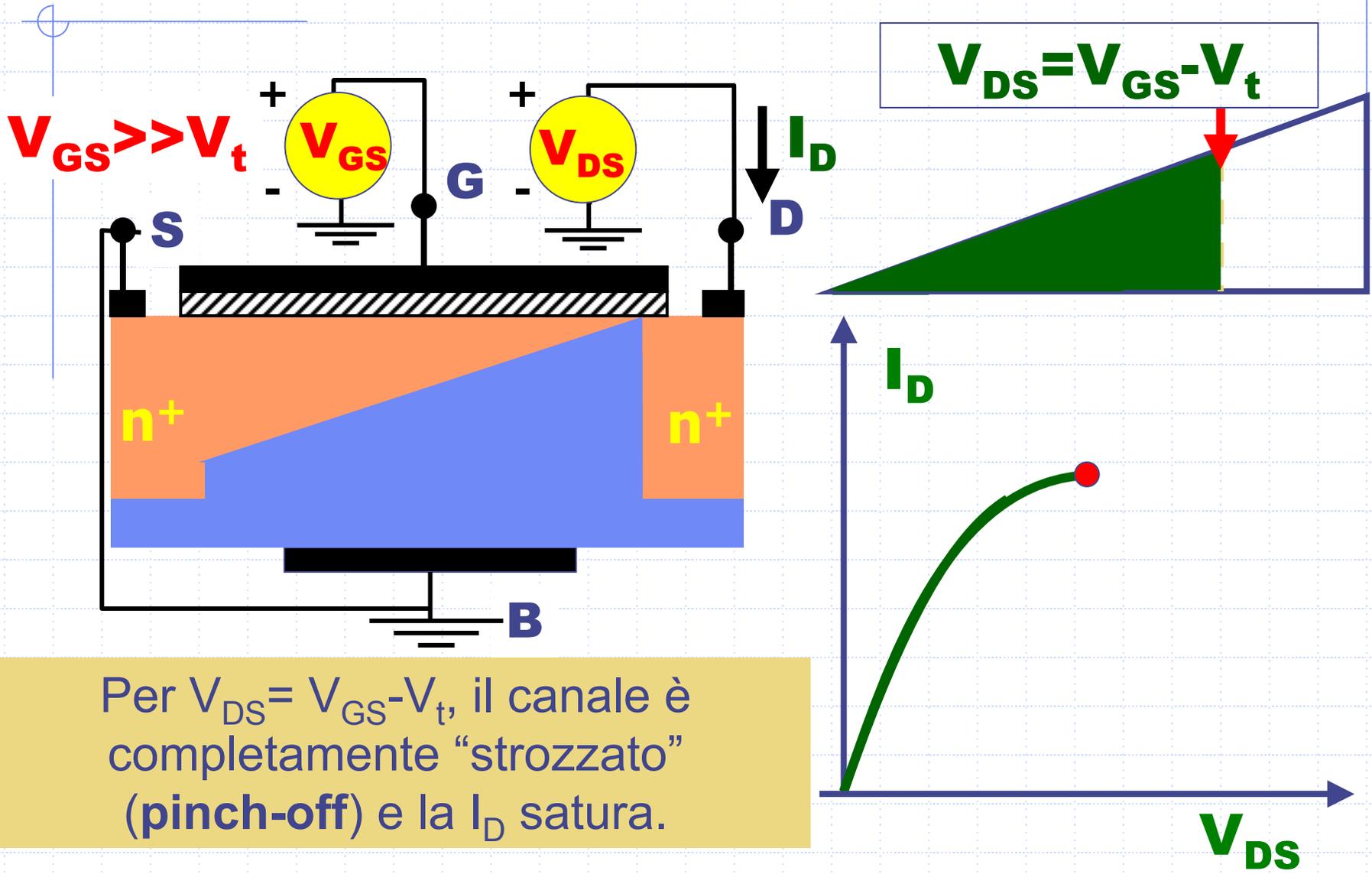
E-nMOSFET

Tensione al Drain elevate



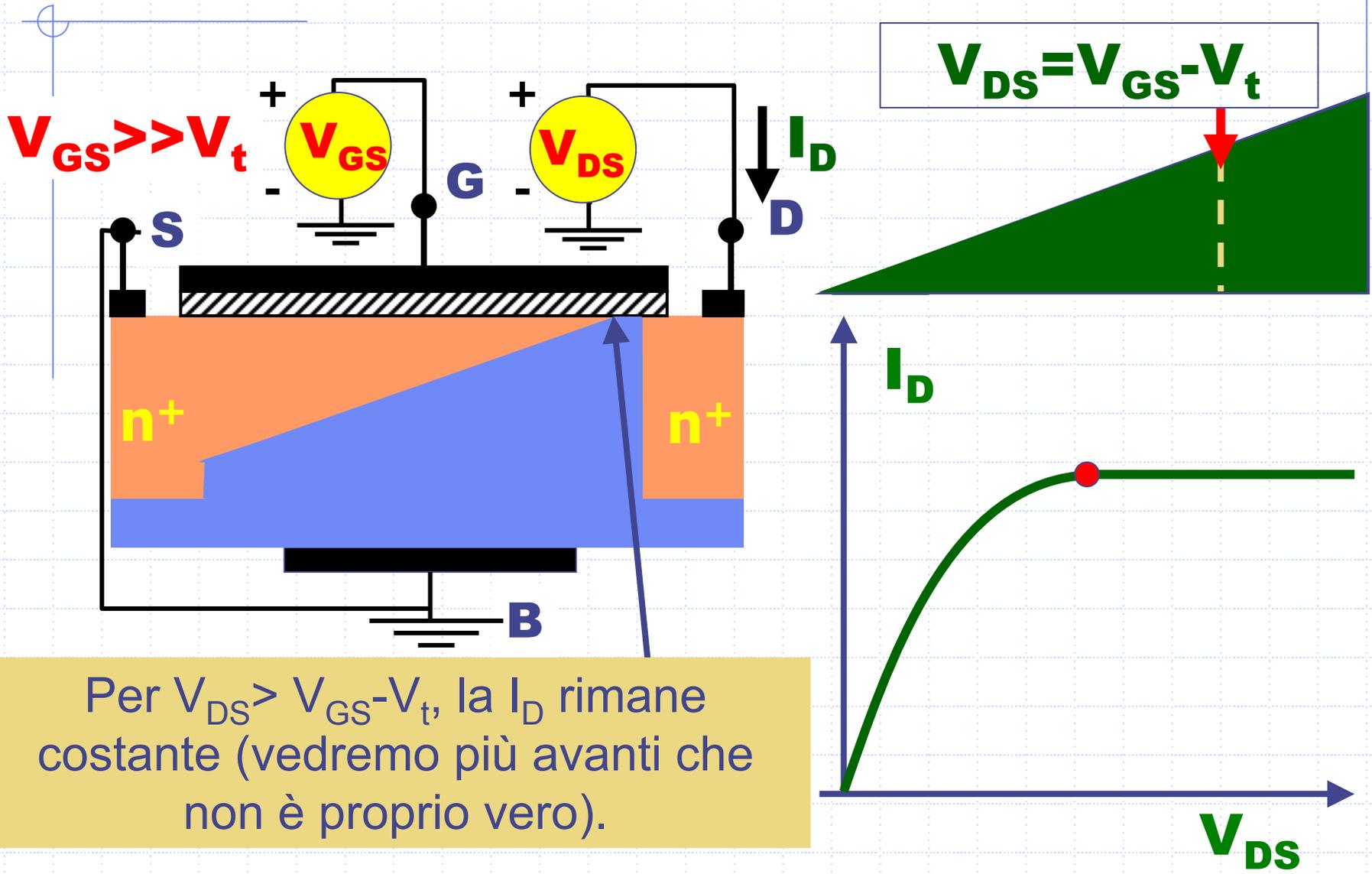
E-nMOSFET

Tensione al Drain elevate



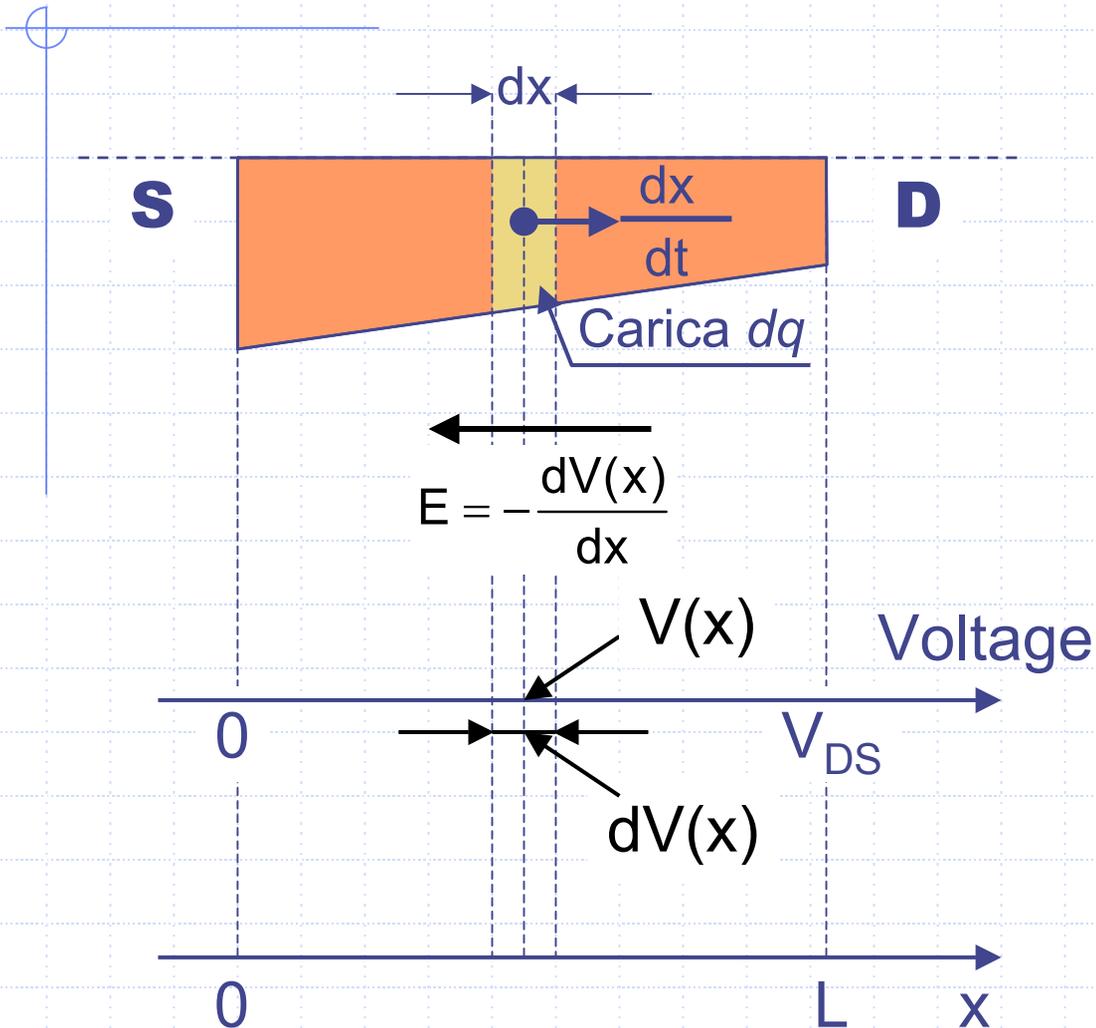
E-nMOSFET

Tensione al Drain elevate



E-nMOSFET

Calcolo delle caratteristiche I_D - V_{DS}



Condizioni:

$$V_{GS} > V_t$$

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

(zona lineare)

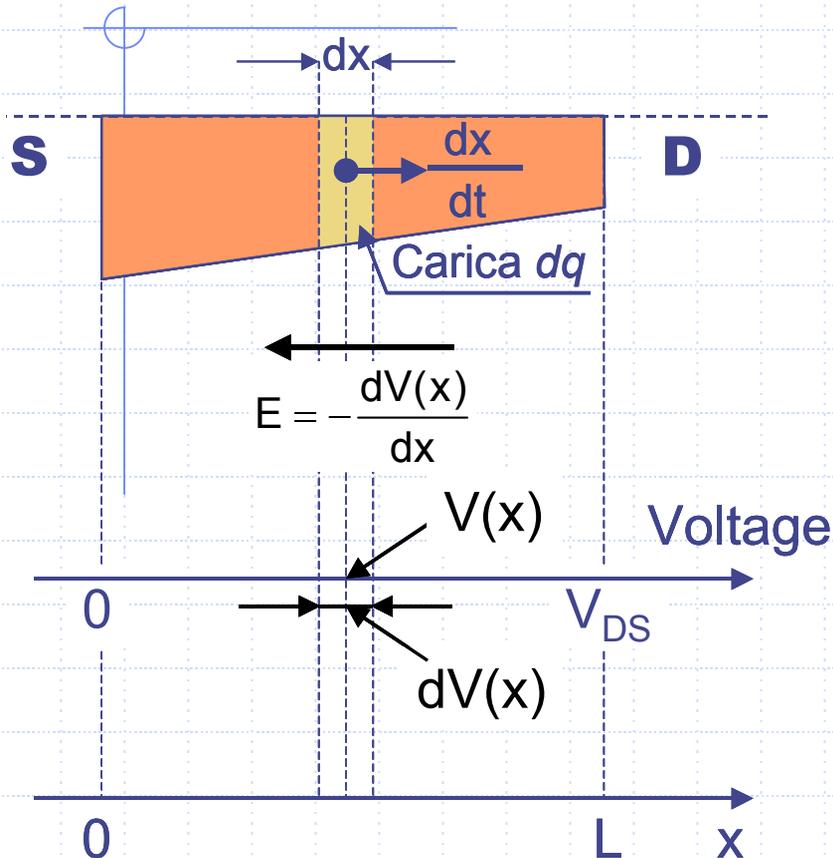
In dx la tensione tra gate e canale vale:

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

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

E-nMOSFET

Calcolo delle caratteristiche I_D - V_{DS}



La carica elettronica in dx vale:
$$dq(x) = -C_{OX} W dx [V_{GS} - V(x) - V_t]$$

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

Il campo elettrico E lungo il canale vale:

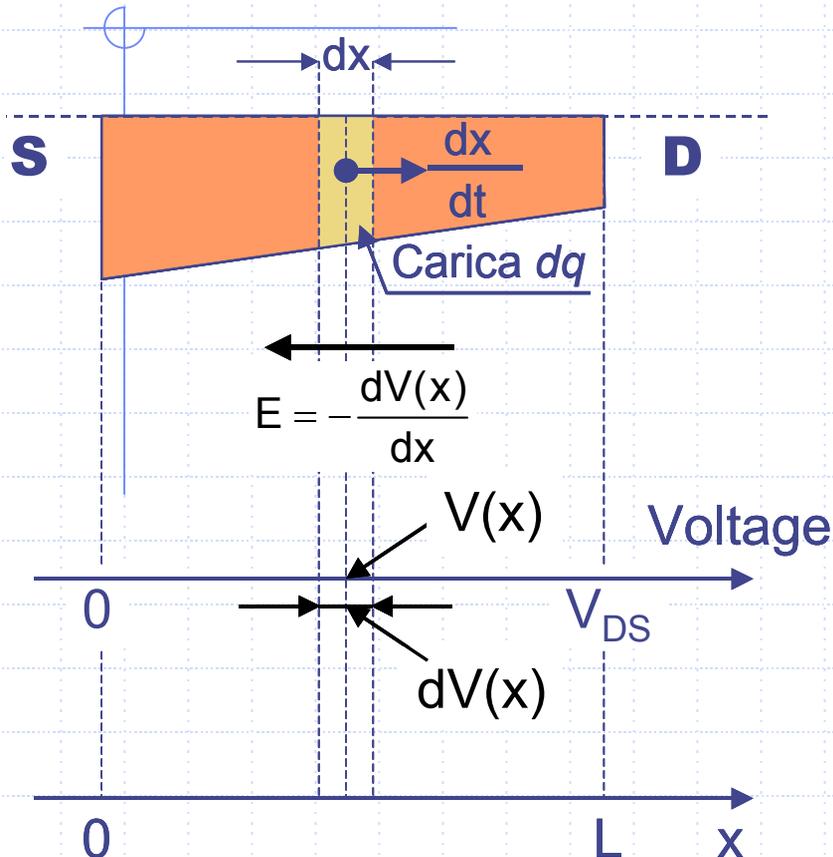
$$E = -\frac{dV(x)}{dx}$$

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 $\left(\frac{dq(x)}{dx}\right)$ per la velocità di deriva:

$$I = -\mu_n C_{OX} W [V_{GS} - V(x) - V_t] \frac{dV(x)}{dx}$$

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

si può quindi scrivere:

$$I_D dx = \mu_n C_{OX} W [V_{GS} - V(x) - V_t] dV(x)$$

E-nMOSFET

Calcolo delle caratteristiche I_D - V_{DS}

Integrando lungo il canale:

$$\int_0^L I_D dx = \int_0^{V_{DS}} \mu_n C_{OX} W [V_{GS} - V(x) - V_t] dV(x)$$

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

$$I_D = (\mu_n C_{OX}) \left(\frac{W}{L} \right) \left[(V_{GS} - V_t) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right]$$

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

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

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 $V_{DS} > V_{GS} - V_t$ la configurazione del canale non cambi e che quindi la corrente, per tali valori di tensione, sia pari a
alla corrente calcolata per $V_{DS} = V_{GS} - V_t$

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_t **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_t **negativa**), per svuotare il canale e spegnere il dispositivo.

Per il **D-nMOSFET**, valgono tutte le relazioni dell' **E-nMOSFET** con la sola differenza $V_t < 0$.

E e D -nMOSFET

In sintesi:

$$V_{GS} < V_t$$

Dispositivo **spento**

$$I_D = 0$$

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

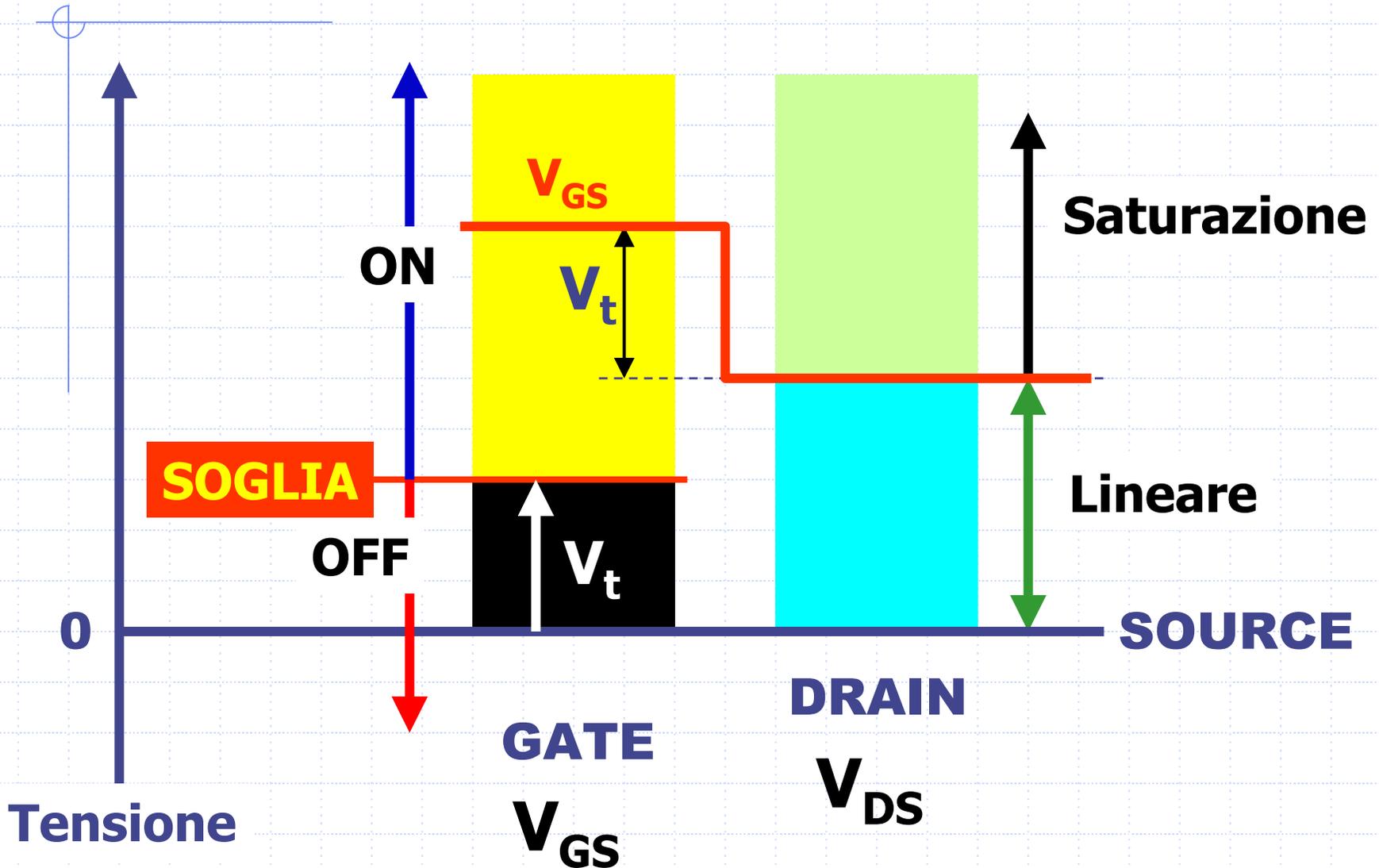
$$I_D = k'_n \left(\frac{W}{L} \right) \left[(V_{GS} - V_t) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right]$$

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

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

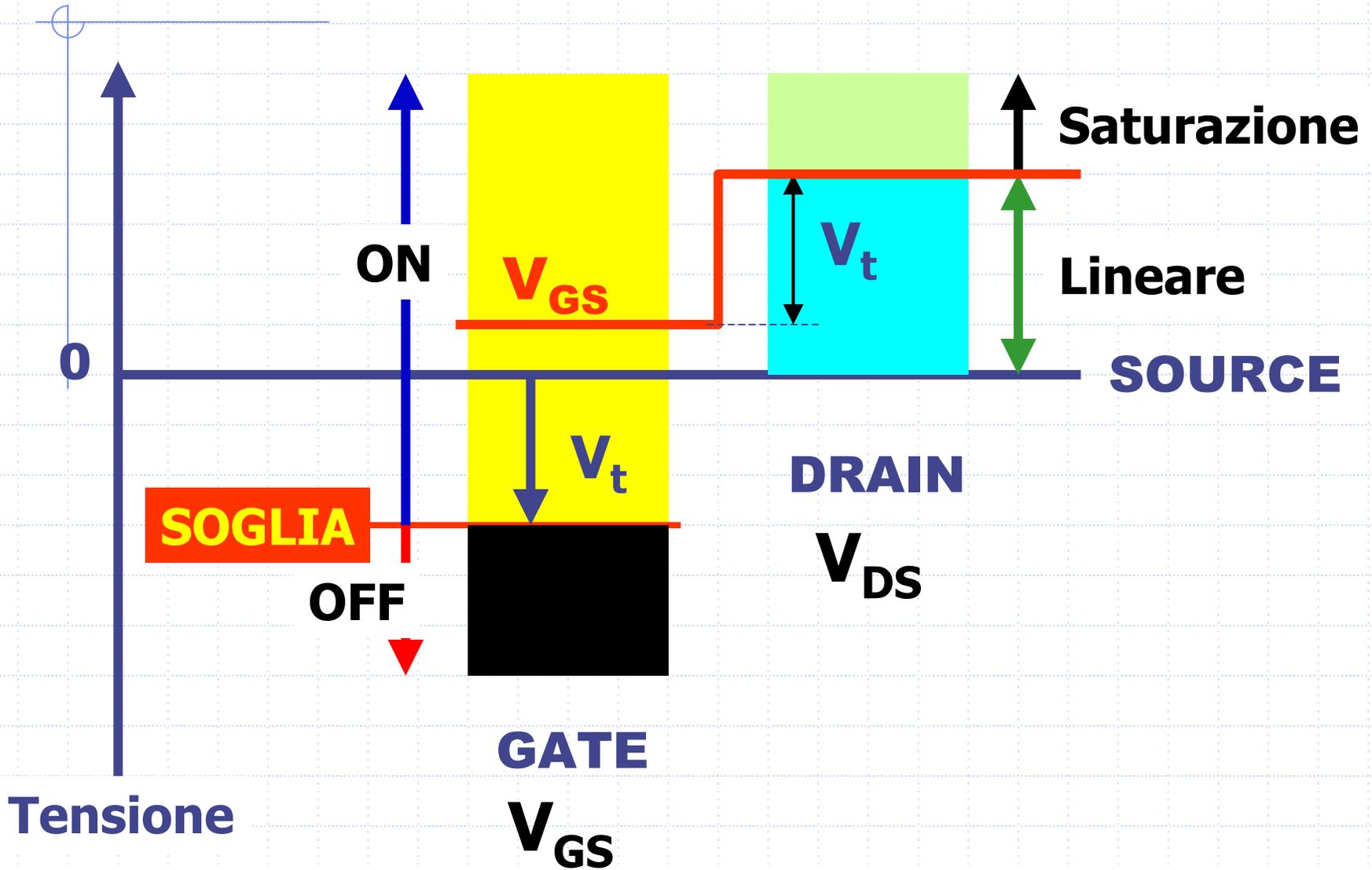
E-nMOSFET

Graficamente:



D-nMOSFET

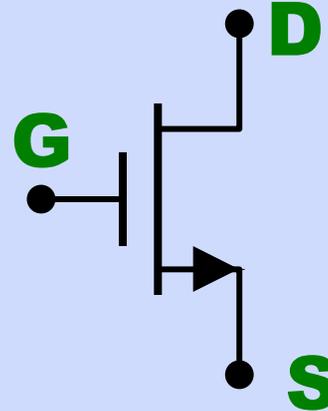
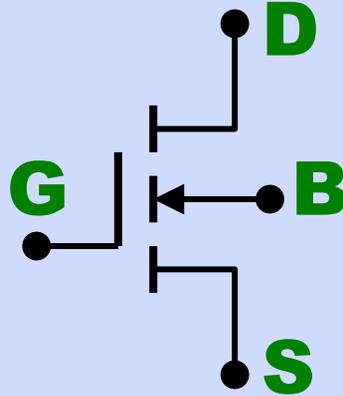
Graficamente:



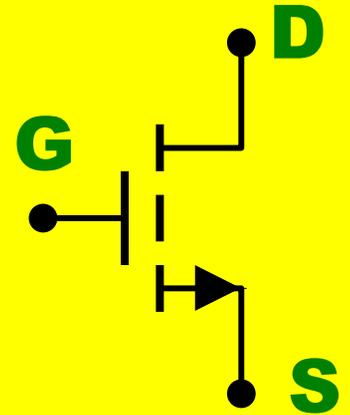
E e D -nMOSFET

Simboli circuitali

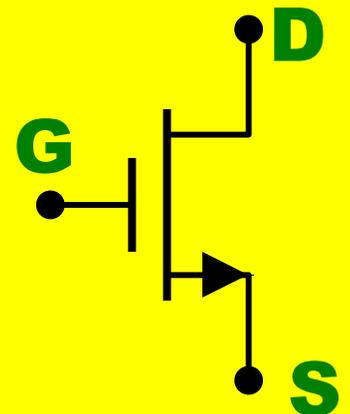
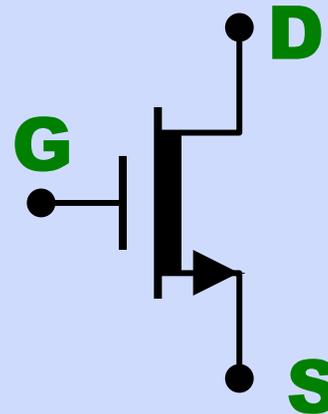
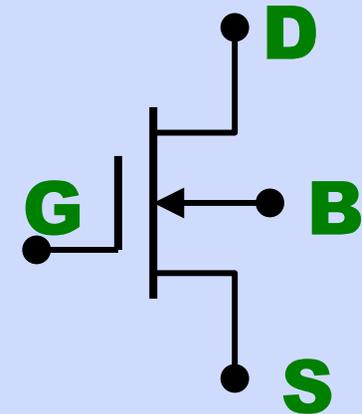
E-nMOSFET



Useremo questo

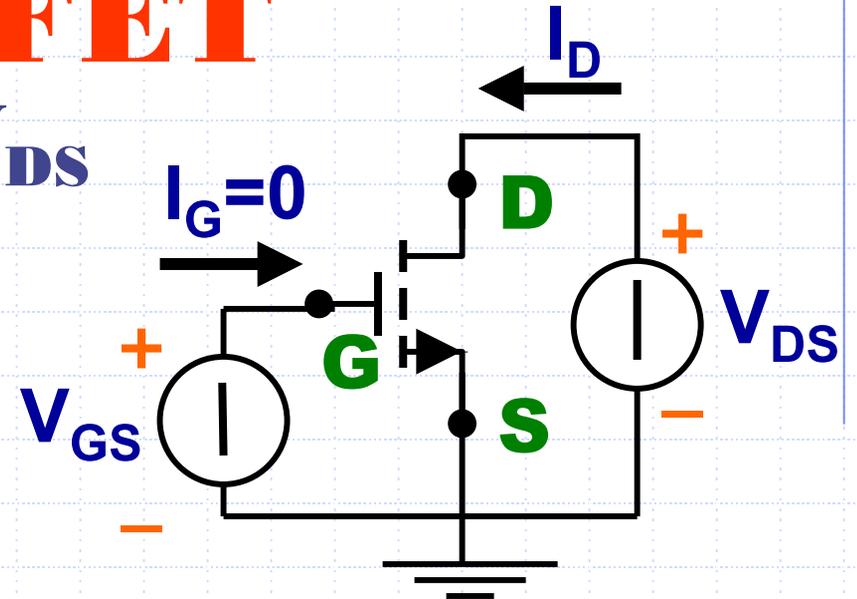
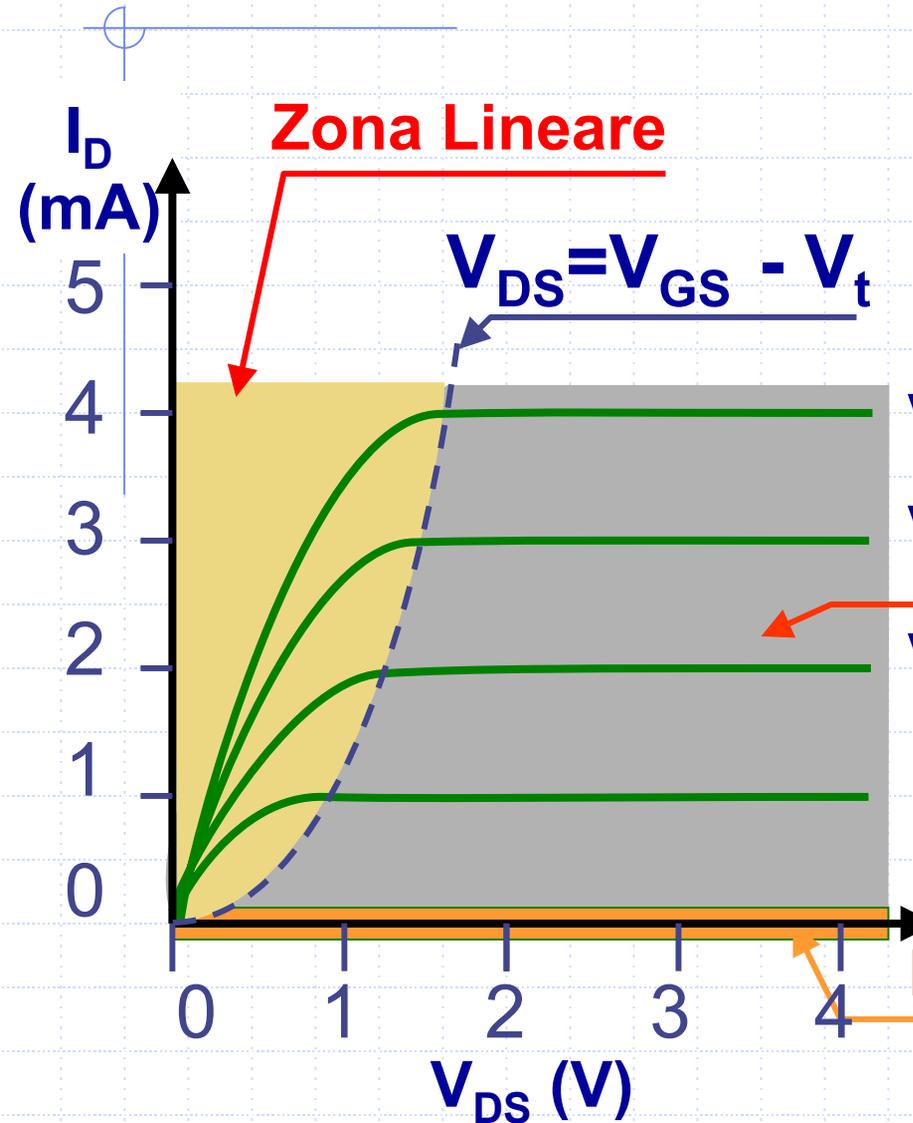


D-nMOSFET



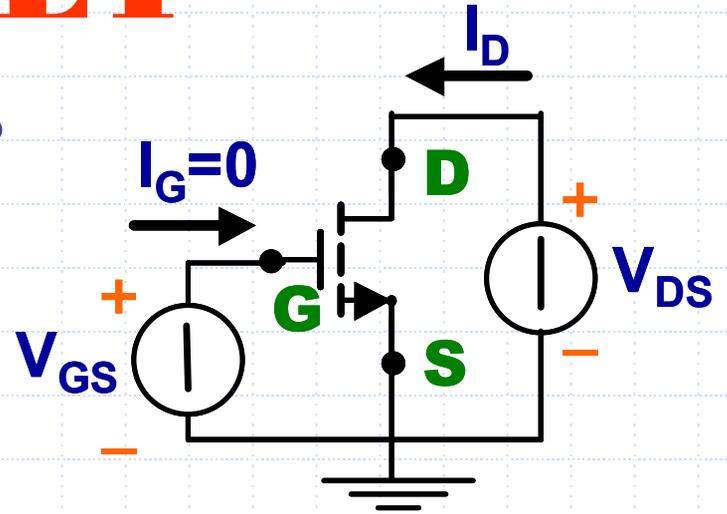
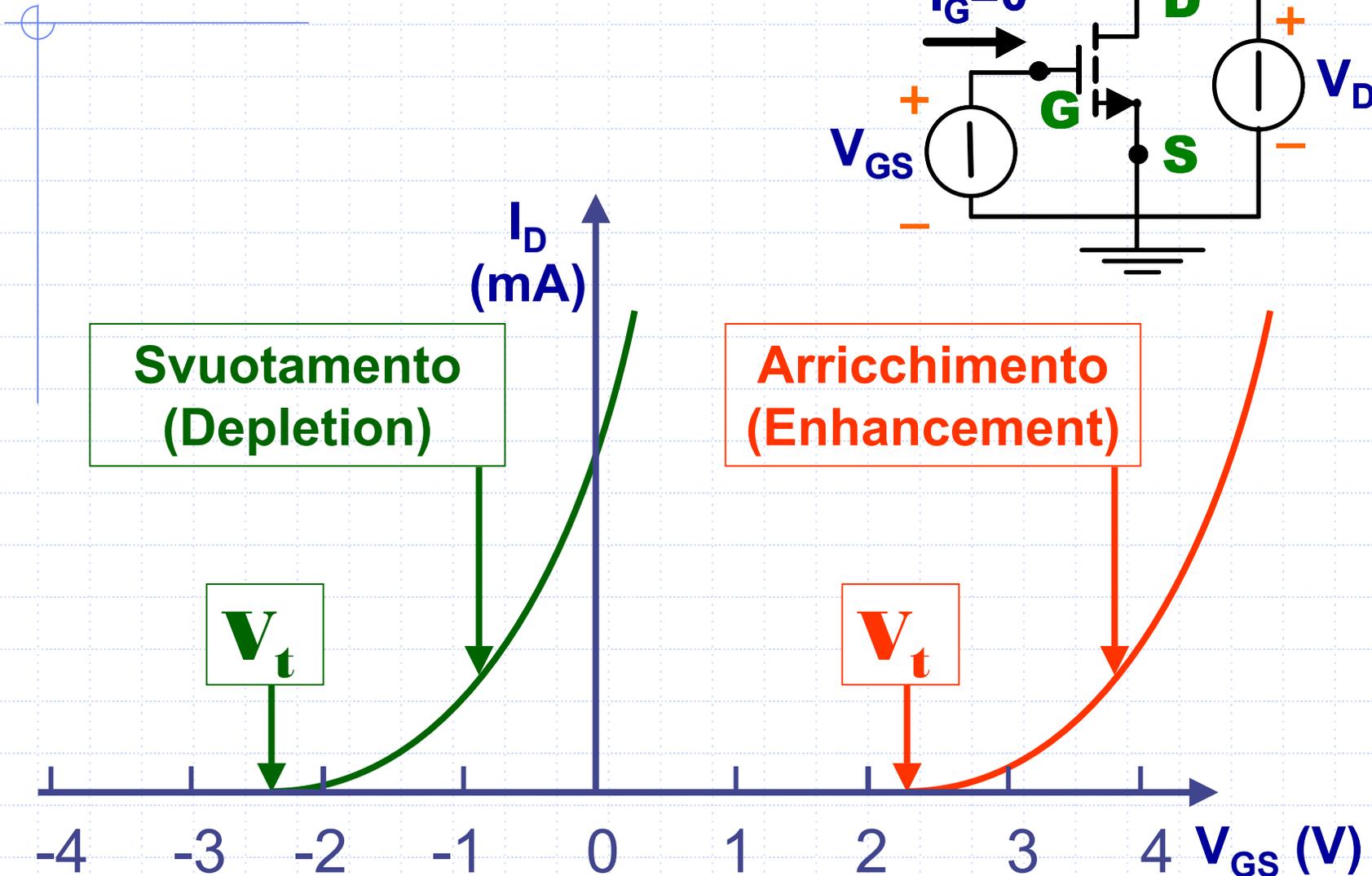
De E- nMOSFET

Caratteristiche I_D - V_{DS}



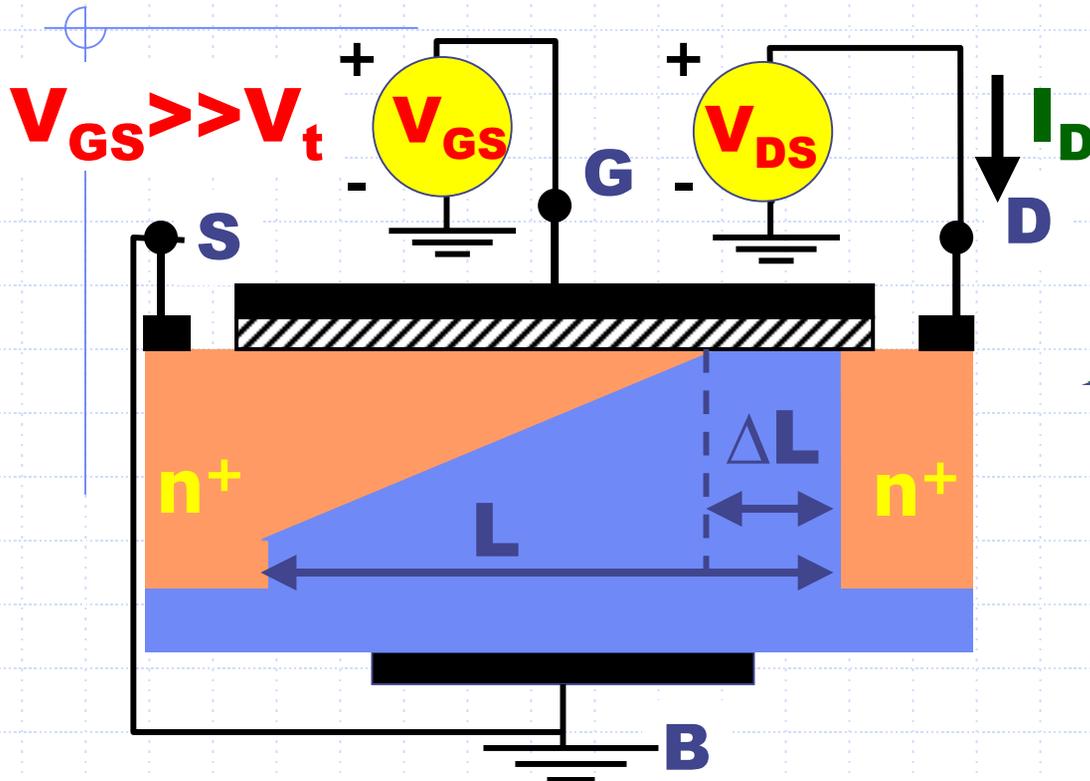
De E- nMOSFET

Caratteristiche I_D - V_{GS}

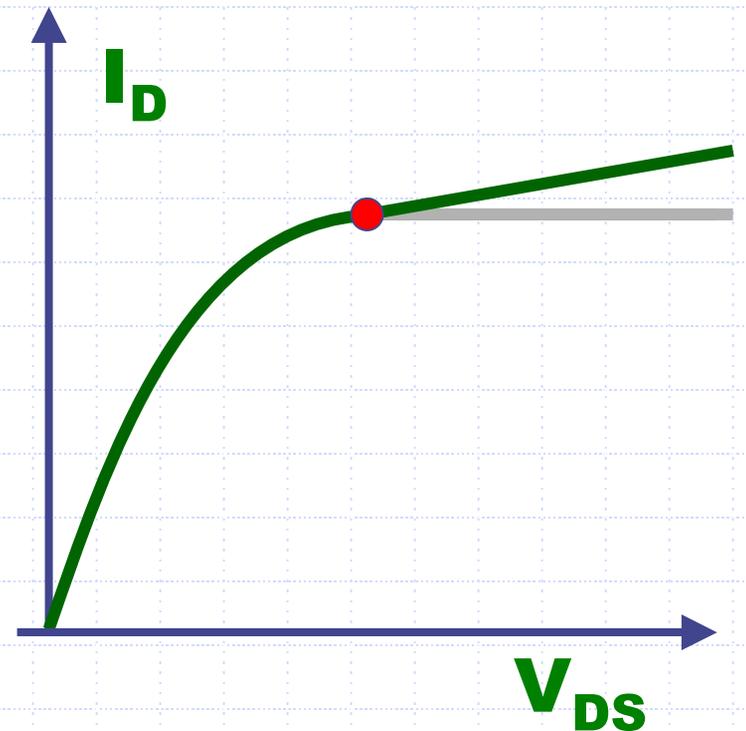
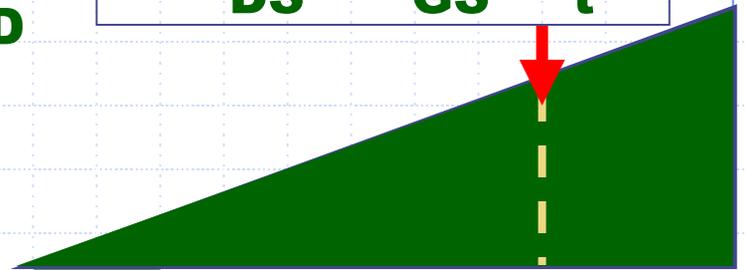


E-nMOSFET

Modulazione di lunghezza di canale



$$V_{DS} = V_{GS} - V_t$$



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

Se L cala, I_D aumenta!

E-nMOSFET

Modulazione di lunghezza di canale

Nell'analisi circuitale si tiene conto dell'effetto di **modulazione della lunghezza di canale**, considerando costante L e inserendo un nuovo parametro, λ :

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

Questo comporta una “resistenza di uscita” finita:

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

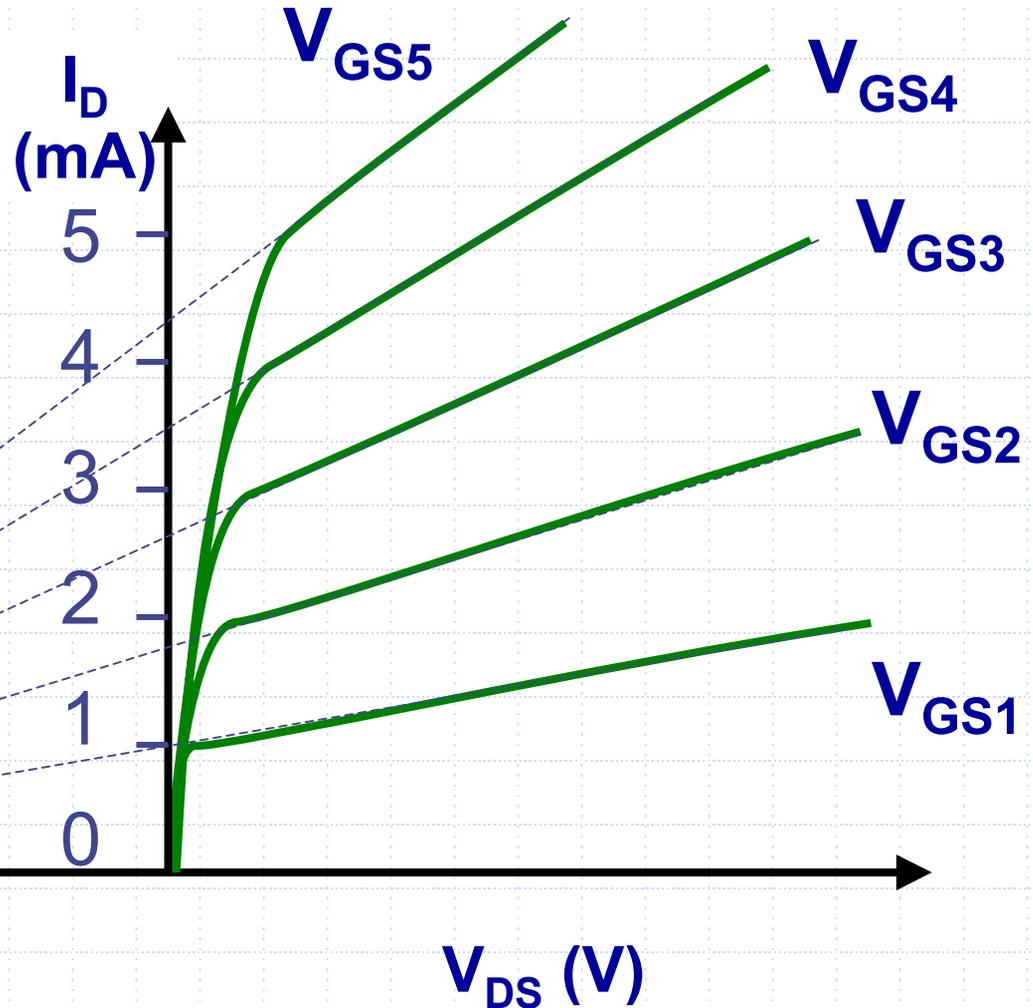
n-MOSFET

Modulazione di lunghezza di canale

$$r_0 = \frac{1}{\lambda I_D} = \frac{V_A}{I_D}$$

Simile alla
Tensione
Early nei bjt

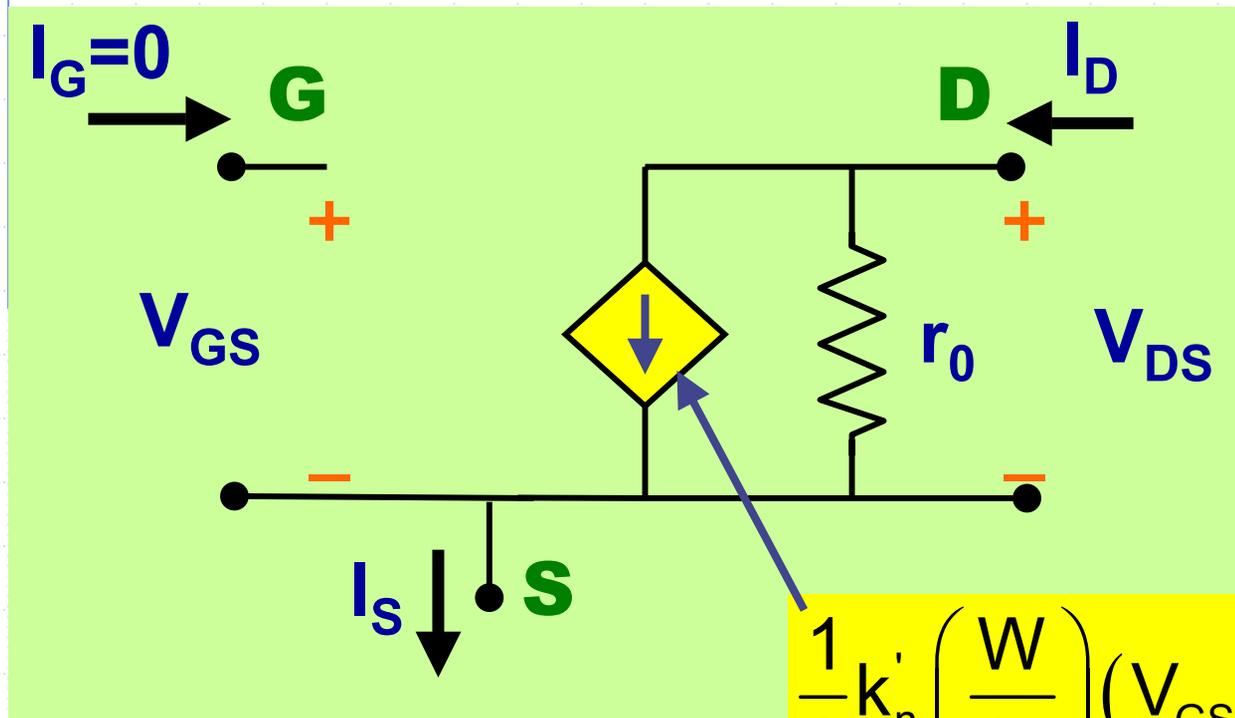
$$-V_A = -1/\lambda$$



n-MOSFET

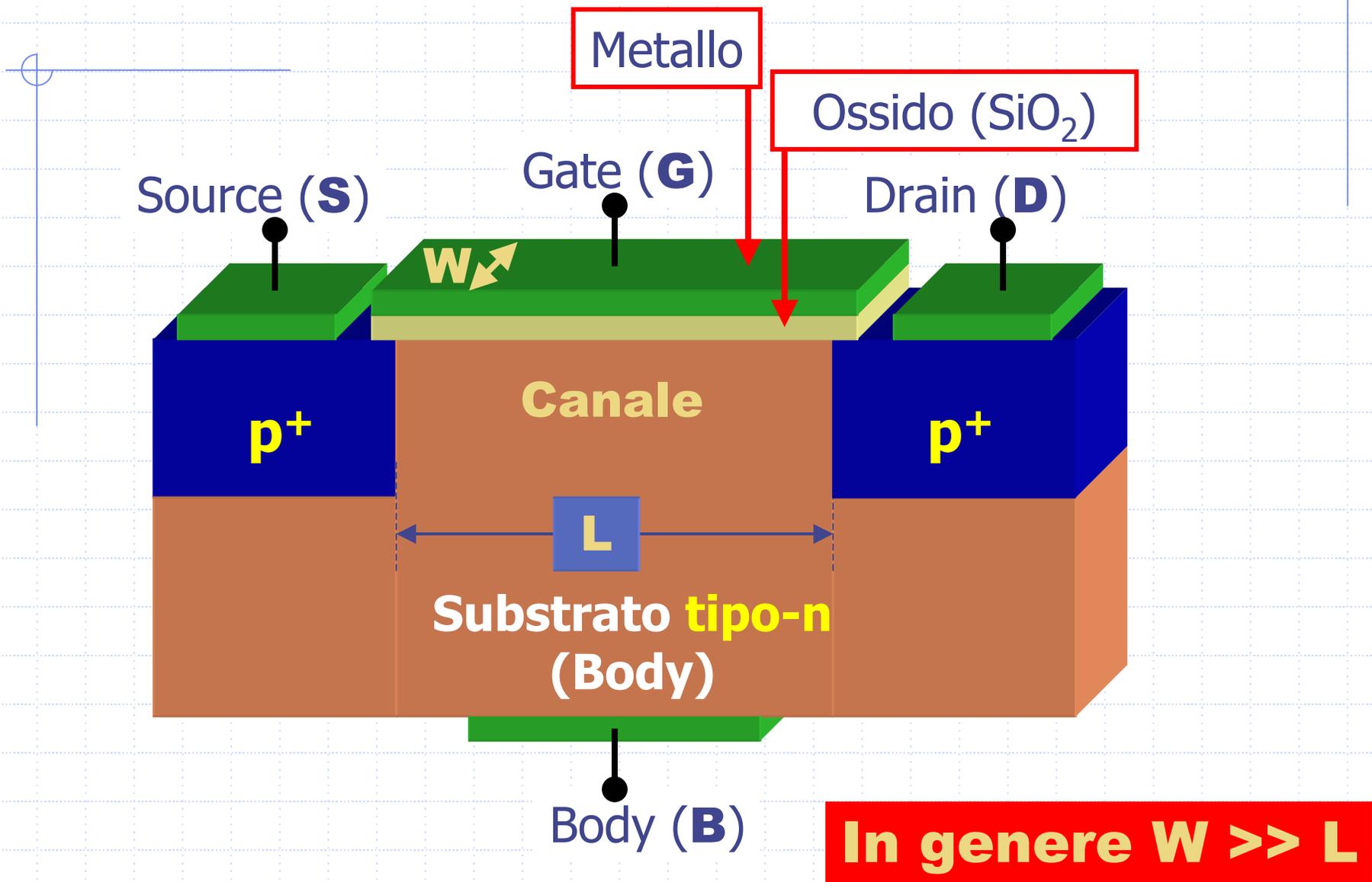
Modello circuitale

IN SATURAZIONE



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

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,

$V_{DS} < 0$

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

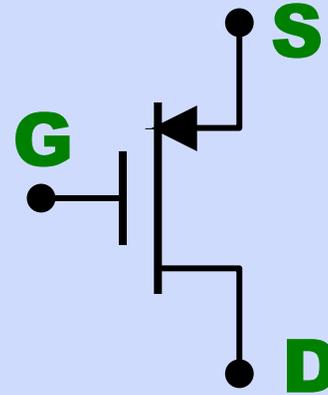
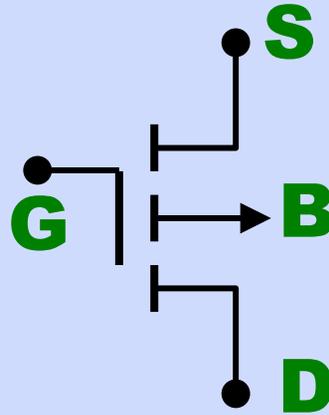
E-pMOSFET ad arricchimento $V_t < 0$

D-pMOSFET a svuotamento $V_t > 0$

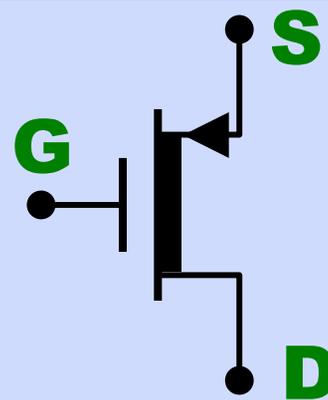
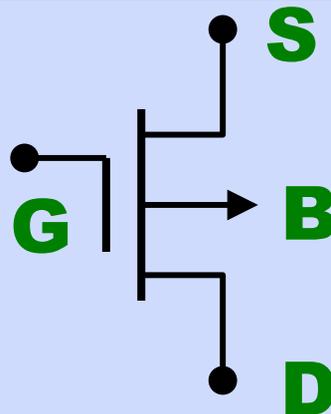
E e D -pMOSFET

Simboli circuitali

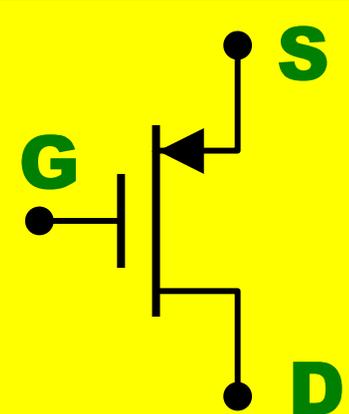
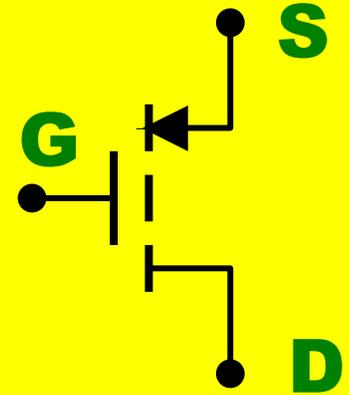
E-pMOSFET



D-pMOSFET

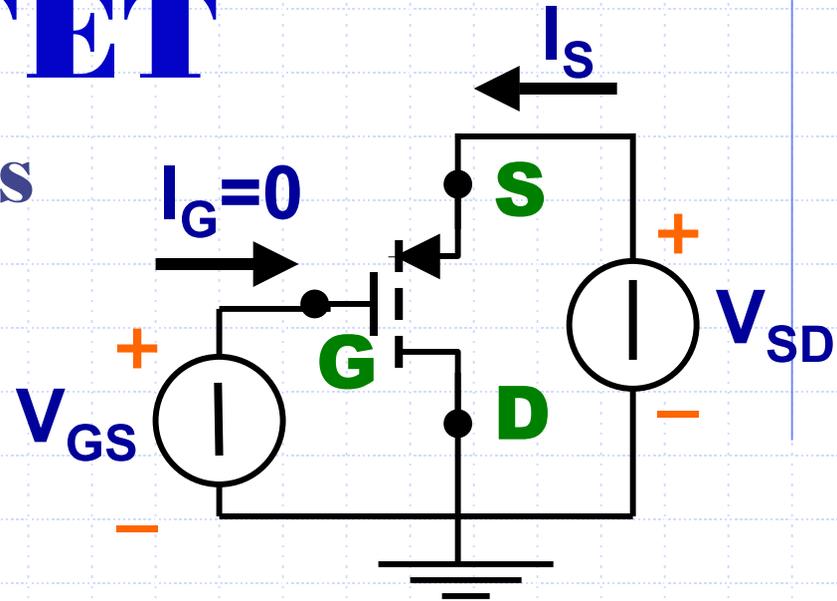
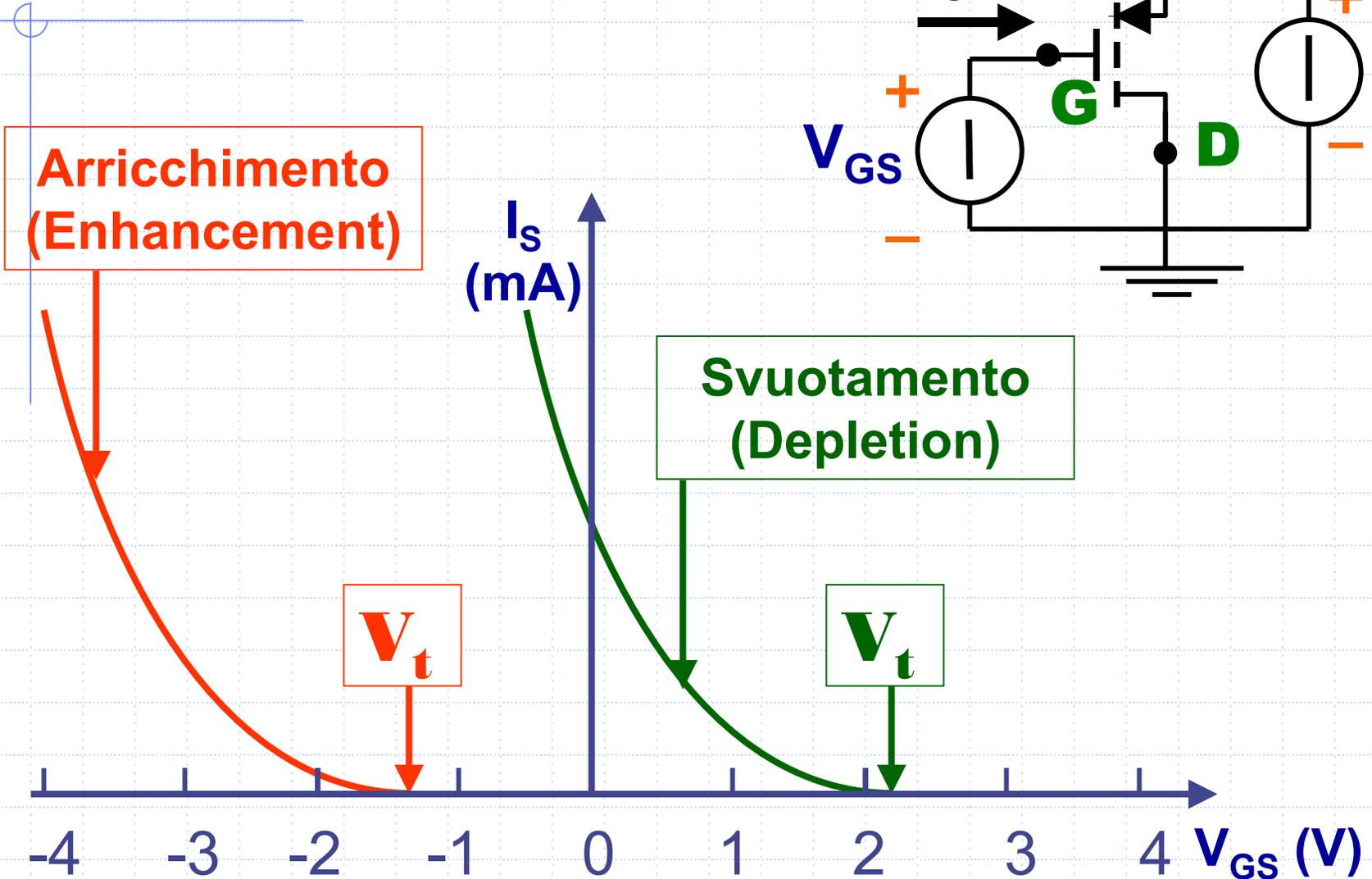


Useremo
questo



De E- pMOSFET

Caratteristiche $I_D - V_{GS}$



E e D - pMOSFET

$$V_{GS} > V_t$$

Dispositivo **spento**

$$I_S = 0$$

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

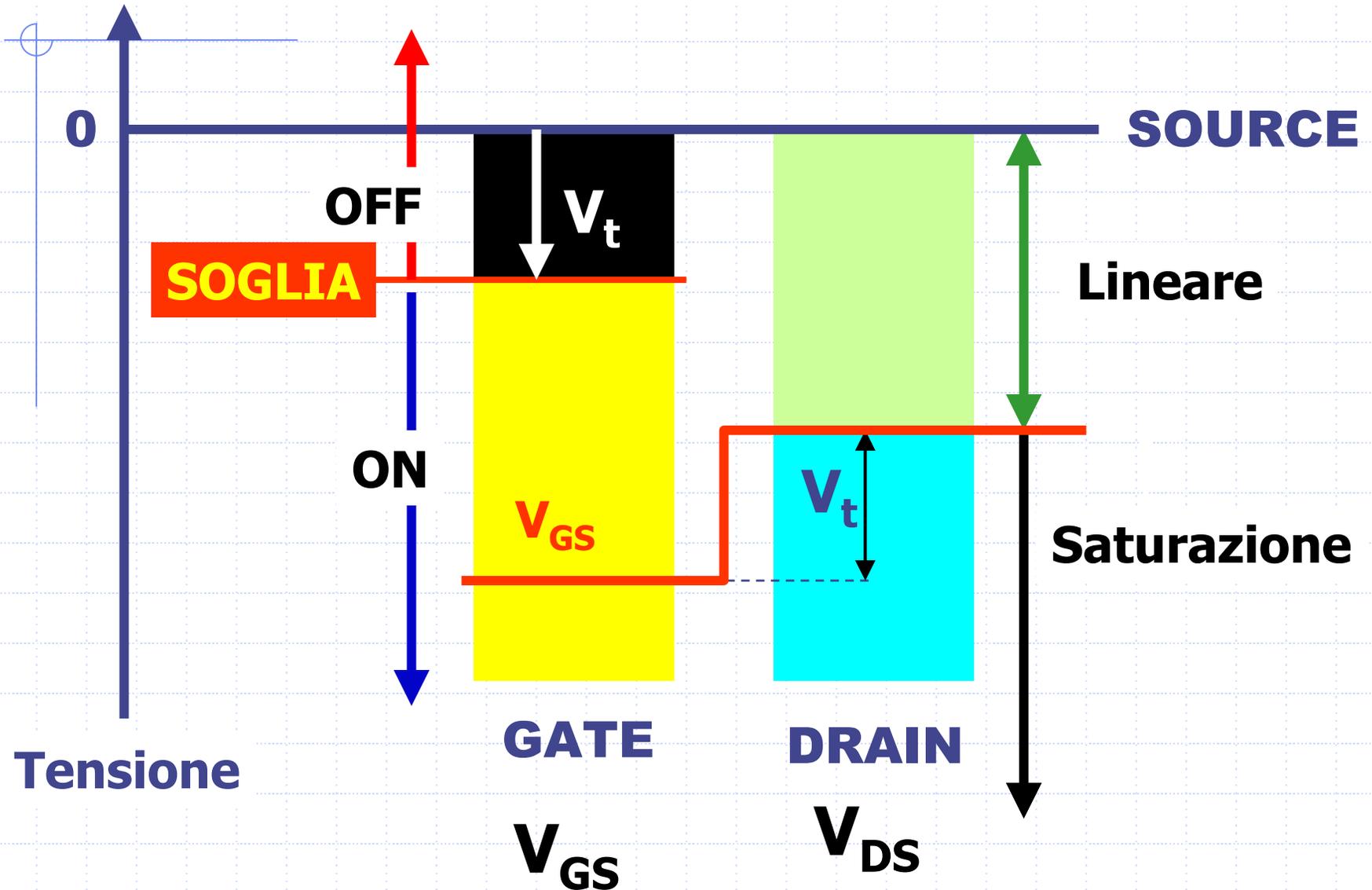
$$I_S = k'_n \left(\frac{W}{L} \right) \left[(V_{GS} - V_t) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right]$$

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

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

E-pMOSFET

Graficamente:



D-pMOSFET

Graficamente:

