

# 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

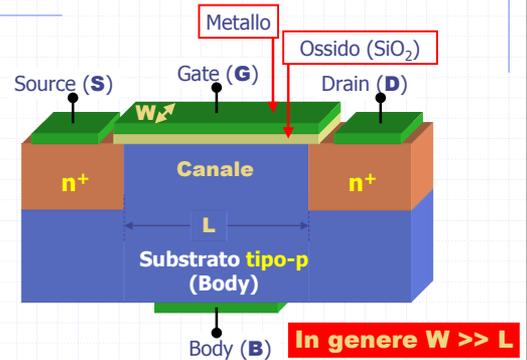
In questa parte iniziale studieremo il **MOSFET a canale n ad arricchimento** (o Enhancement n-channel MOSFET)

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)

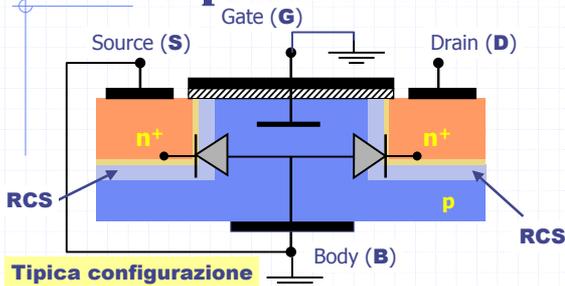
(saranno chiariti in seguito il significato di questi termini).

### E-nMOSFET



### E-nMOSFET

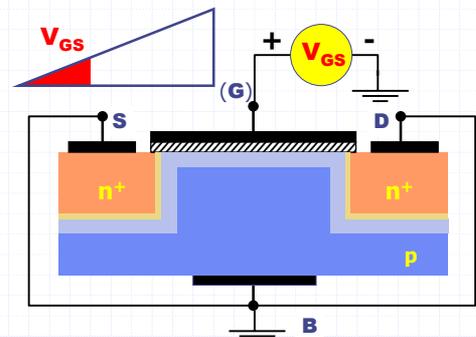
#### Assenza di polarizzazione al Gate



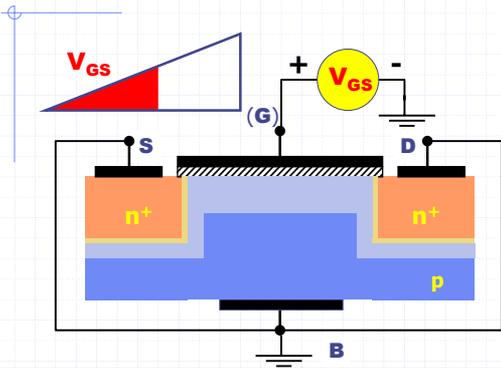
Per ogni valore di  $V_{DS} \geq 0$ , non c'è corrente

### E-nMOSFET

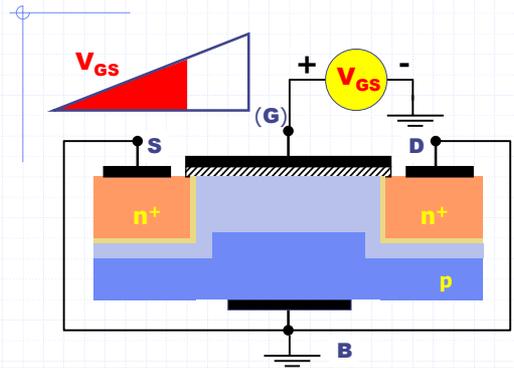
#### Tensione al Gate



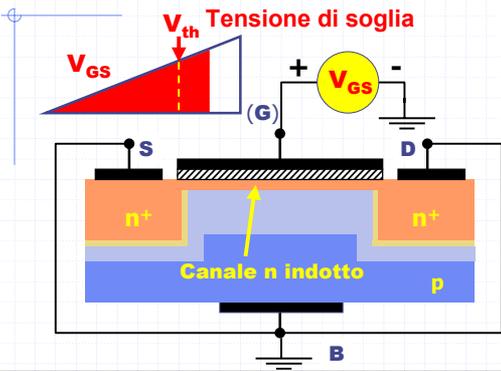
## n-MOSFET Tensione al Gate



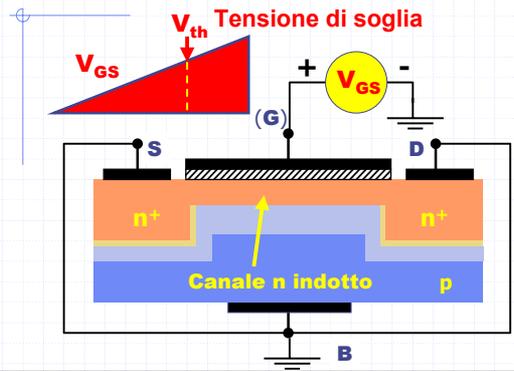
## E-nMOSFET Tensione al Gate



## E-nMOSFET Tensione al Gate



## E-nMOSFET Tensione al Gate



## E-nMOSFET Tensione al Gate

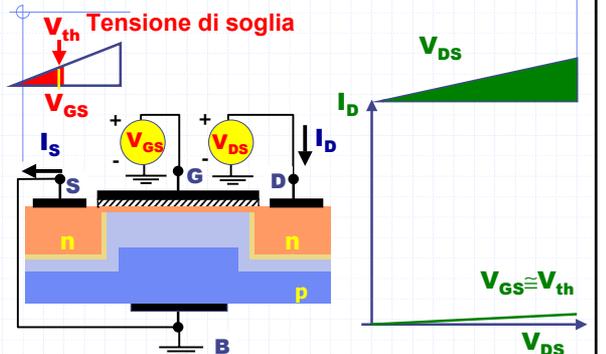
Applicando una tensione positiva al GATE, inizialmente si "respingono" le lacune del semiconduttore "p" e si ha un allargamento della RCS sotto il gate;

Oltre una certa tensione di gate, detta **tensione di soglia**,  $V_{th}$ . 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**.

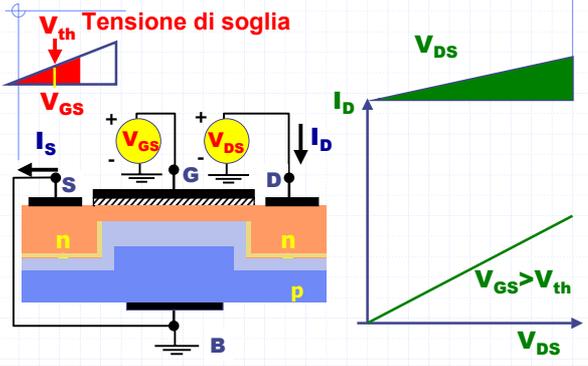
NOTA: Tale descrizione (concettualmente corretta) ha motivazioni fisiche qui non illustrate. Si rimanda al corso di microelettronica.

## E-nMOSFET Tensione al Drain (piccola) con $V_{GS} > V_{th}$



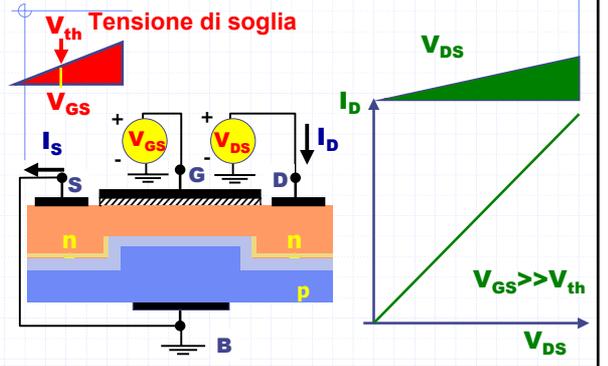
## E-nMOSFET

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  $V_{GS} > V_{th}$

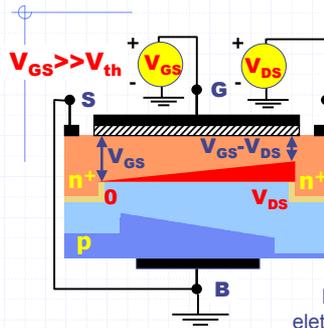
Applicando una tensione positiva (**piccola**) al drain, con al gate una tensione positiva maggiore della **tensione di soglia**,  $V_{th}$ , si ha flusso di elettroni (spinti dal campo elettrico) che danno luogo ad una corrente di drain  $I_D$ .

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:

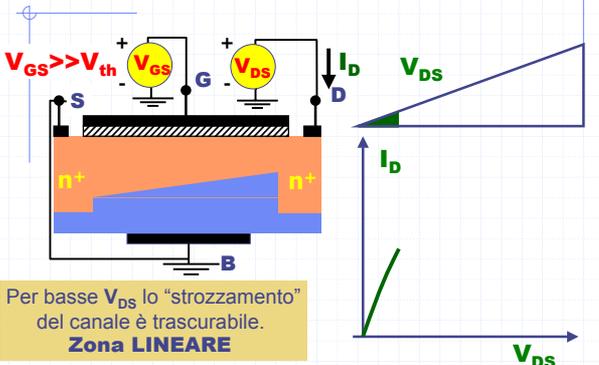
Applicando tensione al Drain, si induce una caduta di **tensione lineare** nel canale.

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.

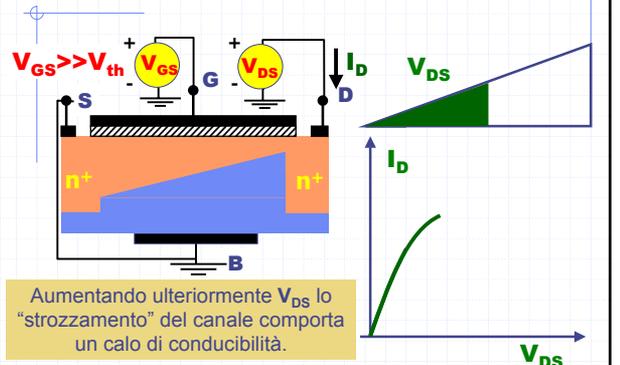
## E-nMOSFET

Tensione al Drain **elevata**



## E-nMOSFET

Tensione al Drain **elevata**



## E-nMOSFET

### Tensione al Drain elevata

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

Per  $V_{DS} = V_{GS} - V_{th}$ , il canale è completamente "strozzato" (pinched-off) e la  $I_D$  satura.

## E-nMOSFET

### Tensione al Drain elevata

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

Per  $V_{DS} > V_{GS} - V_{th}$ , la  $I_D$  rimane costante (vedremo più avanti che non è proprio vero).

## 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  $V(x) \in [0 + V_{DS}]$

## 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  $V_{DS} = V_{GS} - V_{th}$  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**  

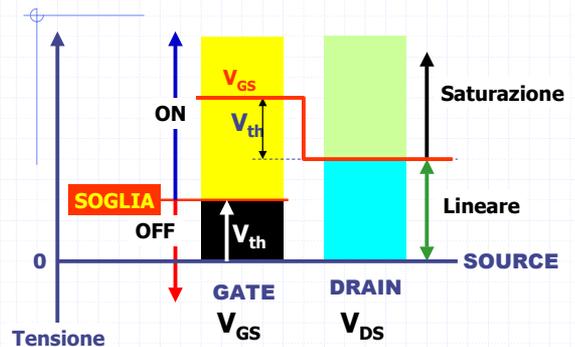
$$I_D = k'_n \frac{W}{L} \left[ (V_{GS} - V_{th})V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

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

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

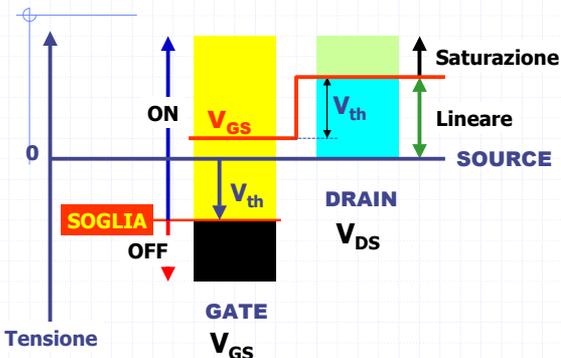
# E-nMOSFET

## Graficamente:



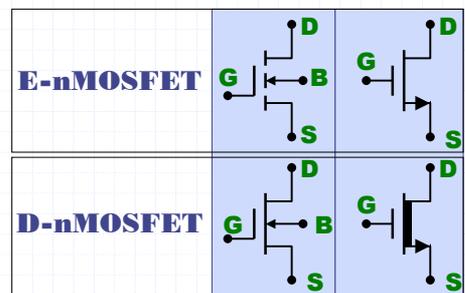
# D-nMOSFET

## Graficamente:



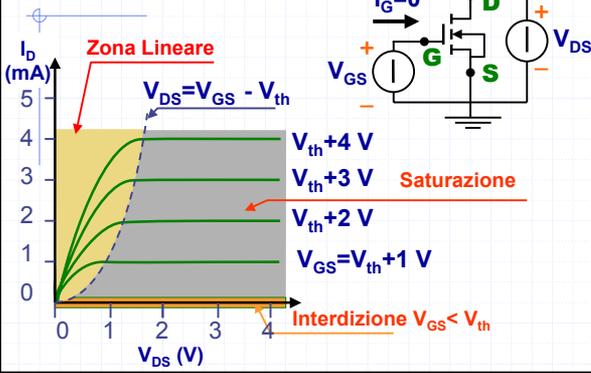
# E e D -nMOSFET

## Simboli circuitali



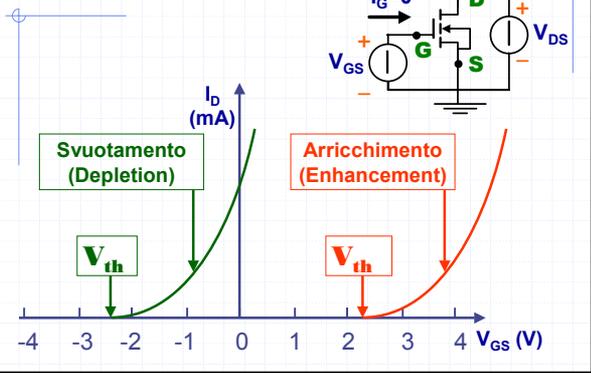
# D e E- nMOSFET

## Caratteristiche $I_D-V_{DS}$



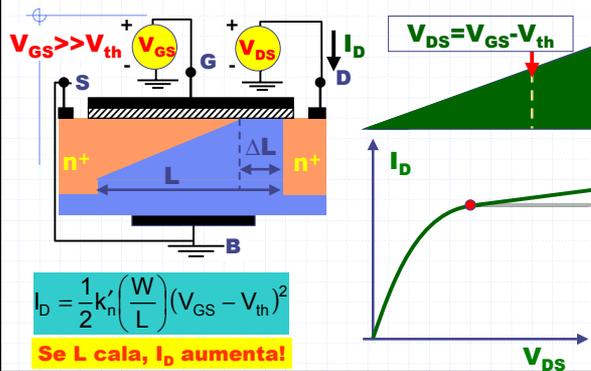
# D e E- nMOSFET

## 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,  $\lambda$ :

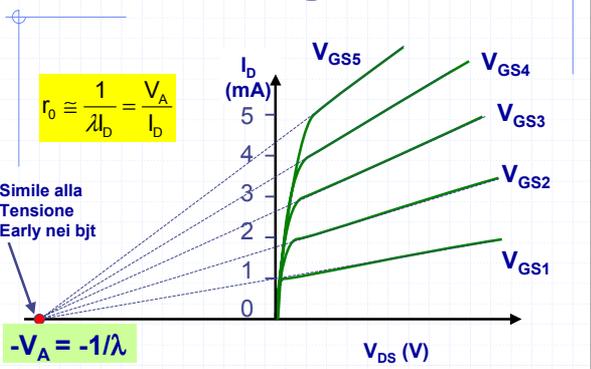
$$I_D = \frac{1}{2} k_n' \left( \frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_{th})^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

Questo comporta una "resistenza di uscita" finita:

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

# n-MOSFET

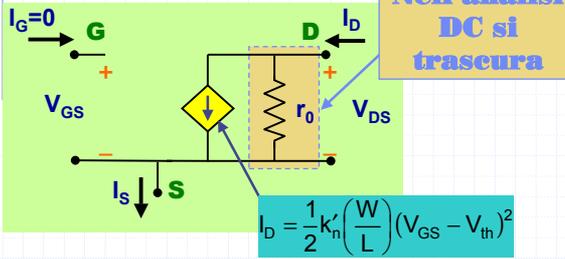
## Modulazione di lunghezza di canale



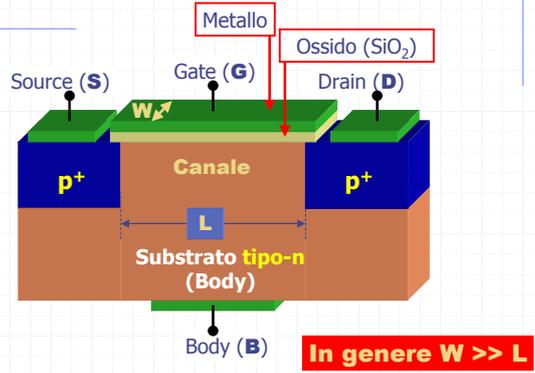
# n-MOSFET

## Modello circuitale

**IN SATURAZIONE**



# pMOSFET



# pMOSFET

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

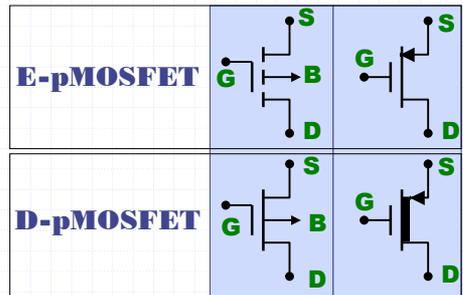
I versi delle tensioni e delle correnti sono invertiti:

- $I_D$  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  $V_{th} > 0$

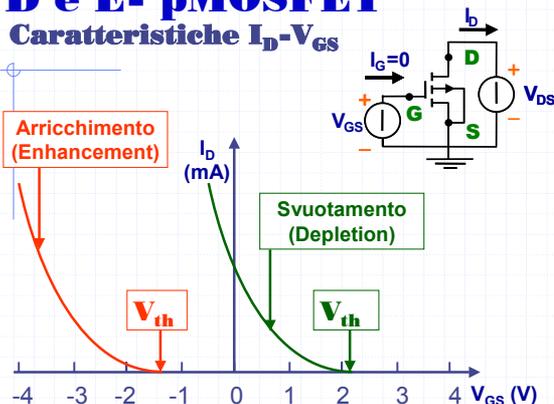
# E e D -pMOSFET

## Simboli circuitali



# 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**

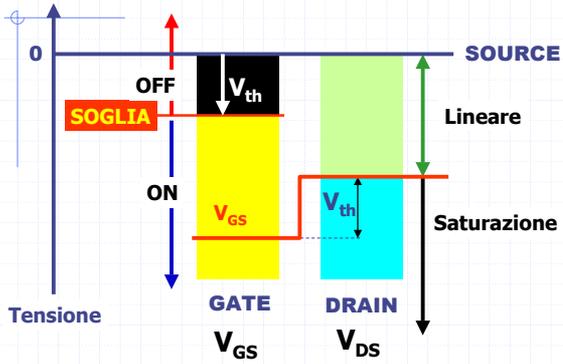
$$I_D = k'_p \frac{W}{L} \left[ (V_{GS} - V_{th}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

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

