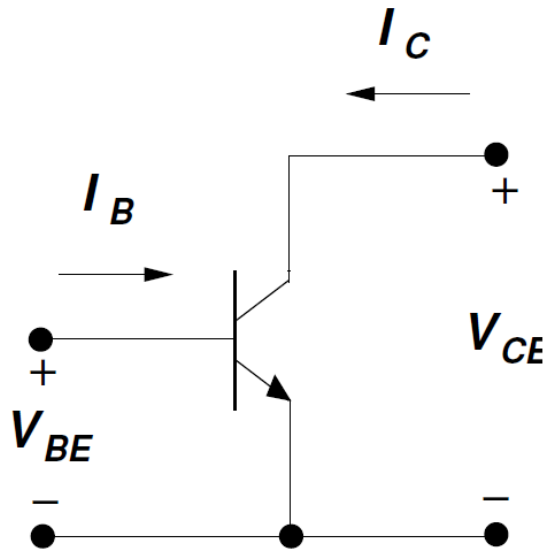


# Elettronica Digitale

## A.A. 2020-2021

Lezione 22/03/2021

# Transistore Bipolare (BJT) – Caratteristiche a emettitore comune

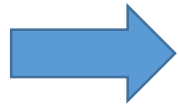


$$\begin{cases} I_E = -I_{ES} \left( \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right) + \alpha_R I_{CS} \left( \exp\left(\frac{V_{BC}}{V_T}\right) - 1 \right) \\ I_C = +\alpha_F I_{ES} \left( \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right) - I_{CS} \left( \exp\left(\frac{V_{BC}}{V_T}\right) - 1 \right) \\ I_B = -I_E - I_C \end{cases}$$

Zona attiva diretta

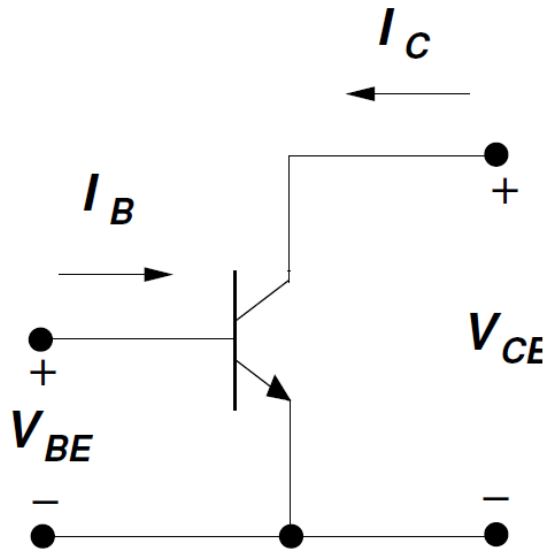
$$V_{BE} \gg V_T$$

$$V_{BC} \ll -V_T$$

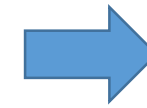


$$\begin{cases} I_E \approx -I_{ES} \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - \alpha_R I_{CS} \approx -I_{ES} \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) \\ I_C \approx +\alpha_F I_{ES} \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) + I_{CS} \approx \alpha_F I_{ES} \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) \end{cases}$$

# Transistore Bipolare (BJT) – Caratteristiche a emettitore comune

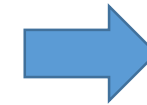


$$\begin{cases} I_E \approx -I_{ES} \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) \\ I_C \approx \alpha_F I_{ES} \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) \end{cases}$$



$$I_C \approx -\alpha_F I_E$$

$$I_B = -I_E - I_C = I_C \frac{1 - \alpha_F}{\alpha_F}$$



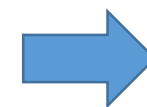
$$I_C = \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F} I_B = \beta_F I_B$$

Zona attiva diretta

$$V_{BE} \gg V_T$$

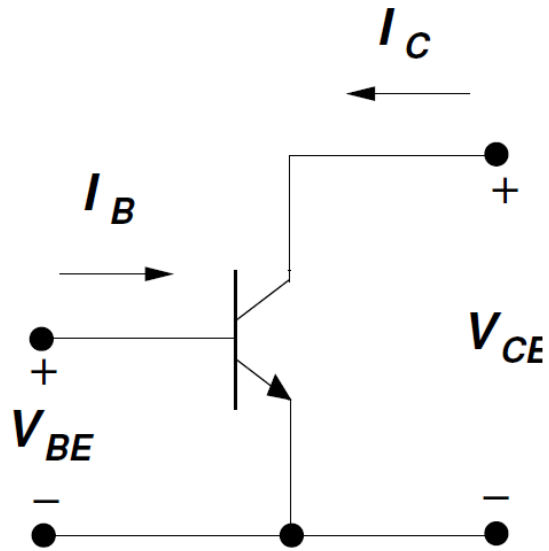
$$V_{BC} \ll -V_T$$

$$I_B = \frac{1 - \alpha_F}{\alpha_F} \alpha_F I_{ES} \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right)$$



$$I_B = (1 - \alpha_F) I_{ES} \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right)$$

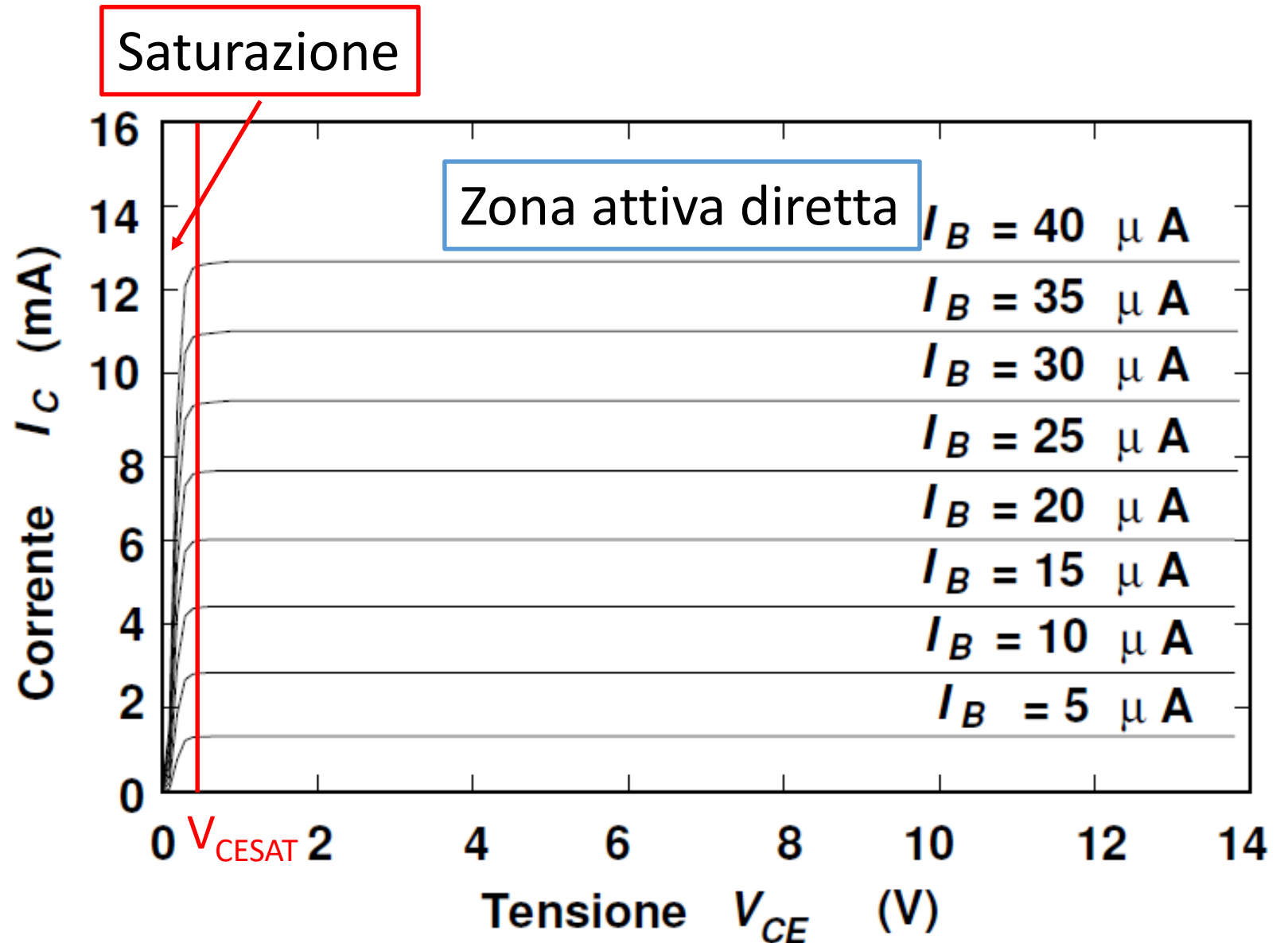
# Transistore Bipolare (BJT) – Caratteristiche a emettitore comune



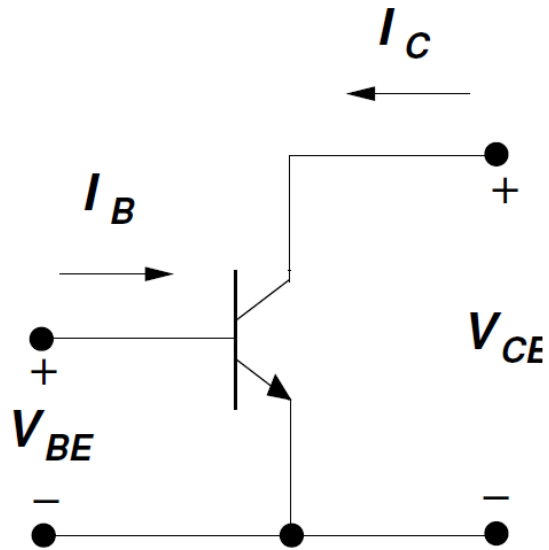
Zona attiva diretta

$$I_C \approx \beta_F I_B$$

$$50 < \beta_F < 500$$



# Transistore Bipolare (BJT) – Caratteristiche a emettitore comune



Saturazione

$$\begin{cases} V_{CE} = V_{CB} + V_{BE} \\ V_{BE} = V_{\gamma} = 0.7 \text{ V} \end{cases} \Rightarrow V_{CB} = V_{CE} - 0.7$$
$$V_{BC} = 0.7 - V_{CE}$$

$$V_{CE} \leq 0.3 \div 0.4 \text{ V} \Rightarrow V_{BC} \geq 0.3 \div 0.4 \text{ V}$$



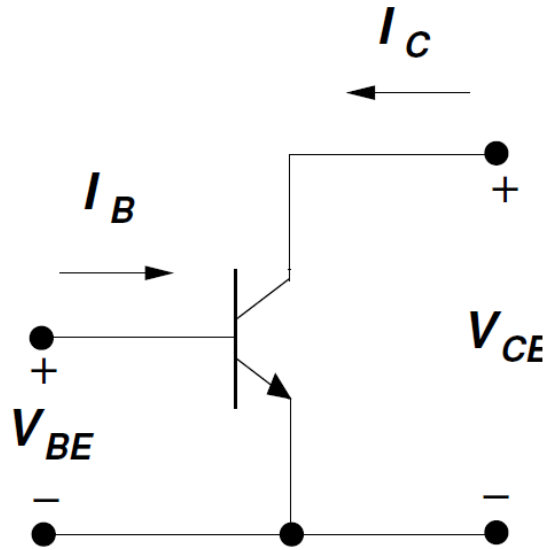
Giunzione "BC" polarizzata direttamente

$$V_{CE} \leq V_{CESat} = 0.1 \div 0.25 \text{ V}$$



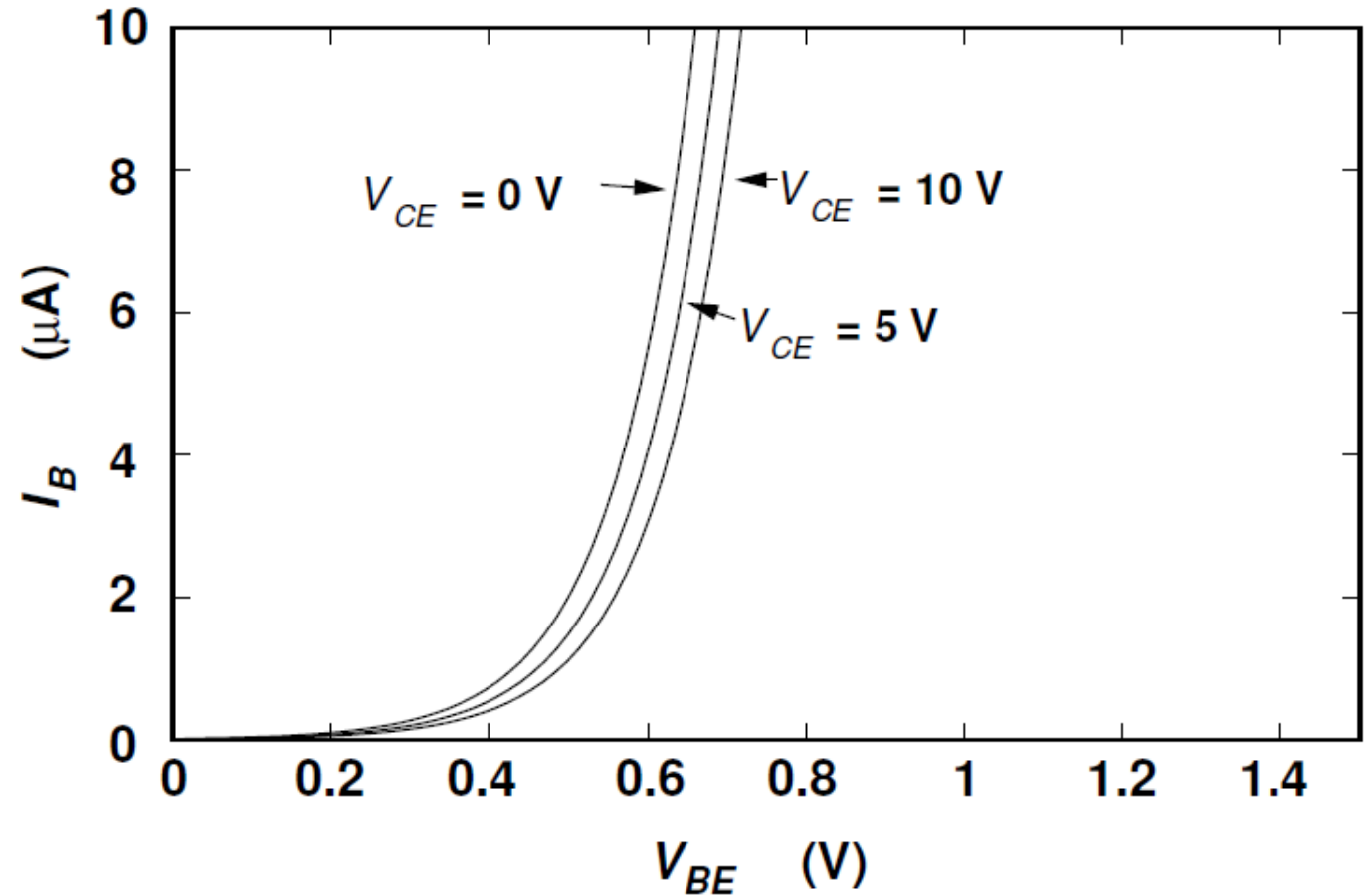
Le caratteristiche collassano l'una sull'altra e il BJT è assimilabile a un interruttore chiuso

# Transistore Bipolare (BJT) – Caratteristiche a emettitore comune

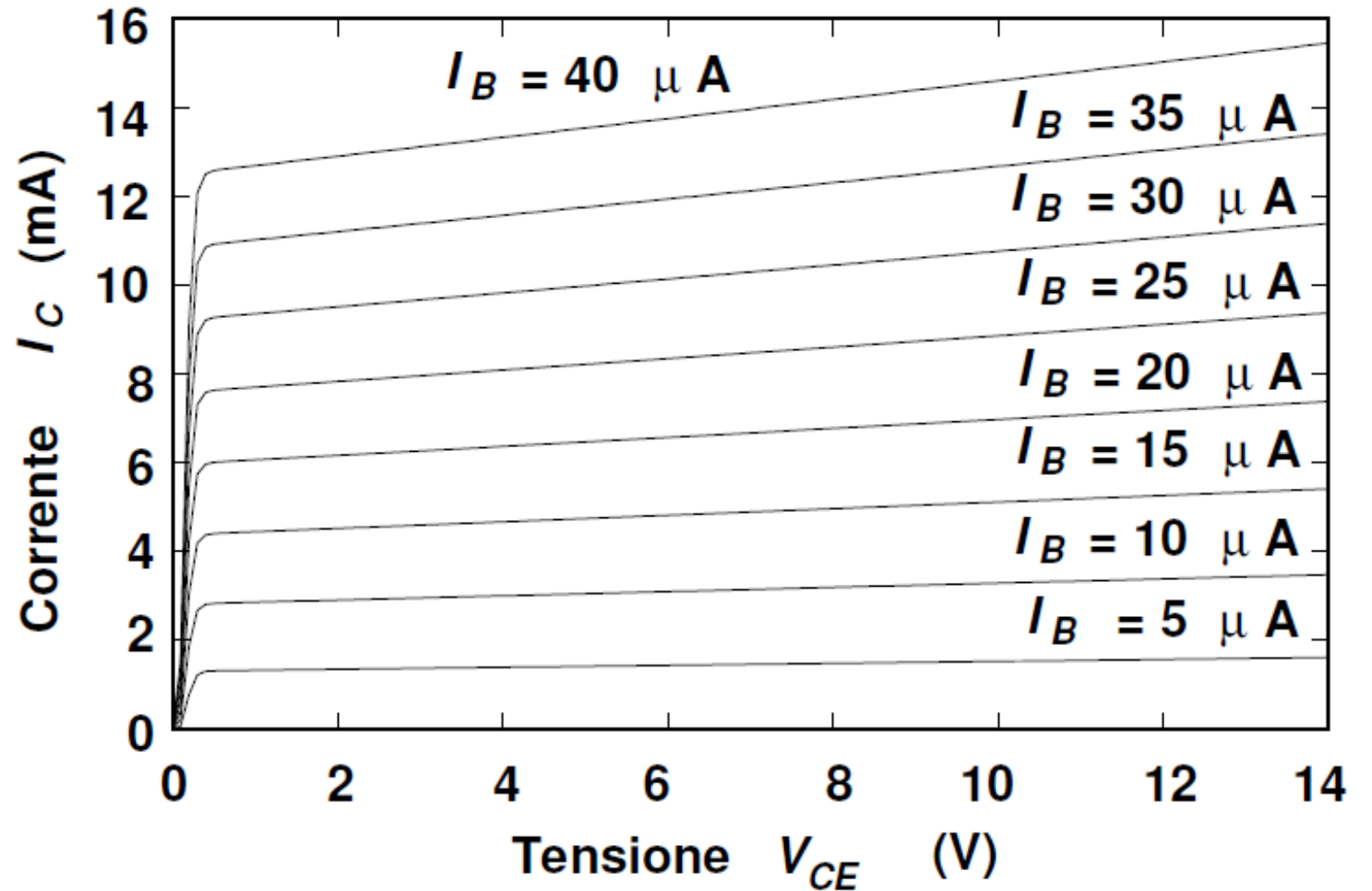
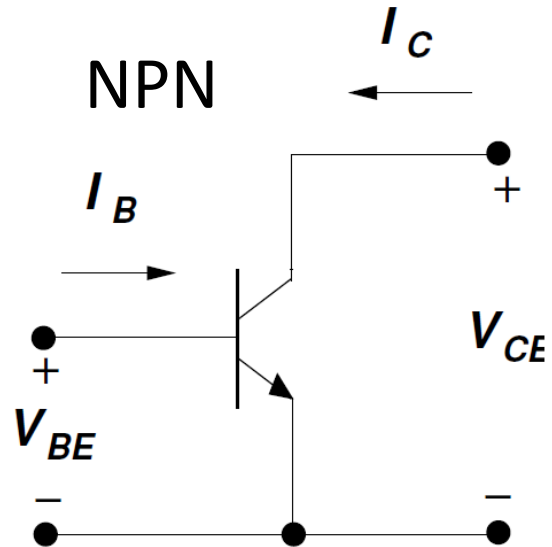


Zona attiva diretta

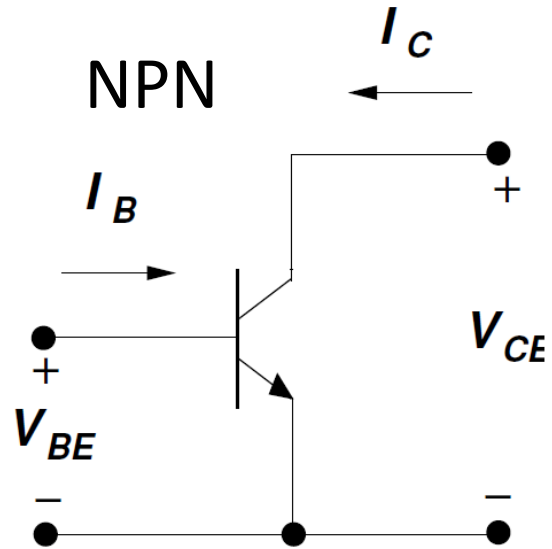
$$I_B \approx (1 - \alpha_F) I_{ES} \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right)$$



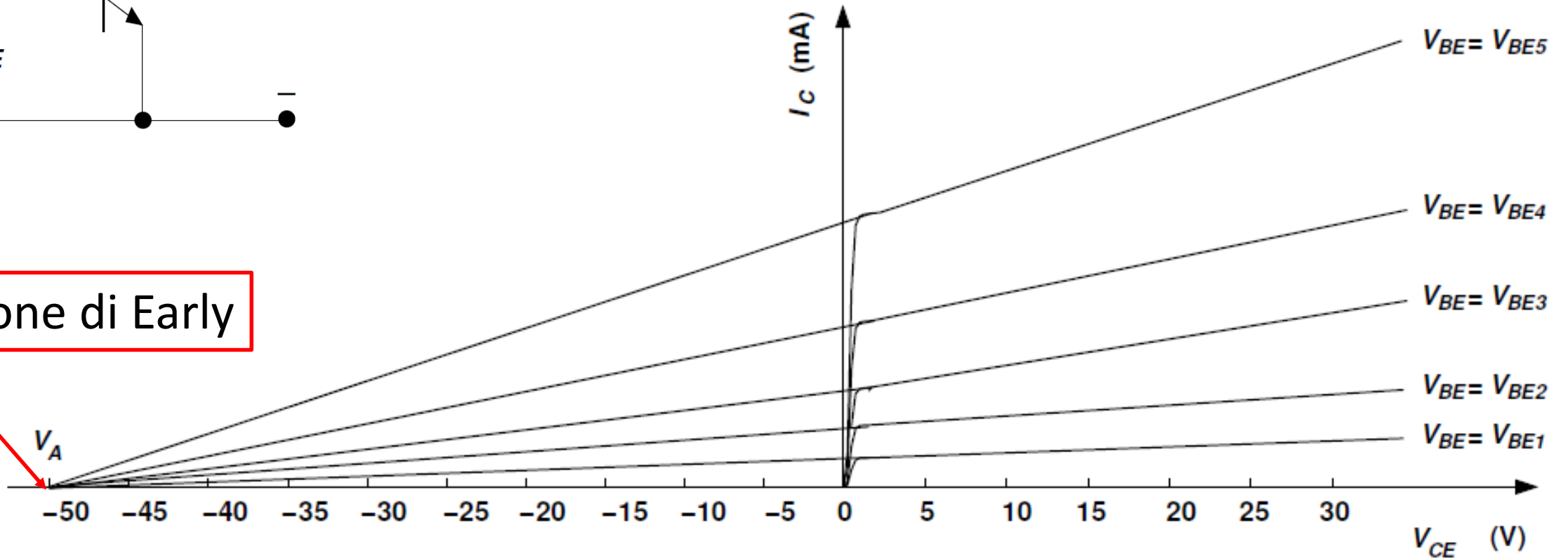
# Transistore Bipolare (BJT) – Effetto Early



# Transistore Bipolare (BJT) – Effetto Early

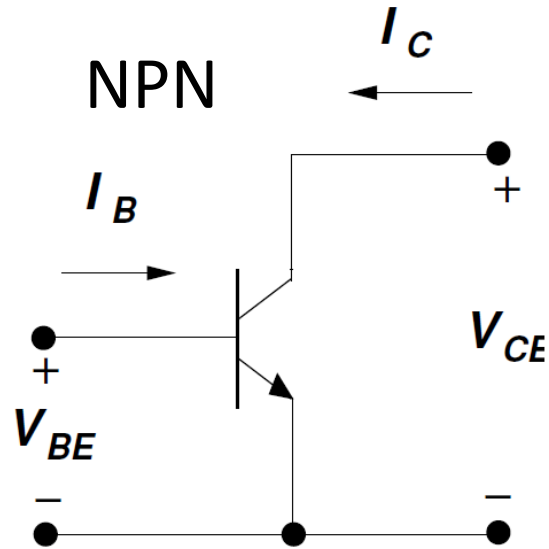


Tensione di Early

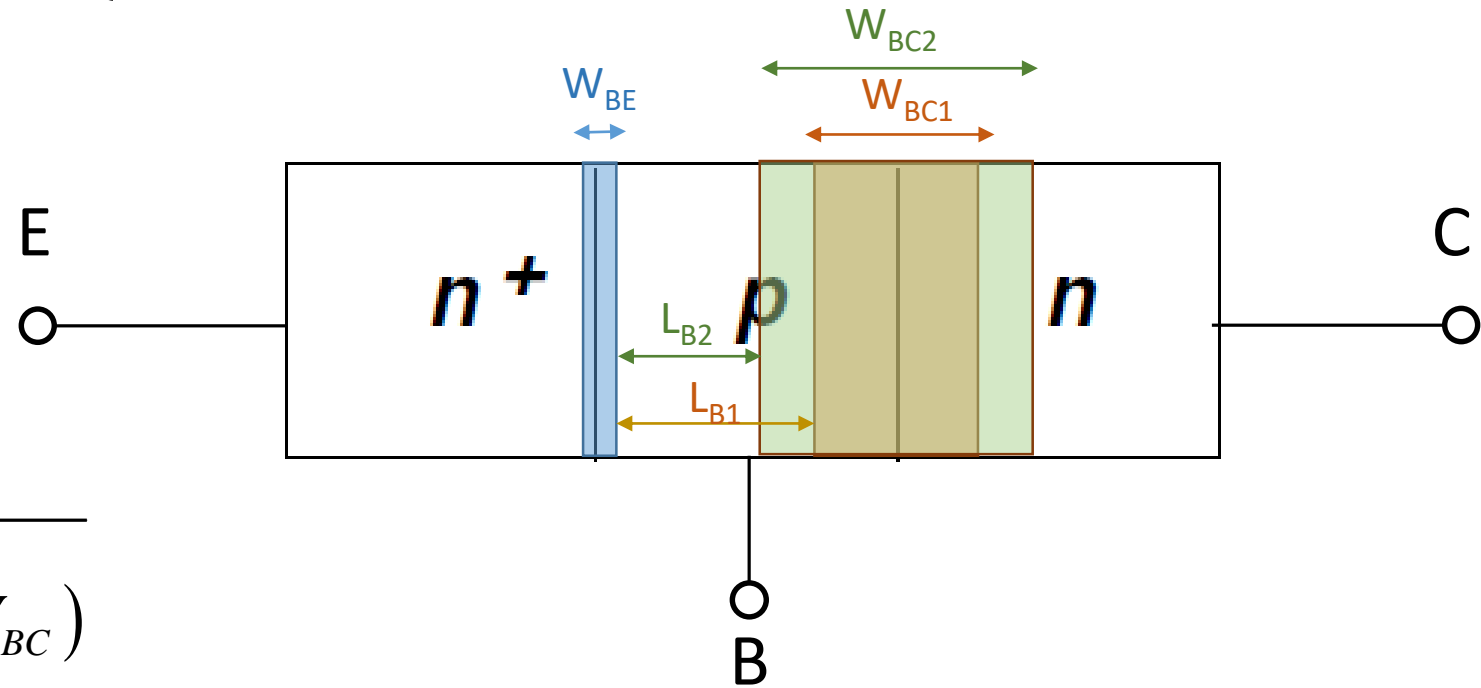




# Transistore Bipolare (BJT) – Effetto Early



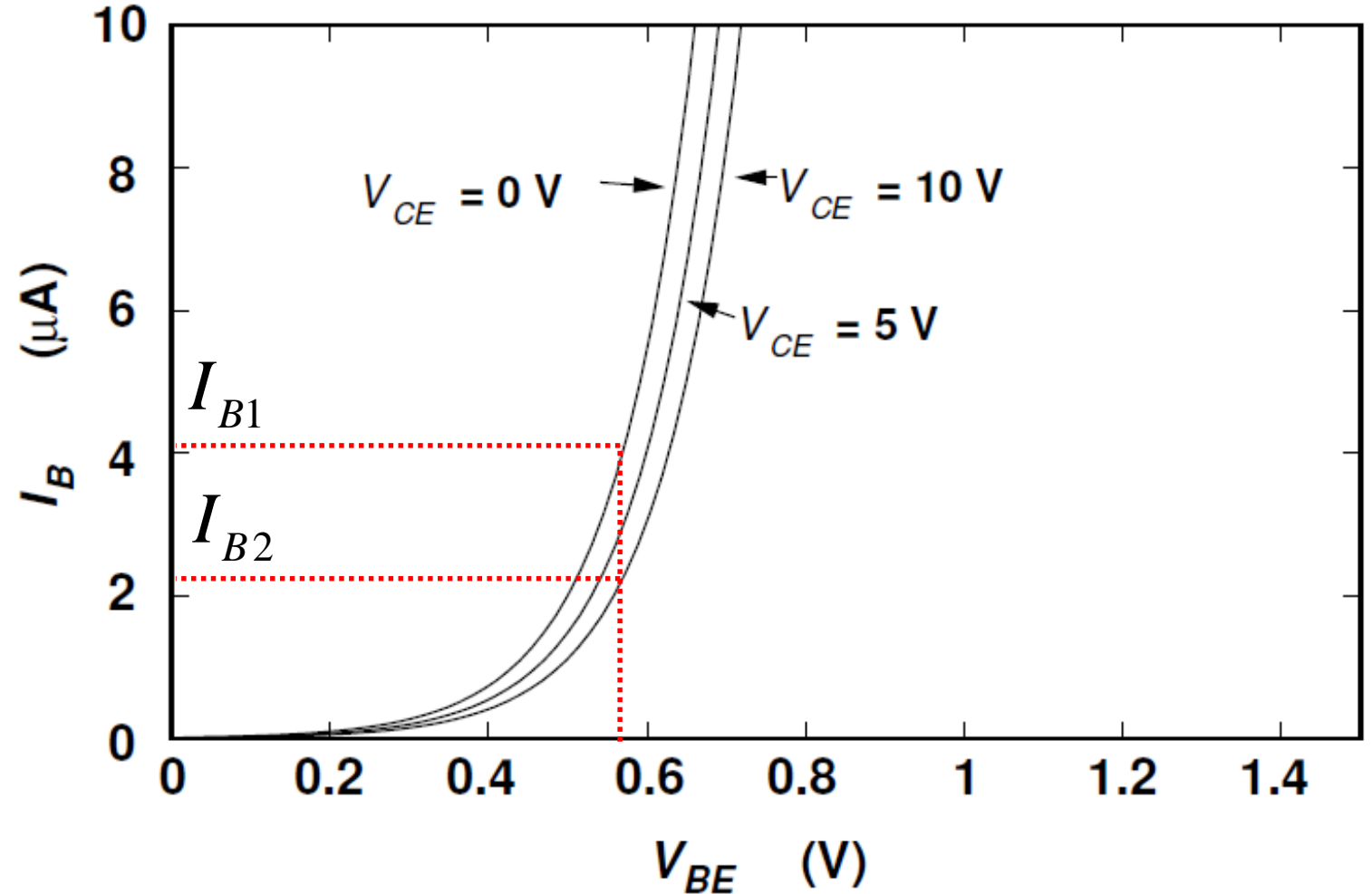
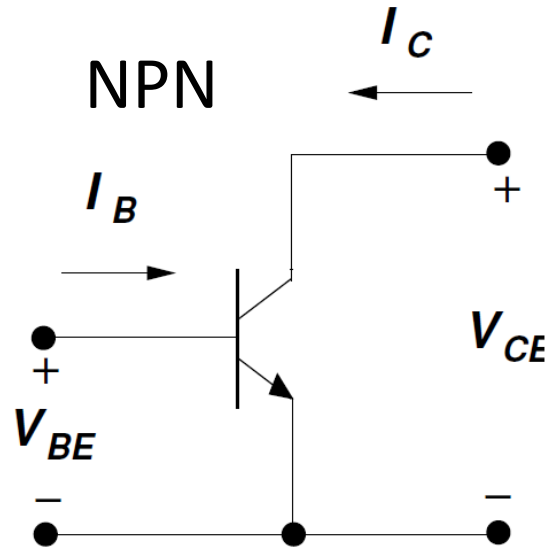
$\begin{cases} V_{CE} \text{ aumenta} \\ V_{BE} \text{ costante} \end{cases} \Rightarrow V_{CB} \text{ aumenta} \Rightarrow W_{BC} \text{ aumenta}$



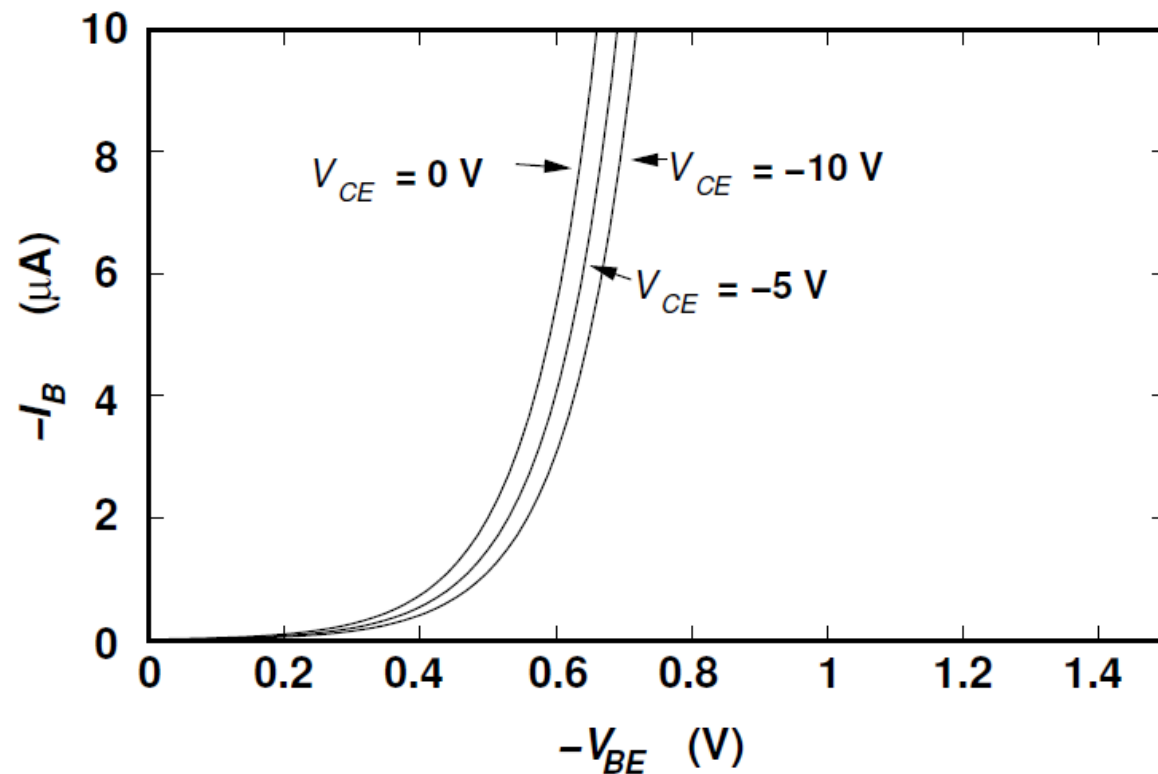
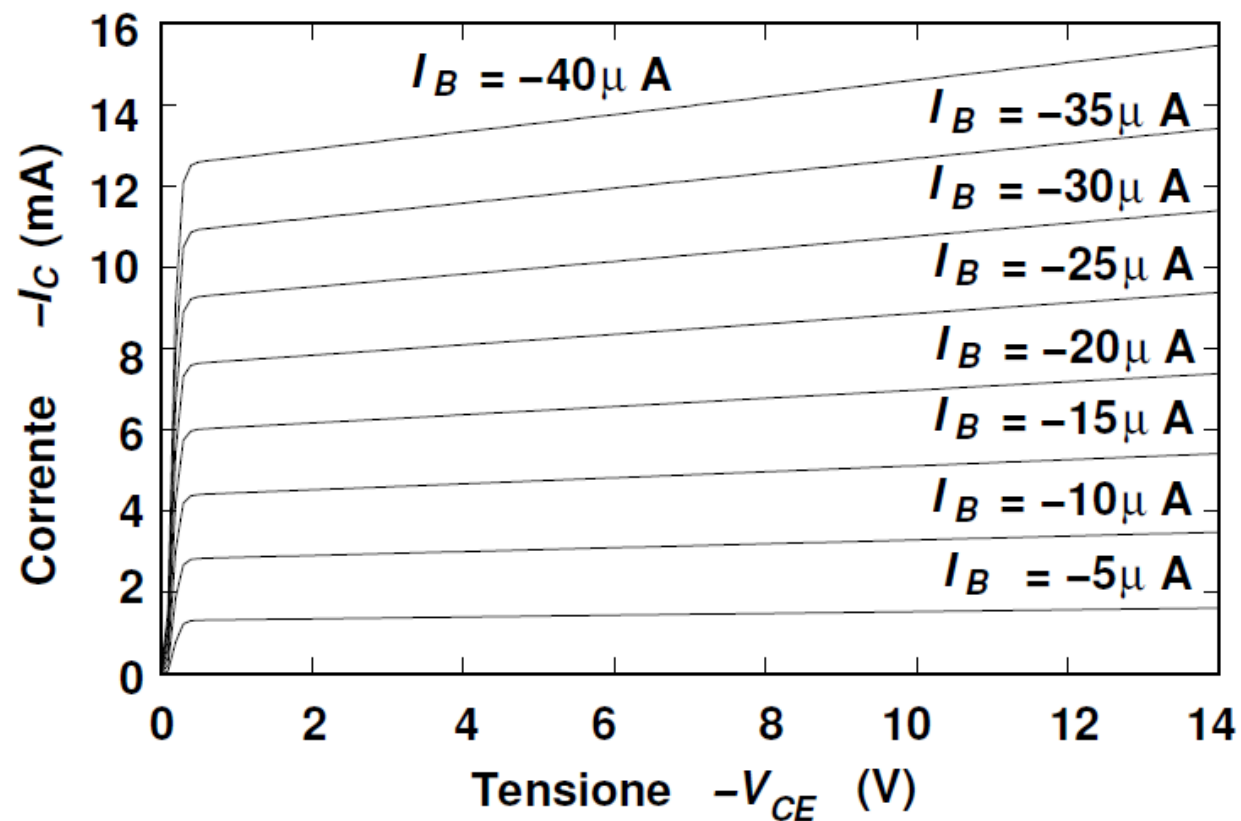
$$W_{BC} = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_0 - V_{BC})}$$

$$V_{CE2} > V_{CE1} \Rightarrow W_{BC2} > W_{BC1} \Rightarrow L_{B2} < L_{B1}$$

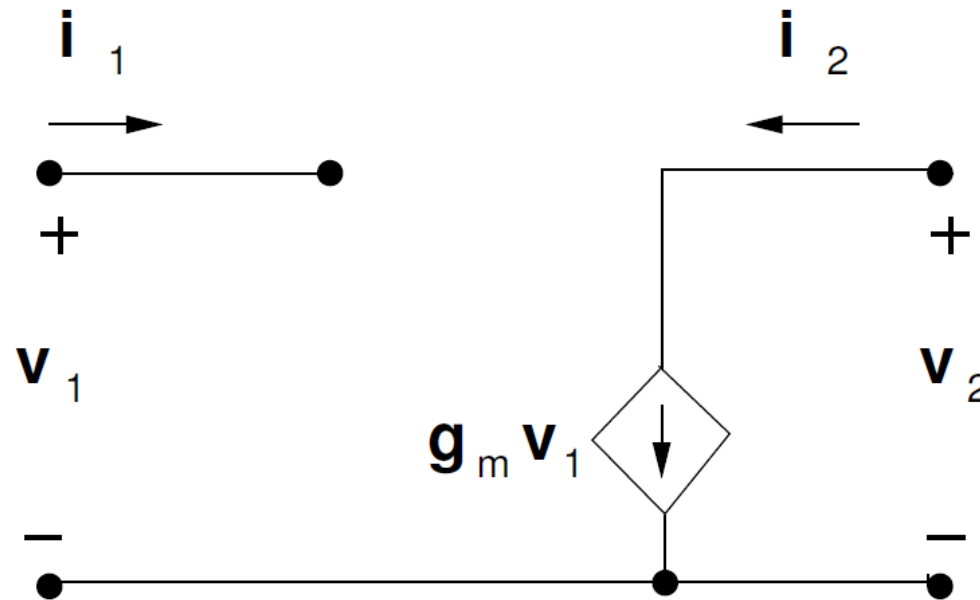
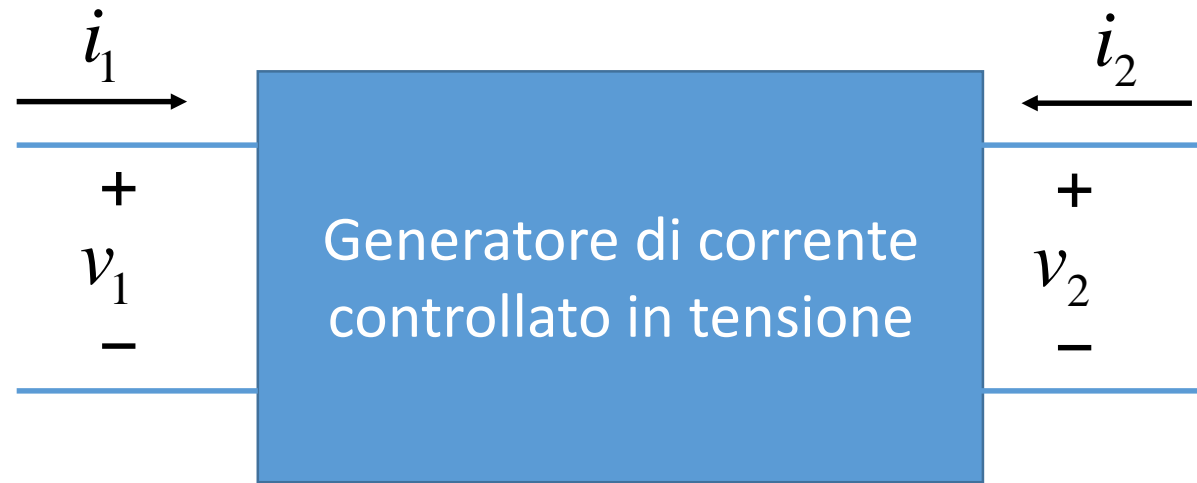
# Transistore Bipolare (BJT) – Effetto Early



# Transistore Bipolare (BJT) - PNP



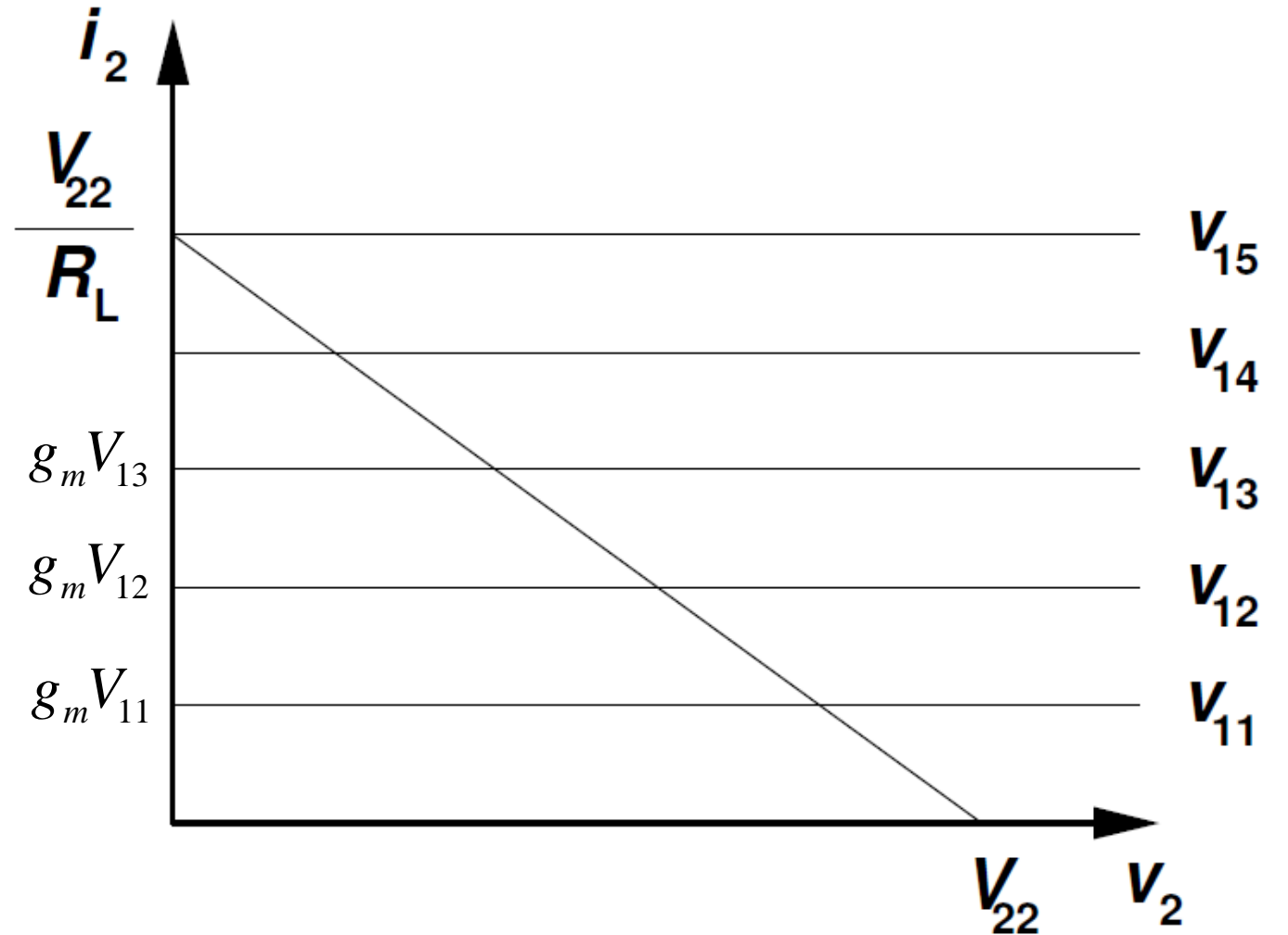
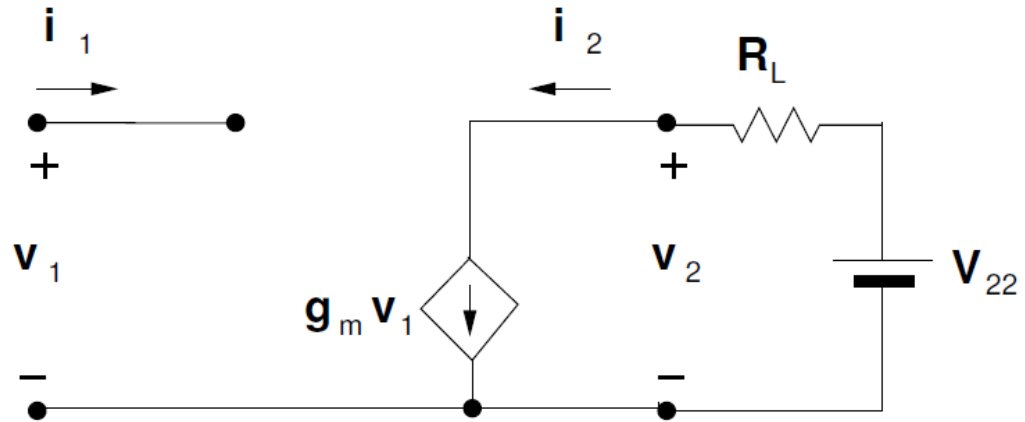
# Transistore a effetto di campo (FET)



$$g_m = \frac{i_2}{v_1} \frac{\text{A}}{\text{V}}$$

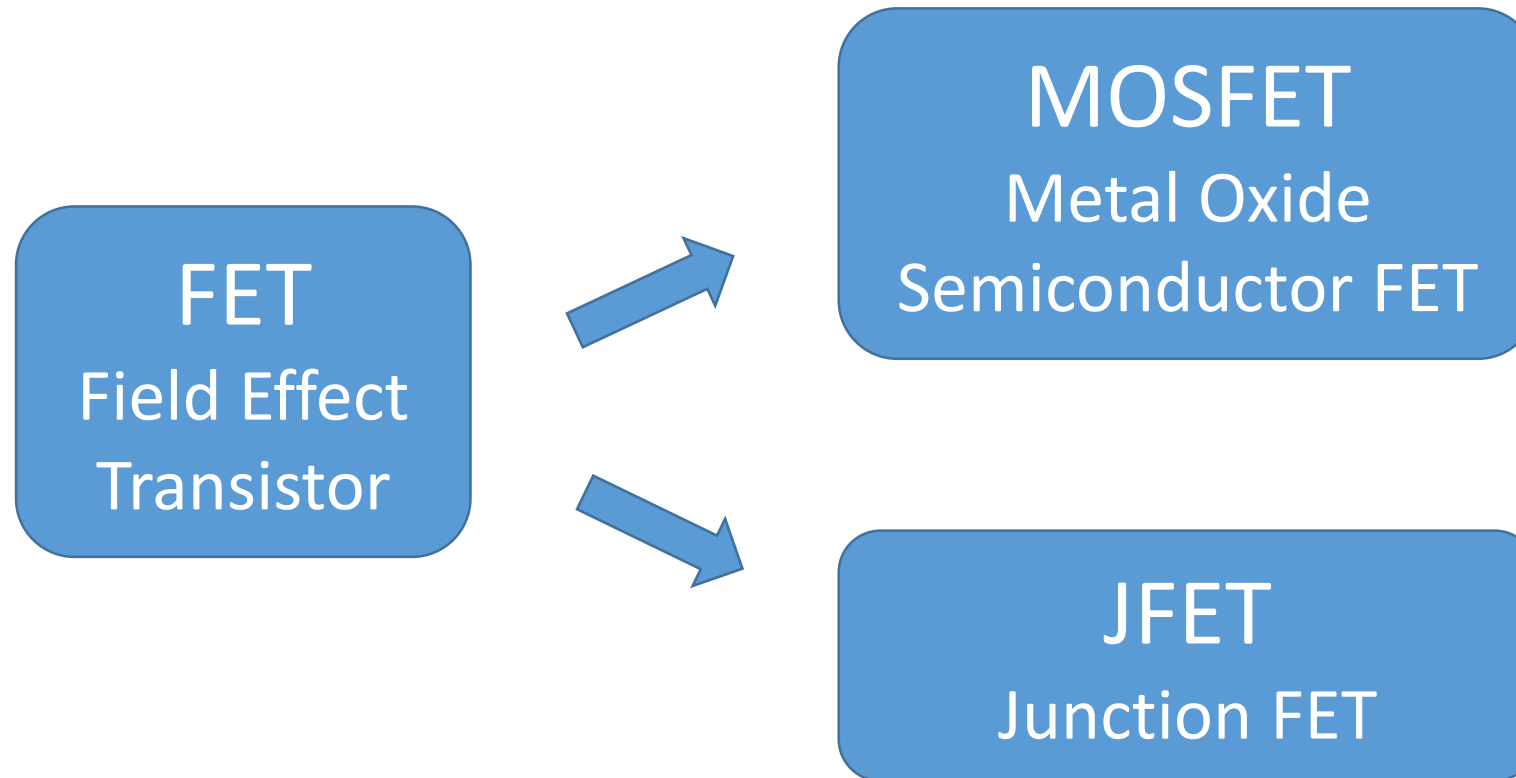
Transconduttanza

# Transistore a effetto di campo (FET)

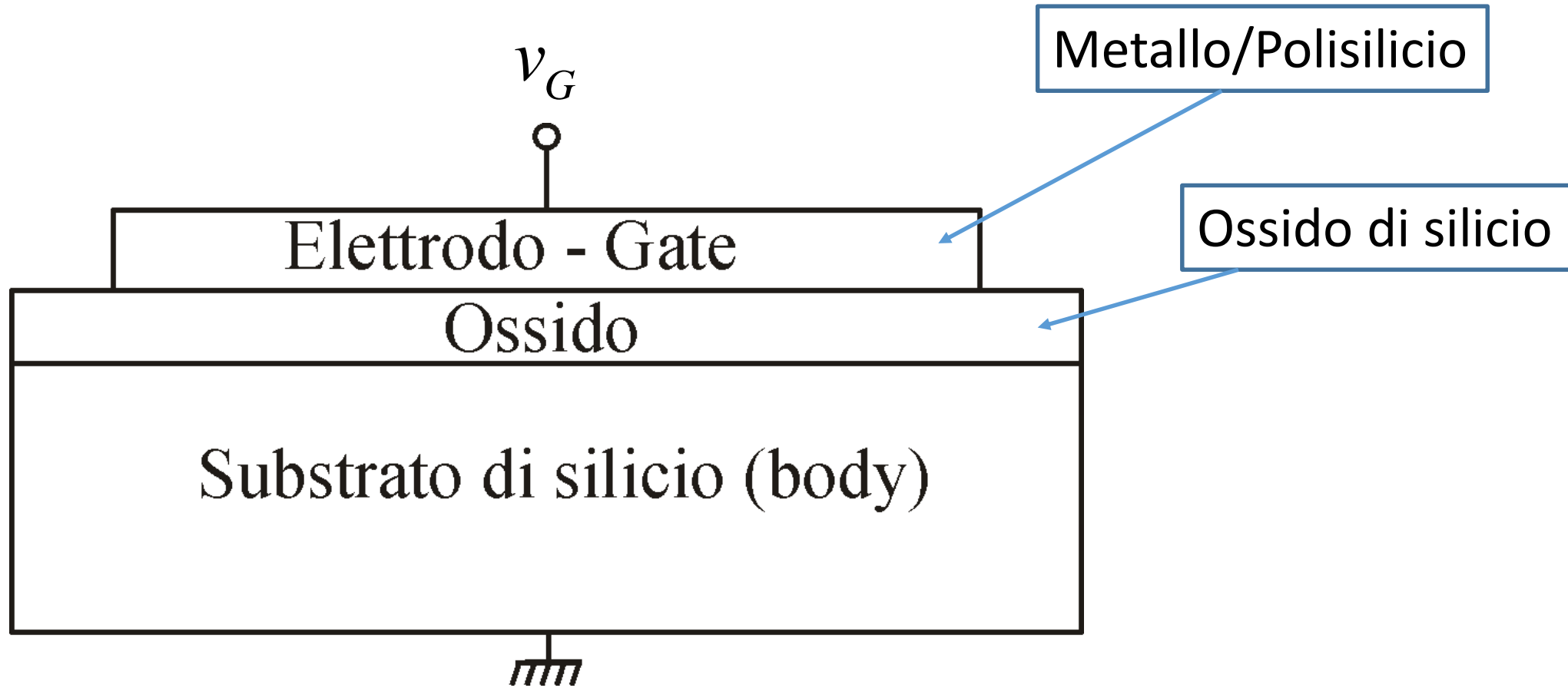


# Transistore a effetto di campo (FET)

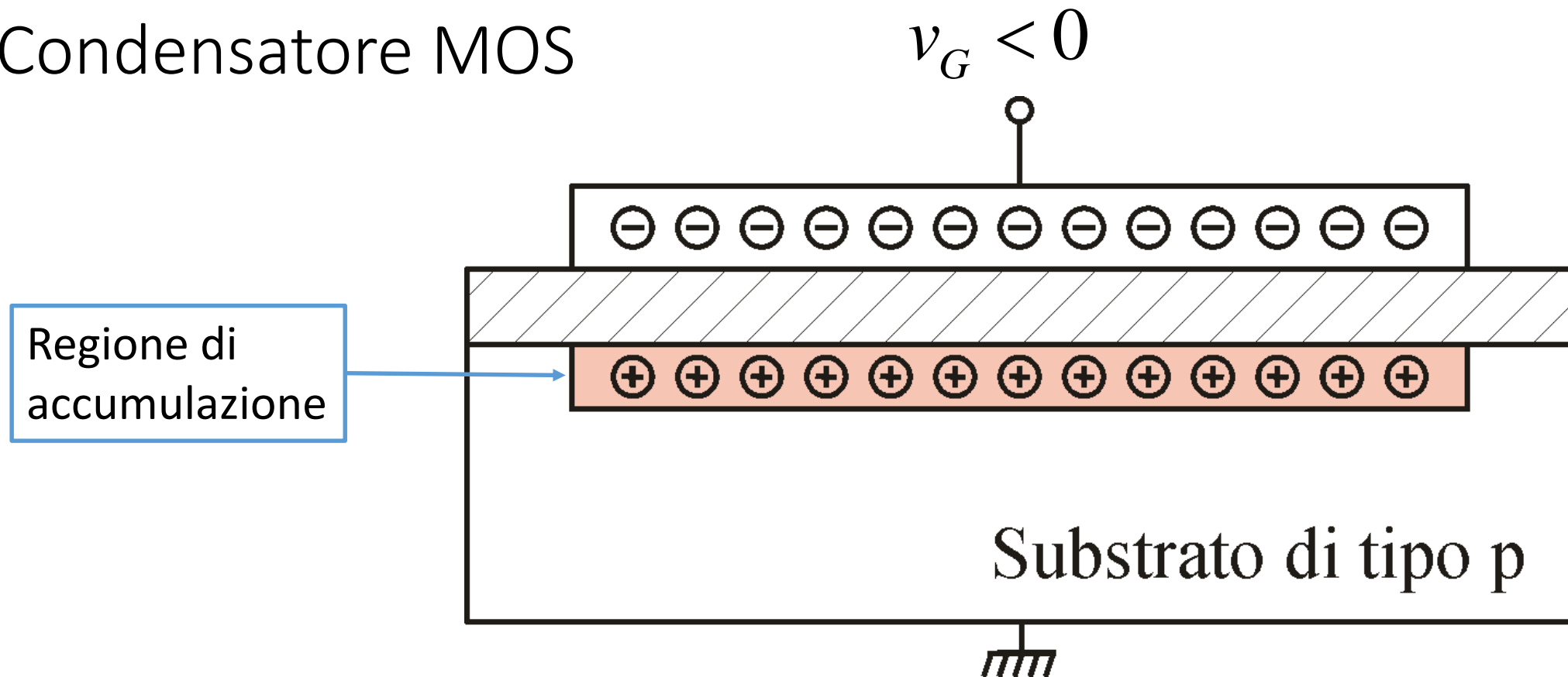
Nei transistori a effetto di campo, come suggerisce il nome stesso, il flusso di corrente viene controllato tramite un campo elettrico e, quindi, attraverso il valore della tensione applicata a un opportuno elettrodo di comando.



# Condensatore MOS



# Condensatore MOS



La carica negativa presente sull'elettrodo di gate viene bilanciata da una carica positiva costituita dalle lacune del substrato che vengono attratte all'interfaccia tra il substrato e l'ossido, sotto il gate.



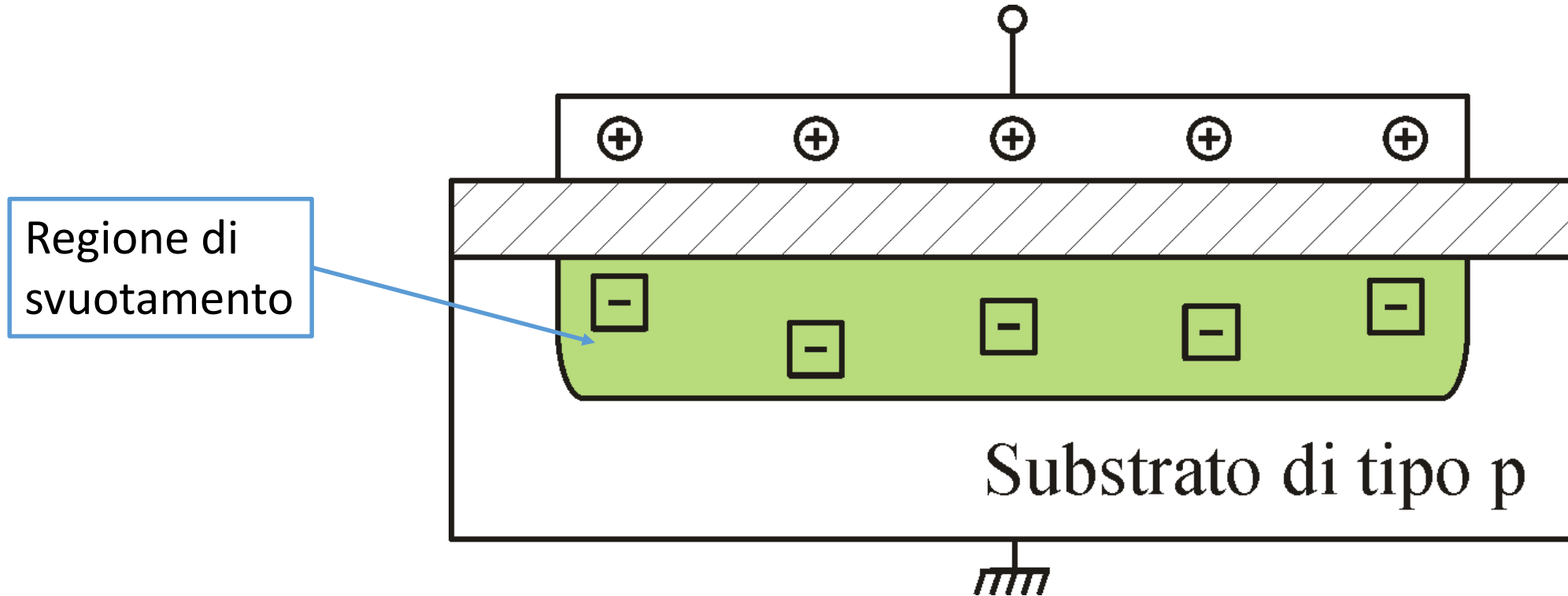
$$p_{\text{superficie}} > p_{\text{body}}$$

Accumulazione



# Condensatore MOS

$$0 < v_G < V_T \quad V_T : \text{tensione di soglia (Threshold)}$$



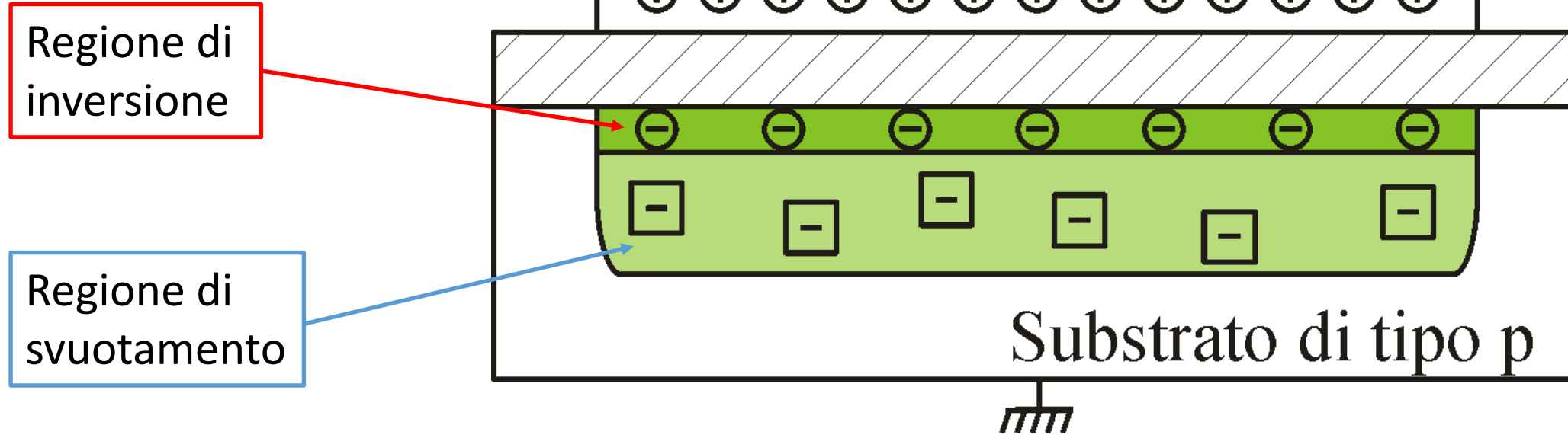
La carica positiva presente sull'elettrodo di gate viene bilanciata da una carica negativa costituita dagli ioni accettori della zona di svuotamento che si è venuta a creare sotto il gate

$$p_{\text{superficie}} < p_{\text{body}}$$

Svuotamento

# Condensatore MOS

$$v_G \geq V_T \quad V_T : \text{tensione di soglia (Threshold)}$$



Il campo elettrico presente all'interfaccia è in grado di richiamare cariche mobili (elettroni) presenti nel substrato, in particolare nella zona di svuotamento, per il fenomeno di generazione termica. La carica positiva presente sull'elettrodo di gate viene bilanciata da una carica negativa costituita sia dagli elettroni sia dagli ioni accettori della regione di svuotamento.

$$n_{\text{superficie}} > p_{\text{body}}$$

Inversione

# Transistore MOSFET

