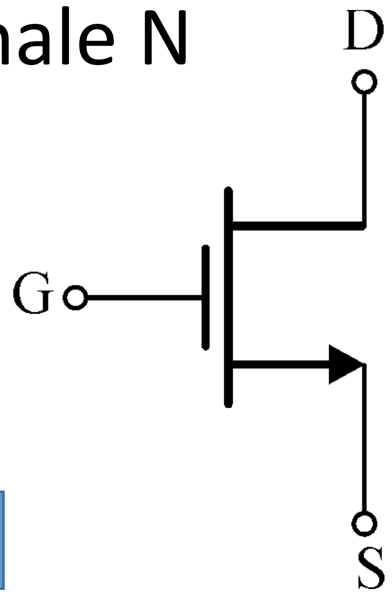
Elettronica Digitale
A.A. 2020-2021

Lezione 31/03/2021

Transistore MOS – Circuiti equivalenti per ampi segnali semplificati

$$V_T > 0$$

Canale N



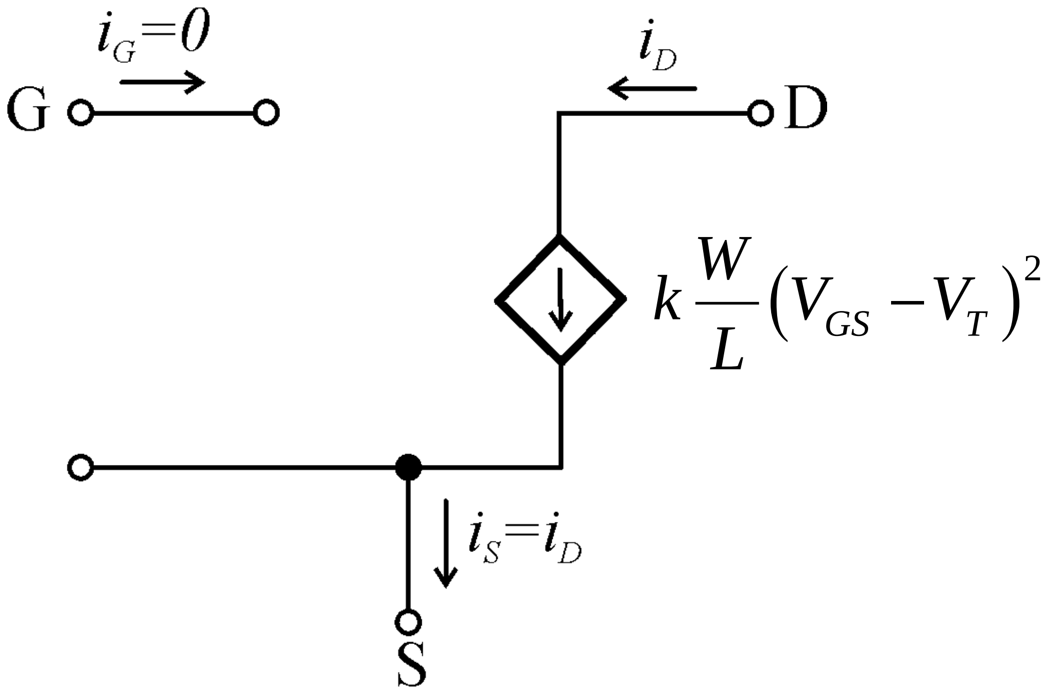
$$V_{GS} \geq V_T$$

$$I_G = 0$$

SATURAZIONE

TRIODO

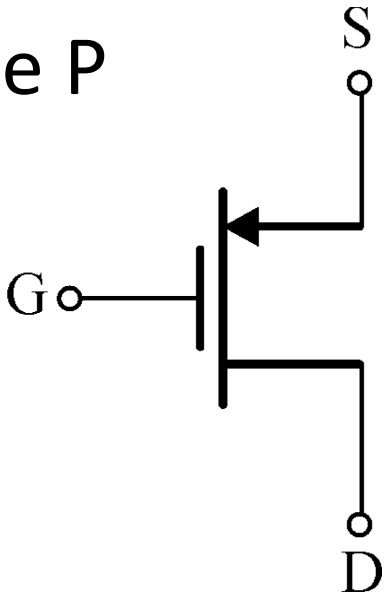
$$I_{DS} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}\left[\left(V_{GS} - V_T\right)V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2}\right]$$



Transistore MOS – Circuiti equivalenti per ampi segnali semplificati

$$V_T < 0$$

Canale P



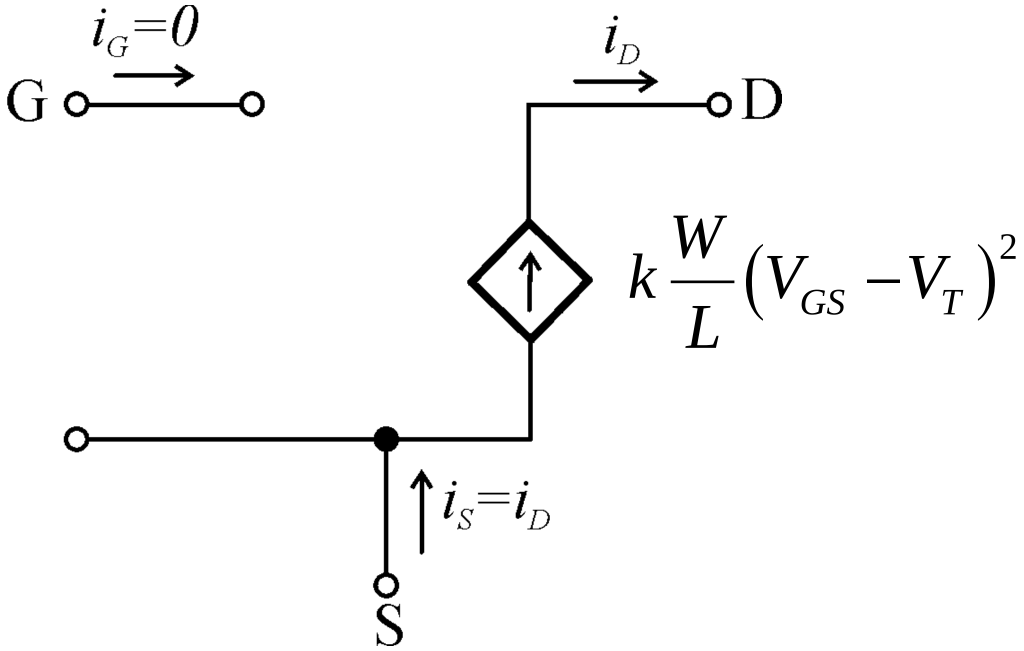
$$V_{GS} \leq V_T$$

$$I_G = 0$$

TRIODO

$$I_{SD} = \mu_p C_{ox} \frac{W}{L}\left[\left(V_{GS} - V_T\right) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right]$$

SATURAZIONE

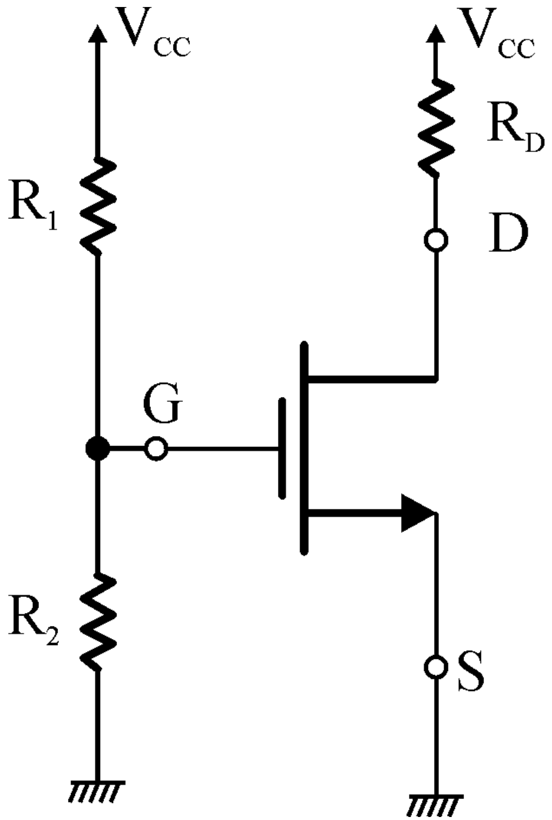


Transistore MOS– Circuiti equivalenti per ampi segnali semplificati

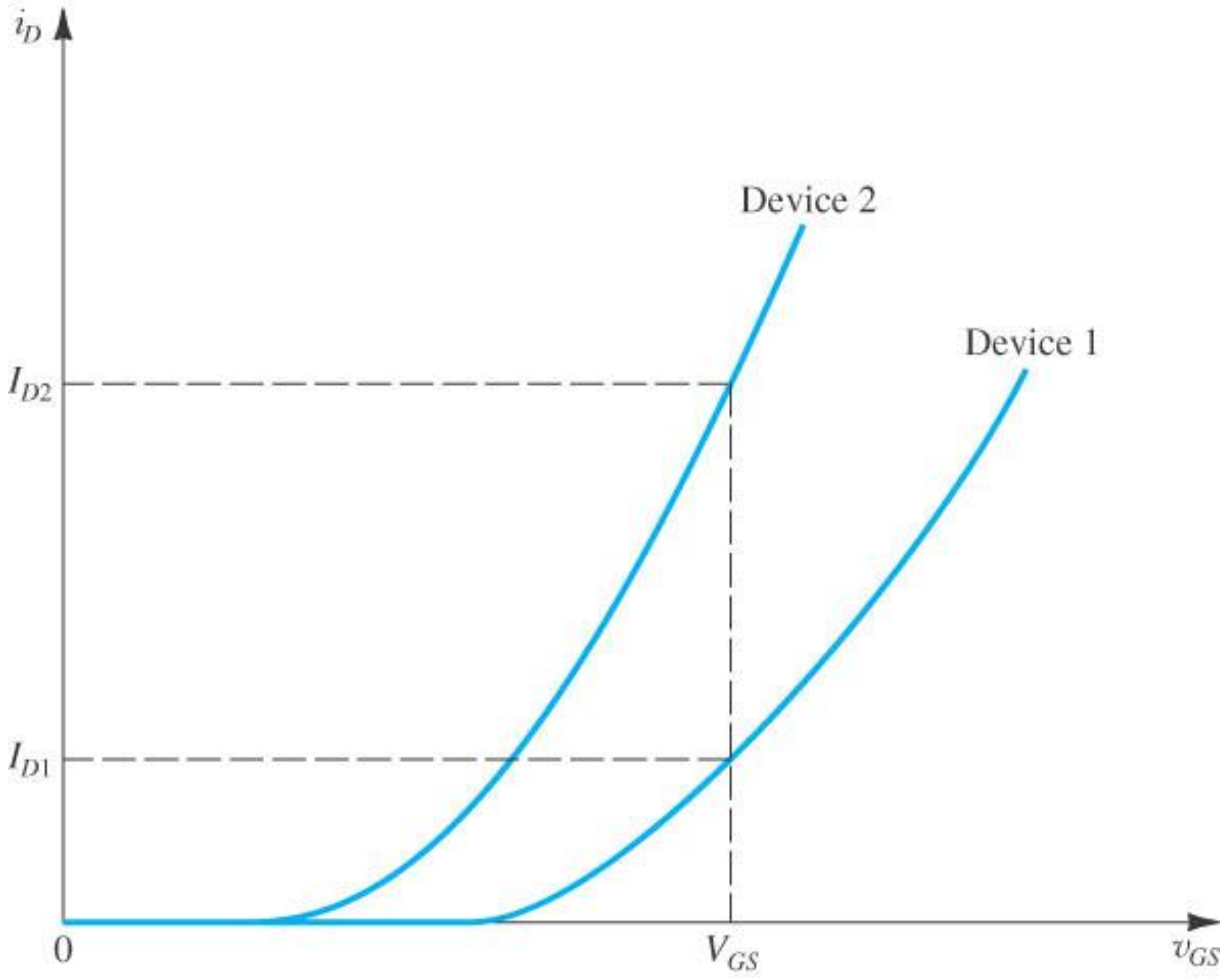
IPOTESI	VERIFICA NMOS	VERIFICA PMOS
SATURAZIONE	$V_{GS} \geq V_T$ $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$	$V_{GS} \leq V_T$ $V_{DS} \leq V_{GS} - V_T$
TRIODO	$V_{GS} \geq V_T$ $V_{DS} < V_{GS} - V_T$	$V_{GS} \leq V_T$ $V_{DS} > V_{GS} - V_T$

Transistore MOS– Polarizzazione in circuiti discreti

Polarizzazione a V_{GS} fissa

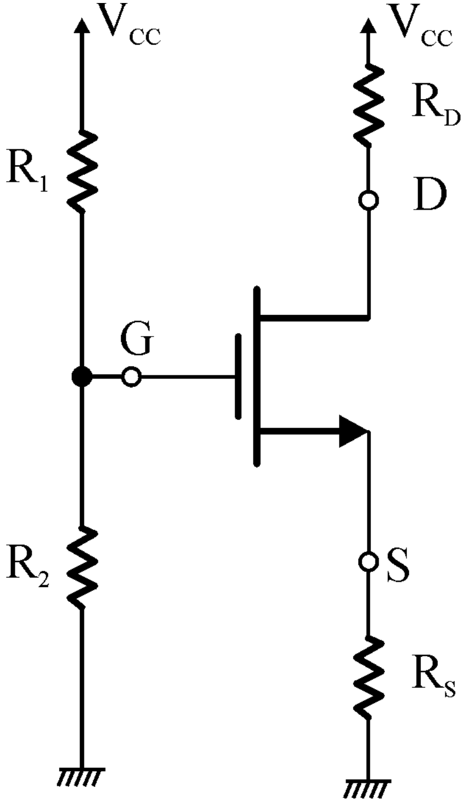


$$V_{GS} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$



Transistore MOS– Polarizzazione in circuiti discreti

Polarizzazione fissando V_G e connettendo un resistore al terminale di source



$$V_G = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$V_G = V_{GS} + R_S I_D$$

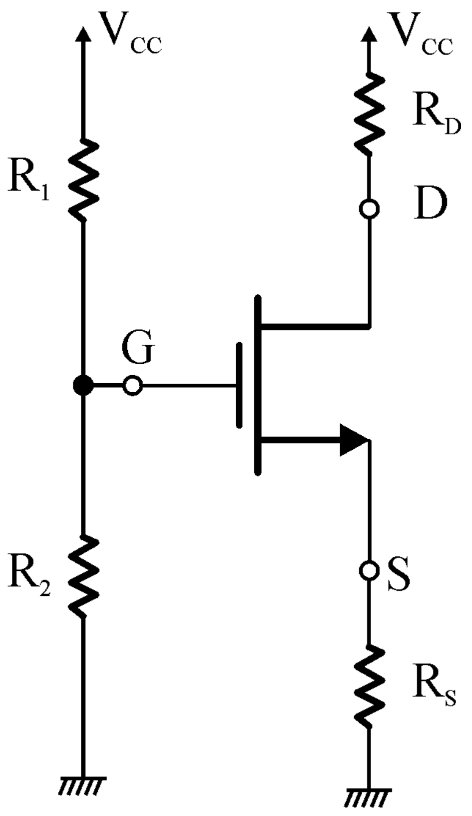
$$I_D = k \frac{W}{L} \left(V_{GS} - V_T\right)^2$$

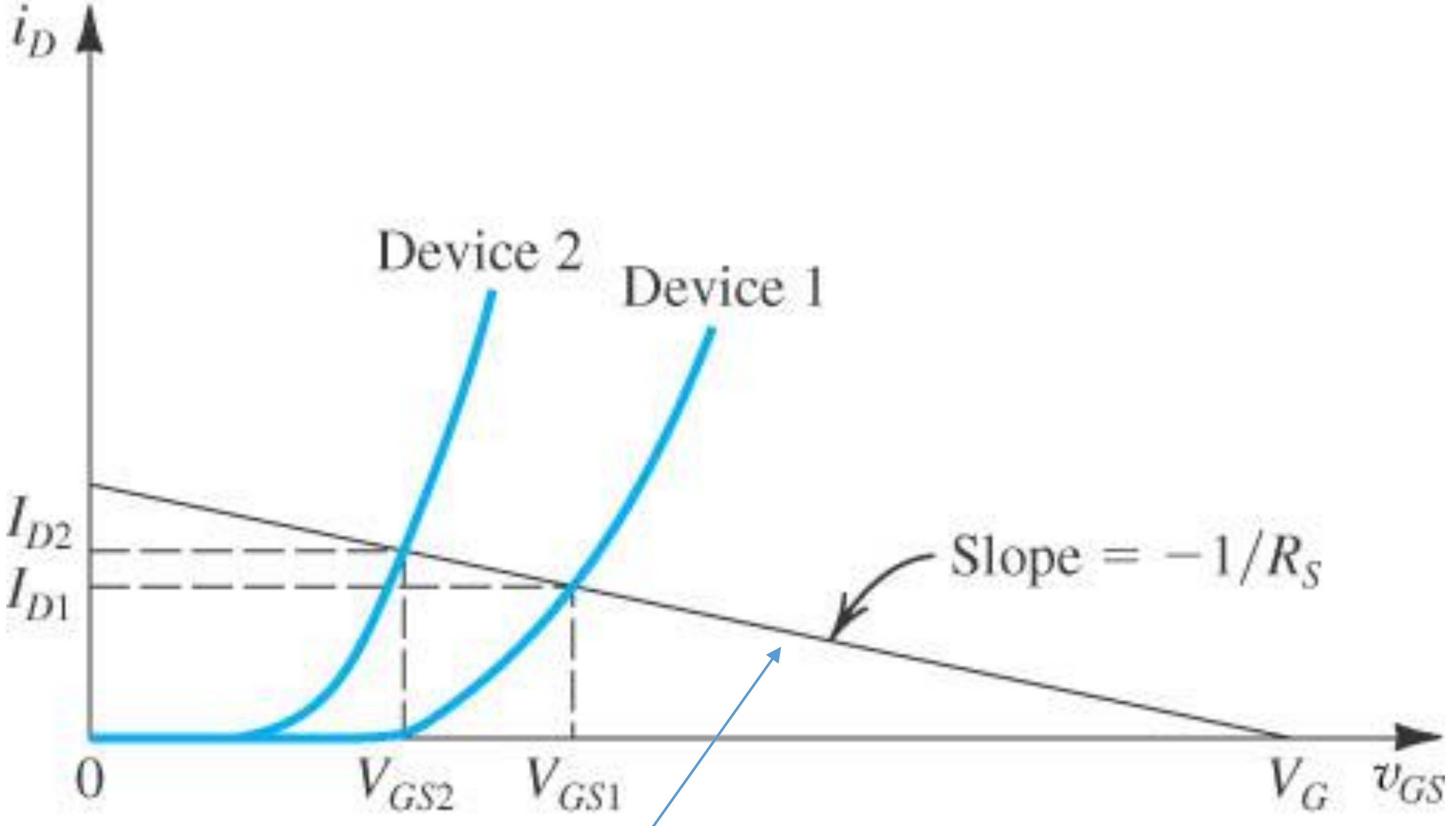
$$V_G = V_{GS} + R_S k \frac{W}{L} \left(V_{GS} - V_T\right)^2$$

Equazione di secondo grado con due soluzioni di cui solo una accettabile

Transistore MOS– Polarizzazione in circuiti discreti

Polarizzazione fissando V_G e connettendo un resistore al terminale di source





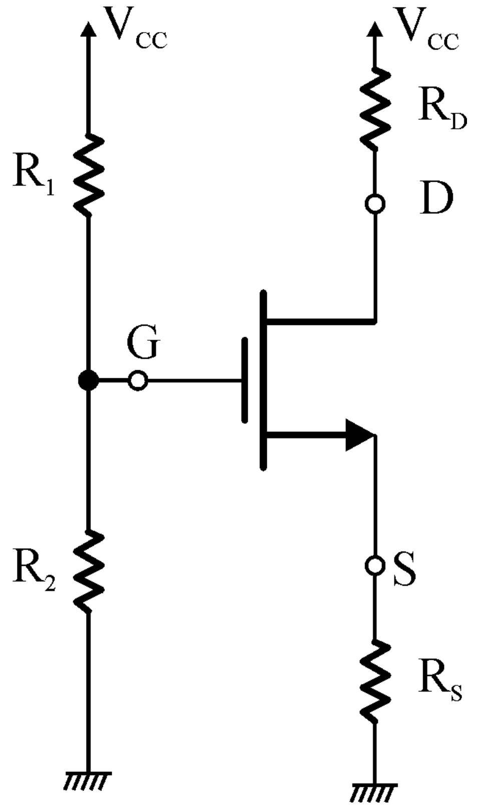
$$V_G = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\boxed{V_G = V_{GS} + R_S I_D}$$

$$I_D = k \frac{W}{L} \left(V_{GS} - V_T\right)^2$$

Transistore MOS– Polarizzazione in circuiti discreti

Polarizzazione fissando V_G e connettendo un resistore al terminale di source



$$V_G = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \qquad V_G = V_{GS} + R_S I_D \qquad I_D = k \frac{W}{L}\left(V_{GS} - V_T\right)^2$$

I_D aumenta $\rightarrow V_S$ aumenta $\rightarrow V_{GS}$ diminuisce poiché V_G
è mantenuta costante dal partitore di tensione R_1, R_2
$\rightarrow I_D$ diminuisce

R_S introduce un effetto di retroazione negativa che stabilizza la corrente di polarizzazione. La resistenza R_S prende il nome di resistenza di degenerazione

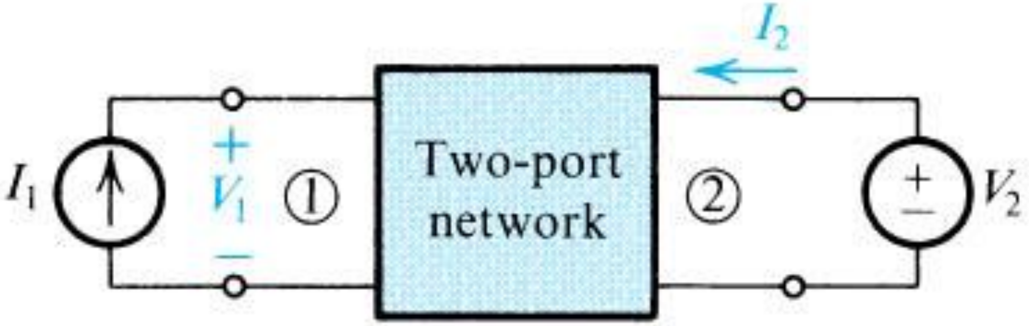
Transistore BJT– Modello linearizzato per piccoli segnali

$$\begin{cases} v_1 = f\left(i_1, v_2\right) \\ i_2 = g\left(i_1, v_2\right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_1 = h_{11} i_1 + h_{12} v_2 \\ i_2 = h_{21} i_1 + h_{22} v_2 \end{cases}$$

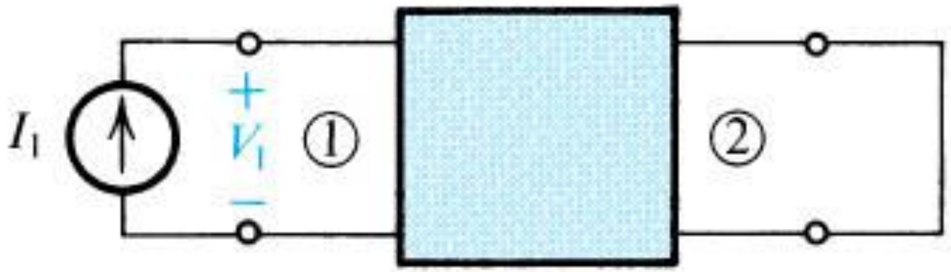
Modello a parametri ibridi (H)

Transistore BJT– Modello linearizzato per piccoli segnali



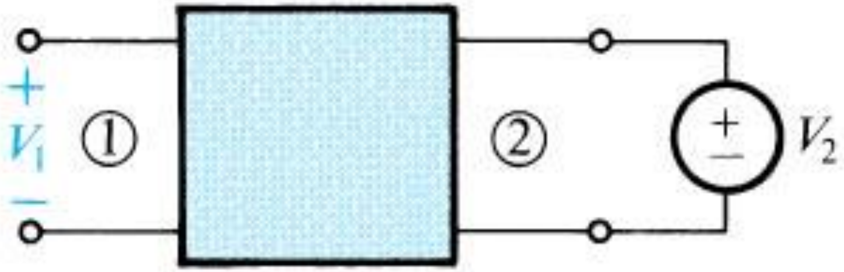
$$\begin{cases} v_1 = h_{11} i_1 + h_{12} v_2 \\ i_2 = h_{21} i_1 + h_{22} v_2 \end{cases}$$

$$h_{11} = h_i = \left.\frac{v_1}{i_1}\right|_{v_2=0}$$



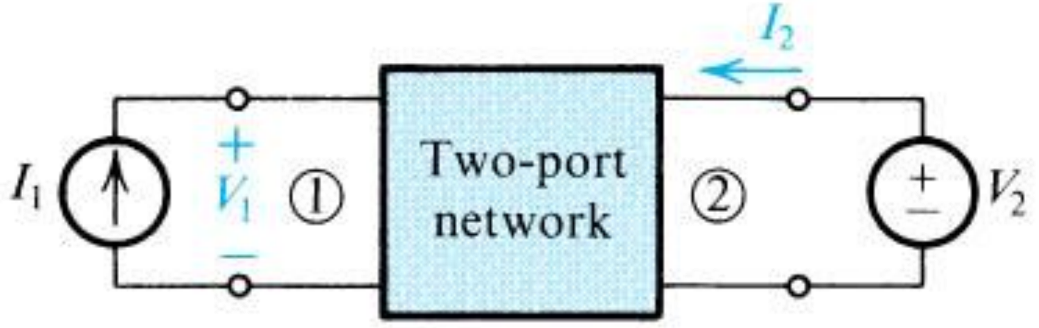
Impedenza di ingresso (input) in cortocircuito

$$h_{12} = h_r = \left.\frac{v_1}{v_2}\right|_{i_1=0}$$



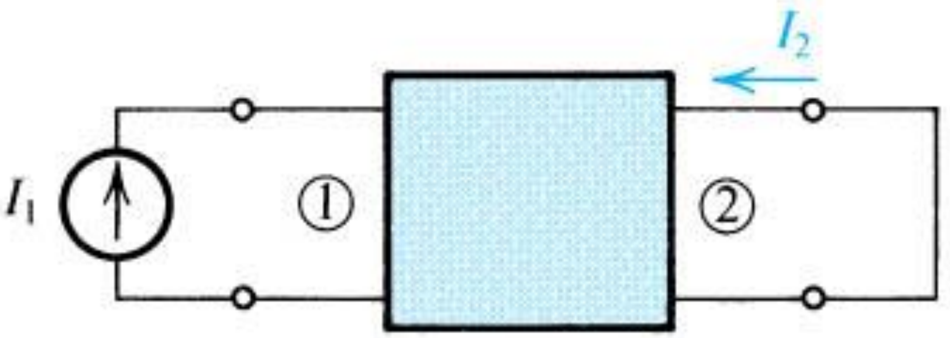
Guadagno di tensione inverso (reverse) a circuito aperto

Transistore BJT– Modello linearizzato per piccoli segnali



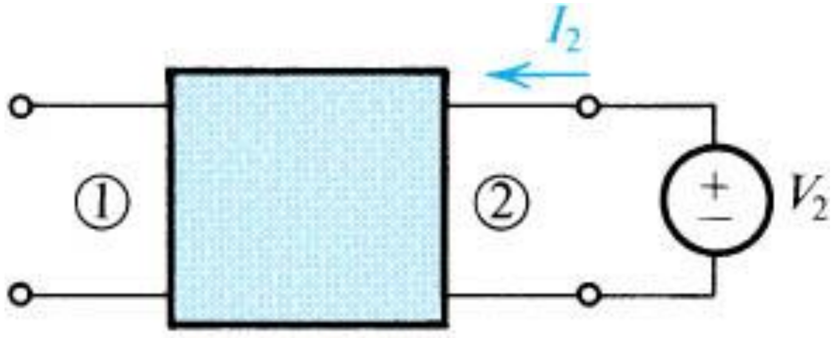
$$\begin{cases} v_1 = h_{11} i_1 + h_{12} v_2 \\ i_2 = h_{21} i_1 + h_{22} v_2 \end{cases}$$

$$h_{21} = h_f = \left.\frac{i_2}{i_1}\right|_{v_2=0}$$



Guadagno di corrente diretto (forward) in cortocircuito

$$h_{22} = h_o = \left.\frac{i_2}{v_2}\right|_{i_1=0}$$

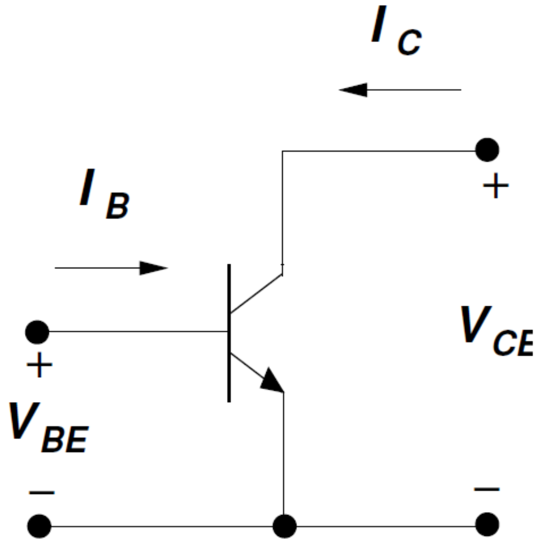


Ammettenza di uscita (output) a circuito aperto

Transistore BJT– Modello linearizzato per piccoli segnali

$$\begin{cases} v_1 = h_i i_1 + h_r v_2 \\ i_2 = h_f i_1 + h_o v_2 \end{cases}$$

Configurazione a emettitore comune



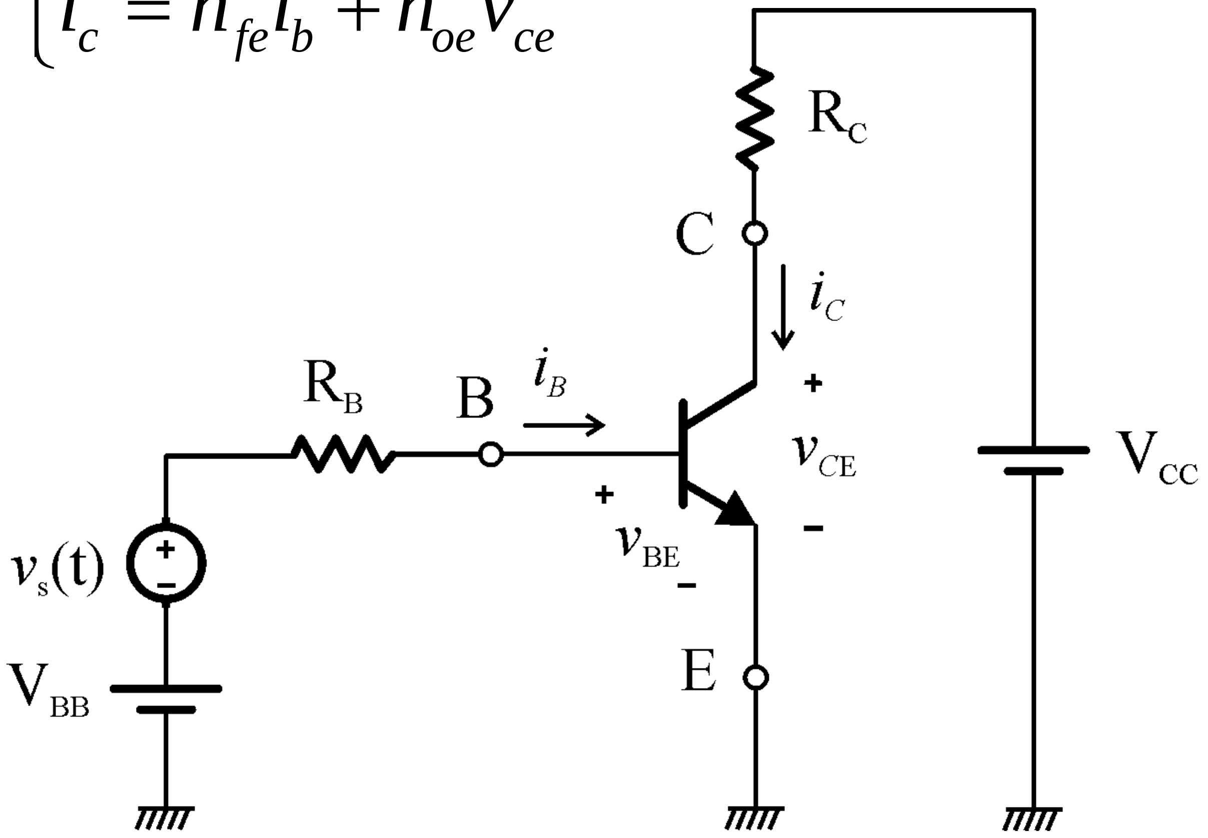
$$\begin{cases} v_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} v_{ce} \\ i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} v_{ce} \end{cases}$$

Transistore BJT– Modello linearizzato per piccoli segnali

Configurazione a emettitore comune

$$\begin{cases} v_{BE} = f\left(i_B, v_{CE}\right) \\ i_C = g\left(i_B, v_{CE}\right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} v_{ce} \\ i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} v_{ce} \end{cases}$$



$$v_{BE}(t) \triangleq V_{BEQ} + v_{be}(t)$$

$$i_B(t) \triangleq I_{BQ} + i_b(t)$$

$$v_{CE}(t) \triangleq V_{CEQ} + v_{ce}(t)$$

$$i_C(t) \triangleq I_{CQ} + i_c(t)$$

Transistore BJT– Modello linearizzato per piccoli segnali

$$\begin{cases} v_{BE}(t) = V_{BEQ} + v_{be}(t) = f\left(I_{BQ} + i_b(t), V_{CEQ} + v_{ce}(t)\right) \\ i_C(t) = I_{CQ} + i_c(t) = g\left(I_{BQ} + i_b(t), V_{CEQ} + v_{ce}(t)\right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_{BE}(t) = \cancel{V_{BEQ}} + v_{be}(t) = \cancel{f\left(I_{BQ}, V_{CEQ}\right)} + \left.\dfrac{\partial f}{\partial i_B}\right|_Q i_b(t) + \left.\dfrac{\partial f}{\partial v_{CE}}\right|_Q v_{ce}(t) + \ldots\ldots \\ i_C(t) = \cancel{I_{CQ}} + i_c(t) = \cancel{g\left(I_{BQ}, V_{CEQ}\right)} + \left.\dfrac{\partial g}{\partial i_B}\right|_Q i_b(t) + \left.\dfrac{\partial g}{\partial v_{CE}}\right|_Q v_{ce}(t) + \ldots\ldots \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} v_{be}(t) \approx + \left.\dfrac{\partial f}{\partial i_B}\right|_Q i_b(t) + \left.\dfrac{\partial f}{\partial v_{CE}}\right|_Q v_{ce}(t) \\ i_c(t) \approx + \left.\dfrac{\partial g}{\partial i_B}\right|_Q i_b(t) + \left.\dfrac{\partial g}{\partial v_{CE}}\right|_Q v_{ce}(t) \end{cases}$$

Transistore BJT– Modello linearizzato per piccoli segnali

$$\begin{cases} v_{be}(t) \approx +\boxed{\left.\dfrac{\partial f}{\partial i_B}\right|_Q} i_b(t) + \boxed{\left.\dfrac{\partial f}{\partial v_{CE}}\right|_Q} v_{ce}(t) \\ i_c(t) \approx +\boxed{\left.\dfrac{\partial g}{\partial i_B}\right|_Q} i_b(t) + \boxed{\left.\dfrac{\partial g}{\partial v_{CE}}\right|_Q} v_{ce}(t) \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_{BE} = f\left(i_B, v_{CE}\right) \\ i_C = g\left(i_B, v_{CE}\right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} v_{ce} \\ i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} v_{ce} \end{cases}$$

$$\boxed{h_{ie} = \left.\frac{\partial f}{\partial i_B}\right|_Q = \left.\frac{\partial v_{BE}}{\partial i_B}\right|_Q}$$

$$\boxed{h_{re} = \left.\frac{\partial f}{\partial v_{CE}}\right|_Q = \left.\frac{\partial v_{BE}}{\partial v_{CE}}\right|_Q}$$

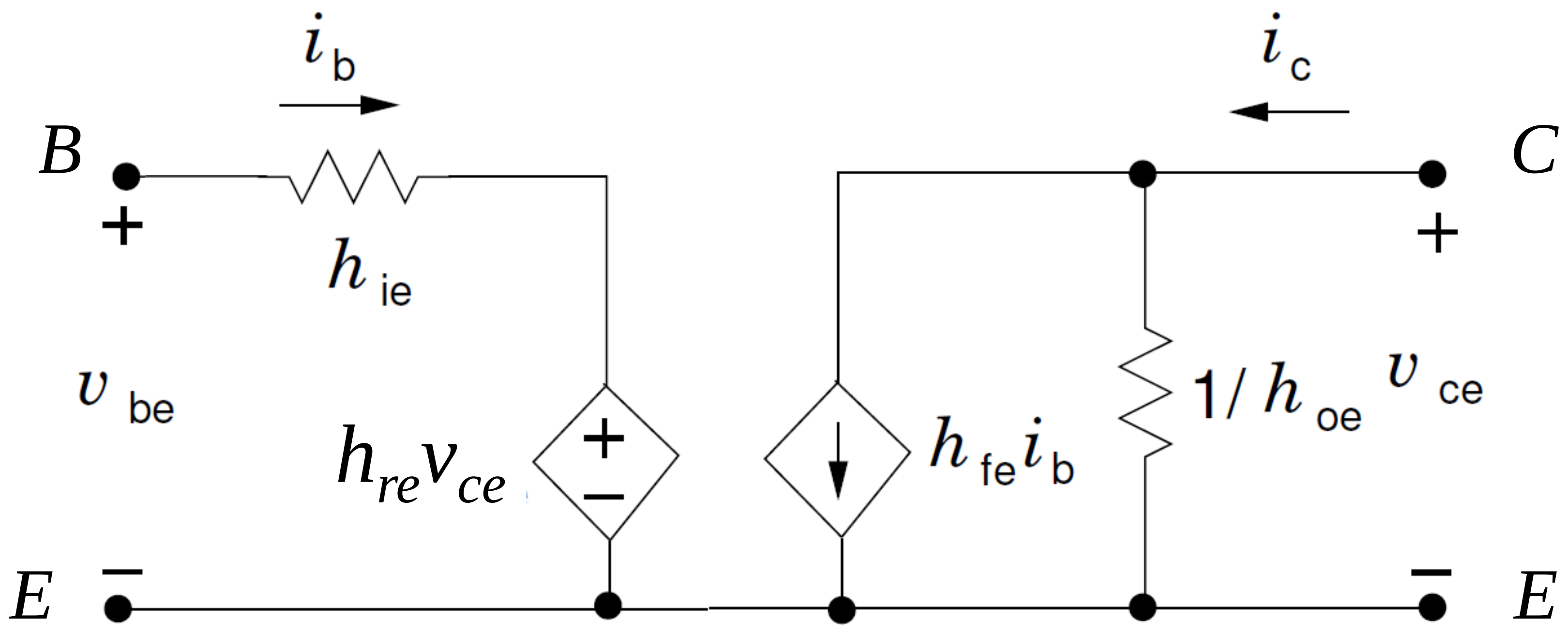
$$\boxed{h_{fe} = \left.\frac{\partial g}{\partial i_B}\right|_Q = \left.\frac{\partial i_C}{\partial i_B}\right|_Q}$$

$$\boxed{h_{oe} = \left.\frac{\partial g}{\partial v_{CE}}\right|_Q = \left.\frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}}\right|_Q}$$

Transistore BJT– Modello linearizzato per piccoli segnali

$$\begin{cases} v_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} v_{ce} \\ i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} v_{ce} \end{cases}$$

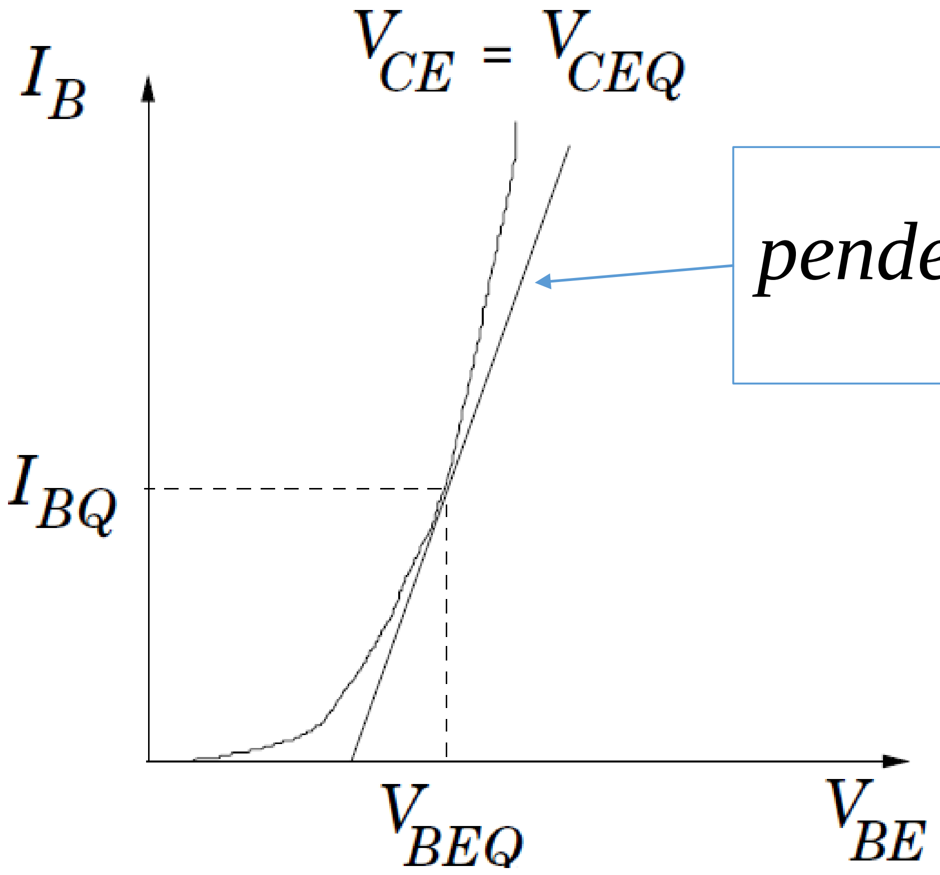
$$h_{ie} = \left.\frac{\partial v_{BE}}{\partial i_B}\right|_Q \qquad h_{re} = \left.\frac{\partial v_{BE}}{\partial v_{CE}}\right|_Q \qquad h_{fe} = \left.\frac{\partial i_C}{\partial i_B}\right|_Q \qquad h_{oe} = \left.\frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}}\right|_Q$$



Transistore BJT– Modello linearizzato per piccoli segnali

$$\begin{cases} v_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} v_{ce} \\ i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} v_{ce} \end{cases}$$

$$\boxed{h_{ie} = \left. \frac{\partial v_{BE}}{\partial i_B} \right|_Q}$$

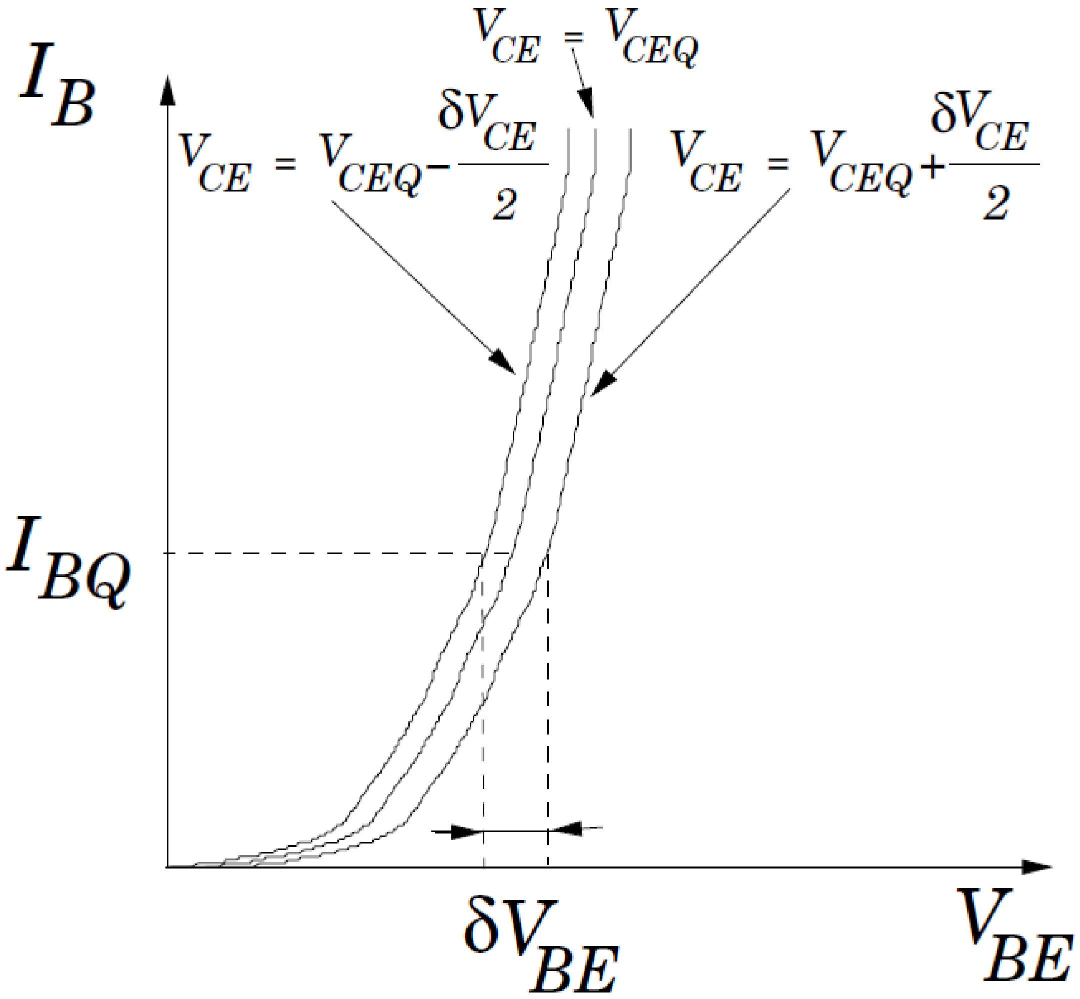


$$\boxed{pendenza = \frac{1}{h_{ie}}}$$

Transistore BJT– Modello linearizzato per piccoli segnali

$$\begin{cases} v_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} v_{ce} \\ i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} v_{ce} \end{cases}$$

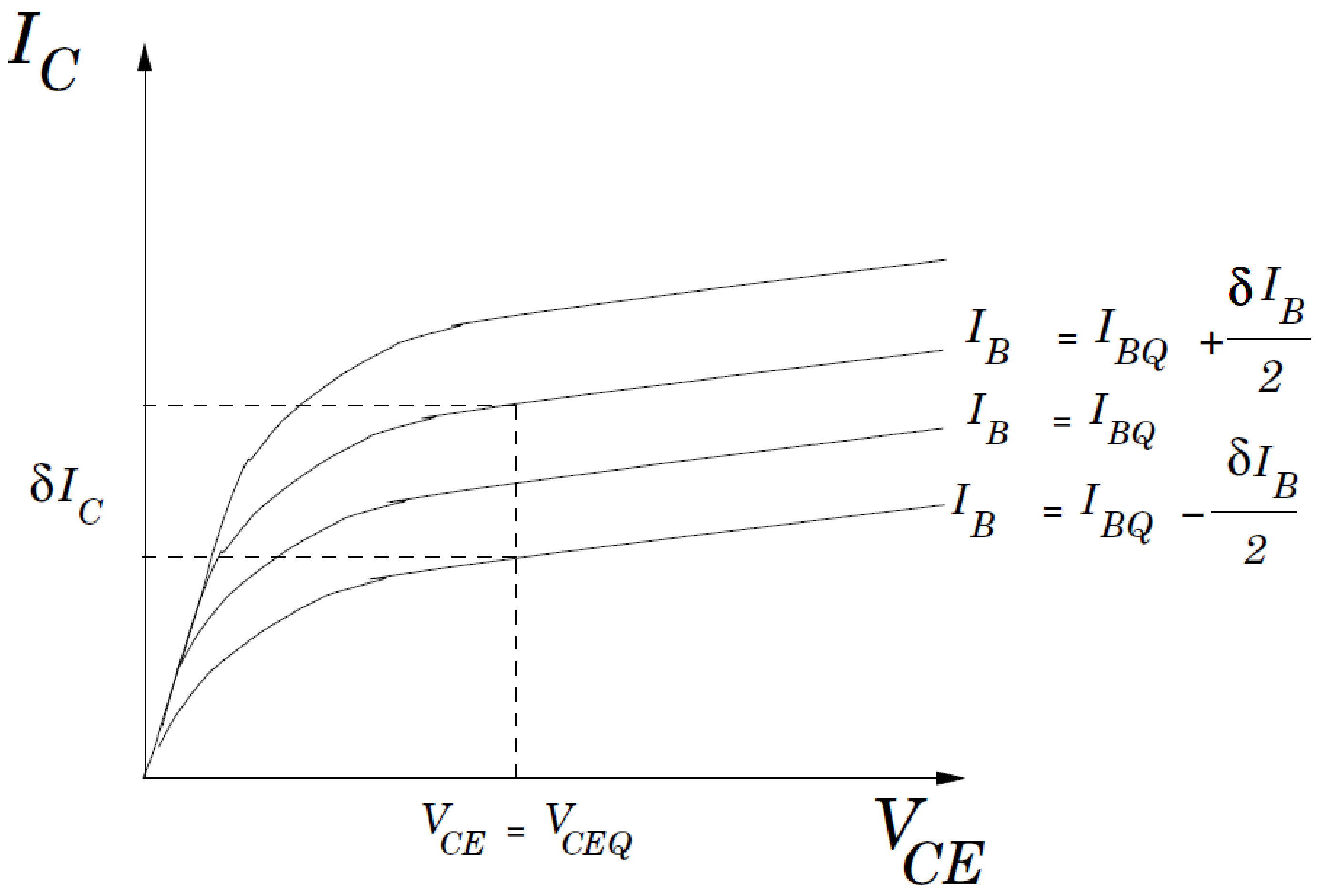
$$\boxed{h_{re} = \left.\frac{\partial v_{BE}}{\partial v_{CE}}\right|_Q = \lim_{\delta v_{CE} \to 0} \left.\frac{\delta v_{BE}}{\delta v_{CE}}\right|_{i_B = I_{BQ}}}$$



Transistore BJT– Modello linearizzato per piccoli segnali

$$\begin{cases} v_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} v_{ce} \\ i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} v_{ce} \end{cases}$$

$$\boxed{h_{fe} = \left.\frac{\partial i_C}{\partial i_B}\right|_Q = \lim_{\delta i_B \to 0} \left.\frac{\delta i_C}{\delta i_B}\right|_{v_{CE} = V_{CEQ}}}$$



Transistore BJT– Modello linearizzato per piccoli segnali

$$\begin{cases} v_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} v_{ce} \\ i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} v_{ce} \end{cases}$$

$$\boxed{h_{oe} = \left.\frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}}\right|_Q = \lim_{\delta v_{CE} \to 0} \left.\frac{\delta i_C}{\delta v_{CE}}\right|_{i_B = I_{BQ}}}$$