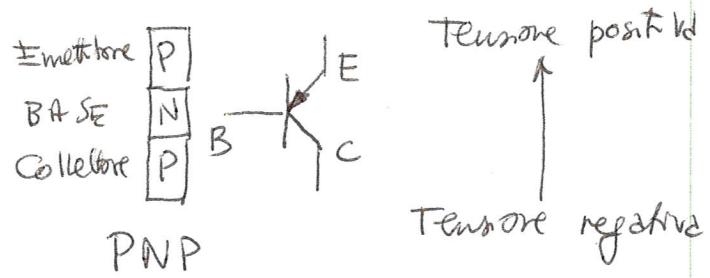
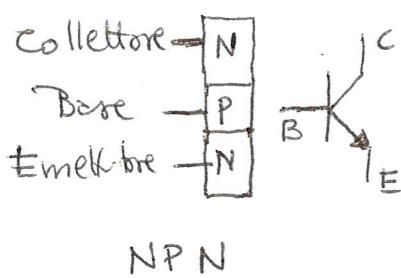


## Lezione 6 - Il transistor bipolare

### 1. Princípio di funzionamento

- Il diodo è un dispositivo passivo  $\rightarrow$  non è possibile amplificare il segnale.
- Nel transistor è possibile utilizzare un segnale "piccolo" per generare un segnale molto più fisso, prendendo la potenza necessaria da una batteria esterna.
- Nel BJT (Bipolar Junction Transistor) si ha una amplificazione di corrente.
- due tipi di BJT (3 terminali)

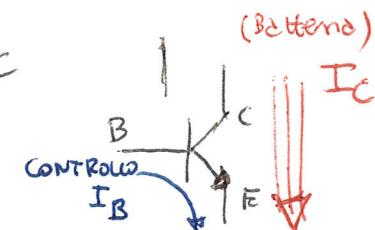


- In condizioni operative : Giunzione BE  $\rightarrow$  Diretta  
Giuizione BC  $\rightarrow$  inversa

- La corrente che entra nella base ( $I_B$ ) controlla le correnti dei portatori "emessi" dall'emettitore e "recolti" dal collettore  $I_C$

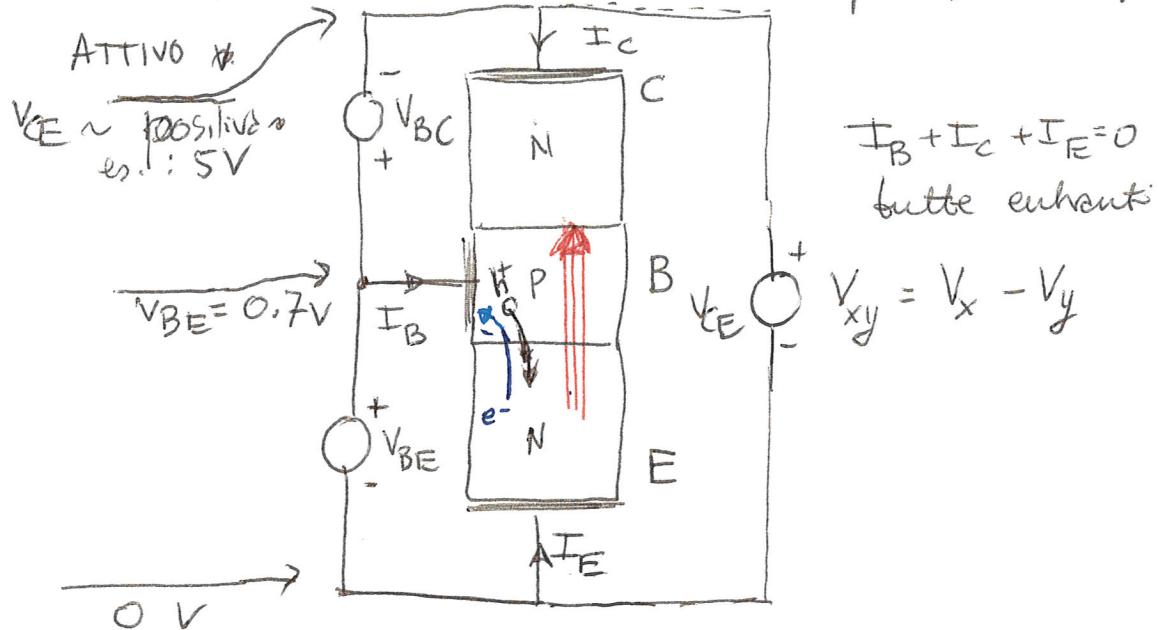
NPN : elettroni da E  $\rightarrow$  C

PNP : lacune da E  $\rightarrow$  C



Equazione base ;  $I_C$  proporzionale a  $I_B$ .

• Nomenclature (useremo sempre l'NPN)



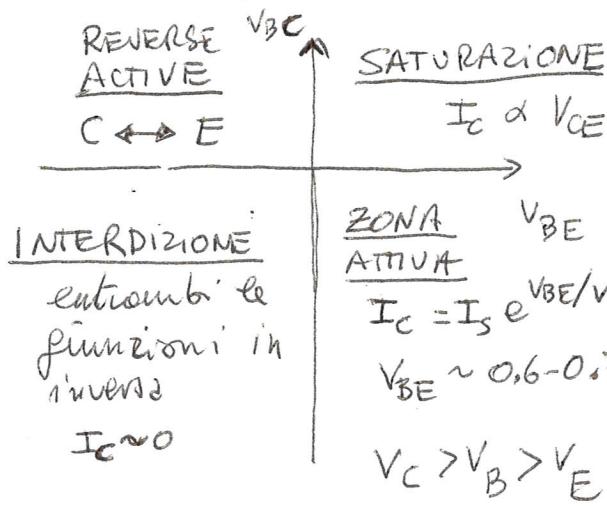
• Funzionamento:

- $I_B$  ( $\sim \mu A$ ) dovute alla giunzione BE in diretta  
→ elettroni "emessi" da E nella base
  - Gli elettroni attraversano la base (campo elettrico + diffusione) e vengono raccolti dal collettore
  - $I_C$  (mA) è controllato dalla  $V_{BE}$  che regola quanti sono gli elettroni emessi → switch ma anche amplificatore
- N.B. Perché gli elettroni attraversino la base senza ricombinarsi con le lacune bisogna che la base sia SOTTILE. Transistor  $\neq$  due diodi.  
Inoltre la base deve essere poco drogata (pochi lacuni)

$$I_C = (I_S) \left( e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - e^{\frac{V_{BC}}{V_T}} \right)$$

↳ Dipende da geometria e drogaggio

## 2. Zone di funzionamento



$V_{BE} \sim V_{BC} \sim 0,6-0,7$   
 $V_{CE}$  piccole ( $\sim 0,2$ )  
 $V_B > V_C \approx V_B > V_E$

$$I_C = I_S e^{V_{BE}/V_T} = h_{FE} \cdot I_B$$

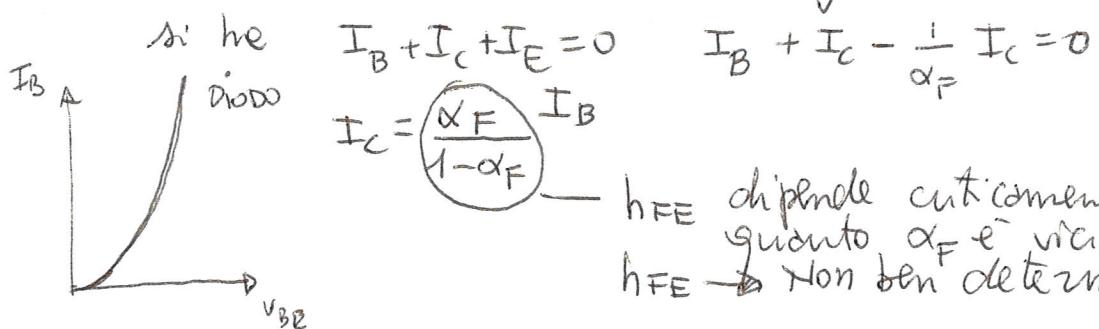
↑ Guadagno per gradi segnali (o in DC)  
 ~ grande → 100

(A) Zone attive  $V_{BE} > 0$ ,  $V_{BC} < 0$

$$I_C = I_S e^{V_{BE}/V_T} = h_{FE} I_B \rightarrow \frac{I_C}{I_B} = \text{costante} \approx 100-1000$$

$h_{FE}$  = large signal current gain  $I_B = I_o (e^{V_{BE}/V_T})$

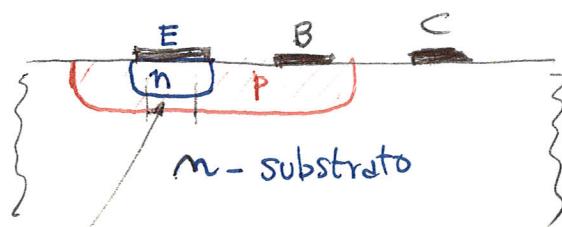
Se scriviamo  $\alpha_F = -\frac{I_C}{I_E}$  = efficienza di raccolta degli elettroni emessi ( $< 1$ )



$h_{FE}$  dipende criticamente da quanto  $\alpha_F$  è vicino a 1  
 $h_{FE} \rightarrow$  Non ben determinato

(B) Reverse active (non usate)

Scambio di  $C \leftrightarrow E$ . Ma i transistors non sono simmetrici



E e C hanno opposti diversi

zone di funzionamento  
del transistor

C) Interruzione  $V_{BE} < 0$   $V_{BC} < 0$

Tutte le finuzioni in inverse

$$I_c \sim 0$$

Transistor "spento"

D) Saturazione  $V_{BE} > 0$   $V_{BC} > 0$

Entrambi le finuzioni sono in diretta.

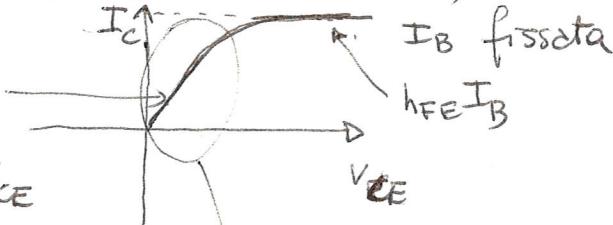
Non c'è più l'effetto moltiplicativo perché la finuzione BC non "porta via" gli elettroni

$$I_c = I_s (e^{V_{BE}/V_T} - e^{V_{CE}/V_T}) = I_s e^{V_{BE}} (1 - e^{-V_{CE}/V_T})$$

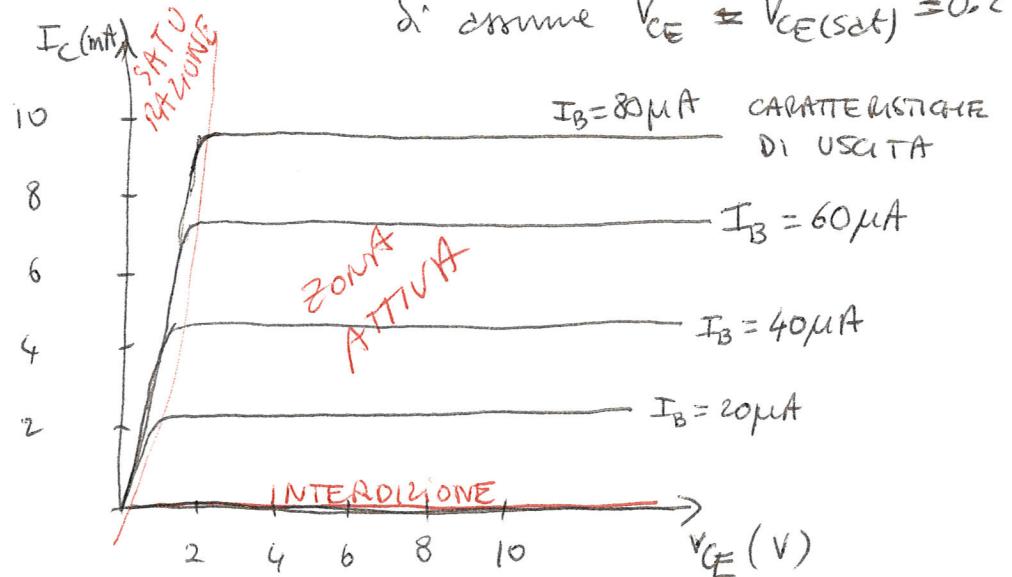
$$\text{Note } V_{BC} - V_{BE} = V_B - V_C + V_B - V_E = -V_{CE}$$

$$= h_{FE} I_B (1 - e^{-V_{CE}/V_T})$$

Curva lineare  
 $I_c \sim \frac{h_{FE} I_B}{V_T} V_{CE}$

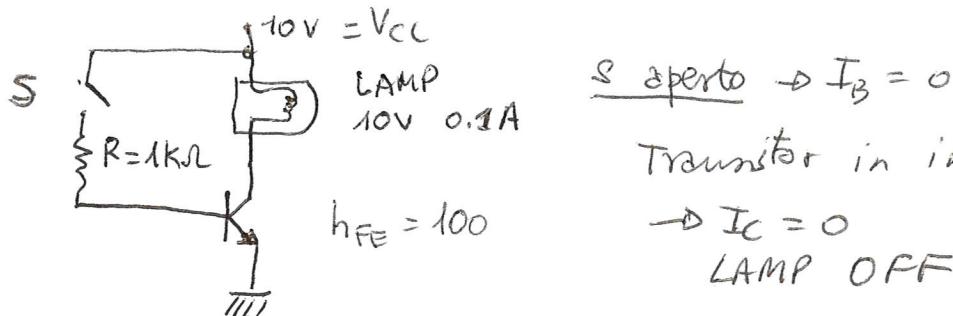


zona saturazione,  $V_{CE}$  piccole.  
 Si assume  $V_{CE} \approx V_{CE(sat)} = 0.2$ V



### 3. Il transistor come interruttore

- Primo uso base del transistor è come interruttore  $\rightarrow$  pilota una corrente grande usando una corrente piccola



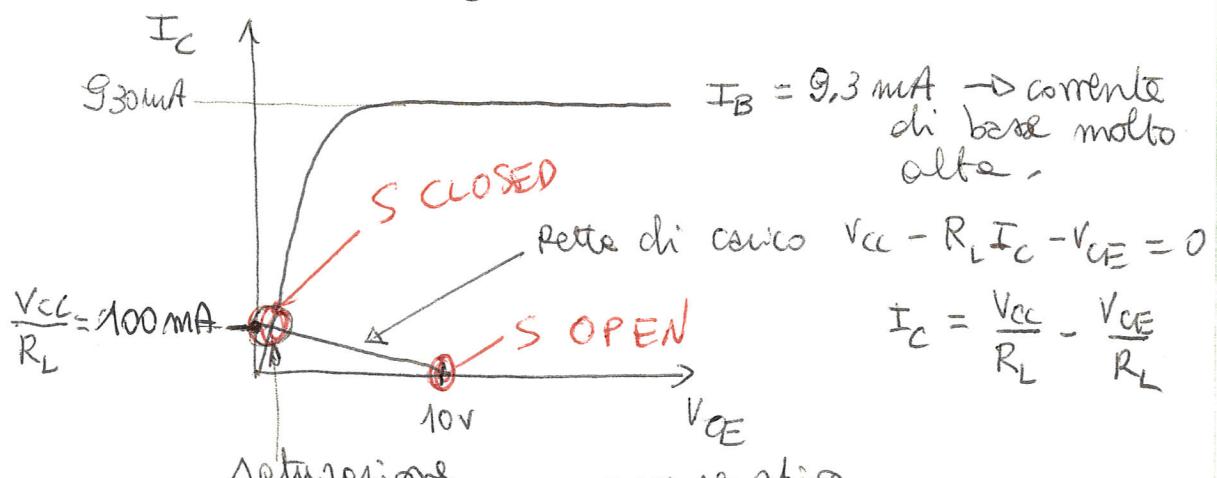
$$S \text{ chiuso } I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R} = \frac{10 - 0.7}{1} = 9.3 \text{ mA}$$

Quanto vale  $I_C$ ? Se fosse zero sarebbe

$$I_C = h_{FE} I_B = 940 \text{ mA} \rightarrow \text{NO}, \text{ perché la lampadina ha una } R_L = \frac{10V}{0.1A} = 100\Omega$$

- Superando 100mA cadrebbe più di 10V, e quindi la giunzione BC è polarizzata in diretta  $\rightarrow$  saturazione

$$I_C \sim 100 \text{ mA} \quad V_{CE} \sim 0$$



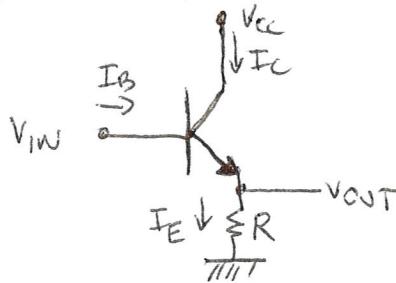
$$I_B = 9.3 \text{ mA} \rightarrow \text{overdrive, conservativo}$$

$$I_{B(MIN)} = \frac{I_{C(ON)}}{h_{FE}} = \frac{100 \text{ mA}}{100} = 1 \text{ mA}$$

$10-100 \text{ volte inferiore a } I_C$

#### 4. Emitter follower - Inseguitore di emettitore

Circuito base:



Se  $V_{IN}$  è positiva ( $> 0.7$ )

$$V_{OUT} = V_{IN} - V_{BE} \approx V_{IN} - 0.7$$

Perché serve?

$$Z_{OUT} \ll Z_{IN}.$$

$Z_{IN}$ :

→ Adattatore di impedenza

Se varia la tensione di base di  $\Delta V_{IN} = \Delta V_B$  anche

$V_E$  varia delle stesse quantità  $\Delta V_E = \Delta V_{OUT} = \Delta V_{IN} = \Delta V_B$

$$\Delta I_E = \frac{\Delta V_E}{R} \rightarrow (\text{se zona attiva}) \quad \Delta I_B = \frac{\Delta I_E}{h_{FE} + 1} = \frac{\Delta V_E}{R(h_{FE} + 1)} = \frac{\Delta V_B}{R(h_{FE} + 1)}$$

Variazioni  
da stato di  
quiescenza  
"small signal"

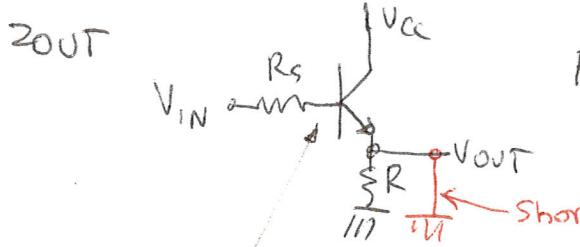
$$1. I_C = I_B + I_E \rightarrow I_E = (h_{FE} + 1) I_B$$

$$2. h_{FE} = \text{large signal current gain} = \frac{I_C}{I_B}$$

$$h_{FE} = \text{small " " " } n = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

In practice, molto simili.

$$\text{Quindi } R_{IN} = \frac{\Delta V_{IN}}{\Delta I_B} = R(h_{FE} + 1) \rightarrow \text{grande}$$



NB: se output è short  
 $V_B = 0.7$  fissa

$$R_{OUT} = \frac{\Delta V_{OUT}(\text{open})}{\Delta I_B(\text{short})} = \frac{\Delta V_{IN}}{\Delta I_E(\text{short})}^2$$

$$= \frac{\Delta V_{IN}}{(h_{FE} + 1) \Delta I_B(\text{short})} = \frac{\Delta V_{IN}}{(h_{FE} + 1) \frac{\Delta V_{IN}}{R_S}} =$$

$$= \frac{R_S}{(h_{FE} + 1)} \rightarrow \text{piccole.}$$

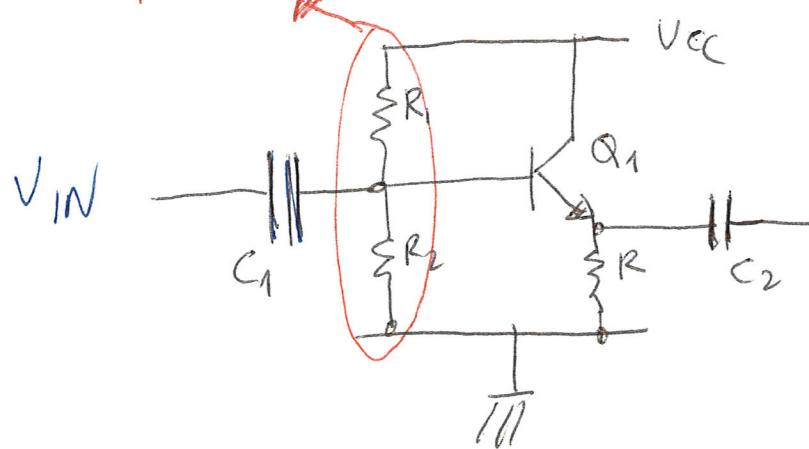
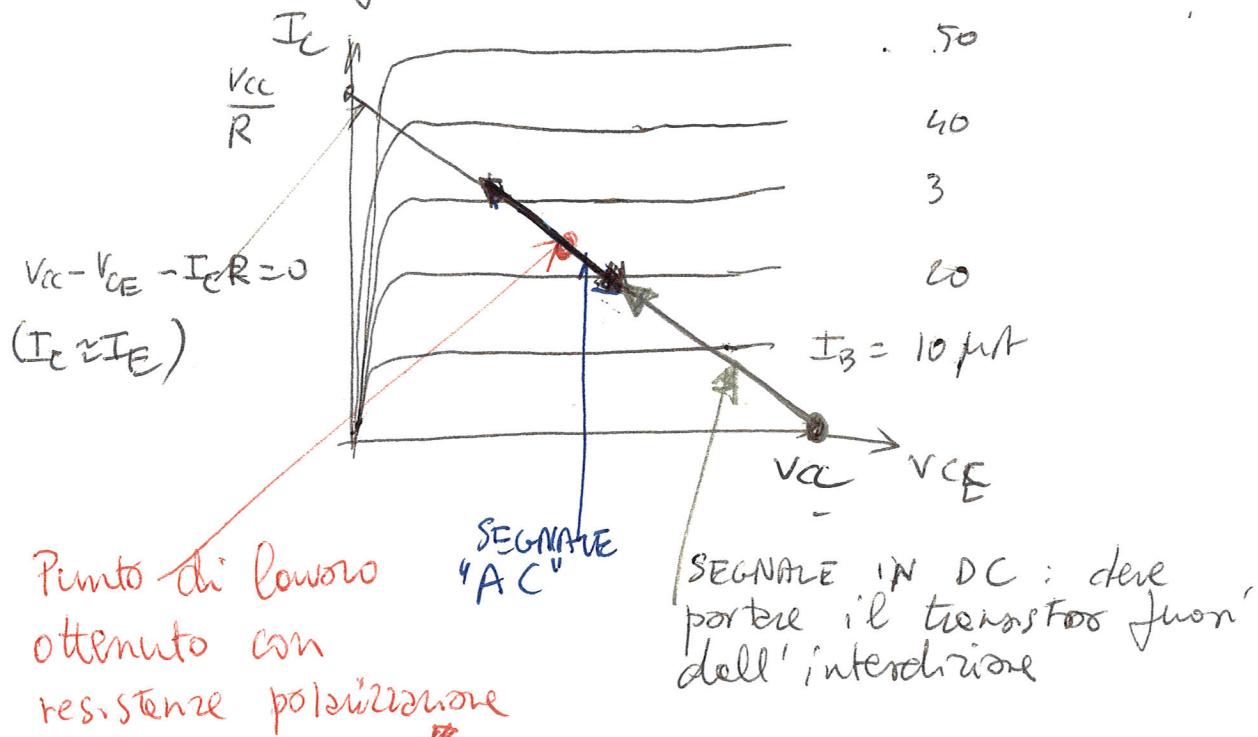
- Emitter follower: guadagno in tensione 1

$Z_{IN}$  elevata,  $Z_{OUT}$  bassa → guadagno in corrente.

$$\begin{cases} Z_{IN} = Z_{LOAD} \cdot (h_{FE} + 1) \\ Z_{OUT} = Z_{SOURCE} / (h_{FE} + 1) \end{cases}$$

## 5. Polarizzazione del transistor e punto di lavoro

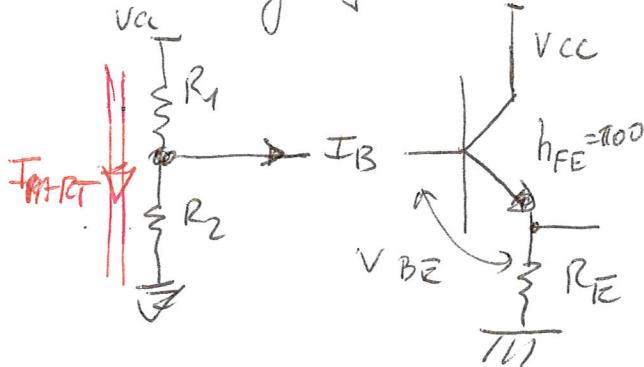
- Problemi con il circuito base di emitter follower:
  - funziona solo per segnali positivi
  - la sorgente deve avere  $V > 0,7V$
  - è la sorgente che fornisce le correnti di base al transistor (in DC)
- Normalmente i segnali vengono accoppiati in "AC"  $\rightarrow$  separe le componenti di segnale dalle polarizzazioni



• Come calcolare il punto di lavoro (o quiescenza)

(A) Partitore "stiff" = rigido

Significa che  $I_B \ll I_{PART} \rightarrow V_{PART} = \text{cost.}$



$$V_E^Q = I_C^Q \cdot R_E$$

$$V_B = V_E + V_{BE} = I_C^Q \cdot R_E + 0.7V$$

$\hookrightarrow = V_{PARTITORE}$

$$V_{PART} = V_{cc} \frac{R_2}{R_1+R_2} = V_{cc} \cdot \frac{1}{1 + R_1/R_2} \rightarrow \frac{R_1}{R_2} = \frac{V_{cc}}{V_{PART}} = 1$$

$$\underline{\text{Es}} : V_B = 10mA \times 0.5k\Omega + 0.7 = 5.7V$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{10}{5.7} - 1 = 0.75$$

Perciò sia  $I_B^Q \ll I_{PART} = \frac{V_{cc}}{R_1+R_2} \rightarrow R_1+R_2 \ll \frac{V_{cc}}{I_B}$

$$R_1+R_2 \ll \frac{V_{cc}}{I_C^Q/h_{FE}} = \frac{10V}{10mA/100} = \frac{10V}{100mA} = 100k\Omega$$

$$R_1, R_2 \sim 10k$$

$$\text{Ad esempio } R_1 = 4.7k \quad R_2 = 5.6k \quad \frac{R_1}{R_2} = 0.84$$

$$\text{oppure } R_1 = 3.9k \quad R_2 = 5.6k \quad \frac{R_1}{R_2} = 0.70$$

Le correnti di quiescenza effettive sono

$$I_C^Q = \frac{V_B - 0.7}{R_E} = \frac{V_{cc}}{R_E} \left( \frac{1}{1 + R_1/R_2} \right) - \frac{0.7}{R_E} \quad \begin{cases} 9.47mA \\ 10.4mA \end{cases}$$

Input :

$$R_E \rightarrow \text{fissa } I_{C MAX} = V_{cc}/R_E$$

$I_C^Q$  = punto di quiescenza

$$\hookrightarrow : V_{cc} = 10V$$

$$I_{C MAX} = 20mA$$

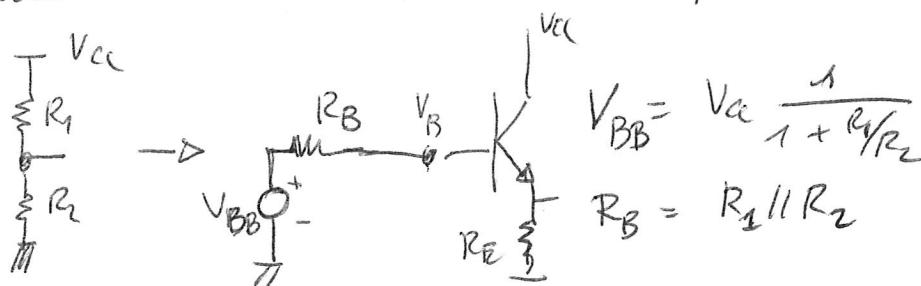
$$\rightarrow R_E = 0.5k\Omega$$

$$I_C^Q = I_{C MAX}/2 = 10mA$$

Notabene:  $h_{FE}$  non entra nel finale il punto di lavoro, se non nel determinare l'ordine di grandezza delle  $R$ .

### B) Partitore "soft" = moscito -

= Può essere desiderabile avere  $R_1, R_2$  più grandi  $\rightarrow$  tener conto delle variazioni delle tensioni di uscita del partitore.



Stesso punto di lavoro  $I_c^Q = 10\text{mA}$

$$V_B = I_c^Q R_E + 0,7 = V_{BB} - I_B^Q \cdot R_B$$

$$V_{BB} = I_c^Q R_E + 0,7 + \frac{I_c^Q}{h_{FE}} R_B = I_c^Q \left( R_E + \frac{R_B}{h_{FE}} \right) + 0,7V$$

Input: dire quanto deve essere  $R_B$ :

Dopo si trova  $R_1$  e  $R_2$  de

$$\begin{cases} R_1 // R_2 = R_B \\ \frac{R_1}{R_2} = \frac{V_{cc}}{V_{BB}} - 1 \end{cases}$$

dipende da  $h_{FE}$

Esempio: voglio che  $R_B = 100\text{k}$

$$1. V_{BB} = 10\text{mA} (0,5\text{k} + 1\text{k}) + 0,7V = 15,7V$$

NON SI PUÒ!

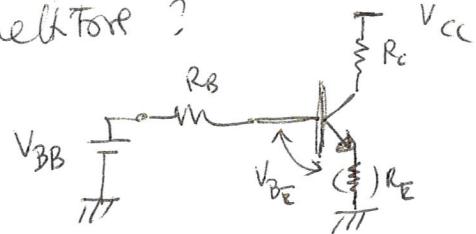
$$2. R_B = 20\text{k} \quad V_{BB} = 7,7V \quad R_1/R_2 = 0,3$$

$$R_B = R_1 // R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = R_1 \left( \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2}} \right) = R_1 \cdot \left( \frac{V_{BB}}{V_{cc}} \right)$$

$$R_1 = R_B \cdot \frac{V_{cc}}{V_{BB}} = 20\text{k} \cdot \frac{10\text{V}}{7,7\text{V}} = 25,9\text{k} \rightarrow R_1 = 27\text{k}$$

$$R_2 = 91\text{k}$$

c) Si può polarizzare senza resistenze di emettitore?



$$V_{BB} = \frac{V_{CC}}{1 + R_1/R_2}$$

$$R_B = R_1 \parallel R_2$$

In questo caso  $I_B^Q = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$   $\rightarrow I_c^Q = h_{FE}(V_{BB} - V_{BE}) / R_B$

Le corrente di quiescenza è dipendente da  $h_{FE}$ , che è un parametro poco stabile.

Saranno l'espressione completa:

$$V_{BB} = I_B^Q R_E + V_{BE} + I_B^Q \cdot R_B =$$

$$= (1+h_{FE}) I_B^Q R_E + I_B^Q R_B + V_{BE} \rightarrow I_B^Q = \frac{V_B - V_{BE}}{R_B + (1+h_{FE}) R_E}$$

Cioè  $I_c^Q = \frac{h_{FE} (V_{BB} - V_{BE})}{R_B + (1+h_{FE}) R_E}$

Bisogna che sia  $R_B \gg h_{FE} R_E$  per avere stabilità del punto di lavoro,

