

# Laboratorio di Segnali e Sistemi

## - Esercitazione -3 -

### Amplificatore ad Emettitore Comune con capacità sull'emettitore



Claudio Luci  
**SAPIENZA**  
UNIVERSITÀ DI ROMA

*last update : 070117*

# Esercitazione 3

## Amplificatore CE con capacità in parallelo a $R_E$

- Misura della frequenza di taglio per due valori diversi della capacità  $C_E$
- Misura dell'amplificazione massima (a frequenze intermedie)
- Diagrammi di Bode (ampiezza e fase)
- Misura della  $r_e$
- Misura della resistenza d'uscita nel caso di massima larghezza di banda
- Misura della resistenza d'ingresso nel caso di massima larghezza di banda
- Studio dell'amplificatore con una piccola reazione negativa (voto bonus)

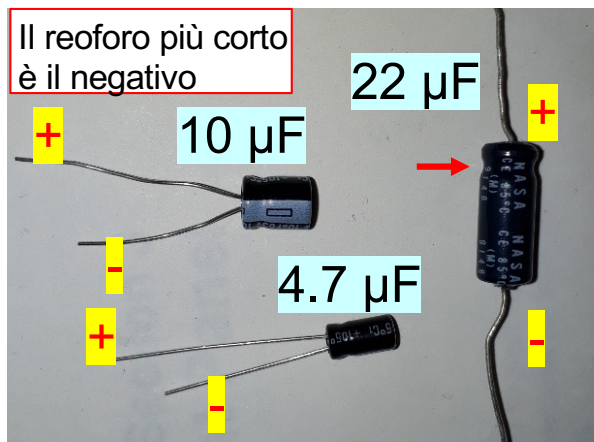
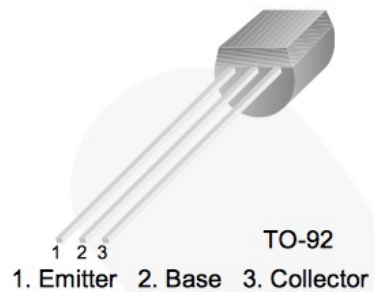
## Relazione

- Presentare il set di misure per uno dei due tipi di amplificatore (con o senza  $C_E$ );
- Facoltativo (voto bonus): confronto delle misure tra i due amplificatori (ad esempio amplificazione, resistenza d'ingresso, banda passante ...)

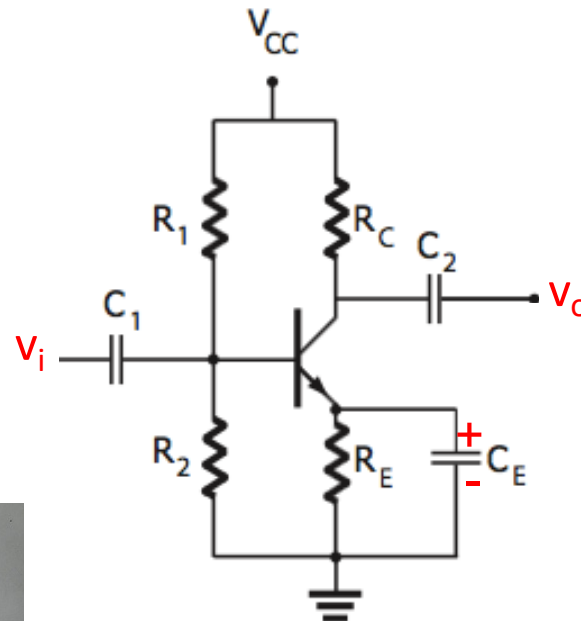
# Amplificatore CE

Utilizzeremo il transistor 2N2222A (npn) per realizzare un amplificatore ad emettitore comune **con capacità** sull'emettitore. Vogliamo studiare l'effetto di questo condensatore sul diagramma di Bode del circuito. Utilizziamo il circuito dell'esercitazione precedente, ma dobbiamo cambiare il valore di  $C_1$  (**Nelle tabelle sono indicati i valori delle resistenze scelti la volta scorsa**)

Involucro plastico



Se volete diminuire l'amplificazione  $\rightarrow$  cambiate  $R_1$



Vedremo con che criterio scegliere  $C_1$  e  $C_E$ . Vogliamo avere la frequenza di taglio indotta da  $C_1$  intorno a 100 Hz e scegliamo diversi valori della frequenza di taglio indotta da  $C_E$

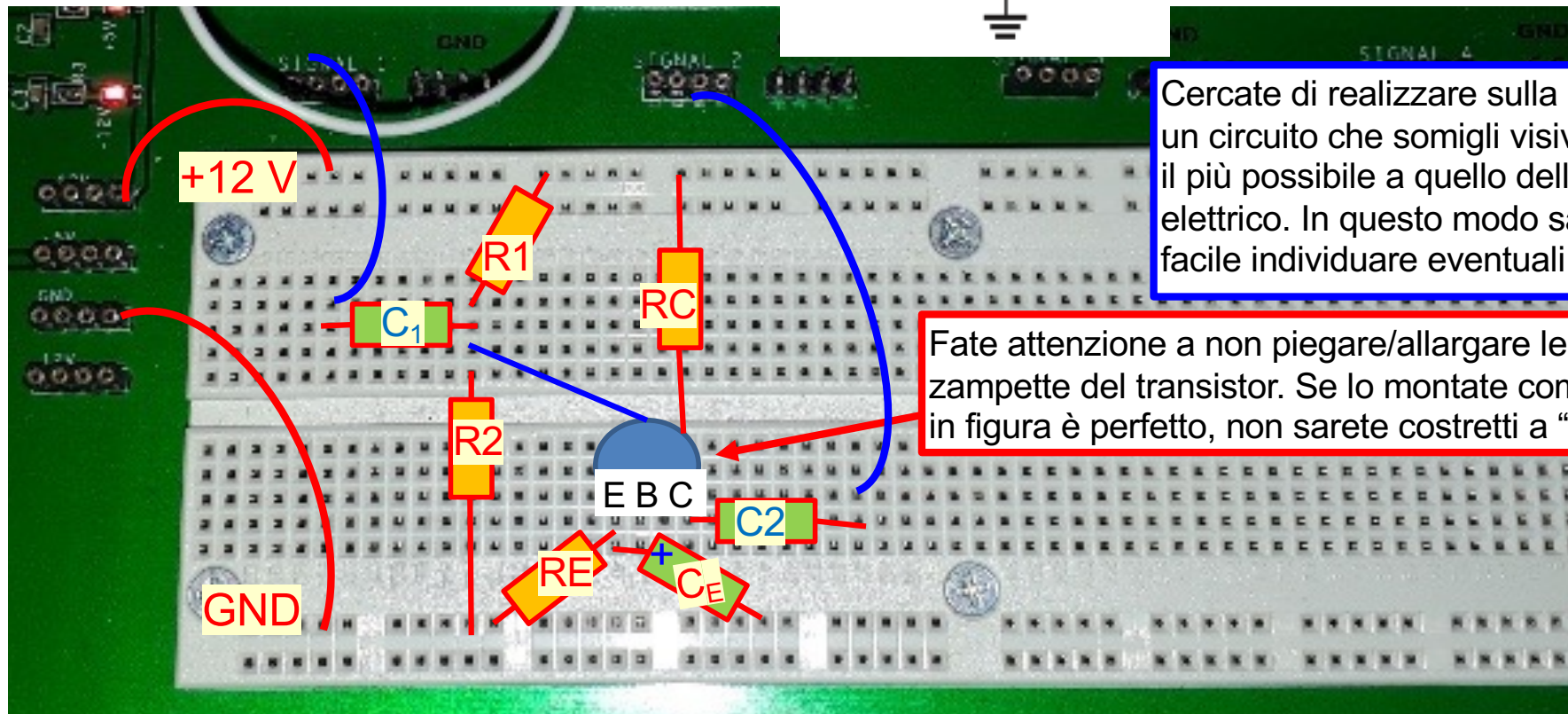
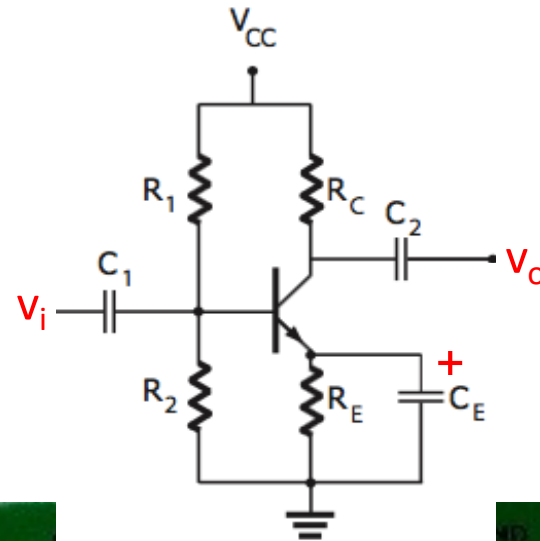
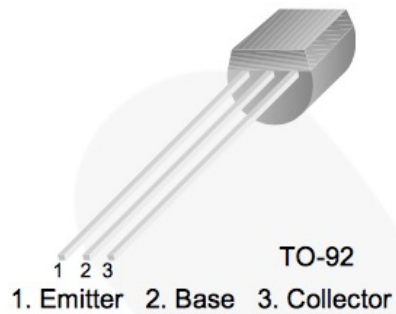
Abbiamo scelto:

- $V_{CC} = 12\text{ V}$
- $V_{CE} = 5-6\text{ V}$
- $I_C \sim 1\text{ mA}$
- $A_V = -(5-6)$
- $f_t \sim 500\text{ kHz}$

Ad esempio:

- $R_C = 5.6\text{ k}\Omega$
- $R_E = 1\text{ k}\Omega$
- $R_1 = 33\text{ k}\Omega \rightarrow 47\text{ k}\Omega$
- $R_2 = 5.6\text{ k}\Omega$
- $C_1 = 68\text{ nF} \rightarrow 1-2.2\text{ }\mu\text{F}$
- $C_2 = 470\text{ nF} \rightarrow 1-2.2\text{ }\mu\text{F}$
- $C_E = \text{xx }\mu\text{F (el.)}$

# Esempio di montaggio

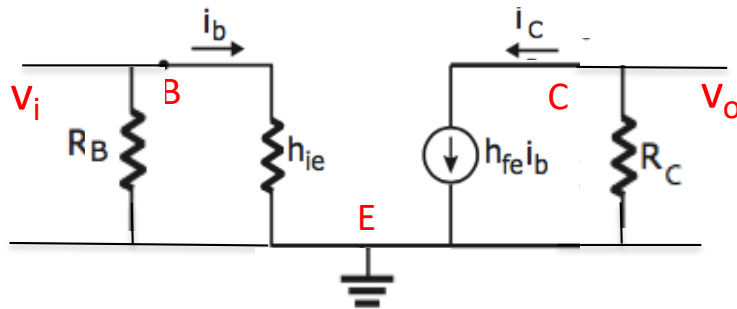


Cercate di realizzare sulla basetta un circuito che somigli visivamente il più possibile a quello dello schema elettrico. In questo modo sarà più facile individuare eventuali errori

Fate attenzione a non piegare/allargare le zampette del transistor. Se lo montate come in figura è perfetto, non sarete costretti a "torturarlo"

# Amplificazione del circuito

Lavoriamo a frequenze intermedie in modo da trascurare tutte le capacità del circuito



$$A_V = -\frac{I_C}{V_T} \cdot R_C$$

- L'introduzione della  $C_E$  non ha cambiato il punto di lavoro del transistor che avete già misurato:

$$A_v = -\frac{1 \cdot 10^{-3}}{25 \cdot 10^{-3}} \cdot 5.6 \cdot 10^3 = -224 \quad \text{Molto grande!}$$

- Dinamica d'ingresso:  $(V_{i\_max} = \min(V_{CE}-0.2; V_{CC}-V_{CE})/A_V = 5.2/224 = 23 \text{ mV})$

$$V_{i\_max} = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{A_V} = \frac{(R_C + R_E)I_C}{R_C I_C / V_T} = V_T \times \left(1 + \frac{R_E}{R_C}\right)$$

$$\text{Se } V_{CE}-0.2 < V_{CC}-V_{CE} \rightarrow V_{i\_max} < V_T$$

Si può lavorare con un segnale così basso ma facciamo attenzione.

# Come diminuire la $I_C$

Si potrebbero avere problemi con un'amplificazione così grande (ad esempio non si raggiunge il plateau) , quindi proviamo a diminuirla:  $A_v = I_C \cdot R_C / V_T$

- Questo può essere fatto riducendo  $I_C$  oppure  $R_C$
  - $I_C = V_E / R_E$  ; quindi aumentando  $R_E$  oppure diminuendo  $V_E$
  - Però avere una  $R_E$  quasi uguale alla  $R_C$  non è una buona cosa (la retta di carico dinamica si discosterebbe troppo da quella statica), quindi è meglio abbassare la  $V_E$  abbassando la  $V_B$ . Questo si fa prendendo una  $R_2$  più piccola
- Per avere una  $I_C$  ad esempio di 0.5 mA, occorre avere  $V_E = 0.5$  V e quindi  $V_B = 1.2$  V

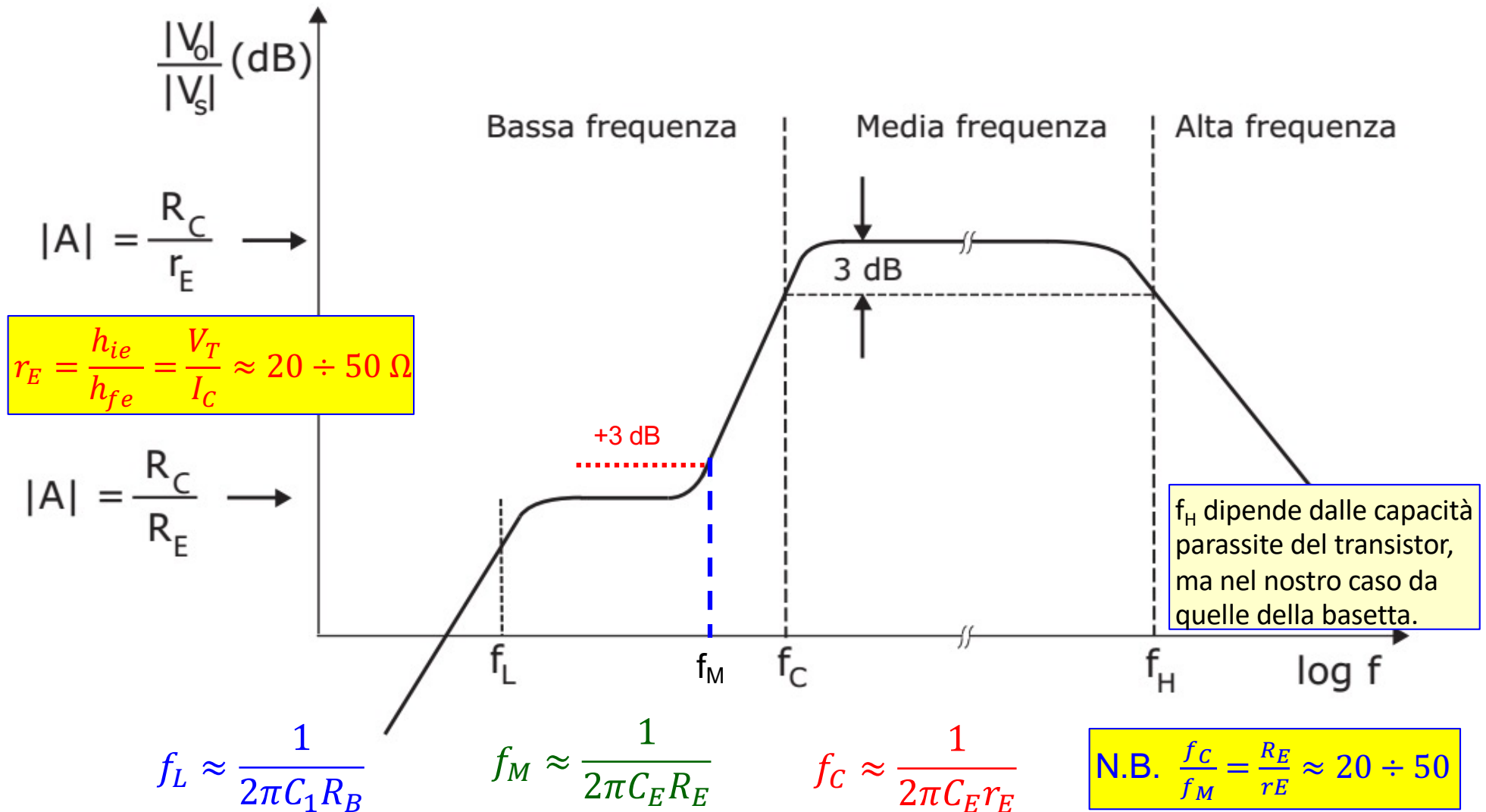
$$V_B = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2}; \text{ se } R_1 + R_2 = 12 \text{ k}\Omega \Rightarrow R_2 = 1.2 \text{ k}\Omega \text{ e } R_1 = 10.8 \text{ k}\Omega$$

però  $R_2$  è troppo piccola, allora le scaliamo per un fattore  $\sim 4.5$

$$R_2 = 5.6 \text{ k}\Omega \text{ e } R_1 = 47 \text{ k}\Omega \text{ (di fatto cambiamo } R_1 \text{ e non } R_2 \text{ !)}$$
$$V_B = V_{CC} \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 12 \times \frac{5.6}{5.6 + 47} = 1.28 \text{ V (dovrebbe andare bene)}$$

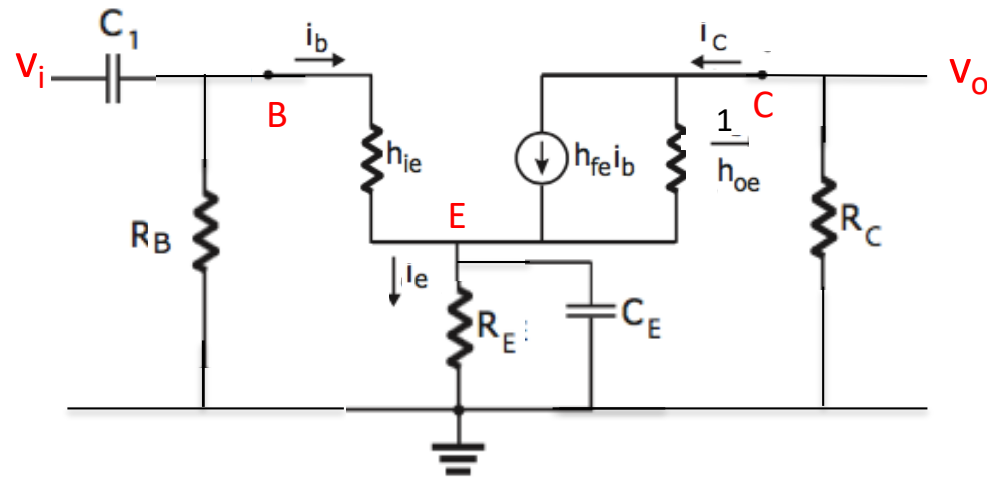
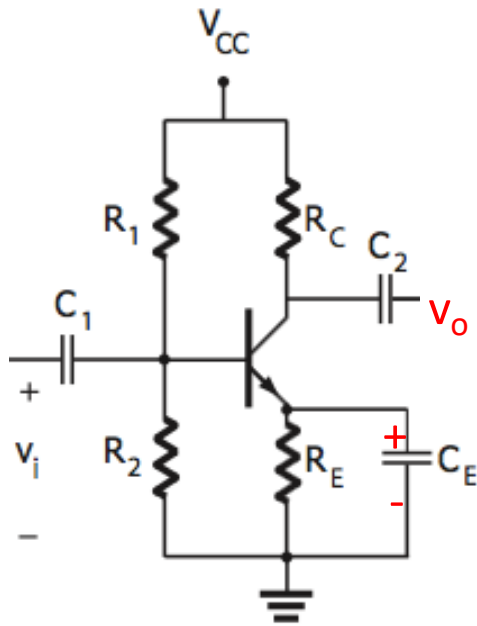
Fate verifica veloce dell'amplificazione massima, della dinamica d'ingresso e della frequenza di taglio inferiore e di quella superiore (avendo messo la  $C_E$  grande, come vedremo in seguito).

# Diagramma di Bode



Molto difficile vedere nello stesso plot i due plateaux. Scegliamo la  $C_1$  la più grande possibile in modo che  $f_L$  sia la più piccola possibile. D'altra parte, l'effetto di  $C_1$  l'abbiamo valutato nella precedente esercitazione.

# Amplificazione in funzione di f



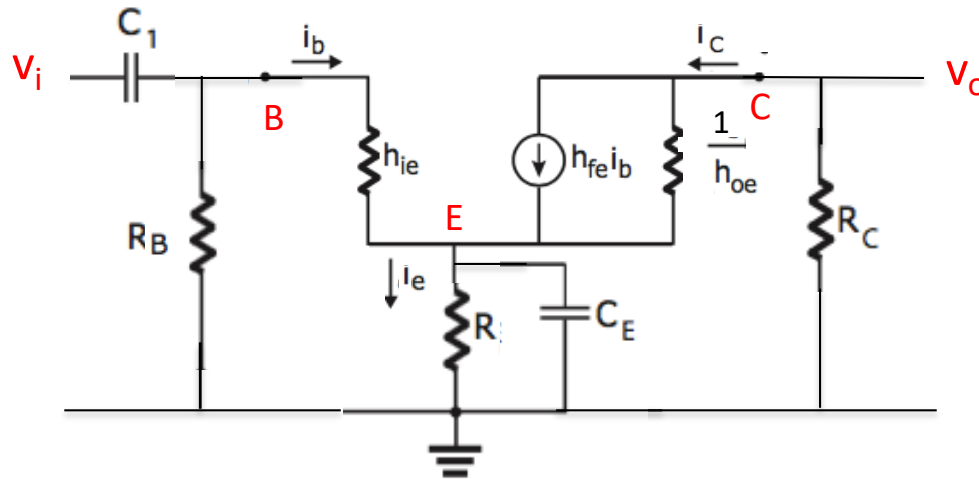
$$Z_E = R_E \parallel C_E = \frac{R_E}{1 + j\omega R_E C_E}$$

$$Z_i = R_B \parallel \left[ h_{ie} + (h_{fe} + 1) \frac{R_E}{1 + j\omega R_E C_E} \right]$$

- La frequenza di taglio inferiore introdotta da  $C_1$  dipende da  $C_1$  e  $Z_i$ , la quale a sua volta dipende da  $C_E$ . Per semplificare scegliamo  $C_1$  e  $C_E$  in modo tale che la frequenza di taglio di  $C_1$  sia piccola e che la reattanza di  $C_E$  sia grande rispetto a  $R_E$  a quella frequenza e possiamo fattorizzare i contributi di  $C_1$  e  $C_E$  nell'andamento in frequenza dell'amplificatore.

1.  $\omega_L \approx \frac{1}{R_B C_1}$  ; facciamo in modo che:  $\frac{1}{\omega_L C_E} \gg R_E$  , cioè'  $\omega_L \ll \omega_M = \frac{1}{R_E C_E}$
2. Se  $f_M \gg f_L$  allora i due contributi sono distinti tra loro, altrimenti la frequenza di taglio inferiore dipende da entrambi i condensatori

# Amplificazione in funzione di f



$$V_B = h_{ie} i_b + (h_{fe} + 1) Z_E i_b$$

$$V_o = -h_{fe} i_b R_C$$

$$\Rightarrow \frac{V_o}{V_B} = - \frac{h_{fe} R_C}{h_{ie} + (h_{fe} + 1) Z_E}$$

$$r_E = \frac{h_{ie}}{h_{fe}}$$

- Sostituiamo l'espressione di  $Z_E$  nella formula e ricordiamo che  $h_{ie}/h_{fe}$  è la resistenza  $r_E$  che interviene nel modello a T del transistor;  $r_E$  schematizza la resistenza del silicio tra il contatto metallico dell'emettitore e la giunzione base emettitore, essa è dell'ordine di una decina di Ohm.

$$A_V = - \frac{R_C}{r_E} \frac{1}{1 + \frac{R_E / r_E}{1 + j\omega R_E C_E}}$$

- Da notare che:

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} A_V = - \frac{R_C}{r_E} = \frac{h_{fe} R_C}{h_{ie}}$$

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} A_V = - \frac{R_C}{R_E}$$

# Amplificazione in funzione di f

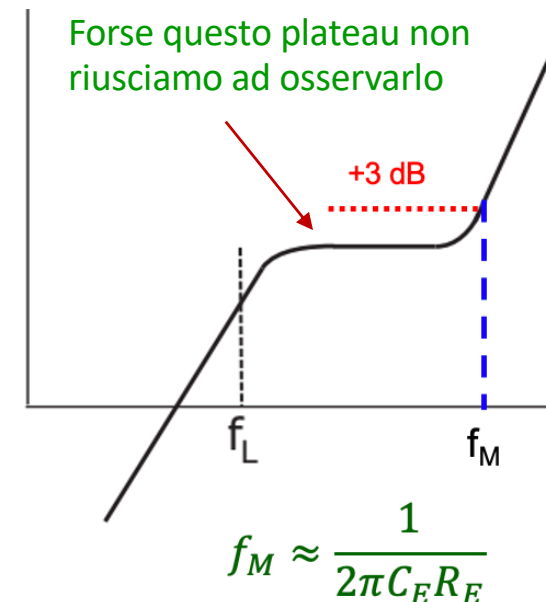
$$A_V = -\frac{R_C}{r_E} \frac{1}{1 + \frac{R_E/r_E}{1 + J\omega R_E C_E}} = -\frac{R_C}{r_E} \cdot \frac{1 + J\omega R_E C_E}{1 + \frac{R_E}{r_E} + J\omega R_E C_E} \approx -\frac{R_C}{r_E} \cdot \frac{1 + J\omega R_E C_E}{\frac{R_E}{r_E} + J\omega R_E C_E}$$

□ Troviamo il modulo:

$$|A_V| = \frac{R_C}{r_E} \cdot \frac{\sqrt{1 + (\omega R_E C_E)^2}}{\sqrt{\left(\frac{R_E}{r_E}\right)^2 + (\omega R_E C_E)^2}}$$

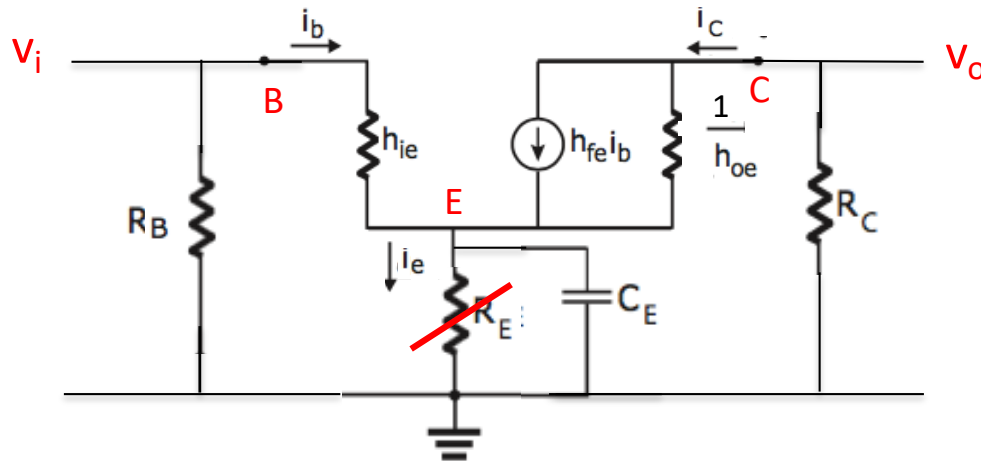
□ Calcoliamo quanto vale per  $\omega_M = \frac{1}{R_E C_E}$ :

$$|A_V| = \frac{R_C}{r_E} \cdot \frac{\sqrt{1+1}}{\sqrt{\left(\frac{R_E}{r_E}\right)^2 + 1}} \approx \frac{R_C}{r_E} \cdot \frac{\sqrt{1+1}}{\sqrt{\left(\frac{R_E}{r_E}\right)^2}} = \frac{R_C}{R_E} \cdot \sqrt{2} = \frac{R_C}{R_E} + 3 \text{ dB}$$



# Amplificazione in funzione di f

❑ Vediamo ora che succede per frequenze f molto maggiori di  $f_M$ :



$$\omega \gg \omega_M = \frac{1}{R_E C_E} \Rightarrow \frac{1}{\omega C_E} \ll R_E$$

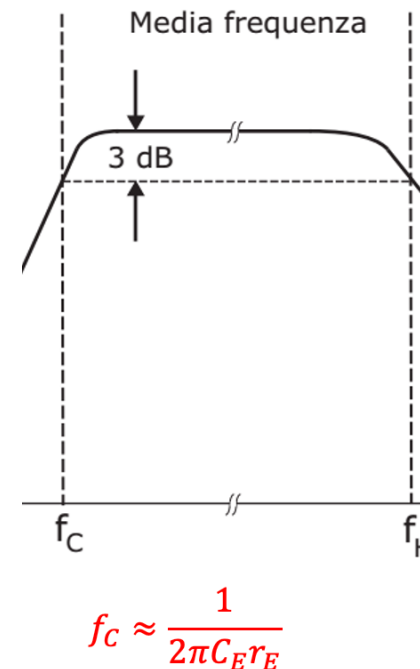
$$V_B = h_{ie} i_b + (h_{fe} + 1) \frac{1}{j\omega C_E} i_b$$

$$V_o = -h_{fe} i_b R_C$$

$$\Rightarrow \frac{V_o}{V_B} = - \frac{h_{fe} R_C}{h_{ie} + (h_{fe} + 1) \frac{1}{j\omega C_E}} = - \frac{R_C}{r_E} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega r_E C_E}}$$

❑ Troviamo il modulo:  $|A_V| = \frac{R_C}{r_E} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega r_E C_E}\right)^2}}$

❑ Per  $\omega_C = \frac{1}{r_E C_E}$  si ha:  $|A_V| = \frac{R_C}{r_E} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}$



# Scelta dei condensatori

- Vogliamo quanto vale  $f_L$  scegliendo  $C_1$  di  $1 \mu F$  (NON elettrolitico).  
La resistenza d'ingresso dell'amplificatore, trascurando la  $C_E$ , è pari a circa  $4.5 \text{ k}\Omega$

$$f_L = \frac{1}{2\pi C_1 R_i} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^{-6} \cdot 4.5 \cdot 10^3} = 35 \text{ Hz} \quad \text{Con } C_1 = 2.2 \mu F \text{ è la metà}$$

1. Proviamo a misurare  $f_C$ ; scegliamo una  $C_E$  tale da avere una frequenza di taglio di  $3 \text{ kHz}$  :

Se  $r_E = \frac{V_T}{I_C} = \frac{25 \text{ mV}}{0.5 \text{ mA}} = 50 \Omega$  possiamo scegliere:

$$C_E = \frac{1}{2\pi f_C r_E} = \frac{1}{2\pi \cdot 3 \cdot 10^3 \cdot 50} = 1.1 \mu F \Rightarrow 1 \mu F$$

2. A questo punto mettete una  $C_E$  grande, in modo da avere una  $f_C$  la più piccola possibile, ad esempio:

$$C_E = 100 \mu F \Rightarrow f_C = 165 \text{ Hz}$$

questa frequenza di taglio è confrontabile con quella indotta da  $C_1$ , che ora dovrebbe essere aumentata perché la resistenza interna dell'amplificatore è diminuita.

# Verifica del circuito

Una volta montato il circuito, occorre fare alcune verifiche preliminari prima di iniziare le misure richieste

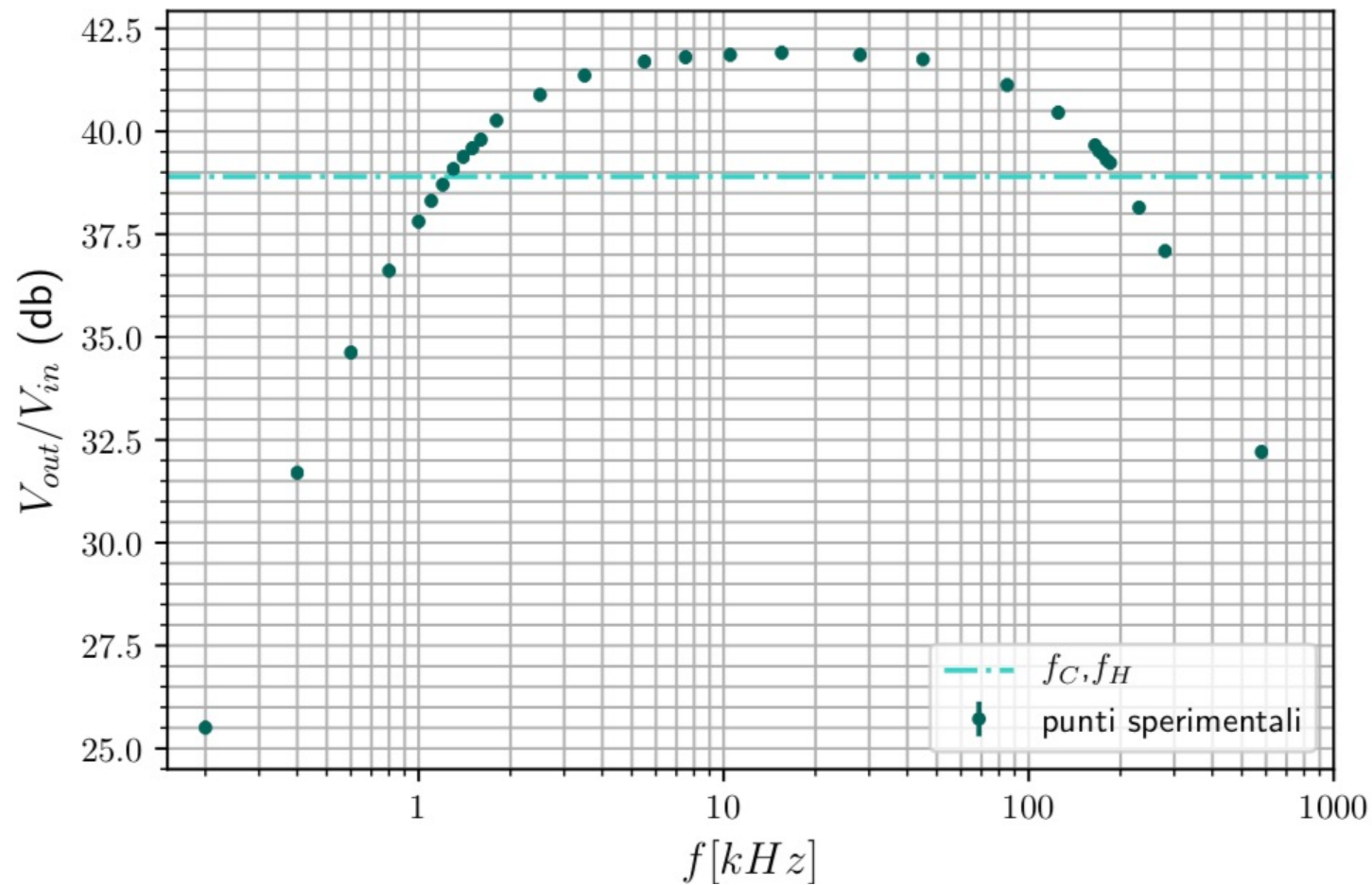
1. Controllate il punto di lavoro del transistor:
    - $V_{CE}$ ,  $V_{BE}$ ,  $I_C$ ,  $I_B$ ,  $I_E$
  2. Misurate anche il potenziale della base e dell'emettitore e confrontatelo con i valori aspettati dal progetto
- 
1. Una volta verificato che il punto di lavoro corrisponde, grosso modo, a quanto progettato, potete fornire in ingresso un segnale sinusoidale di ampiezza tale da far lavorare il transistor sempre nella zona attiva.
  2. Fate un rapido scan in frequenze per individuare il valore dell'amplificazione massima
    - Controllate che il segnale di uscita non sia distorto. Se lo fosse riducete l'ampiezza del segnale d'ingresso
  3. Controllate dove si trova la posizione della frequenza di taglio, corrispondente al 70% dell'amplificazione massima.

Fate questa verifica con la  $C_E$  grande

# Misura di $f_C$ e $f_H$ e stima di $r_E$

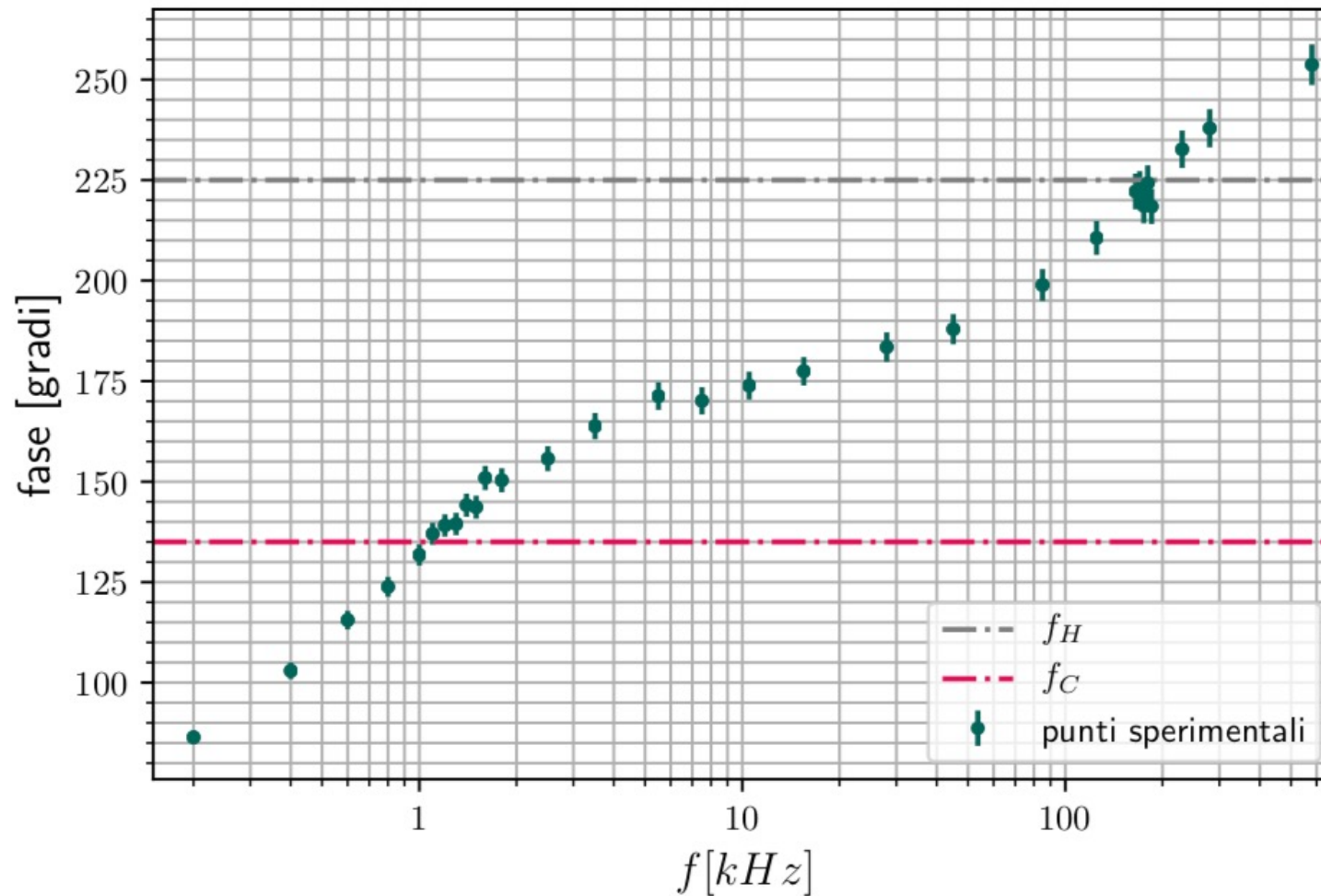
- Con  $C_E = 1.0 \mu F$  la frequenza di taglio è intorno a 3 kHz. Potete scegliere altri valori se volete aumentarla un po' o diminuirla. Ad esempio con  $3.3 \mu F$  avete circa 1 kHz.
- Fate uno scan in frequenza partendo da frequenze basse (50-100 Hz).
- Potreste avere un piccolo plateau, da verificare, ma è difficile.
- Aumentate la frequenza in modo da vedere la risalita dell'amplificazione
- Dovreste raggiungere il secondo plateau alla massima amplificazione
- Aumentate ancora la frequenza in modo da vedere la discesa dell'amplificazione
- Su questo grafico dovreste essere in grado di misurare  $f_C$ ,  $f_H$  e il plateau.  
*Confrontate  $f_H$  con quella misurata la volta scorsa con l'amplificatore senza  $C_E$ .*
- Controllate se torna con quanto ci aspettiamo in base ai calcoli fatti in precedenza.
- Se  $f_C$  è molto diversa da quello che ci aspettiamo, 3 kHz, vuol dire che la stima che abbiamo fatto di  $r_E$  non è corretta. Provate a cambiare  $C_E$  in modo da avere  $f_C$  nell'intervallo voluto.
- Provate a stimare  $r_E$  anche dal valore dell'amplificazione al plateau. Due valori di  $r_E$  misurati con  $f_C$  e con  $Av_{max}$  dovrebbero essere compatibili tra loro.

# Diagramma di Bode con $C_{E1}$



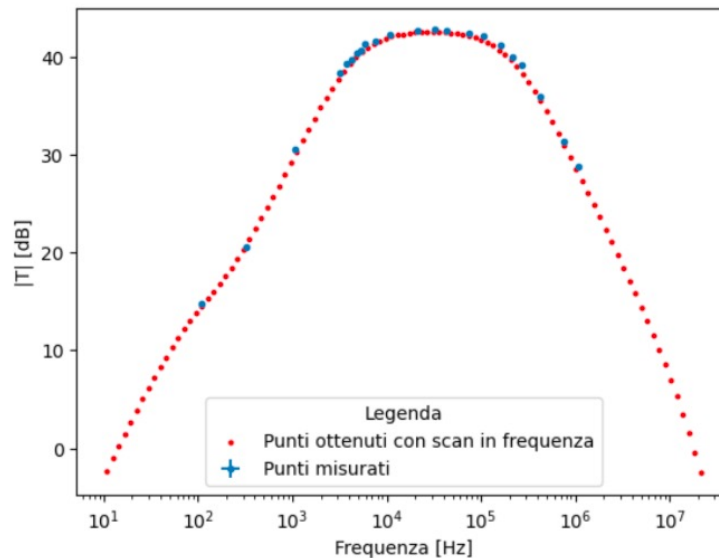
| Frequenza di taglio | Valore teorico  | Valore sperimentale |
|---------------------|-----------------|---------------------|
| $f_c$ [kHz]         | $1.18 \pm 0.02$ | $1.21 \pm 0.13$     |

# Diagramma di Bode con $C_{E1}$

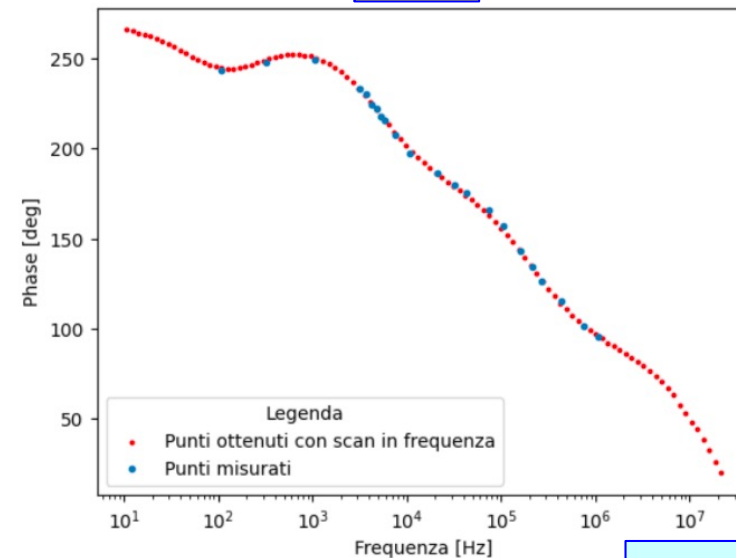


# Diagramma di Bode con $C_{E1}$ (un altro gruppo)

Ampiezza (dB)



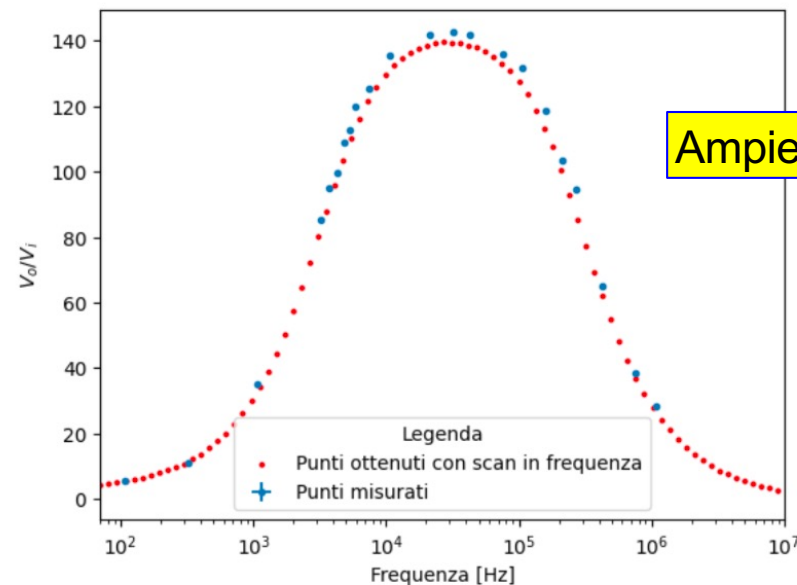
Fase



10 MHz

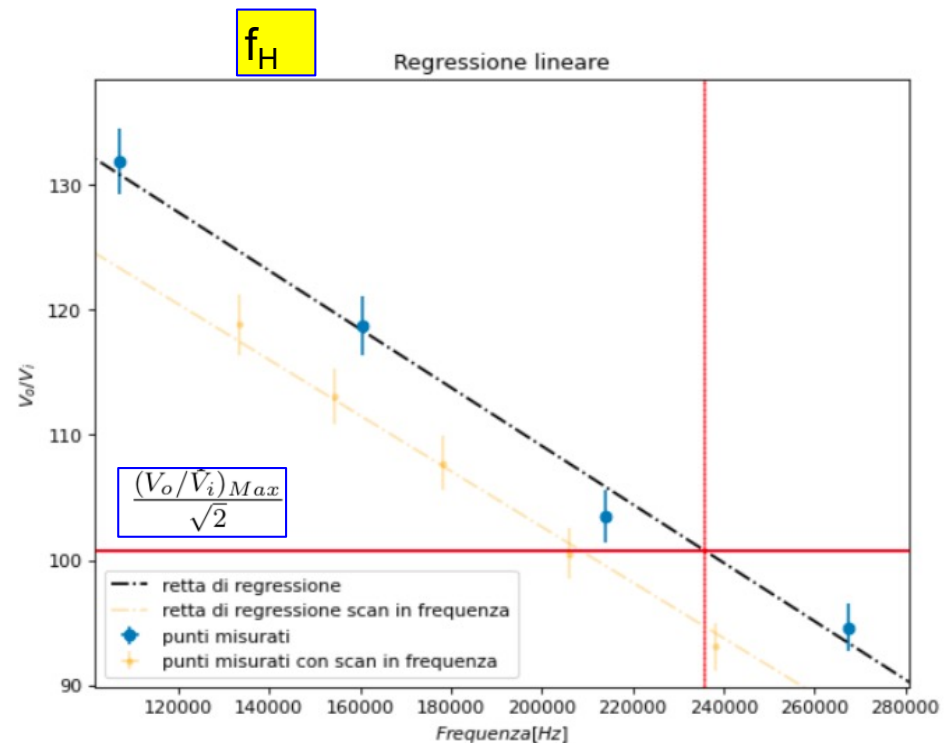
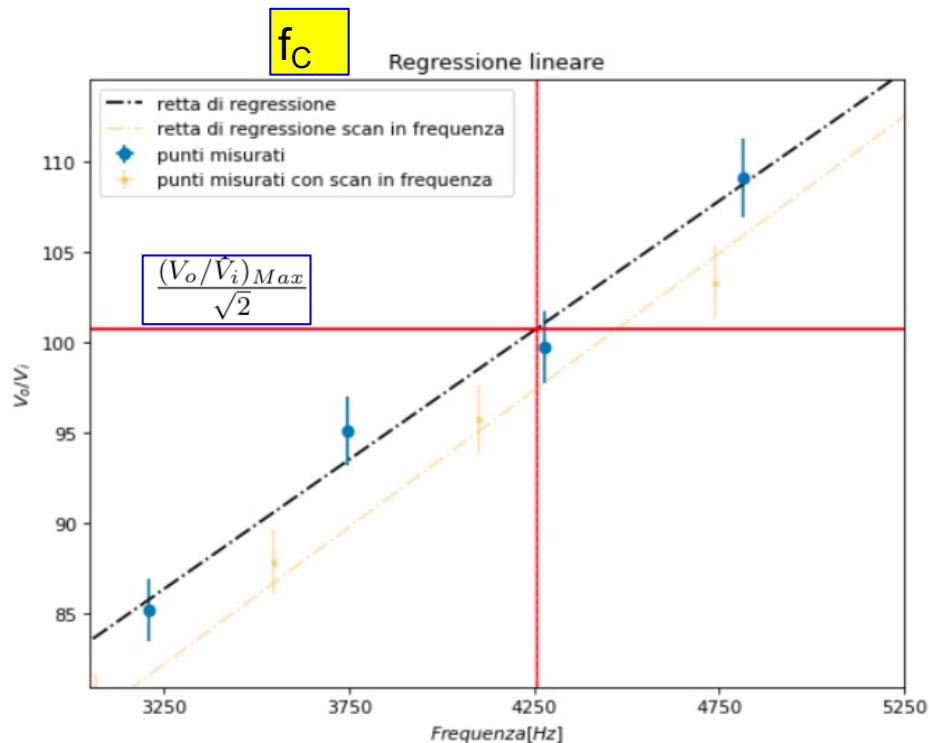
$(953 \pm 10) nF$

Ampiezza (lineare)



Abbiamo esagerato con la frequenza massima?

# Diagramma di Bode con $C_{E1}$ (un altro gruppo)



|                   | $f_C[kHz]$      | $f_H[kHz]$  | $(V_o/V_i)_{Max}$ |
|-------------------|-----------------|-------------|-------------------|
| Misure manuali    | $4.26 \pm 0.21$ | $236 \pm 8$ | $143 \pm 3$       |
| Scan in frequenza | $4.34 \pm 0.19$ | $218 \pm 6$ | $139 \pm 2$       |

$$r_E = 1/(2\pi C_{E2} f_C)$$

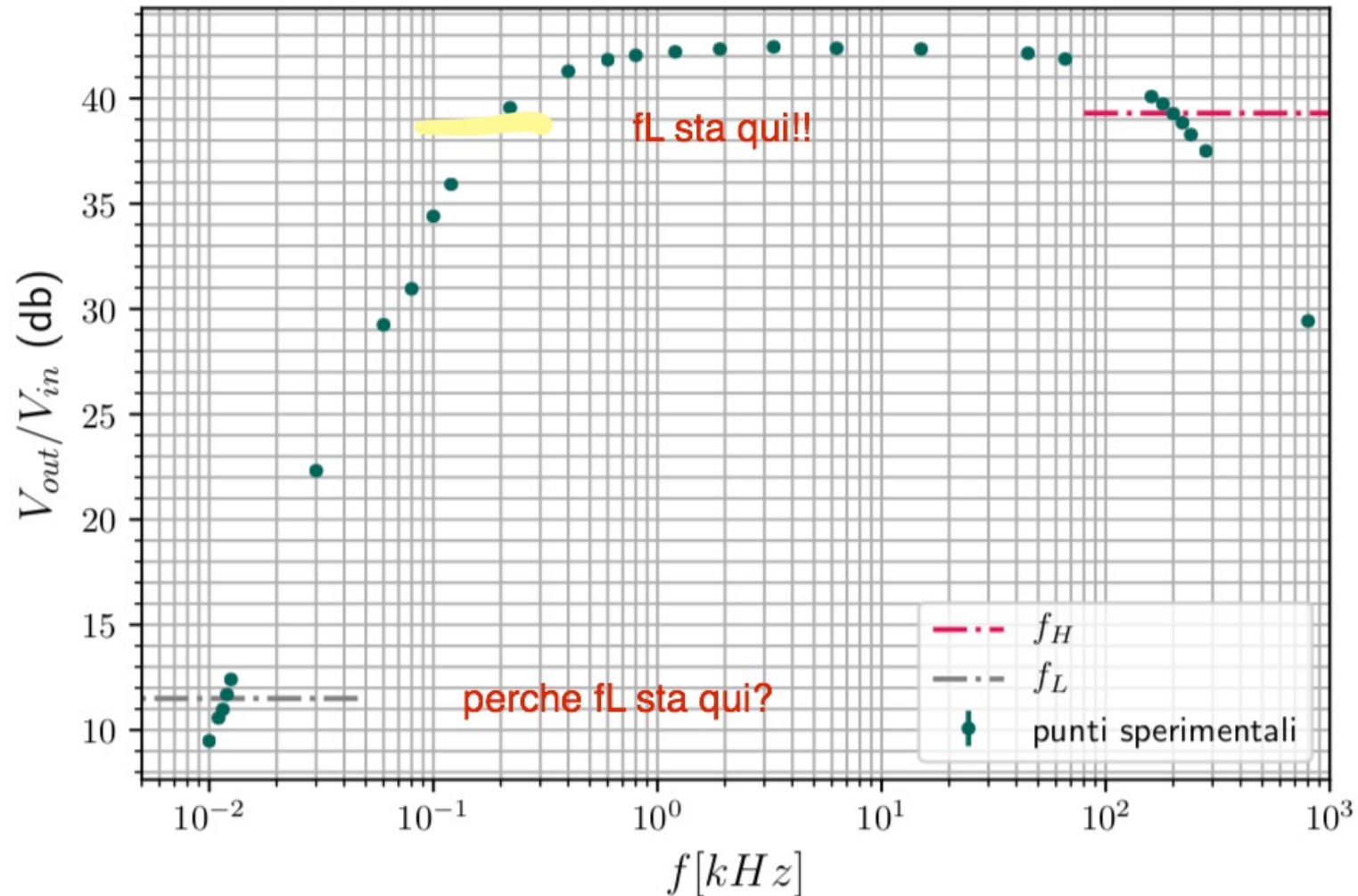
$$r_E = \frac{R_C}{(V_o/V_i)_{Max}}$$

|                   | $r_E[\Omega]$ (da $f_C$ ) | $r_E[\Omega]$ (da $(V_o/V_i)_{Max}$ ) |
|-------------------|---------------------------|---------------------------------------|
| Misure manuali    | $39.2 \pm 1.7$            | $39.0 \pm 1.2$                        |
| Scan in frequenza | $38.5 \pm 1.2$            | $40.1 \pm 1.3$                        |

# Massima larghezza di banda

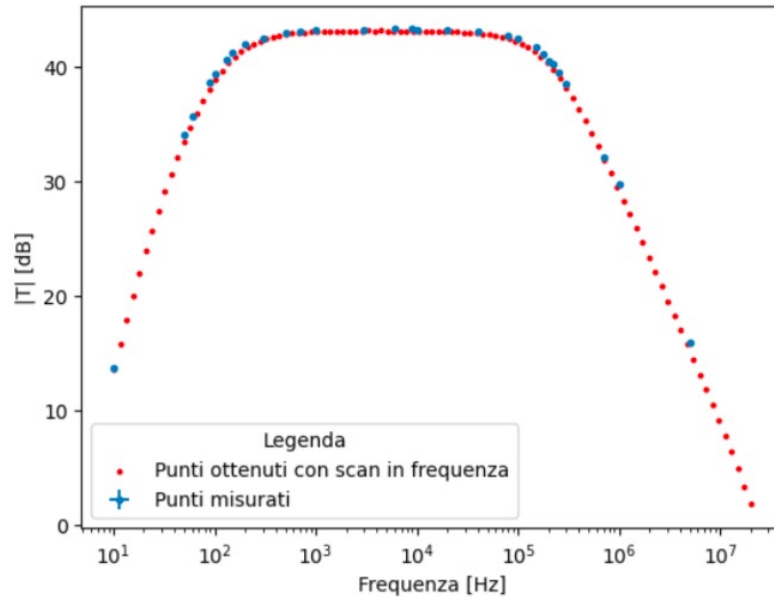
- Utilizzate  $C_E = 100 \mu\text{F}$
- Dovremmo avere una frequenza di taglio molto piccola.
- Fate uno scan in frequenza partendo da frequenze basse (10-20 Hz).
- Verificate che si raggiunge abbastanza presto il plateau alla massima amplificazione
- Aumentate ancora la frequenza in modo da vedere la discesa dell'amplificazione
- Su questo grafico dovrete essere in grado di misurare  $f_L$ ,  $f_H$  e il plateau.
- Controllate se torna con quanto ci aspettiamo in base ai calcoli fatti in precedenza.  
*La frequenza di taglio inferiore  $f_L$  dovrebbe essere diversa da quella misurata in precedenza, perché ora concorrono sia  $C_1$  che  $C_E$ .*
- Se il polo introdotto da  $C_1$  e da  $C_E$  sono alla stessa frequenza di taglio, per questo valore la funzione di trasferimento diminuisce di 6 dB e lo sfasamento dovrebbe essere di 90 gradi. Provate a vedere se qualitativamente osservate questi comportamenti.
- Ovviamente quando l'amplificazione diminuisce molto potete/dovete aumentare la tensione del segnale d'ingresso per migliorare la misura.

# Diagramma di Bode con $C_{E2}$

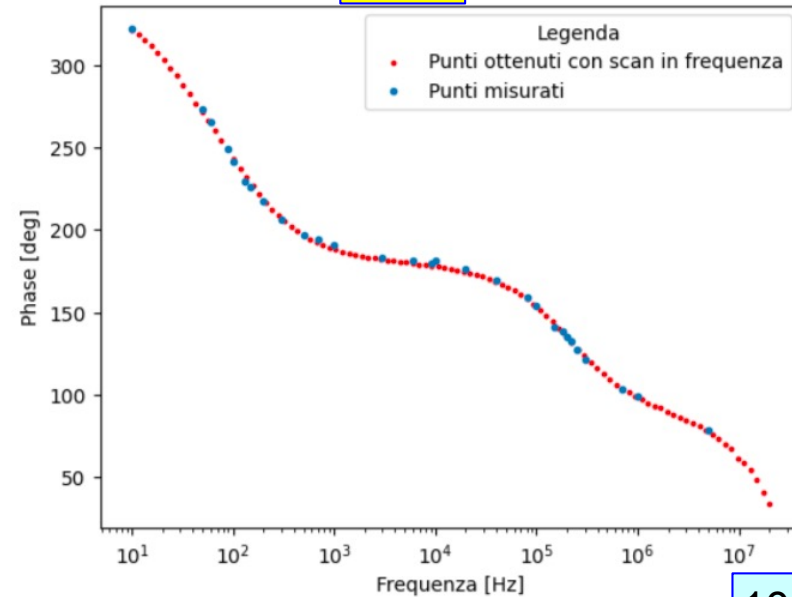


# Massima larghezza di banda con $C_{E2}$ (un altro gruppo)

Ampiezza (dB)



Fase

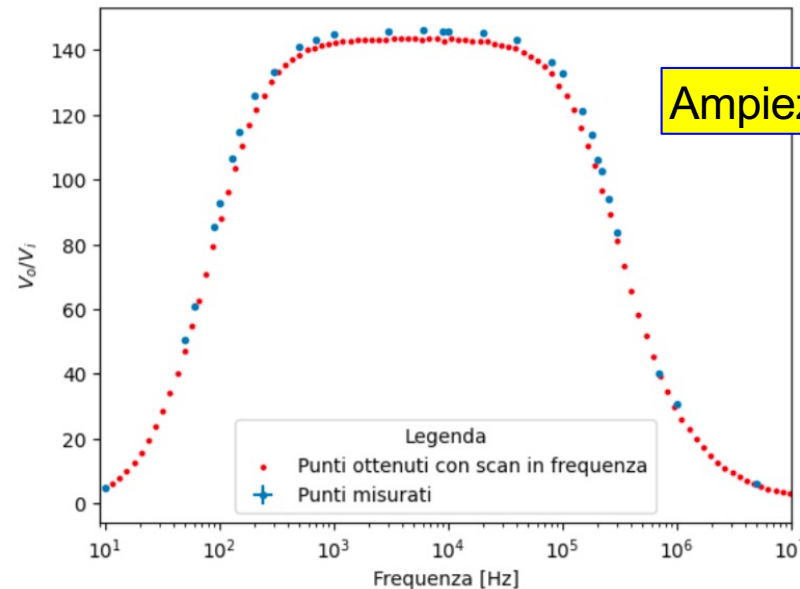


10 MHz

$$(95.4 \pm 0.9) \mu F$$

$$(953 \pm 10) nF$$

Ampiezza (lineare)



# Massima larghezza di banda con $C_{E2}$ (un altro gruppo)

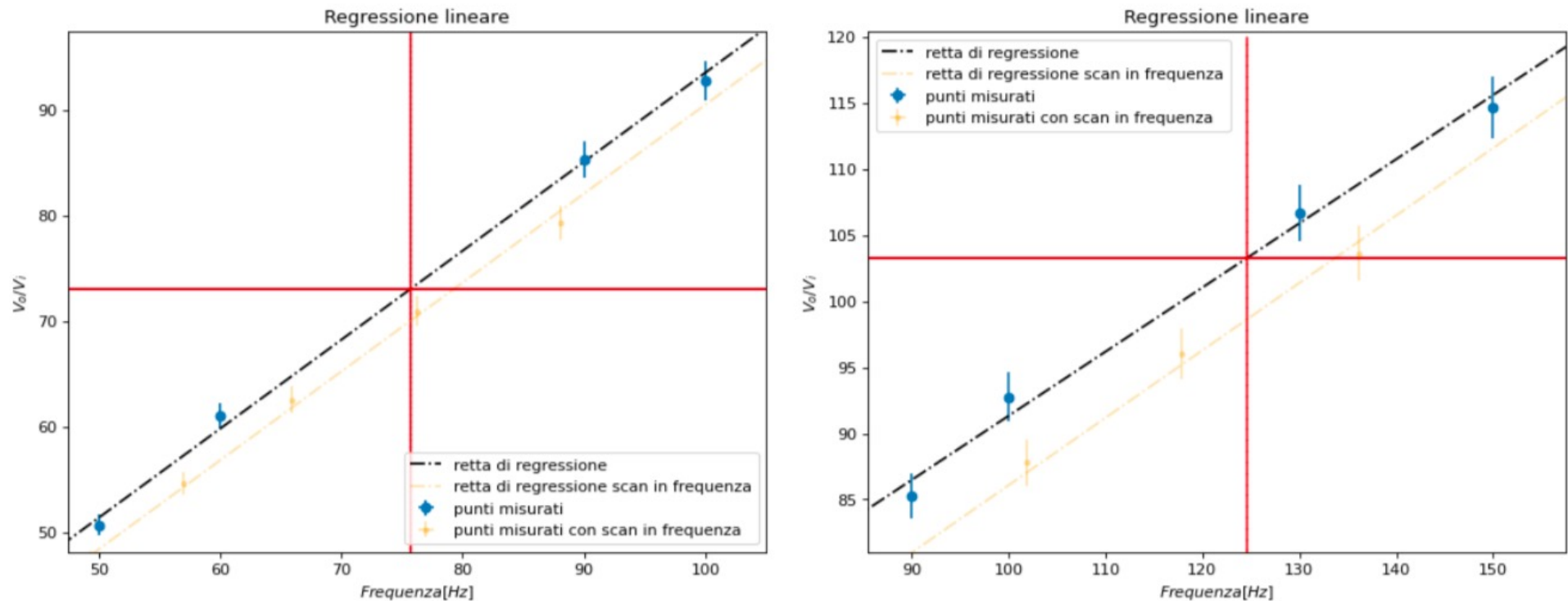
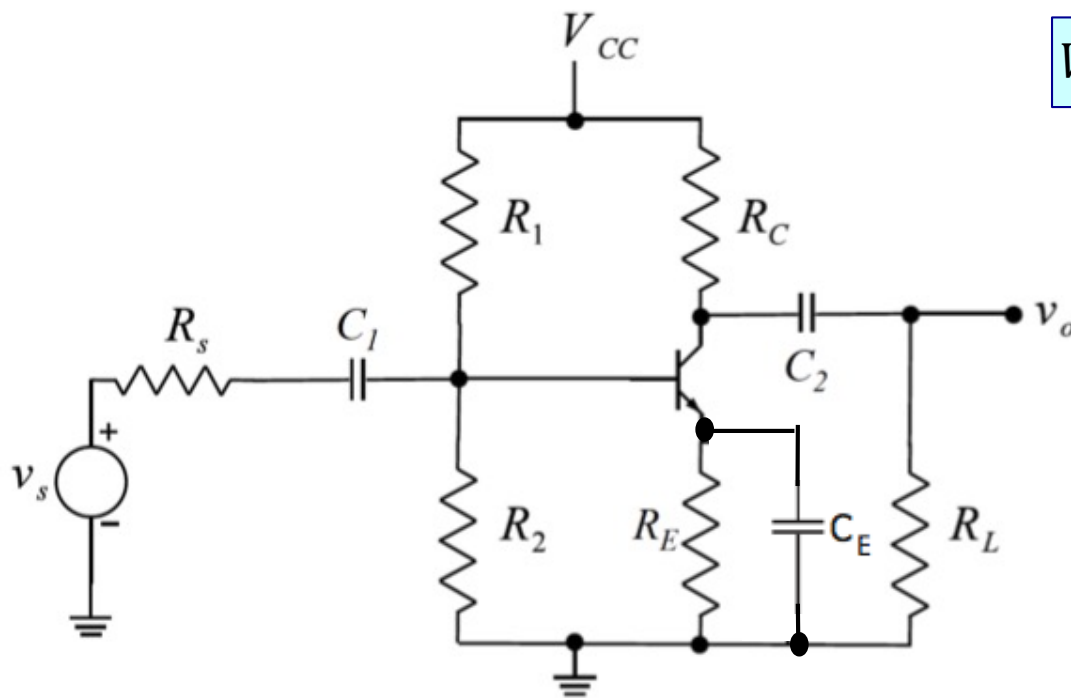


Figura 10: Fit lineari, frequenza di taglio  $f_L$  (sx) e  $f_H$  (dx)

|                   | $f_L [Hz]$  | $f_H [kHz]$ | $(V_o/V_i)_{Max}$ |
|-------------------|-------------|-------------|-------------------|
| Misure manuali    | $130 \pm 4$ | $216 \pm 6$ | $146 \pm 3$       |
| Scan in frequenza | $125 \pm 4$ | $202 \pm 6$ | $142 \pm 3$       |

# Resistenza d'uscita (fatta con la $C_E$ grande)

- Misurate ore la resistenza d'uscita  $R_o$  dell'amplificatore a **frequenze intermedie**.
- Per farlo occorre confrontare la tensione d'uscita con e senza un carico  $R_L$  esterno.
- Il carico  $R_L$  deve essere tale da ottimizzare la sensibilità della misura, quindi esso deve avere un valore vicino alla  $R_o$  che si vuole misurare, che sappiamo essere uguale a  $R_C$ .
- Non dimenticate di inserire il condensatore  $C_2$ .



$V_o$  e' la tensione che misurate senza  $R_L$

$$V_o^* = V_o \frac{R_L}{R_{out} + R_L}$$

$$R_{out} = \frac{V_o - V_o^*}{V_o^*} R_L$$

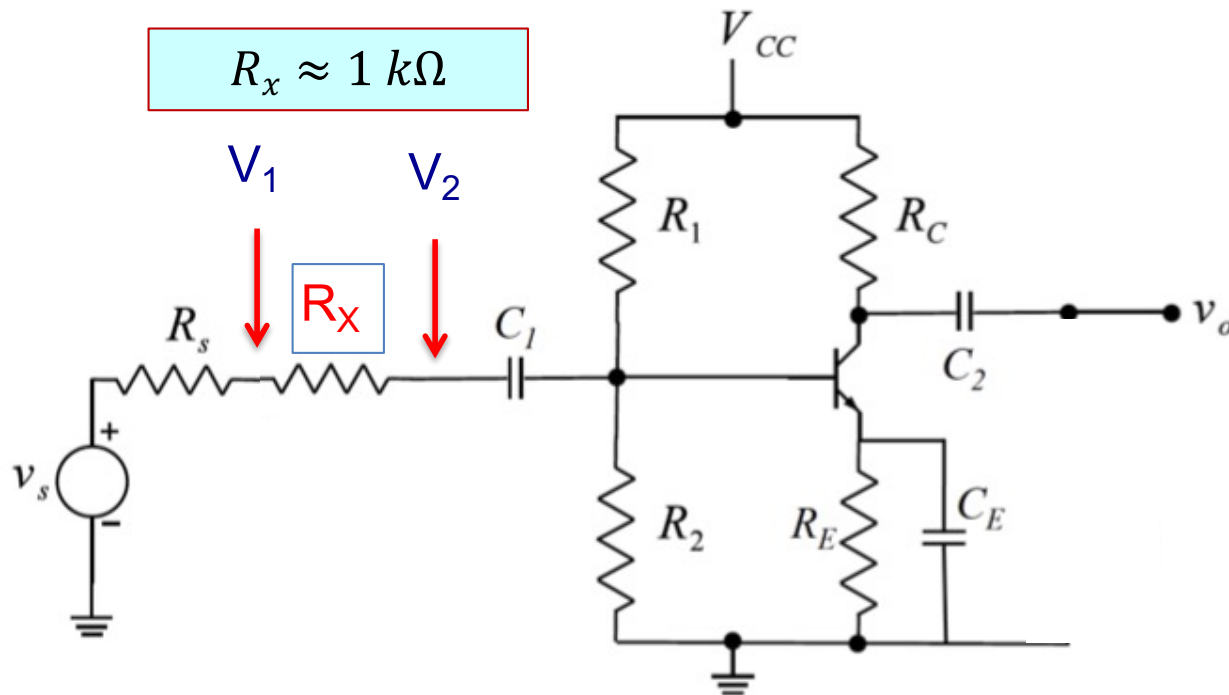
Le tensioni vanno misurate con l'oscilloscopio

Andrebbero fatte diverse misure al variare di  $R_L$

# Resistenza d'ingresso

- ❑ proviamo a valutare la resistenza d'ingresso dell'amplificatore. (usate la  $C_E$  grande)
- ❑ puo' essere valutata dalla misura della frequenza di taglio
- ❑ oppure modificando il circuito nel modo seguente:

$$R_{in} = \frac{1}{2\pi f' C_1}$$



$$V_2 = V_1 \frac{R_{in}}{R_x + R_{in}}$$

$$R_{in} = \frac{V_2}{V_1 - V_2} R_x$$

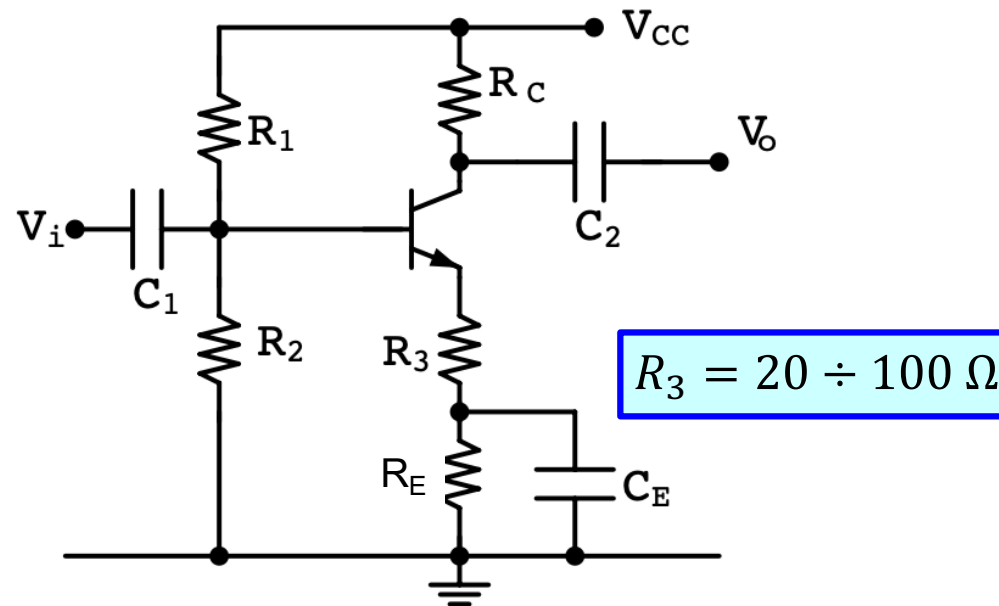
Le tensioni vanno misurate con l'oscilloscopio

Andrebbero fatte diverse misure al variare di  $R_x$

- ❑ Utilizzate la resistenza d'ingresso misurata, unitamente alla capacità  $C_1$ , per valutare la frequenza di taglio inferiore e confrontatela con quella ricavata dal diagramma di Bode.

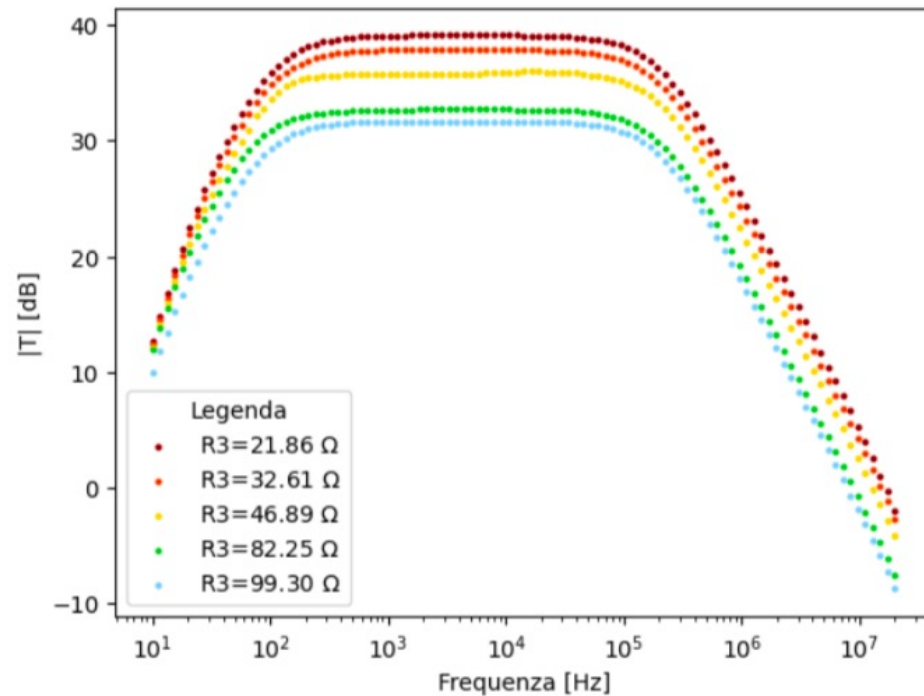
# Amplificatore con piccola reazione

- ❑ Modificate leggermente il circuito aggiungendo una piccola reazione negativa tramite la resistenza  $R_3$ . **Utilizzate la  $C_E$  grande.**
- ❑ Fate il diagramma di Bode.
- ❑ Se avete tempo, provate a fare la misura per diversi valori di  $R_3$
- ❑ Misurate l'amplificazione massima e le due frequenze di taglio. Confrontate i risultati ottenuti con il caso precedente senza la  $R_3$ .



Provate a calcolare da soli qual e' l'amplificazione massima aspettata.

# Amplificatore con piccola reazione

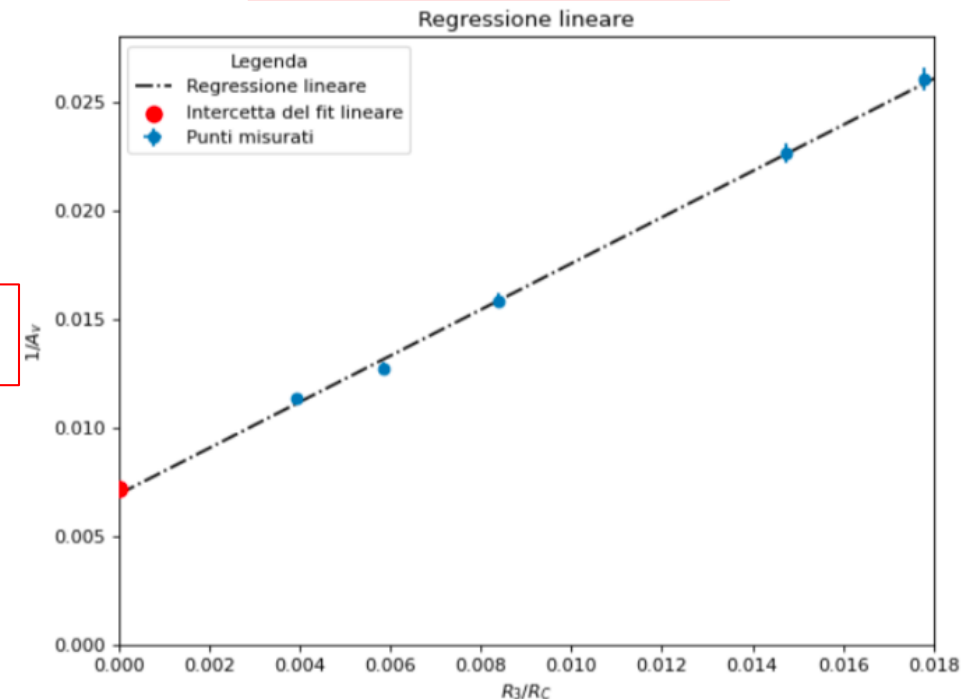


| $R_3 \, [\Omega]$ | $f_L [Hz]$     | $f_H [kHz]$ | $(V_o/V_i)_{Max}$ |
|-------------------|----------------|-------------|-------------------|
| $21.9 \pm 0.2$    | $109 \pm 4$    | $205 \pm 6$ | $86.2 \pm 1.7$    |
| $32.6 \pm 0.3$    | $104 \pm 3$    | $203 \pm 6$ | $77.7 \pm 1.6$    |
| $46.9 \pm 0.5$    | $90.2 \pm 1.9$ | $213 \pm 6$ | $63.0 \pm 1.3$    |
| $82.3 \pm 0.8$    | $75.5 \pm 1.4$ | $207 \pm 6$ | $43.4 \pm 0.9$    |
| $99.3 \pm 1.0$    | $87.8 \pm 1.8$ | $207 \pm 6$ | $38.4 \pm 0.7$    |

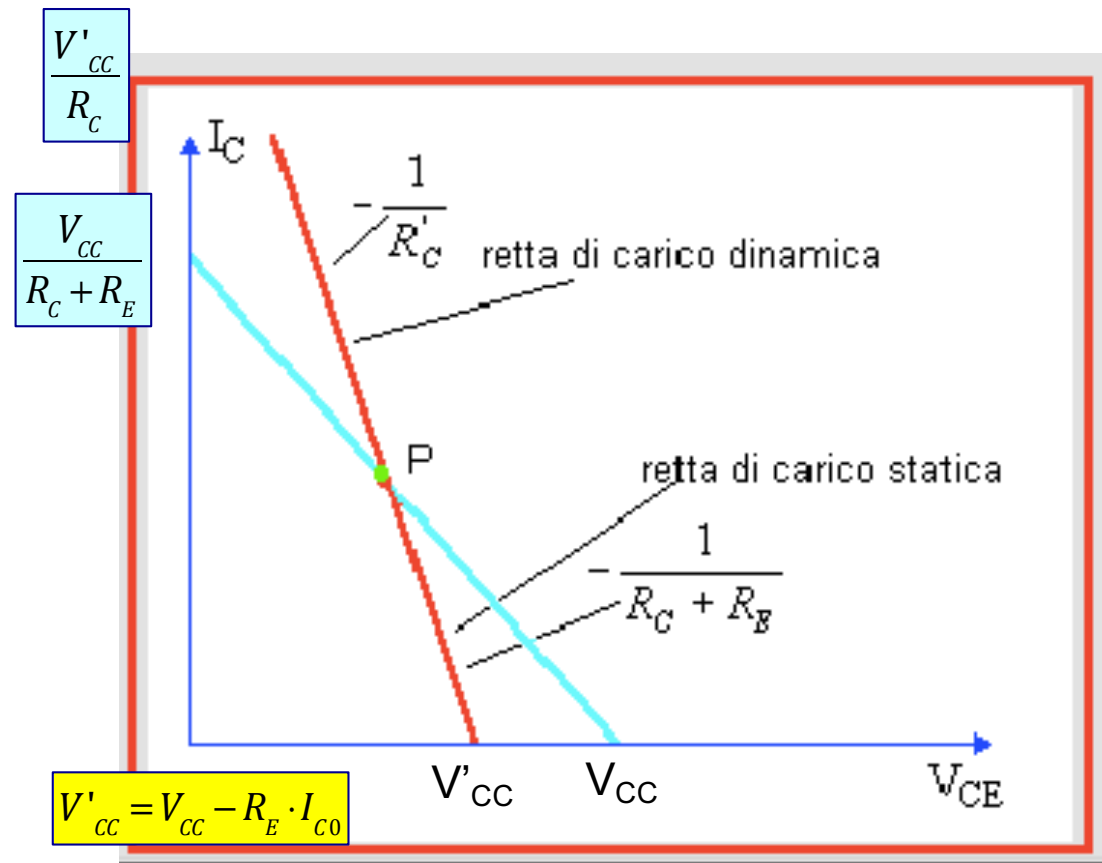
Fit lineare  $\frac{1}{A_v}$  vs  $R_3$ .

$$\frac{1}{A_v} = \frac{R_3}{R_C} + \frac{r_E}{R_C}, \text{ con } \frac{r_E}{R_C} \text{ intercetta del fit.}$$

Si può ricavare  $r_E$  dall'intercetta



# Retta di carico dinamica



Esempio:  $V_{CC} = 10 \text{ V}$ ,  $I_C = 1 \text{ mA}$   
 $R_C = 1.2 \text{ k}$  e  $R_E = 1.3 \text{ k}$

$$V'_{CC} = V_{CC} - V_E = 10 - 1.3 = 8.7 \text{ V}$$

$$\frac{V_{CC}}{R_C + R_E} = \frac{10}{1.2 + 1.3} = 4 \text{ mA}$$

$$\frac{V'_{CC}}{R_C} = \frac{8.7}{1.2} = 7.25 \text{ mA}$$

A parità di  $\Delta I_B$ , la  $\Delta V_{CE}$  è la metà sulla retta dinamica

$$\Delta V_{CE}^{\max} = V'_{CC} - V_{CE0} = 8.7 - 7.5 = 1.2 \text{ V}$$

$$\Delta V_{v_i}^{\max} = \frac{\Delta V_{CE}^{\max}}{A_v} = \frac{1.2}{50} = 24 \text{ mV}$$

*E' importante a questo punto osservare che in realtà il punto di lavoro non si sposta lungo la retta di carica statica, ma lungo quella di carica dinamica che può essere abbastanza facilmente individuata perché se ne conosce la pendenza  $\left(-\frac{1}{R'_C}\right)$  e un punto che è sempre quello di lavoro determinato in precedenza. Infatti quando il segnale sinusoidale passa per lo zero, il p.d.l. diventa quello del progetto statico.*



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

## Fine esercitazione 3