



Università degli  
Studi di Pavia

# Laboratorio di Elettronica II

## Esperienza 3

### *Progetto di un amplificatore con BJT*



# Attività

---

Progetto e verifica al simulatore di un amplificatore, date le specifiche funzionali desiderate:

- Progetto preliminare con dimensionamento analitico dei componenti
- Verifica del funzionamento con simulazioni SPice e aggiustamento del progetto per utilizzare componenti disponibili commercialmente

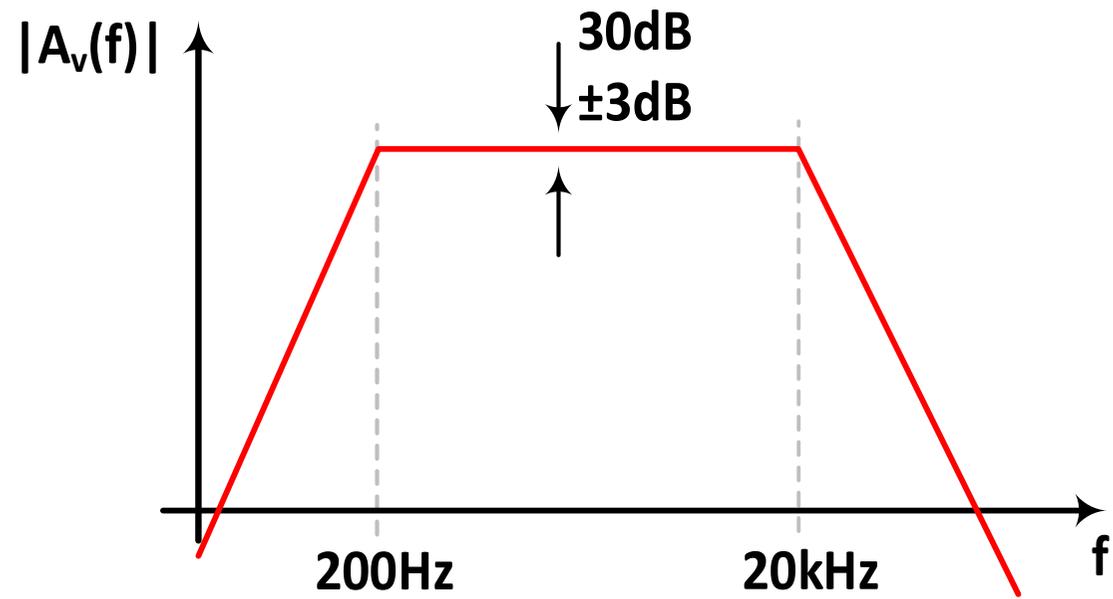
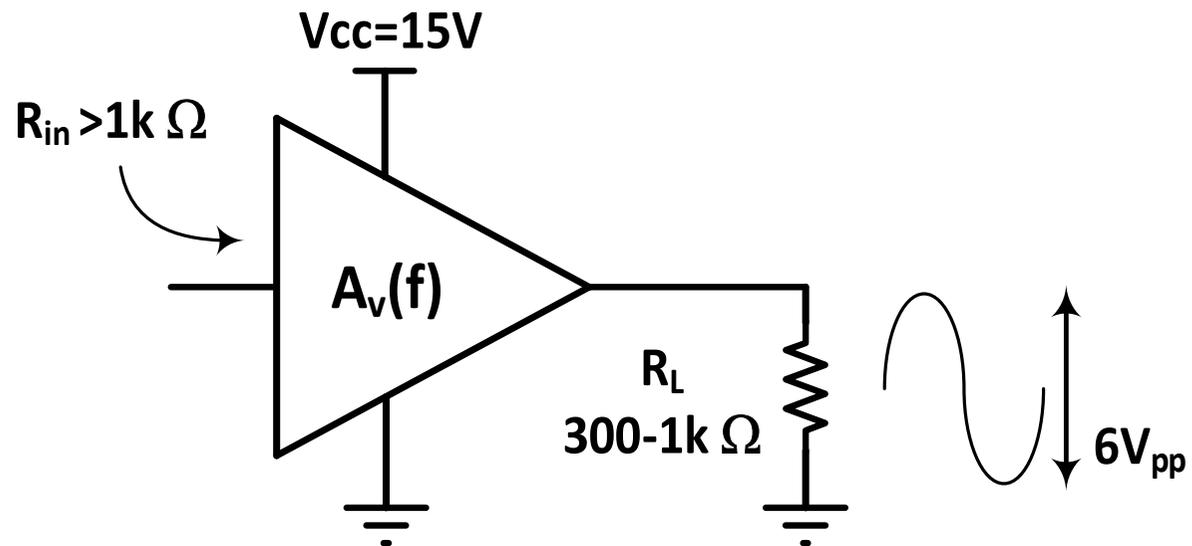


# *Obiettivi di Apprendimento*

---

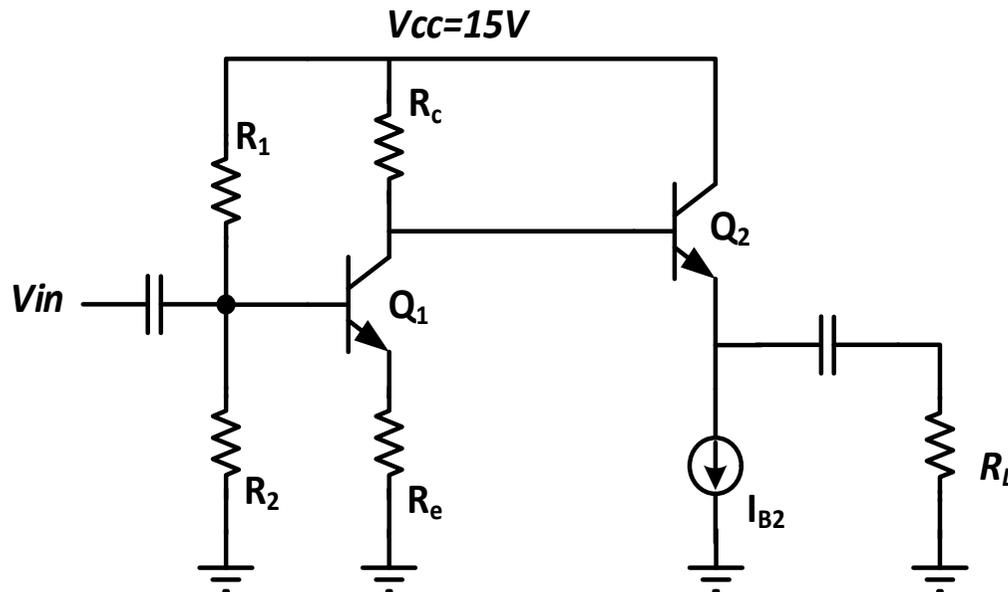
- Ripasso sul funzionamento e analisi di stadi amplificatori a BJT
- Tradurre specifiche funzionali nella scelta della topologia circuitale, vincoli di progetto e dimensionamento dei componenti
- Acquisire familiarità con le approssimazioni (inevitabili) in fase di progetto
- Utilizzare il simulatore per verificare il funzionamento dell'amplificatore
- Utilizzare il simulatore per completare/aggiustare il progetto

# Specifiche dell'amplificatore





## Scelta della topologia



Per avere guadagno stabile a fronte di variazione del carico ( $R_L=300-1k\Omega$ ) è opportuno prevedere un buffer (Q<sub>2</sub>)

Il primo stadio (Q<sub>1</sub>) fornisce il guadagno di tensione richiesto

L'utilizzo della resistenza di emettitore, R<sub>e</sub>, permette di ridurre la sensibilità del guadagno a variazioni del  $\beta$  del transistor Q<sub>1</sub>



Università degli  
Studi di Pavia

# Scelta del transistor



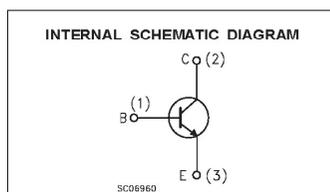
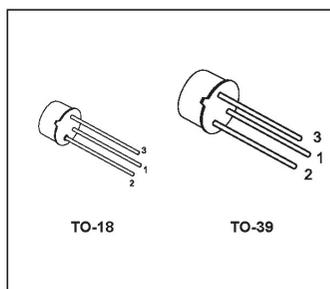
**2N2219A**  
**2N2222A**

## HIGH SPEED SWITCHES

### DESCRIPTION

The 2N2219A and 2N2222A are silicon planar epitaxial NPN transistors in Jedec TO-39 (for 2N2219A) and in Jedec TO-18 (for 2N2222A) metal case. They are designed for high speed switching application at collector current up to 500mA, and feature useful current gain over a wide range of collector current, low leakage currents and low saturation voltage.

2N2219A approved to CECC 50002-100,  
2N2222A approved to CECC 50002-101  
available on request.



### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
$V_{CB0}$	Collector-Base Voltage ( $I_E = 0$ )	75	V
$V_{CE0}$	Collector-Emitter Voltage ( $I_B = 0$ )	40	V
$V_{EB0}$	Emitter-Base Voltage ( $I_C = 0$ )	6	V
$I_C$	Collector Current	0.8	A
$P_{tot}$	Total Dissipation at $T_{amb} \leq 25^\circ\text{C}$ for 2N2219A for 2N2222A at $T_{case} \leq 25^\circ\text{C}$ for 2N2219A for 2N2222A	0.8 0.5 3 1.8	W W W W
$T_{stg}$	Storage Temperature	-65 to 200	$^\circ\text{C}$
$T_J$	Max. Operating Junction Temperature	175	$^\circ\text{C}$

### 2N2219A/2N2222A

#### THERMAL DATA

		TO-39	TO-18	
$R_{th(j-case)}$	Thermal Resistance Junction-Case	Max 50	83.3	$^\circ\text{C/W}$
$R_{th(j-amb)}$	Thermal Resistance Junction-Ambient	Max 187.5	300	$^\circ\text{C/W}$

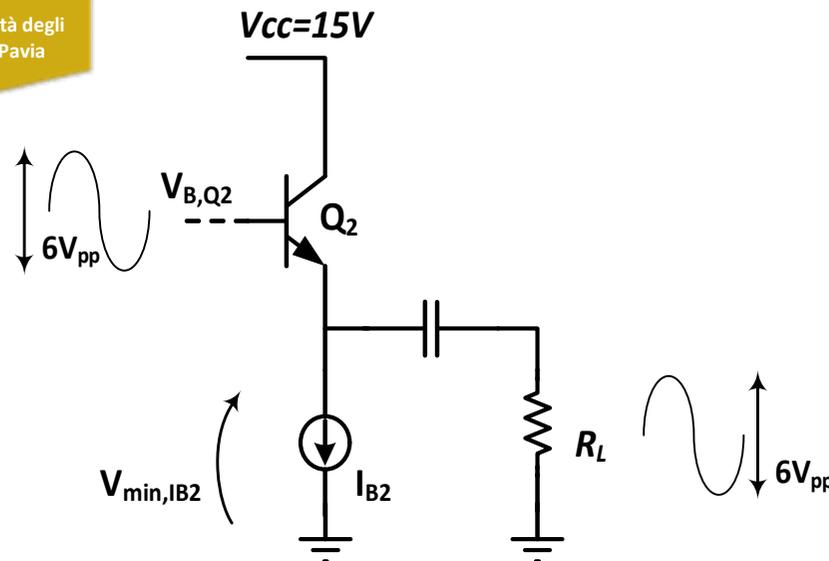
#### ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $T_{case} = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$I_{CBO}$	Collector Cut-off Current ( $I_E = 0$ )	$V_{CB} = 60\text{ V}$ $V_{CB} = 60\text{ V}$ $T_{case} = 150^\circ\text{C}$			10 10	nA $\mu\text{A}$
$I_{CEX}$	Collector Cut-off Current ( $V_{BE} = -3\text{V}$ )	$V_{CE} = 60\text{ V}$			10	nA
$I_{BEX}$	Base Cut-off Current ( $V_{BE} = -3\text{V}$ )	$V_{CE} = 60\text{ V}$			20	nA
$I_{EBO}$	Emitter Cut-off Current ( $I_C = 0$ )	$V_{EB} = 3\text{ V}$			10	nA
$V_{(BR)CB0}^*$	Collector-Base Breakdown Voltage ( $I_E = 0$ )	$I_C = 10\ \mu\text{A}$	75			V
$V_{(BR)CEO}^*$	Collector-Emitter Breakdown Voltage ( $I_B = 0$ )	$I_C = 10\text{ mA}$	40			V
$V_{(BR)EBO}^*$	Emitter-Base Breakdown Voltage ( $I_C = 0$ )	$I_E = 10\ \mu\text{A}$	6			V
$V_{CE(sat)}^*$	Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C = 150\text{ mA}$ $I_B = 15\text{ mA}$ $I_C = 500\text{ mA}$ $I_B = 50\text{ mA}$			0.3 1	V V
$V_{BE(sat)}^*$	Base-Emitter Saturation Voltage	$I_C = 150\text{ mA}$ $I_B = 15\text{ mA}$ $I_C = 500\text{ mA}$ $I_B = 50\text{ mA}$	0.6		1.2 2	V V
$h_{FE}^*$	DC Current Gain	$I_C = 0.1\text{ mA}$ $V_{CE} = 10\text{ V}$ $I_C = 1\text{ mA}$ $V_{CE} = 10\text{ V}$ $I_C = 10\text{ mA}$ $V_{CE} = 10\text{ V}$ $I_C = 150\text{ mA}$ $V_{CE} = 10\text{ V}$ $I_C = 500\text{ mA}$ $V_{CE} = 10\text{ V}$ $I_C = 150\text{ mA}$ $V_{CE} = 1\text{ V}$ $I_C = 10\text{ mA}$ $V_{CE} = 10\text{ V}$ $T_{amb} = -55^\circ\text{C}$	35 50 75 100 40 50 35		300	
$h_{fe}^*$	Small Signal Current Gain	$I_C = 1\text{ mA}$ $V_{CE} = 10\text{ V}$ $f = 1\text{KHz}$ $I_C = 10\text{ mA}$ $V_{CE} = 10\text{ V}$ $f = 1\text{KHz}$	50 75		300 375	
$f_T$	Transition Frequency	$I_C = 20\text{ mA}$ $V_{CE} = 20\text{ V}$ $f = 100\text{ MHz}$	300			MHz
$C_{EBO}$	Emitter Base Capacitance	$I_C = 0$ $V_{EB} = 0.5\text{ V}$ $f = 100\text{KHz}$			25	pF
$C_{CB0}$	Collector Base Capacitance	$I_E = 0$ $V_{CB} = 10\text{ V}$ $f = 100\text{ KHz}$			8	pF
$R_{e(inie)}$	Real Part of Input Impedance	$I_C = 20\text{ mA}$ $V_{CE} = 20\text{ V}$ $f = 300\text{MHz}$			60	$\Omega$

\* Pulsed: Pulse duration = 300  $\mu\text{s}$ , duty cycle  $\leq 1\%$



## Dimensionamento del buffer 1/2



L'ampiezza massima su  $R_L$  è  $3V_{0-pk}$   
 La corrente massima che deve erogare  
 l'amplificatore sul carico si ha quando  $R_L$   
 assume il minimo valore:

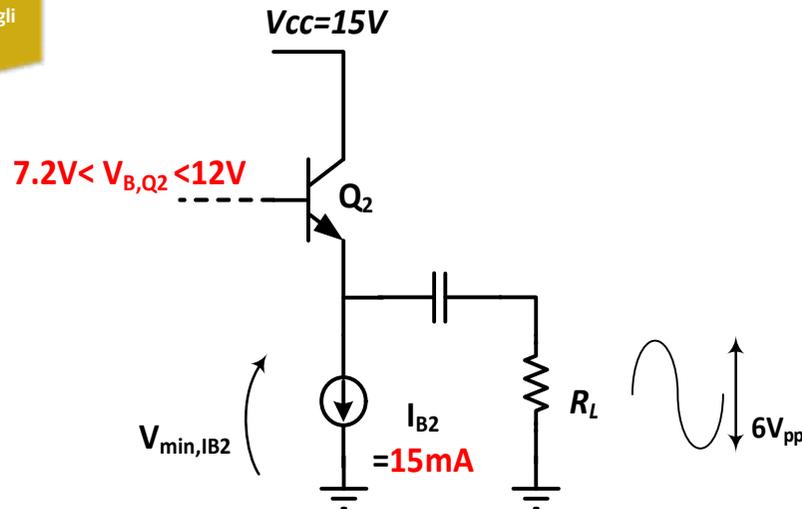
$$I_{o,max} = 3V / 300\Omega = 10mA$$

Il transistor  $Q_2$  deve essere polarizzato con corrente superiore ad  $I_{o,max}$ , per evitare che si spenga in condizioni di massimo segnale, introducendo forte distorsione del segnale: scelgo  $I_{B2} = 15mA$

Il generatore di corrente  $I_{B2}$  necessita di una minima tensione ai capi ( $V_{min,IB2}$ ) per garantirne il funzionamento: supponiamo  $V_{min,IB2} = 3.5V$

Per avere ampiezza del segnale di  $3V_{0-pk}$ , la tensione DC all'emettitore di  $Q_2$  deve essere superiore a  $V_{min,IB2} + 3V = 6.5V$

## Dimensionamento del buffer 2/2



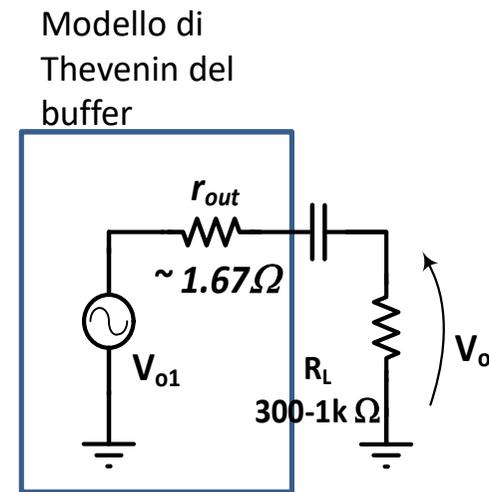
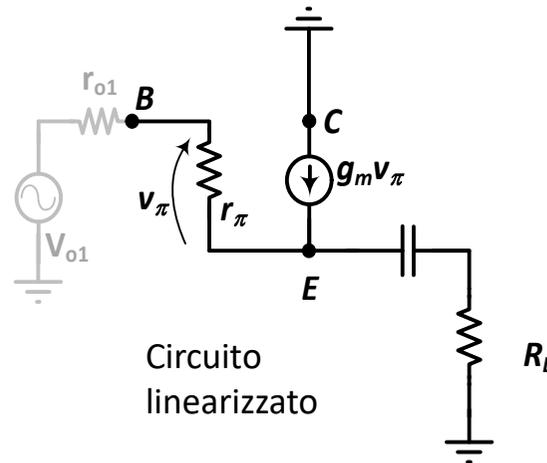
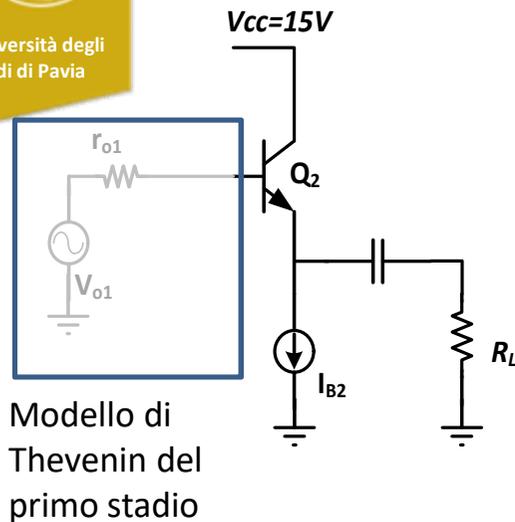
La tensione DC alla base di  $Q_2$  é superiore all'emettitore di  $V_{BE}=0.7V$   
Quindi  $V_{B,Q2} > 7.2V$

La tensione  $V_{B,Q2}$  deve però essere almeno 3V inferiore a  $V_{cc}$ , in modo da permettere una ampiezza del segnale alla base di  $Q_2$  pari a  $6V_{pp}$

La tensione sul punto di lavoro alla base di  $Q_2$  deve essere compresa fra 7.2V e 12V

La potenza dissipata da  $Q_2$  ( $P_{diss} = I_c \times V_{ce}$ ) è 55-130mW, sicuramente minore di  $P_{d,max} = 500mW$ , indicata nel datasheet

# Sensibilità del guadagno a variazioni di $R_L$



$g_m$ ,  $r_\pi$  dipendono dalla corrente di polarizzazione  $I_C$  e dal  $\beta$ :

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \quad r_\pi = \beta \frac{V_T}{I_C} \quad V_T = \frac{kT}{q} = 25mV$$

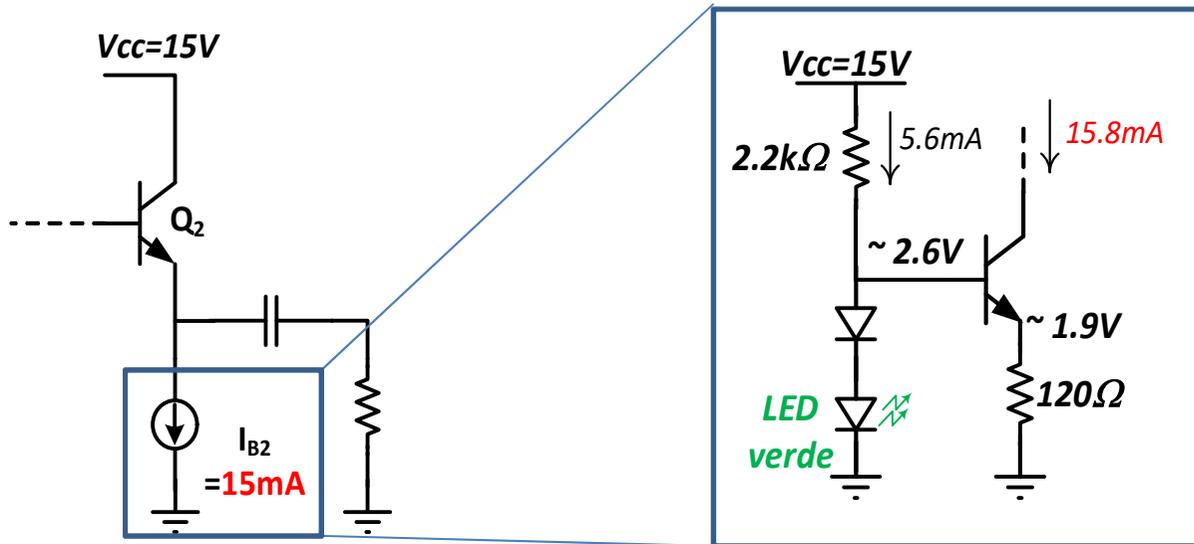
Dall'analisi del circuito linearizzato possiamo ricavare un modello di Thevenin per lo stadio buffer, in cui:

$$r_{out} = \frac{r_\pi + r_{o1}}{g_m r_\pi + 1} = \frac{r_\pi + r_{o1}}{\beta + 1} \approx \frac{r_\pi}{\beta} + \frac{r_{o1}}{\beta} = \frac{1}{g_m} + \frac{r_{o1}}{\beta} \approx \frac{1}{g_m} = 1.67\Omega$$

Con una resistenza di uscita inferiore a  $3\Omega$ , il guadagno del buffer è in buona approssimazione unitario, e la variazione per  $R_L$  nell'intervallo  $0.3-1k\Omega$  risulta inferiore a 1% (0.09dB)



# Generatore di corrente



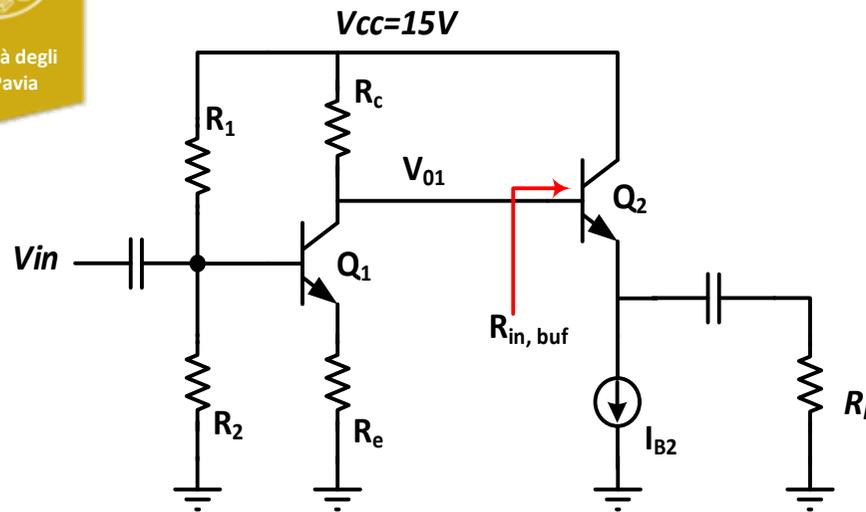
Il diodo LED ha una caduta di tensione di circa 1.9V. In serie con il diodo 1N4148 forma una «batteria» che mantiene la tensione alla base del transistor a circa 2.6V. La tensione all'emettitore risulta  $2.6V - 0.7V = 1.9V$ . La corrente di emettitore (circa uguale a quella di collettore) vale:

$$I_{out} = 1.9V / 120\Omega = 15.8mA$$

La tensione al collettore del BJT deve essere sufficientemente alta da garantire il funzionamento in regione attiva:  $V_{min,IB2} = V_E + V_{CE,sat} = 1.9V + 0.3V = 2.2V$ . Il valore è inferiore (e quindi accettabile) con quanto ipotizzato nella ( slide #7 ),  $V_{min,IB2} = 3.5V$



# Stadio Amplificatore



La resistenza equivalente vista all'ingresso di  $Q_2$  è data da:

$$r_{in,buf} = r_{\pi} + (\beta + 1)R_L = \beta \frac{V_T}{I_{C2}} + (\beta + 1)R_L$$

Nel caso peggiore,  $\beta_{min}=50$ ,  $R_L=300\Omega$ ,  $r_{in,buf}=15.4k\Omega$

Se  $R_c$  è sufficientemente più piccola di  $r_{in,buf}$  quest'ultima (e le sue variazioni dovute a  $\beta$  ed  $R_L$ ) non influenza il guadagno dell'amplificatore, che risulta:

$$A_{v1} = \frac{V_{01}}{V_{in}} = \frac{R_c}{\frac{1}{g_{m1}} + R_e}$$

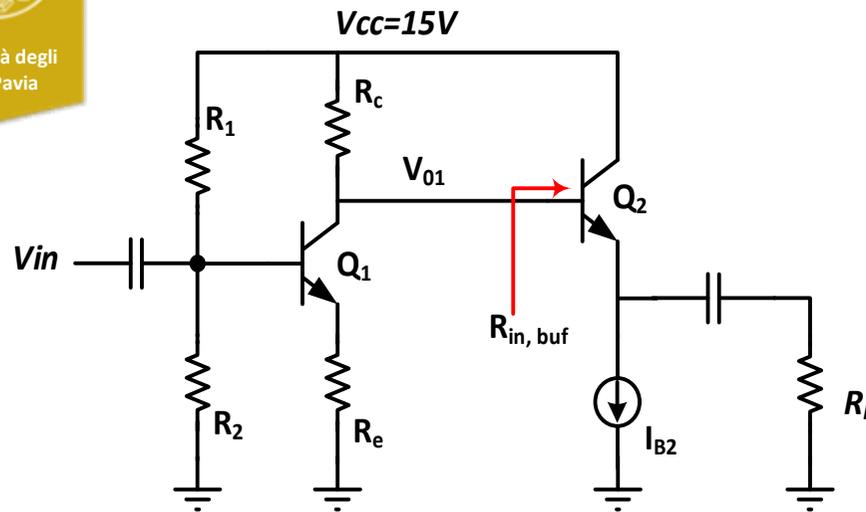
$$g_{m1} = \frac{I_{C1}}{V_T}$$

$I_{c1}$  ed  $R_c$  devono essere scelte in modo che la tensione al collettore di  $Q_2$  ( $V_{c,Q2}=V_{cc}-R_c I_{C2}$ ) cada nell'intervallo precedentemente calcolato ( slide #8 ):

$$7.2V < V_{c,Q2} < 12V$$



## Stadio Amplificatore: $I_c$ , $R_c$ , $R_e$



$$A_{v1} = \frac{V_{01}}{V_{in}} = \frac{R_c}{\frac{1}{g_{m1}} + R_e}$$

$$g_{m1} = \frac{I_{C1}}{V_T}$$

Fissato  $I_{c1}=5\text{mA}$ ,  $g_m^{-1}=5\Omega$  Con questa corrente, possiamo scegliere  $R_c$  in modo che la tensione di collettore cada a metà dell'intervallo richiesto (7.2V-12V). Trascurando la corrente di base di  $Q_2$  (rispetto alla corrente di collettore di  $Q_1$ ):

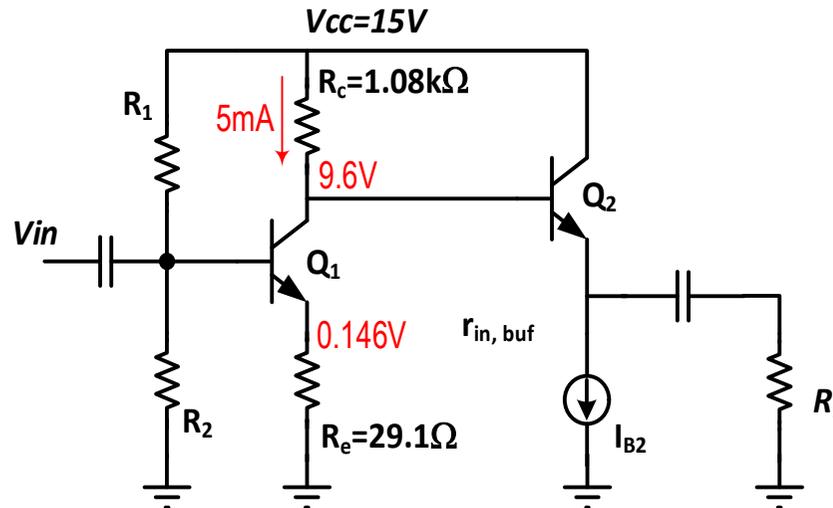
$$V_{c,Q1} = 9.6V \quad R_c = \frac{(15-9.6)V}{5\text{mA}} = 1080\Omega$$

Fissato  $R_c$  e  $g_m$ , per avere un guadagno di tensione nominale  $A_{v1}=30\text{dB}$  (31.62),

$$R_e = \frac{R_c}{A_{v1}} - \frac{1}{g_m} = 29.1\Omega$$



# Stadio Amplificatore: tensione all'emettitore



Fissate  $R_c$ ,  $R_e$  ed  $I_{c1}$ , le tensioni sul punto di lavoro risultano come in figura

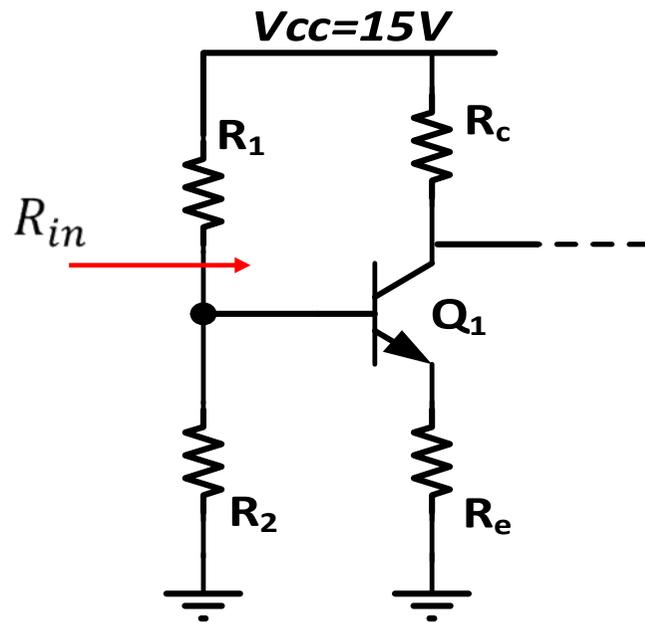
In presenza di segnale, la tensione sul collettore può muoversi di  $\pm 3V$

Quando la tensione di collettore raggiunge il livello minimo  $9.6V - 3V = 6.6V$  il BJT deve rimanere in regione attiva. La tensione all'emettitore deve quindi essere inferiore a  $6.6V - V_{CE,sat} = 6.6V - 0.3V = 6.3V$

Questo vincolo viene rispettato con abbondante margine



## Stadio Amplificatore: resistenza di ingresso



$$R_{in} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + r_{\pi} + (\beta + 1)R_e$$

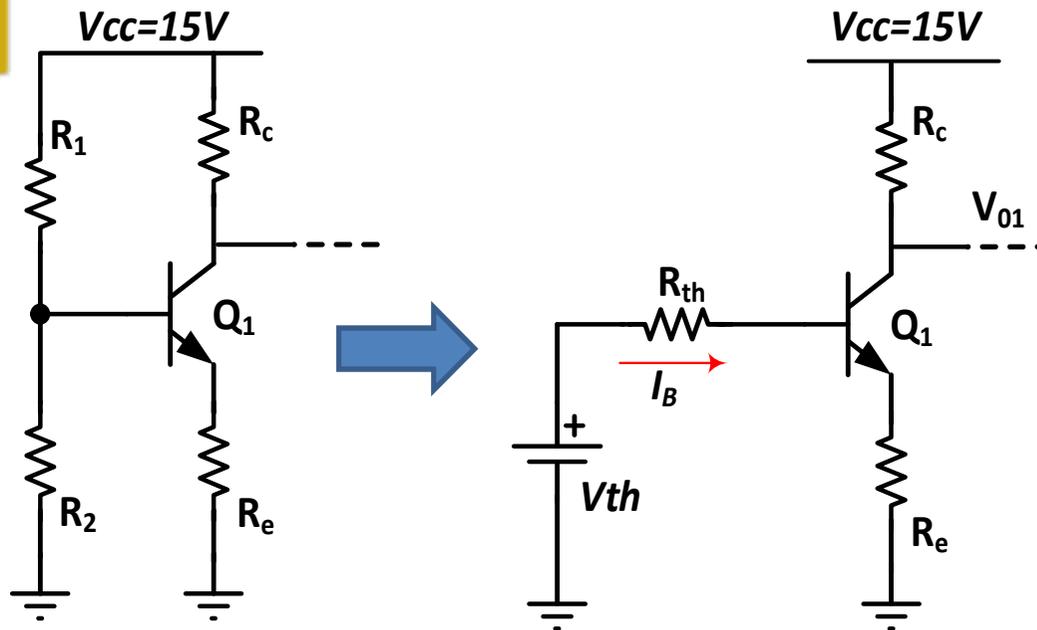
$$r_{\pi} = \beta \frac{V_T}{I_{C1}}$$

Con  $I_{c1}=5\text{mA}$ ,  $\beta=\beta_{\min}=50$ , la resistenza alla base del BJT è  $1705\ \Omega$

Se  $R1//R2=20\text{k}\Omega$ , la resistenza di ingresso dell'amplificatore è  $1571\ \Omega$ ,  
soddisfacendo alla specifica  $R_{in}>1\text{k}\Omega$



# Stadio Amplificatore: $R_1, R_2$



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

$$R_{th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 20k\Omega$$

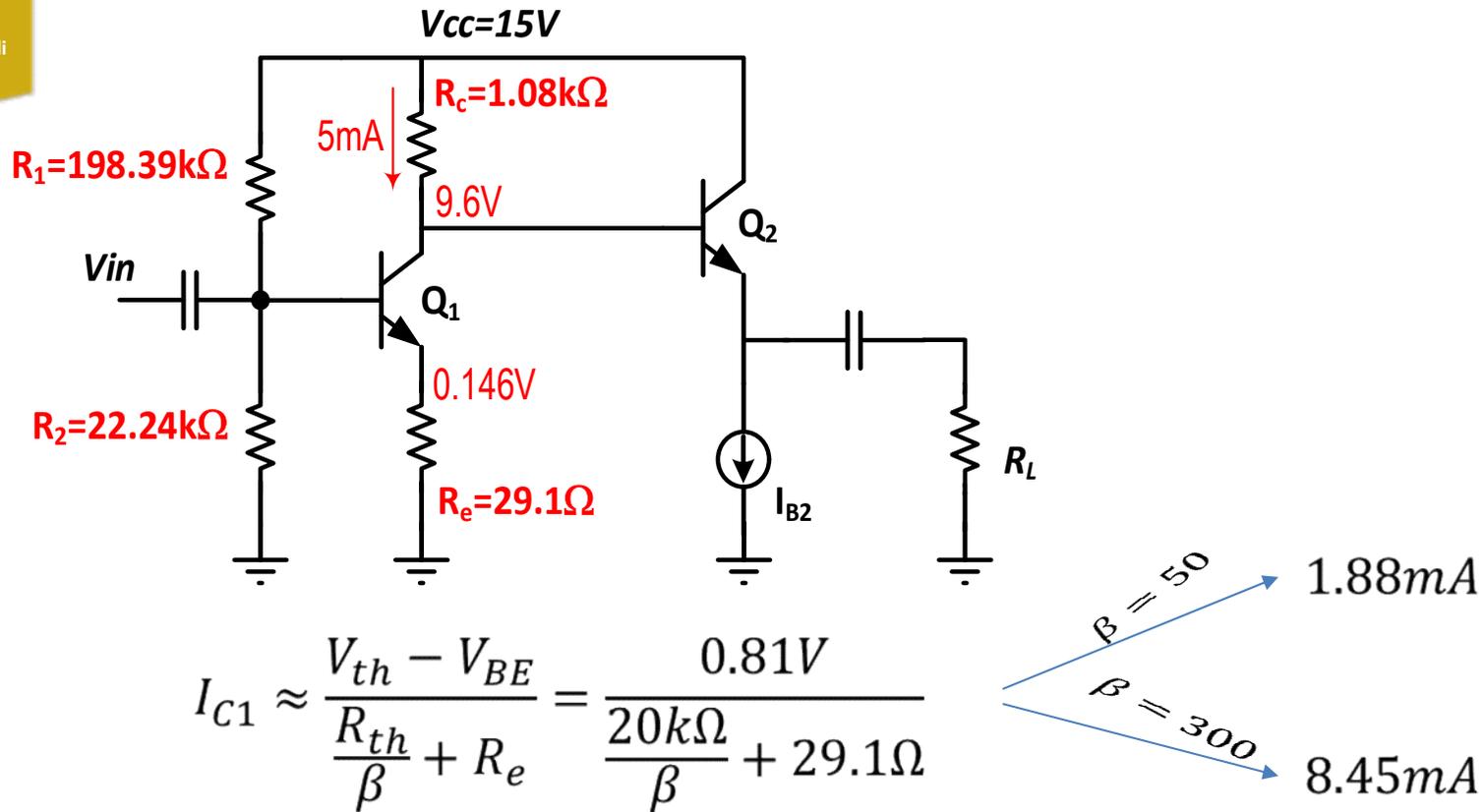
Le resistenze  $R_1$  ed  $R_2$  determinano la corrente di collettore. Risolvendo Kirchhoff alla maglia di ingresso:

$$I_C = \frac{V_{th} - V_{BE}}{\frac{R_{th}}{\beta} + \frac{\beta + 1}{\beta} R_e} \approx \frac{V_{th} - V_{BE}}{\frac{R_{th}}{\beta} + R_e}$$

Con  $R_{th}=20k\Omega$ ,  $I_{C1}=5mA$ ,  $\beta=150$ ,  $V_{be}=0.7V$ ,  $R_e=29.1\Omega$ , l'equazione permette di derivare:

$$V_{th}=1.512V, \quad R_1=198.39k\Omega, \quad R_2=22.24k\Omega$$

# Sensibilità di $I_{c1}$ a variazioni di $\beta$

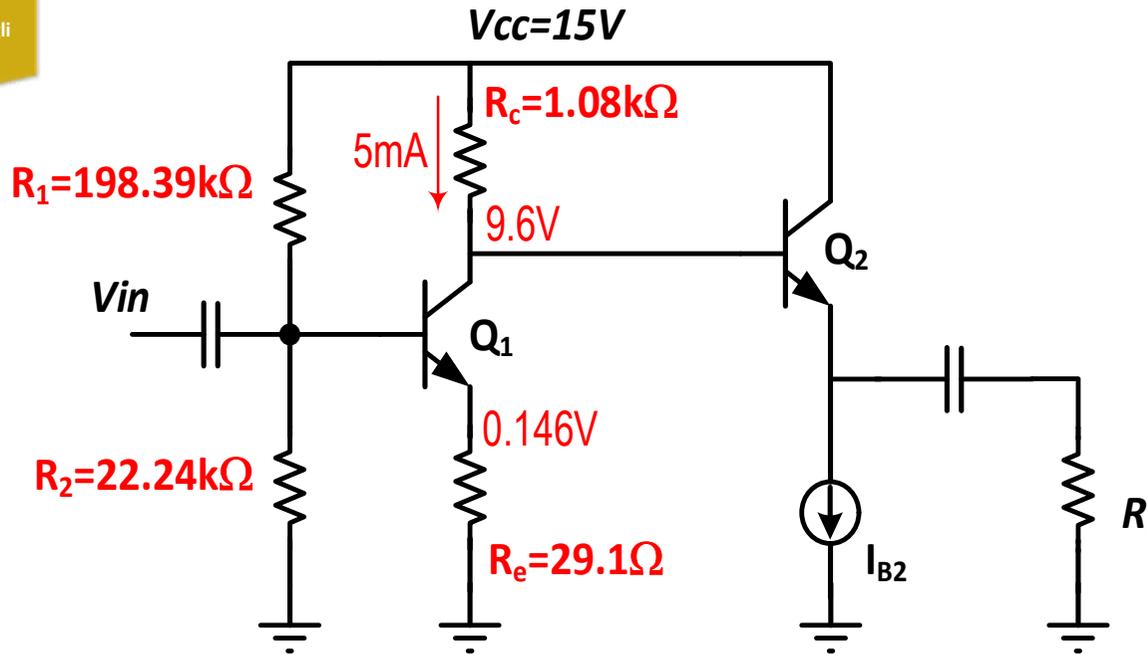


Il punto di lavoro (e di conseguenza anche il guadagno) è fortemente sensibile a variazioni di  $\beta$  poichè a denominatore il termine  $R_{th}/\beta$  è più elevato di  $R_e$

Per ridurre la sensibilità bisogna ridurre  $R_{th}$  (riducendo la resistenza di ingresso dell'amplificatore) o alzare  $R_e$ , riducendo il guadagno



## Sensibilità di $I_{c1}$ variazioni di $\beta$



$$I_{C1} \approx \frac{V_{th} - V_{BE}}{\frac{R_{th}}{\beta} + R_e}$$
$$= \frac{0.81V}{\frac{20k\Omega}{\beta} + 29.1\Omega}$$

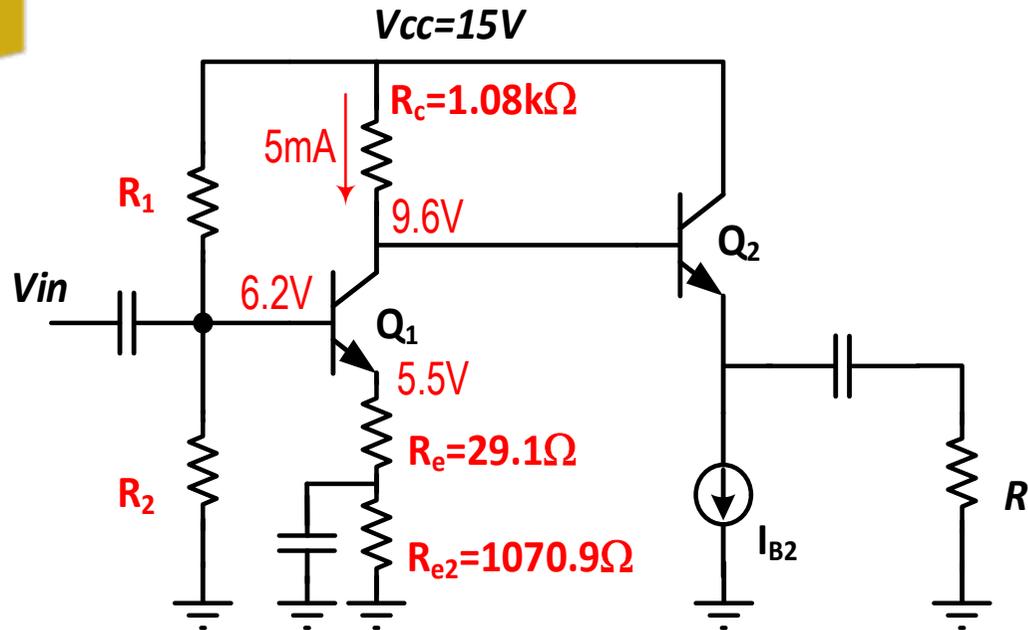
Il valore di  $R_e$  ( $29.1\Omega$ ), fissato per ottenere il guadagno richiesto, è relativamente piccolo

La tensione all'emettitore ( $V_e=0.146V$ ) è molto più bassa del valore massimo che permette un'ampiezza di  $\pm 3V$  al collettore ( $9.6V-3V-0.3V=6.3V$ ), mantenendo il BJT in regione attiva

Possiamo sfruttare questa considerazione per modificare il circuito riducendo la sensibilità a variazioni di  $\beta$



# Amplificatore robusto a variazioni di $\beta$



$$I_C \approx \frac{V_{th} - V_{BE}}{\frac{R_{th}}{\beta} + R_e}$$

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

$$R_{th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

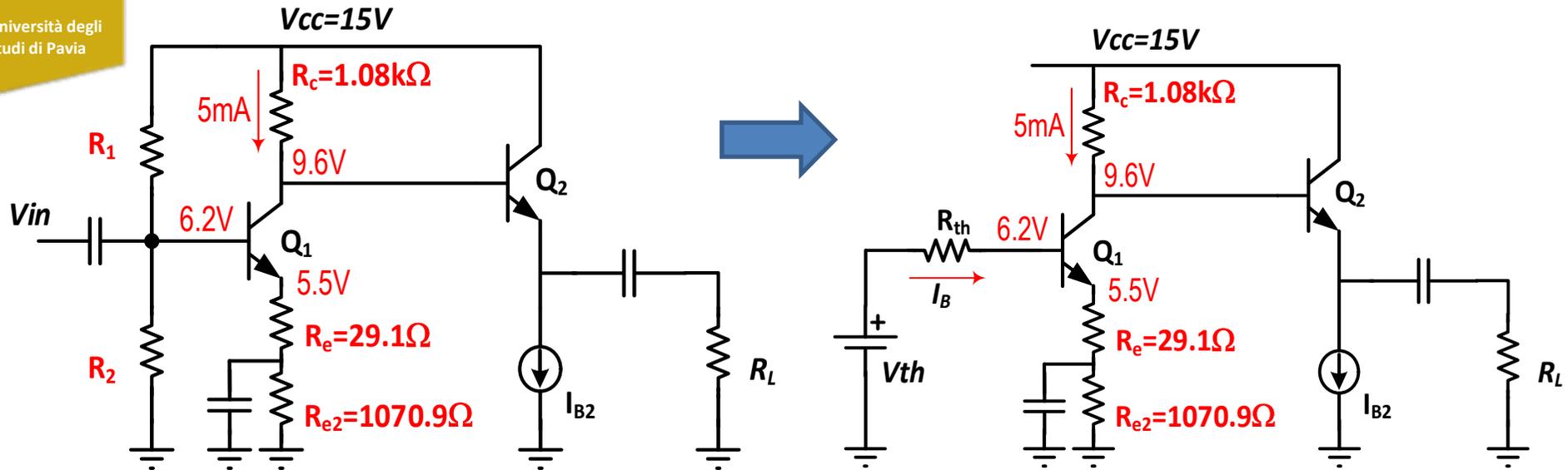
La corrente  $I_{c1}$  è fissata dalla serie delle due resistenze ( $R=1100\Omega$ )

Il condensatore cortocircuita  $R_{e2}$  per il segnale e  $R_e=29.1\Omega$  determina ancora il guadagno

$R_1$  ed  $R_2$  devono essere ricalcolate



# Amplificatore robusto a variazioni di $\beta$



$$I_C \approx \frac{V_{th} - V_{BE}}{\frac{R_{th}}{\beta} + R_e + R_{e2}}$$

$$V_{th} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad R_{th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Con  $R_{th} = 20k\Omega$ ,  $I_C = 5mA$ ,  $\beta = 150$ ,  $V_{be} = 0.7V$ ,  $R_e = 29.1\Omega$ ,  $R_{e2} = 1070.9\Omega$ , l'equazione permette di ottenere:

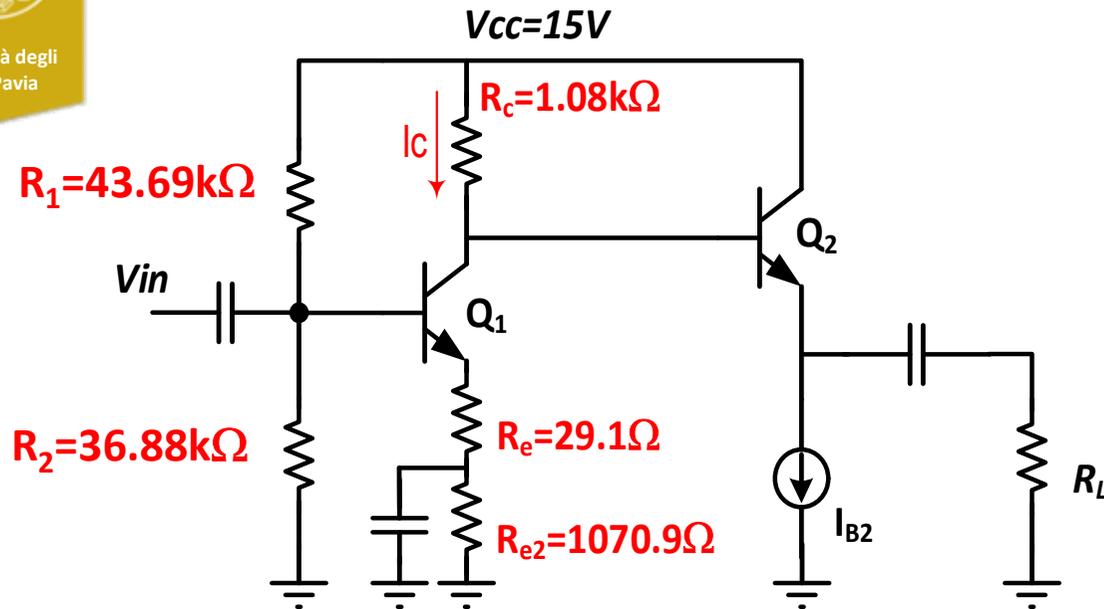
$$V_{th} = 6.866V,$$

$$R_1 = 43.693k\Omega$$

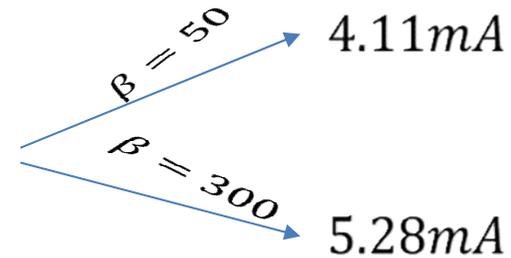
$$R_2 = 36.88k\Omega$$



# Sensibilità di $I_{c1}$ variazioni di $\beta$



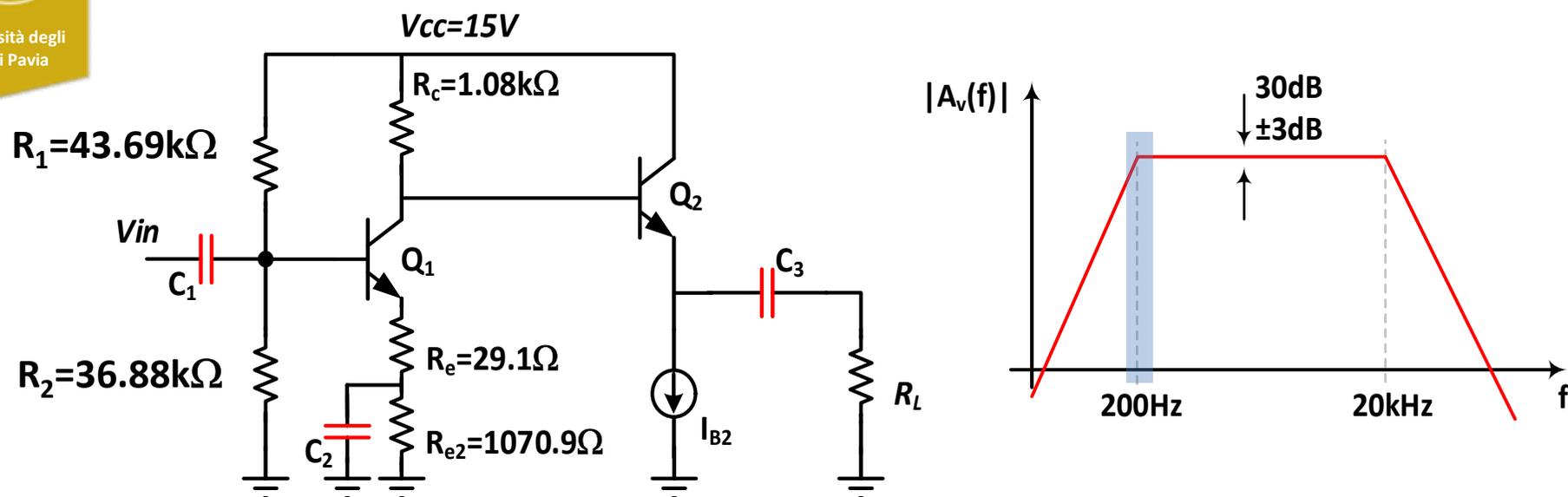
$$I_{C1} \approx \frac{V_{th} - V_{BE}}{\frac{R_{th}}{\beta} + R_e + R_{e2}} = \frac{6.166V}{\frac{20k\Omega}{\beta} + 1100\Omega}$$



La corrente di collettore sul punto di lavoro (e di conseguenza anche il guadagno) è ora molto più insensibile a variazioni  $\beta$



# Frequenza di taglio inferiore



Le capacità evidenziate in rosso introducono zeri e poli in bassa frequenza nella funzione di trasferimento. Questi ultimi limitano inferiormente la banda passante. Possiamo stimare la frequenza di taglio inferiore con il metodo delle **costanti di tempo in corto circuito**:

$$f_{1-3dB} \approx \frac{1}{2\pi} \left( \frac{1}{\tau_{C1}} + \frac{1}{\tau_{C2}} + \frac{1}{\tau_{C3}} \right) = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{1}{r_1 C_1} + \frac{1}{r_2 C_2} + \frac{1}{r_3 C_3} \right)$$

$r_i$  è la resistenza vista ai capi della capacità  $c_i$  quando le altre capacità sono sostituite da corto-circuiti



## Frequenza di taglio inferiore

Posso fissare le tre costanti di tempo uguali, in modo che:

$$f_{1-3dB} \approx \frac{1}{2\pi} \left( \frac{3}{\tau_{ci}} \right) = 200Hz \quad \tau_{ci} = 2.38 \text{ msec}$$

Dall'analisi del circuito, assumendo  $I_{c1}=5\text{mA}$ ,  $I_{c2}=15\text{mA}$ ,  $\beta=150$ ,  $R_L=300$ , ottengo:

$$r_1 = R_{th} // (r_{\pi-Q1} + (\beta + 1)R_e) = 4091\Omega$$

$$r_2 = R_{e2} // \left( R_{e2} + \frac{r_{\pi-Q1}}{\beta+1} \right) = 33\Omega$$

$$r_3 = R_L + \left( \frac{r_{\pi-Q2} + R_c}{\beta + 1} \right) = 308.8\Omega$$

e per avere le tre costanti di tempo uguali a 2.38msec:

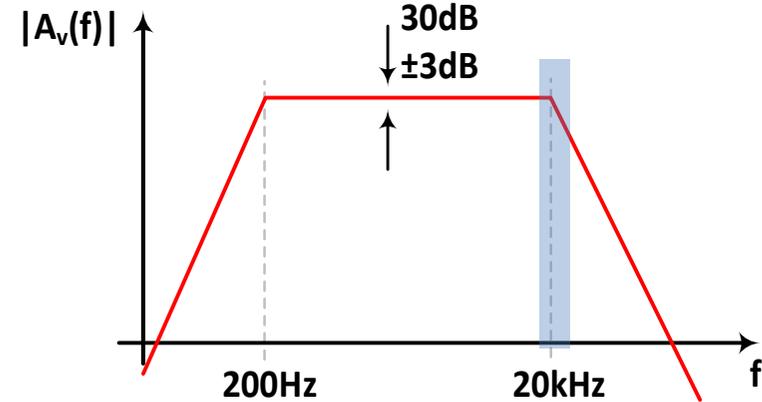
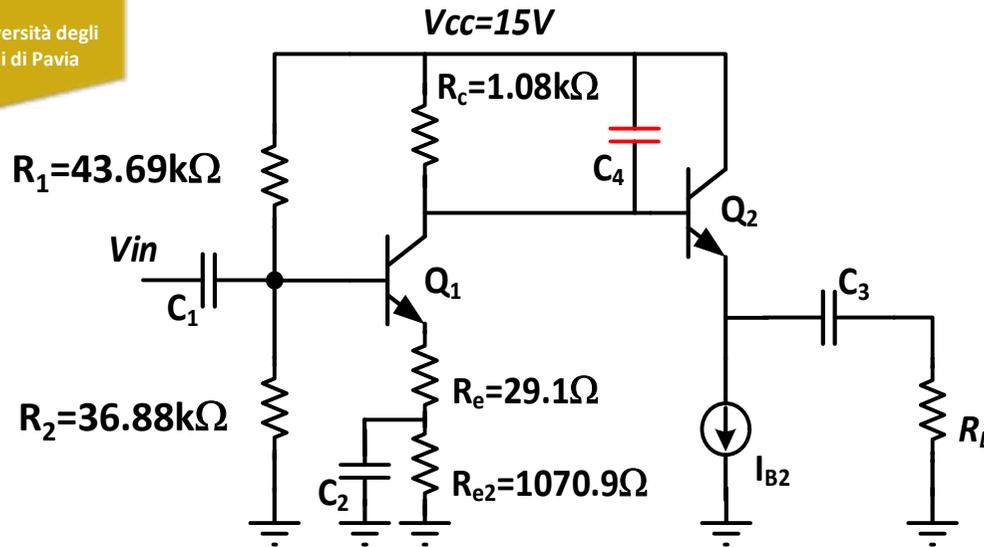
$$C_1 = 581nF$$

$$C_2 = 72\mu F$$

$$C_3 = 7.7\mu F$$



# Frequenza di taglio superiore



Le capacità parassite di  $Q_1$  e  $Q_2$  limitano la banda passante dell'amplificatore a decine di MHz. Per limitare la banda superiore a 20kHz è necessario aggiungere il condensatore  $C_4$ :

$$f_{2-3dB} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{1}{\tau_{C4}} \right) = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{1}{r_4 C_4} \right) = 20kHz$$

$r_4$  è la resistenza vista ai capi di  $C_4$ :  $r_4 = R_C // (r_{\pi-Q2} + (\beta + 1)R_L) = 1065\Omega$

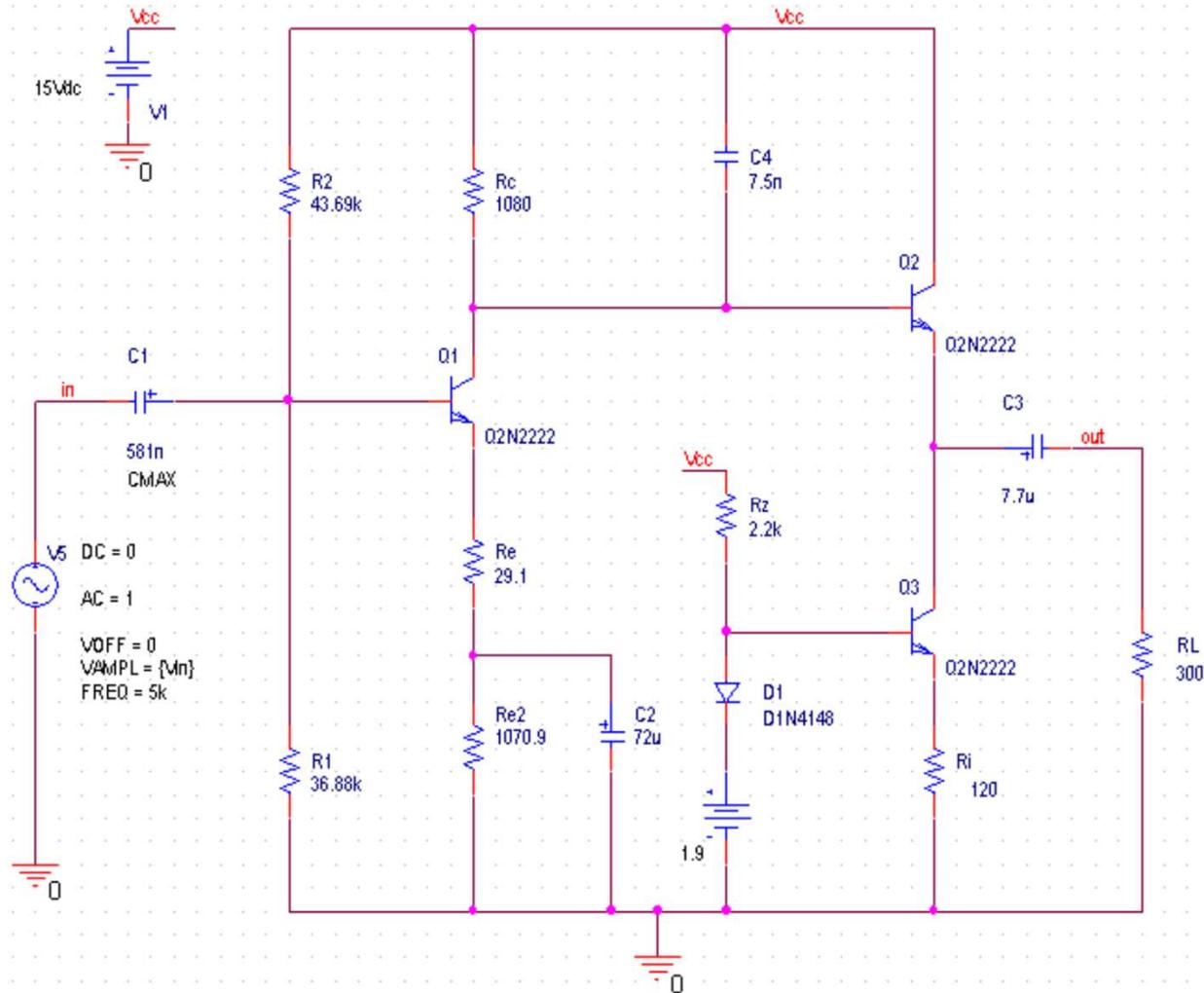
Per ottenere la frequenza di taglio superiore desiderata (20kHz),  $C_4=7.5nF$



# Attività

Disegnare lo schema dell'amplificatore in PSpice con i componenti precedentemente calcolati

Per simulare il comportamento del LED verde utilizzare una batteria da 1.9V



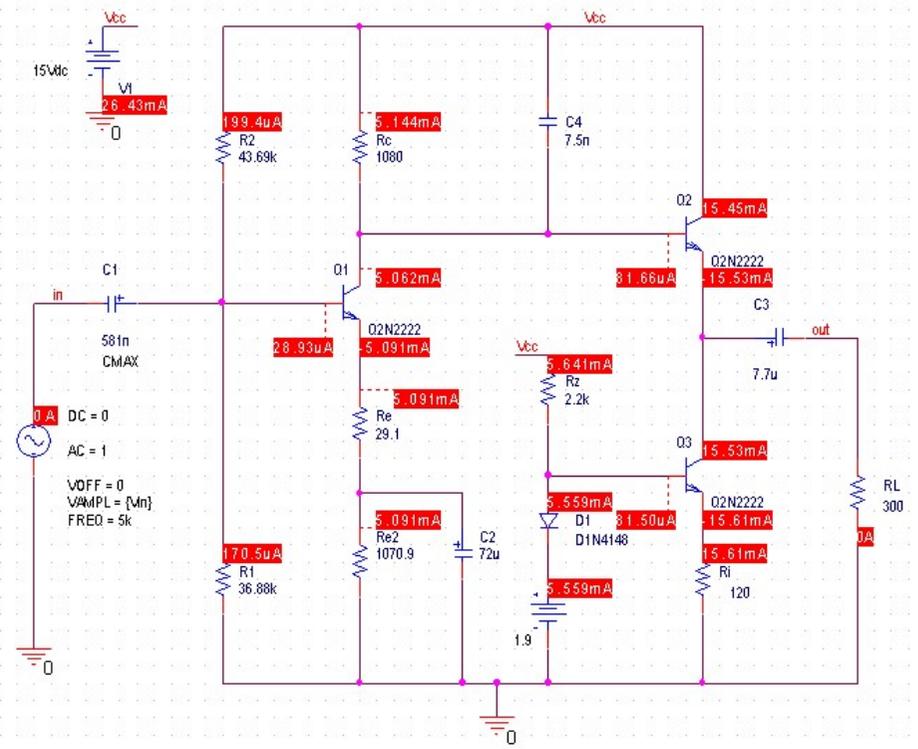
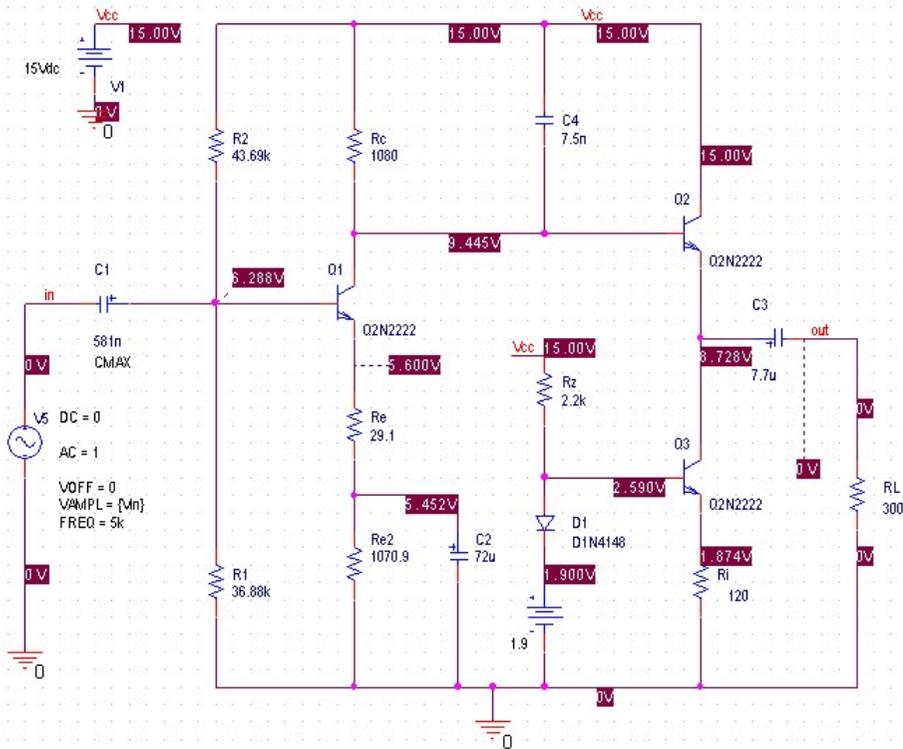


## Attività

- 1) Impostare una simulazione DC. Confrontare il punto di lavoro di  $Q_1, Q_2$  calcolato e simulato
- 2) Verificare la stabilità della corrente di collettore di  $Q_1$  e  $Q_2$  al variare di  $\beta$  da 50 a 300
- 3) Impostare una simulazione AC (da 10Hz a 1MHz) e verificare guadagno a centro-banda e frequenze di taglio inferiore e superiore. Confrontare le prestazioni simulate e calcolate
- 4) Verificare in simulazione la dipendenza della funzione di trasferimento dal  $\beta$  di  $Q_1, Q_2$
- 5) Verificare con una simulazione Transient che l'amplificatore possa erogare in uscita un segnale sinusoidale di ampiezza 3V con distorsione trascurabile
- 6) Aggiustare il progetto, cambiando il valore dei resistori e dei condensatori utilizzando valori della serie E12 e cercando di rispettare al meglio le specifiche



# Punto di Lavoro





## Sensibilità di $I_{c1,2}$ a $\beta$

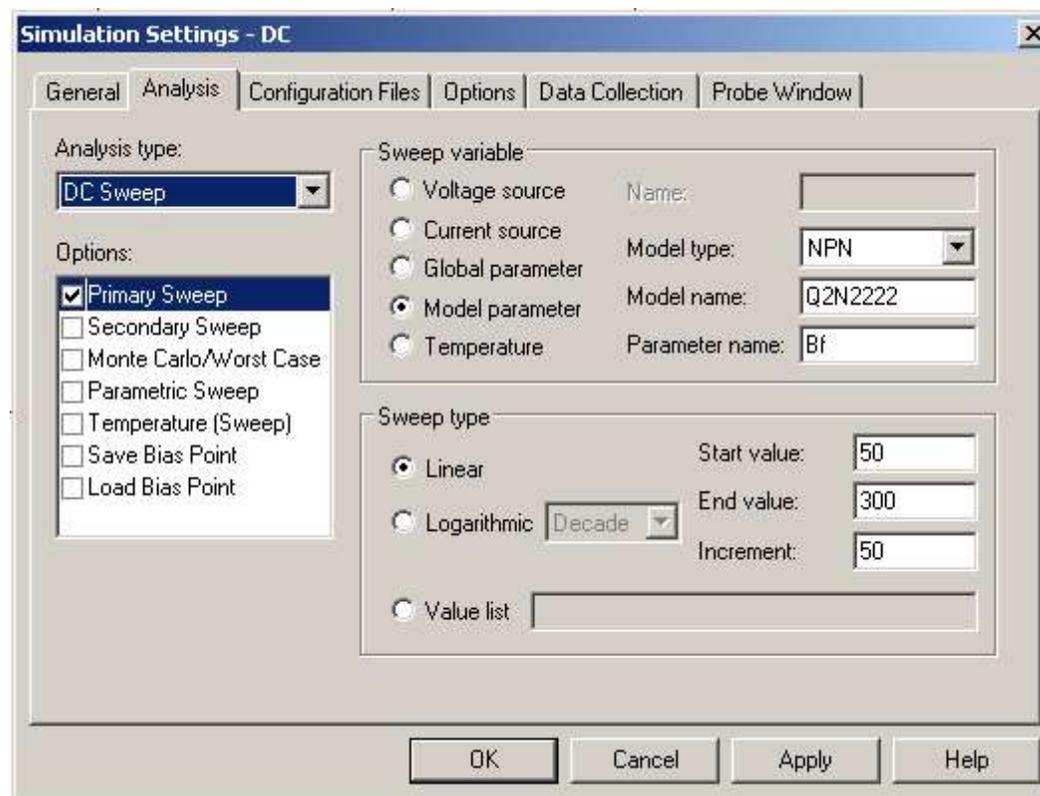
Impostare una simulazione DC Sweep

Selezionare Model Parameter

Model Type: NPN

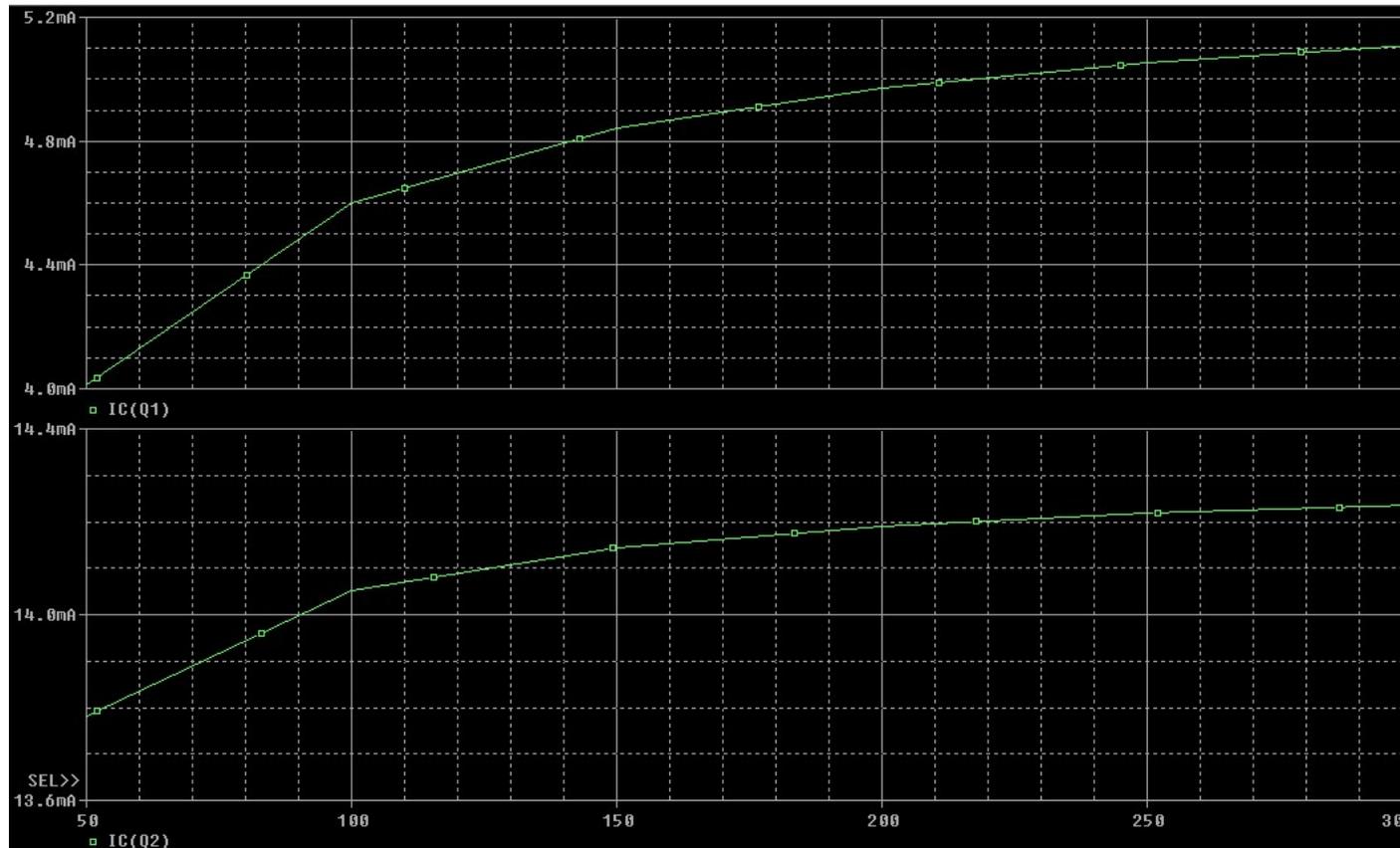
Model Name: Q2N2222

Parameter Name: Bf





## Sensibilità di $I_{c1,2}$ a $\beta$

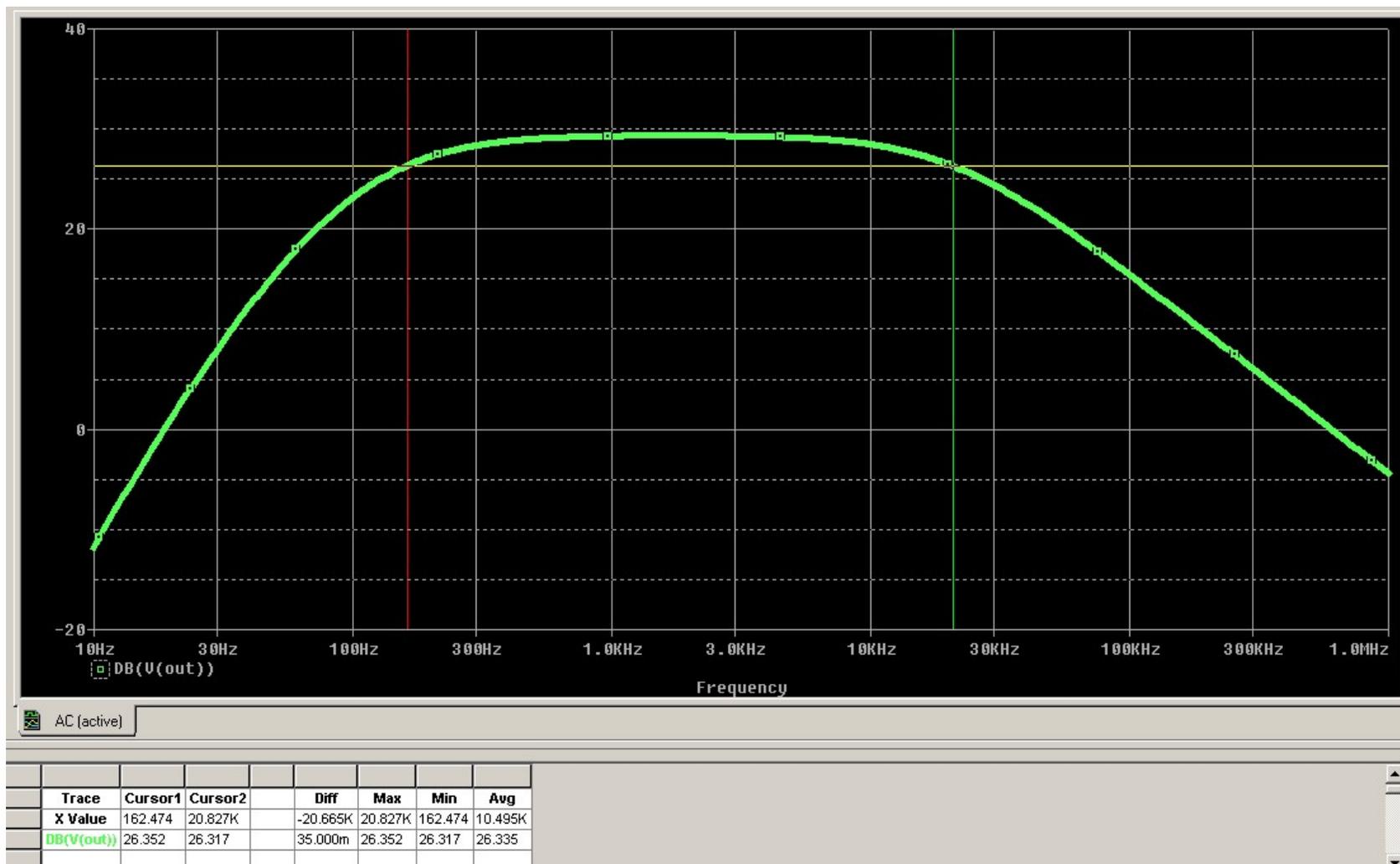


Una volta terminata la simulazione è possibile visualizzare l'andamento delle correnti di collettore in funzione di  $\beta$



Università degli Studi di Pavia

# Guadagno e Banda Passante





# *Sensibilità del guadagno a $\beta$*

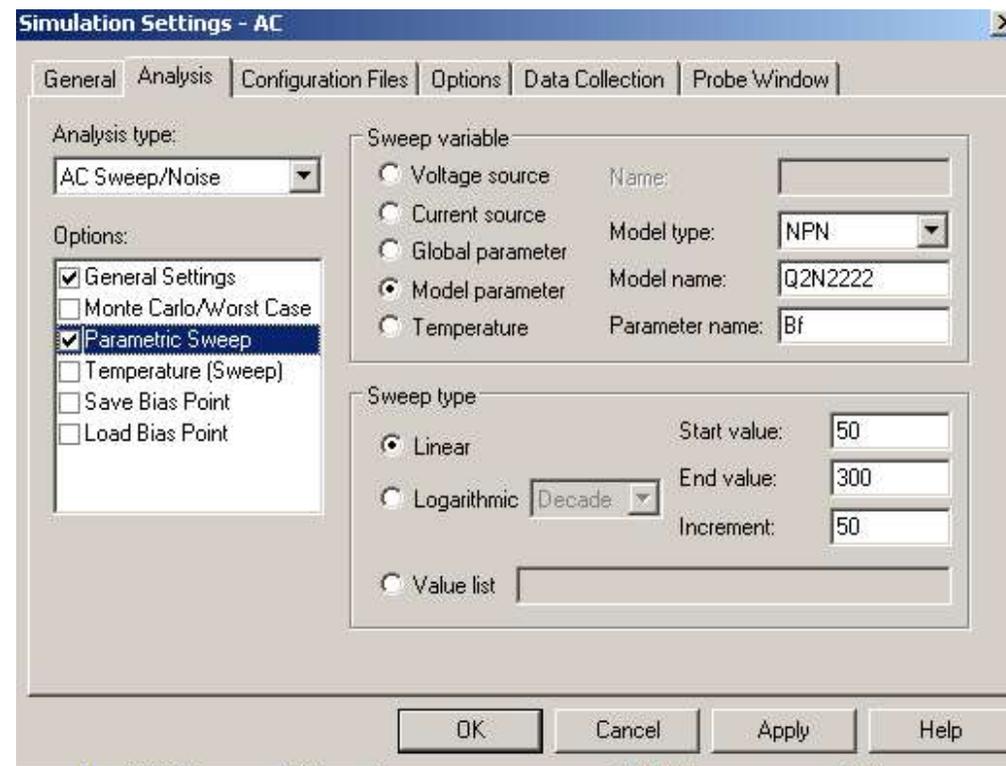
Impostare una simulazione AC Sweep

Selezionare Parametric Sweep

Model Type: NPN

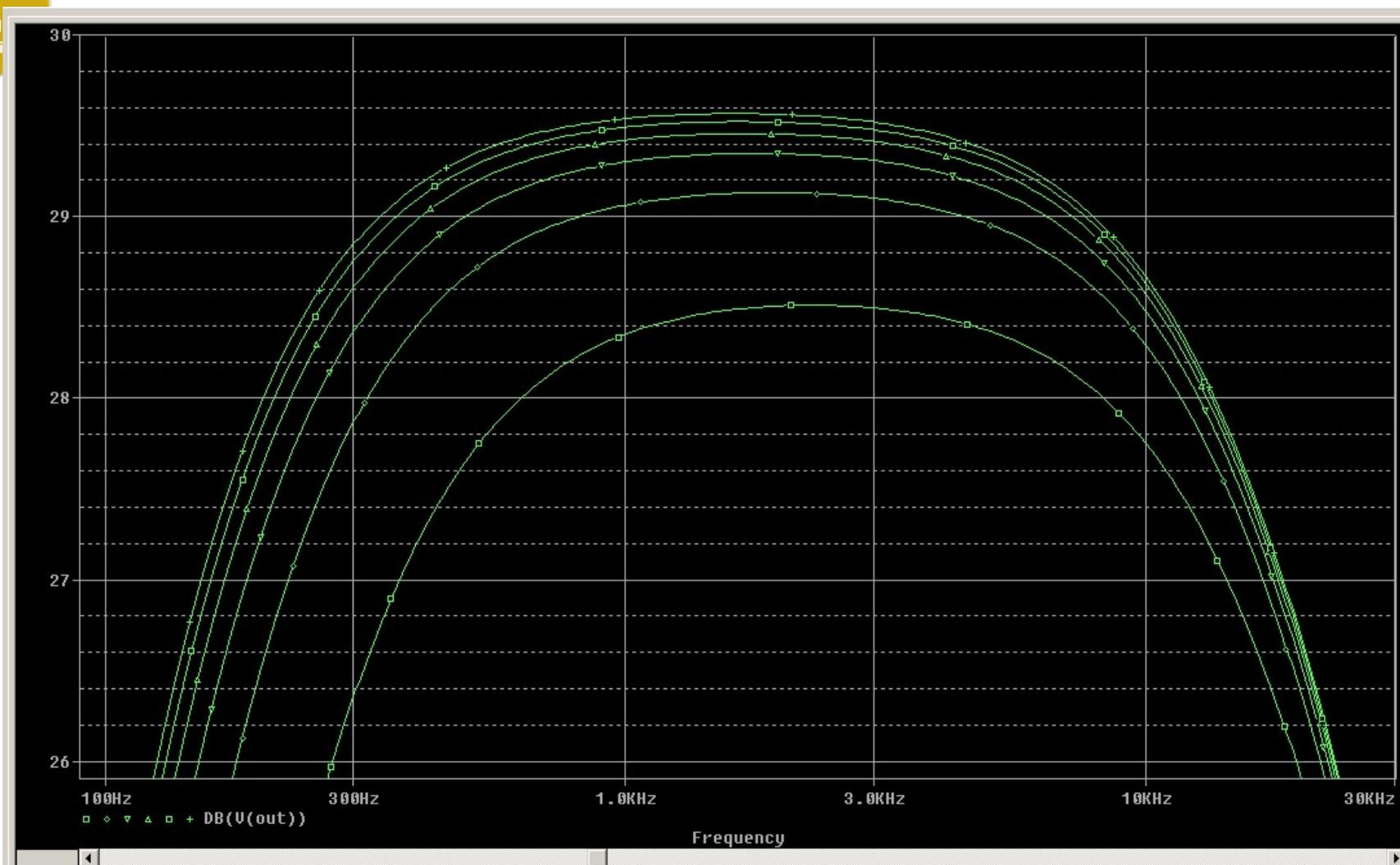
Model Name: Q2N2222

Parameter Name: Bf





## Sensibilità del guadagno a $\beta$



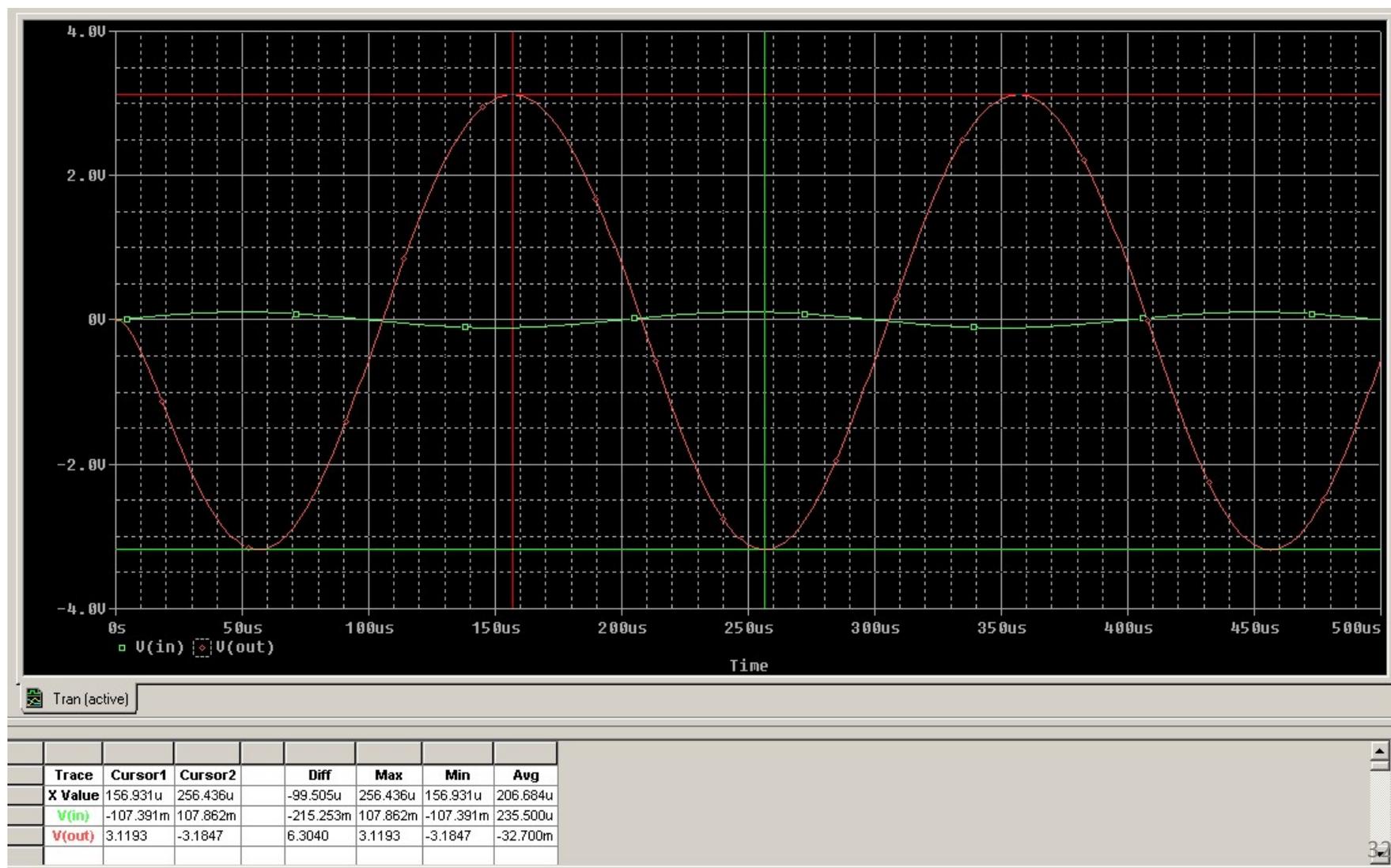
La variazione del guadagno è di circa 1dB

Con  $\beta=50$  la frequenza di taglio inferiore diventa di poco superiore a 200Hz



Università degli  
Studi di Pavia

# Simulazione Transient con $V_{in} = 110mV$







Università degli  
Studi di Pavia

# *Circuito realizzato*

