

# Misura della caratteristica in uscita di un transistor BJT P-N-P in configurazione ad emettitore comune

Cristina Caprioglio, Luca Morelli

Primo turno, tavolo 3

## 1 Scopo della prova

La prova consisteva nella misura delle caratteristiche in uscita di un transistor BJT Silicio P-N-P in configurazione ad emettitore comune, prima con una corrente di base a  $-200\mu A$  e poi a  $-100\mu A$ . Abbiamo realizzato una serie di fit con ROOT in modo da ricavare i parametri caratteristici del transistor: la tensione di Early  $V_A$ , il rapporto  $\frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_{CE}}$  (ovvero la resistenza in uscita per una determinata corrente di base) e il suo inverso, che corrisponde alla conduttanza. Abbiamo anche ricavato il guadagno di corrente  $\beta = \frac{\Delta I_{CE}}{\Delta I_B}$  per diversi valori fissati di  $V_{CE}$ .

## 2 Procedura

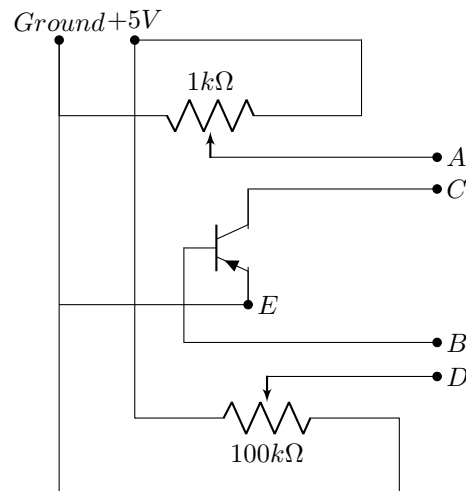


Figura 1: Schema del circuito realizzato

Prima di tutto abbiamo cortocircuitato i punti A e C, poi abbiamo fissato il puntale rosso del multimetro al punto D, mentre quello nero al punto B, dopodichè abbiamo agito sul potenziometro  $R_B$  da  $100k\Omega$

per fissare una corrente di base  $I_B = -200\mu A$ . Abbiamo quindi cortocircuitato i punti B e D e fissato il multimetro tra A e C, collegando il puntale rosso al primo, il nero al secondo e l'oscilloscopio a C. Abbiamo infine ottenuto la caratteristica in uscita misurando con il multimetro la corrente di collettore  $I_C$  in funzione della tensione tra emettitore e collettore  $V_{CE}$ , facendola variare tra i  $-4V$  e i  $-0.05V$  agendo sul potenziometro  $R_A$  da  $1k\Omega$ . In particolare, abbiamo eseguito 32 misure, di cui 21 per valori di tensioni maggiori o uguali ad  $1V$ , ripetendo poi la procedura per una corrente di base di  $-100\mu A$ .

### 3 Materiali utilizzati

- Potenziometri da  $1k\Omega$  e da  $100k\Omega$
- Transistor BJT : 2N3906(BU) Silicio P-N-P
- Cavetti
- Cacciavite
- Cavi a doppia banana
- Breadboard

### 4 Strumentazione

- Alimentatore a bassa tensione
- Oscilloscopio ISO-TECH, ISR 622 20MHz
- Multimetro digitale ISO-TECH, IDM 105

### 5 Misurazioni

La tabella (1) di seguito riportiamo i valori relativi a fondo scala, risoluzione e precisione dei vari strumenti:

	Fondo scala	Risoluzione	Precisione
Oscilloscopio (mV)	10	2	3%
	50	10	3%
	200	40	3%
	500	100	3%
	1000	200	3%
Multimetro (mA)	4 - 400	$10^{-3}$	$0.4\% + 2d$

Tabella 1: Dati forniti dai data sheet della strumentazione utilizzata

Per il calcolo degli errori relativi alle misure effettuate con l'oscilloscopio abbiamo utilizzato la seguente formula:

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_L)^2 + (\sigma_Z)^2 + (\sigma_C)^2} \quad (1)$$

dove  $\sigma_C = (misura \cdot 0.03)$  è l'errore del costruttore.

$$\sigma_L = \sigma_Z = \frac{\text{fondo scala}}{5} \cdot \#tacchette \text{ apprezzabili}$$

$\sigma_Z$  è l'errore sullo zero, in tal caso il fondo scala vale 10 mV/div.

Invece  $\sigma_L$  è l'errore sulla lettura e in questo caso il fondo scala varia in base alla misura, mentre abbiamo considerato “#tacchette apprezzabili” pari a 0.5 per tutte le misure. Per gli errori relativi al multimetro abbiamo preso la misura e moltiplicata rispettivamente per 0.3% , 0.1% o 0.4% in base al fondo scala usato, arrotondando poi all'ordine di grandezza della risoluzione ed aggiunto due digit, secondo le istruzioni del data sheet.

## 5.1 Corrente a $-200 \mu A$

Nella seguente tabella (2) abbiamo riportato i punti sperimentali acquisiti per la caratteristica in uscita del transistor con corrente di base  $I_B = -200 \mu A$ . Per ogni misura abbiamo indicato il fondo scala utilizzato poichè, come si può vedere in tabella (1), questo influenza la stima dell'errore.

Tensione oscilloscopio (mV)	Fondo scala (mV/div)	Corrente multimetro (mA)	Fondo scala (mA)
$-4000 \pm 200$	1000	$-38.3 \pm 0.2$	40
$-3800 \pm 200$	1000	$-38.2 \pm 0.2$	40
$-3600 \pm 200$	1000	$-37.6 \pm 0.2$	40
$-3400 \pm 100$	1000	$-37.3 \pm 0.2$	40
$-3200 \pm 100$	1000	$-36.7 \pm 0.2$	40
$-3000 \pm 100$	1000	$-36.3 \pm 0.2$	40
$-2800 \pm 100$	1000	$-35.9 \pm 0.2$	40
$-2600 \pm 100$	1000	$-35.3 \pm 0.2$	40
$-2400 \pm 100$	1000	$-34.9 \pm 0.2$	40
$-2200 \pm 100$	1000	$-34.5 \pm 0.2$	40
$-2000 \pm 100$	1000	$-34.0 \pm 0.2$	40
$-2000 \pm 80$	500	$-34.0 \pm 0.2$	40
$-1900 \pm 80$	500	$-33.7 \pm 0.2$	40
$-1800 \pm 70$	500	$-33.5 \pm 0.2$	40
$-1700 \pm 70$	500	$-33.2 \pm 0.2$	40
$-1600 \pm 70$	500	$-32.8 \pm 0.2$	40
$-1500 \pm 70$	500	$-32.8 \pm 0.2$	40
$-1400 \pm 70$	500	$-32.5 \pm 0.2$	40
$-1200 \pm 60$	500	$-31.9 \pm 0.2$	40
$-1100 \pm 60$	500	$-31.6 \pm 0.2$	40
$-1000 \pm 60$	500	$-31.0 \pm 0.1$	40
$-700 \pm 50$	500	$-29.8 \pm 0.1$	40
$-500 \pm 50$	500	$-27.0 \pm 0.1$	40
$-400 \pm 20$	200	$-25.9 \pm 0.1$	40
$-320 \pm 20$	200	$-23.3 \pm 0.1$	40
$-280 \pm 20$	200	$-21.9 \pm 0.1$	40
$-200 \pm 20$	200	$-17.46 \pm 0.09$	40
$-150 \pm 7$	50	$-13.08 \pm 0.07$	40
$-120 \pm 6$	50	$-8.490 \pm 0.05$	40
$-100 \pm 6$	50	$-5.580 \pm 0.04$	40
$-70 \pm 6$	50	$-2.39 \pm 0.01$	4
$-60 \pm 5$	50	$-1.651 \pm 0.009$	4

Tabella 2: Punti acquisiti per la caratteristica in uscita con corrente di base  $I_B = -200 \mu A$

## 5.2 Corrente a $-100 \mu A$

Nella tabella (3), sotto riportata, abbiamo elencato i punti sperimentali acquisiti per la caratteristica in uscita del transistor con corrente di base  $I_B = -100 \mu A$ . Per ogni misura abbiamo riportato il fondo scala utilizzato poichè, come si può vedere in tabella (1), questo influenza la stima dell'errore.

Tensione oscilloscopio (mV)	Fondo scala (mV/div)	Corrente multimetro (mA)	Fondo scala (mA)
-4000 ± 200	1000	-20.3 ± 0.1	40
-3800 ± 200	1000	-20.2 ± 0.1	40
-3600 ± 200	1000	-20.0 ± 0.1	40
-3400 ± 100	1000	-19.8 ± 0.1	40
-3200 ± 100	1000	-19.62 ± 0.09	40
-3000 ± 100	1000	-19.46 ± 0.09	40
-2800 ± 100	1000	-19.27 ± 0.09	40
-2600 ± 100	1000	-19.06 ± 0.09	40
-2400 ± 100	1000	-18.85 ± 0.09	40
-2200 ± 100	1000	-18.65 ± 0.09	40
-2000 ± 100	1000	-18.43 ± 0.09	40
-2000 ± 80	500	-18.39 ± 0.09	40
-1900 ± 80	500	-18.28 ± 0.09	40
-1800 ± 70	500	-18.19 ± 0.09	40
-1700 ± 70	500	-18.09 ± 0.09	40
-1600 ± 70	500	-18.00 ± 0.09	40
-1500 ± 70	500	-17.89 ± 0.09	40
-1400 ± 70	500	-17.80 ± 0.09	40
-1200 ± 60	500	-17.60 ± 0.09	40
-1100 ± 60	500	-17.47 ± 0.09	40
-1000 ± 60	500	-17.33 ± 0.09	40
-700 ± 50	500	-16.86 ± 0.09	40
-500 ± 50	500	-16.38 ± 0.09	40
-400 ± 20	200	-16.00 ± 0.08	40
-320 ± 20	200	-15.63 ± 0.08	40
-280 ± 20	200	-15.32 ± 0.08	40
-200 ± 20	200	-10.81 ± 0.06	40
-150 ± 7	50	-8.27 ± 0.05	40
-120 ± 6	50	-4.95 ± 0.04	40
-100 ± 6	50	-2.83 ± 0.01	4
-70 ± 6	50	-1.004 ± 0.006	4
-60 ± 5	50	-0.773 ± 0.005	4

Tabella 3: Punti acquisiti per la caratteristica in uscita con corrente di base  $I_B = -100 \mu A$

## 6 Elaborazione dati e risultati

Abbiamo fittato i dati ricavati dalle tabelle (2) e (3), eseguendo un fit lineare pesato secondo la formula:

$$V_{CE} = a + bI_C \quad \text{con} \quad a \equiv \text{tensione di Early } V_A, \quad b \equiv \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C} \quad (2)$$

Dai fit abbiamo ottenuto i parametri caratteristici del transistor alle diverse correnti riportando quindi i risultati su due grafici, che abbiamo poi unito in uno unico, insieme ai punti sperimentali in modo da

costruire le due curve I-V per i due valori di corrente analizzati. Per quanto riguarda gli errori associati ai parametri li abbiamo ottenuti tramite somma in quadratura. Si deve tener presente che i grafici sono stati rappresentati nel primo quadrante, quindi con valori di tensioni e di correnti positivi, nonostante i valori di entrambe fossero negativi secondo le consuete convenzioni.

### 6.1 Corrente a $-200\mu A$

Dal fit dei dati in tabella (2), riportato nel grafico in figura (2), abbiamo ottenuto come tensione di Early  $V_A = -12000 \pm 400\text{ mV}$ , mentre la resistenza in uscita è risultata  $\frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C} = 410 \pm 10\ \Omega$ . Per il suo inverso, ovvero la conduttanza, abbiamo ottenuto  $g = (241 \pm 7) \cdot 10^{-5} S$ . Si può chiaramente vedere sia l'andamento lineare, con inclinazione dovuto all'effetto Early, che il gomito della curva quando la corrente inizia a variare esponenzialmente.

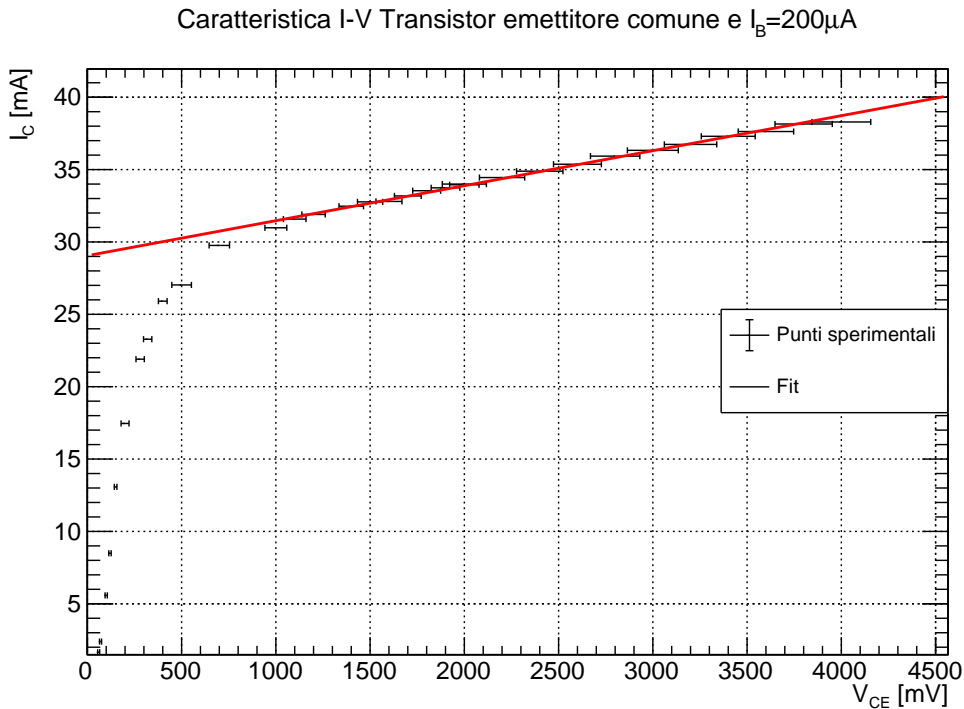


Figura 2: Caratteristiche in uscita del transistor con corrente di base a  $-200\mu A$

### 6.2 Corrente a $-100\mu A$

Dal fit dei dati in tabella (3), riportato nel grafico in figura (3), abbiamo ottenuto come tensione di Early  $V_A = -16000 \pm 500\text{ mV}$ , mentre la resistenza in uscita è risultata  $\frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C} = 990 \pm 30\ \Omega$ . Per il suo inverso, ovvero la conduttanza, abbiamo ottenuto  $g = (102 \pm 3) \cdot 10^{-5} S$ . Si può chiaramente vedere sia l'andamento lineare, con inclinazione dovuto all'effetto Early, che il gomito della curva quando la corrente inizia a variare esponenzialmente.

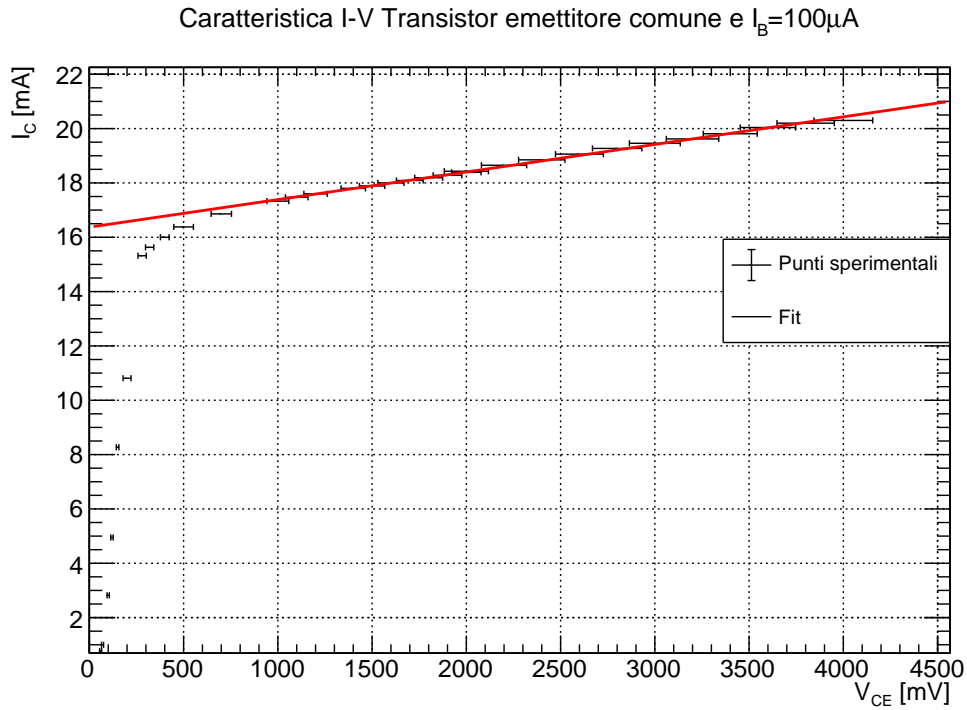


Figura 3: Caratteristiche in uscita del transistor con corrente di base a  $-100\mu A$

### 6.3 Confronto delle curve I-V e parametro $\beta$

Di seguito abbiamo riportato in figura un grafico (4) contenente entrambe le curve I-V. Da quest'ultimo abbiamo ricavato una stima del guadagno di corrente misurando per ogni valore di tensione preso la differenza di corrente tra i punti e diviso per la differenza delle correnti di base secondo la formula:

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad (3)$$

Caratteristica I-V un transistor BJT con emettitore comune a due correnti di base diverse

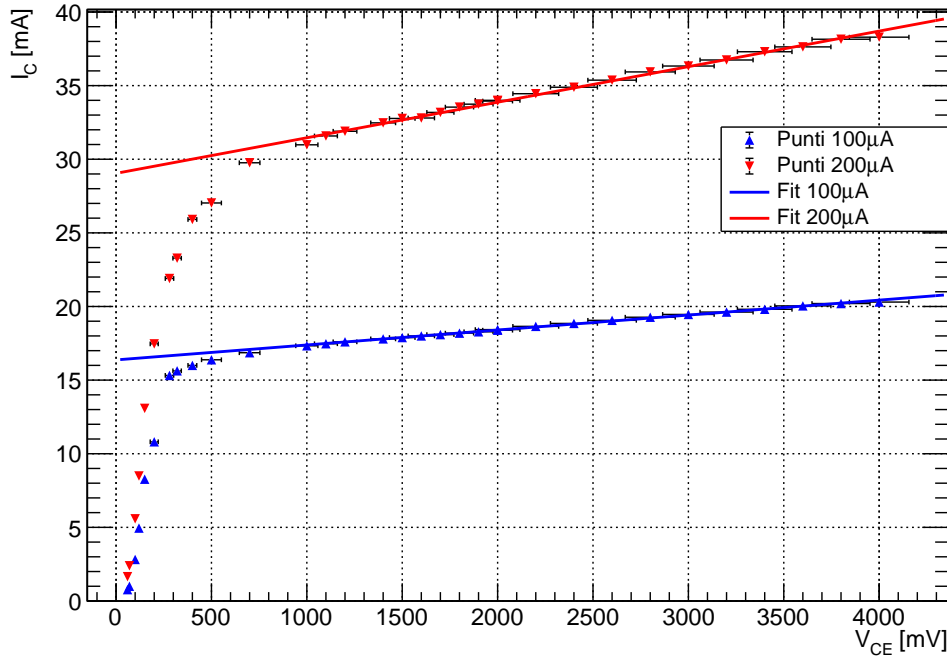


Figura 4: Caratteristiche in uscita del transistor. In rosso per la corrente di base a  $-200 \mu A$  e in blu per la corrente di base a  $-100 \mu A$

Da una media di 20 misure, prese nella zona con andamento lineare, abbiamo ottenuto  $\beta = 160 \pm 10$ , dove per l'errore abbiamo usato la deviazione standard.

## Conclusioni

Le misure delle caratteristiche in uscita del transistor si sono rivelate qualitativamente in accordo con la teoria riproducendo l'andamento prima lineare nella regione attiva e poi esponenziale in quella di saturazione. Evidente è l'inclinazione delle due rette dovuto all'effetto Early, il cui valore di tensione è risultato in entrambe le curve dell'ordine di grandezza previsto:  $V_A = -12000 \pm 400 \text{ mV}$  con corrente di base a  $-200 \mu A$  e  $V_A = -16000 \pm 500 \text{ mV}$  per quella a  $-100 \mu A$ . Anche il parametro  $b$ , ovvero la resistenza in uscita, e di conseguenza il suo inverso  $g$  sono risultati dell'ordine di grandezza atteso per entrambe le due curve, con  $b = 410 \pm 10 \Omega$  e  $g = (242 \pm 7) \cdot 10^{-5} S$  per  $I_B = -200 \mu A$ , mentre per quella a  $-100 \mu A$  abbiamo ottenuto  $b = 990 \pm 30 \Omega$  e  $g = (102 \pm 3) \cdot 10^{-5} S$ . Infine, il valore stimato di  $\beta = 160 \pm 10$  è risultato anch'esso compatibile con i valori di aspettazione.