

# 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

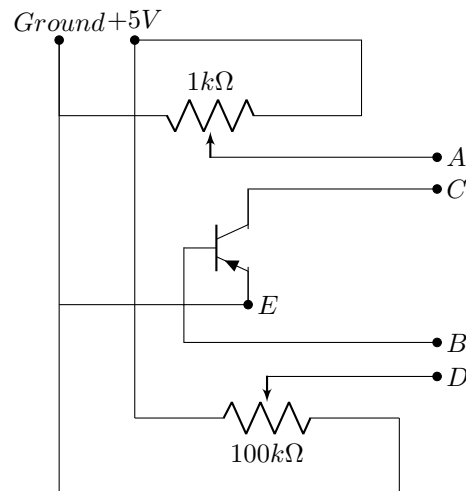


Figura 1: Schema del circuito realizzato

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 (5) 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.

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

$\sigma_Z$  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 (5), questo influenza la stima dell'errore.

| Tensione oscilloscopio (mV) | Fondo scala (mV/div) | Corrente multimetro (mA) | Fondo scala (mA) |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------|------------------|
| $-4000 \pm 160$             | 1000                 | $-38.29 \pm 0.16$        | 40               |
| $-3800 \pm 150$             | 1000                 | $-38.15 \pm 0.15$        | 40               |
| $-3600 \pm 150$             | 1000                 | $-37.63 \pm 0.15$        | 40               |
| $-3400 \pm 140$             | 1000                 | $-37.30 \pm 0.15$        | 40               |
| $-3200 \pm 140$             | 1000                 | $-36.74 \pm 0.15$        | 40               |
| $-3000 \pm 140$             | 1000                 | $-36.33 \pm 0.15$        | 40               |
| $-2800 \pm 130$             | 1000                 | $-35.93 \pm 0.15$        | 40               |
| $-2600 \pm 130$             | 1000                 | $-35.37 \pm 0.14$        | 40               |
| $-2400 \pm 120$             | 1000                 | $-34.89 \pm 0.14$        | 40               |
| $-2200 \pm 120$             | 1000                 | $-34.45 \pm 0.14$        | 40               |
| $-2000 \pm 120$             | 1000                 | $-34.00 \pm 0.14$        | 40               |
| $-2000 \pm 78$              | 500                  | $-33.95 \pm 0.14$        | 40               |
| $-1900 \pm 76$              | 500                  | $-33.74 \pm 0.14$        | 40               |
| $-1800 \pm 74$              | 500                  | $-33.54 \pm 0.14$        | 40               |
| $-1700 \pm 71$              | 500                  | $-33.18 \pm 0.13$        | 40               |
| $-1600 \pm 69$              | 500                  | $-32.80 \pm 0.13$        | 40               |
| $-1500 \pm 67$              | 500                  | $-32.77 \pm 0.13$        | 40               |
| $-1400 \pm 65$              | 500                  | $-32.47 \pm 0.13$        | 40               |
| $-1200 \pm 62$              | 500                  | $-31.90 \pm 0.13$        | 40               |
| $-1100 \pm 60$              | 500                  | $-31.58 \pm 0.13$        | 40               |
| $-1000 \pm 58$              | 500                  | $-30.98 \pm 0.13$        | 40               |
| $-700 \pm 54$               | 500                  | $-29.76 \pm 0.12$        | 40               |
| $-500 \pm 52$               | 500                  | $-27.03 \pm 0.11$        | 40               |
| $-400 \pm 23$               | 200                  | $-25.91 \pm 0.11$        | 40               |
| $-320 \pm 22$               | 200                  | $-23.28 \pm 0.10$        | 40               |
| $-280 \pm 22$               | 200                  | $-21.900 \pm 0.089$      | 40               |
| $-200 \pm 21$               | 200                  | $-17.460 \pm 0.071$      | 40               |
| $-150 \pm 6.8$              | 50                   | $-13.080 \pm 0.055$      | 40               |
| $-120 \pm 6.2$              | 50                   | $-8.490 \pm 0.035$       | 40               |
| $-100 \pm 5.9$              | 50                   | $-5.580 \pm 0.025$       | 40               |
| $-70 \pm 5.5$               | 50                   | $-2.390 \pm 0.011$       | 4                |
| $-60 \pm 5.4$               | 50                   | $-1.650 \pm 0.008$       | 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 (5), questo influenza la stima dell'errore.

| Tensione oscilloscopio (mV) | Fondo scala (mV/div) | Corrente multimetro (mA) | Fondo scala (mA) |
|-----------------------------|----------------------|--------------------------|------------------|
| -4000 ± 160                 | 1000                 | -20.30 ± 0.002           | 40               |
| -3800 ± 150                 | 1000                 | -20.20 ± 0.002           | 40               |
| -3600 ± 150                 | 1000                 | -20.04 ± 0.002           | 40               |
| -3400 ± 140                 | 1000                 | -19.81 ± 0.002           | 40               |
| -3200 ± 140                 | 1000                 | -19.62 ± 0.002           | 40               |
| -3000 ± 140                 | 1000                 | -19.46 ± 0.003           | 40               |
| -2800 ± 130                 | 1000                 | -19.27 ± 0.003           | 40               |
| -2600 ± 130                 | 1000                 | -19.06 ± 0.003           | 40               |
| -2400 ± 120                 | 1000                 | -18.85 ± 0.003           | 40               |
| -2200 ± 120                 | 1000                 | -18.65 ± 0.004           | 40               |
| -2000 ± 120                 | 1000                 | -18.43 ± 0.004           | 40               |
| -2000 ± 78                  | 500                  | -18.39 ± 0.005           | 40               |
| -1900 ± 76                  | 500                  | -18.28 ± 0.007           | 40               |
| -1800 ± 74                  | 500                  | -18.19 ± 0.01            | 40               |
| -1700 ± 71                  | 500                  | -18.09 ± 0.01            | 40               |
| -1600 ± 69                  | 500                  | -18.00 ± 0.02            | 40               |
| -1500 ± 67                  | 500                  | -17.89 ± 0.02            | 40               |
| -1400 ± 65                  | 500                  | -17.80 ± 0.02            | 40               |
| -1200 ± 62                  | 500                  | -17.60 ± 0.02            | 40               |
| -1100 ± 60                  | 500                  | -17.47 ± 0.02            | 40               |
| -1000 ± 58                  | 500                  | -17.33 ± 0.02            | 40               |
| -700 ± 54                   | 500                  | -16.86 ± 0.02            | 40               |
| -500 ± 52                   | 500                  | -16.38 ± 0.02            | 40               |
| -400 ± 23                   | 200                  | -16.00 ± 0.02            | 40               |
| -320 ± 22                   | 200                  | -15.63 ± 0.02            | 40               |
| -280 ± 22                   | 200                  | -15.32 ± 0.02            | 40               |
| -200 ± 21                   | 200                  | -10.81 ± 0.02            | 40               |
| -150 ± 6.8                  | 50                   | -8.27 ± 0.02             | 40               |
| -120 ± 6.2                  | 50                   | -4.95 ± 0.02             | 40               |
| -100 ± 5.9                  | 50                   | -2.82 ± 0.02             | 4                |
| -70 ± 5.5                   | 50                   | -1.00 ± 0.02             | 4                |
| -60 ± 5.4                   | 50                   | -0.77 ± 0.02             | 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  $V_A = -12020 \pm 390\text{ mV}$ , mentre la resistenza in uscita è risultata  $\frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C} = 414 \pm 12\ \Omega$ . Per il suo inverso, ovvero la conduttanza, abbiamo ottenuto  $g = (241.8 \pm 6.8) \cdot 10^{-5}\text{ S}$ . 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.

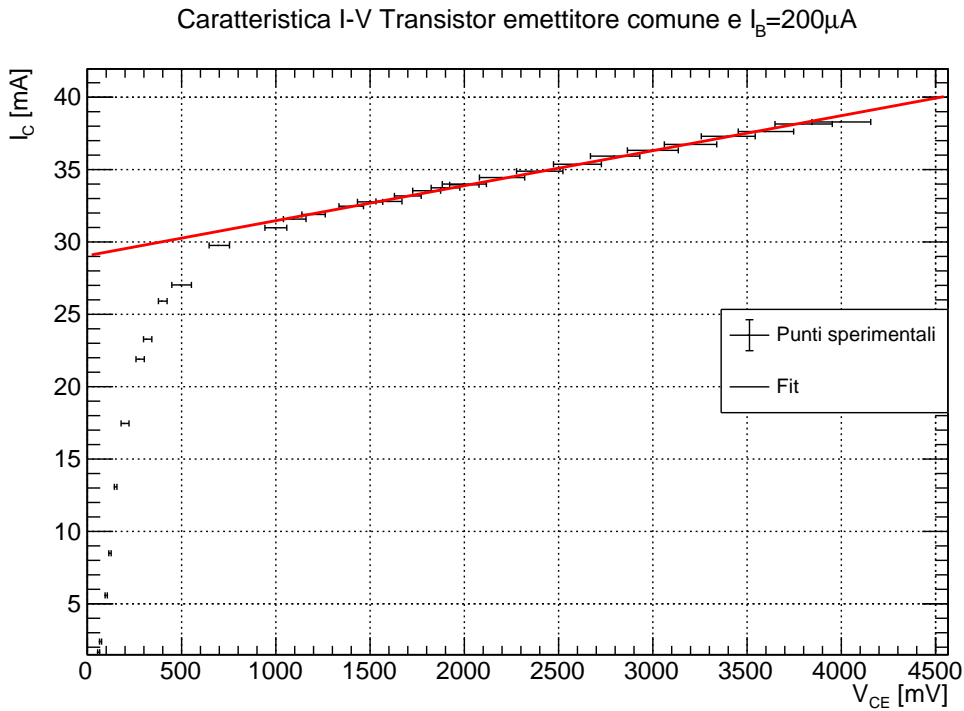


Figura 2: Caratteristiche in uscita del transistor con corrente di base a  $-200\mu A$

### 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  $V_A = -16130 \pm 510\text{ mV}$ , mentre la resistenza in uscita è risultata  $\frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C} = 985 \pm 28\ \Omega$ . Per il suo inverso, ovvero la conduttanza, abbiamo ottenuto  $g = (101.5 \pm 2.9) \cdot 10^{-5}\text{ S}$ . 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.

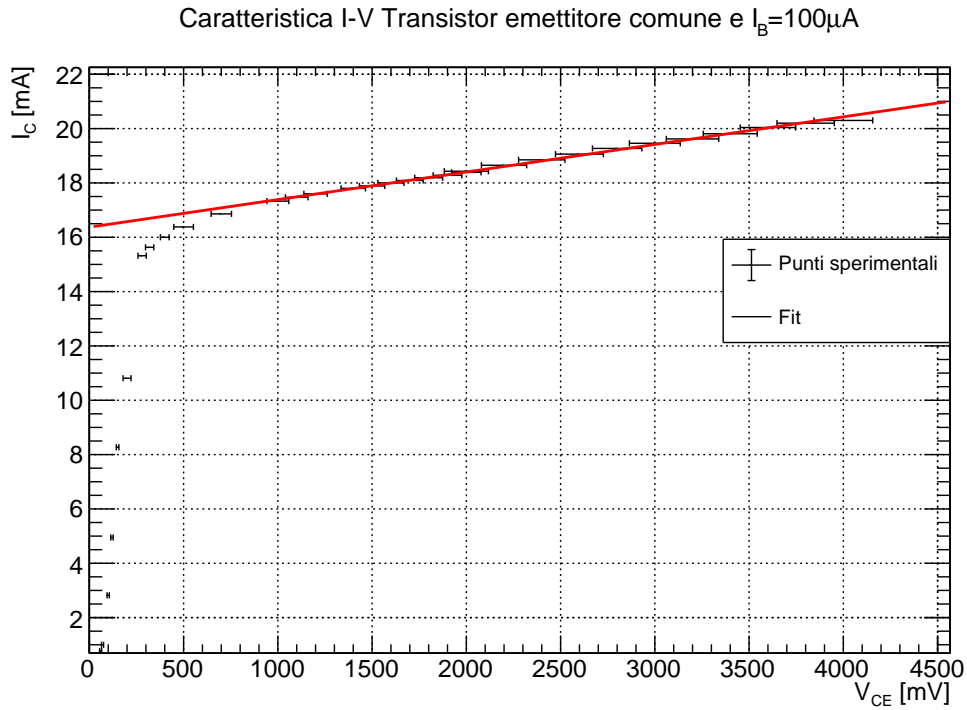


Figura 3: Caratteristiche in uscita del transistor con corrente di base a  $-100 \mu A$

### 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

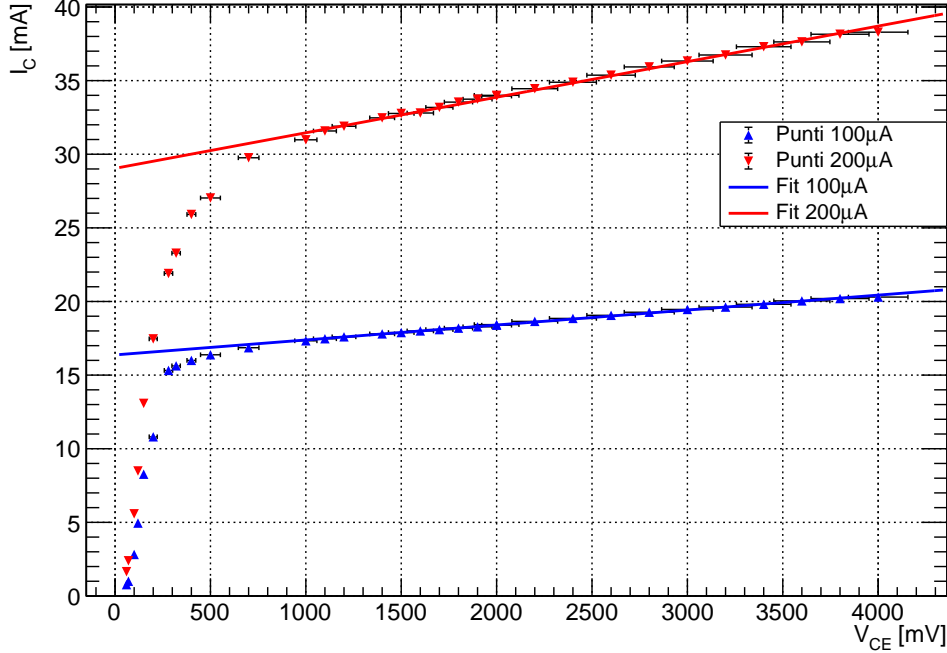


Figura 4: Caratteristiche in uscita del transistor. In rosso per la corrente di base a  $-200 \mu A$  e in blu per la corrente di base a  $-100 \mu A$

Da una media di 20 misure, prese nella zona con andamento lineare, abbiamo ottenuto  $\beta = 159 \pm 13$ , 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:  $V_A = -12020 \pm 390 \text{ mV}$  con corrente di base a  $-200 \mu A$  e  $V_A = -16130 \pm 510 \text{ mV}$  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  $b = 414 \pm 12 \Omega$  e  $g = (241.8 \pm 6.8) \cdot 10^{-5} S$  per  $I_B = -200 \mu A$ , mentre per quella a  $-100 \mu A$  abbiamo ottenuto  $b = 985 \pm 28 \Omega$  e  $g = (101.5 \pm 2.9) \cdot 10^{-5} S$ . Infine, il valore stimato di  $\beta = 159 \pm 13$  è risultato anch'esso compatibile con i valori di aspettazione.