POLARIZZAZIONE E STABILIZZAZIONE TERMICA DI UN TRANSISTOR

Prerequisiti:
Conoscenza delle Leggi dell'Elettrotecnica e della Termodinamica.
Conoscenza dell'Elettronica dello Stato Solido.
Obiettivi:
Saper calcolare il punto di lavoro di un elemento attivo allo stato solido

01). LA TEMPERATURA E LO STATO SOLIDO

Sappiamo che l'energia termica produce cariche libere all'interno del reticolo cristallino, e il loro aumento è in funzione dell'aumento della temperatura: queste cariche sono chiamate minoritarie, in contrapposizione alle cariche maggioritarie che nascono per effetto del drogaggio "N" o "P". Quest'aumento di cariche libere fa crescere la conducibilità, con conseguente aumento della corrente I_{cbo}, che noi chiameremo inversa perché di segno opposto a quella creata dal drogaggio.

Per effetto Joule il corpo solido si riscalda al passaggio della I_{cbo}, facendo aumentare l'energia termica interna, con la conseguenza di un ulteriore aumento delle cariche elettriche libere. Si innesca, così, un pericoloso processo di reazione positiva che porta velocemente il componente alla distruzione per surriscaldamento. Il reticolo cristallino si scompone e i fenomeni di conducibilità basati sul drogaggio vanno distrutti. Il componente è inutilizzabile. Una tecnologia elettronica basata su questa fenomenologia non ha una grande prospettiva. Lo stato solido, in ultima analisi, è intrinsecamente instabile, "si ubriaca" di temperatura fino alle estreme conseguenze, sembra quasi che abbia "tendenze suicide", ma le sue qualità specifiche sono eccellenti, quando è ben adoperato. Si capisce allora come sia importante stabilizzarlo termicamente. Si è scoperto, attraverso studi sperimentali, che la corrente inversa I_{cbo}, dovuta alle cariche minoritarie, varia esponenzialmente con la temperatura secondo l'espressione empirica:

$$\boxed{I_{cbo} = I_{cbo25} \cdot e^{\phi\Delta T}} \qquad (1)$$

dove $I_{cbo\,25}$ è il valore della corrente inversa di riferimento a $25^0\,C$, ΔT è la variazione di temperatura intorno a $25^0\,C$ (ossia $\Delta T = T - 25^0\,C$) e ϕ è un coefficiente che dipende dal materiale semiconduttore adoperato che varia tra 0,06 e 0,1 (con un valore medio intorno a 0,075). In pratica si può dire, con buona approssimazione, che la ***corrente inversa*** I_{cbo} ***raddoppia il suo valore per ogni aumento di temperatura di 10 gradi centigradi.*** Possiamo cioè modificare l'espressione (1) e scrivere, senza commettere errori troppo grossolani:

$$\boxed{I_{cbo} = I_{cbo25} \cdot 2^{\frac{\Delta T}{10}}} \qquad (1a)$$

L'espressione (1a) sarà quella che noi adopereremo.

02). STABILIZZAZIONE TERMICA DEL TRANSISTORE

La *stabilità termica* di un transistor (da non confondere con la dissipazione termica!) è definita tramite un coefficiente S_T che mette in risalto quanto cresce la corrente di collettore I_c rispetto all'aumento della corrente inversa I_{cbo} a causa del riscaldamento della giunzione. Esso è quindi il rapporto tra la variazione ΔI_c della corrente di collettore I_C e la variazione ΔI_{cbo} della I_{cbo}, ossia:

$$\boxed{S_T = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_{cbo}}.} \qquad (1b)$$

Tale rapporto deve tendere al più piccolo valore possibile. Se S_T assume il *valore uno*, significa che l'aumento della I_{cbo} si riduce ad un pari aumento della corrente di collettore I_C senza pericolosi effetti amplificatòri, e il sistema transistor è stabile termicamente.

Richiami

Correnti di polarizzazione in un transistor BJT.

Attraverso la giunzione base-collettore, a causa della polarizzazione inversa, come già noto, circola una corrente inversa di saturazione I_{cbo}*, dovuta alla rottura dei legami covalenti per effetti termici.*

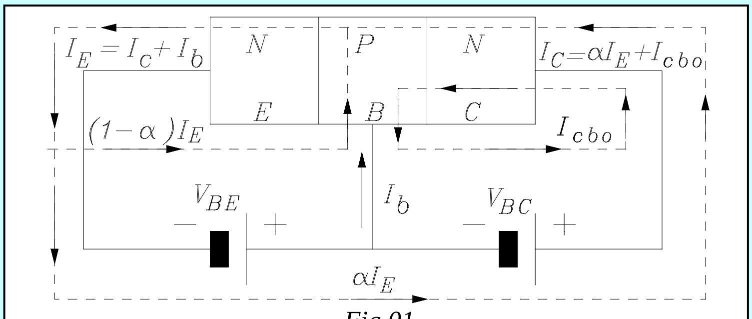


Fig.01

Questa corrente si somma alla corrente di collettore e si sottrae a quella di base, secondo l'espressione (si guardi la Fig.01):

$$I_C = \alpha \cdot I_E + I_{cbo}\,; \qquad I_B = (1-\alpha)\cdot I_E - I_{cbo}\,; \qquad (2)$$

con:

$$\alpha = \frac{I_C - I_{cbo}}{I_E} < 1\,.$$

Sapendo che: $I_E = I_C + I_B$*, con alcuni passaggi arriviamo alla:*

$$I_C = \frac{1}{1-\alpha}\cdot I_{cbo} + \frac{\alpha}{1-\alpha}\cdot I_B$$

Definiamo il parametro β *(coefficiente di amplificazione statico) come :*

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}\,;$$

da ciò si ottiene che: $\frac{1}{1-\alpha} = 1+\beta$*. (Infatti è:* $1+\beta = 1 + \frac{\alpha}{1-\alpha} = \frac{1-\alpha}{1-\alpha} + \frac{\alpha}{1-\alpha} = \frac{1}{1-\alpha}$*).*

Possiamo, quindi, scrivere:

$$I_C = (1+\beta)\cdot I_{cbo} + \beta \cdot I_B \qquad (3)$$

Le (2) e la (3) sono le equazioni fondamentali per la definizione dei parametri di stabilità termica.

----*----

Vediamo ora quale configurazione circuitale rende il transistor più stabile termicamente:

1) **Base comune**: In questa configurazione possiamo scrivere per la corrente di collettore: $I_C = \alpha \cdot I_E + I_{cbo}$ con $\alpha < 1$. Se differenziamo quest'espressione rispetto a I_{cbo}, otteniamo:

$$\frac{\Delta I_c}{\Delta I_{cbo}} = 1 \qquad (3a)$$

perciò per sua natura, ***la configurazione a base comune è, intrinsecamente stabile.***

2) **Emettitore comune:** In questa configurazione possiamo scrivere, per la (3) che la corrente di collettore è: $I_C = \beta \cdot I_B + (1+\beta)\cdot I_{cbo}$ con $\beta >> 1$. Se differenziamo quest'espressione rispetto a I_{cbo} otteniamo:

$$\frac{\Delta I_C}{\Delta I_{cbo}} = (1+\beta) \qquad (3b)$$

Questo risultato ci porta a dedurre che ***la configurazione ad emettitore comune è molto instabile*** termicamente perché β ha un valore molto grande. Purtroppo questa è proprio la configurazione più usata nei sistemi di amplificazione, per la sua alta funzionalità.

Chiariamo meglio con un esempio i concetti su esposti. *Partiamo dal valore standard di 25°C di temperatura ambiente e immaginiamo di avere un transistor al Germanio (più sensibile alla temperatura a confronto con il Silicio, quindi con fenomeni più appariscenti) nella configurazione ad emettitore comune, con una corrente inversa:* $I_{cbo} = 5\mu A$ *(a 25°C). Supponiamo che nel punto di lavoro prestabilito, il transistor abbia una corrente di base* $I_B = 75\mu A$ *e un coefficiente di amplificazione statico* $\beta = 50$*. In queste condizioni, dalla (3b) otteniamo un coefficiente di stabilità:* $S_T = 51$.

Vogliamo sapere quanto sarà la corrente di collettore se la giunzione raggiunge la temperatura di 85°C.
Alla temperatura standard di 25°C abbiamo:

$$I_C = \beta \cdot I_B + (1+\beta) \cdot I_{cbo} = 50 \cdot 75 \cdot 10^{-6} + 51 \cdot 5 \cdot 10^{-6} = 4mA\,.$$

La variazione di temperatura richiesta è data da: $\Delta T = 85 - 25 = 60°C$. *Sostituiamo questi valori nella (1) ed otteniamo:*

$$I_{cbo} = 5 \cdot 10^{-6} \cdot 2^{\frac{60}{10}} = 5 \cdot 10^{-6} \cdot 64 = 320\mu A$$

In base alla (3) la corrente di collettore a 85°C sarà:

$$I_C = 50 \cdot 75 \cdot 10^{-6} + 51 \cdot 320 \cdot 10^{-6} = 20mA$$

con un incremento assoluto di $\Delta I_C = 20 - 4 = 16mA$, *che corrisponde a un aumento percentuale di* $16/4 \cdot 100$ *ossia del 400%. In queste condizioni il transistor ha poca vita e morirà bruciato.*

Imponiamogli adesso un aumento massimo del 25% della corrente di collettore, attraverso un buon circuito di stabilizzazione termica (ancora da definire). In queste condizioni la corrente di collettore I_C *passerà da 4mA a* $4 + 25/100 \cdot 4 = 5mA$, *cioè avrà una variazione* ΔI_C *di un solo milliampere. In queste condizioni il coefficiente di stabilità* S_T *passerà da 51 a:*

$$S_T = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_{cbo}} = \frac{(5-4) \cdot 10^{-3}}{(320-5) \cdot 10^{-6}} = 3{,}2$$

che è un valore molto buono, che si avvicina sufficientemente all'unità e che produce un notevole miglioramento della stabilità termica.

Il problema, ora, sarà trovare i circuiti adatti allo scopo e tra essi quale circuito elettrico si presterà più di altri a migliorare la stabilità termica del semiconduttore BJT.

03). CIRCUITI DI STABILIZZAZIONE TERMICA

Un transistore, per funzionare, deve essere polarizzato, ossia deve avere un punto di lavoro in cui sono ben definiti i parametri elettrici. Ma è ancor più importante che questi parametri debbano rimanere *sufficientemente stabili* al variare delle condizioni ambientali, e, in particolare, al variare della temperatura.

Perciò il calcolo dei circuiti esterni di servizio al transistor deve soddisfare due essenziali condizioni: **polarizzare il componente e contemporaneamente stabilizzare termicamente la polarizzazione.**

Sono molti i circuiti di polarizzazione che possono essere usati. Vediamo qui i due più importanti ed analizziamo i loro pregi e i loro difetti.

1) Circuito di stabilizzazione mediante R_b

La Fig.02a riporta un comune circuito di polarizzazione in cui la corrente di base è fornita dall'alimentazione V_{CC} tramite la resistenza R_b.La corrente di polarizzazione di base I_b è data dalla legge di Ohm:

$$I_b = \frac{V_{CC} - V_{be}}{R_b} \tag{4a}$$

Questo circuito non produce, però, alcun controllo sulla stabilizzazione termica.

Modifichiamolo come in Fig.02b, staccando la resistenza di base R_b dall'alimentazione e collegandola direttamente al collettore del transistor. Controlliamo se il nuovo schema realizza *un circuito di stabilizzazione termica*, oltre che di polarizzazione.

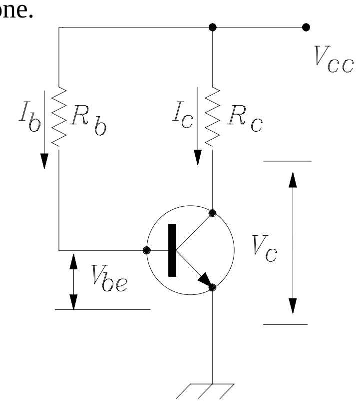


Fig. 02a

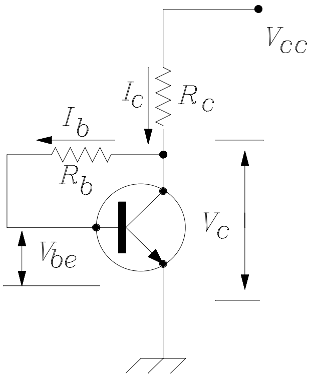


Fig.02b

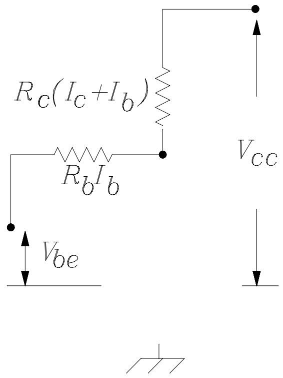


Fig.02c

La (4a) diventa:

$$I_b = \frac{V_C - V_{be}}{R_b}; \qquad (4)$$

Nella (4) compare la tensione di collettore V_C e non quella di alimentazione V_{CC} (che ovviamente è da considerarsi a valore costante). Dall'espressione (4) possiamo qualitativamente dedurre che se aumenta la I_C, aumenta anche la caduta di tensione su R_C a scapito di V_C. Una diminuzione di V_C, per la (4), porta ad una diminuzione di I_b, e ad una diminuzione della I_C per il legame diretto con I_b, e viceversa. ***Possiamo concludere che il circuito tende a non far variare la*** I_C***, realizzando di fatto una stabilizzazione del punto di lavoro.***

Cerchiamo di quantificare questo effetto stabilizzante. Ebbene, quantitativamente possiamo dire che il coefficiente di stabilità S_T relativo al circuito di Fig.02b è dato dalla:

$$\boxed{S \cong \frac{R_b}{R_C} + 1} \qquad (5)$$

che è una formula di progetto.

----*----

Approfondimento matematico

Dimostriamo quant'è il coefficiente di stabilità S_T del circuito di Fig.02b, giustificando quindi la (5). Dal circuito semplificato di Fig.02c si vede che:

$$V_{CC} = R_C(I_C + I_b) + R_b I_b + V_{be} \;,$$

ossia, raccogliendo secondo le correnti:

$$V_{CC} = V_{be} + (R_b + R_C)I_b + R_C I_C \,.$$

Ricordiamo dalla (3) che: $I_C = (1+\beta)\cdot I_{cbo} + \beta \cdot I_B$; da questa ricaviamo l'espressione di I_b:

$$I_b = \frac{I_C - (1+\beta)\cdot I_{cbo}}{\beta}$$

e la sostituiamo nella precedente. Otteniamo:

$$V_{CC} = V_{be} + R_C I_C + (R_b + R_C)\cdot\frac{I_C - (1+\beta)I_{cbo}}{\beta}$$

Sviluppando e trasformando in successione si giunge a:

$$V_{CC} = V_{be} + I_C\left(R_C + \frac{1+\beta}{\beta} + \frac{R_b}{\beta}\right) - (R_b + R_C)\frac{1+\beta}{\beta} I_{cbo}$$

Senza notevoli errori, per essere $\beta >> 1$, possiamo porre:

$$\frac{1+\beta}{\beta} \cong 1$$

Con qualche altro passaggio giungiamo alla definizione della corrente di collettore:

$$I_C = \frac{V_{CC} + V_{be} + (R_b + R_C)I_{cbo}}{R_C + \frac{R_b}{\beta}} = \frac{V_{CC} - V_{be}}{R_C + \frac{R_b}{\beta}} + \frac{R_b + R_C}{R_C + \frac{R_b}{\beta}} I_{cbo}\,.$$

Deriviamo, ora, la I_C rispetto alla I_{cbo}. Si ottiene:

$$S_T = \frac{dI_C}{dI_{cbo}} = \frac{R_b + R_C}{R_C + \frac{R_b}{\beta}} \cong \frac{R_b + R_C}{R_C}\,,$$

poiché possiamo ritenere $\frac{R_b}{\beta}$ trascurabile.

E' così dimostrata la (5): $S \cong \frac{R_b}{R_C} + 1$

----*----

Nella pratica progettuale, con questo circuito, si ottengono valori di S_T troppo elevati (spesso al di sopra di 20) perché la R_b non può essere ridotta quanto si vuole, in quanto essa è praticamente predeterminata, essendo l'unica resistenza di polarizzazione del circuito di base. La R_C, d'altronde, non può essere aumentata quanto si vuole, perché è legata alla tensione di alimentazione. Quindi il circuito di Fig.02b non è molto buono ma è semplice e con pochi componenti circuitali. Esso viene usato solo nei casi in cui non si prevedono grandi escursioni termiche.

2) Circuito di stabilizzazione mediante R_E.

E' il caso più interessante perché da esso deriva il sistema di stabilizzazione che viene comunemente adoperato nella polarizzazione di un transistor. Qualitativamente possiamo dire che a ogni aumento della corrente di collettore I_C, per esempio dovuta all'aumento della temperatura, si verifica un aumento della tensione V_E su R_E. (Fig.03) che fa diminuire la V_{be}, di conseguenza anche la I_b e quindi fa diminuire anche la I_C. Cioè il circuito si comporta, anch'esso, come stabilizzatore del punto di lavoro. Quantitativamente abbiamo la seguente relazione che definisce il coefficiente di stabilità del circuito:

$$\boxed{S = \frac{R_b}{R_E} + 1} \tag{6}$$

Questa relazione è importantissima perché è una formula di progetto, che viene *sempre* applicata nel calcolo della polarizzazione.

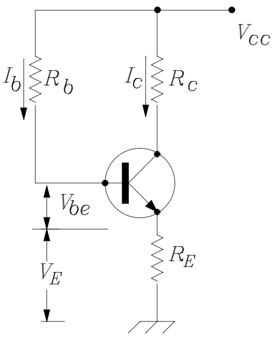


Fig.03

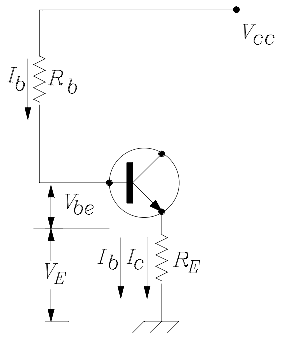


Fig.03a

Approfondimento matematico

Giustifichiamo la (6). In presenza delle Fig.03 e Fig.03a possiamo scrivere:

$$V_{CC} = R_b I_b + V_{be} + V_E = R_b I_b + V_{be} + R_E \cdot (I_C + I_b) = R_E I_C + V_{be} + (R_E + R_b) \cdot I_b$$

Ricordiamo dalla (3) che: $I_C = (1+\beta)\cdot I_{cbo} + \beta \cdot I_B$. Da quest'espressione ricaviamo la I_b:

$$I_b = \frac{I_C - (1+\beta)\cdot I_{cbo}}{\beta}$$

che sostituiamo nella precedente ed otteniamo:

$$V_{CC} = (R_b + R_E)\cdot \frac{I_C - (1+\beta)\cdot I_{cbo}}{\beta} + V_{be} + R_E I_C$$

Attraverso alcuni passaggi si giunge a:

$$V_{CC} = \left(\frac{R_b}{\beta} + \frac{1+\beta}{\beta} R_E\right) I_C - (R_b + R_E)\frac{1+\beta}{\beta} I_{cbo} + V_{be}$$

Senza notevoli errori possiamo porre:

$$\frac{1+\beta}{\beta} \cong 1$$

per cui:

$$V_{CC} = \left(\frac{R_b}{\beta} + R_E\right) I_C - (R_b + R_E) I_{cbo} + V_{be}$$

Si può allora ricavare la I_C:

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{be}}{\dfrac{R_b}{\beta} + R_E} + \frac{R_b + R_E}{\dfrac{R_b}{\beta} + R_E} I_{cbo}.$$

Deriviamo rispetto a I_{cbo} ed otteniamo finalmente:

$$S_T = \frac{dI_C}{dI_{cbo}} = \frac{R_b + R_E}{\dfrac{R_b}{\beta} + R_E}$$

Se teniamo conto che $\frac{R_b}{\beta} << R_E$, ritroviamo la (6).

Anche con questo circuito di stabilizzazione otteniamo valori di S_T molto alti, **(anche peggiori del caso precedente!)** perché la R_b non può essere diminuita molto in quanto è legata alla polarizzazione e la R_E non può essere aumentata a scapito della R_C, con la conseguenza di ridurre l'amplificazione (che è proporzionale a R_C) a valori inaccettabili.

Ma questo circuito può essere migliorato, come vedremo adesso.

04). LA POLARIZZAZIONE E LA STABILIZZAZIONE TERMICA

Se usiamo il sistema di polarizzazione a partitore di base con le due resistenze R_1 e R_2 come in Fig.04, allora il valore di R_b (Fig.04a) deriva non solo dal loro parallelo ma dipende notevolmente anche dalla bassa tensione di partizione V_{bb} (Teorema di Thevenin). Quindi il **valore di R_b dell'espressione (6) può essere teoricamente ridotto quanto si vuole** facendo di conseguenza tendere S_T all'unità con un miglioramento notevole della stabilità termica.

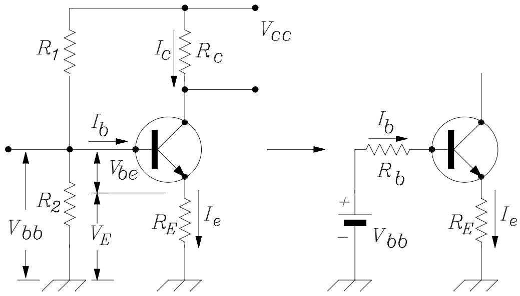


Fig.04 Fig.04a

E' questo in fondo il metodo che viene quasi sempre adoperato per la determinazione del punto di lavoro del transistor**.** ***Nella Fig.04 è riportato il circuito di polarizzazione ormai comunemente utilizzato.*** La corrente di base I_b proviene dal partitore di tensione, formato dalle due resistenze R_1 e R_2, e alimentato dalla tensione V_{CC}. Nel nodo formato da R_1 ed R_2 è presente la tensione di partizione V_{bb}, che si ricava dalla nota legge del partitore:

$$V_{bb} = V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \tag{7}$$

La resistenza interna R_b del generatore V_{bb} è calcolata applicando il teorema di Thevenin. Essa scaturisce dal parallelo delle due resistenze R_1 e R_2:

$$R_b = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \tag{8}$$

Dalle espressioni (7) e (8) si deduce che, se V_{bb} è piccola, possiamo dare anche a R_b un valore decisamente piccolo, migliorando così, il valore della (6) e facendo tendere S_T ad un numero molto prossimo al valore limite "1".

05). ESEMPIO DI POLARIZZAZIONE E STABILIZZAZIONE

Applichiamo i concetti su esposti e vediamo, ora, com'è possibile polarizzare un BJT con una buona stabilizzazione termica. Nei casi più comuni e meno impegnativi termicamente, si considera un valore accettabile di S_T intorno a $3 \div 5$. Ma questo valore di S_T, per esempio, è troppo grande quando vogliamo progettare circuiti sottoposti a grande escursione termica. Si pensi in che condizioni gravose si trova un'autoradio quando sta funzionando dentro un cruscotto nero sotto il sole estivo, magari con l'auto lasciata in sosta, con i finestrini chiusi! In questo caso S_T non può superare il valore 2. Abbassare molto S_T, però, significa ridurre notevolmente i valori di R_1 e R_2, e ciò comporta una forte corrente nel partitore e quindi un forte consumo energetico dovuto ai vari circuiti di partizione. Questa è purtroppo la contropartita (per questo motivo un'autoradio consuma molto).

I valori che di solito vengono fissati nella fase iniziale di calcolo sono:

La tensione di alimentazione V_{CC},
La differenza di potenziale ai capi del transistor V_{CE},
La corrente di collettore I_C,
Il coefficiente di amplificazione h_{FE},
Il coefficiente di stabilizzazione termica S

Procediamo. Se si sostituisce la (8) nella (7) e si risolve rispetto a R_1 si ottiene un'espressione molto comoda:

$$R_1 = R_b \cdot \frac{V_{CC}}{V_{bb}}, \tag{9}$$

che viene usata per il calcolo immediato di R_1, dopo aver determinato R_b e V_{bb} (V_{CC} di norma è conosciuto).
Vi sono ancora alcune incognite che ci impediscono di individuare il punto di lavoro del BJT. Risolviamole man mano.

Possiamo trovare facilmente il valore di I_b :

$$I_b = \frac{I_C}{h_{FE}} \tag{10}$$

L'esperienza di progettazione consolidata ci indica inoltre che si può accettare una perdita di tensione su R_E intorno al 10% della tensione di alimentazione:

$$V_E = R_E \cdot I_E \approx 0{,}1 \cdot V_{CC}.$$

Si può anche affermare che, poiché I_b è trascurabile rispetto a I_E, è anche $I_E \cong I_C$, quindi arriviamo alla:

$$V_E = R_E \cdot I_C \approx 0{,}1 \cdot V_{CC} \tag{11}$$

Dalla (11) si ricava il valore della resistenza di emettitore R_E.
Tramite la (6), che riportiamo per comodità

$$S = \frac{R_b}{R_E} + 1$$

si può, ora, trovare il valore di R_b:

$$R_b = R_E \cdot (S - 1) \tag{12}$$

Dobbiamo determinare la V_{bb}. Ricordiamo, a questo punto, che la tensione di barriera sulla giunzione è valutabile intorno a $0{,}6V$ per il Silicio e intorno a $0{,}2V$ per il Germanio.
Nel nostro caso, ammettendo di utilizzare un BJT al Silicio, possiamo porre: $V_{BE} \cong 0{,}6V$. Guardando la maglia d'ingresso in Fig.04a, possiamo ricavare V_{bb} dalla relazione:

$$V_{bb} = V_E + V_{BE} + R_b \cdot I_b \tag{13}$$

dove tutti i parametri sono ormai noti.

Infine dalla (9) calcoliamo il valore di R_1 e dalla (8) il valore di R_2 tramite la:

$$R_2 = \frac{R_1 \cdot R_b}{R_1 - R_b} \tag{14}$$

Tutte le formule, dalla (6) alla (14), sono necessarie per calcolare correttamente la polarizzazione di un transistor BJT.

Facciamo un esercizio di calcolo:

Questo esercizio può essere considerato un esempio standard di calcolo di una polarizzazione con stabilizzazione termica.

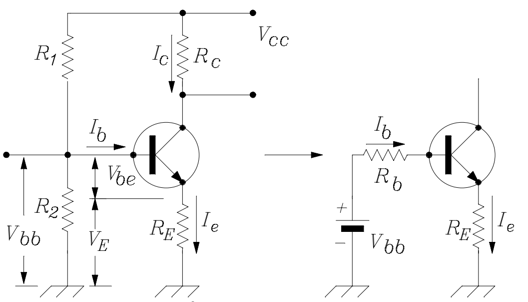


Fig.04

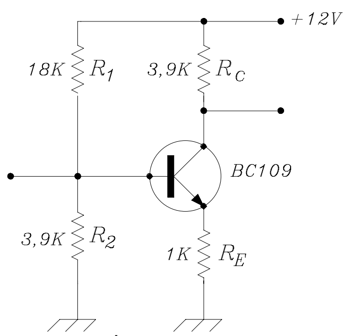


Fig.05

Un transistor **BC109** è utilizzato in un amplificatore monostadio come quello di Fig.04, che qui riportiamo. La tensione di alimentazione V_{CC} è di $12V$. Il punto di lavoro è stato scelto, sul manuale applicativo del BC109, intorno a questi valori: $V_{CE} = 5V$; $V_{Re} = 1{,}5V$; $I_C = 1{,}5mA$; $S = 4$; Nel punto di lavoro scelto leggiamo, dai fogli tecnici, che i parametri "h" hanno circa i seguenti valori;

$$h_{fe} = 220\ ; \qquad h_{ie} = 4{,}5 \cdot 10^3 \Omega\ ; \qquad h_{oe} = 30 \mu \Omega^{-1}\ .$$

Di questi parametri, per ora, ci interessa solo h_{FE}. La V_{BE} s'intende fissata a **0,6V**
Vogliamo trovare il valore di tutti i componenti resistivi che permettono al transistor di funzionare sul punto di lavoro assegnato.
Procediamo nel calcolo nella giusta sequenza, applicando le espressioni dalla (6) alla (14):

$$I_b = \frac{I_C}{h_{FE}} = \frac{1{,}5 \cdot 10^{-3}}{220} = 7 \cdot 10^{-6} = 7 \mu A$$

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE} - V_{Re}}{I_C} = 3{,}6 \cdot 10^3 \to 3{,}9 K\Omega$$

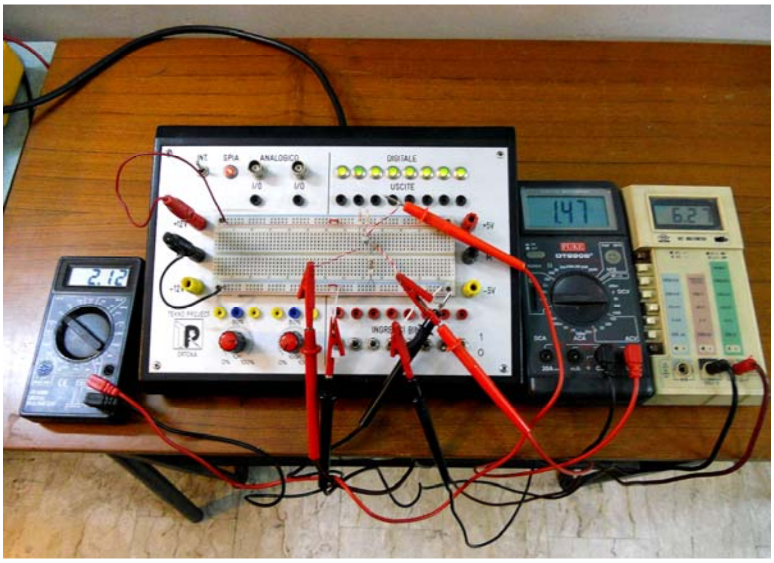
$$R_E = \frac{V_{Re}}{I_C} = 1 \cdot 10^3 \to 1 K\Omega$$

$$R_b = R_E \cdot (S-1) = 3 \cdot 10^3 \Omega$$

$$V_{bb} = R_b \cdot I_b + V_{BE} + V_{Re} = 3 \cdot 10^3 \cdot 7 \cdot 10^{-6} + 0{,}6 + 1{,}5 = 2{,}21 V$$

$$R_1 = \frac{V_{CC}}{V_{bb}} \cdot R_b = \frac{12}{2{,}21} \cdot 3 \cdot 10^3 = 16.98 \cdot 10^3 \to 18 K\Omega$$

$$R_2 = \frac{R_1 \cdot R_b}{R_1 - R_b} = \frac{18 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^3}{(18-3) \cdot 10^3} = 3{,}6 \cdot 10^3 \to 3{,}9 K\Omega$$



Abbiamo così determinato tutti i valori delle componenti resistive. Il circuito è pronto a funzionare nel punto di lavoro assegnato (Fig.05).

Al collaudo il circuito ha fornito i seguenti risultati:

$$V_{RE} = 1{,}47V\ ; \quad V_{CE} = 6{,}27V\ ;$$

$$V_{bb} = 2{,}12V\ ;$$

da cui:

$$V_{BE} = V_{bb} - V_{RE} = 2{,}12 - 1{,}47 = 0{,}65V$$

Considerando la grande variabilità del parametro h_{FE} tra transistor e transistor, tenendo conto della tolleranza e dell'approssimazione delle resistenze adoperate, i valori pratici letti possono essere bene accettati.

Maggio 2012

Nicola del Ciotto