

Transistor bipolare a giunzione (BJT)

Funzionamento

BJT significa transistor bipolare a giunzione. Esso è un dispositivo a semiconduttore in cui si alternano tre regioni drogate ed ha tre terminali, uno per ciascuna regione drogata; i tre terminali vengono chiamati rispettivamente emettitore, base e collettore.

La regione centrale ha drogaggio opposto rispetto alle due regioni esterne; il BJT esiste in due versioni NPN e PNP. (Fig.1)

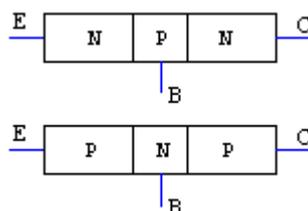


Fig.1

Una delle due regioni esterne, quella di emettitore, è più drogata rispetto all'altra, quella di collettore; nel BJT, perciò, il terminale di emettitore e quello di collettore non sono intercambiabili. La regione di base è stretta e poco drogata.

I simboli elettrici del BJT sono riportati in Fig. 2; il terminale con la freccia è sempre l'emettitore, anzi il verso della freccia contraddistingue l'unico verso in cui può scorrere la corrente di emettitore.

Per essere chiari:

- nel BJT NPN la corrente di base e quella di collettore entrano nel dispositivo, mentre quella di emettitore è uscente;
- nel PNP la corrente di emettitore è entrante mentre le altre due sono uscenti.

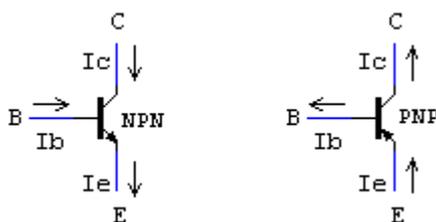


Fig.2

Un solo BJT non è capace di far invertire la corrente in un carico posto sull'emettitore o sul collettore; per ottenere questo scopo bisogna utilizzare una coppia di BJT, uno NPN ed uno PNP opportunamente connessi, che funzionano in controfase o in push-pull. (Questo è uno dei motivi per cui vengono realizzati entrambi i tipi di BJT)

La rete esterna, detta rete di polarizzazione, deve consentire alle correnti del BJT di scorrere nel verso corretto; per questo motivo, nel BJT NPN, l'emettitore va posto verso il potenziale più basso; nel PNP, invece, è il collettore che va posto verso il potenziale più basso.

Le tre correnti del BJT devono soddisfare il primo principio di Kirchoff; pertanto, sia nel BJT NPN che nel PNP vale la relazione:

$$I_e = I_b + I_c$$

Il BJT ha tre modi o regioni di funzionamento a secondo che soltanto una delle due giunzioni sia polarizzata direttamente in modo sufficiente a farla condurre, oppure conducano entrambe, oppure non conduca nessuna delle due.

L'interdizione

Il BJT è interdetto quando nessuna delle due giunzioni è in grado di condurre, o perchè è polarizzata inversamente o perchè è polarizzata direttamente in modo insufficiente o perchè è cortocircuitata.

In Fig.3 il BJT è interdetto perchè nessuna delle due giunzioni conduce; infatti la giunzione

base emettitore ha una polarizzazione diretta di soli 0.2V, insufficiente a farla condurre e, perciò, la corrente di base è piccolissima. La giunzione base-collettore ha una polarizzazione inversa di $V_b - V_c = V_{bb} - V_{cc} = -0.1V$ e non conduce nemmeno.

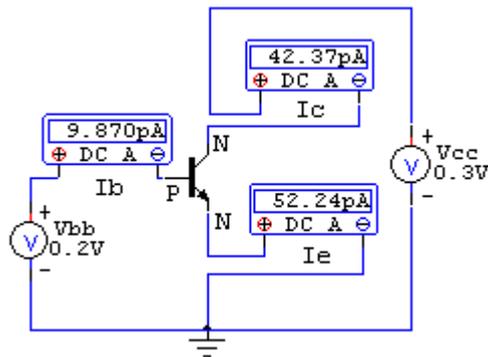


Fig.3

Assumendo, per comodità, il terminale di emettitore come riferimento ($V_E=0$), un BJT NPN è interdetto se $V_b < 0.5V$ in modo che sia $V_{be} < 0.5V$ e la giunzione base emettitore non conduca. e contemporaneamente, $V_c > 0$; in questo modo $V_{bc} < 0.5V$ e neanche la giunzione base-emettitore conduce.

In generale, **il transistor NPN è interdetto quando $V_{be} < 0.5V$ e $V_{ce} > 0$** . In queste condizioni, le tre correnti del dispositivo sono praticamente nulle. Analogamente **il PNP è interdetto quando $V_{eb} < 0.5V$ e $V_{ec} > 0$** .

La regione attiva

Il BJT funziona in modo normale, o in regione attiva, quando la giunzione base emettitore è polarizzata direttamente, in modo sufficiente a farla condurre, e la giunzione base collettore è polarizzata inversamente oppure è polarizzata direttamente in modo insufficiente. In Fig.4 la giunzione base-emettitore ha una polarizzazione diretta di 0.68V. La giunzione base-collettore ha una polarizzazione inversa di $V_b - V_c = V_{bb} - V_{cc} = 0.68 - 5 = 4.32V$

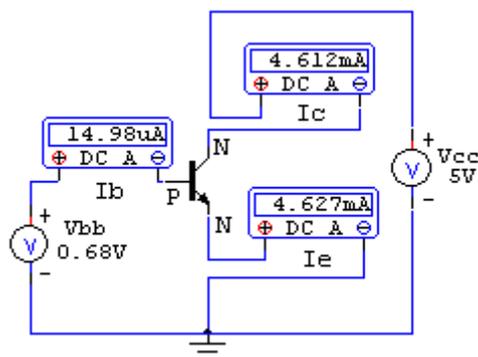


Fig.4

Come possiamo vedere, in regione attiva la corrente di collettore è poco meno di quella di emettitore; mentre quella di base è molto piccola (qualche centesimo della corrente di collettore I_c , nei BJT di piccola potenza). In sostanza, quando il BJT funziona normalmente, abbiamo $I_c \cong I_e$ e $I_b \ll I_c$.

In generale, affinché il BJT operi in regione attiva è necessario che sia $V_{be} \cong 0.7V$ in modo che la giunzione base emettitore sia in conduzione; invece deve essere $V_{bc} < 0.5V$ perchè la giunzione base collettore non deve condurre; perchè ciò accada basta che sia $V_{ce} > 0.2V$ per garantire che la giunzione base collettore sia polarizzata direttamente in modo insufficiente oppure inversamente. In definitiva, **un BJT NPN opera in regione attiva quando $V_{be} \cong 0.7V$ e $V_{ce} > 0.2V$**

Il transistor PNP, invece, funziona in zona attiva quando abbiamo $V_{eb} \cong 0.7V$ e $V_{ec} > 0.2V$.

La saturazione

Il BJT funziona in saturazione quando entrambe le giunzioni sono polarizzate direttamente in modo sufficiente a farle condurre.

Nell'esempio riportato in Fig.5 la giunzione base emettitore è polarizzata direttamente perchè $V_{be}=0.7V$. Anche la giunzione base-collettore è polarizzata direttamente; infatti $V_{bc}=V_{bb}-V_{cc} = 0.7V-0.01V = +0.69V$.

Il BJT è, quindi, saturo; notiamo che I_c è sensibilmente minore di I_e e, di conseguenza, I_b non è più trascurabile.

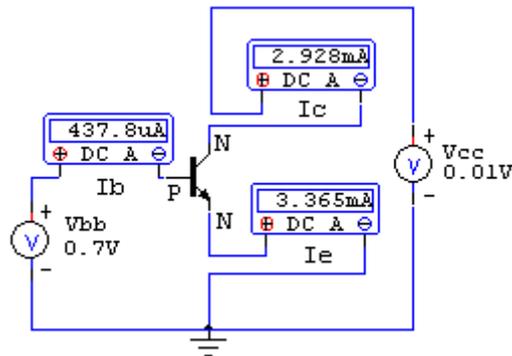


Fig.5

Che il BJT sia saturo oppure no, lo possiamo vedere osservando, al solito, il valore di V_{be} e V_{ce} ; infatti, perchè il BJT NPN saturo è necessario che sia $V_{be}\approx 0.7V$, in modo che la giunzione base emettitore sia in conduzione, e $V_{bc} > 0.5V$ affinchè anche la giunzione C-B possa condurre. Perchè questa ultima condizione si verifichi, basta che sia $V_{ce} < 0.2V$. In conclusione, **in un BJT NPN saturo abbiamo $V_{be}\approx 0.7V$ e $V_{ce} < 0.2V$**

In modo analogo, il BJT PNP è saturo se $V_{eb}\approx 0.7V$ e $V_{ec} < 0.2V$.

Le correnti nel BJT

Abbiamo visto che, regione attiva, la corrente I_b è trascurabile rispetto alla corrente di collettore I_c e a quella di emettitore I_e ; malgrado ciò essa gioca un ruolo fondamentale nel funzionamento del BJT; infatti, **in zona attiva**, la corrente di collettore I_c cresce proporzionalmente alla corrente di base I_b , in accordo alla relazione $I_c = h_{FE} \cdot I_b$. Il parametro h_{FE} si chiama guadagno statico di corrente; esso è un numero puro, è di valore rilevante e può variare sensibilmente da un BJT all'altro. Orientativamente, il guadagno statico h_{FE} è compreso:

- tra 100 e 300 nei BJT di piccola potenza
- tra 20 e 100 nei BJT di potenza

La relazione $I_c = h_{FE} \cdot I_b$ e l'elevato valore del guadagno h_{FE} ci confermano che, in regione attiva, si ha $I_c \gg I_b$; ci dicono anche che una piccola variazione di I_b provoca una rilevante variazione di I_c ; infatti, essendo $\Delta I_c = h_{FE} \cdot \Delta I_b$ ed essendo h_{FE} elevato, risulta $\Delta I_c \gg \Delta I_b$.

Si usa dire, perciò, che il BJT è un dispositivo pilotato in corrente o che è un amplificatore di corrente.

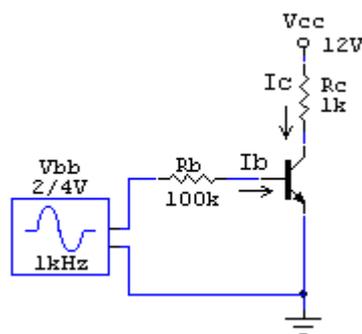


Fig.6

Ma vediamo un esempio che chiarisce meglio la situazione. In Fig.6 il generatore V_{bb} fornisce una tensione che varia sinusoidalmente tra 2V e 4V; di conseguenza, la corrente di base varia anch'essa sinusoidalmente e subisce una variazione picco-picco di circa 20 μA (Fig. 7).

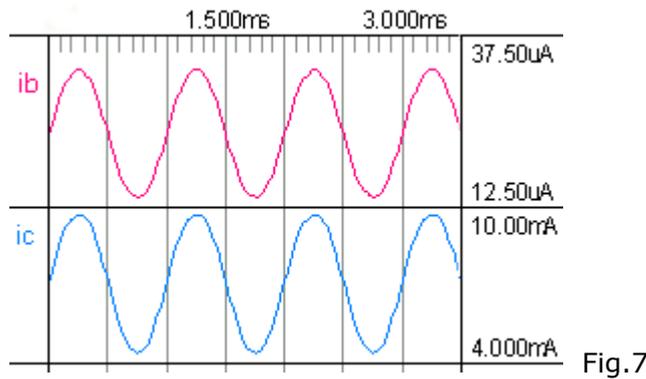


Fig.7

La variazione di I_b fa variare I_c allo stesso modo e la variazione picco-picco subito da I_c è circa 6mA. In sostanza una variazione di I_b di soli 20 μA provoca la variazione di I_c di 6mA, cioè 300 volte più grande!

Abbiamo visto che, aumentando la corrente di pilotaggio I_b , la corrente di collettore I_c cresce proporzionalmente. Ma, sino a che valore può crescere la corrente I_c ?

Non possono esserci dubbi in merito alla risposta: la corrente I_c può crescere sino al massimo valore consentito dalla rete esterna; in Fig.8 il massimo valore che I_c può assumere è

$$\frac{V_{cc}}{R_c} = \frac{12V}{600\Omega} = 20mA;$$

questa è la corrente fornita da V_{cc} quando la tensione V_{ce} , localizzata tra collettore ed emettitore è nulla; cioè quando il BJT è saturo.

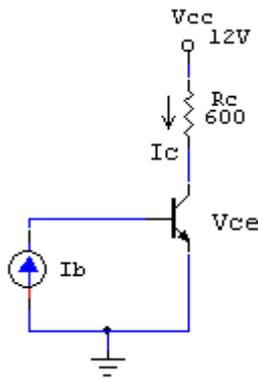


Fig.8

In Fig.9 è riportata la curva che descrive l'andamento di I_c al variare di I_b , nel circuito di Fig.8; la curva è stata ottenuta facendo variare I_b da 0 a 100 μA .

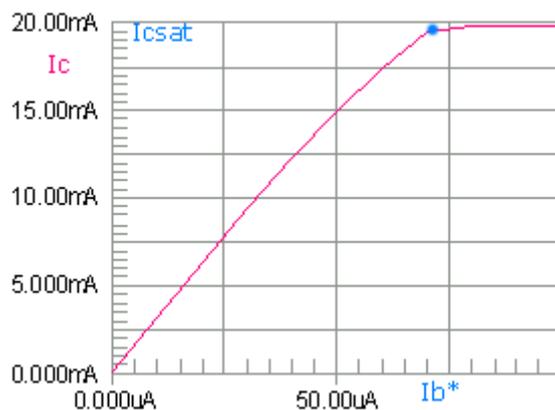


Fig.9

Come possiamo vedere, all'aumentare di I_b , la corrente I_c cresce proporzionalmente sino al massimo valore consentito dalla rete e cioè $I_{csat} = 20mA$; contestualmente $V_{ce} = V_{cc} - R_c \cdot I_c$ va diminuendo quasi sino a zero e il BJT si va avvicinando alla saturazione. Osserviamo che la pendenza della curva è costante per valori di I_c compresi tra zero e 20mA.

Ciò significa che il parametro h_{FE} rimane costante ; questo è vero però solo per bassi valori di I_c ;infatti, per valori elevati di I_c , il guadagno statico h_{FE} comincia a diminuire.

Il diagramma I_c/I_b di Fig.9, detto anche caratteristica di trasferimento del BJT, ci suggerisce che, per rendersi conto della regione di funzionamento del BJT, basta osservare il valore della corrente di base I_b ; e infatti:

- per $I_b=0$ anche $I_c=0$ e il BJT è interdetto
- quando $0 < I_b < I_b^*$ il BJT è in regione attiva e la corrente di collettore cresce proporzionalmente alla corrente di base , secondo la relazione $I_c = h_{FE} \cdot I_b$. Quando il BJT deve funzionare da amplificatore esso viene fatto funzionare proprio in regione attiva.
- per $I_b > I_b^*$ il BJT è saturo per cui $I_c \cong I_{csat}$ e $V_{ce} \cong 0$ e la corrente di collettore rimane costante anche quando I_b continua ad aumentare. In questa situazione non è più lecito ritenere I_b trascurabile rispetto a I_c ; anzi la corrente di base potrebbe crescere a tal punto da diventare paragonabile a quella di collettore.

La corrente I_b^* segna il confine tra la regione attiva e la saturazione del BJT; essa si calcola tenendo presente che , quando $I_b=I_b^*$, la corrente di collettore è $I_c=I_{csat}$; e allora, dalla relazione $I_c = h_{FE} \cdot I_b$, ricaviamo il massimo valore della corrente di base I_b per cui il BJT è

ancora in zona attiva; tale valore è $I_b^* = \frac{I_{csat}}{h_{FE}}$

Approfondimenti

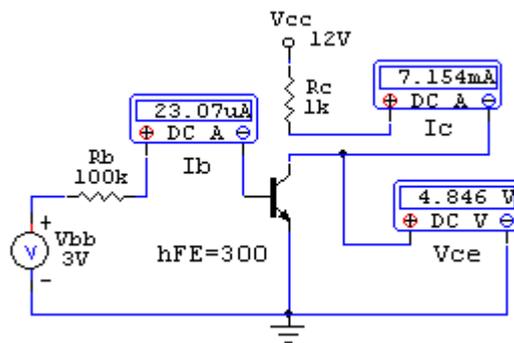


Fig.10

Nel circuito di Fig.10 il massimo valore che può assumere I_c è $I_{csat} = \frac{V_{cc}}{R_c} = \frac{12V}{1k\Omega} = 12mA$. La giunzione base emettitore è polarizzata direttamente e, perciò, la tensione ai suoi capi è $V_{be} \cong 0.7V$.

Il valore di I_b che segna il confine tra la zona attiva e la saturazione è

$$I_b^* = \frac{I_{csat}}{h_{FE}} = \frac{12mA}{300} = 40\mu A$$

Il generatore di tensione continua V_{bb} fornisce al BJT la corrente di base

$$I_b = \frac{V_{bb} - V_{be}}{R_b} = \frac{3V - 0.7V}{100k\Omega} = 23\mu A$$

Il BJT è, allora, in zona attiva dato che $I_b < I_b^*$; perciò:

$$I_c = h_{FE} \cdot I_b = 300 \cdot 23\mu A = 6.9mA$$

e:

$$V_{ce} = V_{cc} - R_c \cdot I_c = 5.1V$$

La simulazione conferma le nostre previsioni. La leggera differenza tra i valori previsti di I_c e V_{ce} e quelli effettivamente ottenuti è dovuta al fatto che il valore $h_{FE}=300$ è solo indicativo.

Nel circuito di Fig.11, le correnti I_{csat} e I_b^* restano invariate perchè V_{cc} e R_c mantengono lo stesso valore che hanno nel circuito di Fig.10; la resistenza R_b invece è più piccola ed allora I_b aumenta; infatti il valore di I_b è:

$$I_b = \frac{V_{bb} - V_{be}}{R_b} = \frac{3V - 0.7V}{39k\Omega} = 59\mu A.$$

Notiamo che $I_b > I_b^*$ ed allora il BJT è saturo. Di conseguenza $I_c = I_{csat} = 12mA$ e $V_{ce} = V_{cesat} \cong 0$.

La simulazione conferma in pieno le nostre aspettative; infatti I_c è poco meno di 12mA e V_{ce} è 120mV.

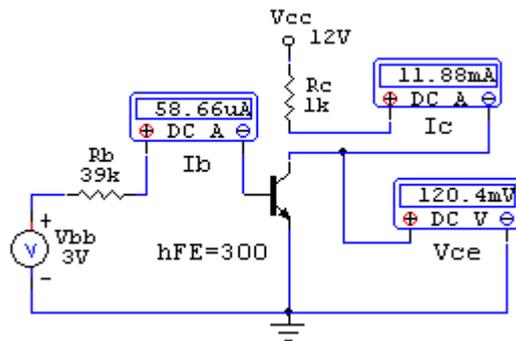


Fig.11

BJT come generatore di corrente

Nel circuito di Fig.12, fissando la corrente di base al valore

$$I_b = \frac{V_{bb} - V_{be}}{R_b} = \frac{4.5V - 0.7V}{220k\Omega} = 17.3\mu A,$$

anche la corrente di collettore I_c rimane fissata al valore $I_c = h_{FE} \cdot I_b$ indipendentemente dal valore di R_c ; almeno sino a quando il BJT si trova in regione attiva, cioè sino a quando è vero che $V_{ce} > 0.2V$.

Il BJT in funzionamento normale si comporta perciò da generatore di corrente nei confronti del carico sul collettore.

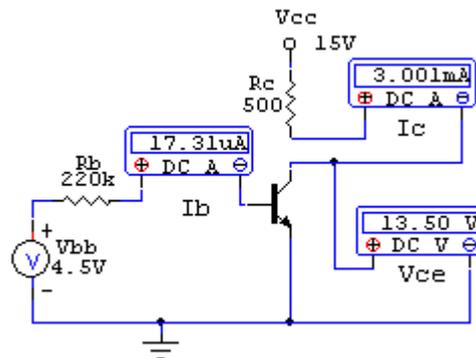


Fig.12

Poichè $V_{ce} = V_{cc} - R_c \cdot I_c$, il BJT è in zona attiva quando $V_{cc} - R_c \cdot I_c > 0.2V$, cioè quando

$$R_c < \frac{V_{cc} - 0.2V}{I_c}.$$

In sostanza, nel circuito di Fig.12, la corrente I_c rimane costante, idealmente, al variare di R_c sino a quando quest'ultima non aumenta a tal punto da ridurre la V_{ce} a zero, facendo saturare il transistor.

Nella simulazione di Fig.12, il dispositivo impiegato è il 2N3904 che ha un guadagno $h_{FE} \cong 173$ e, perciò, in regione attiva si ha $I_c = h_{FE} \cdot I_b \cong 3mA$

La corrente di collettore I_c rimane idealmente costante sino a quando $R_c < \frac{15 - 0.2V}{3mA}$ cioè per $R_c < 4.93k\Omega$;

Nella pratica il generatore di corrente ottenuto non è perfettamente ideale e I_c diminuisce un poco all'aumentare di R_c ; infatti, nelle Figg.12 e 13, quando il valore della resistenza R_c varia da 500Ω a $3k\Omega$, la corrente I_c diminuisce, ma soltanto del 7.8%.

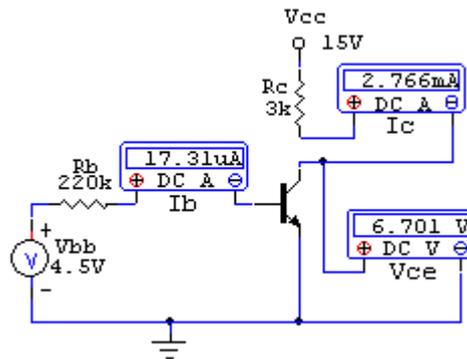


Fig.13

Invece, quando R_c oltrepassa il massimo valore consentito in zona attiva, cioè quando $R_c > 4.93k\Omega$, il BJT entra in saturazione. Allora la corrente I_c diminuisce sensibilmente

assumendo il valore $I_{csat} = \frac{V_{cc}}{R_c}$.

In Fig.14 per $R_c = 8k\Omega$ la corrente di collettore è decisamente minore rispetto al suo valore in zona attiva; infatti il tester evidenzia che $I_c = 1.854mA$, poco meno del valore previsto

$$\frac{V_{cc}}{R_c} = 1.875mA.$$

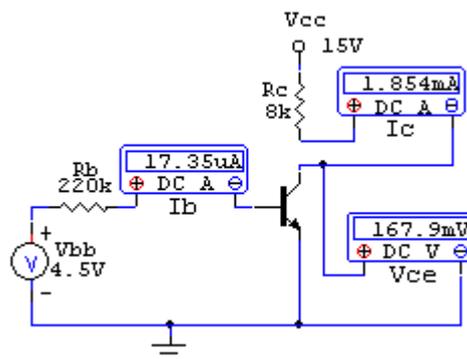


Fig.14

Nel BJT viene dissipata potenza sia nella giunzione base collettore, sia nella giunzione base emettitore; più precisamente, la giunzione C-B è attraversata dalla corrente I_c , avendo ai suoi capi la tensione V_{cb} ; essa dissipa perciò la potenza $P_{cb} = I_c \cdot V_{cb}$.

La giunzione base emettitore dissipa potenza perchè è attraversata dalla corrente di emettitore I_e , avendo ai suoi capi la tensione V_{be} ; essa dissipa la potenza $P_{be} = I_e \cdot V_{be} = (I_c + I_b) \cdot V_{be}$.

La potenza totale dissipata dal BJT è, allora:

$$P_d = P_{cb} + P_{be} = I_c \cdot V_{cb} + (I_c + I_b) \cdot V_{be} = I_c \cdot (V_{cb} + V_{be}) + I_b \cdot V_{be}$$

Il termine $I_b \cdot V_{be}$ è trascurabile anche quando il BJT è saturo; infatti, nei casi pratici, la corrente di base di un BJT saturo è solo un pò maggiore rispetto alla massima consentita in zona attiva che, come sappiamo è trascurabile; inoltre, anche V_{be} è piccola.

Possiamo concludere, perciò, che la potenza dissipata dal BJT, attraversato dalla corrente di collettore I_c e che ha ai suoi capi la tensione V_{ce} , è data da $P_d \cong I_c \cdot V_{ce}$.

Curve Caratteristiche

Come per qualsiasi altro componente, del BJT vengono forniti vari tipi di caratteristiche che descrivono il comportamento del dispositivo.

Caratteristiche di collettore

Le caratteristiche di collettore riportano l'andamento della corrente I_c al variare di V_{ce} , per un prefissato valore della corrente di base I_b ; ripetendo il procedimento per diversi valori di I_b si ottiene una famiglia di caratteristiche. In Fig.15 sono riportate le caratteristiche del BC 107 per valori di I_b che vanno da $10\mu A$ a $100\mu A$, a passi di $10\mu A$.

Le caratteristiche evidenziano quello che sappiamo già; e cioè che sino a quando il BJT è in zona attiva ($V_{ce} > 0.2V$), mantenendo costante I_b , anche I_c rimane costante in accordo alla relazione $I_c = h_{FE} \cdot I_b$.

In realtà, a parità di I_b , aumentando V_{ce} , la corrente I_c aumenta leggermente perchè h_{FE} non rimane rigorosamente costante.

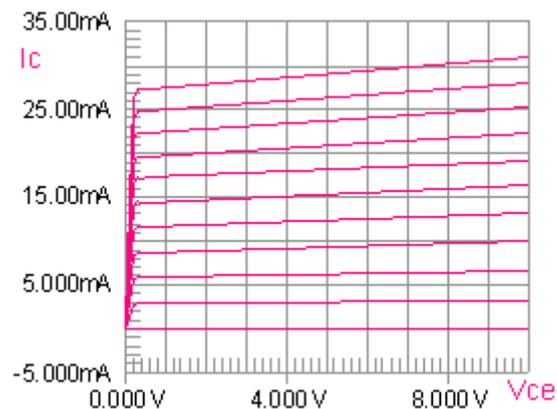


Fig.15

Le caratteristiche evidenziano inoltre che, diminuendo V_{ce} al di sotto di $0.2V$, a parità di I_b , il BJT entra in saturazione e la corrente I_c si riduce a zero.

Le caratteristiche di collettore ribadiscono ancora che, sino a quando il BJT è in zona attiva, piccole variazioni della corrente di base provocano rilevanti variazioni della corrente di collettore, confermando che il transistor bipolare è un generatore di corrente pilotato dalla corrente di base.

Caratteristiche di emettitore

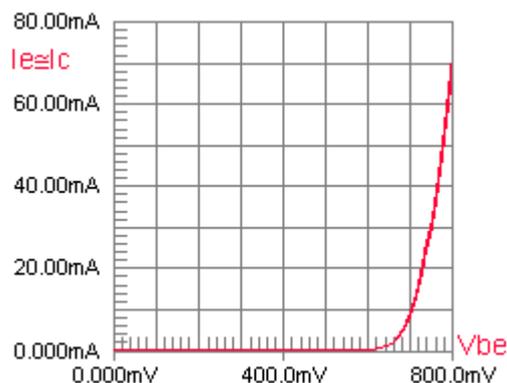


Fig.16

Le caratteristiche di emettitore riportano l'andamento di I_c al variare di V_{be} , per un prefissato valore di V_{ce} .

Al solito, si possono tracciare diverse caratteristiche di emettitore per differenti valori di V_{ce} , ottenendo anche in questo caso una famiglia di caratteristiche.

In Fig.16 sono riportate le caratteristiche di emettitore del BC107 in zona attiva, ottenute facendo variare V_{ce} come parametro da 1V a 10V, a passi di 1V. Come possiamo constatare le caratteristiche somigliano a quella di un diodo (d'altronde la giunzione base-emettitore è una giunzione PN); inoltre sono praticamente coincidenti e ciò conferma ancora una volta che il funzionamento del BJT in zona attiva non dipende dal valore di V_{ce} .

Poichè, in zona attiva $I_c \cong I_e$, le caratteristiche di emettitore ci dicono anche che, in zona attiva, la corrente di collettore è molto sensibile a piccole variazioni di V_{be} confermando ancora una volta che il BJT in zona attiva è un eccellente amplificatore.

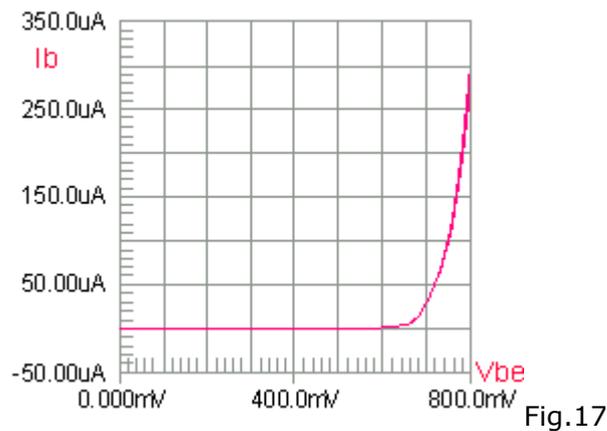
Caratteristiche di base

Le caratteristiche di base riportano l'andamento di I_b al variare di V_{be} , per un prefissato valore di V_{ce} .

Anche in questo caso, si possono tracciare diverse caratteristiche di base per differenti valori di V_{ce} , ottenendo ancora una volta una famiglia di caratteristiche.

In Fig.17 sono riportate le caratteristiche di base del BC107 in zona attiva, ottenute facendo variare V_{ce} come parametro da 1V a 10V, a passi di 1V.

Anche le caratteristiche di base non dipendono dal valore di V_{ce} , sino a quando il BJT è in zona attiva; inoltre hanno una forma simile a quella delle caratteristiche di emettitore.



Ciò è comprensibile perchè, in zona attiva, $I_b = \frac{I_c}{h_{FE}} \cong \frac{I_e}{h_{FE}}$ per cui I_c e I_b , al variare di V_{be} , hanno un andamento simile.

Reti di polarizzazione

La rete di polarizzazione è una rete esterna, fatta di una o più alimentazioni continue e di resistenze di limitazione della corrente; essa ha il compito di portare il BJT nel punto di funzionamento desiderato.

Reti per la polarizzazione di base

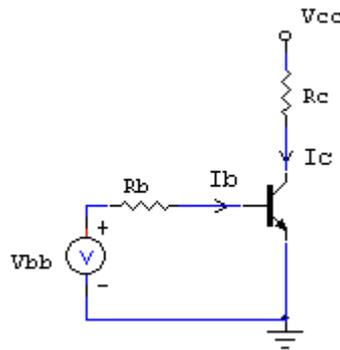


Fig.18

Questa rete (fig. 18) è nota anche come "rete di polarizzazione fissa" o "a corrente di base costante". Applicando il secondo principio di Kirchoff alla maglia di base otteniamo

$$V_{bb} = I_b \cdot R_b + V_{be}$$

e possiamo ricavare:

$$I_b = \frac{V_{bb} - V_{be}}{R_b}$$

Ora V_{bb} e R_b sono costanti mentre il valore di V_{be} è grosso modo lo stesso per tutti i BJT in conduzione.

Il valore di I_b , pertanto, non dipende affatto dal particolare BJT NPN che stiamo utilizzando, ma solamente dalla rete esterna. In conclusione, se sostituiamo il BJT con un altro, la I_b rimane quasi costante, a parità di rete esterna.

In Fig.19 abbiamo una rete per la polarizzazione di base che utilizza un BC 107;

la corrente di base è circa $8.9\mu A$ in ottimo accordo con $I_b = \frac{V_{bb} - V_{be}}{R_b} = \frac{(3.6 - 0.7)V}{330k\Omega} \cong 8.8\mu A$

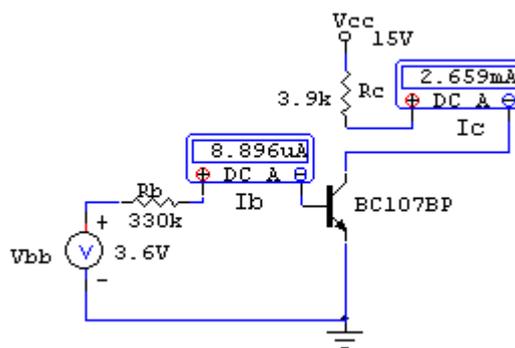


Fig.19

In Fig. 20 abbiamo la stessa rete di polarizzazione in cui è stato inserito il BJT 2N 3904.

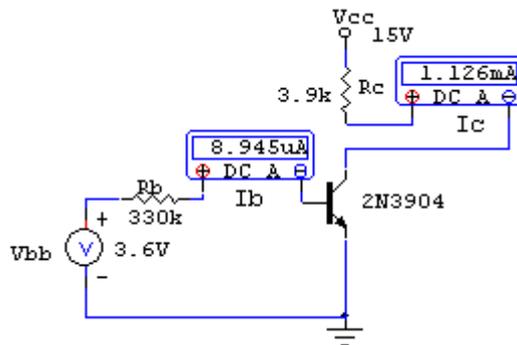


Fig.20

Come possiamo notare, la corrente di base è rimasta praticamente invariata; la corrente di collettore è, invece, sensibilmente diversa.

Ciò accade perchè, in zona attiva, la corrente di collettore è data da $I_c = h_{FE} \cdot I_b$ e, come sappiamo, il valore di h_{FE} varia sensibilmente da un BJT all'altro.

Se, invece, il BJT è saturo allora $I_c = I_{csat} \cong \frac{V_{cc}}{R_c}$ e non dipende dal BJT ma solo dalla rete.

Per la scarsa prevedibilità della corrente di collettore, la rete per la polarizzazione di base è poco usata per far funzionare il BJT in zona attiva; le poche volte che si usa, si preferisce per comodità utilizzare la singola alimentazione come in Fig. 21 e, in questo caso, $I_b = \frac{V_{cc} - V_{be}}{R_b}$.

Questa rete è usata prevalentemente quando si vuol fare funzionare il BJT da interruttore logico.

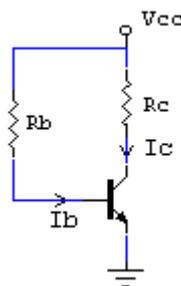


Fig.21

Rete per la polarizzazione di emettitore

In questa rete (Fig.22), la resistenza R_e è in serie all'emettitore, piuttosto che al terminale di base; in questo modo viene fissata la corrente di emettitore che risulta $I_e = \frac{V_{bb} - V_{be}}{R_e}$ e

dipende solo dalla rete esterna e non dal BJT. In sostanza, a parità di rete esterna, tutti i BJT NPN che vengono inseriti hanno la stessa corrente di emettitore; e ancora, sino a quando il BJT rimane in zona attiva, la corrente di collettore I_c è circa uguale a quella di emettitore ed, quindi, anch'essa, indipendente dal dispositivo

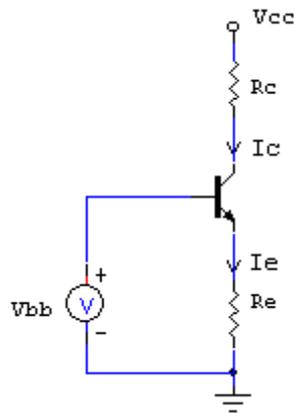


Fig.22

Come possiamo notare, inserendo nella rete un transistor BC 107 (fig.23) oppure un 2N 3904 (fig.24), la corrente di emettitore assume il valore imposto dalla rete

$$\text{esterna } I_e = \frac{V_{bb} - V_{be}}{R_e} = \frac{(3.6 - 0.7)V}{1k\Omega} \cong 2.9mA ; \text{ questo valore coincide anche, all'incirca, con la}$$

corrente di collettore visto che il BJT è in zona attiva (basta verificare che $V_{ce} > 0.2V$). La corrente di base, invece, cambia sensibilmente da un dispositivo all'altro, visto che, in zona

attiva, $I_b = \frac{I_c}{h_{FE}}$ e, come sappiamo, il valore di h_{FE} cambia con il dispositivo.

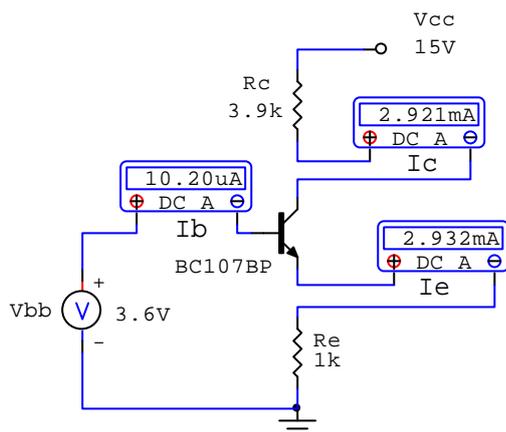


fig.23

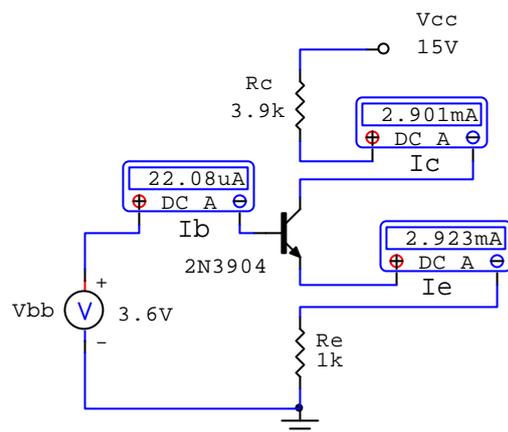


Fig.24

Questa rete, che ha il grosso vantaggio di fornire una corrente di collettore abbastanza prevedibile, non viene usata per un paio di buoni motivi.

Per cominciare, la rete non ha applicazioni pratiche perchè la presenza di V_{bb} tra base e massa non consente di variare facilmente il potenziale di base (e ciò è fondamentale quando si usa il BJT da amplificatore); e poi perchè richiede necessariamente due alimentazioni con $V_{bb} < V_{cc}$; infatti, se usassimo una singola alimentazione $V_{cc} = V_{bb}$, il BJT saturerebbe, come si può facilmente verificare.

Polarizzazione automatica a partitore (Rete VDB)

Come abbiamo appena visto, la rete per la polarizzazione di emettitore, che permette di ottenere, in zona attiva, una I_c prevedibile, ha il grosso svantaggio di richiedere una doppia alimentazione, in quanto deve essere $V_{bb} < V_{cc}$. Questo ostacolo può essere aggirato ricavando V_{bb} da V_{cc} mediante un partitore di tensione, come in Fig.25; la rete ottenuta si chiama rete VDB o rete di polarizzazione automatica a partitore.

E' bene chiarire immediatamente, però, che c'è qualche differenza tra la rete VDB e quella per la polarizzazione di emettitore di Fig. 22; in quest'ultima, infatti, il potenziale in base (relativamente a massa) rimane rigorosamente costante.

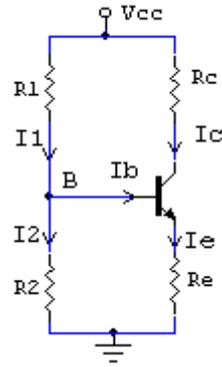


Fig.25

Nella rete VDB, invece, il potenziale in base varia con la corrente assorbita dalla base del BJT, durante il suo funzionamento; a meno che non progettiamo il partitore in modo che sia $I1 \gg Ib$. In queste condizioni, il partitore lavora praticamente a vuoto e fornisce la tensione

$$Vb = VR_2 \cong V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \text{ che è quasi costante con buona approssimazione; la corrente di}$$

emettitore I_e , che è data da $I_e = \frac{Vb - V_{be}}{R_e}$, risulta a tutti gli effetti pressochè indipendente dal dispositivo e dipende solo dalla rete esterna.

Nella simulazione di Fig.26, abbiamo una rete VDB che impiega un BC107; la rete è progettata in modo che sia $I1 \gg Ib$, come si può verificare facilmente osservando i valori segnati dai tester ($I1 = 726.8 \mu A$, $Ib = 7.54 \mu A$).

Il partitore $R1/R2$ non è, in pratica, caricato dal BJT e fornisce la tensione:

$$Vb \cong V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 15 \cdot \frac{2.7k}{2.7k + 18k} \cong 1.96V$$

Il valore ottenuto con la simulazione (1.939V) è leggermente inferiore a quello calcolato ed è giusto così, perchè il partitore non lavora propriamente a vuoto.

Il BJT è in zona attiva ($V_{ce} = 6.2V$)

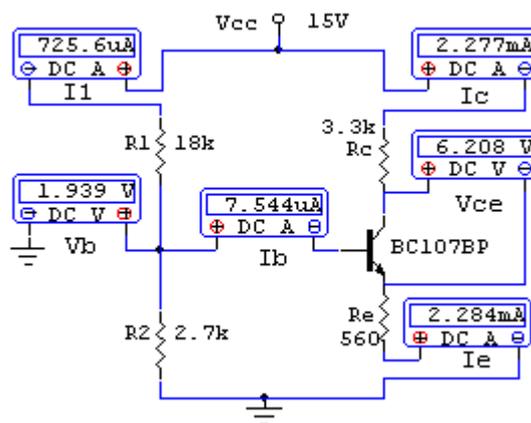


Fig.26

Il valore di I_e (2.284mA) è coerente con il valore previsto

$$I_e = \frac{Vb - V_{be}}{R_b} \cong \frac{(1.96 - 0.7)V}{560\Omega} \cong 2.25mA$$

Per quanto riguarda la corrente di collettore, essa è circa uguale a I_e , visto che il BJT è in zona attiva. La simulazione conferma in pieno le nostre aspettative.

Andiamo ora a verificare che, cambiando il BJT, a parità di rete, le correnti I_e e I_c restano praticamente invariate.

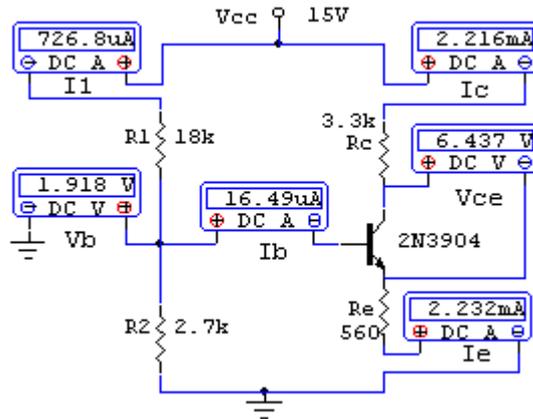


Fig.27

In Fig. 27 abbiamo la stessa rete VDB in cui il BC 107 è stato sostituito dal BJT 2N3904; come possiamo notare dalla simulazione nè I_e , nè I_c , nè I_1 sono cambiati apprezzabilmente, come ci aspettavamo.

L'unica corrente che è variata sensibilmente è quella di base; ciò è giusto perchè il 2N3904 ha un guadagno statico h_{FE} inferiore rispetto al BC107. Notiamo anche che V_b ha un valore leggermente inferiore a quello di Fig. 26, perchè il nuovo BJT assorbe più corrente di base; il valore di V_b è, comunque, molto vicino a quello previsto.

Progetto della rete VDB

Per progettare la rete VDB, una volta noti V_{cc} e il valore della corrente di collettore I_c che si vuole ottenere in zona attiva, si procede come segue:

1. si impone che la tensione V_{Re} sulla resistenza di emettitore R_e , sia non inferiore a 1V; cioè si sceglie $V_{RE} > 1V$; il motivo di tale posizione sarà chiaro in seguito.
2. si ricava il valore della resistenza di emettitore da $R_e = \frac{V_{RE}}{I_e} \cong \frac{V_{RE}}{I_c}$
3. si ricava $V_b = V_{R2} = V_{be} + V_{Re}$
4. si impone $I_1 \gg I_b$; a tale scopo basta imporre $I_1 > 10 \cdot I_b$ e quindi $I_1 > 10 \cdot \frac{I_c}{h_{FE}}$. Questa condizione deve essere soddisfatta soprattutto per i BJT che assorbono più corrente di base, cioè per i BJT che hanno il valore di h_{FE} più piccolo; poichè h_{FE} difficilmente scende al di sotto di 50, basta imporre $I_1 > 10 \cdot \frac{I_c}{50}$ cioè $I_1 > 0.2 \cdot I_c$; scegliamo $I_1 = 0.25 \cdot I_c$
5. si ricava il valore di R_2 da $R_2 = \frac{V_{R2}}{I_2} \cong \frac{V_b}{I_1}$ visto che I_b è trascurabile
6. si calcola il valore della resistenza R_1 da $R_1 = \frac{V_{R1}}{I_1} = \frac{V_{CC} - V_{R2}}{I_1}$

Al variare di R_c , la corrente di collettore conserva il valore imposto dalla rete sino a quando il BJT rimane in zona attiva, cioè sino a quando $V_{ce} > 0.2V$. Dalla maglia di collettore noi ricaviamo che

$$V_{cc} = R_c \cdot I_c + V_{ce} + V_{Re}$$

e, perciò, otteniamo:

$$V_{ce} = V_{cc} - R_c \cdot I_c - V_{Re}$$

Ciò comporta che deve essere:

$$V_{cc} - R_c \cdot I_c - V_{Re} > 0.2V$$

e, in definitiva, che il BJT resta in zona attiva sino a quando $R_C < \frac{V_{CC} - 0.2V - V_{RE}}{I_C}$.

Approfondimento

Abbiamo visto che, progettando adeguatamente la rete VDB, la corrente di collettore in zona attiva non dipende dal dispositivo ma dalla rete di polarizzazione. Rimane un problema: la tensione V_{be} che si stabilisce ai capi della giunzione base- emettitore, polarizzata direttamente, tende a diminuire all'aumentare della temperatura del dispositivo; anzi, a parità di corrente che attraversa la giunzione, V_{be} diminuisce di $2.5\text{mV}/^\circ\text{C}$. In conseguenza di questo

comportamento, la corrente di collettore $I_C \cong \frac{V_b - V_{be}}{R_e}$ aumenta all'aumentare della

temperatura; ciò potrebbe provocare un aumento della potenza dissipata dal BJT ed un ulteriore aumento della temperatura e così via. Questo fenomeno, chiamato fuga termica, è particolarmente pericoloso nei BJT di potenza e potrebbe portare alla distruzione del dispositivo.

Occorre, perciò, limitare l'aumento, subito da I_C in conseguenza della diminuzione di V_{be} con la temperatura.

Essendo V_b praticamente costante, la variazione subita da I_C in conseguenza di una variazione

di V_{be} è $\Delta I_C = -\frac{\Delta V_{be}}{R_e}$

Il segno meno che compare nella relazione sta ad indicare che le due variazioni hanno segno opposto; cioè, quando V_{be} diminuisce, I_C cresce e viceversa.

Più che la variazione assoluta di I_C , a noi interessa quella relativa, decisamente più significativa; essa è data da:

$$\frac{\Delta I_C}{I_C} \cong -\frac{\Delta V_{be}}{I_C \cdot R_e} \cong -\frac{\Delta V_{be}}{V_{RE}}$$

la variazione percentuale è:

$$\Delta I_C\% \cong \frac{|\Delta V_{be}|}{V_{RE}} \cdot 100$$

Notiamo che, più elevato è il valore di V_{RE} , e più piccola è la variazione relativa (o percentuale) subita da I_C . In genere basta che sia V_{RE} poco maggiore di $1V$, per ridurre la variazione di I_C in modo significativo.

Concludiamo osservando che la variazione di V_{be} con la temperatura, che può provocare seri problemi negli amplificatori di potenza, in altri ambiti viene utilmente impiegata per realizzare eccellenti trasduttori di temperatura.

Ricerca grafica del punto di riposo

Anche nei BJT, il punto di riposo può essere determinato per via grafica; per farlo bisogna disporre, come al solito, delle caratteristiche e della retta di carico.

Come abbiamo già visto per il diodo, l' equazione della retta di carico proviene dall' applicazione del secondo principio di Kirchoff ad una maglia del circuito ed è il luogo di tutti i punti del piano che soddisfano lo stesso principio.

Vediamo adesso come si determina, nel piano delle caratteristiche di collettore, il punto di riposo del BJT, una volta nota la corrente di base. A tale scopo utilizzeremo, per semplicità, la rete a polarizzazione fissa di Fig.28. Cominciamo la ricerca grafica disegnando la retta di carico nel piano I_C - V_{ce} .

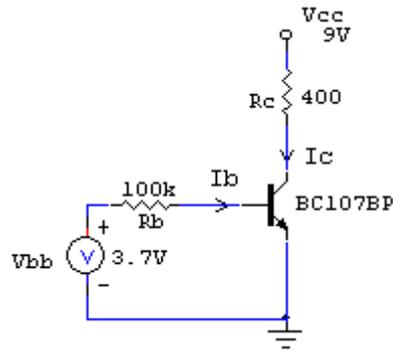


Fig.28

Applicando il secondo principio di Kirchoff alla maglia di collettore, otteniamo:

$$V_{cc} = I_c \cdot R_c + V_{ce}$$

e, da questa:

$$I_c = \frac{V_{cc} - V_{ce}}{R_c}$$

Questa è l'equazione della retta di carico, che interseca l'asse delle correnti nel punto A di coordinate $V_{ce}=0$ e $I_c = \frac{V_{cc}}{R_c}$ (Fig. 29); mentre interseca l'asse delle tensioni nel punto B di coordinate $I_c=0$ e $V_{ce}=V_{cc}$.

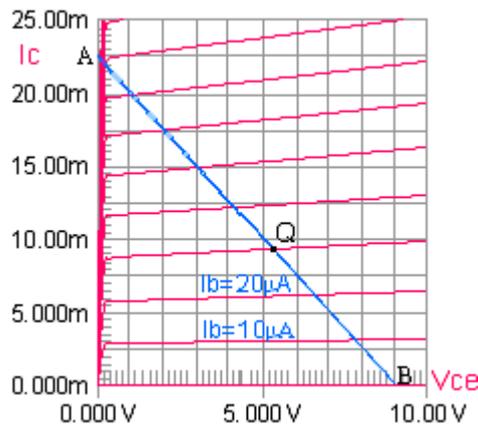


Fig.29

Nel nostro caso le due intersezioni valgono rispettivamente $\frac{V_{cc}}{R_c} = \frac{9V}{400\Omega} = 22.5mA$, quella con l'asse delle correnti, e $V_{ce}=9V$ quella con l'asse delle tensioni.

Per portare a termine la ricerca del punto di riposo, è necessario ricavare il valore di I_b ; in Fig.28 essa può essere determinata facilmente dalla maglia di base; infatti

$$I_b = \frac{V_{bb} - V_{be}}{R_b} = 30\mu A.$$

Adesso, determinare il punto di riposo è facile; esso, infatti, deve trovarsi sulla caratteristica di collettore relativa a $I_b=30\mu A$ ma deve stare anche sulla retta di carico; perciò, l'unico punto di riposo possibile è il punto l'intersezione Q tra la retta di carico e la caratteristica relativa a $I_b=30\mu A$

Dalla Fig.29 ricaviamo che il punto di riposo Q ha coordinate $I_{cq}\approx 9.5mA$ e $V_{ceq}\approx 5.3V$.

La simulazione di Fig.30 conferma in pieno lo studio grafico.

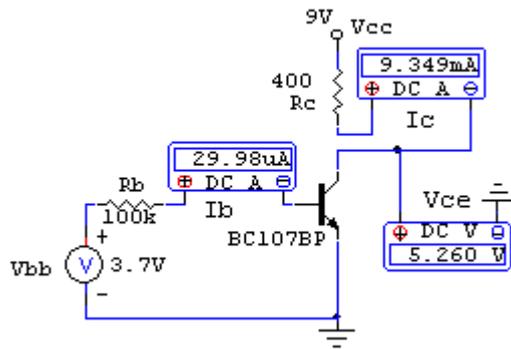


Fig.30

Osserviamo che, all' aumentare di I_b , il punto di riposo Q si va spostando, sulla retta di carico, verso l' alto e il BJT si va avvicinando alla saturazione; quando la corrente di base oltrepassa un certo limite, circa $80\mu A$ nel nostro caso, il BJT entra in saturazione e, quindi, la corrente I_c raggiunge il massimo valore consentito dalla rete esterna e, contestualmente, V_{ce} diventa circa zero.

Noi, per brevità, abbiamo ricavato la corrente di base in modo analitico. E' bene evidenziare che essa può essere determinata anche per via grafica; per farlo, basta disegnarsi la retta di carico di equazione $I_b = \frac{V_{bb} - V_{be}}{R_b}$ nel piano delle caratteristiche di base (in pratica una sola in zona attiva) e determinare l'intersezione.

BJT come interruttore logico

Nel funzionamento da interruttore logico, il BJT viene fatto passare dalla regione di interdizione, dove $I_c=0$ e perciò esso si comporta da tasto aperto, alla saturazione, dove $V_{ce}\approx 0$ e perciò esso si comporta quasi da cortocircuito.

La rete di polarizzazione più usata è quella fissa. La tensione V_{in} che pilota l'interruttore può essere fornita direttamente da un generatore di onde rettangolari o quadre, come in Fig.31.

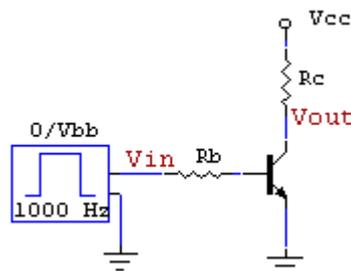


Fig.31

Oppure può essere ottenuta mediante un interruttore S che commuta la base o verso massa oppure verso $+V_{bb}$, come in Fig.32.

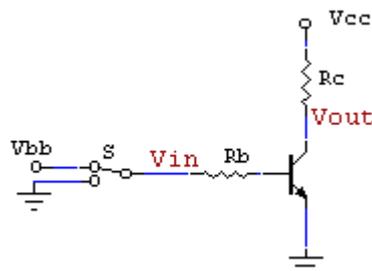
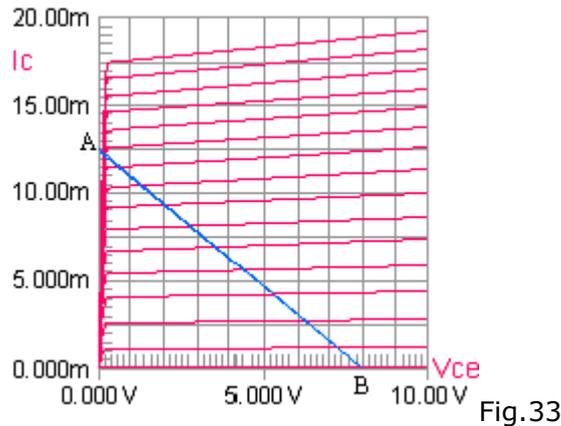


Fig.32

Osserviamo che, quando il BJT funziona da interruttore, il carico R_c o non è percorso da corrente oppure è attraversato dalla massima corrente consentita dalla rete.

Quando $V_{in}=0$, la corrente di base $I_b=0$ ed anche $I_c=0$; il BJT è interdetto e il punto di funzionamento del BJT si porta nella posizione B, come in Fig. 33.



Quando $V_{in}=V_{bb}$, il BJT deve essere saturo e perciò deve spostarsi nella posizione A; per ottenere tale scopo la corrente di base I_b deve avere un valore adeguato; più precisamente

$$\text{deve essere } I_b > \frac{I_{csat}}{h_{FE}} \text{ con } I_{csat} \cong \frac{V_{cc}}{R_c}.$$

In queste condizioni, $I_c \cong I_{csat}$ e $V_{ce} \cong 0$.

Nel funzionamento da interruttore il BJT dissipa pochissima potenza; infatti, essendo la potenza dissipata $P_d \cong I_c \cdot V_{ce}$, quando il BJT è interdetto, P_d è nulla perchè $I_c=0$.

Quando il BJT è saturo, la tensione $V_{ce}=V_{cesat}$ è molto piccola, per cui anche la potenza dissipata $I_c \cdot V_{ce}$ è piccola.

L'interruttore logico a BJT ha moltissime applicazioni. Ad esempio, gli integrati per il controllo dei motori oppure i regolatori per gli alimentatori di potenza elevata utilizzano BJT che funzionano ON/OFF; se, nei casi appena citati, i BJT funzionassero in zona attiva, la dissipazione di potenza sarebbe proibitiva con tutti i problemi termici derivanti.

Le porte logiche TTL utilizzano BJT in funzionamento ON/OFF. Già il circuito di Fig. 31 è un primo esempio di porta NOT rudimentale.

Infatti, quando $V_{in}=0$, il BJT è interdetto e $I_b=I_c=0$; e perciò $V_{out} = V_{ce} = V_{cc} - I_c \cdot R_c = V_{cc}$.

Quando $V_{in}=V_{bb}$, il BJT è saturo e perciò $V_{out} = V_{ce} \cong 0$.

E allora, se in ingresso mettiamo un'onda quadra 0/5V, in uscita otteniamo la stessa onda quadra negata, come nella simulazione di Fig.34 in cui $V_{cc}=5V$.

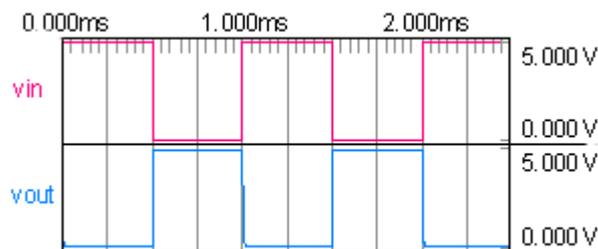


Fig.34

Se la frequenza di pilotaggio dell'interruttore diventa elevata, la corrente I_c e, di conseguenza, la tensione V_{out} stentano a seguire le variazioni brusche del segnale V_{in} , come in Fig. 35 dove la frequenza è 100kHz.

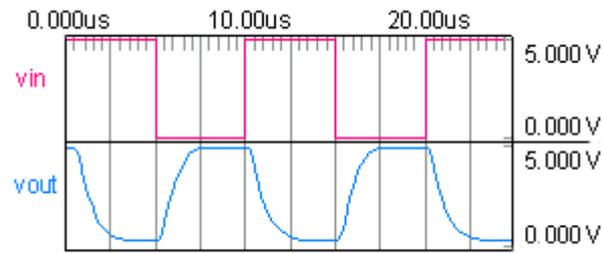


Fig.35

Infatti, affinché il BJT possa commutare, il suo punto di funzionamento deve attraversare la regione attiva e ciò richiede un certo tempo; inoltre esso ritarda ad uscire dalla saturazione e dall'interdizione per fenomeni di immagazzinamento di cariche nelle varie parti del BJT. La presenza di una probabile capacità di carico (spesso parassita) rallenta ulteriormente le evoluzioni dell'interruttore.

Da quanto detto, risulta evidente che le porte logiche, che devono poter funzionare correttamente sino a frequenze elevate, devono essere realizzate con accorgimenti particolari.