

IL TRANSISTORE BJT

dal manuale

PHILIPS Elcoma 1968

GENERALITA' SUI TRANSISTOR

Il transistor è un elemento semiconduttore a tre terminali, capace di funzionare come amplificatore, come oscillatore, come interruttore elettronico, in quasi tutti quei circuiti che, prima della sua comparsa, venivano equipaggiati con valvole termoioniche. Esso può, quindi, considerarsi come l'equivalente semiconduttore del triodo a vuoto o di altri tipi di tubi con maggior numero di elettrodi. Come nel caso del diodo a cristallo, adottando diverse tecniche costruttive e seguendo diversi processi di fabbricazione, viene attualmente prodotta una vasta gamma di tipi di transistor adatti per le più diverse applicazioni. Esistono così transistor particolarmente adatti a funzionare alle alte frequenze ed altri capaci di dissipare notevoli potenze, e quindi, adatti ad essere impiegati come amplificatori finali, interruttori di potenza, ecc.

Il principio di funzionamento del transistor può essere facilmente compreso se lo si considera, come d'altra parte è in realtà, formato da due diodi a cristallo aventi una zona in comune. A seconda che questa zona in comune è costituita di materiale di tipo n o di tipo p , il transistor viene

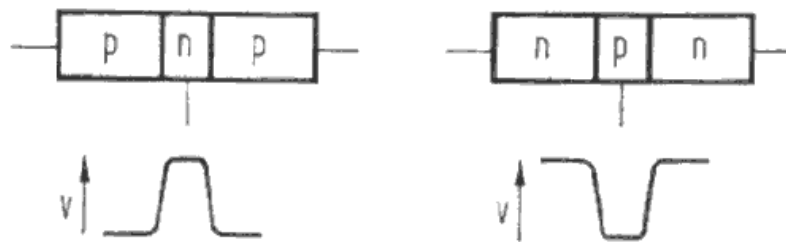


Fig. 1 - Rappresentazione schematica di un transistor p-n-p (a sinistra) e di un transistor n-p-n (a destra). Sotto sono indicate le corrispondenti barriere di potenziale.

detto del tipo **p-n-p** o **n-p-n**. I due tipi sono indicati schematicamente nella parte superiore della fig. 1; mentre nella parte inferiore sono indicate le barriere di potenziale. Per quanto riguarda la differenza esistente fra i due tipi è sufficiente ricordare che la polarità della barriera di potenziale, il senso di circolazione delle correnti e le tensioni applicate durante il loro funzionamento, sono nel transistor **n-p-n**, di segno opposto rispetto a quelle applicate nel transistor **p-n-p**.

In condizioni di funzionamento normali, il **diodo base-emettitore** è polarizzato in senso diretto con una tensione di alcuni decimi di volt, e cioè, per un transistor **p-n-p**, il polo positivo della sorgente di alimentazione, è collegato all'emettitore ed il polo negativo alla base. Il **diodo collettore-base**

viene invece polarizzato in senso inverso con una tensione generalmente dell'ordine di alcuni volt, e pertanto il collettore viene a trovarsi ad un potenziale negativo rispetto alla base [vedi fig. 2 (a)].

Consideriamo ora quanto accade quando il circuito base- collettore è aperto come indicato nella fig. 2 (b). Essendo il diodo base-emettitore polarizzato in senso diretto, viene abbassata la barriera di potenziale intrinseca del diodo stesso provocando uno spostamento di cavità positive dell'emettitore verso la base. Inoltre, essendo la concentrazione delle impurità più bassa nella base che nell'emettitore, soltanto un trascurabile numero di

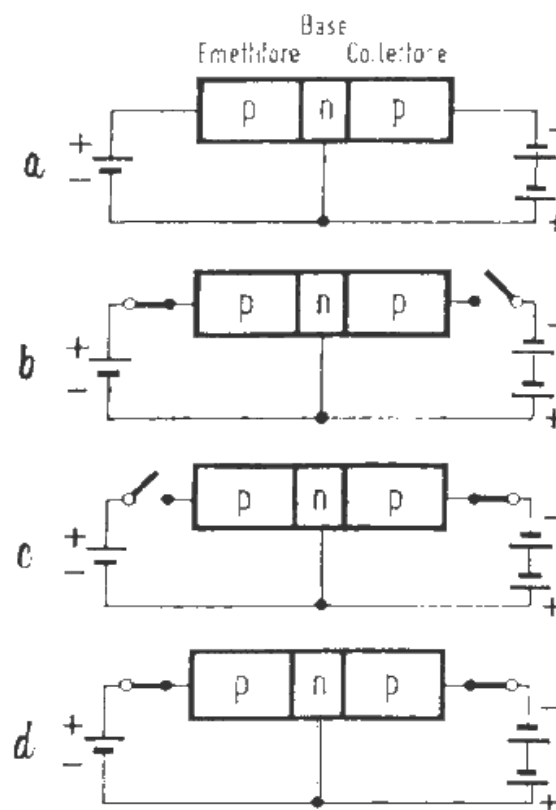


Fig. 2 - Illustrazione schematica del funzionamento del transistor.

elettroni attraverserà la giunzione nel senso base-emettitore. Quindi, la corrente totale emettitore- base (I_E) risulta costituita quasi esclusivamente da cavità positive.

Consideriamo adesso la situazione che si viene a creare quando è chiuso il circuito collettore-base ed aperto quello base-emettitore, come illustrato nella fig. 2 (c). A causa della polarizzazione inversa la barriera di potenziale intrinseca del diodo collettore-base viene alzata, e perciò, solo una

debole corrente di cavità positive fluirà dalla base al collettore attraversando la giunzione del rispettivo diodo. Una corrente ancora più debole di elettroni fluirà dal collettore verso la base.

Cerchiamo ora di combinare questi due effetti considerando chiusi simultaneamente sia il circuito del diodo emettitore-base che quello del diodo collettore-base [fig. 2 (d)]. Essendo la base del transistor costituita da uno strato semiconduttore molto sottile rispetto alla distanza media che può essere percorsa dalle cavità positive provenienti dall'emettitore, la grande maggioranza di queste ultime raggiungerà la giunzione collettore-base e verrà, di conseguenza, attratta dal potenziale negativo al quale si trova il collettore stesso. La corrente che dal circuito esterno entra nella base è di piccola intensità poichè essa viene ad essere costituita essenzialmente da quel limitato numero di elettroni richiesti per rimpiazzare quelli che all'interno della base, si sono ricombinati con le cavità positive.

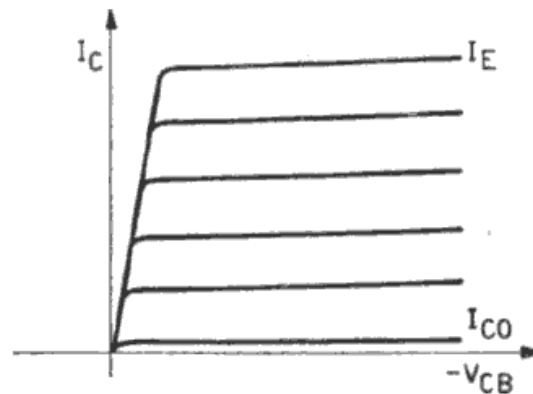


Fig. 3 - Andamento generale delle caratteristiche tensione di collettore-corrente di collettore di un transistor montato in base comune, con la corrente di emettitore come parametro.

Si capisce, pertanto, come la corrente di collettore risulti praticamente indipendente dalla tensione inversa applicata al diodo collettore-base. Essa consiste infatti in una debole e pressochè costante corrente di dispersione sommata ad una componente che si può considerare praticamente quasi uguale alla corrente di emettitore. La corrente di collettore, nella configurazione circuitale testè considerata e denominata **con base comune**, può essere espressa come segue:

$$I_C = I_{CBO} + \alpha_{FB} \cdot I_E$$

in cui I_C , I_{CBO} ed I_E rappresentano rispettivamente la corrente di collet-

collettore comune viene essenzialmente usato come trasformatore d'impedenza e, più raramente, in alcuni stadi di uscita.

CIRCUITI EQUIVALENTI

Il funzionamento del transistor come amplificatore di piccoli segnali può essere studiato applicando la teoria dei quadripoli ad uno dei diversi circuiti equivalenti che sono stati ideati in funzione del particolare tipo di applicazione cui il transistor può essere destinato. Descriveremo qui di seguito alcuni di questi circuiti.

Il circuito a π

Questa particolare rappresentazione del transistor si presta in modo particolare per studiarne il comportamento negli amplificatori a larga banda in quanto i diversi parametri del circuito si possono considerare per un largo intervallo di frequenza indipendenti da quest'ultima. Il circuito equivalente a π del transistor montato con base comune è indicato in fig. 5 (a).

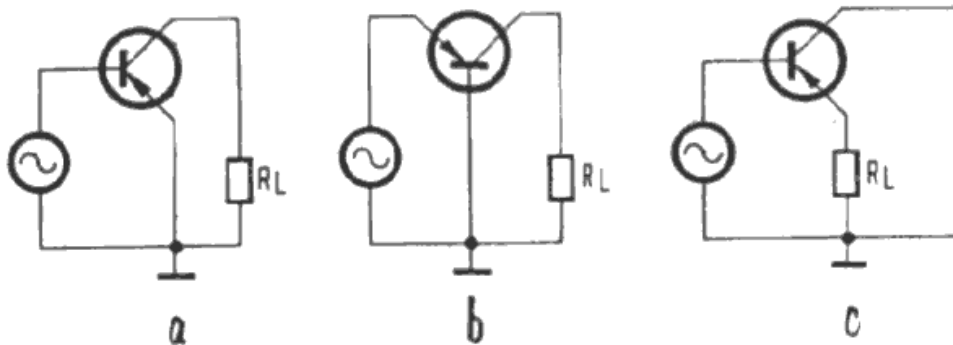


Fig. 4 - Circuiti fondamentali per emettitore comune, base comune, collettore comune. (Le tensioni di polarizzazione sono omesse per chiarezza).

EMETTITORE COMUNE

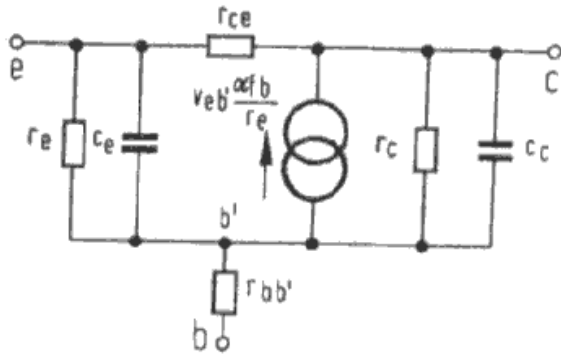
Bassa impedenza d'ingresso
Alta impedenza d'uscita
Alto guadagno sia di corrente che di tensione
Elevato guadagno di potenza.

BASE COMUNE

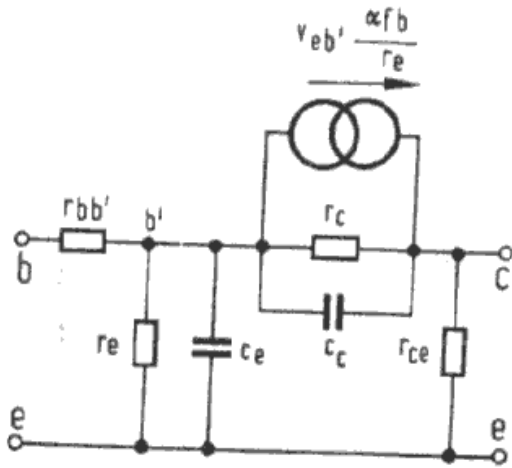
Impedenza d'ingresso molto bassa
Impedenza di uscita molto alta
Guadagno di corrente pressochè unitario
Guadagno di tensione molto alto
Guadagno di potenza medio.

COLLETTORE COMUNE

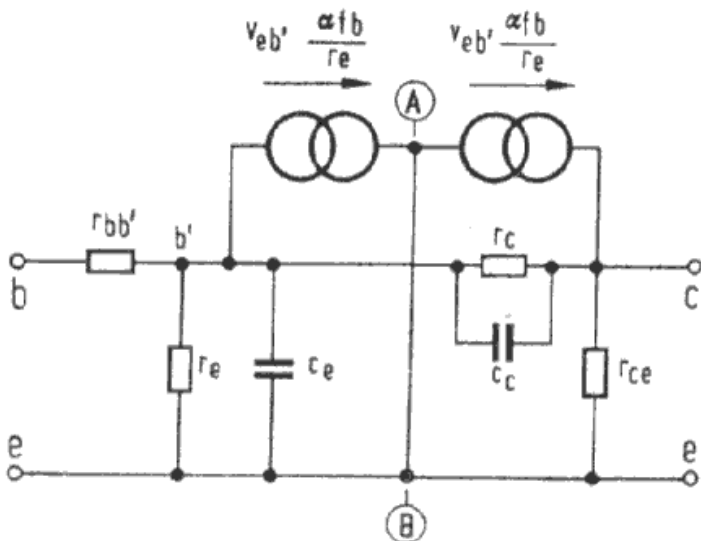
Impedenza d'ingresso molto alta
Impedenza di uscita molto bassa
Guadagno di corrente alto
Guadagno di tensione unitario
Guadagno di potenza basso.



(a) Base comune.



(b) Circuito ridisegnato per la configurazione ad emettitore comune.

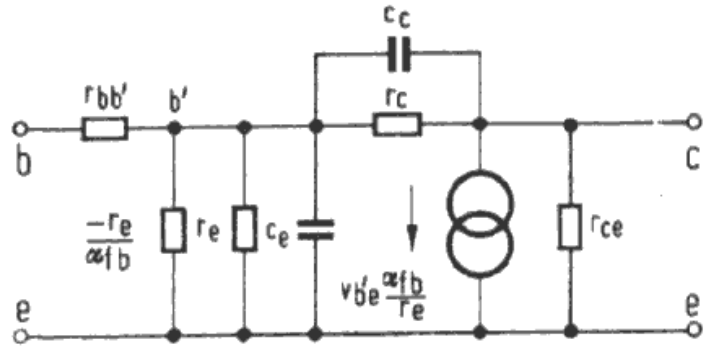


(c) Due sorgenti di corrente in serie danno la stessa corrente di una sorgente sola. Il punto A può quindi essere connesso al punto B, poichè in AB non scorrerà corrente.

(d) La sorgente di corrente di sinistra

$$V_{e'b} \frac{\alpha_{fb}}{r_e} = - V_{b'e} \frac{\alpha_{fb}}{r_e}$$

può essere sostituita dalla resistenza $-r_e/\alpha_{fb}$ connessa tra b' ed e .



(e) Emittitore comune. r_e in parallelo con $-r_e/\alpha_{fb}$ fornisce $r_e/(1-\alpha_{fb}) = (1+\alpha_{fe})r_e$.

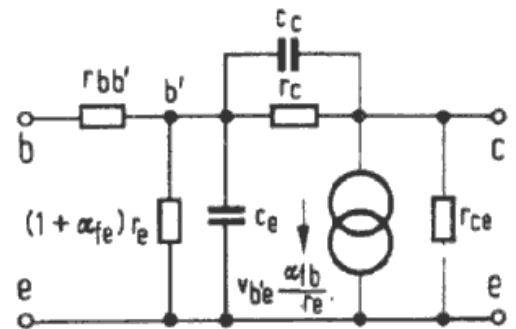


Fig. 5 - Derivazione del circuito a π per la configurazione ad emittitore comune dal circuito a base comune.

Il circuito equivalente al montaggio con emittitore comune si può dedurre dalla stessa figura 5 (a) mediante le successive trasformazioni illustrate nelle varie figure che seguono, e cioè dalla fig. 5 (b) alla 5 (e).

L'impedenza d'ingresso, come abbiamo già visto, è costituita da una resistenza e da un condensatore in parallelo. Il suo valore diminuisce pertanto all'aumentare della frequenza e quindi con tensione d'ingresso costante, si ha un aumento della corrente di base entrante, mentre rimane invariata la corrente in uscita. Il guadagno di corrente diminuisce quindi all'aumentare della frequenza del segnale. In relazione a questo fenomeno si definisce **frequenza di taglio** quella frequenza a cui il guadagno di corrente (α_{fb} e α_{fe} , rispettivamente per il montaggio con base e con emittitore comune) diminuisce di 3 dB, e cioè si è attenuato del rapporto $1/\sqrt{2}$ rispetto al valore assunto alle frequenze molto basse. La frequenza di taglio viene generalmente indicata col simbolo f_{ab} o f_{ae} a seconda del tipo di montaggio a cui si riferisce.

325

Come appare illustrato nella fig. 5 (e), la resistenza di ingresso nel montaggio con emettitore comune è data da $(1 + \alpha_{fe})r_e$, e pertanto la corrispondente frequenza di taglio $f_{\alpha e}$, che è inversamente proporzionale al prodotto della resistenza e della capacità d'ingresso, risulta diminuita rispetto a $f_{\alpha b}$ nel rapporto $(1 + \alpha_{fe})$, cioè:

$$f_{\alpha b} = (1 + \alpha_{fe}) f_{\alpha e}$$

Il circuito a T

Il circuito equivalente a T può essere derivato da quello a π omettendo le capacità, il che è ammissibile per segnali a bassa frequenza. Il circuito equivalente a T (vedi figura 6) è quindi valido solo per le applicazioni in bassa frequenza. Questo circuito può anche essere derivato rappresentando il transistor come l'insieme di due diodi, considerando cioè il diodo base-emettitore polarizzato in senso diretto ed il diodo base-collettore

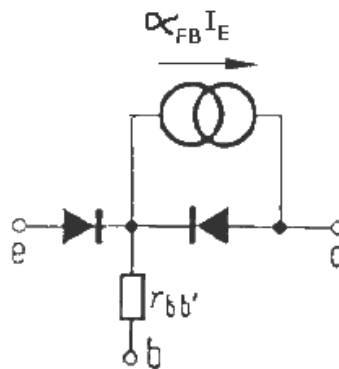


Fig. 6 - Rappresentazione del transistor come l'insieme di due diodi, di un generatore di corrente e di una resistenza.

polarizzato in senso inverso. Il processo di diffusione per cui la corrente di « buchi » dell'emettitore raggiunge il collettore, è rappresentato da un generatore di corrente ($\alpha_{FB} I_E$) connesso ai capi del diodo base-collettore, e la resistenza interna del materiale costituente la base dalla resistenza $r_{bb'}$. Questo circuito a due diodi è rappresentato in figura 6.

Se ora, oltre alle tensioni continue di polarizzazione si applica all'ingresso un segnale alternato, è evidente dalla caratteristica del diodo riprodotta in figura 7 che per piccoli segnali ciascun diodo può essere sostituito dalla resistenza differenziale corrispondente al suo punto di lavoro determinato dalla polarizzazione applicata. Si ottiene così la forma semplice del circuito a T di figura 8. Il generatore di corrente $\alpha_{fb} i_e$ in parallelo con la

resistenza r_o può essere sostituito da un generatore di tensione in serie con r_o . Se questa tensione si esprime in funzione della corrente d'ingresso, cioè $i_e \cdot r_m$ per la configurazione ad emettitore comune oppure $i_b \cdot r_m$

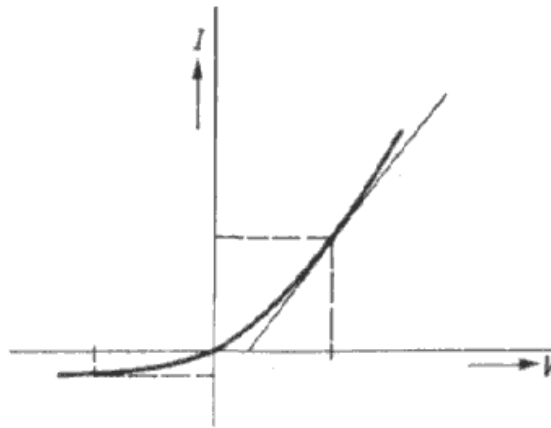


Fig. 7 - Caratteristica del diodo, che mostra i punti di lavoro per polarizzazione diretta ed inversa.

per la configurazione a base comune, i circuiti equivalenti per le due configurazioni saranno quelli rappresentati nelle figure 9 e 10.

Qui r_b , r_e ed r_c sono le resistenze interne equivalenti rispettivamente della base, dell'emettitore e del collettore, ed r_m è la resistenza di trasferimento, uguale numericamente ad $\alpha_{fb} r_o$. I valori di tutte queste resistenze sono costanti per un dato punto di lavoro, cioè per date condizioni di polarizzazione.

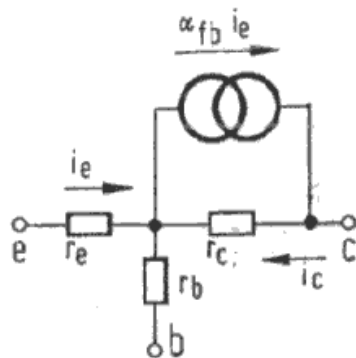


Fig. 8 - Circuito a T, in cui i due diodi sono rimpiazzati dalle resistenze differenziali.

Nella configurazione a base comune, il guadagno di corrente è

$$\alpha_{fb} = \frac{-I_o}{I_o} = \frac{r_m + r_b}{r_o + r_b}$$

ovvero, poichè r_b è molto piccola rispetto ad r_m ed r_o ,

$$\alpha_{fb} \approx \frac{r_m}{r_o}$$

Analogamente, nella configurazione ad emettitore comune, il guadagno di corrente è:

$$\alpha_{fe} = \frac{I_o}{I_b} = \frac{r_m - r_e}{r_o - r_m + r_e}$$

ovvero, poichè r_e è piccola rispetto ad r_m o $(r_o - r_m)$

$$\alpha_{fe} \approx \frac{r_m}{r_o - r_m}$$

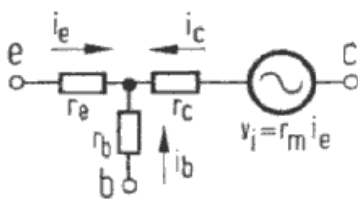


Fig. 9 - Circuito equivalente a T per un transistor nella configurazione a base comune.

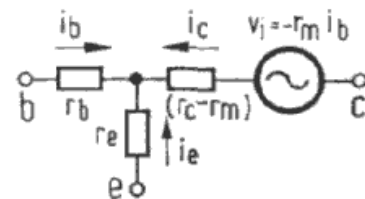


Fig. 10 - Circuito equivalente a T per un transistor nella configurazione ad emettitore comune.

PARAMETRI CARATTERISTICI DEI TRANSISTOR

Le proprietà elettriche dei transistor possono anche essere rappresentate sotto forma di quantità numeriche, dette parametri, le quali indicano le relazioni esistenti tra le tensioni e le correnti all'ingresso ed all'uscita. Verranno ora descritti alcuni dei sistemi di parametri più usati.

Parametri « Y »

Il sistema dei parametri Y è basato sul fatto che nei circuiti a corrente alternata la relazione tra corrente e tensione è $i = v/Z$, dove Z è l'impedenza, oppure $i = vY$ dove Y è l'ammettenza. Come dice il loro nome, i parametri Y sono quindi una serie di coefficienti che rappresentano delle ammettenze in certe determinate condizioni. In una rete a tre terminali, come quella di figura 11, ciascuna delle tre correnti: i_1 , i_2 e i_3 , è una funzione di tutte e tre le tensioni v_1 , v_2 , v_3 , essendo la correlazione tra di loro lineare, almeno in prima approssimazione, cosicché in ciascun caso i coefficienti sono ammettenze. Queste ammettenze possono essere indicate

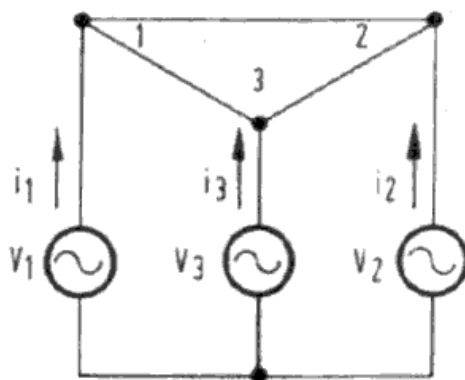


Fig. 11 - Rappresentazione schematica di una rete a tre terminali.

da simboli della forma Y_{ab} , in cui a si riferisce alla corrente e b alla tensione considerata. Nella rete di figura 11 le tre correnti saranno:

$$\begin{aligned} i_1 &= Y_{11}v_1 + Y_{12}v_2 + Y_{13}v_3 \\ i_2 &= Y_{21}v_1 + Y_{22}v_2 + Y_{23}v_3 \\ i_3 &= Y_{31}v_1 + Y_{32}v_2 + Y_{33}v_3 \end{aligned}$$

o più semplicemente:

$$\begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix}$$

La parentesi che contiene i terminali Y è denominata matrice dei coefficienti. E' chiaro allora che la risposta elettrica del sistema è determinata dalla matrice dei coefficienti, poichè queste ammettenze sono proprietà del sistema. E' per questo che esse sono chiamate parametri.

Se si considera ora un transistor come un elemento a tre terminali, si vede che ciascuna delle configurazioni del circuito (emettitore comune, base comune o collettore comune) corrisponde alla messa a massa di uno degli elettrodi 1, 2 o 3 dell'elemento, rendendo così uguale a zero la tensione corrispondente, v_1 , v_2 o v_3 . Per esempio, se l'elettrodo 1 rappresenta l'emettitore, il 2 il collettore ed il 3 la base, v_1 è zero nella configurazione ad emettitore comune, v_2 è zero nella configurazione a collettore comune, e v_3 è zero nella configurazione a base comune.

I valori delle correnti nei due rimanenti elettrodi sono le seguenti nei tre casi:

<i>emett. comune</i>	<i>base comune</i>	<i>coll. comune</i>
$i_2 = Y_{22}v_2 + Y_{23}v_3$	$i_1 = Y_{11}v_1 + Y_{12}v_2$	$i_1 = Y_{11}v_1 + Y_{13}v_3$
$i_3 = Y_{32}v_2 + Y_{33}v_3$	$i_2 = Y_{21}v_1 + Y_{22}v_2$	$i_3 = Y_{31}v_1 + Y_{33}v_3$

La matrice dei coefficienti per il circuito fondamentale a tre terminali e per le tre configurazioni circuitali del transistor è la seguente:

<i>circ. fond.</i>	<i>em. com.</i>	<i>base com.</i>	<i>coll. com.</i>
$\begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & Y_{22} & Y_{23} \\ \bullet & Y_{32} & Y_{33} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \bullet \\ Y_{21} & Y_{22} & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} Y_{11} & \bullet & Y_{13} \\ \bullet & \bullet & \bullet \\ Y_{31} & \bullet & Y_{33} \end{pmatrix}$

Si vede quindi che per ciascuna delle configurazioni del circuito si può usare una differente combinazione dei parametri, la cui correlazione si può trovare da un ulteriore esame della matrice dei coefficienti Y per il circuito fondamentale a tre terminali. Applicando la legge di Kirchhoff ($i_1 + i_2 + i_3 = 0$), risulta che la somma di ciascuna delle colonne verticali della matrice è zero, indipendentemente dai valori delle tensioni relative, cioè:

$$\left. \begin{aligned} Y_{11} + Y_{21} + Y_{31} &= 0 \\ Y_{12} + Y_{22} + Y_{32} &= 0 \\ Y_{13} + Y_{23} + Y_{33} &= 0 \end{aligned} \right\} \text{1ª regola}$$

Inoltre poiché le tensioni sono tutte riferite ad uno stesso livello, non specificato, i valori delle correnti alternate i_1 , i_2 ed i_3 non varieranno se questo livello cresce, cioè se ciascuna delle tensioni v_1 , v_2 e v_3 cresce della

stessa quantità. Da questo segue che la somma delle righe orizzontali della matrice è zero, cioè:

$$\left. \begin{aligned} Y_{11} + Y_{12} + Y_{13} &= 0 \\ Y_{21} + Y_{22} + Y_{23} &= 0 \\ Y_{31} + Y_{32} + Y_{33} &= 0 \end{aligned} \right\} \text{II}^{\circ} \text{ regola}$$

Da queste due regole segue che se si conoscono quattro dei coefficienti, si possono calcolare i rimanenti.

Per esempio se si conoscono i coefficienti per la configurazione ad emettitore comune, la matrice per il circuito a tre terminali può essere completata, cosicchè si vengono a conoscere i coefficienti per le rimanenti configurazioni.

Bisogna notare che la scelta fatta prima, per cui l'elettrodo 1 è l'emettitore, il 2 la base e il 3 il collettore, è del tutto arbitraria. Se la base fosse chiamata 1, il collettore 2 e l'emettitore 3, la matrice per la configurazione con emettitore a massa sarebbe:

$$\begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix}$$

Si usa generalmente indicare col numero 3 l'elettrodo che è a massa, ed aggiungere a ciascun parametro un altro indice che denomina l'elettrodo a massa, per esempio Y_{11e} , Y_{11b} , Y_{11c} , Y_{12e} , e così via. Così quando si conoscono i parametri Y_{11e} , Y_{12e} , Y_{21e} , Y_{22e} , relativi alla configurazione con emettitore comune (che sono identici a quelli che abbiamo chiamato Y_{22} , Y_{23} , Y_{32} , Y_{33} secondo la scelta fatta per gli elettrodi), si possono calcolare, mediante le regole I^a e II^a, i parametri per la configurazione con base comune, che saranno:

$$\begin{aligned} Y_{22b} &= Y_{22} = Y_{11e} \\ Y_{21b} &= -(Y_{22} + Y_{23}) = -(Y_{11e} + Y_{12e}) \\ Y_{12b} &= -(Y_{22} + Y_{32}) = -(Y_{11e} + Y_{21e}) \\ Y_{11b} &= -(Y_{12} + Y_{13}) = +(Y_{22} + Y_{32}) + (Y_{23} + Y_{33}) = \\ &= Y_{11e} + Y_{12e} + Y_{21e} + Y_{22e} \end{aligned}$$

Inoltre il transistor può essere considerato matematicamente come un quadripolo in cui l'elettrodo a massa sia comune sia all'ingresso che all'uscita, come è indicato in figura 12. Le correnti all'ingresso e all'uscita possono essere espresse in termini di tensioni ed ammettenze come segue:

$$\begin{aligned} I_i &= Y_i V_i + Y_r V_o \\ I_o &= Y_f V_i + Y_o V_o \end{aligned}$$

Dove gli indici hanno il seguente significato:

i = ingresso

o = uscita

t = trasferimento in senso diretto

r = trasferimento in senso inverso

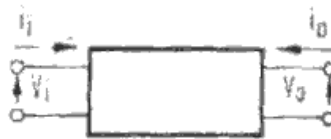


Fig. 12 - Rappresentazione convenzionale di una rete a quattro terminali.

Si può anche scrivere:

$$i_1 = Y_{11}v_1 + Y_{12}v_2$$

$$i_2 = Y_{21}v_1 + Y_{22}v_2$$

Allora, $Y_t = Y_{11}$; $Y_r = Y_{12}$; $Y_f = Y_{21}$; $Y_o = Y_{22}$, saranno gli stessi parametri usati per il circuito a tre terminali. Si usa indicare l'elettrodo comune con un secondo indice cosicché, per esempio, per la configurazione ad emettitore comune, i coefficienti saranno $Y_{te} = Y_{11e}$; $Y_{re} = Y_{12e}$; $Y_{fe} = Y_{21e}$; $Y_{oe} = Y_{22e}$.

Il circuito equivalente a quattro terminali corrispondente è quello di fi-

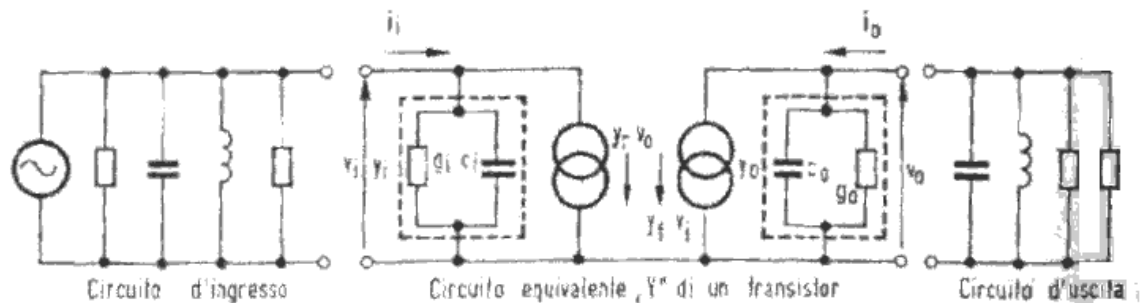


Fig. 13 - Circuito equivalente Y di un transistor (con circuiti accordati all'ingresso e all'uscita).

gura 13. Bisogna ancora notare che in generale le ammettenze sono quantità complesse, formate dalla connessione in parallelo di una conduttanza g ed una suscettanza B (cioè di una resistenza e di un condensatore). L'uso del sistema dei parametri Y è particolarmente utile quando si consideri il transistor funzionante a frequenze alte, per esempio in amplificatori selettivi dove sia l'ingresso che l'uscita sono collegati a circuiti accordati cosicchè le ammettenze si sommano.

Parametri « h »

Un altro sistema di parametri che può essere usato per descrivere il funzionamento del transistor è il sistema dei parametri h o « ibridi », chiamati così poichè non hanno tutti le stesse dimensioni. Essi sono basati sulle seguenti relazioni:

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= h_i i_1 + h_r v_2 \\ i_2 &= h_f i_1 + h_o v_2 \end{aligned} \right\} \text{ oppure } \left\{ \begin{aligned} v_1 &= h_{11} i_1 + h_{12} v_2 \\ i_2 &= h_{21} i_1 + h_{22} v_2 \end{aligned} \right.$$

Gli indici hanno lo stesso significato che avevano nel sistema dei parametri Y . I parametri h sono usati principalmente nelle applicazioni in bassa frequenza, come negli amplificatori audio, per i quali è generalmente adottata la configurazione ad emettitore comune, che dà il maggior guadagno di potenza. Il transistor lavora quindi con un'alta impedenza della sorgente

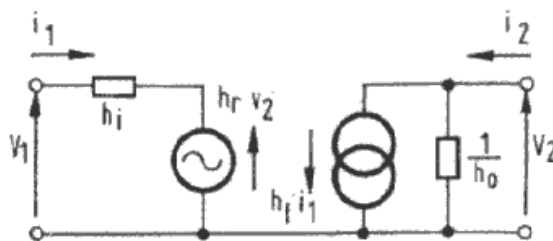


Fig. 14 - Circuito equivalente h di un transistor (configurazione ed emettitore comune).

del segnale, e con una impedenza del carico bassa. In questo caso i parametri h hanno i seguenti significati fisici:

h_{11} (od h_i): rappresenta l'impedenza d'ingresso in ohm, con la condizione di una bassa impedenza di carico, che si avvicina alle condizioni di uscita in corto circuito per le correnti alternate (cioè $v_2 = 0$).

h_{21} (od h_r): è il trasferimento di corrente in senso diretto (guadagno di corrente) con la stessa condizione.

h_{22} (od h_o): è l'ammettenza d'uscita espressa in siemens, con la condizione di alta impedenza d'ingresso, che si avvicina alla condizione d'ingresso aperto per le correnti alternate.

h_{12} (od h_r): è il trasferimento in senso inverso di tensione, cioè il reciproco del guadagno di tensione, nelle stesse condizioni.

Come con i parametri Y , si può usare una combinazione diversa dei parametri h per ciascuna configurazione del circuito, e per questo si introduce un altro indice, per esempio e per la configurazione ad emettitore comune, b per quella a base comune e c per quella a collettore comune. Il circuito equivalente del transistor per la configurazione con emettitore comune diventa in questo caso quello della figura 14.

Parametri « a »

Per circuiti in cascata è più conveniente l'uso dei parametri a , che sono basati sulle seguenti relazioni:

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= a_{11}v_2 + a_{12}(-i_2) \\ i_1 &= a_{21}v_2 + a_{22}(-i_2) \end{aligned} \right\} \text{ oppure } \begin{pmatrix} v_1 \\ i_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_2 \\ -i_2 \end{pmatrix}$$

Il vantaggio del sistema di parametri a è quello di rendere immediatamente evidente la relazione esistente tra ingresso ed uscita e quindi si può facilmente calcolare l'uscita di più stadi in cascata, moltiplicando le matrici dei coefficienti.

Conversione e relazione tra i vari sistemi di parametri

Tutti i parametri sono indicati sui dati pubblicati dai fabbricanti di transistor, per certe condizioni di polarizzazione, frequenza e temperatura. Per altre condizioni, questi parametri possono essere convertiti con l'aiuto di grafici, anch'essi pubblicati, del tipo di quelli di figura 15. I differenti sistemi di coefficiente sono ovviamente legati tra di loro e ciascuno può essere espresso in termini degli altri in modo semplice. La conversione, nel caso dei parametri Y , h ed a , può essere eseguita con la tabella seguente:

	« Y »		« h »		« a »	
« Y »	Y_{11}	Y_{12}	$\frac{1}{h_{11}}$	$-\frac{h_{12}}{h_{11}}$	$\frac{a_{22}}{a_{12}}$	$-\frac{\Delta a}{a_{12}}$
	Y_{21}	Y_{22}	$\frac{h_{21}}{h_{11}}$	$\frac{\Delta h}{h_{11}}$	$-\frac{1}{a_{12}}$	$\frac{a_{11}}{a_{12}}$
« h »	$\frac{1}{Y_{11}}$	$-\frac{Y_{12}}{Y_{11}}$	h_{11}	h_{12}	$\frac{a_{12}}{a_{22}}$	$\frac{\Delta a}{a_{22}}$
	Y_{21}	ΔY	h_{21}	h_{22}	$-\frac{1}{a_{22}}$	$\frac{a_{21}}{a_{22}}$
	$\frac{Y_{21}}{Y_{11}}$	$\frac{Y_{12}}{Y_{11}}$				
	$\frac{Y_{21}}{Y_{11}}$	$\frac{Y_{12}}{Y_{11}}$				
« a »	$-\frac{Y_{22}}{Y_{21}}$	$-\frac{1}{Y_{21}}$	$-\frac{\Delta h}{h_{21}}$	$-\frac{h_{11}}{h_{21}}$	a_{11}	a_{12}
	$\frac{Y_{21}}{Y_{21}}$	$\frac{Y_{21}}{Y_{21}}$	h_{21}	h_{21}		
	$-\frac{\Delta Y}{Y_{21}}$	$-\frac{Y_{11}}{Y_{21}}$	$-\frac{h_{22}}{h_{21}}$	$-\frac{1}{h_{21}}$	a_{21}	a_{22}
	$\frac{Y_{21}}{Y_{21}}$	$\frac{Y_{21}}{Y_{21}}$	h_{21}	h_{21}		

In questa tabella:

$$\Delta Y = Y_{11} Y_{22} - Y_{12} Y_{21}$$

$$\Delta h = h_{11} h_{22} - h_{12} h_{21}$$

$$\Delta a = a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21}$$

Questa tabella permette anche il calcolo dei coefficienti per altre configurazioni quando siano noti quelli di una. Per esempio, se si conoscono i parametri h per la configurazione con base comune, questi parametri, h_{11b} , h_{12b} , ecc., dapprima si esprimono in termini di parametri Y per base a massa Y_{11b} , Y_{12b} , ecc. Essi permettono di completare la matrice Y per il circuito a tre terminali, come è stato spiegato a pag. 299, e da quest'ultima si possono ottenere i parametri per le altre configurazioni. Questi possono allora essere convertiti nei parametri h desiderati. Le relazioni tra i parametri h e le quantità relative al circuito a T , per le

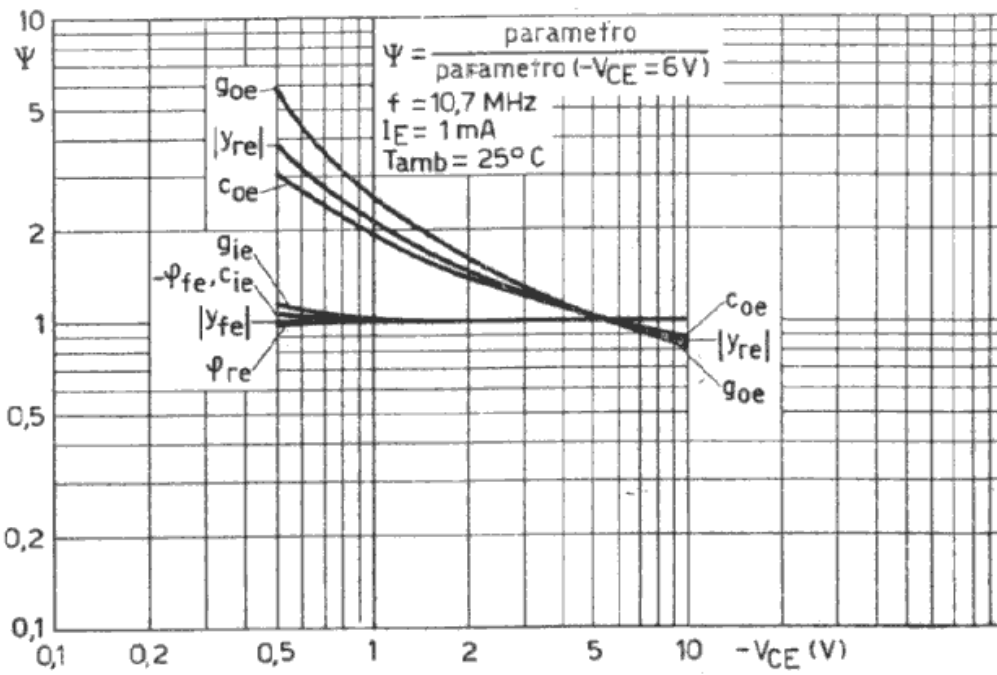
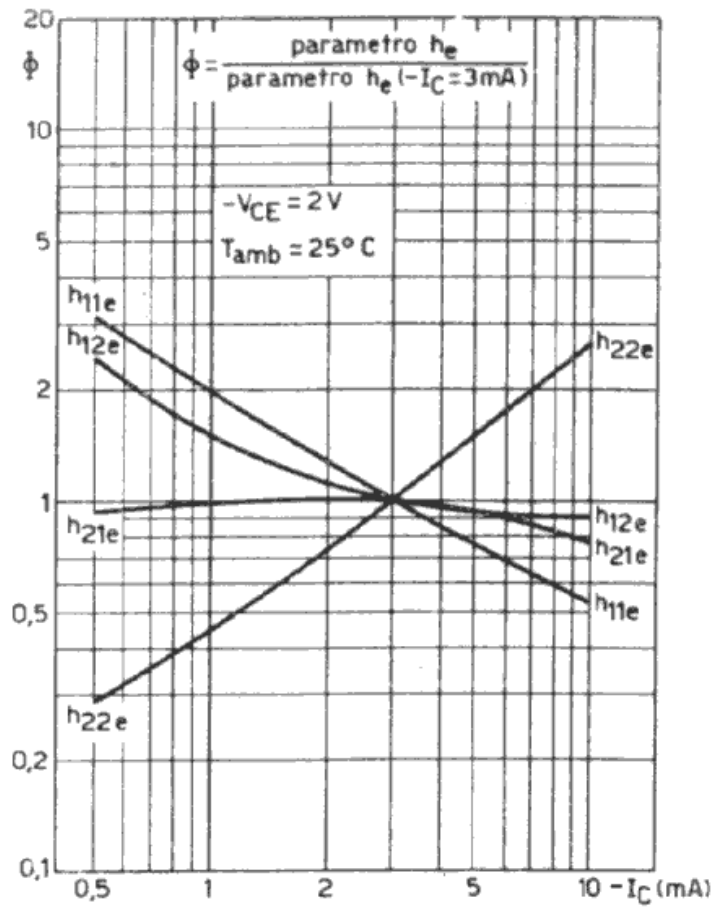


Fig. 15 - Esempi grafici di conversione che danno i valori dei parametri per diverse condizioni di polarizzazione.

tre configurazioni sono date dalla seguente tabella:

Base comune	Emettitore comune	Collettore comune
$h_{11b} = r_e + (1 - \alpha_{fb}) r_b$	$h_{11e} = (1 + \alpha_{fe}) h_{11b}$	$-h_{11o} = h_{11e}$
$h_{21b} = \alpha_{fb} = \frac{\alpha_{fe}}{1 + \alpha_{fe}}$	$h_{21e} = \alpha_{fe}$	$-h_{21o} = 1 + h_{21e}$
$h_{22b} = 1/r_e$	$h_{22e} = (1 + \alpha_{fe}) h_{22b}$	$h_{22o} = h_{22e}$
$h_{12b} = r_b/r_e$	$h_{12e} = r_e (1 + \alpha_{fe}) h_{22b}$	$h_{12o} = 1/(1 + h_{12e})$

Bisogna infine notare che finora le correnti sono state considerate sempre entranti nel transistor, come è indicato in figura 16 (a). In questo caso si ha che $i_e + i_o + i_b = 0$. Il fattore di amplificazione di corrente è

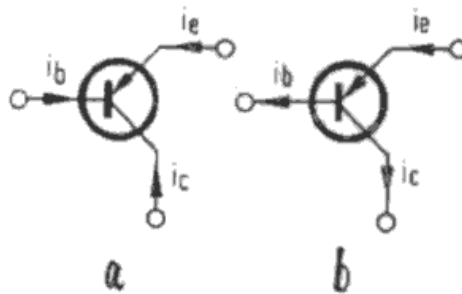


Fig. 16 - Convenzioni per il senso delle correnti in un transistor p-n-p.

allora $\alpha_{fb} = -i_c/i_e$ (base comune) oppure $\alpha_{fe} = i_c/i_b$ (emettitore comune). Talvolta il simbolo α_{fe} è sostituito da α' o da β , ed α_{fb} da α . In alcuni circuiti i sensi delle correnti sono presi come indicato in figura 16 (b), nel qual caso $i_o = i_e + i_b$, $\alpha_{fb} = i_c/i_e$ ed $\alpha_{fe} = i_o/i_b$.

In entrambi i casi valgono le seguenti relazioni:

$$\alpha_{fb} = \frac{\alpha_{fe}}{1 + \alpha_{fe}} ; \quad \alpha_{fe} = \frac{\alpha_{fb}}{1 - \alpha_{fb}} ; \quad 1 + \alpha_{fe} = \frac{1}{1 - \alpha_{fb}}$$

CURVE CARATTERISTICHE DEL TRANSISTOR

I sistemi di parametri precedentemente descritti si usano principalmente per risolvere problemi di progetto relativi al comportamento del transistor nelle condizioni di segnale debole. Per scegliere un opportuno **punto di lavoro** e determinare il comportamento di un transistor quando si applicano segnali di ampiezza elevata, le proprietà elettriche del transistor vengono indicate più convenientemente con l'insieme di curve dette **caratteristiche statiche**, che mostrano le relazioni mutue esistenti tra le sei variabili che sono poi le tre correnti nei tre elettrodi (I_E , $-I_B$ e $-I_C$) e le tre tensioni ai capi di ciascuna coppia di elettrodi ($-V_{CE}$, $-V_{BE}$ e $-V_{BC}$). Queste quantità, per la configurazione a emettitore comune, sono indicate in fig. 17, dove le polarità sia del collettore sia della base sono negative rispetto all'emettitore, come devono normalmente essere per un

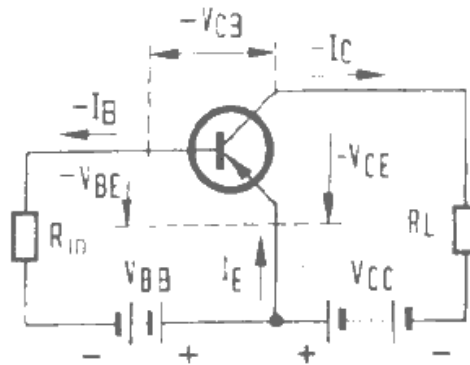


Fig. 17 - Tensioni e correnti in un transistor per la configurazione ad emettitore comune.

transistor usato quale amplificatore. Le quattro curve caratteristiche per un tipico transistor $p-n-p$ (tipo OC 71) sono riprodotte nella figura 18, e sono le seguenti:

Nel primo quadrante:

La caratteristica d'uscita che dà $-I_C$ in funzione di $-V_{CE}$, con $-I_B$ come parametro. Questa famiglia di caratteristiche d'uscita è paragonabile alle curve $I_a = f(V_a)$ di una valvola termoionica.

Nel secondo quadrante:

La caratteristica di trasferimento che dà $-I_C$ in funzione di $-I_B$ con $-V_{CE}$ come parametro. Questa famiglia di curve è analoga alle curve $I_a = f(V_g)$ di una valvola termoionica.

Nel terzo quadrante: La caratteristica d'ingresso che dà $-I_B$ in funzione di $-V_{BE}$, con $-V_{CE}$ come parametro.

Nel quarto quadrante: La caratteristica di reazione che dà $-V_{BE}$ in funzione di $-V_{CE}$, con $-I_B$ come parametro.

La resistenza di carico R_L può essere rappresentata nel primo quadrante da una retta di carico la cui pendenza ($\tan \gamma$) sia eguale a $1/R_L$. Analogamente si può tracciare nel terzo quadrante una retta la cui pendenza ($\tan \beta$) rappresenti la resistenza della sorgente. Se questa linea è tracciata in modo da intercettare l'asse $-V_{BE}$ nel punto corrispondente

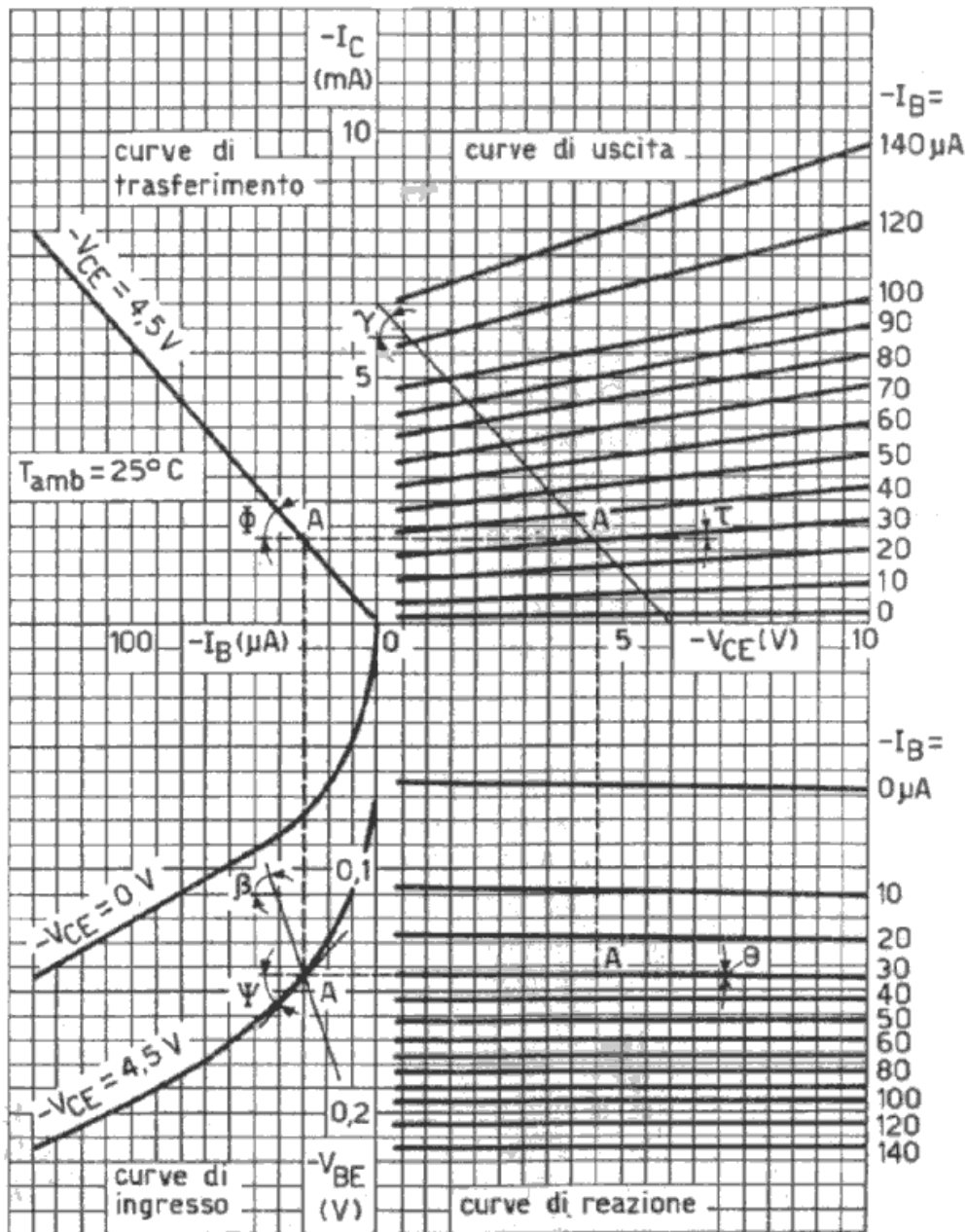


Fig. 18 - Curve caratteristiche per un transistor tipico p-n-p nella configurazione ad emettitore comune.

alla tensione fissa base-emettitore (V_{BB} di figura 17), si ottiene un punto di lavoro A che, proiettato sulle altre curve, indica la interdipendenza delle varie tensioni e correnti.

Quattro altri angoli: φ , ψ , δ e τ sono individuabili in figura 18. Le tangenti di questi angoli rappresentano rispettivamente le pendenze delle caratteristiche di trasferimento, d'ingresso, di reazione e di uscita nel punto di lavoro A sulle curve relative. I valori di queste tangenti sono, infatti, i parametri h discussi in precedenza. Essi corrispondono alle tensioni ed alle correnti continue relative al punto di lavoro A , che sono allora rappresentate da lettere maiuscole (I e V) ed indici maiuscoli (V_{BE} , I_E ecc.). I parametri h precedentemente descritti corrispondono allora alle tensioni e correnti alternate che sono sovrapposte ai valori in continua applicando un segnale debole e vengono indicati con simboli minuscoli (v_{be} , i_e ecc.). La pendenza della caratteristica di trasferimento ($\text{tang } \varphi = -i_c / -i_b$ per un valore costante di V_{CE} , cioè per $v_{ce} = 0$) corrisponde al funzionamento del transistor con l'uscita in corto circuito per le correnti alternate, cioè con $R_L = 0$. Il rapporto $-i_c / -i_b$ corrisponde allora ad h_{21e} o h_{fe} , cioè al guadagno di corrente nella configurazione ad emettitore comune. Dalle curve riprodotte in figura 18 si può determinare il valore di h_{fe} , e si è trovato che esso è approssimativamente 50 per le condizioni rappresentate dal punto di lavoro A .

Si osserverà che le intercette sulla retta di carico per incrementi uguali di $-I_B$, non sono uguali. La spiegazione è che il valore di α non è costante ma dipende dalla corrente, cosicché la caratteristica $I_C - I_B$ non è lineare per i valori più alti di I_C . Inoltre, per l'effetto Early, crescendo la corrente all'aumentare della tensione, le curve $I_C - V_{CE}$ non sono orizzontali. Siccome la caratteristica $I_C - I_B$ è una linea retta nella zona normale di lavoro, il guadagno in questa zona è praticamente costante, come è indicato anche in figura 15, sebbene si abbia una piccola distorsione di ampiezza con pieno pilotaggio, per le ragioni dette prima. La pendenza della caratteristica di ingresso (terzo quadrante) è $\text{tang } \psi = -v_{be} / -i_b$, con $-V_{CE}$ costante, cioè con $v_{ce} = 0$. Essa rappresenta l'impedenza incrementale d'ingresso del transistor nella configurazione ad emettitore comune con l'uscita in corto circuito per la corrente alternata. Essa corrisponde quindi a h_{ie} oppure h_{4e} nel sistema di parametri h . La caratteristica d'ingresso mostra una notevole curvatura, la quale indica che la resistenza statica d'ingresso varia grandemente col punto di lavoro. La pendenza della caratteristica di reazione (quarto quadrante) è $\text{tang } \delta = -v_{be} / -v_{ce}$, per $i_b = 0$, ed è chiamata fattore di reazione. Essa corrisponde a h_{12e} o h_{re} nel sistema dei parametri h . Per la configurazione ad emettitore comune il suo valore è piuttosto piccolo e può quindi essere trascurato in molte applicazioni pratiche.

Infine, la pendenza della caratteristica d'uscita, (primo quadrante) è la tangente dell'angolo τ nel punto di lavoro scelto. Essa è $\text{tang } \tau = -i_c / -v_{ce}$

per $i_b = 0$, e dà l'ammettenza di uscita del transistor per corrente di base $-I_B$, cioè con l'uscita aperta per la corrente alternata. Essa corrisponde inoltre ai parametri h_{22} o h_{oe} .

La resistenza d'uscita determinata dalla figura 18, diminuisce all'aumentare della corrente di collettore $-I_C$. Questo si può anche vedere dalla figura 15.

Le caratteristiche di trasferimento e di uscita sono riprodotte di nuovo nella figura 19, dove è indicata la zona di controllo del transistor. Si osserverà che la tensione di ginocchio, che limita nella parte inferiore l'escursione della tensione nelle applicazioni per amplificatori, ha un va-

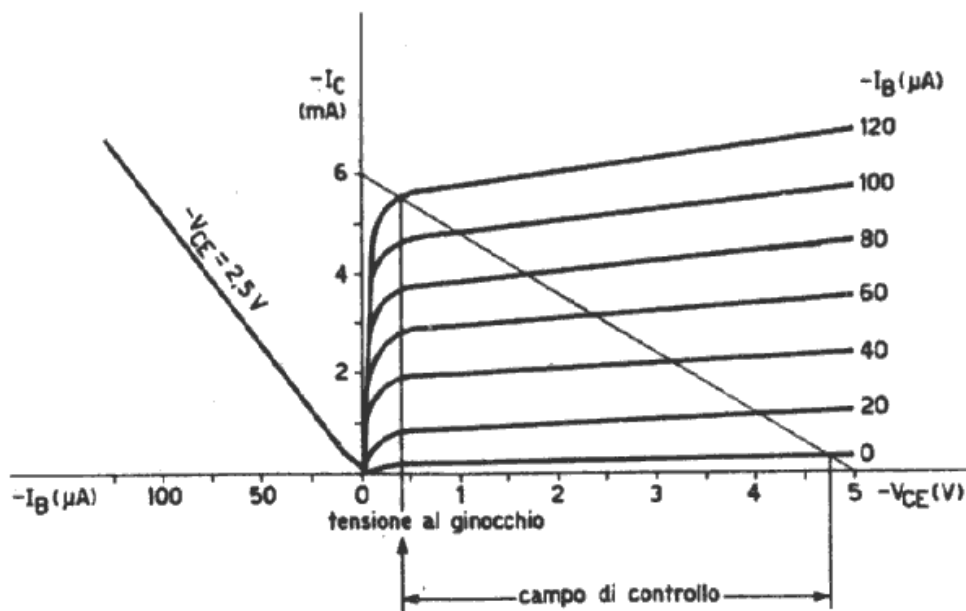


Fig. 19 - Grafico indicante le limitazioni della zona di controllo dovute alla tensione di ginocchio ed alla tensione di dispersione di collettore.

lore di alcuni decimi di volt solamente, rispetto a quella di un pentodo termoionico ad alto vuoto, che è di alcuni volt. Un transistor può quindi essere controllato nelle applicazioni di amplificazione fino ad una tensione molto più bassa che non un pentodo. Nelle applicazioni di commutazione, dove la condizione « on » o di conduzione corrisponde approssimativamente al ginocchio della caratteristica di uscita, il basso valore della tensione di ginocchio significa che la caduta di tensione è molto piccola cosicché la resistenza dell'« interruttore » e quindi la potenza dissipata è molto piccola.

La parte alta della zona di controllo è limitata dalla corrente di dispersione

del collettore cioè dalla corrente residua di collettore che scorre quando il valore della corrente di controllo (d'ingresso) $-I_B$ è zero.

La relazione esistente tra le **correnti di dispersione** è indicata in figura 20, dove queste correnti sono tracciate in funzione della tensione base-emettitore V_{BE} . Per la configurazione a base comune la corrente di dispersione di collettore per corrente d'ingresso nulla ($I_E = 0$) è indicata con $-I_{CBO}$, e la corrente di dispersione nel diodo emettitore-base, quando l'uscita è aperta ($I_C = 0$) è indicata con I_{EBO} . Per la configurazione con emettitore comune quando la corrente di base è zero la corrente di dispersione, indicata con I_{CEO} scorre in entrambi i diodi emettitore-base e collettore-base. Come si è detto prima, le correnti di dispersione dipendono dalla temperatura.

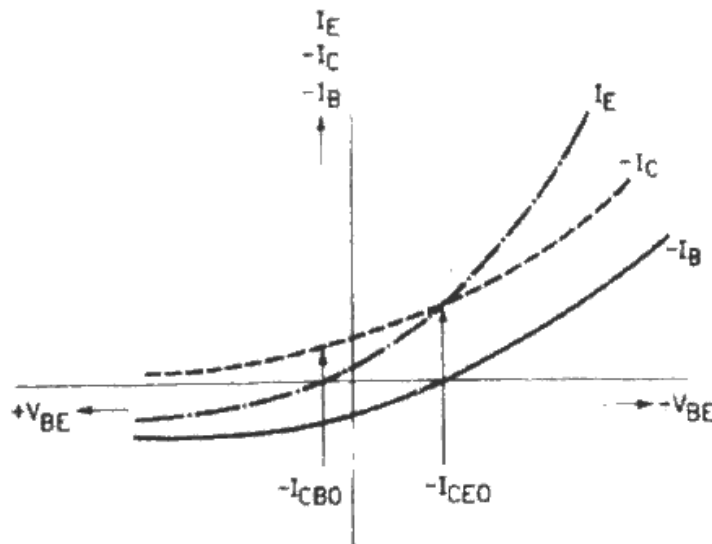


Fig. 20 - Correnti di dispersione di un transistor, tracciate in funzione della tensione base-emettitore.

Le caratteristiche di un transistor tipo OC 71 nella configurazione a base comune sono rappresentate in figura 21, dove i parametri della caratteristica di uscita sono dati in funzione della corrente di ingresso, che in questo caso è la corrente di emettitore I_E . Un confronto tra le curve per emettitore comune e per base comune mostra che, per il circuito a base comune:

- 1) La pendenza della caratteristica di trasferimento $-I_C = f(I_E)$ corrisponde a un guadagno di corrente all'incirca unitario.

- 2) La pendenza della caratteristica d'ingresso $V_{EB} = f(I_E)$ indica il valore molto più basso della resistenza di ingresso.
- 3) La pendenza della caratteristica di uscita $-I_C = f(-V_{CB})$ indica un valore molto più alto della resistenza di uscita.
- 4) La corrente di collettore continua a scorrere anche quando la tensione collettore-base è zero.

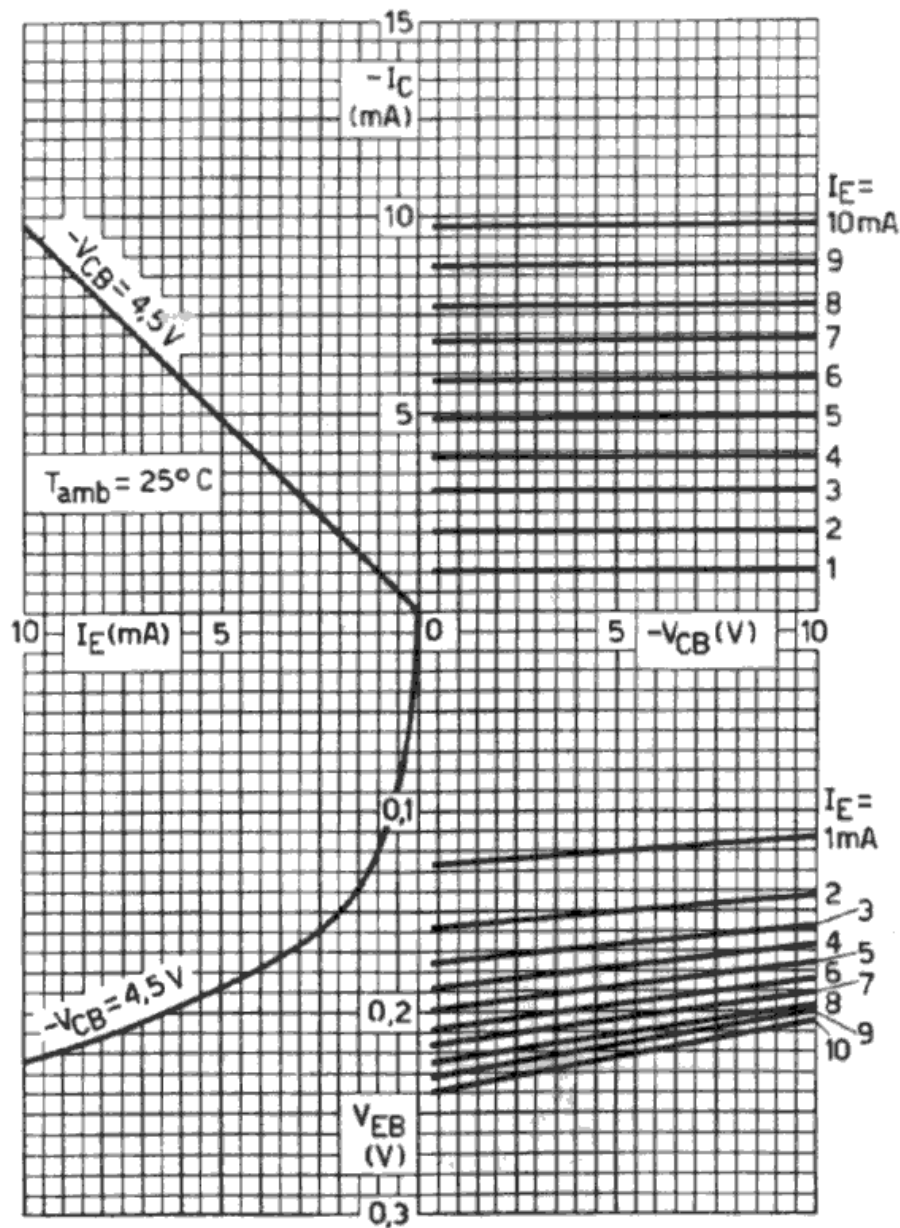


Fig. 21 - Curve caratteristiche di un transistor con base comune.

SIGNIFICATO DEI SIMBOLI IMPIEGATI NEI DATI TECNICI DEI TRANSISTOR

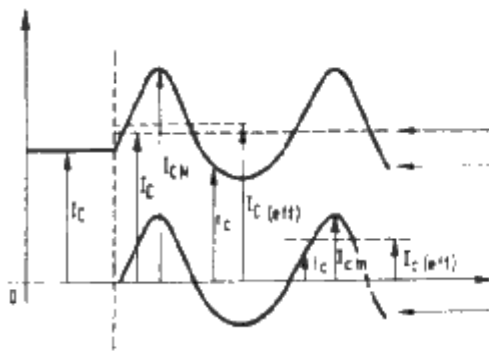
Elettrodi

- B oppure b indica la base del transistor
- E oppure e indica l'emettitore del transistor
- C oppure c indica il collettore del transistor

Circuiti fondamentali

- Circuito con emettitore comune: il circuito d'ingresso e quello d'uscita hanno in comune l'emettitore.
- Circuito con base comune: il circuito d'ingresso e quello d'uscita hanno in comune la base.
- Circuito con collettore comune: il circuito d'ingresso e quello d'uscita hanno in comune il collettore.

Nel grafico che segue è rappresentata una corrente variabile di collettore, la sua componente costante (corrente continua) e la sua componente variabile (corrente alternata). Il simbolismo adottato è valido anche per le correnti e le tensioni degli altri elettrodi.



Componente costante
(valore medio)

Corrente totale
(Indici con lettere maiuscole)

Componente variabile
(Indici con lettere minuscole)

I_C	Valore medio	} della corrente totale
I_{CM}	Valore di cresta	
$I_{C(eff)}$	Valore efficace	
i_C	Valore istantaneo	

i_{om}	Valore di cresta	} della componente variabile
$i_{o(eff)}$	Valore efficace	
i_o	Valore istantaneo	

Tensioni

Le tensioni vengono rappresentate dai simboli V oppure v con l'aggiunta di due indici.

Il primo indice indica l'elettrodo sul quale viene misurata la tensione. Il secondo indice indica l'elettrodo al quale viene riferita la misura (in generale è l'elettrodo comune).

Le tensioni di alimentazione vengono indicate ripetendo il primo indice. In questo caso l'elettrodo al quale viene riferita la precedente misura viene indicato mediante un terzo indice. Nel caso ciò desse luogo ad ambiguità la tensione di alimentazione può essere indicata mediante l'indice S .

V_{BE} oppure V_{be}	tensione di base (emettitore comune)
V_{CB} oppure V_{cb}	tensione di collettore (base comune)
V_{CCB}	tensione di alimentazione del collettore (base comune)
V_{CCE}	tensione di alimentazione del collettore (emettitore comune)
V_{CE} oppure V_{ce}	tensione di collettore (emettitore comune)
V_i	tensione alternata d'ingresso
V_{im}	valore di cresta della tensione alternata d'ingresso
V_o	tensione alternata d'uscita
V_{hf}	tensione alta frequenza
V_{osc}	tensione dell'oscillatore
V_S oppure V_{CC}	tensione di alimentazione
V_{CEK}	tensione di collettore al ginocchio della curva.

Correnti

È positiva una corrente che circola nel senso convenzionale dal circuito esterno verso l'elettrodo.

I_B oppure I_b	corrente di base
I_C oppure I_c	corrente di collettore
I_E oppure I_e	corrente di emettitore
I_i	corrente alternata d'ingresso
I_{im}	valore di cresta della corrente alternata d'ingresso
I_o	corrente alternata d'uscita
I_S	corrente della sorgente di alimentazione.

Correnti di dispersione

Le correnti di dispersione vengono indicate mediante tre indici. I primi due indicano gli elettrodi attraverso i quali passa la corrente misurata, il terzo sta ad indicare che nel restante elettrodo la corrente è nulla ossia il circuito è aperto.

- I_{CEO} corrente di dispersione di collettore con circuito di base aperto
 I_{BCO} corrente di dispersione di collettore con circuito di emettitore aperto
 I_{EBO} corrente di dispersione di emettitore con circuito di collettore aperto.

Coefficiente di amplificazione di corrente e frequenza di taglio

- h_{fb} coefficiente di amplificazione di corrente (base comune)
 h_{fe} coefficiente di amplificazione di corrente (emettitore comune)
 α_{FB} oppure α_{fb} coefficiente di amplificazione di corrente (base comune)
 α_{FE} oppure α_{fe} coefficiente di amplificazione di corrente (emettitore comune)
 f_{α_b} frequenza di taglio di α_{fb} (è la frequenza alla quale il valore di α_{fb} è di 3 dB inferiore al valore in corrente continua α_{FB})
 f_{α_e} frequenza di taglio di α_{fe} (è la frequenza alla quale il valore di α_{fe} è di 3 dB inferiore al valore in corrente continua α_{FE}).

Potenze

- P_C potenza dissipata al collettore
 P_o potenza di uscita dal collettore
 P_i potenza di ingresso
 P_o potenza di uscita
 P_S potenza della sorgente di alimentazione

Resistenze

- R_B oppure R_b resistenza esterna di base
 r_b resistenza interna equivalente di base
 R_{BE} oppure R_{be} resistenza esterna tra base ed emettitore

R_C oppure R_c	resistenza di carico di collettore
r_o	resistenza interna equivalente di collettore
$R_{c'e}$	resistenza di carico di uno stadio push-pull (da collettore a collettore)
$R_{c'e}$	resistenza collettore/emettitore
R_E oppure R_e	resistenza esterna di emettitore
r_e	resistenza interna equivalente di emettitore
r_m	resistenza interna equivalente di trasferimento

Temperature

T_{amb}	temperatura ambiente
T_j	temperatura alla giunzione
ΔT_j	variazione della temperatura alla giunzione

Parametri h

base comune:

h_{11b}	impedenza d'ingresso, uscita in corto circuito
h_{12b}	rapporto di reazione di tensione, ingresso aperto
h_{21b}	coefficiente di amplificazione di corrente, uscita in corto circuito
h_{22b}	ammettenza di uscita, ingresso aperto

emettitore comune:

h_{11e}	impedenza d'ingresso, uscita in corto circuito
h_{12e}	rapporto di reazione di tensione, ingresso aperto
h_{21e}	coefficiente di amplificazione di corrente, uscita in corto circuito
h_{22e}	ammettenza di uscita, ingresso aperto

Parametri y

Base comune:

Y_{ib}	ammettenza d'ingresso	} uscita in corto circuito
g_{ib}	conduttanza d'ingresso	
C_{ib}	capacità d'ingresso	
φ_{ib}	angolo di fase dell'ammettenza d'ingresso	

y_{ob}	ammettenza di uscita	}	ingresso in corto circuito
g_{ob}	conduttanza di uscita		
c_{ob}	capacità di uscita		
φ_{ob}	angolo di fase dell'ammettenza di uscita		

y_{rb}	ammettenza di reazione	}	ingresso in corto circuito
g_{rb}	conduttanza di reazione		
c_{rb}	capacità di reazione		
φ_{rb}	angolo di fase dell'ammettenza di reazione		

y_{fb}	ammettenza di trasferimento	}	uscita in corto circuito
g_{fb}	conduttanza di trasferimento		
c_{fb}	capacità di trasferimento		
φ_{fb}	angolo di fase dell'ammettenza di trasferimento		

Emettitore comune:

y_{ie}	ammettenza d'ingresso	}	uscita in corto circuito
g_{ie}	conduttanza d'ingresso		
c_{ie}	capacità d'ingresso		
φ_{ie}	angolo di fase dell'ammettenza d'ingresso		

y_{oe}	ammettenza di uscita	}	ingresso in corto circuito
g_{oe}	conduttanza di uscita		
c_{oe}	capacità di uscita		
φ_{oe}	angolo di fase dell'ammettenza di uscita		

y_{re}	ammettenza di reazione	}	ingresso in corto circuito
g_{re}	conduttanza di reazione		
c_{re}	capacità di reazione		
φ_{re}	angolo di fase dell'ammettenza di reazione		

y_{fe}	ammettenza di trasferimento	} uscita in corto circuito
g_{fe}	conduttanza di trasferimento	
c_{fe}	capacità di trasferimento	
φ_{fe}	angolo di fase dell'ammettenza di trasferimento	

Simboli vari

B	larghezza di banda
d	fattore di distorsione
F	fattore di fruscio misurato a 1000 Hz con un generatore di impedenza interna $Z_1 = 500 \Omega$
K	aumento della temperatura alla giunzione per unità di potenza dissipata (transistor in aria libera da 0 a 75 °C)
η	rendimento