

Il BJT come amplificatore di segnale

La via più semplice e immediata per comprendere il funzionamento del BJT come amplificatore di segnale è sicuramente quella grafica.

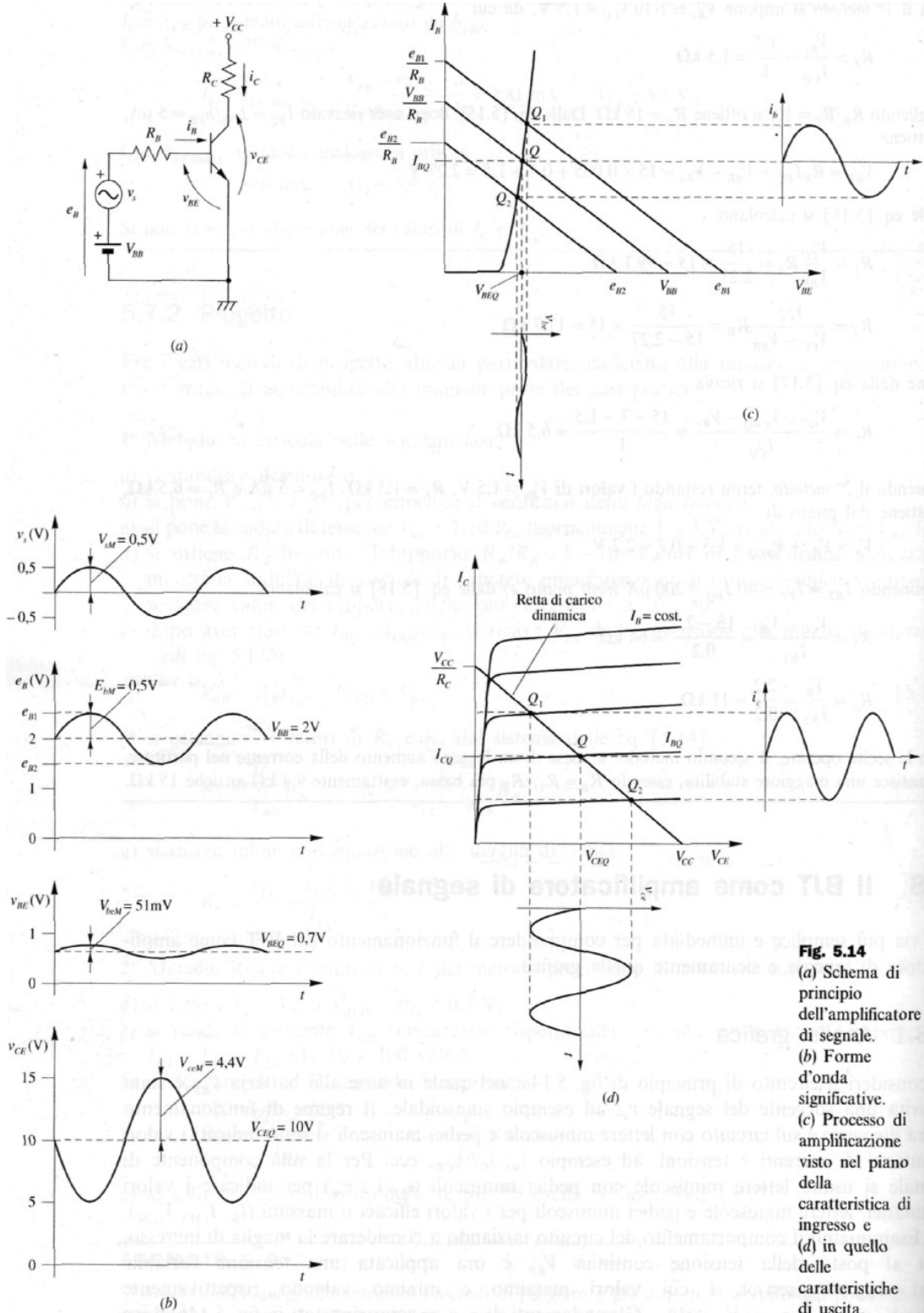


Fig. 5.14
 (a) Schema di principio dell'amplificatore di segnale.
 (b) Forme d'onda significative.
 (c) Processo di amplificazione visto nel piano della caratteristica di ingresso e
 (d) in quello delle caratteristiche di uscita.

1 Analisi grafica

Si consideri il circuito di principio di fig.5.14, nel quale in serie alla batteria V_{BB} è stata inserita una sorgente del segnale $v_s(t)$ ad es. sinusoidale. Il regime di funzionamento è ora *dinamico*. Esaminiamo il comportamento del circuito iniziando a considerare la maglia di ingresso. Qui al posto della tensione continua V_{BB} è ora applicata una tensione variabile $e_B(t) = V_{BB} + V_{sM} \sin \omega t$, i cui valori massimo e minimo valgono rispettivamente $e_{B1} = V_{BB} + V_{sM}$ e $e_{B2} = V_{BB} - V_{sM}$. Gli andamenti di v_s e e_B sono riportati in fig. 5.14, dove i valori sono esemplificativi. Sulla caratteristica di ingresso del BJT, rappresenta la retta di polarizzazione, anziché fissa, trasla al variare di v_s parallelamente a sé stessa, mantenendo costante la pendenza pari a $-1/R_B$ ed assumendo le posizioni estreme indicate nel disegno. Di conseguenza il punto di funzionamento si sposta fra Q_1 e Q_2 attorno al punto di riposo Q . Poiché nell'intervallo considerato la caratteristica può ritenersi circa rettilinea (ciò risulta più vicino al vero per piccole variazioni attorno a Q , ovvero *per piccoli segnali*), il funzionamento è sostanzialmente lineare e sia i_B che v_{BE} risultano sinusoidali.

La maglia di uscita del circuito a sua volta consente di scrivere l'espressione

$$V_{CC} = v_{CE} + R_c i_c \quad [5-19]$$

che rappresenta sulle caratteristiche del BJT una retta, detta *retta di carico dinamica*, con pendenza $-1/R_c$ e coincidente in questo caso con la retta di carico statica.

Sulle caratteristiche di uscita del BJT è riportata la retta di carico dinamica e su di essa sono disegnati gli spostamenti del punto di lavoro Q al variare di i_B . Se le caratteristiche sono sufficientemente parallele ed equidistanti per uguali variazioni di i_B , il funzionamento può considerarsi lineare e sia i_c che v_{ce} risultano sostanzialmente sinusoidali.

In definitiva in regime dinamico le correnti e le tensioni del transistor possono essere espresse nel seguente modo

$$\begin{aligned} v_{BE}(t) &= V_{BEQ} + \Delta v_{BE} = V_{BEQ} + v_{be} = V_{BEQ} + V_{beM} \sin \omega t \\ i_B(t) &= I_{BQ} + \Delta i_B = I_{BQ} + i_b = I_{BQ} + I_{bM} \sin \omega t \\ i_C(t) &= I_{CQ} + \Delta i_C = I_{CQ} + i_c = I_{CQ} + I_{cM} \sin \omega t \\ v_{CE}(t) &= V_{CEQ} + \Delta v_{CE} = V_{CEQ} + v_{ce} = V_{CEQ} - V_{ceM} \sin \omega t \end{aligned} \quad [5.20]$$

dove con Δi_B , Δv_{BE} , ..., ecc. si intendono le variazioni di i_B , v_{BE} , ..., ecc. rispetto al valore statico I_{BQ} , V_{BEQ} , ..., ecc.

Osservando le forme d'onda di fig. 5.14b si può notare sia lo sfasamento di 180° fra v_{be} e v_{ce} , ossia fra la tensione di ingresso e quella di uscita del transistor, sia l'effetto amplificatore del circuito. In generale si definiscono come *amplificazioni di corrente* A_i e di *tensione* A_v i rapporti

$$|A_i| = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} = \frac{i_c}{i_b} = \frac{I_{cM}}{I_{bM}} \quad |A_v| = \frac{\Delta v_{CE}}{\Delta v_{BE}} = \frac{v_{ce}}{v_{be}} = \frac{V_{ceM}}{V_{beM}} \quad [5.21]$$

Con i valori esemplificativi indicati in fig. 5.14b l'amplificazione di tensione varrebbe $|A_v| = V_{ceM}/V_{beM} = 4,4/0,051 = 86$.

2 Metodo generale di analisi

Nello studio del BJT come *amplificatore di piccoli segnali* conviene distinguere il suo funzionamento *statico* da quello *dinamico*. Analizzati separatamente i due funzionamenti, il comportamento complessivo dell'amplificatore sarà fornito dalla sovrapposizione dei risultati parziali, secondo il ben noto *principio della sovrapposizione degli effetti*.

Funzionamento statico. Si considera il circuito amplificatore per la sola componente continua; il

segnale viene cortocircuitato ($v_s=0$) mentre viene considerata attiva la batteria di alimentazione. Eventuali condensatori presenti nel circuito sono trattati come circuiti aperti. L'analisi statica esamina quindi il BJT nel suo stato di quiete e fornisce i valori di tensioni e correnti relative al punto di funzionamento a riposo.

Funzionamento dinamico. Vengono considerate le sole variazioni di correnti e tensioni rispetto alla condizione di riposo. Pertanto il generatore di segnale v_s è considerato attivo mentre la batteria di alimentazione è considerata cortocircuitata. Eventuali condensatori sono a loro volta trattati come cortocircuiti rispetto al segnale.

Il BJT viene rappresentato con uno dei suoi *modelli equivalenti* per piccoli segnali. L'analisi dinamica fornisce quindi le sole componenti di segnale presenti nel circuito e permette di ottenere le amplificazioni di tensione e di corrente.

Modello del BJT per piccoli segnali

In funzionamento lineare la determinazione delle amplificazioni di corrente e di tensione, anziché graficamente, può essere fatta per via analitica, ricorrendo al *modello equivalente* per piccoli segnali. Diversi sono i modelli; fra i più utilizzati ricordiamo quello a *parametri h*.

1 Modello a parametri h_e

Il circuito equivalente a *parametri h* (*hybrid parameter*) riferito alla configurazione ad emettitore comune (CE) è illustrato in fig. 5.16. La resistenza h_{ie} inserita nel circuito d'ingresso rappresenta, con buona approssimazione, la resistenza differenziale della giunzione J_E . Il generatore dipendente di tensione $h_{re}v_{ce}$ tiene conto dell'effetto Early, ossia del fatto che la caratteristica di ingresso dipende, seppure in maniera piuttosto limitata, dalla tensione di uscita. Il circuito di uscita è costituito invece da un generatore quasi ideale di corrente proporzionale a quella di ingresso i_b , come si può dedurre dall'andamento circa orizzontale delle caratteristiche di uscita del dispositivo in zona lineare; h_{oe} è pertanto una conduttanza molto piccola.

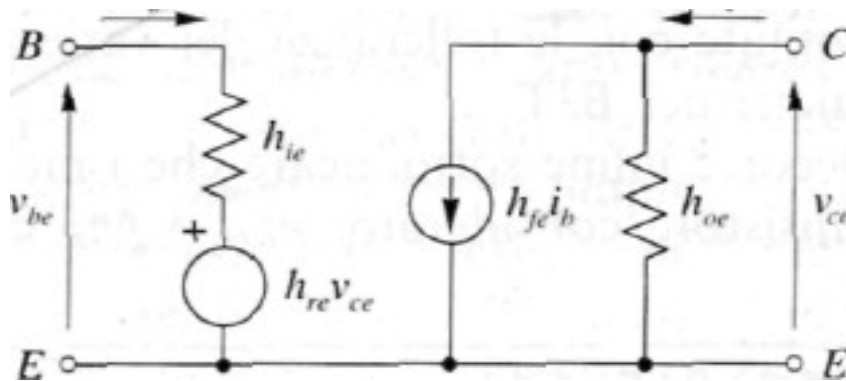


Fig. 5.16 Modello equivalente del BJT a parametri ibridi.

Dalle equazioni di funzionamento del circuito di fig. 5.16

$$\begin{aligned} v_{be} &= h_{ie}i_b + h_{re}v_{ce} \\ i_c &= h_{fe}i_b + h_{oe}v_{ce} \end{aligned} \quad [5.22]$$

si ricavano le definizioni dei parametri h_e (il pedice e si riferisce alla configurazione CE).

h_{ie} . È la *resistenza di ingresso con uscita in cortocircuito*. Il pedice i sta per *input*. Il suo ordine di grandezza abituale va dalle centinaia di Ω a 10 k Ω .

$$h_{ie} = \left. \frac{v_{be}}{i_b} \right|_{v_{ce}=0} \quad \text{o pi\`u in generale} \quad h_{ie} = \left. \frac{\Delta v_{BE}}{\Delta i_B} \right|_{v_{CE}=\text{cost.}=V_{CEQ}} \quad [5.23]$$

h_{re} . È il *fattore di reazione interna o amplificazione inversa di tensione a vuoto*; r sta per *reverse* e il suo valore è dell'ordine di $10^{-3} \div 10^{-4}$.

$$h_{re} = \left. \frac{v_{be}}{v_{ce}} \right|_{i_b=0} \quad \text{o pi\`u in generale} \quad h_{re} = \left. \frac{\Delta v_{BE}}{\Delta v_{CE}} \right|_{i_B=\text{cost.}=I_{BQ}} \quad [5.24]$$

h_{fe} . È l'*amplificazione di corrente di cortocircuito*; f sta per *forward (diretta)* e il suo valore è normalmente compreso tra 10 e 1000.

$$h_{fe} = \left. \frac{i_c}{i_b} \right|_{v_{ce}=0} \quad \text{o pi\`u in generale} \quad h_{fe} = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \right|_{v_{CE}=\text{cost.}=V_{CEQ}} \quad [5.25]$$

h_{oe} . È la *conduttanza di uscita con ingresso a vuoto*; o sta per *output* e il suo valore è compreso abitualmente tra 10 e 100 μS ($1/h_{oe} = 10 \div 100 \text{ k}\Omega$).

$$h_{oe} = \left. \frac{i_c}{v_{ce}} \right|_{i_b=0} \quad \text{o pi\`u in generale} \quad h_{oe} = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta v_{CE}} \right|_{i_B=\text{cost.}=I_{BQ}} \quad [5.26]$$

Si noti che i parametri sono definiti per un dato punto di funzionamento Q e variano con il punto stesso. I manuali spesso forniscono grafici che esprimono tale variazione. In generale si nota che al crescere di I_c , h_{ie} diminuisce mentre h_{oe} aumenta. Inoltre per BJT della stessa sigla si riscontra una forte dispersione dei valori dei parametri e spesso i costruttori si limitano a fornire il valore massimo e minimo di ciascuno, per un punto di lavoro precisato.

2 Modello approssimato generalizzato

Considerato il basso valore di h_{re} , il generatore dipendente $h_{re}v_{ce}$ del circuito di fig. 5.16 può normalmente essere trascurato. Molto spesso risulta trascurabile anche l'influenza della resistenza $1/h_{oe}$. In tal caso il modello di fig. 5.16 si trasforma in quello approssimato di fig. 5.17 che, per la sua semplicità, si presta bene ad essere utilizzato per l'analisi di tutte le configurazioni circuitali. Le approssimazioni che derivano dall'uso di questo circuito sono accettabili nella maggior parte dei casi pratici, specie se confrontate con le tolleranze dei vari componenti e con la dispersione stessa dei valori dei parametri del BJT.

Occorre infine sottolineare che i modelli equivalenti illustrati sono indipendenti dal tipo di transistor considerato, *nnp* o *pnp* che sia.

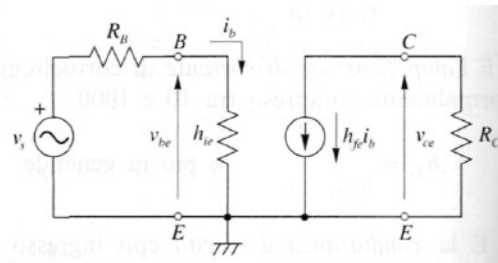
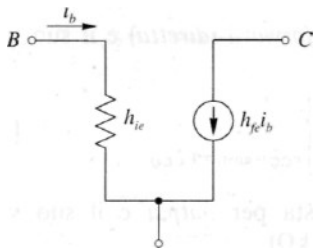


Fig. 5.17 Modello approssimato del BJT a parametri ibridi. Fig. 5.18 Schema equivalente dinamico del circuito di fig. 5.14