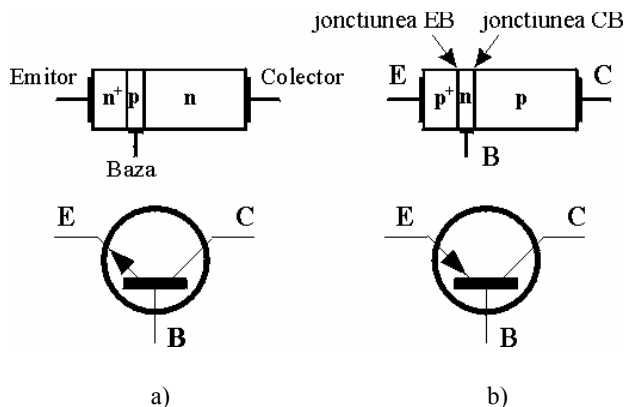


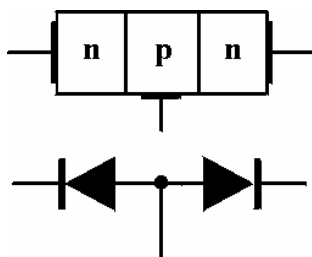
2.3. Tranzistorul bipolar

2.3.1. Structură și simboluri

Tranzistorul bipolar este un dispozitiv format din 3 straturi de material semiconductor și are trei electrozi conectați la acestea. Construcția și simbolurile sunt prezentate în figura 2.19. După modul de succesiune al straturilor există două tipuri de tranzistoare:



2.19 Structura și simbolul tranzistorului :
a) *nnp*; b) *pnp*



2.20 Structura *nnp* cu
zona mediană groasă

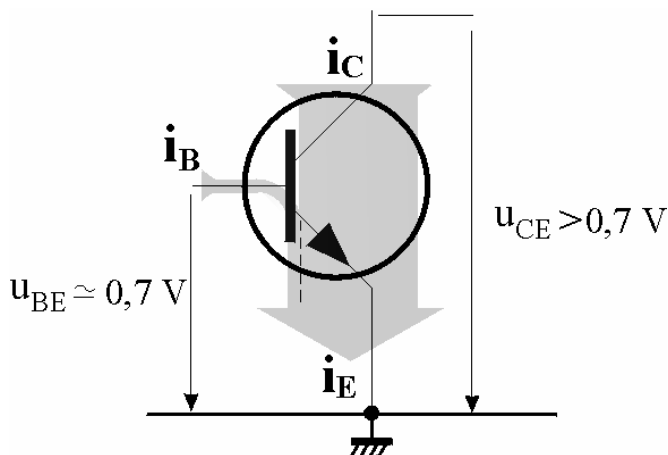
impurificată. Sensul săgeții este în același timp și sensul curentului principal care traversează tranzistorul atunci când acesta este în zona principală de funcționare, denumită zona activă. Tranzistorul se numește bipolar pentru că în mecanismul conducției sunt angrenați atât purtători majoritari cât și purtători minoritari.

- tranzistoare *nnp*;
- tranzistoare *pnp*.

Stratul median este foarte subțire iar electrodul corespunzător se numește **bază** și se notează cu B. Construcția tranzistorului nu este simetrică, straturile exterioare, deși de același tip, sunt diferite. Unul dintre straturi este mai subțire și mai puternic impurificat, având în consecință un număr mai mare de purtători. Pinul corespunzător se

numește **emitor** și se notează cu E. Al treilea strat este mai gros iar electrodul corespunzător se numește **colector** și se notează cu C.

Simbolurile celor două tipuri de tranzistoare se deosebesc doar după sensul săgeții care marchează emitorul. Semnul plus marchează zona mai puternic



2.21. Circulația curenților prin tranzistorul în zona activă.

2.3.2. Principiul de funcționare

Având trei straturi alternate de material semiconductor, tranzistorul bipolar are două joncțiuni $p-n$, joncțiunea bază-emitor (jBE) și joncțiunea bază-colector (jBC). Dacă baza ar fi groasă tranzistorul nu ar fi altceva decât un grup format din două diode conectate ca în figura 2.20. Oricum ar fi polaritatea tensiunii între emitor și colector, întotdeauna una dintre diode va fi polarizată invers și între cei doi electrozi nu va exista circulație de curent. În realitate baza este foarte subțire, permitând, în anumite condiții, printr-un efect numit efect de tranzistor, circulația curentului între colector și emitor. Pentru exemplificare s-a ales un tranzistor npn, figura 2.21.

Dacă jBE e polarizată direct (aici $u_{BE} > 0$) iar jBC e polarizată invers (aici $u_{BC} < 0$), adică tensiunea colector emitor este pozitivă și mai mare decât cea bază-emitor, de asemenea pozitivă și de aproximativ 0.7 V, tensiunea unei joncțiuni polarizată direct, atunci suntem în zona activă și tranzistorul este traversat între colector și emitor de un curent principal, mare, care depinde de un curent mult mai mic, curent de comandă i_B , între bază și emitor.

2.3.3. Relații între curenți în zona activă

Considerând tranzistorul un nod de circuit cu trei ramuri care sunt terminalele tranzistorului, prima relație între curenții tranzistorului rezultă din prima teoremă a lui Kirchhoff și se scrie de obicei sub forma:

$$i_E = i_C + i_B. \quad (2.2)$$

Această relație este valabilă pentru toate zonele de funcționare ale tranzistorului.

O a doua relație este valabilă doar pentru zona activă și definește funcționarea tranzistorului drept generator de curent comandat în curent:

$$i_C = \beta i_B \quad (2.3)$$

β se numește factor de amplificare în curent, este un parametru important al tranzistorului și are valori cuprinse între zeci, pentru tranzistoarele de putere și sute, până la o mie, pentru tranzistoarele de mică putere. β este un parametru individual, este într-o prima aproximare constant, dar este diferit de la tranzistor la tranzistor, chiar și în cadrul aceluiași tip de tranzistoare. Mai mult, poate varia în cadrul aceluiași tip cu procente de ordinul sutelor. De exemplu, pentru unul dintre tranzistoarele de mică putere de uz general, tranzistorul BC 107, fabricantul dă o dispersie mare a factorului de amplificare, factor care este cuprins între 100 și 500.

Relația (2.3) arată că în zona activă curentul principal care traversează tranzistorul, i_C este mult mai mare și proporțional cu un curent de comanda, curentul i_B . Deoarece $i_C \gg i_B$, în relația (2.2) i_B se poate neglija, rezultând:

$$i_E \cong i_C \quad (2.4)$$

Trebuie precizat că și relația (2.3) este o relație simplificată, de fapt o relație mai precisă ține cont de curentul de saturație i_{CB0} al joncțiunii bază-colector, joncțiune polarizată invers în zona activă:

$$i_C = \beta i_B + i_{CB0} \quad (2.5)$$

O dată cu creșterea temperaturii curentul i_{CB0} crește de asemenea, exponențial, astfel încât simplificarea nu se poate face decât la temperaturi ce nu depășesc 30 grade Celsius.

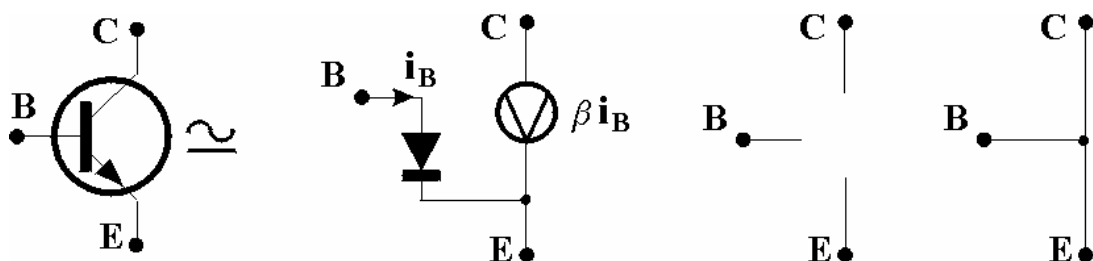
2.3.4. Zone de funcționare și scheme echivalente

Funcționarea tranzistorului depinde decisiv de modul cum sunt polarizate cele două joncțiuni ale sale, joncțiunea BE și joncțiunea BC. Există două posibilități pentru o joncțiune, polarizare directă și inversă astfel că tranzistorul poate fi polarizat în 4 moduri distincte. Pentru fiecare mod de polarizare corespunde o zonă de funcționare a tranzistorului. În fiecare zonă tranzistorul are o comportare total diferită față de comportarea în oricare dintre celelalte zone

Zona activă

Este zona în care tranzistorul se află în majoritatea aplicațiilor analogice. Tranzistorul este parcurs de un curent principal, $i_C \cong i_E$, proporțional cu un curent de comandă mult mai mic, curentul de bază, i_B . Schema echivalentă simplificată pentru zona activă este prezentată în figura 2.22 a. Între bază și emitor tranzistorul este echivalent cu o diodă, fiind valabile schemele echivalente pentru diode, iar între colector și emitor tranzistorul este echivalent cu un generator de curent, de valoare:

$$i_C = \beta i_B.$$



a) În zona activă b) În zona de blocare c) În saturatie

2.22 Scheme echivalente simplificate ale tranzistorului bipolar

Zona de blocare.

Această zonă se atinge prin micșorarea tensiunii între bază și emitor sub pragul de deschidere al joncțiunii, deci sub 0,7 V, dar în multe situații blocarea se face prin polarizarea inversă a joncțiunii. Dacă se neglijează curenții de saturație ai joncțiunilor atunci toți curenții prin tranzistor sunt zero. Curentul principal este întrerupt. Tranzistorul poate fi echivalat cu rezistența infinită sau contact deschis între toate cele trei terminale (fig. 2.22 b).

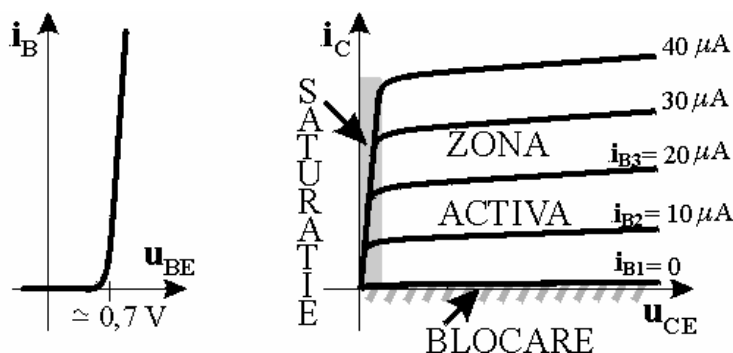
Zona de saturație.

Un tranzistor este adus în zona de saturație prin mărirea curentului de comandă și implicit a curentului principal până la o limita la care tensiunea între colector și emitor scade sub 0,7 V, deci potențialul colectorului devine mai mic decât al bazei. Din acest moment j_{CE} este polarizată direct. În practică tensiunea colector-emitor nu poate fi scăzută sub o valoare de 0,2 până la 0,5 volți. Din momentul intrării în saturație curentul principal rămâne la valoarea de saturație și nu mai este proporțional

cu acela de comanda, i_B . Curentul i_B poate să crească în continuare dar nu mai influențează curentul principal. Dacă se neglijează căderile de tensiune pe joncțiunile deschise, tranzistorul este echivalent cu un nod de circuit (figura 2.22 c.)

Caracteristici grafice

La fel ca în cazul diodei, și comportarea tranzistorului poate fi descrisă prin relații analitice. Acestea se numesc relațiile Ebers-Moll și dau dependența curenților de colector și de emitor în funcție de tensiunile pe joncțiunile tranzistorului ca o sumă de



a) Caracteristica de intrare

b) Caracteristicile de iesire

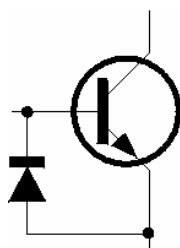
2.23. Caracteristicile grafice ale tranzistorului

exponențiale. În calculul curent al circuitelor cu tranzistoare aceste relații se evită deoarece sunt greu de utilizat. Se preferă liniarizarea circuitelor cu ajutorul schemelor echivalente iar uneori se folosesc metode grafice. Producătorii furnizează în cataloagele lor o multitudine de caracteristici grafice sau de familii de caracteristici grafice.

Două dintre ele sunt mai importante.

Prima este **caracteristica de intrare** care leagă mărimile din spațiul de intrare al tranzistorului, care este spațiul bază-emitor. Este vorba de curentul de bază și de tensiunea bază-emitor și caracteristica de intrare este dependența i_B funcție de u_{BE} prezentată în figura 2.23 a.

Se observă că aceasta este similară cu caracteristica grafică a diodei semiconductoare. Întrădevăr, spațiul bază-emitor este o joncțiune $n-p$ iar tranzistorul se comportă aici asemănător cu o diodă. Există și pentru tranzistor o tensiune de deschidere a bazei situată în jurul a 0,6-0,7V. Există, de asemenea o limită maximă pentru curentul de bază cât și una pentru tensiunea inversă bază-emitor. Cea din urmă este de obicei mică, în jur de 5 volți și atunci când este necesar tranzistoarele sunt de obicei protejate împotriva depășirii acestei valori limită, cu ajutorul unei diode conectate ca în figura 2.24.



2.24 Protecția tranzistorului la tensiune inversă baza-emitor

Mai trebuie menționat că temperatura influențează caracteristica de intrare a tranzistorului la fel cum influențează caracteristica unei diode (figura 2.11) și că tensiunea pe a doua joncțiune are și ea o mică influență asupra caracteristicii de intrare a tranzistorului, influență însă neglijabilă în marea majoritate a cazurilor.

A doua este familia **caracteristicilor de ieșire** ale tranzistorului care leagă mărimile din spațiul de ieșire al

tranzistorului care este de obicei spațiul colector-emitor. Este vorba despre curentul de colector, tensiunea colector-emitor iar caracteristicile de ieșire dau dependența i_C funcție de u_{CE} având curentul de bază i_B drept parametru. Familia de caracteristici de ieșire este prezentată în figura 2.23 b.

Pe figură sunt marcate și zonele de funcționare ale tranzistorului.

Zona de saturație corespunde tensiunilor u_{CE} mai mici decât 0,7 volți, cât se presupune că este valoarea minimă a tensiunii u_{BE} .

Zona de blocare este zona în care tensiunea u_{BE} este mai mică decât valoarea de 0,7 volți, tensiunea minimă de deschidere a bazei și în consecință curentul i_B este zero. Se poate observa că pentru $i_B = 0$ există totuși un curent de colector foarte mic. Acesta este denumit i_{CE0} și este neglijabil. La temperaturi ridicate acest curent poate însă deveni semnificativ.

Zona activă corespunde unor curenți de bază mai mari decât zero. Se poate observa faptul că tensiunea colector-emitor, u_{CE} , influențează puțin curentul de colector. Dacă i_B este constant și i_C este aproape constant. Dar i_C depinde mult de i_B , fiind proporțional cu acesta și mult mai mare. Constanta de proporționalitate este β , factorul de amplificare în curent al tranzistorului.

Modele liniare în regim dinamic

Schemele echivalente (modelele) prezentate anterior (figura 2.22) sunt utile atunci când se analizează circuite cu tranzistoare în regim de curent continuu sau lent variabil. La fel ca în cazul diodelor, tranzistoarele bipolare au modele liniare de semnal mic utilizate în analiza circuitelor în regim de curent alternativ (regim dinamic) pentru semnal mic. Trebuie precizat că un semnal este considerat mic dacă tensiunea sa este sensibil sub valoarea tensiunii sursei de alimentare a circuitului.

Două variante de modele sunt utilizate mai des și anume:

- modelul natural sau Giacoletto
- modelul de cuadripol cu parametrii hibridi (parametrii h)

Modelele în variante simplificate sunt prezentate în figura 2.25.

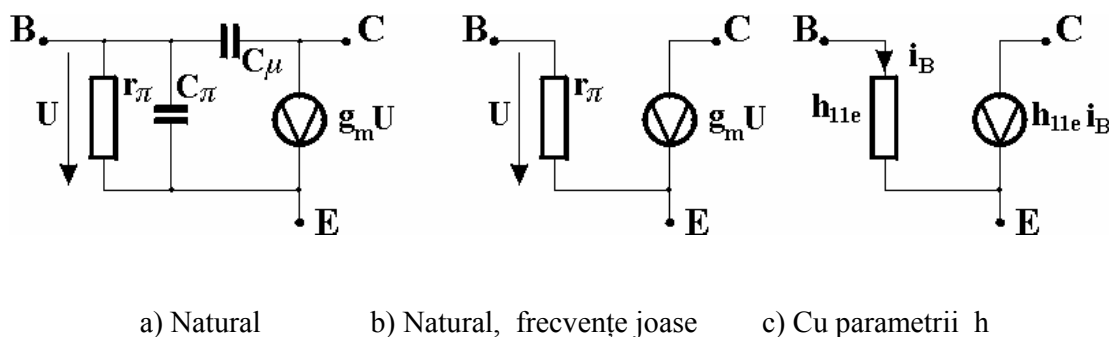


Fig. 2.25 Modele liniare de semnal mic

Unele valori ale elementelor din schemele echivalente sunt date în foile de catalog ale tranzistorului iar altele trebuie calculate. De exemplu, pentru schema Giacoletto de frecvențe joase trebuie cunoscute factorul β de amplificare în curent al

tranzistorului și componenta de curent continuu a curentului prin tranzistor, I_C . Atunci:

$$g_m = 40 I_C \quad (2.6)$$

$$r_\pi = \beta / g_m \quad (2.7)$$

La frecvențe înalte valorile condensatoarelor C_π și C_μ care corespund joncțiunilor BE și BC trebuie luate din foile de catalog.

La schema cu parametri h acești parametri sunt în cazul general mărimi complexe. În plus, există seturi diferite de parametri h în funcție de modul de conectare a tranzistorului în circuit. Ei sunt dați în foile de catalog iar în cazul frecvențelor joase și conexiunea de tip emitor comun pot fi aproximați și prin relațiile:

$$h_{11e} = r_\pi \quad (2.8)$$

$$h_{21e} = \beta \quad (2.9)$$

Circuite de polarizare a tranzistorului în zona activă

Pentru a utiliza proprietatea de amplificator de curent a tranzistorului acesta trebuie să fie în zona activă, ceea ce înseamnă a polariza corect joncțiunile

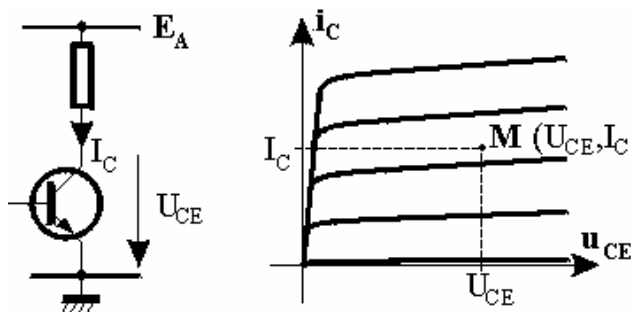


Fig. 2.26 Punctul de funcționare static al tranzistorului

tranzistorului și anume joncțiunea bazei direct iar a colectorului invers. În urma plasării tranzistorului în zona activă acesta este caracterizat în spațiul de ieșire prin două mărimi continue și anume curentul de colector I_C și tensiunea colector emitor U_{CE} . Aceste două mărimi definesc un punct M în planul caracteristicilor de ieșire ale tranzistorului, punct denumit **punct de funcționare static** (figura 2.26). Un circuit de

polarizare bun aduce tranzistorul într-un punct de funcționare dorit și în plus asigură stabilitatea acestuia atunci când anumiți factori interni sau externi se modifică. Factorii a căror modificare periclitează cel mai mult poziția punctului de funcționare sunt tensiunea de alimentare, temperatura și factorul de amplificare în curent β .

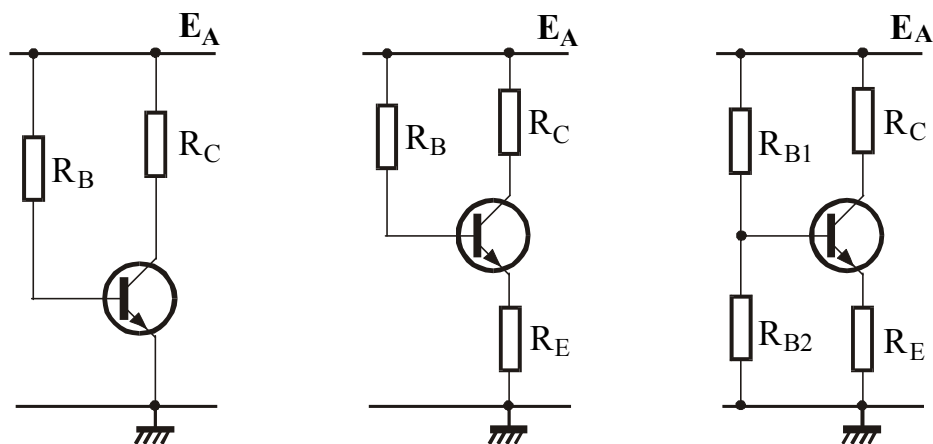
Influența variațiilor tensiunii de alimentare este limitată în circuitele cu tranzistoare prin utilizarea unor surse de tensiune stabilizate, cu variații nesemnificative. Mai dificil este cu ceilalți doi factori. Temperatura unui tranzistor se modifică atât din cauza variațiilor din mediul exterior cât și din cauza pierderilor Joule din tranzistor. Poate fi stabilizată dar cu cheltuieli prea mari. În ceea ce privește factorul de amplificare în curent, acesta are din fabricație o dispersie mare. De exemplu, pentru același tip de tranzistor o variație a acestuia de la tranzistor la tranzistor între 100 și 500 este uzuală.

Pentru polarizarea tranzistorului se pot utiliza două surse de tensiune, una pentru jBE și alta pentru jBC. În practică se folosește rar această variantă deoarece o polarizare potrivită se poate realiza cu o singură sursă.

Schema de polarizare simplă este prezentată în figura 2.27 a. Aceasta are două dezavantaje mari. Primul: schema este sensibilă puternic la variațiile de temperatură.

O variatie de cateva zeci de grade Celsius poate impinge tranzistorul din zona activa in zona de saturatie. Al doilea: tranzistorul poate fi situat ferm intr-un anumit punct de functionare doar daca factorul de amplificare in curent β este precis cunoscut. Dispersia β este mare. Se poate masura dar ar implica in plus scheme personalizate adica eforturi mari si in fond inutile fiindca exista alte solutii.

În primul rand, daca se adauga o rezistenta in emitorul tranzistorului (figura 2.27 b). atunci schema de polarizare atenueaza mult influenta temperaturii si in masura ceva mai mica pe cea a factorului de amplificare. Rezistenta R_E se mai numeste si rezistenta de stabilizare termica a punctului de functionare al tranzistorului.



a) Simpla b) Cu rezistenta de stabilizare termica c) Cu divizor rezistiv

Fig. 2.27 Circuite de polarizare a tranzistoarelor in zona activa

Schema de polarizare din figura 2.27 c asigura cea mai buna stabilitate a punctului de functionare, atat la variatia temperaturii cat si la aceea a factorului de amplificare β . Deoarece utilizeaza pentru polarizarea bazei divizorul rezistiv format din R_{B1} si R_{B2} se mai numeste schema de polarizare cu divizor rezistiv.