

2. SEMICONDUCTOARE

2.1 Purtători de sarcină în semiconductoare

2.1.1 Conductoare, izolatoare, semiconductoare

Din punctul de vedere al proprietății corpurilor solide de a fi străbătute de curent electric sub acțiunea unei tensiuni electrice continue aplicate din exterior, acestea se împart în trei mari categorii:

- conductoare (metalele);
- semiconductoare;
- izolatoare.

După cum s-a arătat anterior, în metale întâlnim o structură cristalină, unde în nodurile rețelei cristaline se găsesc plasați ioni pozitivi, în timp ce printre noduri se mișcă liber și haotic electroni. Apariția electronilor liberi se explică prin forța de legătură foarte slabă a electronilor de valență. Concentrația electronilor liberi este de ordinul 10^{28} m^{-3} și nu depinde practic de temperatură. Rezistența electrică a metalelor este determinată de frecvența ciocnirilor electronilor liberi cu ionii pozitivi din nodurile rețelei. Ionii sunt într-o permanentă vibrație termică în jurul unei poziții de echilibru. Cu creșterea temperaturii, amplitudinea oscilațiilor crește, ceea ce frânează mișcarea de ansamblu a electronilor liberi sub acțiunea unui câmp electric exterior. Așa se explică creșterea rezistenței (rezistivității) metalelor cu temperatura.

Din punct de vedere al conductivității σ ($\sigma = 1/\rho$), metalele înregistrează valori foarte mari, $\sigma_m \in [10^6, 10^8] \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$. Există și o categorie de materiale, numite izolatoare, pentru care conductivitatea este extrem de mică, $\sigma_i \in [10^{-12}, 10^{-20}] \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$. Electronii de valență ai atomilor acestor materiale sunt foarte puternic legați de atomi. Izolatoarele nu conduc curentul electric deoarece în interiorul lor, practic, nu există purtători liberi de sarcină electrică. Aceste materiale, cum ar fi mica, materiale plastice, sticla, ceramica, marmura, hârtia, cauciucul etc. sunt foarte folosite în electrotehnică în general pentru a realiza diferite izolații electrice.

Între metale și izolatoare, din punct de vedere al conductivității, se plasează semiconductoarele, pentru care $\sigma_s \in [10^4, 10^{-8}] \Omega^{-1}m^{-1}$. Spre deosebire de metale, la semiconductoare, conductivitatea crește puternic cu temperatura (absolută), așa cum se indică în fig. 2.1.

La temperaturi foarte coborâte, semiconductoarele sunt izolatoare, iar la temperaturi ridicate sunt conductoare destul de bune. În categoria semiconductoarelor intră o mare varietate de substanțe: oxizi, compuși, elemente chimice ca siliciul, germaniul, seleniul, etc. În dispozitivele electronice semiconductoare, cele mai utilizate materiale sunt cristalele elementelor tetravalente Ge și Si și a unor compuși intermetalici, îndeosebi GaAs (arseniură de galiu).

În cazul semiconductoarelor, electronii de valență sunt legați de atom mai slab decât la materialele izolatoare. Aceste legături pot fi rupte dacă electronii primesc o energie suficientă devenind astfel electroni liberi. Pentru trecerea electronilor din stadiul de electroni legați de atom în starea de electroni liberi, trebuie transmisă o energie minimă ΔW , numită energie de activare. Pentru semiconductoare, energia de activare se plasează în domeniul 0,025 ... 3 eV. Fiecare material semiconductor în parte este caracterizat de o anumită valoare a energiei de activare. Astfel, pentru Ge avem $\Delta W = 0,72$ eV, pentru Si, $\Delta W = 1,1$ eV, etc. Folosind același criteriu, al energiei de activare, putem constata că la metale, $\Delta W = 0$, iar la izolatori, $\Delta W = 3 \dots 10$ eV. Energia de activare la metale fiind nulă, la orice temperatură numărul electronilor liberi este același. În cazul izolatoarelor, energia de activare fiind foarte mare, prin încălzire, practic nu apar purtători liberi.

Datorită valorilor mici, energia de activare poate fi transmisă electronilor de valență din materialele semiconductoare de energia de agitație termică a ionilor rețelei cristaline. Spre deosebire de metale, cu creșterea temperaturii în semiconductoare crește numărul electronilor liberi. De exemplu, la Si pur, concentrația electronilor liberi crește de la $10^{17} m^{-3}$ (la temperatura camerei) până la $10^{24} m^{-3}$, la temperatura de 700 °C (legea 3/2).

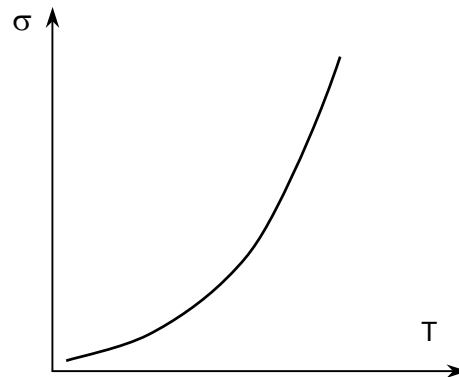


Fig. 2.1 Variația cu temperatura a conductivității semiconductoarelor

2.1.2 Purtători de sarcină în semiconductoare. Semiconductoare intrinseci

La semiconductoare este caracteristic faptul că la conducție participă pe lângă electronii liberi (de conducție) și electronii de valență, rămași legați de atomii din rețeaua cristalină. Pentru înțelegerea acestui tip de conducție analizăm comportarea electronilor dintr-un cristal de germaniu. Atomul de germaniu are patru electroni de valență. În rețeaua cristalinului de germaniu, fiecare atom este înconjurat echidistant de patru atomi. Fiecare electron de valență al unui atom formează o pereche cu un electron de valență din atomul vecin. Electronii devin comuni ambilor atomi. Acest tip de legătură, caracterizată prin punerea în comun a electronilor de valență între atomii vecini, se numește **legătură covalentă**. În fig. 2.2 *a* se reprezintă modelul spațial al legăturilor unui atom de germaniu din rețeaua cristalină, iar în fig. 2.2 *b* modelul plan (simplificat) al legăturilor covalente dintre atomii de germaniu.

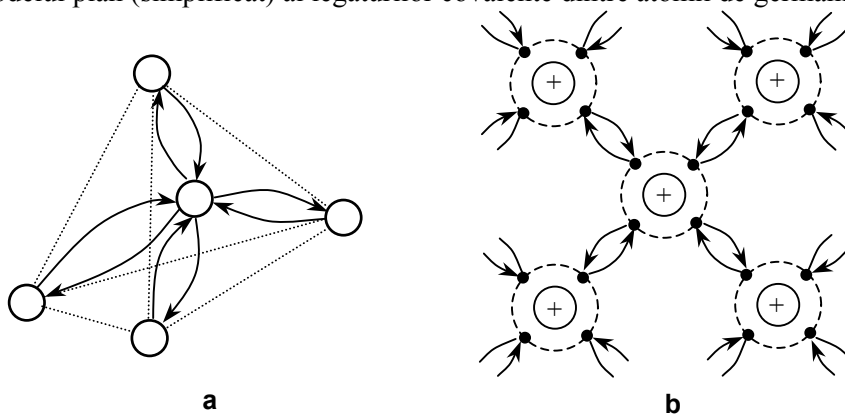


Fig. 2.2 *a) Modelul spațial al legăturilor unui atom dintr-un cristal de germaniu pur; b) Legăturile covalente ale cristalului de germaniu pur (reprezentare simplificată în plan a modelului spațial)*

Starea legăturilor din fig. 2.2 corespunde temperaturilor foarte scăzute, când cristalul se comportă ca un izolator aproape perfect. La temperaturi mai înalte, datorită caracterului fluctuant al energiei de agitație termică, o parte din electronii din legăturile covalente pot deveni electroni liberi, primind o energie (cel puțin) egală cu energia de activare. Electronii eliberați din atomii neutri lasă în locurile pe care le părăsesc "goluri", adică legături covalente nesatisfăcute. Sub acțiunea unui câmp electric exterior, electronii din unele legături covalente ale atomilor vecini

pot "umple" aceste "goluri". Ca urmare, în atomii de unde au plecat rămân alte "goluri". După apariția unui "gol", un electron dintr-un atom vecin îl umple, lăsând în urma lui alt gol. Prin urmare, are loc o deplasare a electronului legat (de valență) într-un sens și a golului în sens contrar. În acest fel, golurile se comportă ca niște particule fictive, cu sarcină pozitivă $+e$ și masă m_p , care se deplasează prin cristal și contribuie, alături de electronii liberi, la conducția electrică.

Mișcarea electronilor liberi, eliberați din legăturile covalente, se poate reprezenta printr-o mișcare clasică, supusă legilor mecanicii newtoniene, sub acțiunea forțelor externe (câmpuri electrice exterioare), a unei particule fictive, numită electron de conducție. Acesta are sarcina electrică $-e$ și o masă m_n . În m_n se include efectul câmpului electric periodic, datorat ionilor rețelei cristaline, electronul fiind supus doar forțelor externe, macroscopice.

În concluzie, în semiconductoare participă la conducție două tipuri de purtători de sarcină mobilă: electronii (negativi) și golurile (pozitive).

Într-un semiconductor pur, la echilibru termic, purtătorii mobili apar numai prin generarea termică a perechilor electron-gol. În acest fel, vor rezulta tot atâtea electroni de conducție câte goluri.

Semiconductorul în care concentrația de electroni este egală cu cea de goluri se numește *semiconductor intrinsec*, iar concentrația respectivă n_i , *concentrația intrinsecă*:

$$n_0 = p_0 = n_i \quad (2.1)$$

unde n_0 și p_0 reprezintă concentrațiile de electroni, respectiv de goluri, în semiconductorul pur, la echilibru termic. Pentru o temperatură dată, n_0 și p_0 sunt mărimi constante care depind de natura semiconductorului pur respectiv.

2.2 Semiconductoare cu impurități. Conductivitatea electrică a unui semiconductor cu impurități

2.2.1 Semiconductoare cu impurități

Tipul conducției electrice într-un semiconductor poate fi determinat și de prezența și de natura atomilor străini (impurități) în rețeaua sa cristalină. Procesul (tehnologic) de impurificare a unui semiconductor se numește **dopare** (sau **dotare**). Nivelele normale de dopare sunt foarte mici, de ordinul un atom de impuritate la $10^4 \dots 10^7$ atomi de semiconductor din cristal.

În rețeaua cristalină se pot introduce două tipuri de impurități:

a) dacă în cristalul de germaniu se introduc atomi pentavalenți (de exemplu, arseniu), numai 4 din cei 5 electroni de valență se leagă covalent cu atomii vecini

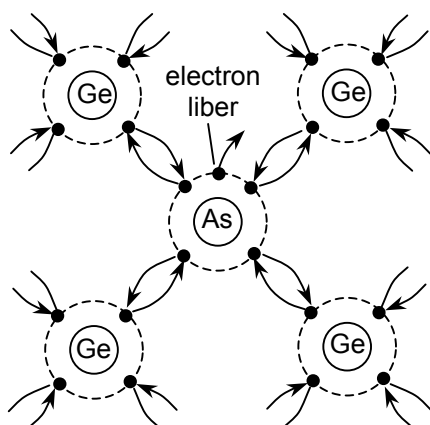


Fig. 2.3 Legăturile covalente în cristalul de germaniu, în care un atom de germaniu a fost înlocuit cu un atom de impuritate pentavalent (arseniu)

de germaniu, iar cel de-al cincilea se desprinde de atomul de impuritate și devine electron liber (fig. 2.3). Pentru ca el să devină electron de conducție, este suficientă o energie în jur de 0,01 eV, la Ge, respectiv 0,05 eV, la Si, capabilă să-l desprindă de atom. La temperatura camerei, practic toți acești ai 5-lea electroni devin electroni de conducție. Electronul cedat nu lasă însă o legătură nesatisfăcută; atomul de arseniu (As) devine ion pozitiv (devenind purtător de sarcină imobil). Impuritățile pentavalente creează deci, în rețeaua cristalină a germaniului un singur fel de purtători mobili de sarcină: electroni. Impuritățile care permit astfel de cedări de electroni liberi se numesc *donori*, iar

semiconductorul cu atomi de impuritate donori se numește *semiconductor extrinsec de tip n* (negativ).

În semiconductorul extrinsec de tip n, n_{n0} reprezintă concentrația totală de electroni liberi la echilibru termic, proveniți atât de la atomii de impuritate, cât și datorită agitației termice a rețelei, care generează perechi electron-gol. În acest caz, $n_{n0} \gg p_0$ și semiconductorul are conductivitatea electrică mult mai mare decât conductivitatea aceluiași semiconductor în stare pură. Deoarece conducția în acest caz se face în principal cu electroni, ea se numește *conducție de tip n*. În semiconductorul de tip n, electronii sunt *purtători majoritari*, iar golurile sunt *purtători minoritari*. De exemplu, la 20 °C, pentru Ge pur conductivitatea are valoarea $\sigma = 2,2 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$, iar Ge de tip n are $\sigma = 10^2 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$. Conductivitatea semiconductorului este cu atât mai mare cu cât concentrația purtătorilor de sarcină liberi este mai mare.

b) În cristalul de germaniu se pot introduce impurități formate din atomi trivalenți (indiu, galiu, bor, aluminiu). Și în acest caz atomii de impuritate vor ocupa în rețea locul unor atomi de germaniu, având însă fiecare câte o legătură covalentă nesatisfăcută. Atomul trivalent de bor - de exemplu, are lipsă un electron

de legătură (fig. 2.4). Atomul de bor poate accepta un electron provenind de la o legătură Ge - Ge a unui atom vecin.

Apare un gol care tinde să se completeze prin atragerea unui electron de valență de la un alt atom de germaniu vecin. Astfel, în rețeaua semiconductorului se formează un număr de goluri egal cu numărul atomilor de impuritate. Atomii de impuritate devin ioni negativi (fiecși) și poartă denumirea de *acceptori*. Purtătorii de sarcină mobili majoritari sunt în acest caz golurile iar purtătorii mobili de sarcină minoritari sunt electronii liberi proveniți din generarea de perechi electron-gol, pe seama fluctuației energiei de agitație termică a rețelei. Deci, $n_{p0} \gg n_0$ și avem *conducție de tip p*.

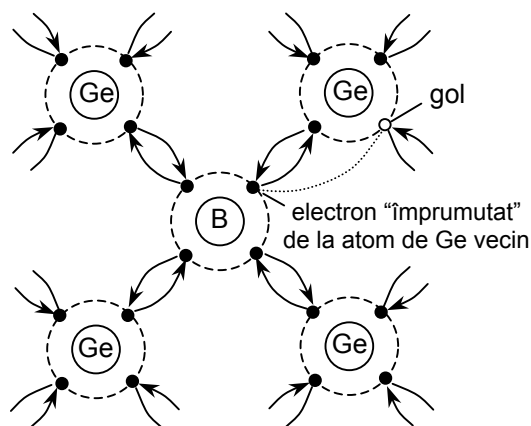


Fig. 2.4 Formarea golurilor în cristalul de germaniu extrinsec dotat cu atomi de bor

2.2.2 Conductibilitatea semiconductorilor și structura benzilor energetice

Conform teoriei cuantice, atât în stratul de valență cât și în cel de conducție, electronii sunt caracterizați de valori cuantificate (discontinue) ale energiei. Nivelele energetice (posibile) ale electronilor de valență se grupează în *banda de valență*, iar a electronilor liberi în *banda de conducție*. Cele două benzi sunt separate de *banda interzisă*. Se cunoaște că pentru semiconductorul intrinsec, pur din punct de vedere chimic, la o anumită energie primită din exterior, un număr de electroni din stratul de valență părăsesc atomii respectivi, devenind electroni liberi ce participă la procese de conducție. Aportul energetic exterior necesar este egal cu înălțimea ΔW a benzii interzise.

În fig. 2.5 se prezintă structura benzilor energetice în cazul unui semiconductor intrinsec.

Atunci când un electron de valență primește energie din exterior, el poate rupe legătura covalentă, devenind electron liber. Prin acest proces apare și golul, care

participă la conducție ca purtător de sarcină pozitivă. Ca urmare, electronul liber este un purtător al cărui nivel energetic corespunde benzii de conducție, pe când golul este un purtător pozitiv, al cărui nivel energetic corespunde benzii de valență.

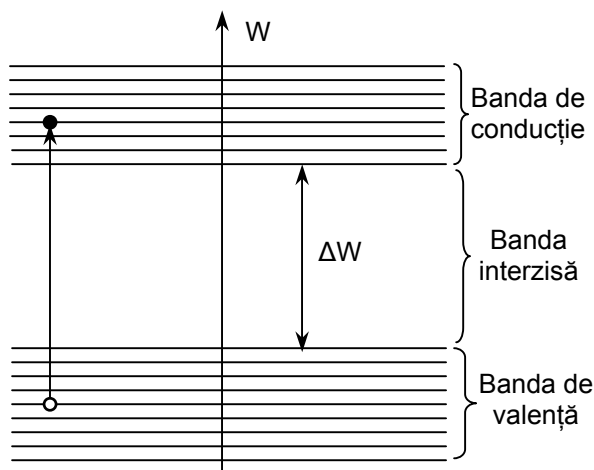


Fig. 2.5 Structura benzilor energetice la un semiconductor intrinsec

electromagnetic, radiații cu particule sau electromagnetice, se spune că se află la echilibru termic. În acest caz, concentrațiile de electroni și goluri generați prin mecanism intrinsec, depind de temperatura absolută:

$$n_i = p_i = A \cdot T^{3/2} \exp\left(-\frac{\Delta W}{2kT}\right) \quad (2.2)$$

unde n_i , p_i sunt concentrațiile de electroni și goluri în semiconductorul intrinsec, T - temperatura absolută, k - constanta lui Boltzmann, ΔW - lățimea benzii interzise, A - constantă, i - indice care arată că procesul se referă la semiconductor intrinsec.

Dacă în semiconductor apare un câmp electric, electronii se vor mișca în sens invers câmpului, iar golurile în sensul liniilor de câmp. Se formează un curent de electroni i_{ni} , respectiv de goluri i_{pi} , ambii în același sens (al liniilor de câmp). Curentul total de conducție prin semiconductor este egal cu suma celor doi curenți. Componentele curentului de conducție nu sunt egale ($i_{ni} > i_{pi}$), deoarece mobilitățile celor două tipuri de purtători nu sunt egale.

Analiza folosind structura de benzi se aplică și la semiconductoarele extrinseci. În cazul semiconductoarelor dopate cu impurități pentavalente (donoare), impuritățile introduc un nivel energetic în banda interzisă a semiconductorului, numit *nivel donor*, situat foarte aproape de banda de conducție, ca în fig. 2.6.

Cum valoarea ΔW_d este foarte mică (0,01 ... 0,05) eV la temperaturile ambiante obișnuite, practic toți atomii donori furnizează câte un electron liber, electronii devenind astfel purtători majoritari.

În cazul semiconductorului dopat cu impurități trivalente, acestea introduc în banda interzisă un *nivel acceptor*, foarte aproape de banda de valență, ca în fig. 2.7. Ca urmare, la temperatura ambiantă, practic toți atomii acceptori captează câte un electron, care a primit o energie $\Delta W_a \ll \Delta W_d$, formându-se un număr de goluri egal cu numărul de atomi acceptori. Deci, golurile devin în acest caz purtători majoritari, iar electronii devin purtători minoritari.

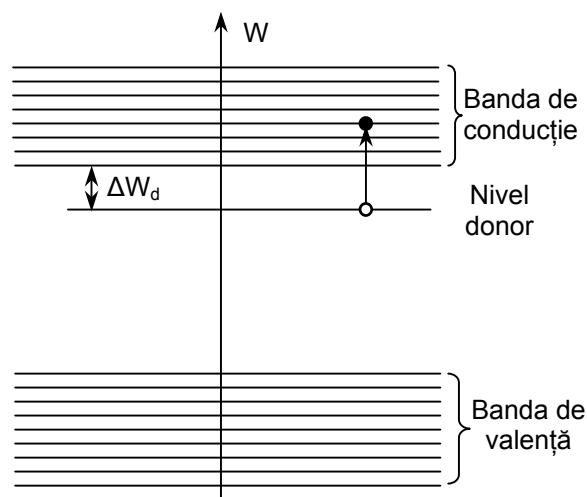


Fig. 2.6 Structura benzilor energetice la un semiconductor extrinsec cu impurități donoare

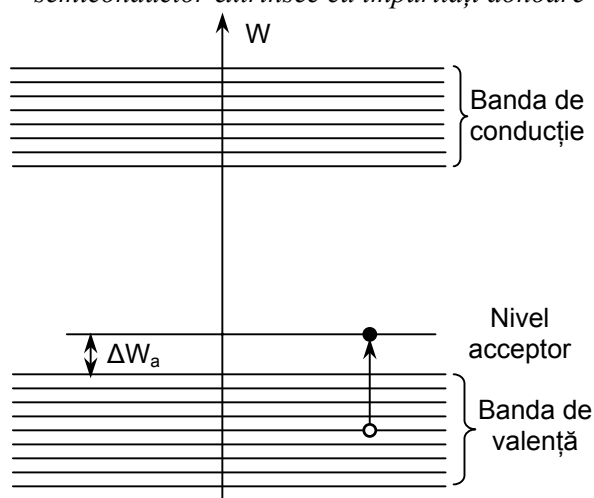


Fig. 2.7 Structura benzilor energetice la un semiconductor extrinsec cu impurități acceptoare

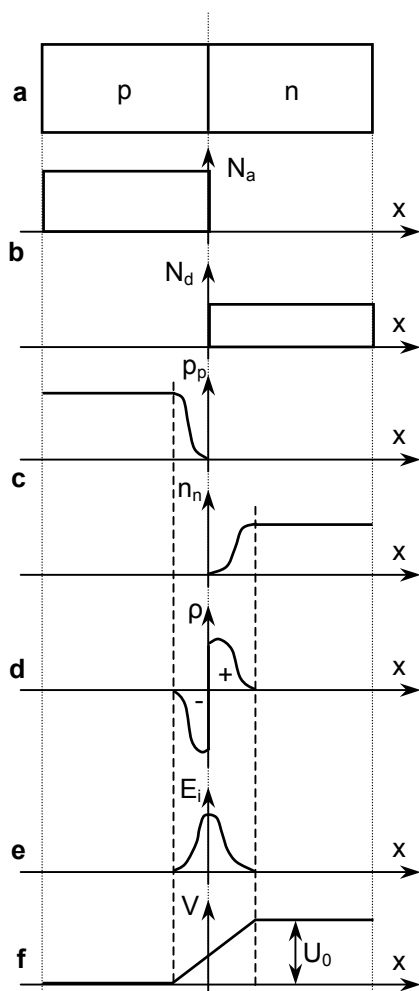


Fig. 2.8 Joncțiunea p-n. a) structura joncțiunii; b) distribuția concentrației de impurități; c) distribuția concentrației purtătorilor majoritari; d) distribuția sarcinii spațiale; e) distribuția intensității câmpului electric intern al regiunii de trecere; f) distribuția potențialului

2.3 Joncțiunea p – n

2.3.1 Procese fizice în joncțiunea p-n

Dacă într-un semiconductor se realizează, prin procedee speciale, o zonă p și o zonă n , astfel ca trecerea de la o zonă la cealaltă să se facă pe o distanță foarte mică (de regulă, sub 10^{-5} mm), se obține o joncțiune $p - n$ (fig. 2.8).

Notând cu N_a concentrația atomilor acceptori și cu N_d concentrația atomilor donori, în fig. 2.8 b se prezintă distribuția concentrației impurităților, în cazul ideal, când trecerea de la regiunea p la regiunea n se face brusc (joncțiune abruptă). De obicei, concentrațiile impurităților în cele două zone nu sunt egale ($N_a > N_d$), joncțiunea numindu-se în acest caz *asimetrică*.

Procesele fizice care au loc în joncțiunea $p - n$ au o importanță deosebită în funcționarea celor mai multe dispozitive semiconductoare. În cel mai simplu caz, joncțiunea $p - n$ poate fi utilizată la realizarea diodelor semiconductoare.

În vecinătatea suprafeței de separație a zonelor p și n există o variație puternică a concentrației purtătorilor majoritari. Diferențele de concentrații ale golurilor și electronilor determină difuzia purtătorilor majoritari dintr-o zonă în alta: golurile tind să difuzeze din zona n iar electronii în zona p . Datorită procesului de difuzie, cât și datorită recombinării purtătorilor majoritari cu cei difuzați, în vecinătatea suprafeței de separație are loc o micșorare substanțială a concentrației purtătorilor majoritari (fig. 2.8 c). În consecință, sarcina ionilor imobili ai

impurităților rămâne necompensată de sarcina purtătorilor majoritari, conducând la apariția în vecinătatea suprafeței de separație, a unei sarcini spațiale fixată în rețeaua cristalină. Sarcina spațială este formată din ioni negativi de impurități acceptoare, în zona p și de ioni pozitivi de impurități donoare, în regiunea n (fig. 2.8 d). Regiunea în care apare sarcina spațială, din vecinătatea suprafeței de separare se numește *regiune de trecere*. Celelalte zone, fără sarcină spațială, se numesc *regiuni neutre*.

Sarcina spațială produce un câmp electric intern al regiunii de trecere, care se opune difuziei purtătorilor majoritari (fig. 2.8 e). Prezența câmpului electric duce la apariția unui potențial, a cărui distribuție este precizată în fig. 2.8 f . Se constată apariția unei bariere de potențial în regiunea de trecere care se va opune difuziei purtătorilor majoritari. în acest caz va exista totuși un curent de difuzie $i_d = i_{pM} + i_{nM}$, unde i_{pM} și i_{nM} sunt componentele curenților de goluri, respectiv de electroni, produși de acei purtători majoritari care au o energie suficient de mare pentru a învinge bariera de potențial U_0 din regiunea de trecere. Cum bariera de potențial este mare, curentul de difuzie i_d este foarte mic.

Câmpul intern al joncțiunii antrenează dintr-o zonă în alta purtătorii minoritari, formând un curent de conducție, $i_c = i_{pm} + i_{nm}$, unde i_{pm} și i_{nm} sunt componentele curenților de goluri, respectiv de electroni (purtători minoritari). În regimul de echilibru termic al unei joncțiuni nepolarizate, curentul de difuzie i_d este egal și de sens contrar cu curentul de conducție i_c , astfel încât curentul rezultat prin joncțiune este nul (fig. 2.9 a).

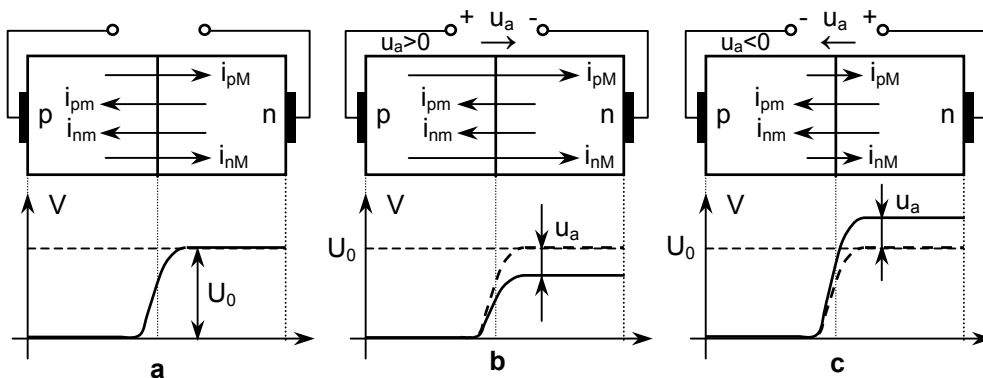


Fig. 2.9 Polarizarea joncțiunii $p - n$; a) joncțiunea $p - n$ nepolarizată; b) joncțiunea $p - n$ polarizată direct; c) joncțiunea $p - n$ polarizată invers

Presupunem că joncțiunea $p-n$ este prevăzută cu două contacte laterale metalice (fig. 2.9), care permit conectarea dispozitivului în circuit. Cu toate că există o

diferență de potențial între zonele p și n , reprezentând bariera de potențial U_0 , tensiunea la bornele dispozitivului, în gol, este egală cu zero. Aceasta se explică prin existența în circuit a două contacte metal - semiconductor, care produc potențiale de contact, astfel încât tensiunea rezultantă între terminale este egală cu zero.

Dacă se aplică la bornele joncțiunii $p-n$ o tensiune u_a cu polaritatea din fig. 2.9 b , câmpul electric exterior diminuează intensitatea câmpului electric din regiunea de trecere și ca urmare bariera de potențial scade de la valoarea U_0 la valoarea $U_0 - u_a$. Curentul de difuzie crește și poate atinge valori foarte mari, în timp ce curentul de conducție se modifică puțin. Curentul prin joncțiune este egal cu curentul de difuzie, format din purtătorii majoritari, reprezentând curentul direct al joncțiunii.

Aplicând o tensiune $u_a < 0$, adică cu polaritatea plus pe borna n , câmpul electric din regiunea de trecere este întărit de câmpul electric aplicat din exterior. Bariera de potențial crește de la U_0 la $U_0 + |u_a|$. Curentul de difuzie scade practic la zero. Prin joncțiune va circula curentul de purtători minoritari (de conducție) i_c . Ca valoare, acest curent este foarte mic și reprezintă curentul invers al joncțiunii $p-n$.

Pentru stabilirea unor proprietăți ale regiunii de trecere, esențiale pentru înțelegerea funcționării dispozitivelor semiconductoare, se folosește un model simplificat al joncțiunii, obținut în ipoteza că densitățile de sarcină spațială, din regiunea de trecere, sunt constante în cele două zone (fig. 2.10).

În fig. 2.10 s-a notat cu L_n lățimea regiunii de trecere în zona n și cu L_p lățimea regiunii de trecere în zona p .

Se poate deduce lățimea regiunii de trecere a joncțiunii, conform relației:

$$L = L_p = L_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon U_0}{e} \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)} \quad (2.3)$$

unde:

- ε - permitivitatea materialului;
- e - sarcina electrică elementară;

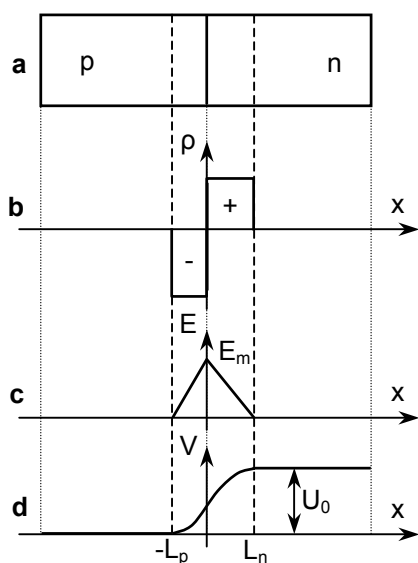


Fig. 2.10 Model simplificat al joncțiunii $p-n$. a) structura joncțiunii; b) distribuția sarcinii spațiale; c) distribuția intensității câmpului electric; d) distribuția potențialului

U_0 - bariera de potențial;

N_a, N_d - concentrațiile de impurități acceptoare, respectiv donoare.

În cazul în care joncțiunii i se aplică o tensiune u_a , lățimea regiunii de trecere devine:

$$L = L_p = L_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_0(U_0 - u_a)}{e} \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)} \quad (2.4)$$

Pe baza acestui model se pot deduce următoarele proprietăți importante ale regiunii de trecere:

- regiunea de trecere se comportă ca un dielectric datorită concentrației scăzute a purtătorilor;
- extinderea regiunii de trecere în zonele p și n este invers proporțională cu concentrația impurităților în zonele respective;
- lățimea regiunii de trecere crește odată cu tensiunea inversă aplicată joncțiunii.

2.3.2 Caracteristica statică a joncțiunii $p-n$. Punctul static de funcționare

Fie o joncțiune $p-n$ utilizată ca diodă semiconductoră (fig. 2.11). Electroful cu potențial pozitiv în timpul conducerii se numește *anod*, iar celălalt electrod se numește *catod*.

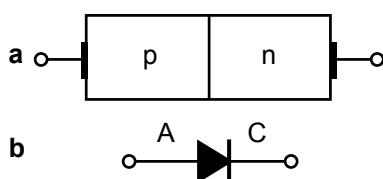


Fig. 2.11 Dioda semiconductoră
a) structură; b) simbolizare

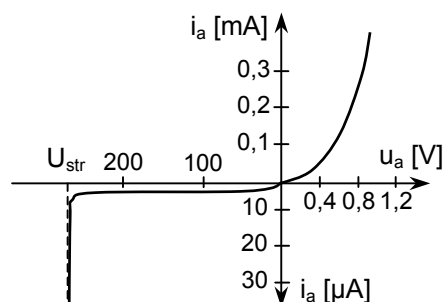


Fig. 2.12 Caracteristica statică a diodei semiconductoră

Caracteristica statică a diodei semiconductoră reprezintă dependența curentului prin diodă, numit *curent anodic* de tensiunea dintre anod și catod, numită *tensiune anodică*.

SURSE ȘI CIRCUITE DE ALIMENTARE

În fig. 2.12 se prezintă caracteristica statică a diodei semiconductoare, pentru care s-au adoptat scări diferite pe semiaxe. În cadranul I se prezintă caracteristica directă, unde tensiunea anodică are valori foarte mici (0,2, ..., 0,5V) la Ge și (0,6, ..., 0,9V) la Si, iar curentul poate avea valori mari. În cadranul III se reprezintă ramura de polarizare inversă, în care tensiunile aplicate diodei pot avea valori mari, dar curentul prin diodă este practic constant și foarte mic. Caracteristica teoretică a unei diode este de forma:

$$i_a = I_S \left[\exp\left(\frac{eu_a}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.5)$$

unde:

u_a - tensiunea aplicată la borne;

e - sarcina electrică elementară;

k - constanta lui Boltzmann;

T - temperatura absolută;

I_S - curent de saturație, dependent de concentrațiile purtătorilor minoritari.

Factorul $e_T = \frac{kT}{e}$ se exprimă dimensional în volți și se numește *tensiune termică* ($e_T = 26$ mV la $T = 300$ K). Pentru tensiuni inverse mari (față de e_T), $\exp\left(\frac{eU_a}{kT}\right) \ll 1$ și $i_a \cong I_S$. La polarizări directe, dacă $U_a > e_T$ și $\exp\left(\frac{eU_a}{kT}\right) \gg 1$, se obține ecuația:

$$i_a \cong I_S \left[\exp\left(\frac{eu_a}{kT}\right) \right] \quad (2.6)$$

La tensiuni inverse mari se constată o creștere importantă a curentului invers prin diodă, datorat multiplicării în avalanșă a purtătorilor de sarcină. Sub acțiunea câmpului electric rezultat prin aplicarea tensiunii la borne, purtătorii de sarcină sunt accelerați, putând produce ionizări, respectiv generări de perechi electron - gol, datorită ciocnirilor neelastice. Purtătorii rezultați sunt la rândul lor accelerați și pot genera noi perechi electron - gol prin alte ciocniri neelastice.

Temperatura joncțiunii *p-n* influențează substanțial curentul prin diodă, în sensul creșterii, atât la conducția directă, dar în special la polarizarea inversă (fig. 2.13).

Se consideră un circuit electric format dintr-o diodă înseriată cu o rezistență R și cu o sursă de t.e.m E (fig. 2.14). Dându-se valorile E și R și caracteristica statică a diodei $i_a = i_a(u_a)$, se cere să se determine curentul prin diodă și tensiunea la borne.

Pentru rezolvarea problemei, se utilizează caracteristica statică a diodei și relația obținută prin aplicarea legii a II-a a lui Kirchhoff pe circuitul considerat.

$$i_a = i_a(u_a)$$

$$Ri_a + u_a = E$$

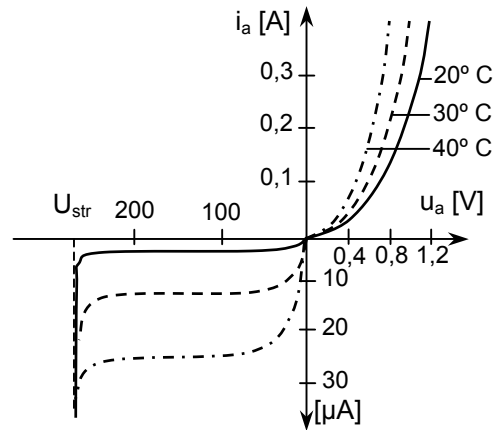


Fig. 2.13 Influența temperaturii asupra caracteristicii statice a diodei semiconductoare

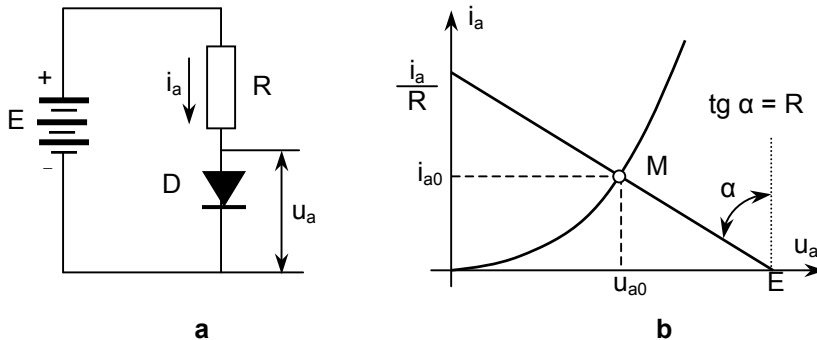


Fig. 2.14 Dioda semiconductoare în circuit. a) circuitul de alimentare; b) determinarea punctului static de funcționare

Soluția sistemului constituie curentul prin diodă și tensiunea la bornele sale. Cum relația $i_a = i_a(u_a)$ este dată sub formă grafică, soluția sistemului se obține pe cale grafică (metoda grafo - analitică). Reprezentarea celei de-a doua ecuații din sistem în planul $i_a - u_a$ poartă denumirea de *dreaptă statică de sarcină*. Intersecția dreptei statice de sarcină cu caracteristica diodei se numește *punct static de funcționare*. Coordonatele acestui punct (i_{a0} , u_{a0}) reprezintă soluția problemei.

2.3.3 Comportarea joncțiunii $p-n$ în regim variabil, la semnal mic

Fie o diodă semiconductoră funcționând într-un punct static de funcționare M , de coordonate u_{a0} , i_{a0} (fig. 2.15). Dacă tensiunea anodică are variații de joasă frecvență în jurul valorii u_{a0} (mici în comparație cu tensiunea termică e_T), de forma:

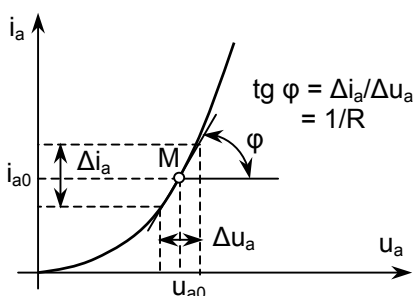


Fig. 2.15 Regimul dinamic al joncțiunii $p-n$

$$u_a(t) = u_{a0} + \Delta u_a(t),$$

curentul prin diodă este:

$$i_a(t) = i_{a0} + \Delta i_a(t)$$

Variația $\Delta i_a(t)$ este determinată în funcție de Δu_a , prin intermediul pantei la caracteristica statică în punctul M , adică:

$$\frac{1}{R_i} = \left. \frac{di_a}{du_a} \right|_{u_{a0}}, \quad \Delta i_a = \frac{1}{R_i} \cdot \Delta u_a$$

unde:
$$R_i = \left[\left. \frac{di_a}{du_a} \right|_{u_{a0}} \right]^{-1}$$

se numește *rezistență internă* a diodei. Folosind ecuația diodei ideale:

$$i_a = I_S \left[\exp\left(\frac{eu_a}{kT}\right) - 1 \right], \text{ rezultă:}$$

$$\frac{di_a}{du_a} = I_S \frac{e}{kT} \exp\left(\frac{eu_a}{kT}\right) = \frac{e}{kT} \left\{ I_S \left[\exp\left(\frac{eu_a}{kT}\right) - 1 \right] + I_S \right\} = \frac{e}{kT} (i_a + I_S)$$

$$R_i = \left[\left. \frac{di_a}{du_a} \right|_{u_{a0}} \right]^{-1} = \frac{kT}{e} \frac{1}{I_S + i_a} \Big|_{u_{a0}} = \frac{kT}{q} \frac{1}{I_S + i_{a0}}$$

$$R_i = \frac{e_T}{I_S + i_{a0}}$$

Atunci când variația $\Delta u_a(t)$ a tensiunii la bornele diodei este de frecvență ridicată, curentul prin diodă este determinat și de capacitățile proprii ale joncțiunii $p-n$: *capacitatea de barieră* C_b și *capacitatea de difuzie* C_d . Schema echivalentă a diodei la variații mici, de frecvență ridicată, în jurul unui punct static de funcționare este prezentată în fig. 2.16.

Capacitatea de barieră corespunde sarcinii spațiale acumulate în regiunea de trecere și depinde de tensiunea u_a , conform relației:

$$C'_b = \frac{C_{b0}}{\sqrt{1 - \frac{u_a}{U_0}}}$$

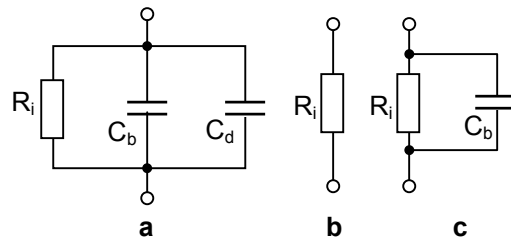


Fig. 2.16 Schema echivalentă de semnal mic a diodei semiconductoare
a) schema echivalentă generală; b) schema echivalentă la polarizare directă; c) schema echivalentă la polarizare inversă

unde C_{b0} este capacitatea de barieră a joncțiunii nepolarizate.

În fig. 2.17 se prezintă variația capacității C_b cu tensiunea aplicată.

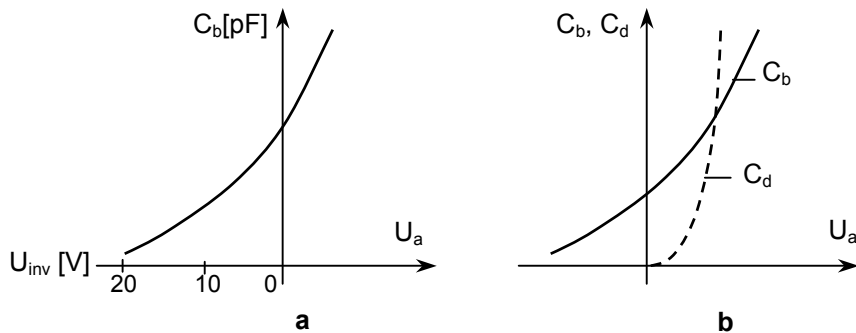


Fig. 2.17 Variația capacităților diodei cu tensiunea aplicată
a) capacitatea de barieră; b) capacitatea de barieră și de difuzie la polarizarea directă

Capacitatea de difuzie corespunde efectului acumulării de sarcină datorită procesului de difuzie a purtătorilor de sarcină în regiunile neutre ale semiconductorului. Valoarea capacității de difuzie C_d depinde de punctul de funcționare a diodei, fiind extrem de mică atunci când joncțiunea este polarizată invers (fig. 2.17).

La polarizarea în sens direct, rezistența internă a diodei R_i este foarte mică, astfel că efectul capacităților C_b și C_d poate fi neglijat. Schema echivalentă a diodei la semnal mic este ca în fig. 2.16 *b*. La polarizarea inversă, rezistența R_i este foarte mare, deci capacitatea joncțiunii, egală practic cu C_b , are un efect de șuntare care poate fi neglijat. În acest caz, schema echivalentă de semnal mic a diodei rezultă ca în fig. 2.16 *c*.

2.4 Tipuri de diode semiconductoare

În industrie se folosesc mai multe tipuri de diode semiconductoare, dintre care amintim: dioda redresoare, dioda de comutație, dioda cu contact punctiform, dioda stabilizatoare (Zener), dioda varicap, dioda tunel, fotodiode, dioda electroluminiscentă, dioda laser.

Diodele redresoare se construiesc (sau s-au construit) cu germaniu, siliciu, iar la puteri mici, cu seleniu. Diodele de putere medie și mare au o construcție care permite montarea lor pe radiatoare, pentru a crește suprafața de disipare a căldurii.

Principalii parametri ai diodelor redresoare sunt: curentul mediu redresat, I_0 ; curentul direct de vârf repetitiv, I_{FRM} ; tensiunea inversă de vârf repetitivă, U_{RRM} ; temperatura maximă a joncțiunii, $T_{j \max}$; rezistența termică, R_{th} care determină transferul de căldură în exterior.

La diodele cu siliciu, curentul mediu redresat poate atinge valori de sute sau chiar mii de amperi, cu tensiuni inverse de vârf repetitive de mii de volți, temperatura de lucru maximă a joncțiunii fiind de 150 °C. La diodele cu germaniu, valorile de curent și tensiune sunt mai mici și temperatura maximă de lucru a joncțiunii este de 80 °C.

Diodele redresoare se folosesc până la frecvențe de cca. 10...20 kHz, deoarece la frecvențe înalte, capacitatea de barieră produce un puternic efect de șuntare a rezistenței inverse și proprietățile de redresare sunt diminuate (sau chiar dispar).

Dioda stabilizatoare (Zener). Sunt diode cu siliciu, care utilizează ramura caracteristicii curent - tensiune, corespunzătoare polarizării inverse. La o anumită tensiune inversă se produce generarea prin multiplicare în avalanșă și - într-o

oarecare măsură - prin efect Zener, a perechilor electron - gol. Efectul Zener constă din ruperea unor legături covalente și formarea perechilor electron - gol datorită trecerii prin efect tunel a electronilor din banda de valență în banda de conducție. În consecință, curentul invers prin jonctiune începe să crească brusc, tensiunea la bornele diodei fiind aproape constantă. Diodele Zener sunt construite pentru a funcționa în mod normal pe caracteristica inversă de străpungere nedistructivă. Caracteristicile diodei Zener sunt prezentate în fig. 2.18.

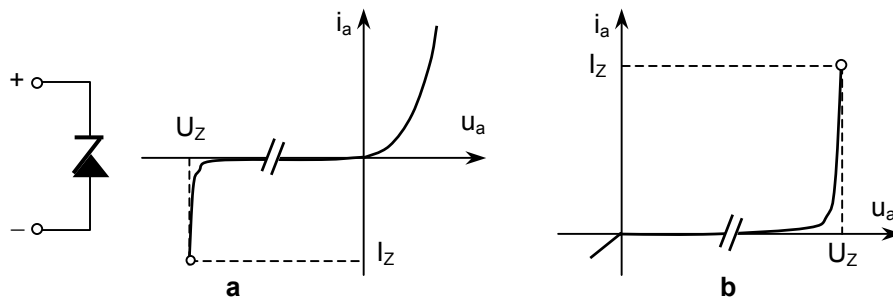


Fig. 2.18 Diode Zener. a) cazul sensului adoptat ca la diodele redresoare;
b) cazul sensului de referință inversat

Principalii parametri ai diodei Zener sunt: puterea nominală, tensiunea nominală de străpungere, U_Z (pentru o valoare specifică a curentului în regiunea de străpungere, I_Z), rezistența internă (dinamică) în porțiunea de funcționare a caracteristicii, coeficientul de variație cu temperatura a tensiunii stabilizate:

$$\alpha_Z = \frac{1}{U_Z} \cdot \frac{\Delta U_Z}{\Delta T} \cdot 100 [\%/^{\circ}C]$$

Puterile diodelor stabilizatoare ating zeci de W și tensiuni U_Z cuprinse de la 2 până la sute de volți.

2.5 Tranzistorul bipolar

2.5.1 Tranzistorul ca element comandat prin semnal

Una din funcțiile esențiale pe care le realizează tranzistorul este amplificarea semnalelor electrice. Un amplificator are structură de diport; la bornele de intrare

se aplică un semnal, iar la bornele de ieșire, un receptor numit *sarcină* (rezistență sau în general impedanță de sarcină) pe care se obține semnalul amplificat (fig. 2.19 a).

Considerăm cazul simplu, în care amplificatorul are ca sarcină o rezistență R și conține un singur tranzistor. Analizând circuitul dinspre bornele de ieșire $2 - 2'$ amplificatorul se poate reprezenta printr-un generator echivalent de tensiune sau de curent G , comandat prin semnalul de intrare, notat generic prin x_1 (fig. 2.19 b).

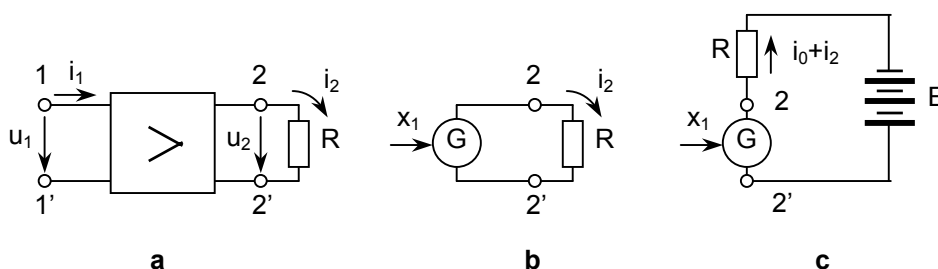


Fig. 2.19 Funcția de amplificare a tranzistorului. a) structura de diport a unui amplificator; b) schema echivalentă cu generator echivalent de tensiune sau curent; c) schema echivalentă cu sursă de alimentare

Generatorul de semnal G reflectă în esență proprietățile de amplificare ale tranzistorului, fără a specifica un aspect esențial: amplificarea în putere se realizează pe seama consumului de energie de la o sursă de alimentare care asigură funcționarea normală a tranzistorului. Această sursă este menționată în fig. 2.19 c, ca având t.e.m. E . Este posibil ca sarcina să fie parcursă numai de curentul i_2 produs de semnalul de intrare, nu și de componenta continuă i_0 , care asigură funcționarea normală a tranzistorului.

Ca urmare, cel mai simplu amplificator conține: sarcina, pe care se obține semnalul amplificat; tranzistorul, care se comportă ca un generator de tensiune sau de curent, comandat prin semnalul de intrare; elementele care asigură funcționarea tranzistorului într-un regim, unde se obțin proprietățile de amplificare (sursa E și alte elemente).

Există două categorii de tranzistoare: *bipolare* și *unipolare*.

În tranzistoarele bipolare, mecanismul conducției este determinat atât de purtătorii majoritari, cât și de purtătorii minoritari din semiconductor. Semnalul x_1 prin care se comandă tranzistorul bipolar într-un etaj de amplificare este un *curent electric* iar generatorul echivalent G este un *generator de curent*.

2.5.2 Structura fizică și funcționarea tranzistorului bipolar

Tranzistoarele bipolare sunt dispozitive semiconductoare cu două joncțiuni formate printr-o succesiune de 3 zone *pn* sau *npn* (fig. 2.20). Zona din mijloc a tranzistorului se numește *bază* (*B*) și este realizată cu următoarele proprietăți: este foarte îngustă (de ordinul micronilor sau chiar zecimi de micron) și are o dopare cu impurități mult mai mică decât regiunile laterale. O zonă extremă, cu cea mai mare dopare cu impurități se numește *emitor* (*E*). Cealaltă zonă extremă se numește *colector* (*C*).

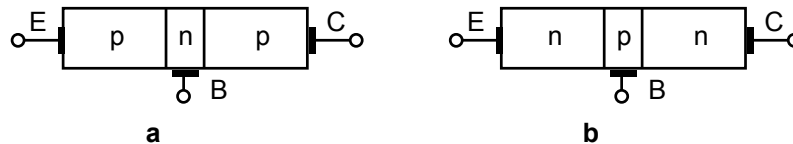


Fig. 2.20 Tranzistorul bipolar. a) structura *pnp*; b) structura *npn*

Cele două joncțiuni ale unui tranzistor se numesc *joncțiunea emitorului*, respectiv *joncțiunea colectorului*. La funcționarea în regiunea activă (în care se manifestă proprietățile de amplificare ale tranzistorului), joncțiunea emitorului este polarizată în sens direct, iar joncțiunea colectorului în sens invers. Pentru a urmări procesele fizice din tranzistor studiem tranzistorul *pnp*. Pentru structura *npn* funcționarea este similară, inversându-se rolurile electronilor și golurilor și sensurile tensiunilor și curenților.

Presupunem că se alimentează numai joncțiunea colectorului ($E_E = 0$). Prin această joncțiune va circula în acest caz numai curentul invers, de purtători minoritari, notat cu I_{CB0} . Regiunea de trecere a joncțiunii are o lărgime mare, datorită prezenței tensiunii de polarizare inversă E_C . Ea se extinde mult în zona bazei, deoarece aceasta este mult mai slab dopată cu impurități decât în zona colectorului.

Dacă se consideră alimentarea normală a tranzistorului (fig. 2.21), cu joncțiunea emitorului polarizată în sens direct, va exista un curent de difuzie prin această joncțiune: golurile din emitor difuzează în bază, formând curentul i_{pE} , iar electronii din bază difuzează în emitor, formând curentul i_{nBE} .

Deoarece concentrația impurităților, deci și a purtătorilor majoritari, este mult mai mare în emitor decât în bază, curentul de difuzie prin joncțiunea emitorului va fi, în cea mai mare parte, curent de goluri. Golurile injectate de emitor în bază, formând curentul i_{pE} al joncțiunii emitorului devin în bază purtători minoritari. S-a

SURSE ȘI CIRCUITE DE ALIMENTARE

precizat că lățimea w a bazei este foarte mică iar regiunea de sarcină spațială a joncțiunii colectorului se extinde mult în zona n a bazei. În consecință, golurile difuzate în bază vor fi preluate și transportate în colector de către câmpul intern din regiunea de trecere a joncțiunii colectorului, formând curentul i_{pEC} . Transferul aproape integral în colector al golurilor difuzate în bază se numește *efect de tranzistor*. El se produce datorită grosimii foarte reduse a bazei, precum și datorită extinderii pronunțate, în zona bazei a regiunii de trecere a joncțiunii colectorului. O mică parte din golurile injectate în bază nu trec în colector, ci se recombină cu electronii din bază, formând curentul i_{pEB} . Sursa E_E asigură o circulație de electroni care iau locul celor recombinăți cu golurile în bază.

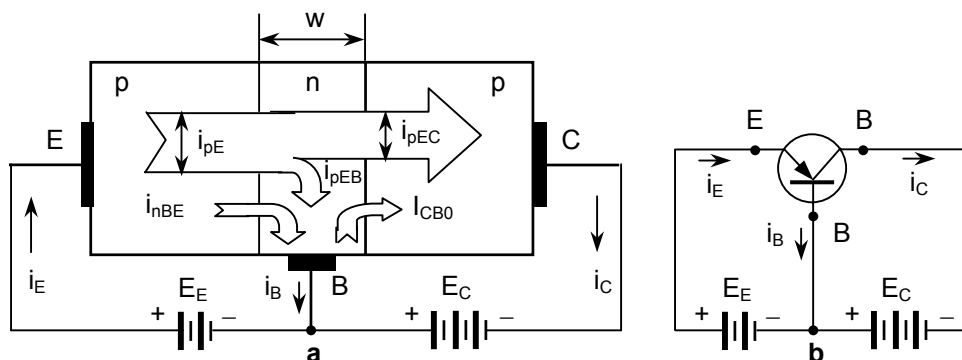


Fig. 2.21 Tranzistorul pnp a) diagrama curenților prin tranzistor; b) simbolul tranzistorului în circuitul de alimentare

Având în vedere cele arătate, rezultă următoarele relații ale curenților pentru tranzistorul bipolar pnp:

$$i_E = i_{pE} + i_{nBE}$$

$$i_C = i_{pEC} + I_{CB0}$$

$$i_B = i_{pEB} + i_{nBE} - I_{CB0}$$

Însumând i_C cu i_B și ținând cont că:

$$i_{pE} = i_{pEC} + i_{pEB}$$

rezultă:

$$i_C + i_B = i_{pEC} + I_{CB0} + i_{pEB} + i_{nBE} - I_{CB0} = i_{pE} + i_{nBE} = i_E$$

Raportul:

$$\alpha_N = \frac{i_{pEC}}{i_{pE}}$$

se numește *factor static de amplificare în curent* și are valori de 0,98, ..., 0,998. Neglijând componenta i_{nBE} în raport cu i_{pE} deoarece concentrația purtătorilor majoritari în emitor este mult mai mare decât în bază, rezultă: $i_E = i_{pE}$. Cu această simplificare se obțin ecuațiile uzuale ale curenților prin tranzistor:

$$i_C = \alpha_N i_E + I_{CB0}$$

$$i_B = (1 - \alpha_N) i_E - I_{CB0}$$

În cazul tranzistorului *npn* (fig. 2.22), electronii majoritari din emitor difuzează în zona bazei. De aici, electronii difuzați, deveniți purtători minoritari, trec prin efect de tranzistor în zona colectorului. Deci, circulația purtătorilor se face în mod analog tranzistorului *pnp*, cu deosebirea că sensul curentului de electroni este invers sensului de circulație a electronilor. Polaritățile tensiunilor aplicate tranzistorului *npn* se inversează față de tranzistorul *pnp*, însă în valori absolute, aceste tensiuni au același ordin de mărime.

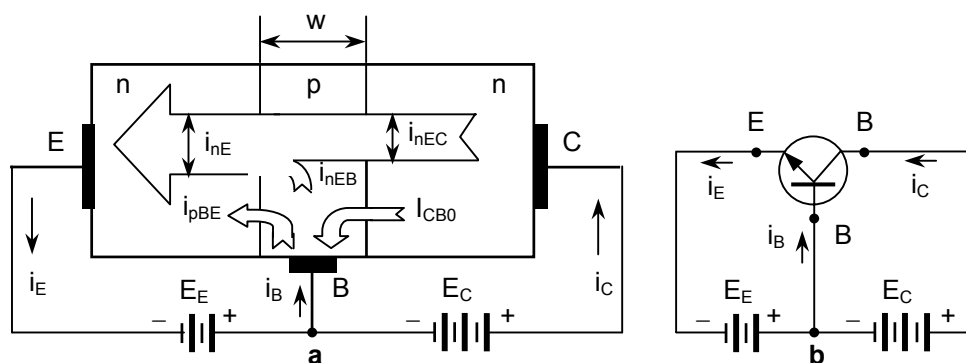


Fig. 2.22 Tranzistorul npn a) diagrama curenților prin tranzistor; b) simbolul tranzistorului în circuitul de alimentare

SURSE ȘI CIRCUITE DE ALIMENTARE

În concluzie, se pot reține următoarele aspecte importante privind funcționarea tranzistorului bipolar, în regimul de lucru considerat (pentru regiunea activă de funcționare):

- tensiunea între emitor și bază este mică (zecimi de volt), întrucât joncțiunea emitoare este polarizată în sens direct;
- tensiunea între colector și bază are o valoare mare (volți, zeci de volți sau chiar sute de volți), deoarece joncțiunea colectoare este polarizată invers, putând prelua tensiuni mari;
- curentul de colector este aproximativ egal cu curentul de emitor;
- întrucât curentul obținut în "circuitul de ieșire" al tranzistorului (circuitul de colector) este practic egal cu curentul din "circuitul de intrare" (circuitul bază - emitor), iar tensiunea bază - colector este mult mai mare decât tensiunea bază - emitor, rezultă că puterea ce se poate obține în circuitul de ieșire este mai mare decât puterea în circuitul de intrare, ceea ce permite realizarea funcției de amplificare în putere a unui semnal.

2.5.3 Caracteristicile statice ale tranzistorului bipolar

În schemele de amplificare, precum și în alte circuite electronice, tranzistorul este tratat ca un cuadripol activ, având două borne de intrare și două borne de ieșire. Dar tranzistorul are numai trei borne (terminale). Rezultă că, pentru a fi utilizat într-un anumit circuit, de exemplu de amplificare, este necesar ca o bornă a tranzistorului să fie comună atât circuitului de intrare cât și circuitului de ieșire. În funcție de electrodul folosit ca bornă comună, tranzistorul are trei conexiuni posibile (fig. 2.23): bază comună (BC), emitor comun (EC) și colector comun (CC).

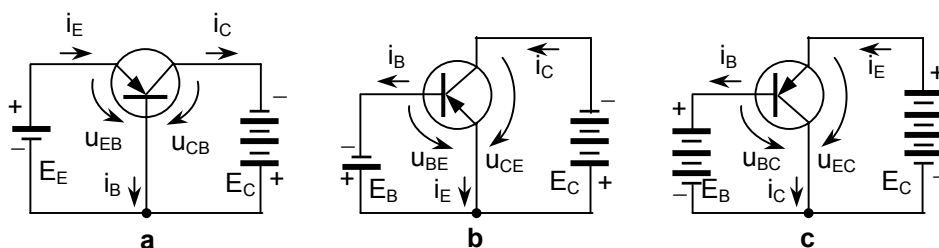


Fig. 2.23 Scheme fundamentale de conectare a tranzistorului. a) bază comună (BC); b) emitor comun (EC); c) colector comun (CC)

Caracteristicile statice ale unui tranzistor exprimă legăturile dintre curenții prin tranzistor și tensiunile aplicate, în regim staționar. Dependențele se pot exprima analitic, însă cel mai frecvent se dau sub formă grafică.

Principalele caracteristici ale tranzistoarelor sunt:

- familia caracteristicilor de ieșire, care dă dependența curentului din circuitul de ieșire în funcție de tensiunea la bornele de ieșire și curentul din circuitul de intrare (ca parametru): $i_E = f(u_E, i_i)$;
- familia caracteristicilor de intrare reprezintă dependența curentului din circuitul de intrare ca funcție de tensiunea de intrare și tensiunea de la bornele de ieșire (ca parametru): $i_i = f(u_i, u_E)$.

Evident, caracteristicile tranzistorului depind de schema de conectare. Pentru conexiunea bază comună (BC), cele două caracteristici reprezintă dependențele:

$$i_C = f_1(u_{CB}, i_B)$$

$$i_E = f_2(u_{EB}, u_{CB})$$

Un exemplu de caracteristici în conexiune BC este dat în fig. 2.24.

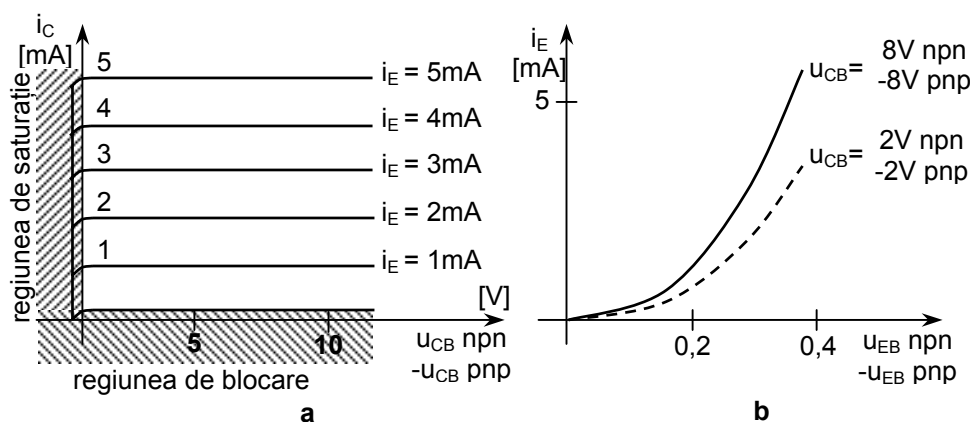


Fig. 2.24 Caracteristicile statice ale tranzistorului bipolar în conexiune BC.
a) caracteristici de ieșire; b) caracteristici de intrare

În planul caracteristicilor de ieșire se pot distinge următoarele regiuni:

- regiunea activă directă (normală), în care joncțiunea emitorului este polarizată în sens direct, iar joncțiunea colectorului este polarizată în sens invers, expresia curentului de colector fiind dată de relația:

$$i_C = \alpha_N i_E + I_{CB0} \quad (\text{pentru } i_E > 0)$$

- regiunea de blocare (de tăiere), în care joncțiunea emitorului fie nu este polarizată (deci $i_C = I_{CB0}$), fie este polarizată invers,
- regiunea de saturație, în care ambele joncțiuni sunt polarizate în sens direct,
- regiunea activă inversă, în care emitorul și colectorul își inversează rolurile; joncțiunea colectorului are polarizare directă, iar cea a emitorului are polarizare inversă. Analog cu relația pentru regiunea activă normală, putem scrie:

$$i_E = \alpha_I (-i_C) + I_{EB0}$$

În această relație, sensurile de referință ale curenților s-au considerat cele de la regiunea activă normală, iar α_I și I_{EB0} au semnificații similare mărimilor α_N și I_{CB0} .

În amplificatoarele obișnuite, tranzistorul funcționează cel mai frecvent în regiunea activă directă (normală) a caracteristicilor statice. Aici caracteristicile sunt practic drepte echidistante, având o înclinare foarte mică față de orizontală, înclinare datorată creșterii factorului α_N cu tensiunea de alimentare u_{CB} . Efectul se datorează îngustării zonei neutre, ca urmare a lărgirii regiunii de sarcină spațială a joncțiunii colectorului la creșterea tensiunii inverse u_{CB} .

Intr-o serie de circuite electronice, cum sunt cele de comutație statică, tranzistorul funcționează în regiunile de blocare, de saturație și chiar cu alimentarea inversată.

Pentru reprezentarea completă a caracteristicilor tranzistorului bipolar, se dau uneori, într-o diagramă cu patru cadrane, patru familii de caracteristici. Pe lângă cele două familii deja prezentate (cele de ieșire și cele de intrare) se mai dau și două familii pentru caracteristici de transfer:

$$i_C = f_3(i_B, u_{CB})$$

$$u_{EB} = f_4(u_{CB}, i_B)$$

În circuitele electronice, cea mai utilizată schemă de conexiune a tranzistorului bipolar este *EC*. În această conexiune, familiile caracteristicilor de ieșire și de intrare reprezintă dependențele:

$$i_C = f(u_{CE}, i_B)$$

$$i_B = g(u_{BE}, u_{CE})$$

Familia caracteristicilor de ieșire este reprezentată în fig. 2.25.

Pentru a stabili dependența curentului de ieșire i_C în funcție de curentul de intrare i_B , folosim relațiile:

$$i_C = \alpha_N i_E + I_{CB0}$$

$$i_B = (1 - \alpha_N) i_E - I_{CB0}$$

Din cea de-a doua relație extragem i_E și înlocuim în prima relație:

$$i_E = \frac{i_B + I_{CB0}}{1 - \alpha_N}$$

$$i_C = \frac{\alpha_N}{1 - \alpha_N} (i_B + I_{CB0}) + I_{CB0} = \frac{\alpha_N}{1 - \alpha_N} i_B + \frac{(\alpha_N + 1 - \alpha_N) \cdot I_{CB0}}{1 - \alpha_N}$$

Rezultă:

$$i_C = \frac{\alpha_N}{1 - \alpha_N} \cdot i_B + \frac{I_{CB0}}{1 - \alpha_N} = \beta_N \cdot i_B + I_{CE0}; I_{CE0} = \frac{I_{CB0}}{1 - \alpha_N}$$

în care $\beta_N = \frac{\alpha_N}{1 - \alpha_N}$ se numește factor de amplificarea static în curent al tranzistorului, în conexiunea *EC*. Cum α_N este foarte apropiat ca valoare de 1 ($\alpha_N = 0,98, \dots, 0,998$), factorul β_N este relativ mare, între 30 și 1000. Așa cum s-a menționat anterior, creșterea tensiunii aplicate invers în circuitul colectorului produce o ușoară creștere a factorului α_N . Aceasta provoacă însă o modificare mult mai pronunțată a lui β_N . Drept consecință, caracteristicile de ieșire au în regiunea activă o înclinare relativ mare, față de cazul conexiunii *BC*.

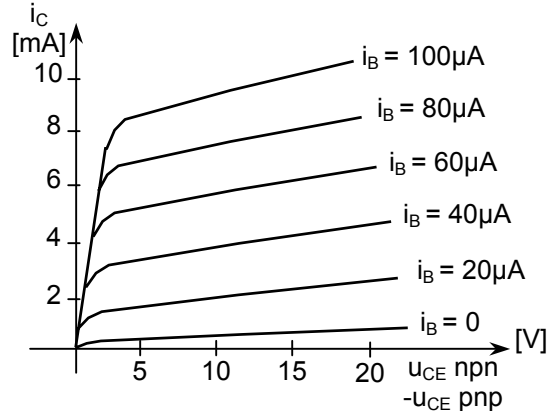


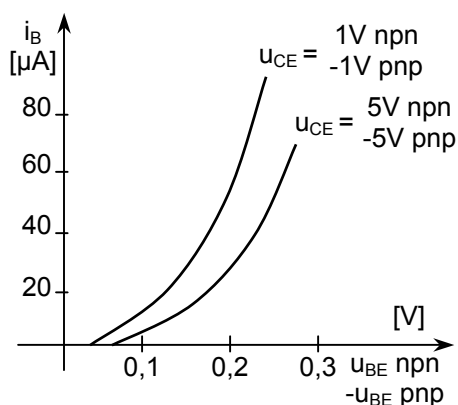
Fig. 2.25 Caracteristicile de ieșire ale unui tranzistor în conexiune *EC*

Regiunea de saturație a caracteristicii de ieșire este situată în cadranul I. În această regiune, caracteristicile de ieșire ale tranzistorului sunt foarte apropiate. Pentru scări obișnuite, regiunea de saturație se reduce practic la o dreaptă, cu înclinație apropiată de 90°, numită dreaptă de saturație.

Regiunea de blocare (tăiere), corespunde situațiilor de polarizare inversă a joncțiunii emitor - bază. Riguros, regimul de tăiere se obține pentru $i_B = -I_{CB0}$.

Dacă se consideră situația în care emitorul și colectorul își inversează rolurile, caracteristicile se extind în cadranul III (tranzistor inversat). Apare regiunea activă inversă.

Familia caracteristicilor de intrare este prezentată în fig. 2.26.



Și pentru conexiunea EC se poate da o reprezentare în patru cadrane prin introducerea a două familii de caracteristici de transfer:

$$i_C = f'(i_B, u_{CE})$$

$$u_{EB} = f''(u_{CE}, i_B)$$

Caracteristicile tranzistoarelor bipolare se pot exprima și sub formă analitică. Se consideră un tranzistor în conexiune BC. Folosind ecuația diodei ideale, se pot deduce ecuațiile curenților i_C și i_E , pentru oricare regim de funcționare.

Notând I_{CS} și I_{ES} curenții de saturație ai joncțiunilor de colector respectiv de emitor, curenții i_C și i_E pot fi considerați ca rezultând din însumarea a câte doi curenți, corespunzători celor două joncțiuni. Astfel, prin joncțiunea colectorului circulă componentele:

$$I_{CS} \left[\exp\left(\frac{e u_{CB}}{kT}\right) - 1 \right] \text{ corespunzătoare tensiunii } u_{CB} \text{ și}$$

$$\alpha_N I_{ES} \left[\exp\left(\frac{e u_{EB}}{kT}\right) - 1 \right] \text{ dată de joncțiunea emitorului ca urmare a efectului de}$$

tranzistor.

În mod similar, prin joncțiunea emitorului circulă:

$$I_{ES} \left[\exp\left(\frac{e u_{EB}}{kT}\right) - 1 \right], \text{ datorită tensiunii } u_{EB} \text{ aplicată și}$$

$$\alpha_I I_{CS} \left[\exp\left(\frac{e u_{CB}}{kT}\right) - 1 \right], \text{ datorită efectului de tranzistor în regiunea activă}$$

inversă.

Rezultă expresiile:

$$i_C = -I_{CS} \left[\exp\left(\frac{e u_{CB}}{kT}\right) - 1 \right] + \alpha_N I_{ES} \left[\exp\left(\frac{e u_{BE}}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$i_E = I_{ES} \left[\exp\left(\frac{e u_{EB}}{kT}\right) - 1 \right] - \alpha_I I_{CS} \left[\exp\left(\frac{e u_{CB}}{kT}\right) - 1 \right]$$

Cele două ecuații formează modelul Ebers - Moll al tranzistorului bipolar.

2.5.4 Influența temperaturii asupra caracteristicilor statice ale tranzistorului

Concentrațiile purtătorilor minoritari din cele trei regiuni ale tranzistorului bipolar depind exponențial ($T^{3/2}$) de temperatura cristalului. Această particularitate determină o influență importantă a temperaturilor joncțiunilor asupra caracteristicilor statice ale tranzistorului. Dintre efectele cele mai importante menționăm:

- creșterea curentului de colector i_C cu temperatura, având ca efect deplasarea spre în sus a curbelor din familia caracteristicilor de ieșire (fig. 2.27). O influență deosebită o are creșterea substanțială cu temperatura a curentului de purtători minoritari I_{CB0} . La tranzistoarele cu Si, curentul rezidual este extrem de mic, de ordinul nA, astfel că ponderea sa, chiar la temperaturi ridicate, este mai mică decât la tranzistoarele cu Ge.

SURSE ȘI CIRCUITE DE ALIMENTARE

- micșorarea tensiunii emitor - bază (pentru $i_E = ct$ sau $i_B = ct$), având ca efect modificarea caracteristicilor de intrare, atât în schema BC , cât și în EC (fig. 2.28 a, b).
- creșterea coeficientului static de amplificare α_N și implicit a coeficientului β_N la majoritatea tranzistoarelor.

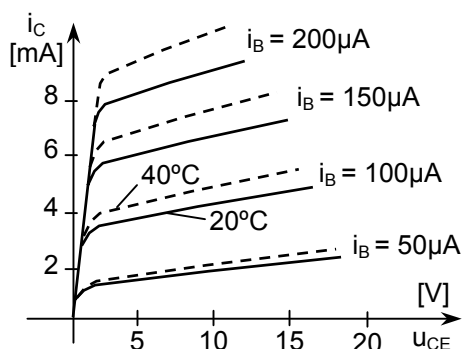


Fig. 2.27 Modificarea cu temperatura a familiei caracteristicilor de ieșire la un tranzistor (conexiune EC)

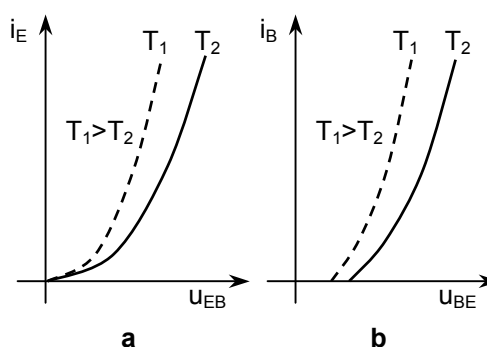


Fig. 2.28 Modificarea caracteristicilor de intrare cu temperatura
a) în conexiunea BC ;
b) în conexiunea EC

2.5.4 Stabilirea punctului static de funcționare al tranzistorului

Pentru funcționarea corectă a tranzistorului bipolar într-un etaj de amplificare, așa cum s-a văzut la începutul capitolului (când s-a discutat despre tranzistor ca element comandat prin semnal, fig. 2.19 c), tranzistorul trebuie să fie alimentat în serie cu rezistența de sarcină, astfel încât să fie asigurată funcționarea în regiunea activă a caracteristicilor de ieșire.

Considerăm conexiunea EC , care este de fapt și cel mai des folosită în circuitele electronice.

Asigurarea unui punct static de funcționare în regiunea activă normală a caracteristicilor, caracterizat de curentul de bază i_{B0} , curentul de colector i_{C0} și tensiunea colector - emitor u_{CE0} , necesită polarizarea în sens de conducție a joncțiunii emitoare și a joncțiunii colectorului în sens de blocare. Aceasta se poate realiza cu ajutorul a două surse E_C și E_B (fig. 2.29). Rezistența R_B din circuitul bazei se alege astfel ca pentru o rezistență de sarcină $R_S \equiv R_C$ și o tensiune de

colector E_C date, să se impună un punct de funcționare convenabil, în regiunea activă admisibilă a caracteristicii statice.

Schemele din fig. 2.29 au dezavantajul că necesită două surse de alimentare care să asigure funcționarea montajului, de aceea se folosește rar.

Pentru realizarea etajului de amplificare, se poate utiliza și o singură sursă de alimentare, prin care se stabilește atât polarizarea joncțiunii colectorului, cât și polarizarea joncțiunii emitorului. Cea mai simplă situație constă în alimentarea bazei de la sursa de colector E_C , printr-o rezistență R_B care asigură valoarea i_{B0} a curentului de bază (fig. 2.30).

Presupunem că sunt date caracteristicile de ieșire ale tranzistorului (ca în fig. 2.31)

$$i_C = f(u_{CE}, i_B)$$

precum și mărimile E_C , R_B și rezistența de sarcină (de colector). Se pune problema determinării punctului static de funcționare, definit prin mărimile i_{B0} , i_{C0} și u_{CE0} . În acest scop, se scrie legea a II-a a lui Kirchhoff pe circuitul de colector și pe circuitul de alimentare a bazei.

$$E_C = R_C i_C + u_{CE}$$

$$E_C = R_B i_B + u_{BE}$$

Deoarece $|u_{BE}| \ll E_C$, putem scrie:

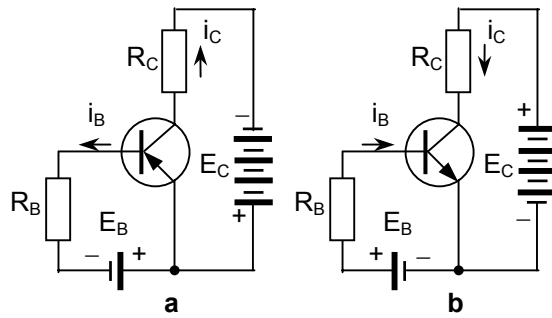


Fig. 2.29 Alimentarea unui tranzistor într-un etaj, folosind două surse de alimentare. a) tranzistor pnp; b) tranzistor npn

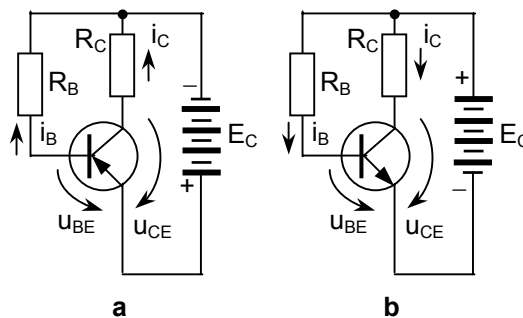


Fig. 2.30 Alimentarea unui tranzistor într-un etaj, folosind o singură sursă de alimentare. a) tranzistor pnp; b) tranzistor npn

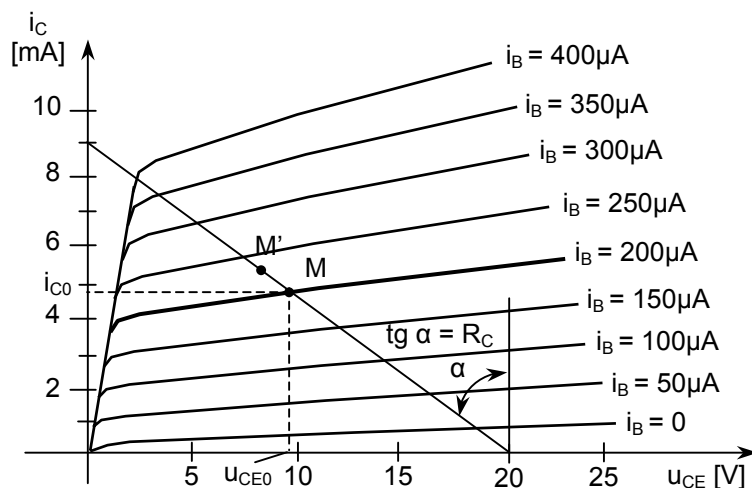


Fig. 2.31 Stabilirea punctului static de funcționare pentru tranzistorul alimentat de la o singură sursă

$$E_C \cong R_B i_B$$

Pentru deducerea punctului static de funcționare în schema din fig. 2.30, se rezolvă grafic sistemul:

$$i_C = f(u_{CE}, i_B)$$

$$E_C = R_C i_C + u_{CE}$$

$$E_C \cong R_B i_B$$

Din ultima ecuație a sistemului rezultă imediat:

$$i_{B0} \cong E_C / R_B$$

În planul caracteristicilor de ieșire se face reprezentarea grafică a dreptei statice de sarcină (ecuația $E_C = R_C i_C + u_{CE}$). Intersecția dreptei statice de sarcină cu caracteristica corespunzătoare curentului i_{B0} , determină punctul static de funcționare M , de coordonate u_{CE0} , i_{C0} .

De asemenea, dacă se dă tensiunea E_C și punctul static de funcționare, se pot calcula rezistențele R_C și R_B care să asigure punctul static de funcționare dat.

S-a arătat că variația temperaturii produce modificarea caracteristicilor statice ale tranzistoarelor. Considerând modificarea temperaturii la o valoare mai ridicată, punctul static de funcționare se modifică din M în M' (fig. 2.31). Curentul de colector crește, iar $|u_{CE}|$ scade. O cerință importantă impusă circuitului de polarizare a tranzistorului, care nu este îndeplinită de schemele din fig. 2.30, este asigurarea stabilității punctului static de funcționare la variația temperaturii.

Ținând seama de influența temperaturii asupra curentului rezidual I_{CB0} , tensiunii u_{EB} (corespunzătoare unui curent $i_E = \text{const.}$) și asupra factorului β_N , precum și de efectul acestor mărimi asupra curentului de colector exprimat de relația:

$$i_C = i_C(I_{CB0}, U_{EB}, \beta_N),$$

se obține variația totală a curentului de colector, prin diferențierea relației și trecerea la diferențe finite:

$$\Delta i_C = \frac{\partial i_C}{\partial I_{CB0}} \Delta I_{CB0} + \frac{\partial i_C}{\partial |U_{EB}|} \Delta |U_{EB}| + \frac{\partial i_C}{\partial \beta_N} \Delta \beta_N$$

sau:

$$\Delta i_C = S_I \Delta I_{CB0} + S_U \Delta |U_{EB}| + S_\beta \Delta \beta_N, \text{ unde}$$

$$S_I = \frac{\partial i_C}{\partial I_{CB0}}; \quad S_U = \frac{\partial i_C}{\partial |U_{EB}|}; \quad S_\beta = \frac{\partial i_C}{\partial \beta_N}$$

sunt factorii de sensibilitate ai curentului de colector, în raport cu I_{CB0} , $|U_{EB}|$ și β_N . Micșorarea variației Δi_C , la modificarea temperaturii, se realizează cu ajutorul unor scheme de polarizare a tranzistorului, care asigură stabilizarea termică a punctului static de funcționare.

ÎNTREBĂRI – PROBLEME

1. Cum se comportă semiconductoarele din punct de vedere al conductivității la temperaturi foarte joase?
2. Care este energia de activare a electronilor de valență ΔW dintr-un semiconductor (exprimată în eV)?
3. Cine participă la conducție într-un semiconductor intrinsec?
4. Ce efect are creșterea temperaturii asupra numărului de electroni liberi din materialele semiconductoare?
5. Cine asigură conducția electrică în semiconductoarele intrinseci?
6. Ce relație este între masa electronului de conducție m_n și masa electronului m_e ?
7. Care este sarcina electronului de conducție, față de sarcina electrică elementară e ?
8. Ce relație respectă, pentru un semiconductor pur, la echilibru termic la o temperatură dată, concentrațiile de electroni n_0 și de goluri p_0 ?
9. Ce valență au impuritățile folosite pentru a realiza un semiconductor extrinsec de tip n ?
10. Ce valență au impuritățile folosite pentru a realiza un semiconductor extrinsec de tip p ?
11. Ce valoare poate avea din punct de vedere al energiei un electron liber dintr-un material semiconductor?
12. Ce valoare poate avea din punct de vedere al energiei un gol dintr-un material semiconductor?

13. Cum depinde de temperatura absolută T concentrația de electroni și de goluri generați prin mecanism intrinsec într-un semiconductor la echilibru termic?
14. Unde este plasat nivelul energetic donor introdus într-un semiconductor extrinsec de tip n de impuritățile donoare?
15. Unde este plasat nivelul energetic acceptor introdus într-un semiconductor extrinsec de tip p de impuritățile acceptoare?
16. Ce se constată din punctul de vedere al concentrației purtătorilor majoritari în vecinătatea suprafeței de separație a unei joncțiuni $p - n$?
17. Ce efect are câmpul intern al regiunii de trecere creat de sarcina spațială a unei joncțiuni $p-n$ asupra difuziei purtătorilor majoritari?
18. Cine formează sarcina spațială a unei joncțiuni $p - n$?
19. În ce relație se află, la regimul de echilibru termic al unei joncțiuni $p-n$ nepolarizate, curentul de difuzie i_d și curentul de conducție i_c ?
20. În ce relație se află, pentru o joncțiune $p-n$ polarizată în sens direct, curentul de difuzie i_d și curentul de conducție i_c ?
21. În ce relație se află, pentru o joncțiune $p-n$ polarizată în sens invers, curentul de difuzie i_d și curentul de conducție i_c ?
22. Cum variază la o joncțiune $p-n$, la aplicarea unei tensiuni inverse, lățimea regiunii de trecere în funcție de concentrațiile de impurități din zonele respective?
23. Cum se comportă, din punct de vedere al conducției electrice, regiunea de trecere a joncțiunii $p - n$?
24. Ce efect are asupra lărgimii regiunii de trecere a unei joncțiuni $p - n$ tensiunea inversă aplicată joncțiunii?
25. Ce reprezintă caracteristica statică a diodei semiconductoare?

SURSE ȘI CIRCUITE DE ALIMENTARE

26. Ce se constată la aplicarea pe dioda semiconductoare a unor tensiuni inverse mari?
27. Cum depinde din punct de vedere al legii matematice, în expresia caracteristicii teoretice a unei diode semiconductoare, curentul de tensiunea aplicată joncțiunii?
28. Ce efect are creșterea temperaturii joncțiunii unei diode semiconductoare asupra valorii curentului prin diodă?
29. Cum se definește riguros rezistența internă a unei diode semiconductoare funcționând în punctul static $M(U_{a0}, I_{a0})$, cu variații de semnal mic $\Delta u_a, \Delta i_a$?
30. Cine determină apariția capacității de barieră C_b a unei joncțiuni $p-n$?
31. Ce efect are asupra capacității de barieră creșterea tensiunii aplicate pe joncțiunea $p-n$?
32. Ce se întâmplă cu valoarea rezistenței interne a diodei la o valoare mai mare a curentului de punct static al diodei semiconductoare?
33. Unde se plasează în mod normal punctul de funcționare la o diodă Zener?
34. Ce regiune a tranzistorului bipolar este caracterizată de cel mai înalt nivel de dopare cu impurități?
35. Ce regiune a tranzistorului bipolar este caracterizată de cel mai redus nivel de dopare cu impurități?
36. Care este cea mai îngustă regiune într-un tranzistor bipolar?
37. Cine asigură conducția într-un tranzistor bipolar?
38. Cum se definește pentru un tranzistor pnp , factorul de amplificare în curent α_N ?
39. Cine asigură, în cea mai mare parte, pentru un tranzistor pnp curentul de difuzie prin joncțiunea emitorului?

40. Ce se întâmplă cu golurile în baza unui tranzistor *pnp*?
41. Cine determină, pentru un tranzistor *pnp*, transferul aproape integral al golurilor din regiunea de emitor în cea de colector?
42. Care este, pentru un tranzistor bipolar în conexiune normală, valoarea tipică a factorului static de amplificare în curent α_N ?
43. În ce relație se află, pentru un tranzistor bipolar în conexiune normală, curentul de colector și curentul de emitor?
44. Cum sunt polarizate joncțiunile tranzistorului bipolar funcționând în regiunea activă directă (normală)?
45. Cum sunt polarizate joncțiunile tranzistorului bipolar funcționând în regiunea activă inversă?
46. Cum sunt polarizate joncțiunile tranzistorului bipolar funcționând în regiunea de blocare?
47. Cum sunt polarizate joncțiunile tranzistorului bipolar funcționând în regiunea de saturație?
48. Care este valoarea tipică a factorului de amplificare static în curent al tranzistorului în conexiunea emitor comun β_N ?
49. Cum variază, conform caracteristicilor de intrare ale tranzistorului în conexiunea emitor comun, pentru aceeași valoare a tensiunii u_{BE} , i_B în funcție de u_{CE} ?
50. Ce efect are creșterea temperaturii asupra curbelor din familia caracteristicilor de ieșire pentru un tranzistor bipolar funcționând în conexiunea emitor comun?
51. Ce efect are creșterea temperaturii asupra tensiunii emitor-bază pentru un tranzistor bipolar funcționând în conexiunea emitor comun?