



UNIUNEA EUROPEANĂ



GUVERNUL ROMÂNIEI



Instrumente Structurale  
2007-2013



# Platformă de e-learning și curriculum e-content pentru învățământul superior tehnic

## Elemente de Electronică Analogică

### 52. Dispozitive electronice: Dioda, TBIP, TEC

## Dispozitive electronice in regim static

### DIODA SEMICONDUCTOARE

#### 1. A. Caracteristica statică a diodelor semiconductoare

##### 1. A. 1. Scopul lucrării experimentale

Ridicarea caracteristicilor statice și determinarea principalilor parametri ai diodelor semiconductoare; studiul comportării diodei semiconductoare în circuite elementare.

##### 1. A. 2. Noțiuni teoretice

Caracteristica statică, curent-tensiune, teoretică a unei diode semiconductoare dedusă prin analiza fenomenelor fizice într-o joncțiune PN ideală ce au loc la aplicarea unei tensiuni din exterior este dată de legea (Shockley):

$$i_A = I_0 (e^{\frac{qu_A}{kT}} - 1) \quad (1.1)$$

unde:  $k = 1.3807 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$  (constanta Boltzmann) și  $q = -1.60219 \cdot 10^{-19}$  (sarcina electrică elementară).

În această relație reprezentată grafic în fig. (1.1),  $I_0$  este curentul de saturație al diodei dat de expresia :

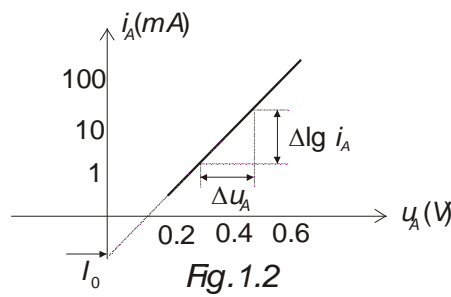
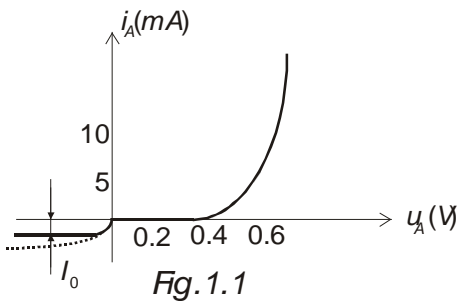
$$I_0 = qn_i^2 \left( \frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right) S \quad (1.2)$$

și este dependent de parametrii fizici și tehnologici ai joncțiunii PN (suprafața joncțiunii,  $S$ , concentrația intrinsecă de purtători  $n_i$ , coeficienții de difuzie  $D_p$ ,  $D_n$ , lungimile de difuzie  $L_p$ ,  $L_n$ , ale purtătorilor de sarcină, precum și concentrațiile de impurități,  $N_D$ ,  $N_A$ ), iar  $1 < \gamma < 2$ , un coeficient cu valori mai apropiate de 1 pentru Ge, și mai apropiate de 2 pentru Si, care rezultă din considerarea efectului de

recombinare din zona de sarcină spațială la tensiuni de polarizare directe mici (efect important la diodele cu Si la temperatura camerei).

În funcție de suprafața joncțiunii PN, la rândul ei, dependentă de curentul maxim pe care trebuie să-l accepte dioda în conducție directă, curentul de saturație  $I_0$ , are, la temperatura camerei, valori de ordinul de mărime,  $1 \div 10 \mu\text{A}$ , pentru diodele din Ge și  $1 \div 100 \text{ mA}$  pentru diodele din Si.

La curenți direcți de ordinul  $1 \div 10 \text{ mA}$  (valori des întâlnite în practică) tensiunea directă pe diodă este de  $0.2 - 0.3 \text{ V}$  pentru diodele din Ge respectiv  $0.6 - 0.8 \text{ V}$  pentru diodele din Si.



Cele două mărimi,  $I_0$  și  $\gamma$ , se determină prin reprezentarea ecuației diodei semiconductoare la scară semilogaritmică (ca în fig. (1.2), unde, pe abscisă se reprezintă tensiunea aplicată pentru conducție directă la scară liniară și pe verticală curentul pe diodă în scară logaritmică). Panta dreptei astfel obținute permite deducerea coeficientului  $\gamma$ . (De remarcat faptul că forma exponențială a caracteristicii directe se păstrează într-un interval mare de valori ale curentului) cu relația :

$$\gamma = \frac{q}{KT} \frac{1}{2.3} \frac{\Delta u_A}{\Delta \lg i_A} \quad (1.3)$$

Prin prelungirea aceleiași drepte, la intersecția cu axa ordonatei, se obține curentul de saturație  $I_0$ .

Dependența de temperatură a caracteristicii statice a unei diode semiconductoare este foarte puternică, înregistrându-se a dublare a curentului de saturație la fiecare  $10^\circ\text{C}$  pentru diode din Ge respectiv la fiecare  $6^\circ\text{C}$  pentru diodele din Si. Această dependență poate fi pusă în evidență și prin coeficientul de

variație a tensiunii directe de pe diodă cu temperatura, la curent constant. Teoretic acest curent este de circa  $-2 \text{ mV} / ^\circ\text{C}$ , pentru ambele tipuri de material utilizate curent pentru realizarea diodelor semiconductoare.

La polarizare inversă, conform ecuație teoretice (1.1), curentul este constant și egal cu  $-I_0$ . Dar pentru tensiuni inverse aplicate diodei, regiunea de sarcină spațială se mărește și apare un curent de generare, dependent de tensiunea aplicată, cu valori relative importante pentru diodele de Si (în fig. (1.1) contribuția acestui curent la cracteristica diodei a fost reprezentată punctat). La tensiuni de polarizare inversă mai mari, datorită fenomenului Zener, și fenomenului de multiplicare în avalanșă (predominant de obicei), curentul invers crește, valoare lui fiind limitată numai de circuitul exterior. Tensiunile de străpungere, la care apare această creștere a curentului, sunt dependente de natura materialului semiconductor, din care este realizat dispozitivul, precum și de concentrațiile de impurități, fiind cu atât mai mici cu cât concentrațiile de impurități sunt mai mari.

La tensiuni directe mari caracteristica statică tinde să se liniarizeze, datorită căderilor de tensiune pe zonele neutre ale joncțiunii PN, care nu mai pot fi neglijabile.

În circuitele electronice, diodele semiconductoare pot îndeplini mai multe funcțiuni (redresare, detecție, limitare, etc.) în multe situații fiind necesară stabilirea unui regim static de funcționare.

Pentru circuitul elementar din fig. (1.3) punctul static de funcționare se determină prin rezolvarea grafoanalitică a sistemului de ecuații format din ecuația caracteristicii statice a diodei (1.1) și ecuația dreptei statice de funcționare :

$$u_A = E - R \cdot i_A \quad (1.4)$$

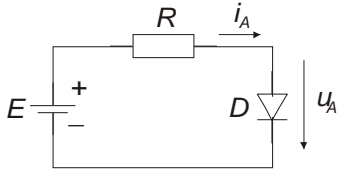


Fig.1.3

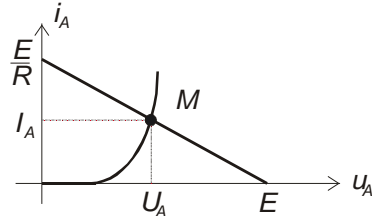


Fig.1.4

Punctul static de funcționare  $M$  are coordonatele  $M(U_A, I_A)$ , iar în acest punct de funcționare dioda este caracterizată din punct de vedere al semnalelor lent variabile (ce pot fi aplicate în serie cu tensiunea continuă  $E$ ) printr-o rezistență dinamică, pentru care se deduce relația :

$$r_d = \gamma \frac{KT}{qI_A} \quad (1.5)$$

Rezistența dinamică  $r_d$  se determină experimental prin calculul pantei caracteristicii statice, în punctul static de funcționare  $M$  conform relației :

$$r_d = \left. \frac{\Delta u_A}{\Delta i_A} \right|_M \quad (1.6)$$

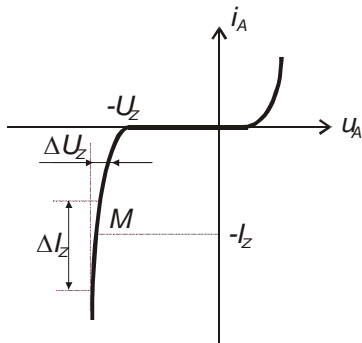


Fig.1.5

Diodele stabilizatoare de tensiune (impropriu dar frecvent denumite diode Zener) sunt caracterizate printr-o tensiune de străpungere bine definită (datorită efectului de multiplicare în avalanșă care determină o creștere foarte puternică a curentului invers în zona de străpungere), controlată prin concentrația de impurități, funcționarea normală a diodei fiind în această zonă. Fig. (1.5), în care este reprezentată caracteristica statică, atât cea directă cât și cea inversă, permite înțelegerea noțiunii de tensiune stabilizată,  $U_Z$ , precum și determinarea rezistenței dinamice a diodei,  $r_Z$ , conform relației (1.7).

$$r_Z = \left. \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z} \right|_{I_Z=ct.} \quad (1.7)$$

### 1. A. 3. Desfășurarea lucrării experimentale:

Se identifică montajul din fig. (1.6) în care se folosește o schemă electrică ajutăoare ca sursă de curent reglabil cu ajutorul potențiometrului  $P$ . Alimentat în curent continuu între bornele 3 (+5 V) și 2 (masă), circuitul furnizează la borna 7 un curent reglabil între 0÷50 mA, iar la borna 8 un curent de maximum 500 mA, ambele închizându-se spre borna comună de masă (borna 2).

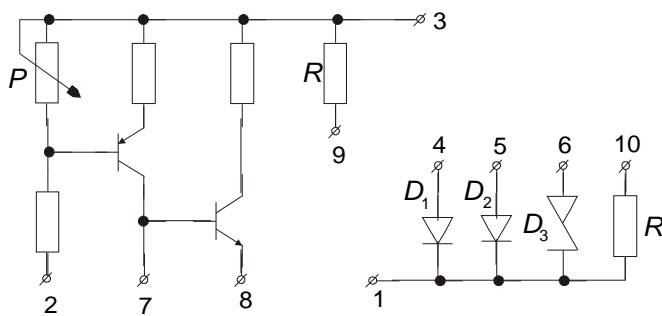


Fig.1.6

Se ridică caracteristicile statice la polarizarea directă pentru diodele  $D_1$  - EFR 136 (diodă redresoare din Ge), curenți în domeniul 0,5÷200 mA (borna 4 reprezintă anodul),  $D_2$  -BA 243 (diodă din Si, de uz general, de putere mică), curenți în domeniul 0,1÷50 mA (borna 5 este anodul) și  $D_3$  -BZX 85 C7V5 (diodă stabilizatoare de tensiune), curenți în domeniul 0,1÷20 mA (anodul este borna 6).

Ridicarea caracteristicilor directe se face cu montajul din fig. (1.7); curentul prin diodă se măsoară cu un miliampermetru, pe o scară corespunzătoare de curenți, iar tensiunea la bornele diodei cu un volmetru electronic (de preferință voltmetru numeric). Curentul se va regla la valori pentru care se poate face o reprezentare comodă la scară logaritmică adică multiplii și submultiplii zecimali ai numerelor 1,2 și 5 (ai căror logaritmi zecimali sunt, aproximativ, 0, 0.3 respectiv 0.7).

Pentru dioda EFR 136 se va folosi borna 8 a generatorului pentru curenți mai mari de 50 mA iar pentru celelalte cazuri se va folosi numai borna 7 a generatorului de curent.

Rezultatele măsurătorilor experimentale se vor trece în tabel (1.1). și se va reprezenta grafic dependența curent – tensiune pentru fiecare dioda in parte, la scara liniară.

Se simulează montajul utilizat la determinările experimentale, completându-se tabelul (1.1) cu datele obtinute.

La curentul  $I_A = 5 \text{ mA}$  se încălzește (cu mâna sau prin apropierea unui ciocan de lipit încălzit) dioda BA 243 și se constată, calitativ, modificarea tensiunii directe pe diodă.

Se trasează caracteristicile statice ale celor trei diode la scară semilogaritmică (ca în fig. (1.2)) și se determină parametrii  $I_0$  și  $\gamma$ .

| Tensiune (V)   | Curent (mA) |     |     |     |   |   |   |    |    |    |     |     |  |
|----------------|-------------|-----|-----|-----|---|---|---|----|----|----|-----|-----|--|
|                |             | 0.1 | 0.2 | 0.5 | 1 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 | 100 | 200 |  |
| D <sub>1</sub> | Experiment  |     |     |     |   |   |   |    |    |    |     |     |  |
|                | Simulare    |     |     |     |   |   |   |    |    |    |     |     |  |
| D <sub>2</sub> | Experiment  |     |     |     |   |   |   |    |    |    |     |     |  |
|                | Simulare    |     |     |     |   |   |   |    |    |    |     |     |  |
| D <sub>3</sub> | Experiment  |     |     |     |   |   |   |    |    |    |     |     |  |
|                | Simulare    |     |     |     |   |   |   |    |    |    |     |     |  |

Tabel 1.1 Dependența curent - tensiune

Se vor trasa cele șase caracteristici la scară liniară pe un același grafic, pe hârtie milimetrică (numai în domeniul de curenți comun diodelor). Pentru BA 243 se va trasa și dreapta statică de funcționare (ecuația (1.4.), cu  $E = 5\text{ V}$  și  $R = 820\ \Omega$ ) determina punctul static de funcționare precizarea coordonatelor sale,  $U_A$  și  $I_A$ ). de funcționare astfel stabilit, se va grafic, rezistența dinamică cu relația calcula și valoarea teoretică a rezistenței formula (1.5) în care  $\frac{kT}{q} = 26\text{ mV}$ ,  $\gamma$  are la punctul anterior iar  $I_A$  are valoarea funcționare și se vor compara

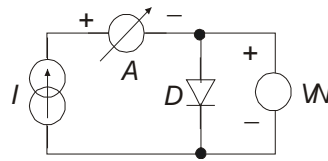


Fig.1.7

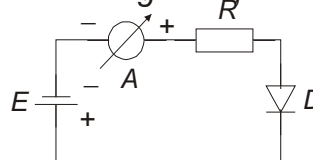


Fig.1.8

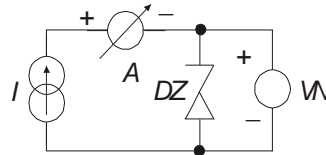


Fig.1.9

Se realizează circuitul din dioda BA 243 cu  $E = 5\text{ V}$  și  $R = 820\ \Omega$  și mărimile caracteristice punctului static de funcționare,  $U_A$  și  $I_A$  și se compară cu rezultatele obținute prin metoda grafoanalitică, la punctul precedent.

Cu montajul din fig. (1.8) se măsoară curentul invers prin diodele EFR 136 și BA 243 la tensiunile  $E = 0, -5\text{ V}, -10\text{ V}, -20\text{ V}$ . Rezultatele se trec în tabelul (1.2).

Se simulează montajul utilizat la determinările experimentale, completându-se tabelul (1.2) cu datele obținute. Se face o comparație între caracteristica determinată experimental și caracteristica simulată.

funcționare și se va  $M$  (prin  $\hat{M}$  în punctul static determina, (1.6); se va dinamice cu valoarea dedusă din punctul de rezultatele.

fig.(1.3) pentru se măsoară



| E (V)<br>Curent invers ( $\mu$ A) |  | 0                           | -5 | -10 | -20 |
|-----------------------------------|--|-----------------------------|----|-----|-----|
|                                   |  | D <sub>1</sub> experimental |    |     |     |
| Simulare                          |  |                             |    |     |     |
| D <sub>2</sub> experimental       |  |                             |    |     |     |
| Simulare                          |  |                             |    |     |     |

Tabel 1.2 Caracteristica inversă pentru diodele redresoare

Se măsoară caracteristica inversă a diodei stabilizatoare de tensiune BZX 85 C7V5 cu montajul din fig. (1.9), pentru curenți între 0.1 mA și 20 mA. Pentru aceasta, generatorul de curent se alimentează cu +15 V (la borna 3), bornele 7 și 1 se conectează împreună printr-un miliampermetru iar tensiunea se măsoară cu un voltmetru electronic (numeric) (bornele 2 și 6 sunt cuplate la masă). Rezultatele determinarilor experimentale se trec în tabelul (1.3).

| Curent (mA)<br>Tensiune (V) |  | 0.1                       | 0.2 | 0.5 | 1 | 2 | 5 | 10 | 20 |
|-----------------------------|--|---------------------------|-----|-----|---|---|---|----|----|
|                             |  | D <sub>3</sub> Experiment |     |     |   |   |   |    |    |
| Simulare                    |  |                           |     |     |   |   |   |    |    |

Tabel 1.3 Caracteristica inversă pentru dioda Zener

Se simulează montajul utilizat la determinările experimentale, completându-se tabelul (1.3) cu datele obținute.

Se trasează caracteristica inversă a diodei stabilizatoare la scară liniară pe un grafic pe care se trasează, spre comparație și caracteristica directă. În punctul static de funcționare caracterizat prin  $I_z = 10 \text{ mA}$ , se determină rezistența dinamică, măsurând tensiunea pe diodă la curenții:  $I_z = 5 \text{ mA}$  și  $I_z = 15 \text{ mA}$ .

#### **1. A. 4. Cuprinsul referatului :**

- schemele de principiu pentru ridicarea caracteristicilor directe și inverse ale diodelor;
- tabelele cu rezultatele măsurărilor și simularilor;
- graficele și determinările făcute pe baza acestora;
- compararea rezultatelor experimentale și simulate.

## **TRANZISTORUL BIPOLAR**

### **B. Caracteristicile statice ale tranzistorului bipolar**

#### **1. B. 1. Scopul lucrării experimentale :**

Ridicarea caracteristicilor statice ale tranzistorului bipolar în conexiunile emitor-comun (**EC**) și bază-comună (**BC**), determinarea unor parametri de curent continuu și de regim dinamic al tranzistorului bipolar.

#### **1. B. 2. Noțiuni teoretice :**

În fig. (1.10.) este reprezentat simbolul unui tranzistor NPN cu precizarea sensului curenților și tensiunilor așa cum vor fi folosite în această lucrare. Între aceste mărimi se pot scrie relațiile:

$$i_E = i_C + i_B \quad (1.8)$$

$$u_{CE} = u_{CB} + u_{BE} \quad (1.9)$$

Comportarea tranzistorului bipolar în continuu este definită de relațiile ce descriu curenților  $i_C$  și  $i_E$  de tensiunile aplicate la celor două joncțiuni  $u_{BE}$  și  $u_{CB}$ . În regiunea normală, joncțiunea emitor-bază polarizată joncțiunea colector-bază polarizată invers, relațiile de bază pentru curenți pentru un tranzistor NPN sunt:

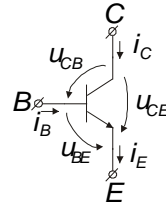


Fig. 1.10

regim  
dependența  
bornele  
activă  
direct și

$$i_E = S \frac{qD_n n_p}{w} e^{\frac{q \cdot u_{BE}}{kT}} \quad (1.10)$$

$$i_C = \alpha_0 i_E + I_{cb0} \quad (1.11)$$

În aceste relații  $S$  este suprafața joncțiunii bază-emitor,  $D_n$  este constanta de difuzie a purtătorilor minoritari din bază (electronii) a căror concentrație este  $n_p$ ,  $\frac{kT}{q} = 26$  mV la temperatura camerei,  $w$  este grosimea efectivă a bazei dată de relația:

$$w = d - \sqrt{\frac{2\varepsilon(U'_0 - u_{CB})}{q} \frac{n_n + p'_p}{n_n \cdot p'_p}} \quad (1.12)$$

( $d$  este grosimea fizică a bazei,  $U'_0$  este bariera de potențial a joncțiunii colector-bază dependentă de concentrațiile de purtători majoritari din bază  $n_n$  și din colector  $p'_p$ , iar  $\varepsilon$  este permitivitatea electrică a materialului din care este confecționat tranzistorul); se constată că, la creșterea tensiunii de polarizare inversă a joncțiunii bază-collector, grosimea efectivă a bazei scade. Parametrul  $\alpha_0$  este factorul de curent al tranzistorului în conexiunea bază comună și are expresia aproximativă data de relația (1.13).

$$\alpha_0 = \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{w}{L_n} \right)^2 \right] \left( 1 - \frac{\sigma_p}{\sigma_n} \frac{w}{L_p} \right) \quad (1.13)$$

unde  $L_n$  și  $L_p$  sunt lungimile de difuzie ale electronilor (în bază) respectiv ale golurilor (în emitor) iar  $\sigma_p$  și  $\sigma_n$  sunt conductivitățile electrice ale bazei, respectiv

emitorului. Se remarcă dependența lui  $\alpha_0$  de tensiunea colector bază prin intermediul lui  $w$ .

Din punct de vedere practic, pentru determinarea regimului de funcționare în curent continuu, este necesară cunoașterea caracteristicilor statice de intrare, de transfer direct și de ieșire (numai două dintre ele sunt independente), cu particularități specifice fiecărui mod de conexiune. În conexiunea *bază comună*, terminalul de referință este baza iar în conexiunea *emitor comun* terminalul de referință va fi emitorul.

Din punct de vedere dinamic, la semnale mici (când caracteristicile statice pot fi liniarizate în jurul punctului static de funcționare), lent variabile, tranzistorului poate fi caracterizat prin parametrii de cuadripol definiți prin ecuațiile:

$$\begin{cases} U_1 = h_i I_1 + h_r U_2 \\ I_2 = h_f I_1 + h_o U_2 \end{cases} \quad (1.14)$$

unde  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $I_1$  și  $I_2$  sunt mărimile variabile sinusoidale, cu sensurile obișnuite acceptate pentru cuadripoli. Parametrii  $h$  vor fi indexați  $b$  sau  $c$  după cum tranzistorul este utilizat în conexiunea BC sau CC; conexiunea EC fiind cea mai des utilizată nu se indexează.

Caracteristica de intrare a tranzistorului în conexiunea BC adică  $i_E = i_E(u_{EB})$ , se deduce din relația (1.10), în care se înlocuiește  $u_{BE} = -u_{EB}$ . Reprezentarea grafică

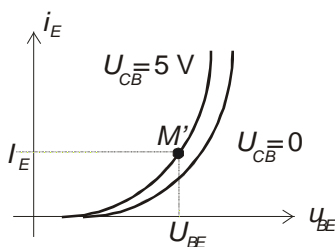


Fig. 1.11

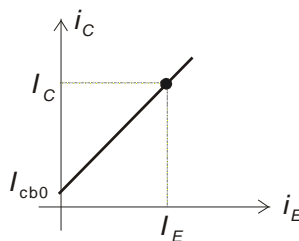


Fig. 1.12

este dată în fig. (1.11), unde s-a considerat ca parametru, tensiunea  $u_{CB}$ .

Se constată caracterul exponențial al caracteristicii de intrare și influența mică a tensiunii de colector asupra caracteristicii de intrare. Exponentul poate fi

afectat de coeficientul  $\gamma$ , ca la dioda semiconductoră, determinarea lui experimentală făcându-se în același mod.

Caracteristica de transfer  $i_C = i_C(i_E)$  este descrisă de ecuația (1.11) și este reprezentată grafic în fig. (1.12.); factorul de curent  $\alpha_0$ , care dă panta acestei drepte, variază foarte puțin cu tensiunea  $u_{CB}$  (prin intermediul lui  $w$ ) și cu curentul de colector (scădere atât la curenți mici cât și la curenți mari, dependență care nu rezultă din teoria elementară a tranzistorului). Factorul de curent al tranzistorului în conexiunea bază comună,  $\alpha_0$ , se calculează cu relația:

$$\alpha_0 = \frac{i_C - I_{cb0}}{i_E} \quad (1.15)$$

Precizia acestei relații este puternic afectată de imprecizia măsurărilor curenților  $i_C$  și  $i_E$ , de valori foarte apropiate. Pentru măsurarea factorului de curent  $\alpha_0$  se preferă relația (1.22), după măsurarea factorului de curent în conexiunea EC,  $\beta_0$ .  $I_{cb0}$  este curentul jonctiunii colector-bază polarizate invers cu emitorul în gol, de valoare foarte mică pentru tranzistoarele realizate din siliciu și dependent de

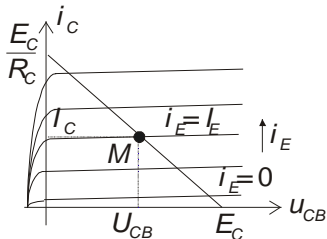


Fig. 1.13

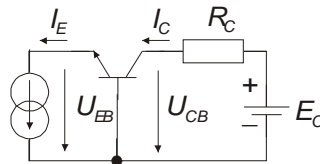


Fig. 1.14

tensiunea  $u_{CB}$ .

Caracteristicile de ieșire  $i_C = i_C(u_{CB})$ , sunt determinate de relațiile (1.11) și (1.13) și sunt reprezentate grafic în fig. (1.13). Se constată dependența foarte mică a curentului de colector de tensiunea  $u_{CB}$  în regiunea activă normală, caracteristicile fiind practic orizontale și echidistante, pentru trepte constante ale curentului de emitor (ceea ce conferă tranzistorului în conexiunea BC caracterul de generator de curent). Pentru tensiuni  $u_{CB} < 0$ , curentul de colector scade datorită polarizării în conducție directă și a jonctiunii colector-bază, ceea ce duce la funcționarea tranzistorului în regiunea de saturatie.

În circuitul elementar din fig. (1.14), punctul static de funcționare se determină prin rezolvarea grafo-analitică a sistemului de ecuații (1.16).

$$\begin{cases} i_C = i_C(i_E, u_{CB}) \\ E_C = R_C i_C + u_{CB} \end{cases} \quad (1.16)$$

unde valoarea curentului de emitor este fixată de circuitul de intrare (în lucrare, de către generatorul de curent). În fig. (1.13) în planul caracteristicilor statice, se trasează dreapta de sarcină și, pentru  $i_E = I_E$ , se obține punctul static de funcționare  $M$  cu coordonatele  $M(I_E, I_C, U_{CB})$ ; pe caracteristica de intrare punctul static de funcționare este  $M'(I_E, U_{EB})$ .

În punctul static de funcționare, se pot măsura parametrii  $h$  pentru caracterizarea funcționării tranzistorului la semnale variabile mici, conform relațiilor :

$$h_{ib} = \left. \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta i_E} \right|_M, \quad h_{fb} = - \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E} \right|_M, \quad h_{ob} = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta u_{CB}} \right|_M \quad (1.17)$$

Pentru parametrii  $h_{ib}$  și  $h_{fb}$  se dau și relațiile teoretice deduse din formulele (1.10) și (1.11) sub forma:

$$h_{ib} \approx \frac{kT}{q \cdot I_E} \approx \frac{kT}{q \cdot I_C} \quad (1.18)$$

$$h_{fb} \approx -\alpha_0 \quad (1.19)$$

Parametrul  $h_{rb}$  nu poate fi determinat printr-o aceeași metodă deoarece variațiile foarte mici ale tensiunii  $u_{EB}$  (la variații mari ale tensiunii  $u_{CB}$ ) sunt afectate de fenomene secundare, cum ar fi modificarea regimului termic al tranzistorului la variația tensiunii de colector.

Caracteristica de intrare pentru tranzistorul în conexiunea EC, dată de funcția  $i_B = i_B(u_{BE})$  are ca parametru tensiunea  $u_{CE}$ , care intervine, în principal, prin parametrul  $w$ . Ecuația acestei caracteristici se obține din relațiile (1.8), (1.10) și (1.11) sub forma :

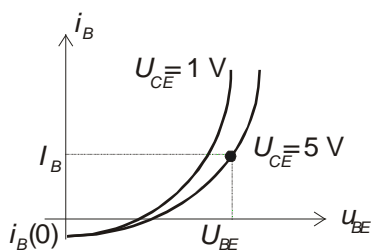


Fig.1.15

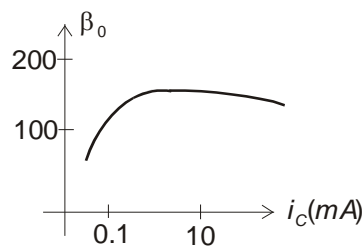


Fig.1.16

$$i_B = (1 - \alpha_0) \frac{S \cdot q \cdot D_n n_p}{w} e^{\frac{q u_{BE}}{kT}} - I_{CB0} \quad (1.20)$$

și este reprezentată grafic în fig. (1.15).

Se constată forma exponențială a caracteristicii, cu o influență redusă a tensiunii  $u_{CE}$  (prin intermediul variației grosimii efective a bazei,  $w$ ) și anularea curentului de bază pentru o valoare diferită de 0 a tensiunii  $u_{BE}$ .

Caracteristica de transfer este dată de relația :

$$i_C = \beta_0 i_B + I_{ce0} \quad (1.21)$$

unde  $\beta_0$  este factorul de curent în conexiune EC a cărui expresie dedusă din relațiile (1.8) și (1.11) este :

$$\beta_0 = \frac{\alpha_0}{1 - \alpha_0} \quad (1.22)$$

iar  $I_{ce0}$  este curentul de colector măsurat cu baza în gol și determinat prin relația :

$$I_{ce0} = (\beta_0 + 1) I_{cb0} \quad (1.23)$$

Factorul de curent al tranzistorului în conexiunea EC depinde de tensiunea colector-emitor (prin intermediul grosimii efective a bazei,  $w$ ) și de curentul de colector (această dependență este mai puternică decât a factorului de curent  $\alpha_0$ ) ca în fig. (1.16).

Factorul de curent  $\beta_0$  se determină din relația (1.21) sub forma:

$$\beta_0 = \frac{i_C - I_{ce0}}{i_B} \quad (1.24)$$

Caracteristicile de ieșire dau dependența curentului de colector de tensiunea  $u_{CE}$  având ca parametru curentul de bază,  $i_B$ , și sunt descrise de relația (1.21); dependența mai puternică a factorului de curent al tranzistorului,  $\beta_0$ , de  $u_{CE}$ , determină o înclinare mai puternică a caracteristicilor față de orizontală.

În zona tensiunilor  $u_{CE}$  mici, ecuația (1.21) nu mai este valabilă, tranzistorul funcționând în regiunea de saturație.

Pentru circuitul elementar din fig. (1.18), punctul static de funcționare se determină prin metoda grafo-analitică de rezolvare a sistemului format din ecuațiile:

$$\begin{cases} i_C = i_C(i_B, u_{CE}) \\ E_C = R_C i_C + u_{CE} \end{cases} \quad (1.25)$$

curentul  $i_B$  fiind determinat de circuitul de intrare (in cazul experimentului, prin generator de curent constant).

În punctul static de funcționare,  $M$ , caracterizat prin parametrii  $M(I_C, I_B, U_{BE}, U_{CE})$ , se pot defini parametrii  $h$  pentru semnal mic, lent variabil:

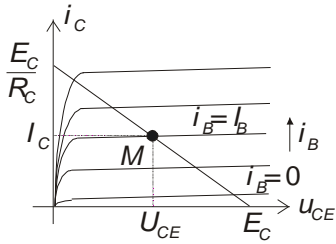


Fig. 1.17

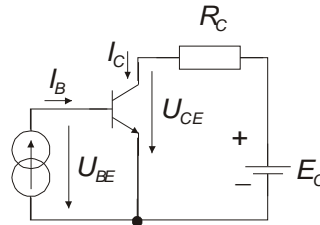


Fig. 1.18

$$h_i = \left. \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta i_B} \right|_M, \quad h_f = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \right|_M, \quad h_o = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta u_{CE}} \right|_M \quad (1.26)$$

La fel ca și  $h_{rb}$ , parametrul  $h_r$  nu se poate măsura prin această metodă.

Între parametrii  $h$  în conexiunea EC și cei în conexiunea BC există următoarele relații aproximative:

$$h_i \approx (h_f + 1)h_{ib} \approx \frac{h_f kT}{qI_C} \quad (1.27)$$

$$h_{fb} \approx -\frac{h_f}{1 + h_f} \quad (1.28)$$

În anumite circuite electronice, tranzistorul bipolar poate fi folosit în conexiune inversă prin schimbarea rolurilor terminalelor emitor și colector. Parametrul ce caracterizează această funcționare este factorul de curent în conexiune inversă,  $\alpha_i$  sau  $\beta_i$ . Cu excepția unor tranzistoare special construite, factorul de curent  $\beta_i$ , este foarte mic, de obicei, subunitar.



### 1. B. 3. Desfășurarea lucrării experimentale :

Se identifică montajul din fig.(1.19), în care se folosește un circuit ajutător în calitate de generator de curent reglabil din potențiometrul  $P$ .

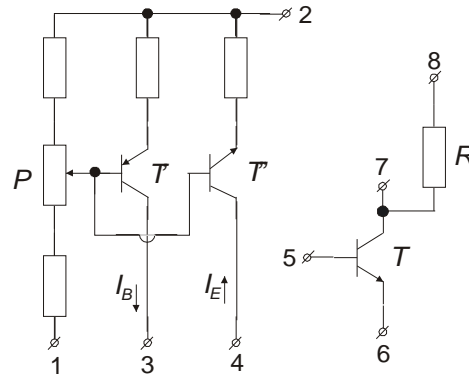


Fig.1.19

Pentru curenții de bază necesari tranzistorului NPN în conexiune EC se alimentează schema cu +5 V (aproximativ) la borna 2 față de borna de masă (borna 1) și se obține la borna 3 un curent reglabil (în sensul săgeții) între 0÷200  $\mu$ A ; pentru curenții de emitor necesari aceluiași tranzistor NPN în conexiune BC se alimentează schema cu -5V la borna 2 față de borna 1 (borna de masă) și se obține la borna 4 un curent reglabil între 0÷50 mA.

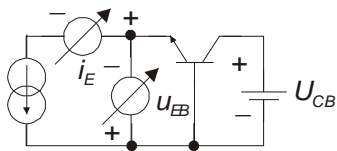


Fig.1.20

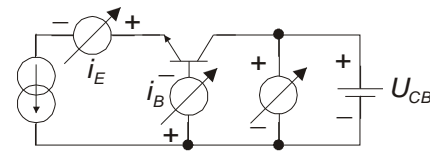


Fig.1.21

Se trasează caracteristica de intrare a tranzistorului în conexiunea BC conform schemei de măsură din fig. (1.20). Pentru aceasta, generatorul de curent se va alimenta cu -5 V la borna 2 față de borna de masă (borna 1), ieșirea generatorului de curent fiind borna 4. Pentru curentul de emitor se vor lua valorile: 0.1; 0.2; 0.5; 1; 2; 5; 10; 20; (mA), iar tensiunea colector-bază va fi de 5 V. Rezultatele se trec în tabelul (1.4).

Se simulează montajul utilizat la determinările experimentale, completându-se tabelul (1.4) cu datele obținute.

Se trasează caracteristica de intrare atât la scară liniară cât și la scară logaritmică (pentru curent) pentru determinarea parametrului  $\gamma$  ca la dioda semiconductoare. Se compară rezultatele experimentale și cele simulate.

|              |            |   |     |     |     |   |   |   |    |    |
|--------------|------------|---|-----|-----|-----|---|---|---|----|----|
| $i_E$ (mA)   |            | 0 | 0.1 | 0.2 | 0.5 | 1 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| $U_{EB}$ (V) | experiment |   |     |     |     |   |   |   |    |    |
|              | simulare   |   |     |     |     |   |   |   |    |    |

Tabel 1.4 Caracteristica de intrare în conexiune BC

Se trasează cracteristica de transfer  $i_C = i_C(i_E)$  folosind schema de măsură din fig. (1.21). Întrucât valorile curenților  $i_C$  și  $i_E$  sunt foarte apropiate, se preferă măsurarea curentului de bază pentru fiecare valoare a curentului de emitor, iar curentul de colector se deduce din relația (1.8). tensiunea  $u_{CB}$  este de 5 V. Pentru curentul de emitor se vor lua aceleași valori ca la experimentul precedent. Rezultatele se trec în tabelul (1.5).

Se simulează montajul utilizat la determinările experimentale, completându-se tabelul (1.5) cu datele obținute.

Se determină factorul de curent al tranzistorului în conexiunea BC,  $\alpha_0$ , cu relația (1.15) în care  $I_{CB0}$  este valoarea curentului de colector obținut cu emitorul în gol. Se trasează caracteristica de transfer la scară liniară.

|            |                   |     |     |     |   |   |   |    |    |
|------------|-------------------|-----|-----|-----|---|---|---|----|----|
| $i_E$ (mA) | 0                 | 0.1 | 0.2 | 0.5 | 1 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| experiment | $i_B$ ( $\mu A$ ) |     |     |     |   |   |   |    |    |
|            | $i_C$ (mA)        |     |     |     |   |   |   |    |    |
|            | $\alpha_0$        |     |     |     |   |   |   |    |    |
| simulare   | $i_B$ ( $\mu A$ ) |     |     |     |   |   |   |    |    |
|            | $i_C$ (mA)        |     |     |     |   |   |   |    |    |
|            | $\alpha_0$        |     |     |     |   |   |   |    |    |

Tabel 1.5 Caracteristica de transfer în conexiune BC

Se trasează caracteristicile statice de ieșire în conexiunea BC cu schema de măsură din fig. (1.21). Pentru tensiunea de ieșire se vor lua valorile 0.1, 0.5, 1, 2, 5, 10, V, iar curentul de emitor va fi fixat la valorile 0, 2, 4, 6, 8, 10, mA . Rezultatele experimentale se trec într-un tabel de tipul tabelului (1.6).

Se simulează montajul utilizat la determinările experimentale, completându-se un tabel de tipul tabelului (1.6).

|                          |            |                   |   |     |     |     |   |   |   |    |
|--------------------------|------------|-------------------|---|-----|-----|-----|---|---|---|----|
| Experimental,<br>Simulat | $i_E$ (mA) | $u_{CB}$ (V)      | 0 | 0.1 | 0.2 | 0.5 | 1 | 2 | 5 | 10 |
|                          | 0          | $i_B$ ( $\mu A$ ) |   |     |     |     |   |   |   |    |
|                          |            | $i_C$ (mA)        |   |     |     |     |   |   |   |    |

|    |               |  |
|----|---------------|--|
| 2  | $i_B (\mu A)$ |  |
|    | $i_C (mA)$    |  |
| 4  | $i_B (\mu A)$ |  |
|    | $i_C (mA)$    |  |
| 6  | $i_B (\mu A)$ |  |
|    | $i_C (mA)$    |  |
| 8  | $i_B (\mu A)$ |  |
|    | $i_C (mA)$    |  |
| 10 | $i_B (\mu A)$ |  |
|    | $i_C (mA)$    |  |

Tabel 1.6 Caracteristica de ieșire în conexiune BC (experimentală, simulată)

Pentru  $i_E = 2 \text{ mA}$ , se inversează semnul tensiunii  $U_{CB}$  și se determină valoarea acestei tensiuni pentru care curentul de colector se anulează; măsurătoarea se va face cu atenție, deoarece anularea curentului de colector se produce la valori mici ale tensiunii colector bază (circa  $-0.6 \div -0.7 \text{ V}$ )

În planul caracteristicilor de ieșire ridicate la punctul precedent, se trasează dreapta statică de funcționare, conform relației (1.16), în care  $R_C = 3.6 \text{ k}\Omega$ ,  $E_C = 12 \text{ V}$  și se determină coordonatele punctului static de funcționare, știind că  $I_E = 2 \text{ mA}$ .

Se realizează montajul din fig. (1.14) cu  $R_C = 3.6 \text{ k}\Omega$  și  $E_C = 12 \text{ V}$  și se măsoară coordonatele punctului static de funcționare pentru  $I_E = 2 \text{ mA}$ . Se compară rezultatele obținute prin cele două metode. În punctul de funcționare

astfel determinat, se calculează parametrul  $h_{ib}$  pe caracteristica de intrare, iar parametrii  $h_{fb}$  și  $h_{ob}$  se calculează folosind rezultatele din tabelul corespunzător, având în vedere dificultatea măsurării unor variații foarte mici ale curentului de colector direct pe grafic. Se vor folosi relațiile (1.17)

Se alimentează generatorul de tensiunea +5 V la borna 2 (față de trasează caracteristica de intrare în  $i_B = i_B(u_{BE})$ , conform schemei de (1.22) (bornele 1 și 6 sunt legate miliampermetrul se conectează între bornele 3 și 5); tensiunea  $u_{BE}$  se va măsura cu un voltmetru electronic, de preferință numeric. Se va măsura tensiunea  $u_{BE}$  pentru următoarele valori ale curentului de bază:  $i_B = 0, 10, 20, 30, 40$  și  $50 \mu A$ .

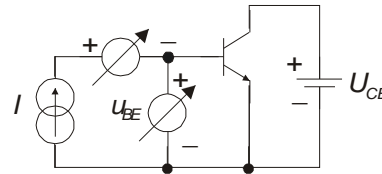


Fig. 1.22

curent cu borna 1); se conexiunea EC, măsură din fig. împreună iar

tensiunea  $u_{BE}$  se va măsura cu un voltmetru electronic, de preferință numeric. Se va măsura tensiunea  $u_{BE}$  pentru următoarele valori ale curentului de bază:  $i_B = 0, 10, 20, 30, 40$  și  $50 \mu A$ .

| $u_{CE}$ (V) |                   | 5 |   |   |   |   |   |    |    |    |   | 0.1 |   |   |   |   |    |    |    |   |   | 1 |   |   |   |    |    |    |   |   |   | 10 |   |   |    |    |    |  |  |  |  |
|--------------|-------------------|---|---|---|---|---|---|----|----|----|---|-----|---|---|---|---|----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|----|----|---|---|---|----|---|---|----|----|----|--|--|--|--|
| experiment   | $i_B$ ( $\mu A$ ) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 50 | 50 | 50 | 0 | 1   | 2 | 3 | 4 | 5 | 50 | 50 | 50 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 50 | 50 | 50 | 0 | 1 | 2 | 3  | 4 | 5 | 50 | 50 | 50 |  |  |  |  |
|              | $u_{BE}$ (V)      | 0 |   |   |   |   |   |    |    |    |   |     |   |   |   |   |    |    |    |   |   |   |   |   |   |    |    |    |   |   |   |    |   |   |    |    |    |  |  |  |  |
| simulare     | $i_B$ ( $\mu A$ ) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 50 | 50 | 50 | 0 | 1   | 2 | 3 | 4 | 5 | 50 | 50 | 50 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 50 | 50 | 50 | 0 | 1 | 2 | 3  | 4 | 5 | 50 | 50 | 50 |  |  |  |  |
|              | $u_{BE}$ (V)      | 0 |   |   |   |   |   |    |    |    |   |     |   |   |   |   |    |    |    |   |   |   |   |   |   |    |    |    |   |   |   |    |   |   |    |    |    |  |  |  |  |

Tabel 1.7 Caracteristica de intrare în conexiune EC

Întrucât caracteristica de intrare  $i_B(u_{BE})$  pleacă de la valori negative ale curentului de bază, se vor pune în scurt circuit baza cu emitorul și se va măsura  $i_B(0)$  (schimbând bornele miliampermetrului). Se menține curentul de bază la

valoarea constantă  $I_B = 50 \mu\text{A}$  și se măsoară tensiunea bază-emitor pentru următoarele valori ale tensiunii colector-emitor : 0, 1, 5 și 10 V.

Rezultatele se vor trece în tabelul 1.7. Se simulează montajul utilizat la determinările experimentale, completându-se tabelul (1.7) cu datele obținute. Se vor trasa graficele  $i_B(u_{BE})$  cu  $U_{CE} = 5\text{V}$ , la scară liniară.

Se măsoară mărimile necesare pentru ridicarea caracteristicii de transfer, conform schemei din fig. (1.23). Tensiunea colector-emitor va fi  $u_{CE} = 5 \text{ V}$ .

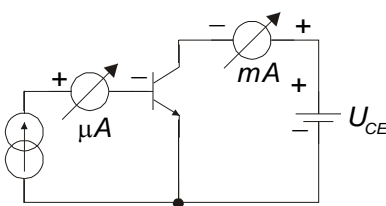


Fig.1.23

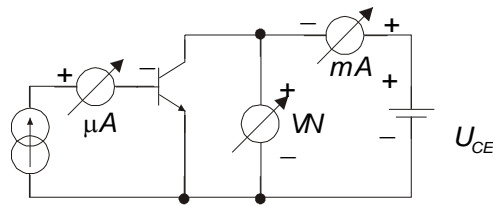


Fig.1.24

Se va nota, mai întâi, valoarea curentului de colector cu baza în gol,  $I_{ce0}$ . Se va regla apoi curentul de bază pentru a se obține curenți de colector de valoare: 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 50 mA, rezultatele fiind trecute în tabelul (1.8). În același tabel, se va trece factorul de curent al tranzistorului,  $\beta_0$ , calculat cu relația (1.24).

| $u_{CE}$ (V) |                   | 5  |   |   |   |   |   |   | 1 | 10 |  |
|--------------|-------------------|----|---|---|---|---|---|---|---|----|--|
| experiment   | $i_B$ ( $\mu A$ ) | 0  |   |   |   |   |   |   | 0 | 0  |  |
|              | $i_C$ (mA)        | 0. | 1 | 2 | 5 | 1 | 2 | 5 | 2 | 2  |  |
|              |                   | 5  |   |   |   | 0 | 0 | 0 |   |    |  |
|              | $\beta_0$         |    |   |   |   |   |   |   |   |    |  |
| $\alpha_0$   |                   |    |   |   |   |   |   |   |   |    |  |
| simulare     | $i_B$ ( $\mu A$ ) | 0  |   |   |   |   |   |   | 0 | 0  |  |
|              | $i_C$ (mA)        | 0. | 1 | 2 | 5 | 1 | 2 | 5 | 2 | 2  |  |
|              |                   | 5  |   |   |   | 0 | 0 | 0 |   |    |  |
|              | $\beta_0$         |    |   |   |   |   |   |   |   |    |  |
| $\alpha_0$   |                   |    |   |   |   |   |   |   |   |    |  |

Tabel 1.8 Caracteristica de transfer în conexiune EC

Se măsoară factorul de curent al tranzistorului în conexiunea EC la alte două tensiuni colector-emitor,  $u_{CE}=1$  V și  $u_{CE}=10$  V. Pentru fiecare dintre aceste valori, se determină, mai întâi  $I_{CE0}$  (cu baza în gol) și apoi curentul de bază necesar obținerii ac eluiași curent colector  $I_C = 2$  mA. Se simulează montajul utilizat la determinările experimentale, completandu-se tabelul (1.8) cu datele obținute. Se vor trasa graficele funcției de transfer  $i_C(i_B)$ , la scară liniară.

Se determină caracteristicile de ieșire ale tranzistorului în conexiune EC cu parametru  $i_B$ , conform schemei de măsură din fig. (1.24). Pentru curentul de bază,  $i_B$ , se vor lua valorile 10, 20, 30, 40, 50  $\mu A$ , iar curentul colector se va măsura pentru următoarele valori ale tensiunii colector-emitor care asigură funcționarea

tranzistorului în regiunea activă normală : 0.5, 1, 2, 5, 10 V și se trasează familia de caracteristici  $i_c(u_{CE})$  la scară liniară.

Se efectuează măsurătorile pentru ridicarea caracteristicilor de ieșire în zona de saturație a tranzistorului și în zona activă normală învecinată, pentru tensiuni mici între colector și emitor. Se va folosi același montaj și se vor considera aceleași valori ale curentului de bază, iar tensiunea colector-emitor se reglează la valorile 0.1; 0.2; 0.3; 0.4 și 0.5 V. Rezultatele se trec în același tabelul (1.9) și se va trasa un grafic separat pentru această zonă la o scară convenabilă pentru  $u_{CE}$ .

| $i_c$ (mA) | $i_B$ ( $\mu A$ ) | $u_{CE}$ (V) | 0 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 1 | 2 | 5 | 10 |  |
|------------|-------------------|--------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|---|---|---|----|--|
|            | 0                 | experiment   |   |     |     |     |     |     |   |   |   |    |  |
|            |                   | simulare     |   |     |     |     |     |     |   |   |   |    |  |
|            | 10                | experiment   |   |     |     |     |     |     |   |   |   |    |  |
|            |                   | simulare     |   |     |     |     |     |     |   |   |   |    |  |
|            | 20                | experiment   |   |     |     |     |     |     |   |   |   |    |  |
|            |                   | simulare     |   |     |     |     |     |     |   |   |   |    |  |
|            | 30                | experiment   |   |     |     |     |     |     |   |   |   |    |  |
| simulare   |                   |              |   |     |     |     |     |     |   |   |   |    |  |
| 40         | experiment        |              |   |     |     |     |     |     |   |   |   |    |  |
|            | simulare          |              |   |     |     |     |     |     |   |   |   |    |  |
| 50         | experiment        |              |   |     |     |     |     |     |   |   |   |    |  |
|            | simulare          |              |   |     |     |     |     |     |   |   |   |    |  |

Tabel 1.9 Caracteristica de ieșire în conexiune EC



Se realizează schema din fig. (1.18) pentru determinarea punctului static de funcționare. Se fixează  $E_C = 12\text{ V}$  și se reglează curentul de bază până când  $I_C = 2\text{ mA}$ . Se vor nota coordonatele punctului static de funcționare ( $I_C, I_B, U_{CE}, U_{BE}$ ).

Pe caracteristicile statice de ieșire ale tranzistorului desenate la punctul precedent, se trasează prin interpolare, cu aproximație, caracteristica statică corespunzătoare curentului de bază măsurat anterior și dreapta de sarcină descrisă de ecuația (1.25). La intersecția lor se obține punctul static de funcționare ale cărui coordonate trebuie să fie apropiate de cele măsurate.

În acest punct static de funcționare, se vor determina parametrii  $h_i$  (pe caracteristica de intrare),  $h_f$  (pe caracteristica de transfer),  $h_o$  (pe caracteristica de ieșire) conform relațiilor (1.26).

Se vor verifica relațiile de legătură între parametrii  $h$  în cele două conexiuni (1.27) și (1.28), punctele de funcționare fiind apropiate.

Se măsoară factorul de curent al tranzistorului în conexiune inversă, conform schemei de măsură din fig. (1.25) și folosind relația:

$$\beta_i = \frac{i_E - I_{ec0}}{i_B} \quad (1.29)$$

unde  $i_E$  este curentul înregistrat de din emitor pentru  $i_B = 200\text{ }\mu\text{A}$ , iar  $I_{ec0}$  este curentul înregistrat de același aparat pentru  $i_B = 0$  (baza în gol).

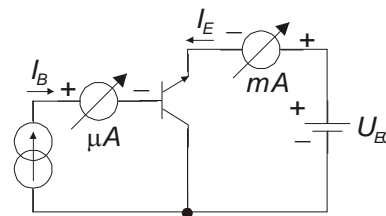


Fig.1.25

ampermetrul este curentul

#### 1.B. 4. Conținutul referatului :

- schemele de măsură pentru parametri și pentru caracteristicile statice ale tranzistorului în cele două conexiuni;
- tabelele cu rezultatele măsurătorilor;
- graficele corespunzătoare și determinările făcute pe baza acestora așa cum se indică la modul de lucru;
- schemele elementare cu tranzistoare pentru determinarea punctelor statice de

funcționare respective;

În cazul unor neconcordanțe între rezultatele teoretice și cele experimentale se vor da scurte justificări.

## **C. Stabilizarea punctului static de funcționare.**

### **1. C. 1. Scopul lucrării experimentale :**

Determinarea experimentală a influenței dispersiei de fabricație și a temperaturii asupra comportării tranzistorului bipolar în curent continuu; se va studia și eficacitatea diferitelor scheme de polarizare pentru stabilirea punctului static de funcționare al tranzistorului.

### **1. C. 2. Aspecte teoretice:**

Datorită procesului tehnologic, principalii parametri de curent continuu ai tranzistorului bipolar (factorul de curent  $\beta_0$ , tensiunea bază-emitor  $U_{BE}$  la curent de emitor dat și curentul rezidual de colector,  $I_{cb0}$  sau  $I_{ce0}$ ) diferă, uneori foarte mult, de la un exemplar la altul. De asemenea, acești parametri sunt influențați de temperatura mediului ambiant.

Ca urmare a modificării parametrilor de curent continuu ai tranzistorului (fie prin înlocuirea unui dispozitiv defect cu un altul de același tip, fie prin creșterea temperaturii ambiante) se va modifica punctul static de funcționare al tranzistorului bipolar montat într-un circuit de curent continuu, care va avea ca efect apropierea acestuia de zonele profund neliniare ale tranzistorului (saturție, blocare) și schimbarea parametrilor de regim variabil. Pentru micșorarea acestor efecte negative se utilizează diferite circuite de polarizare în curent continuu și de stabilizare termică a punctului static de funcționare, asigurându-se, în același timp, și diminuarea influenței dispersiei de fabricație. În lucrare nu sunt prezentate metodele de compensare care să folosească elemente neliniare de circuit.

Dispersia de fabricație este foarte mare în ceea ce privește factorul de curent al tranzistorului. De exemplu, pentru tranzistorul BC 171 care se folosește în lucrare, se dau în catalog valoarea maximă -300- și valoarea minimă -100- între care se poate afla factorul de curent în conexiunea EC,  $\beta_0$ .

Factorul de curent  $\beta_0$  depinde relativ puțin de temperatura după o relație de forma:

$$\frac{\Delta\beta_0}{\Delta T} = (\beta_0 + 1)C_\alpha \quad (1.29)$$

unde  $C_\alpha$  este o constantă care, pentru tranzistoarele cu siliciu, are valori în jur de  $0.01 / ^\circ\text{C}$ .

Factorul de curent  $\beta_0$  depinde și de curentul de colector al tranzistorului,

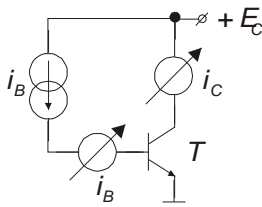


Fig. 1.26

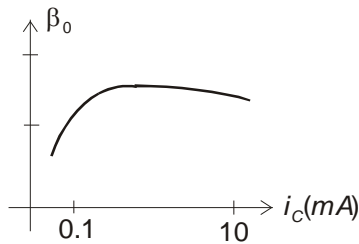


Fig. 1.27

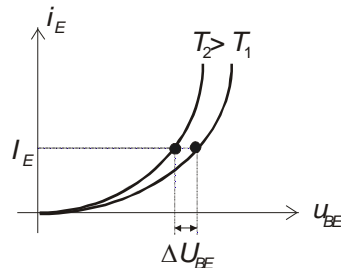


Fig. 1.28

curba tipică de variație fiind reprezentată în fig. (1.27).

Măsurarea factorului de curent  $\beta_0$  se poate face cu schema din fig. (1.26) (pentru un tranzistor NPN), valoarea sa determinându-se cu relația:

$$\beta_0 = \frac{i_C - I_{ce0}}{i_B} \quad (1.30)$$

unde  $I_{ce0}$  este curentul rezidual de colector în conexiunea emitor comun (măsurat cu baza în gol).

Caracteristica de intrare  $i_E = f(u_{BE})$  este puternic afectată de temperatură, așa cum se vede și în fig. (1.28), înregistrându-se o deplasare a acesteia spre stânga sus la creșterea temperaturii. Caracteristica teoretică este dată de relația :

$$i_E = ct.T^3 e^{\frac{qU_{BE}-\Delta W}{kT}} \quad (1.31)$$

unde  $\Delta W$  este lățimea zonei interzise a semiconductorului,  $q$  sarcina electronului,  $k$  constanta lui Boltzmann iar  $T$  temperatura absolută în  $^{\circ}\text{K}$ .

La curent de emitor constant, se deduce:

$$\Delta U_{BE} = -\frac{kT}{q} \left( 3 + \frac{\Delta W - qU_{BE}}{kT} \right) \frac{\Delta T}{T} \quad (1.32)$$

Pentru temperaturi ambiante obișnuite, se poate considera:

$$\frac{\Delta U_{BE}}{\Delta T} \approx -2 \text{ mV} / ^{\circ}\text{C} \quad (1.33)$$

atât pentru tranzistoarele fabricate din germaniu cât și pentru cele fabricate din siliciu.

La același curent de emitor, tensiunea bază-emitor pentru două tranzistoare diferite, dar de același tip, nu este aceeași datorită dispersiei de fabricație, diferența fiind de cel mult 0.1 V la tranzistoarele din siliciu.

Curentul rezidual de colector,  $I_{cb0}$ , depinde de temperatură după o lege de forma:

$$I_{cb0} = ct.T^3 e^{-\frac{q\Delta W}{kT}} \quad (1.34)$$

și, pentru temperaturi ambiante obișnuite se obține o dublare a curentului rezidual la fiecare  $10^{\circ}\text{C}$  (pentru germaniu) respectiv la fiecare  $6^{\circ}\text{C}$  (pentru siliciu).

Măsurarea curentului rezidual se face tot cu circuitul din fig. (1.26), lăsînd baza în gol, rezultatul fiind:

$$I_{ce0} = (\beta_0 + 1) I_{cb0} \quad (1.35)$$

Cum lățimea benzii interzise este diferită la germaniu (circa 0,67 eV) față de siliciu (circa 1,1 eV), valorile curenților reziduali sunt foarte mult diferite (la siliciu, se obține la temperatura ambiantă obișnuită curent rezidual cu cel puțin 3-4 ordine de mărime mai mic decăt la germaniu).

Avand în vedere acest lucru, se constată că, la tranzistoarele din siliciu, punctul static de funcționare este influențat de temperatură, în principal, prin intermediul tensiunii bază-emitor, iar la tranzistoarele cu germaniu, prin intermediul curentului rezidual de colector.

**Observație:** la tranzistoarele din siliciu, întrucat curentul rezidual de colector,  $I_{cb0}$ , determinat teoretic are valori foarte mici, în valoarea măsurată au o contribuție neglijabilă curentul de generare din regiunea de trecere a colectorului și curentul de pierderi de suprafață.

Punctul static de funcționare al unui tranzistor este determinat prin precizarea curenților prin tranzistor ( $I_C$  și  $I_B$ ) și a tensiunilor la bornele sale ( $U_{BE}$  și  $U_{CE}$  sau  $U_{CB}$ ).

Datorită variației temperaturii mediului ambiante, se modifică curenții prin tranzistor și deci și tensiunile la bornele joncțiunilor tranzistorului într-un circuit dat. Variația curentului de colector determinată de o variație de temperatură  $\Delta T$  se poate scrie sub forma:

$$\Delta I_C = S_I \Delta I_{cb0} + S_U \Delta U_{BE} \quad (1.36)$$

unde:  $\Delta I_{cb0}$  și  $\Delta U_{BE}$  sunt variația curentului rezidual al joncțiunii bază colector, respectiv variația tensiunii bază-emitor la variația temperaturii ambiante cu  $T$ , iar  $S_I$  și  $S_U$  sunt factorii de stabilizare termică ce depind de circuitul de polarizare (s-a neglijat contribuția factorului de curent  $\beta_0$ ).

Conform relației (1.36) se obțin expresiile :

$$S_I = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_{cb0}} \right|_{U_{BE}=ct.} \quad (1.37)$$

$$S_U = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{BE}} \right|_{I_C=ct.} \quad (1.38)$$

Pentru o stabilizare termică bună a punctului de funcționare este necesar ca factorii de stabilizare termică  $S_I$  și  $S_U$  să fie cât mai mici.

În circuitul de polarizare general din fig. (1.29), punctul static de funcționare se determină analitic dacă se aproximează caracteristica de intrare printr-o formă idealizată cu o tensiune de prag  $U_{BE}$  constantă, ca în fig. (1.30) și dacă se presupune

că  $\beta_0$  și  $I_{cb0}$  nu depind de curentul de colector și de curentul prin joncțiuni. (altfel trebuie utilizate metode grafice ce folosesc caracteristicile statice ale tranzistorului, afectate și ele de dispersia de fabricație a dispozitivelor).

Se obțin relațiile:

$$I_C = \beta_0 \frac{E_B - U_{BE}}{(\beta_0 + 1)R_E + R_B} + \frac{(\beta_0 + 1)(R_E + R_B)}{R_B + (\beta_0 + 1)R_E} I_{cb0} \quad (1.39)$$

$$U_{CE} = E_C - R_C I_C - R_E I_E = E - (R_C + R_E) I_C \quad (1.40)$$

Se deduc factorii de stabilizare termică:

$$S_I = \frac{(\beta_0 + 1)(R_E + R_B)}{R_B + (\beta_0 + 1)R_E} \quad (1.41)$$

$$S_U = -\frac{\beta_0}{R_B + (\beta_0 + 1)R_E} \quad (1.42)$$

Se constată, atât analitic cât și fizic, că rezistența de emitor are un efect stabilizant asupra punctului static de funcționare iar rezistența de bază are un efect destabilizant.

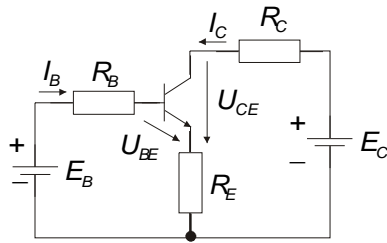


Fig. 1.29

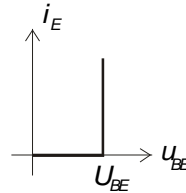


Fig. 1.30

În figurile (1.31) – (1.34) sunt prezentate patru circuite de polarizare: (1.31) - fără stabilizarea termică a punctului static de funcționare, (1.32) - cu stabilizarea punctului static de funcționare prin reacție serie, (1.33)- o variantă a montajului (1.31) cu polarizarea bazei prin divizor și (1.34) - cu stabilizare a punctului static de funcționare prin reacție paralel.

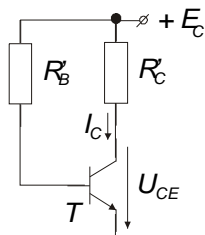


Fig. 1.31

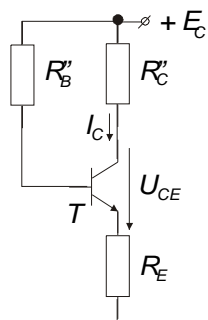


Fig. 1.32

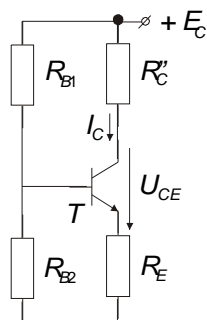


Fig. 1.33

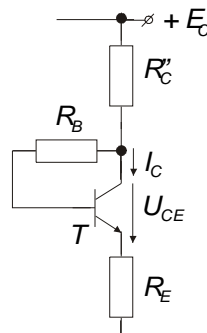


Fig. 1.34

Factorii de stabilizare termică se deduc pentru schemele (1.31), (1.32) direct cu relațiile (1.41) și (1.42) iar pentru montajele (1.33) și (1.34) fie conform definițiilor (1.37) și (1.38) după deducerea curentului de colector, fie cu relațiile (1.41) și (1.42) prin echivalarea schemelor cu circuite asemănătoare celui din fig. (1.29).

În cazul polarizării tranzistorului într-un montaj bază comună, fig. (1.35), coordonatele punctului de funcționare vor fi:

$$I_C = \frac{\beta_0}{\beta_0 + 1} \cdot \frac{E_E - U_{BE}}{R_E} + I_{CB0} \quad (1.43)$$

$$U_{CB} = E_C - R_C I_C \quad (1.44)$$

Factorii de stabilizare vor avea expresiile:

$$S_I = 1 \text{ (valoarea minimă posibilă)} \quad (1.45)$$

$$S_U = \frac{1}{R_E} \quad (1.46)$$

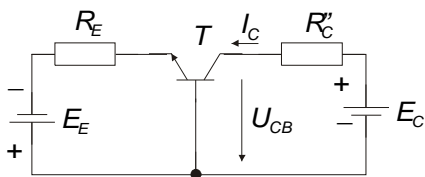


Fig. 1.35

### 1. C. 3. Desfășurarea lucrării experimentale

Se identifică montajul din fig. (1.36), în care tranzistorul  $T_0$ , împreună cu rezistențele respective și potențiometrul  $P$ , formează un generator de curent reglabil pentru asigurarea curentului de bază al tranzistorului măsurat.

Se vor măsura trei tipuri diferite de tranzistoare  $T_1 - T_3$ . Măsurătorile se vor face asupra celor trei tranzistoare la temperatura ambiantă ( $t_2$ ) și asupra tranzistorului  $T_1$  și la temperaturile  $t_1$  (temperatură apropiată de  $0^\circ\text{C}$  asigurată prin introducerea tranzistorului în amestec de apă cu gheață) și  $t_3$  (apropiată de  $35^\circ\text{C}$  obținută prin încălzirea tranzistorului cu mâna, timp de câteva minute). Tranzistorul testat se introduce într-un soclu.

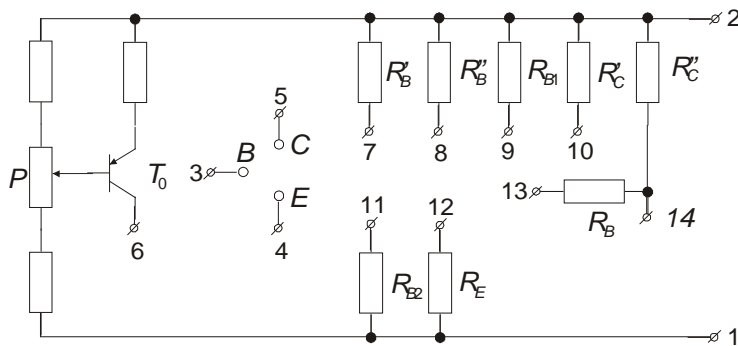


Fig. 1.36

Se realizează montajul din fig. (1.26) în care se folosește generatorul de curent format cu tranzistorul  $T_0$  pentru curentul de bază. Se introduc instrumente pentru măsurarea curentului de bază (între bornele 3 și 6) și a curentului de colector (între bornele 5 și 2). Emitorul (borna 4) va fi cuplat la masă și se alimentează circuitul cu  $E_C = +5\text{ V}$  (borna 2 față de masă). Se introduc, pe rînd, tranzistoarele de testat în soclu.

Se reglează curentul de bază,  $I_B$  și apoi se măsoară curentul de colector când se întrerupe circuitul bazei,  $I_{ce0}$ . Se determină apoi  $\beta_0$  cu relația (1.30). Rezultatele se trec în tabelul 1.10.



|                  |            | $T_1$ |       |       | $T_2$ | $T_3$ |
|------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                  |            | $t_1$ | $t_2$ | $t_3$ |       |       |
| $I_B(\mu A)$     | experiment |       |       |       |       |       |
|                  | simulare   |       |       |       |       |       |
| $I_{ce0}(\mu A)$ | experiment |       |       |       |       |       |
|                  | simulare   |       |       |       |       |       |
| $\beta_0$        | experiment |       |       |       |       |       |
|                  | simulare   |       |       |       |       |       |

Tabel 1.10 Măsurarea factorului de curent  $\beta_0$

Pentru trnzistorul  $T_2$  se determină variația lui  $\beta_0$  cu curentul de colector.În același montaj, se reglează curentul de colector la valorile: 0,1mA; 0,2mA; 0,5mA; 1 mA; 2 mA; 5 mA;10 mA; 20 mA; se măsoară valorile corespunzătoare ale curentului de colector și apoi se determină  $\beta_0$  cu relația (3.2). Se va trasa graficul  $\beta_0 = \beta_0(I_C)$  la scară logaritmică pe abscisă.

| $I_C$ (mA)   |            | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1 | 2 | 5 | 10 | 20 |
|--------------|------------|-----|-----|-----|---|---|---|----|----|
| $I_B(\mu A)$ | experiment |     |     |     |   |   |   |    |    |
|              | simulare   |     |     |     |   |   |   |    |    |
| $\beta_0$    | experiment |     |     |     |   |   |   |    |    |
|              | simulare   |     |     |     |   |   |   |    |    |

Tabel 1.11 Măsurarea factorului de curent  $\beta_0$  pentru tranzistorul  $T_2$

4. Se măsoară caracteristica de intrare a tranzistorului  $T_1$  la cele trei temperaturi cu montajul din *fig.3.2*. Tensiunea bază-emitor se măsoară cu un voltmetru electronic, de preferință numeric. Curentul de colector va lua valorile de la punctul precedent. Cele trei caracteristici se vor reprezenta pe același grafic. La curentul  $I_E \approx I_C = 2$  mA, se măsoară  $\Delta U_{BE}$  (ca în *fig.3.3*) și apoi se determină  $\frac{\Delta U_{BE}}{\Delta T}$  și se compară cu valoarea teoretică dată de relația (3.5).

5. Se realizează, pe rând, cele cinci montaje de polarizare cu valorile precizate în *fig.3.6,7,8,9* și 10 și se măsoară punctele statice de funcționare pentru toate tranzistoarele de testat; pentru tranzistorul  $T_1$  măsurătorile se fac și la temperaturile  $t_1$  și  $t_3$ . Curentul de colector se măsoară cu un miliampermetru conectat în serie cu colectorul iar tensiunea colector-emitor (sau colector-bază pentru montajul  $M_5$ ) cu un voltmetru electronic.

Tensiunea de alimentare este  $E_C = 12$  V (cu polaritatea corespunzătoare în funcție de tipul tranzistorului) iar pentru montajul  $M_5$  se va lua și  $E_E = 6$  V.

Rezultatele se trec în tabelul 3.2, iar punctele statice de funcționare măsurate se

|              | $M_1$ |       |       |       |       |       | $M_2$ |       |       |       | ..... |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|              | $T_1$ |       |       | $T_2$ | $T_3$ | $T_2$ | $T_1$ |       |       | $T_2$ |       |
|              | $t_1$ | $t_2$ | $t_3$ |       |       |       | $t_1$ | $t_2$ | $t_3$ |       |       |
| $I_C$ (mA)   |       |       |       |       |       | calc  |       |       |       |       |       |
| $U_{CE}$ (V) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |

Tabelul 3.2

marchează în planul caracteristicilor statice de ieșire  $i_C = i_C(u_{CE})$ .

#### 1. C. 4. Conținutul referatului :

- schemele de măsură pentru  $\beta_0$ ,  $I_{ce0}$ ;
- tabelele de rezultate și graficele  $\beta_0(I_C)$  pentru tranzistorul  $T_2$  și  $i_E(u_{BE})$  pentru tranzistorul  $T_1$  la cele trei temperaturi cu deducerea aproximativă a lui  $\frac{\Delta U_{BE}}{\Delta T}$ ;
- explicarea variației lui  $\beta_0$  cu curentul de colector;
- schemele celor cinci montaje experimentale cu precizarea conectării

- instrumentelor folosite pentru măsurători;
- calculul factorilor de stabilizare termică;
  - calculul punctelor statice de funcționare pentru toate montajele pentru tranzistorul  $T_2$  ( $\beta_0 = 200$ );
  - planul caracteristicilor  $i_C(u_{CE})$  cu poziționarea punctelor statice de funcționare ale tranzistoarelor pentru cele 5 montaje.

## **TRANZISTORUL CU EFECT DE CÂMP CU POARTĂ IZOLATĂ**

### **D. Caracteristicile statice ale tranzistorului cu efect de camp cu poartă izolată**

#### **1. D. 1. Scopul lucrării experimentale**

**Lucrarea își propune să familiarizeze studenții cu tranzistoarele cu efect de câmp atât în ceea ce privește caracteristicile statice și parametrii dinamici cât și în privința comportării lor în regim de amplificare. Sunt studiate tranzistoarele cu efect de câmp cu poartă izolată cu canal inițial și cu canal indus.**

În relațiile pentru regimul static, tensiunile și curenții sunt luați întotdeauna în valoare absolută, fiind precedați de semnul + sau - , după caz.

#### **1. D. 2. Noțiuni teoretice**

Tranzistorii cu efect de camp sunt de doua tipuri: tranzistori cu efect de camp cu jonctiune (TECJ) și tranzistori cu efect de camp metal-oxid-semiconductor (TECMOS). Fiecare din cele două categorii poate fi cu canal de tip **n** sau de tip **p**, cele două tipuri fiind complementare atât ca structură cât și ca funcționare. Tranzistorul cu efect de câmp metal-oxid-semiconductor (TECMOS) este un dispozitiv electronic la care la conducția electrică participă un singur tip de purtători (dispozitiv unipolar), efectul de tranzistor obținându-se prin modularea conductanței canalului dintre sursă și drenă de către câmpul creat de diferența de potențial dintre poartă și sursă; canalul poate exista pentru  $V_{GS} = 0$  și atunci

dispozitivul este numit cu canal inițial sau poate apare numai dacă se obține un câmp electric capabil să provoace inversarea tipului de conductibilitate la suprafața semiconductorului, dispozitivul fiind numit cu canal indus.

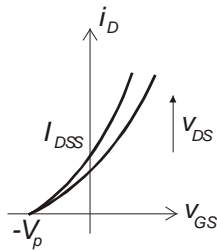


Fig. 1.37

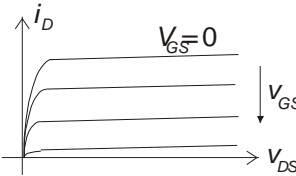


Fig. 1.38

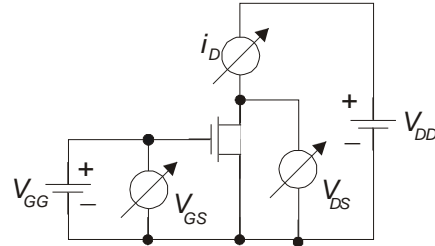


Fig. 1.39

Curentul de drenă al unui TECMOS cu canal inițial depinde atât de tensiunea poartă-sursă,  $V_{GS}$ , cât și de tensiunea drenă-sursă,  $V_{DS}$ . Această dependență este reprezentată grafic în *fig. 8.1* și în *fig. 8.2* sub forma caracteristicilor statice de transfer, respectiv de ieșire, iar în *fig. 8.3* se arată un circuit de măsură cu care se poate trasa aceste caracteristici.

Pe caracteristicile de ieșire ale tranzistorului se disting două regiuni: înainte de saturație sau regiunea liniară, în care curentul variază mult cu tensiunea drenă-sursă și regiunea de saturație a curentului de drenă la creșterea tensiunii drenă-sursă. Ca amplificator, TECMOS este folosit, aproape întotdeauna, în regiunea de saturație, în care curentul de drenă depinde, practic, numai de tensiunea poartă-sursă,  $V_{GS}$ , după o lege de forma:

$$i_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2 \quad (8.1)$$

unde  $I_{DSS}$  și  $V_P$  au semnificațiile din *fig. 8.1*,  $V_P$  fiind numită și tensiune de prag a dispozitivului.

În regiunea liniară liniară, dependența de  $V_{DS}$  este complicată, dar pentru tensiuni  $V_{DS}$  foarte mici, curentul variază liniar cu  $V_{DS}$ :

$$i_D \cong V_{DS} \frac{2I_{DSS}}{V_P} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right) \quad (8.2).$$

Din punct de vedere dinamic, TECMOS este caracterizat prin conductanța mutuală  $g_m$  și prin rezistența de ieșire,  $r_o$ . Acești parametri depind de punctul

static de funcționare și se pot determina experimental, într-un punct static de funcționare, pe caracteristicile de transfer, respectiv de ieșire, prin relațiile:

$$g_m = \left. \frac{\Delta i_D}{\Delta V_{GS}} \right|_{V_{DS}=0} \quad (8.3)$$

$$r_0 = \left. \frac{\Delta V_{DS}}{\Delta i_D} \right|_{V_{GS}=0} \quad (8.4)$$

Teoretic, în regiunea de saturație:

$$g_0 \cong \frac{1}{r_0} \cong 0, \quad g_m = \frac{2I_{DSS}}{V_P} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right) \quad (8.5)$$

fiind dependentă de  $V_{DS}$ .

Pentru regiunea liniară este interesantă comportarea TECMOS în jurul originii ca rezistență variabilă controlată prin tensiunea  $V_{GS}$ . Dependența teoretică rezultă sub forma:

$$r_0 = r_{DS} = \frac{V_P}{2I_{DSS}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{V_{GS}}{V_P}} \quad (8.6).$$

**4. Curentul de drenă al unui TECMOS cu canal indus depinde de ambele tensiuni aplicate pe poartă și pe drenă față de sursă:**

- în regiunea liniară, înainte de saturație:

$$i_{DS} = \beta \left[ (V_{GS} - V_P)V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \quad (8.7)$$

- în regiunea de saturație:

$$i_{DS} = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_P)^2$$

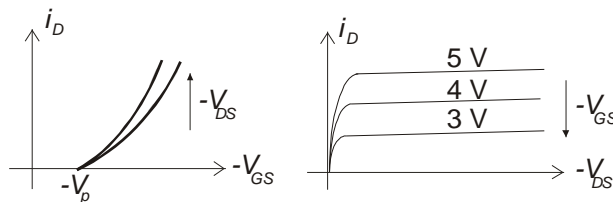


Fig. 1.40

În aceste relații,  $\beta$  este factorul de curent al tranzistorului, dependent de dimensiunile geometrice ale tranzistorului, dar independent de punctul static de funcționare, iar  $V_p$  este

tensiunea de prag a dispozitivului, măsurată pentru un curent de drenă de circa  $10 \mu A$ . Caracteristicile statice sunt desenate în fig. 8.4.

Principalii parametri de semnal mic ai tranzistorului,  $g_m$  și  $r_0$ , se determină experimental cu relațiile (8.3) și (8.4) și se calculează teoretic cu relațiile:

- conductanța mutuală în regiunea de saturație:

$$g_m = \beta(V_{GS} - V_P) \quad (8.9)$$

- rezistența de ieșire (la saturație este infinită) în regiunea tensiunilor drenă-sursă foarte mici:

$$r_0 = r_{DS} = \frac{1}{\beta(V_{GS} - V_P)} \quad (8.10).$$

5. În amplificatoarele elementare, TECMOS este utilizat în regiunea de saturație. Având în vedere că impedanța de intrare în TECMOS este foarte mare, nu se va măsura impedanța de intrare în amplificator, considerînd că aceasta va fi dată de circuitul de polarizare. Întrucât din punct de vedere dinamic, TECMOS cu canal inițial și TECMOS cu canal indus se comportă la fel, în continuare, se dau numai schemele de principiu, neprecizîndu-se tipul tranzistorului cu efect de câmp utilizat.

Polarizarea unui TECMOS se face prin asigurarea unei tensiuni  $V_{GS}$  necesare obținerii curentului  $I_{DS}$  dorit. În lucrare, este prevăzută posibilitatea reglării tensiunii  $V_{GS}$  cu un potențiomtru.

Se vor studia următoarele montaje elementare:

- amplificatorul cu sursa la masă (*fig. 8.5*); amplificarea de tensiune va fi :

$$A_v = -\frac{g_m R_d}{1 + g_0 R_d} \cong -g_m R_d \quad (8.11)$$

iar impedanța de ieșire va fi dată numai de rezistența de drenă;

- amplificatorul cu sarcină distribuită (*fig. 8.6*); amplificarea de tensiune va fi:

$$A_v = -\frac{g_m R_d}{1 + g_m R_S} \quad (8.12)$$

cu observația că nu se poate neglija la numitor 1 în comparație cu  $g_m R_S$ , panta tranzistorului cu efect de câmp fiind mică;

- repetorul pe sursă (*fig. 8.7*); amplificarea de tensiune este:

$$A_v = \frac{g_m R_S}{1 + g_m R_S} \quad (8.13)$$

iar impedanța de ieșire:

$$Z_{ies} = \frac{R_S}{1 + g_m R_S} \quad (8.14).$$

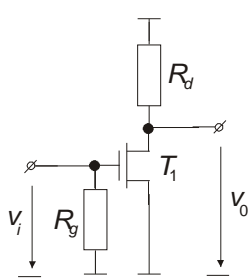


Fig. 1.41

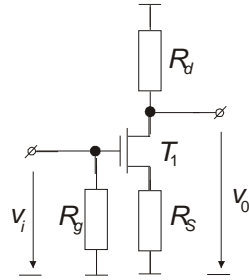


Fig. 1.42

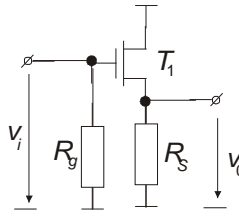


Fig. 1.43

Se observă că, din cauza pantei mici a TECMOS, amplificarea ed tensiune pe drenă este mică, iar pentru repetorul pe sursă, amplificarea de tensiune este net subunitară, impedanța de ieșire fiind destul de mare. Se pot îmbunătăți performanțele dacă utilizează și un tranzistor bipolar în structură complementară.

**d)** repetor pe sursă cu schemă complementară (fig. 8.8); tranzistorul  $T_2$  este de tip PNP pentru TECMOS cu canal N și de tipul NPN pentru TECMOS cu canal P. Se

obțin amplificările:

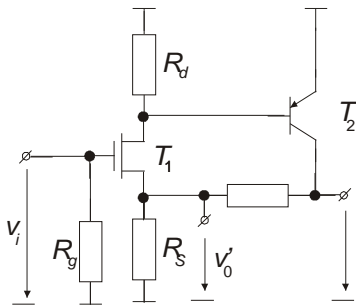


Fig. 1.44

$$A_v'' = \frac{v_o''}{v_i} \cong 1 + \frac{R}{R_S} \quad (8.15)$$

$$A_v' = \frac{v_o'}{v_i} \cong \frac{g_{m_{echiv}} R_S}{1 + g_{m_{echiv}} R_S}$$

(8.16)

unde:

$$g_{m_{echiv}} \cong \frac{h_{21} R_d}{h_{11} + R_d} g_m \quad (8.17)$$

$h_{21}$  și  $h_{11}$  fiind parametrii  $h$  ai tranzistorului  $T_2$ .

Între bornele  $v_i - v_o'$ , circuitul din fig. 8.8 este un foarte bun repetor, avînd și imedanță de intrare foarte mare, iar în colectorul tranzistorului bipolar se obține și o amplificare de tensiune, dar pe impedanță de ieșire mai mare.

## 1.1. DESFĂȘURAREA LUCRĂRII

1. Pentru ridicarea caracteristicilor statice ale unui TECMOS cu canal inițial (de tipul KF 521), se folosesc montajele  $M_1$  și  $M_2$ , cu tranzistorul bipolar scos din soclu. Se vor folosi bornele 3 (poarta), 4 (drena) și 5 (sursa). Se montează în serie cu drena un instrument de curent continuu. Se va urmări menținerea în permanență a curenților și tensiunilor sub valorile absolute date în anexă.

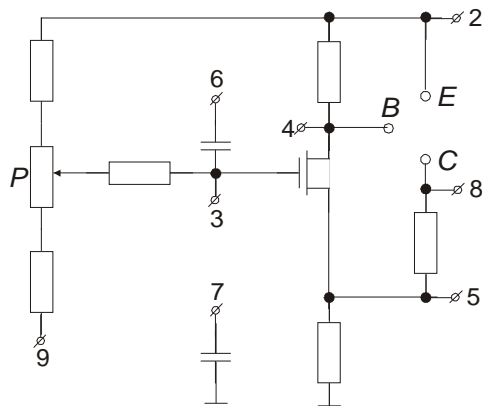


Fig. 1.45

Montajul de laborator este desenat în fig. 8.9.

2. Se trasează caracteristicile de transfer  $i_{DS} = i_{DS}(V_{GS})$  pentru 3 valori ale tensiunii  $V_{DS}$ . Pentru aceasta, se folosește schema de măsură din fig. 8.3, tensiunea  $V_{GS}$  fiind cuprinsă între +1 și -4 V.

Se măsoară tensiunea de prag,  $V_p$  (la  $I_{DS} = 10 \mu\text{A}$ ) și curentul  $I_{DSS}$  (pentru  $V_{GS} = 0$  și  $V_{DS} = 6 \text{ V}$ ).

Rezultatele măsurătorilor se trec în tabelul 1.

Se calculează curentul de drenă cu relația (8.1) în care  $V_p$  și  $I_{DSS}$  au valorile determinate anterior și rezultatele se trec în tabelul 1.

Se calculează panta tranzistorului (conductanța mutuală),  $g_m$ , cu relația (8.3) pentru  $V_{DS} = 6 \text{ V}$  și pentru toate valorile lui  $V_{GS}$  trecute în tabel; se calculează apoi panta cu relația (8.5) și se completează tabelul 1.



Se reprezintă grafic curbele  $I_{DS}(V_{GS})$  și  $g_m(V_{GS})$  pentru  $V_{DS} = 6$  V, cu valorile determinate experimental.

**3.** Se trasează caracteristicile de ieșire,  $i_{DS} = i_{DS}(v_{DS})$ , cu parametru tensiunea  $V_{GS}$ . Tensiunea  $V_{DS}$  se reglează între 0 și 10 V iar tensiunea  $V_{GS}$  se fixează la valorile indicate în tabelul 2. Pe grafic, vor fi trecute valorile limită absolute pentru tensiune și curent, precum și curba puterii disipate pe drenă.

Se determină, din grafic, rezistența de ieșire în zona de saturație, conform relației (8.4), pentru  $V_{DS} = 8$  V și  $V_{GS} = 0$ .

**4.** Se trasează caracteristicile de ieșire pentru tensiuni  $V_{DS}$  mici pentru aceleași tensiuni  $V_{GS}$  ca la punctul 3. Tensiunea  $V_{DS}$  se va măsura cu un voltmetru cu impedanța de intrare mare; se va completa tabelul 3. Se inversează sensul tensiunii  $V_{DS}$  (și al instrumentului din drenă) și se fac aceleași măsurători completând tabelul 3. Curbele se vor desena pe un același grafic pentru a se vedea simetria comportării TECMOS în jurul originii.

Se va calcula rezistența drenă-sursă,  $r_0 = r_{DS}$ , pentru  $V_{DS} = 0.1$  V, cu relația (8.4) pentru toate valorile specificate ale tensiunii poartă sursă,  $V_{GS}$ , din tabel; se calculează și valoarea teoretică cu relația (8.6).

Se reprezintă grafic dependența rezistenței  $r_{DS}$  de tensiunea poartă sursă, cu valorile determinate experimental.

**5.** Pentru trasarea caracteristicilor statice ale unui TECMOS cu canal P indus, se folosesc montajele  $M_3$  și  $M_4$  cu tranzistorul bipolar scos din soclu. Se montează în serie cu drenă un miliampermetru de curent continuu, pentru măsurarea curentului de drenă. Se va urmări, în permanentă, menținerea tensiunilor și curenților sub valorile limită date în anexă pentru tranzistorul folosit în lucrare (KF 552).

**6.** Se determină tensiunea de prag și factorul de curent,  $\beta$ , măsurând tensiunea  $V_{DS} = V_{GS} = V_p$  (toate negative) pentru care curentul de drenă este  $I_{DS} = 10$   $\mu$ A, apoi măsurând curentul de drenă pentru  $V_{DS} = V_{GS} = -8$  V; factorul de curent,  $\beta$ , se determină din relația (8.8).

Se trasează caracteristica de transfer  $i_{DS} = i_{DS}(v_{GS})$  pentru două valori ale tensiunii drenă-sursă și se completează tabelul 4.

Din graficul  $i_{DS} = i_{DS}(v_{GS})$ , se determină valoarea pantei tranzistorului,  $g_m$ , conform relației (8.3), pentru  $V_{DS} = 8 \text{ V}$ , pentru valorile tensiunii poartă-sursă specificate în tabel.

Cu valorile lui  $V_p$  și  $\beta$  determinate anterior, se calculează caracteristica de transfer  $i_{DS} = i_{DS}(v_{GS})$  pentru  $V_{DS} = -8 \text{ V}$ , cu relația (8.8) și dependența pantei de tensiunea  $V_{GS}$  cu relația (8.9) și se completează tabelul 4.

Se vor reprezenta grafic caracteristica de transfer și dependența pantei  $g_m$  de  $V_{GS}$  pentru  $V_{DS} = -8 \text{ V}$ , cu valorile măsurate.

**7.** Se trasează caracteristicile de ieșire  $i_{DS} = i_{DS}(v_{DS})$  cu tensiunea poartă sursă,  $V_{GS}$ , ca parametru. Tensiunea  $V_{DS}$  se reglează între 0 și  $-10 \text{ V}$ , fără a depăși valoarea maximă admisă. Pentru tensiuni drenă-sursă mici se vor efectua mai multe măsurători, așa cum se vede în tabelul 5.

Pentru  $V_{DS} = -8 \text{ V}$  și  $V_{GS} = -8 \text{ V}$ , cu relația (8.4) se determină rezistența de ieșire în regiunea de saturație.

Pentru  $V_{GS} = -8 \text{ V}$ , se calculează caracteristica de ieșire cu relațiile (8.7) și (8.8), cu valorile determinate anterior pentru tensiunea de prag,  $V_p$ , și pentru factorul de curent,  $\beta$ .

Se determină, experimental, cu relația (8.4) și teoretic, cu relația (8.10), rezistența drenă-sursă,  $r_{DS}$ , pentru  $V_{DS} = 0.2 \text{ V}$ , pentru valorile tensiunii poartă sursă din tabelul 5; se reprezintă grafic curba experimentală obținută.

**8.** Pentru măsurarea amplificatoarelor elementare realizate cu TECMOS se alimentează montajele astfel:  $M_1$  și  $M_2$  cu  $+15 \text{ V}$  la borna 2 față de masă și  $-15 \text{ V}$  la borna 9 față de masă (borna 1); montajele  $M_3$  și  $M_4$  cu  $-15 \text{ V}$  la borna 2 față de masă (borna 9 este deja legată la masă). Tranzistorul bipolar este scos.

La toate punctele care urmează, se vor măsura curentul prin TECMOS și tensiunea drenă-sursă, iar prin interpolare, din caracteristicile statice trasate

|                  |          | $V_{GS}$ (V) | 1 | 0 | -1 | -2 | -3 | -5 |
|------------------|----------|--------------|---|---|----|----|----|----|
|                  |          | $V_{DS}$ (V) |   |   |    |    |    |    |
| $i_{DS}$<br>(mA) | 1        |              |   |   |    |    |    |    |
|                  | 6        |              |   |   |    |    |    |    |
|                  | 3        |              |   |   |    |    |    |    |
|                  | teoretic |              |   |   |    |    |    |    |
| $g_m$<br>(mA/V)  | 6        |              |   |   |    |    |    |    |
|                  | teoretic |              |   |   |    |    |    |    |

Tabelul 8.1

anterior, se deduce tensiunea poartă sursă. Pentru valorile din punctul static de funcționare, se determină, din grafice, parametrii necesari pentru verificările relațiilor teoretice.

Semnalul alternativ, care se aplică prin capacitate la borna 6, are frecvența de 1 kHz și valoarea eficace de 100 mV.

9. Se realizează montajul de amplificator cu sursa la masă, conform *fig.8.5*,

|                  |    | $V_{GS}$ (V) | 1 | 2 | 3 | 4 | 6 | 8 | 10 |
|------------------|----|--------------|---|---|---|---|---|---|----|
|                  |    | $V_{DS}$ (V) |   |   |   |   |   |   |    |
| $i_{DS}$<br>(mA) | 1  |              |   |   |   |   |   |   |    |
|                  | 0  |              |   |   |   |   |   |   |    |
|                  | -1 |              |   |   |   |   |   |   |    |
|                  | -2 |              |   |   |   |   |   |   |    |
|                  | -3 |              |   |   |   |   |   |   |    |
|                  | -4 |              |   |   |   |   |   |   |    |

Tabelul 8.2

prin legarea împreună a bornelor 5 și 7. Se reglează punctul static de funcționare astfel încât  $V_{DS} = 6$  V.

Se aplică semnalul la borna 6 și se măsoară răspunsul circuitului la borna 4. Se determină amplificarea de tensiune și se verifică relația (8.11).

| $i_{DS}$<br>( $\mu\text{A}$ ) | $V_{DS}$ (V) \ $V_{GS}$ (V) | -0.3 | -0.2 | -0.1 | 0 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | $r_{DS}$ ( $\Omega$ ) |     |
|-------------------------------|-----------------------------|------|------|------|---|-----|-----|-----|-----------------------|-----|
|                               |                             |      |      |      |   |     |     |     |                       | ex. |
|                               | 1                           |      |      |      |   |     |     |     |                       |     |
| 0                             |                             |      |      |      |   |     |     |     |                       |     |
| -1                            |                             |      |      |      |   |     |     |     |                       |     |
| -2                            |                             |      |      |      |   |     |     |     |                       |     |
| -3                            |                             |      |      |      |   |     |     |     |                       |     |
| -4                            |                             |      |      |      |   |     |     |     |                       |     |

Tabelul 8.3

Se determină banda amplificatorului prin măsurarea frecvențelor limită la o scădere cu 3 dB a modulului amplificării de tensiune.

| $i_{DS}$<br>(mA) | $V_{DS}$ (V) \ $V_{GS}$ (V) | -3 | -4 | -6 | -8 | -10 | -12 |
|------------------|-----------------------------|----|----|----|----|-----|-----|
|                  |                             | -4 |    |    |    |     |     |
| -8               |                             |    |    |    |    |     |     |
| teoretic         |                             |    |    |    |    |     |     |
| $g_m$<br>(mA/V)  | -8                          |    |    |    |    |     |     |
| teoretic         |                             |    |    |    |    |     |     |

Tabelul 8.4

Se măsoară, cu osciloscopul, excursia maximă de tensiune, măsurând amplitudinea semnalului de la intrare până la limitare.

**10.** Se realizează amplificatorul cu sarcină distribuită, desfăcând legătura

| $i_{DS}$<br>(mA) | $V_{DS}$ (V) \ $V_{GS}$ (V) | -0.1 | -0.2 | -0.3 | -0.4 | -0.5 | -1 | -2 | -4 | -6 | -8 | -10 | $r_{DS}$ ( $\Omega$ ) |    |
|------------------|-----------------------------|------|------|------|------|------|----|----|----|----|----|-----|-----------------------|----|
|                  |                             |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |     | ex.                   | t. |
|                  | -4                          |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |     |                       |    |
| -6               |                             |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |     |                       |    |
| -8               |                             |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |     |                       |    |
| -10              |                             |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |     |                       |    |
| -12              |                             |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |     |                       |    |
| teoretic         |                             |      |      |      |      |      |    |    |    |    |    |     |                       |    |

Tabelul 8.5

dintre bornele 5 și 7. Se măsoară amplificarea în bandă, la 1 kHz și se verifică relația (8.12) și se măsoară și banda de trecere a amplificatorului.

**11.** Se realizează montajul de repetor pe sursă prin legarea împreună a bornelor 4 și 7; ieșirea va fi la borna 5. Se măsoară amplificarea de tensiune și se verifică relația (8.13)

**12.** Se realizează montajul complementar din *fig.8.8*, introducând în soclu tranzistorul bipolar (PNP pentru montajele  $M_1$  și  $M_2$ , respectiv NPN pentru montajele  $M_3$  și  $M_4$ ).

Se reglează curentul prin TECMOS astfel încât curentul prin tranzistorul bipolar să fie de 1 mA.

Se măsoară amplificările de tensiune  $A'_v$  (ieșire la borna 5) și  $A''_v$  (ieșirea la borna 8). Se vor verifica relațiile (8.15) și (8.16) în care se vor considera:  $h_{21} = 200$  și  $h_{11} = 5 \text{ k}\Omega$ .