

Capitolul III. MODELE SPICE ALE TRANZISTOARELOR BIPOLARE

3.1. DESCRIEREA UNUI TRANZISTOR BIPOLAR ÎN SPICE

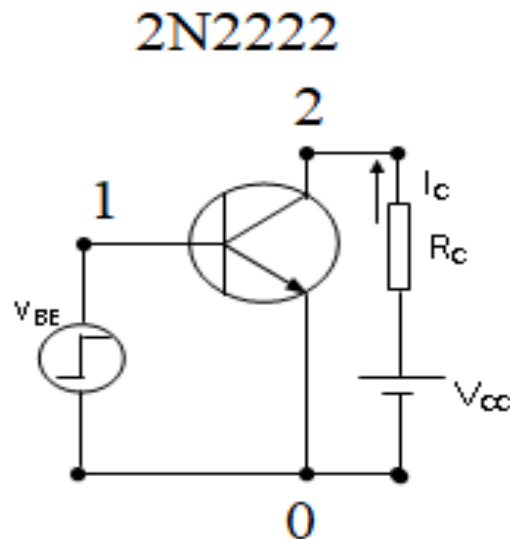
3.1. continuare

- Forma generală de declarare a unui tranzistor bipolar într-o linie de program SPICE este:
- *Q*nume colector baza emitor <ns> *MODEL_ nume* <area> <OFF>
- *.MODEL MODEL_ nume npn/pnp*(IS=1E-15 BF=100 ...)
- Dacă linia de program începe cu litera “Q”, programul înțelege că urmează descrierea unui tranzistor bipolar.
- Fără “spațiu” urmează numele format din maxim 7 caractere.
- Nodurile colector, bază, emitor, exact în această ordine.

- Opțional se poate specifica și numele nodului substrat prin <ns>, implicit substratul (TB-integrate).
- Factorul de scală <area>, implicit egal cu 1, este egal cu numărul de tranzistoare identice, conectate în paralel.
- Cuvântul cheie <OFF>, dacă apare, inițializează tranzistorul în regim de blocare; în caz contrar tranzistorul este inițializat în Regim Activ Normal, fiind polarizat la $V_{BE} = +0.6V$, $V_{BC} = -1V$.
- *MODEL_*nume este numele modelului care specifică între paranteze parametrii pentru acest tranzistor. Apoi trebuie precizat tipul tranzistorului bipolar: npn sau pnp.

Exemplu:

- Un exemplu pentru definirea tranzistorului 2N2222:
- Q1 2 1 0 2N2222
- .MODEL 2N2222 npn(IS=1E-16 BF=210 VAF=100)



3.2. Modelarea regimului static a TB

- Modelul de bază, în SPICE level 1,2,...6 a fost modelul Ebers-Moll. Chiar dacă modele mai performante ca modelul Gummel Poon, au fost dezvoltate ulterior dar au avut punctul de plecare tot în modelul Ebers-Moll.
- Modelul Ebers-Moll fundamental pentru regimul de curent continuu al TB stabilește dependența curenților I_C , I_E , I_B în funcție de tensiunile V_{BE} , V_{BC} .
- Conventii:
- - npn - toti curenții intra în terminale.

3.2.1 Modelul Ebers-Moll fundamental

Ipoteze:

1. Curenții de colector și emitor reprezintă o superpoziție între curentul propriu al unei joncțiuni și o fracțiune (notată $\alpha_{F/R}$) din curentul joncțiunii vecine.
2. Curentul propriu al unei joncțiuni este de natura *curentului de difuzie*. Conform teoriei joncțiunii pn el are expresia:

$$I_{\text{jonct}} = I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{qV_{\text{jonct}}}{kT}\right) - 1 \right]$$

3. Ipoteza de *reciprocitate*, din modelele fizice:

$$I_{ES} \alpha_F = I_{CS} \alpha_R$$

3.2.1. continuare

În baza ipotezelor 1-3 se pot exprima curenții I_C , I_E astfel:

$$I_C = -\alpha_F I_E - I_{C0} \cdot \left[\exp\left(\frac{qV_{BC}}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$I_E = -\alpha_R I_C - I_{E0} \cdot \left[\exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - 1 \right]$$

unde α_F , α_R reprezintă fracțiunile din curentul vecin care ajunge la joncțiunea colectorului, respectiv emitorului, iar I_{C0} , I_{E0} sunt curenții reziduali ai joncțiunilor colectorului, respectiv emitorului

- Rezolvând sistemul de mai sus în raport cu necunoscutele I_C , I_E rezultă:

$$I_C = \alpha_F I_{ES} \cdot \left[\exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - 1 \right] - I_{CS} \cdot \left[\exp\left(\frac{qV_{BC}}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$I_E = -I_{ES} \cdot \left[\exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - 1 \right] + \alpha_R I_{CS} \cdot \left[\exp\left(\frac{qV_{BC}}{kT}\right) - 1 \right]$$

Acest model are 4 parametri: α_F , α_R , I_{CS} , I_{ES} ,

- α_F , α_R – subunitari, adimensionali - factori de transfer **direct** și **invers** în curent continuu, în conexiunea Bază Comună;
- I_{ES} - curentul propriu în polarizare inversă a joncțiunii emitor-bază cu joncțiunea colector-bază scurtcircuitată ($V_{BE} < 0$, $V_{BC} = 0$).
- I_{CS} - curentul propriu în polarizare inversă a joncțiunii colector-bază cu joncțiunea emitor-bază scurtcircuitată ($V_{BE} = 0$, $V_{BC} < 0$).

I_{ES} – noteaza: $I_{ES} = \frac{I_{E0}}{1 - \alpha_F \alpha_R}$

I_{CS} – noteaza: $I_{CS} = \frac{I_{C0}}{1 - \alpha_F \alpha_R}$

Între cei 4 parametri de model, α_F , α_R , I_{CS} , I_{ES} există o relație de dependență liniară, ce rezultă din modelarea fizică și care este ipoteza de reciprocitate:

$$I_{ES} \alpha_F = I_{CS} \alpha_R = I_S$$

Se definesc factorii de amplificare **direct** și **invers** în curent continuu, β_F , respectiv β_R , în conexiunea Emitor Comun:

$$\beta_F = \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F} \qquad \beta_R = \frac{\alpha_R}{1 - \alpha_R}$$

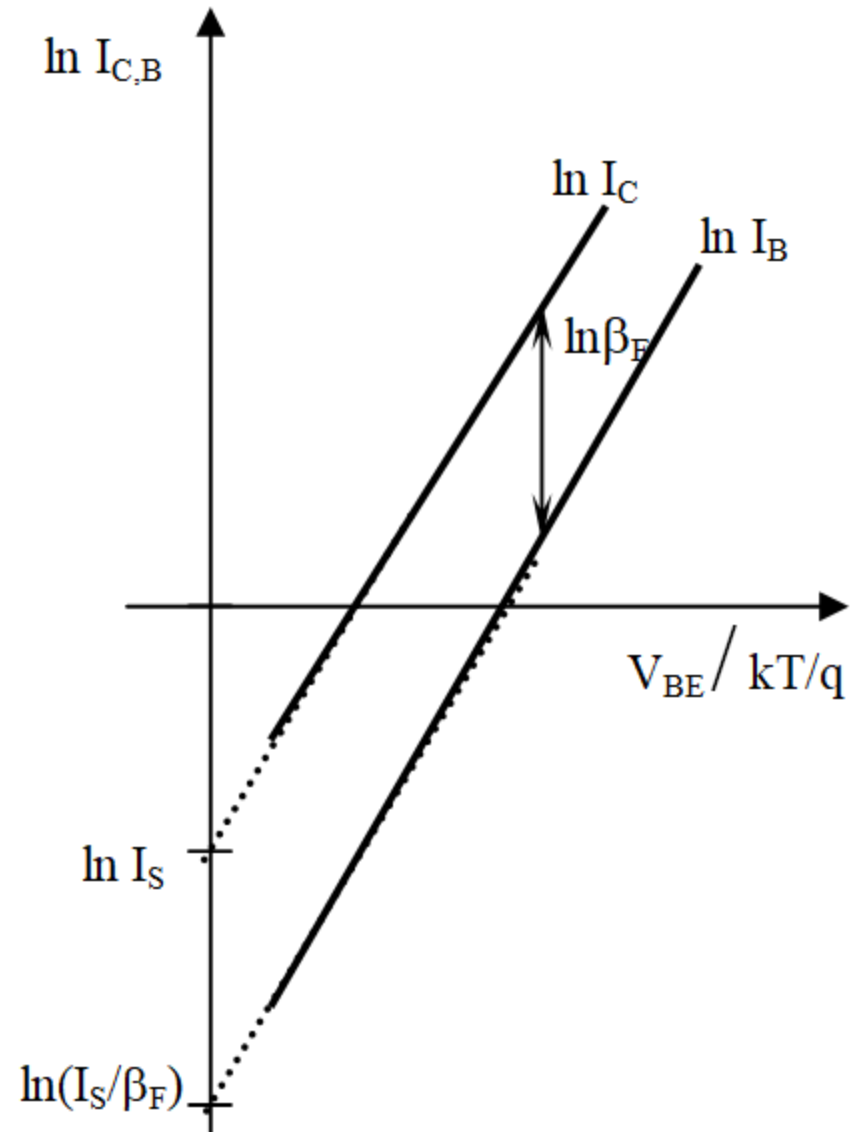
- Dacă se exprimă I_{ES} , I_{CS} în funcție de I_S și parametrii α_F , α_R în funcție de β_F , β_R ->
- Modelul Ebers-Moll varianta de transport (π)

$$I_C = I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - \exp\left(\frac{qV_{BC}}{kT}\right) \right] - \frac{I_S}{\beta_R} \cdot \left[\exp\left(\frac{qV_{BC}}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$I_E = -I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - \exp\left(\frac{qV_{BC}}{kT}\right) \right] - \frac{I_S}{\beta_F} \cdot \left[\exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - 1 \right]$$

Parametrii de model – 3 !

Extragerea parametrilor modelului fundamental, în condiții de $V_{BC}=0$.



3.2.2. Efectul rezistențelor serie

- Tranzistorul bipolar cu rezistențe serie este descris de ecuațiile Ebers-Moll fundamentale scrise cu tensiunile $V_{B'E'}$, $V_{B'C'}$ în loc de V_{BE} , V_{BC} , plus ecuațiile Kirchhoff pe cele două bucle:

$$V_{BE} = V_{B'E'} + r_B I_B - r_E I_E$$

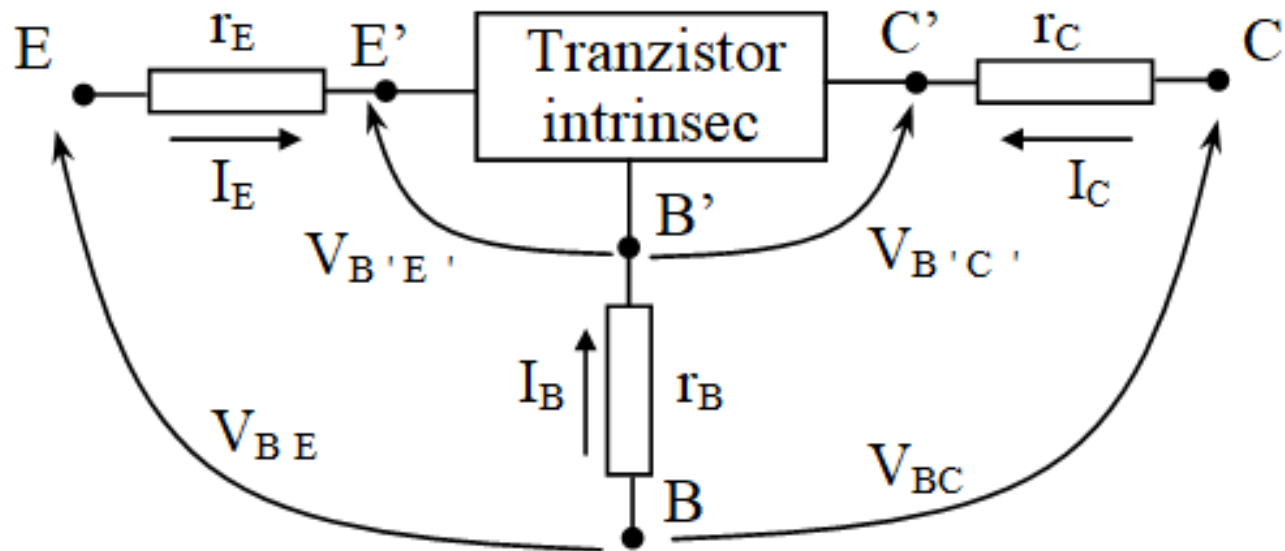
$$V_{BC} = V_{B'C'} + r_B I_B - r_C I_C$$

Parametrii de model, introduși suplimentar de acest efect sunt încă **3**: r_E , r_B , r_C . Ei au valori tipice de ordinul:

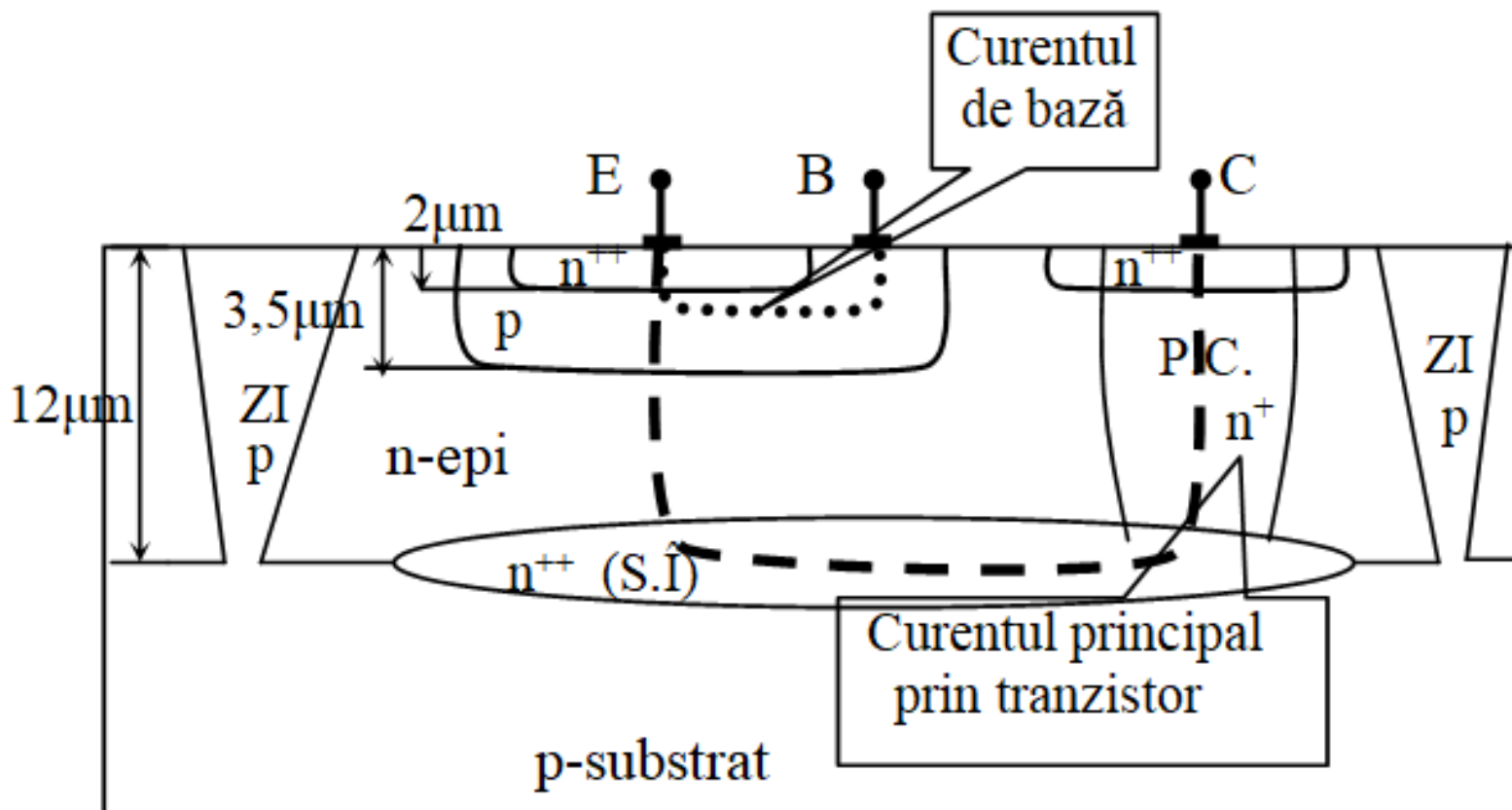
$$r_B = 100\Omega, \quad r_C = 10\Omega, \quad r_E = 1\Omega,$$

sau aproximativ se află în acest raport.

Completarea modelului Ebers-Moll fundamental cu efectul rezistențelor serie:



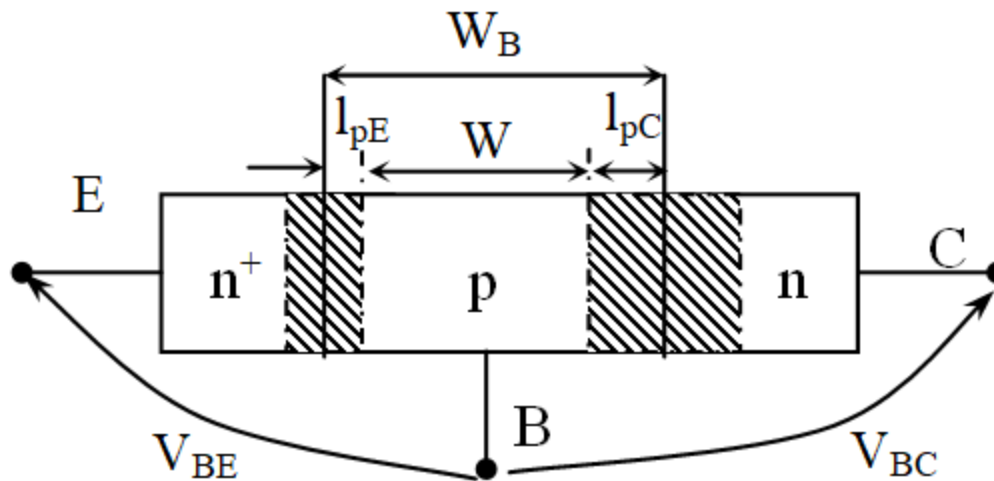
- Structura tranzistorului npn bipolar integrat



3.2.3. Efectul Early

E. Early este *efectul modulării grosimii regiunii neutre a bazei* prin intermediul V_{BC} .

$$W = W_B - l_{pE}(V_{BE}) - l_{pC}(V_{BC})$$



- **Parametrii de model suplimentari față de modelul Ebers-Moll fundamental** : $\underline{1}$ = tensiunea Early, V_A cu valori 10V 100V.
- Programele SPICE 3 sau de nivel mai înalt modelează efectul Early prin parametrul V_{AF} – tensiune Early directă (vechiul V_A) și efectul Late prin parametrul V_{AR} – tensiune Early inversă.
- Au de suferit parametrii I_S și β_F de pe urma efectului Early:

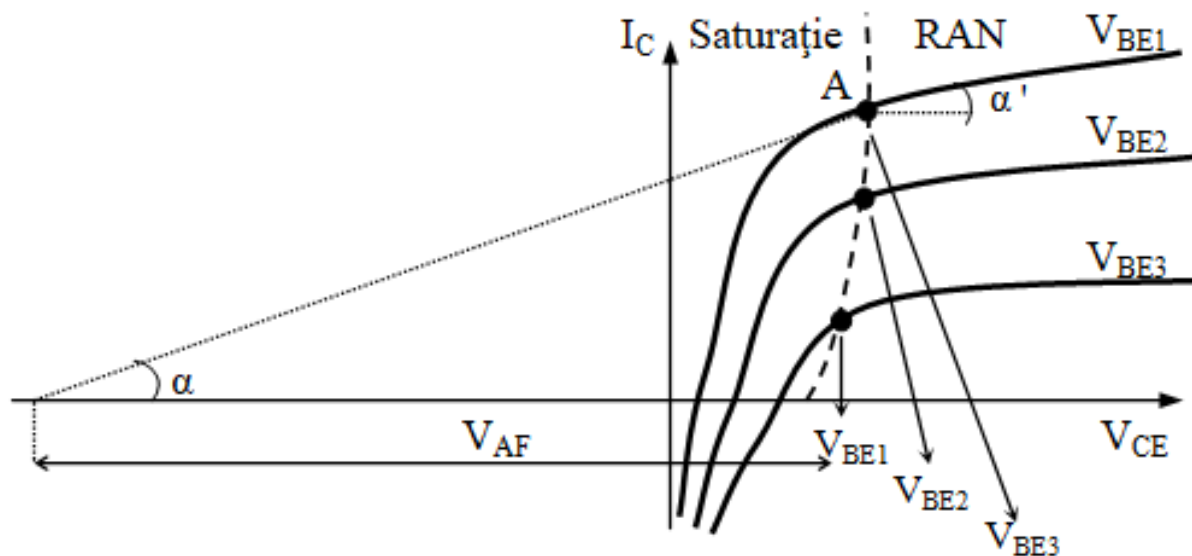
$$I_S(V_{BC}) = I_S(0) \cdot \frac{W(0)}{W(V_{BC})} \cong I_S(0) \left(1 - \frac{V_{BC}}{V_A} \right)$$

$$\beta_F(V_{BC}) = \beta_F(0) \cdot \frac{W(0)}{W(V_{BC})} \cong \beta_F(0) \left(1 - \frac{V_{BC}}{V_A} \right)$$

$$W(V_{BC}) \cong W(0) + \left. \frac{\partial W}{\partial V_{BC}} \right|_{V_{BC}=0} \cdot V_{BC} + \dots$$

Extracția parametrului de model

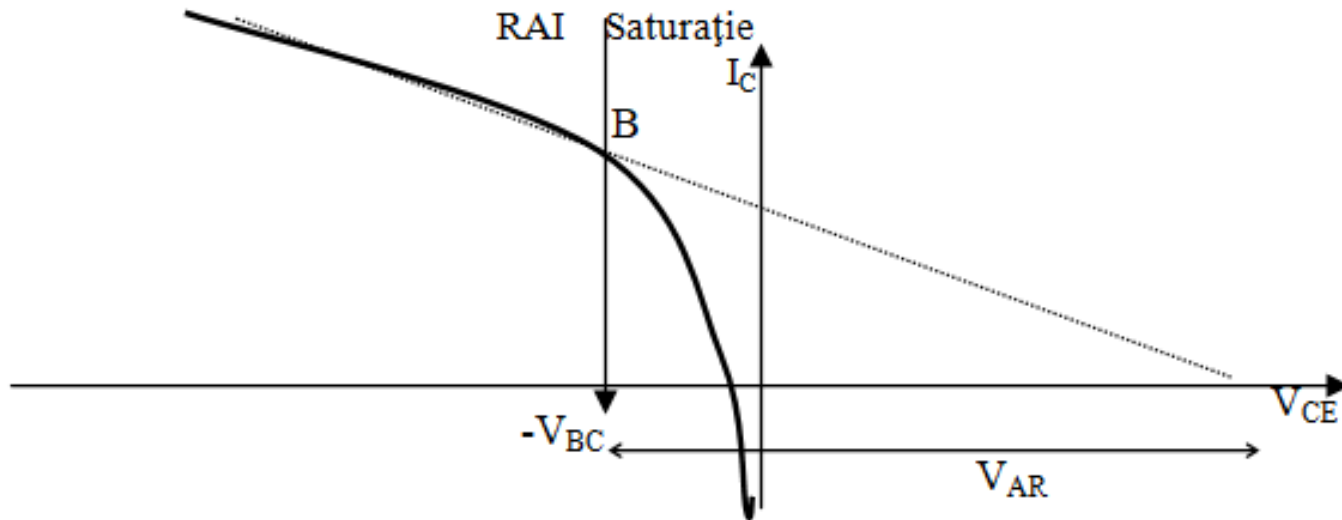
Utilă este zona de caracteristică din regim activ normal, cu o ușoară creștere a curentului I_C cu tensiunea V_{CE} .



$$h_{oE} = \left. \frac{\partial I_C}{\partial V_{CE}} \right|_{V_{CE}=V_{BE}}$$

$$h_{oE} = \operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \alpha' = \frac{I_C|_{V_{CE}=V_{BE}}}{V_A} \Leftrightarrow V_A = \frac{I_C|_{V_{CE}=V_{BE}}}{h_{oE}}$$

Extragerea parametrului de model V_{AR} al efectului Late, se face din măsurători similare $I_C - V_{CE}$ la $V_{BC} = \text{ct.} > 0$ și $V_{CE} < 0$



Efectul curenților de generare-recombinare

$$I_{grE} = C_2 I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{qV_{BE}}{n_{EL} kT}\right) - 1 \right]$$

$$I_{grC} = C_4 I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{qV_{BC}}{n_{CL} kT}\right) - 1 \right]$$

Efectul de nivel mare de injecție

$$I_S(V_{BE}) = \frac{I_S|_{V_{BE}=0}}{1 + \theta \exp\left(\frac{qV_{BE}}{2kT}\right)}$$

Parametrii de model introduși în regimul static Ebers – Moll:

Modelul fundamental: I_S , β_{FM} , β_{RM} .

Efectul curenților de generare-recombinare: C_2 , n_{EL} , C_4 , n_{CL} .

Efectul nivelului mare de injecție: θ .

Efectul Early: V_A .

Efectul rezistențelor serie: r_E , r_B , r_C .

În total 12 parametri.

Parametrii de model introduși în regimul dinamic Ebers – Moll:

Efectul capacităților de tranziție: C_{TE} , Φ_E , m_E , FE , C_{TC} , Φ_C , m_C , FC , r .

Efectul capacităților de difuzie: τ_F , τ_R .

Efectul capacității de substrat: C_{CS} .

În total 12 parametri.