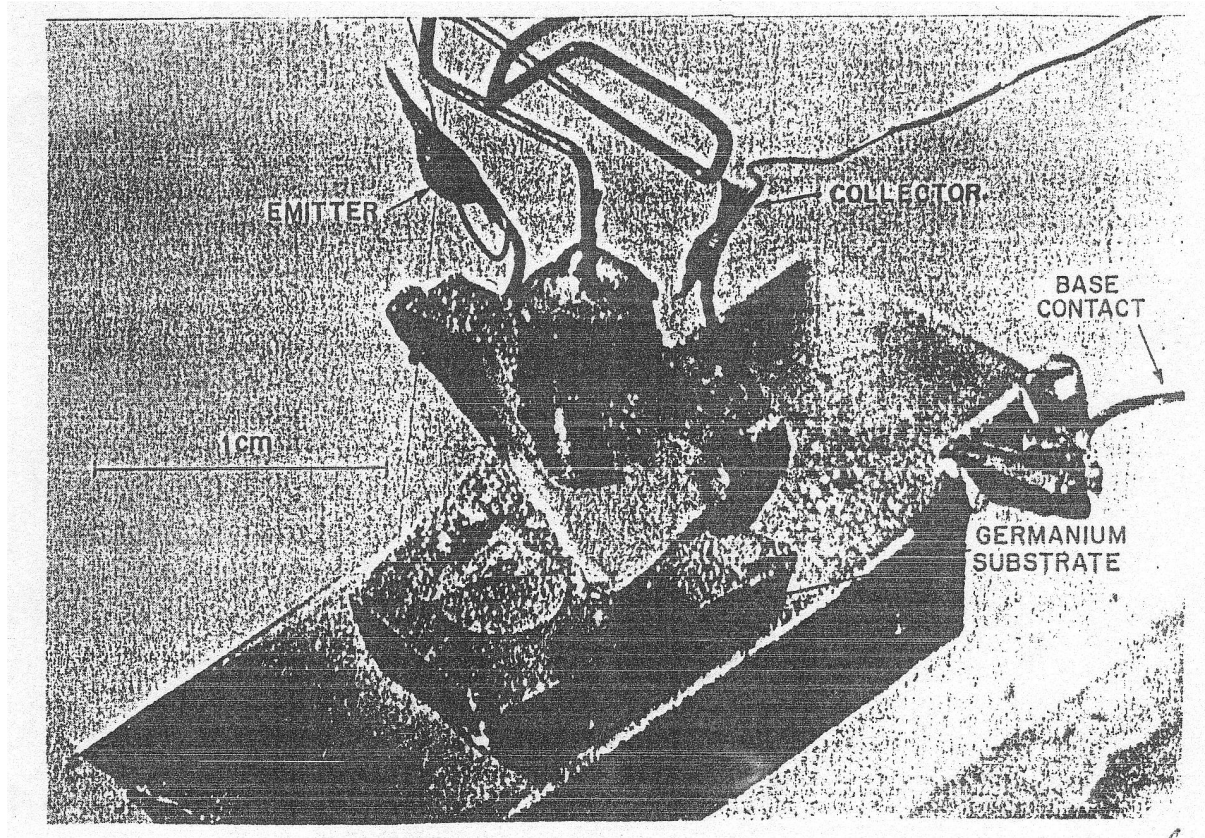


Bipoláris eszközök

Bell Laboratories, 1947

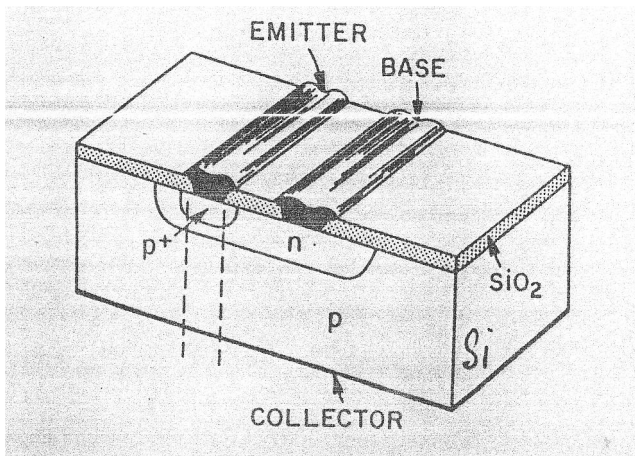
J. Bardeen, W. H. Brattain és W. Shockley



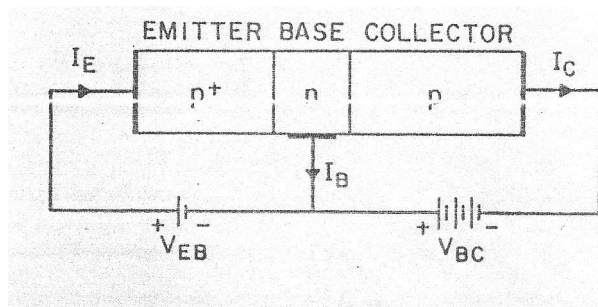
Az első tranzisztor – 2 fém kontaktus egy Ge kristályhoz

Tranzisztor: két közeli $p-n$ átmenet (homo-, heteroátmenet)

Tiristor: (gas tyrration analógja): három $p-n$ átmenet → **bistabil** jelleg (két állapot - nagyimpedanciájú **kikapcsolt**, kisimpedanciájú **bekapcsolt**)



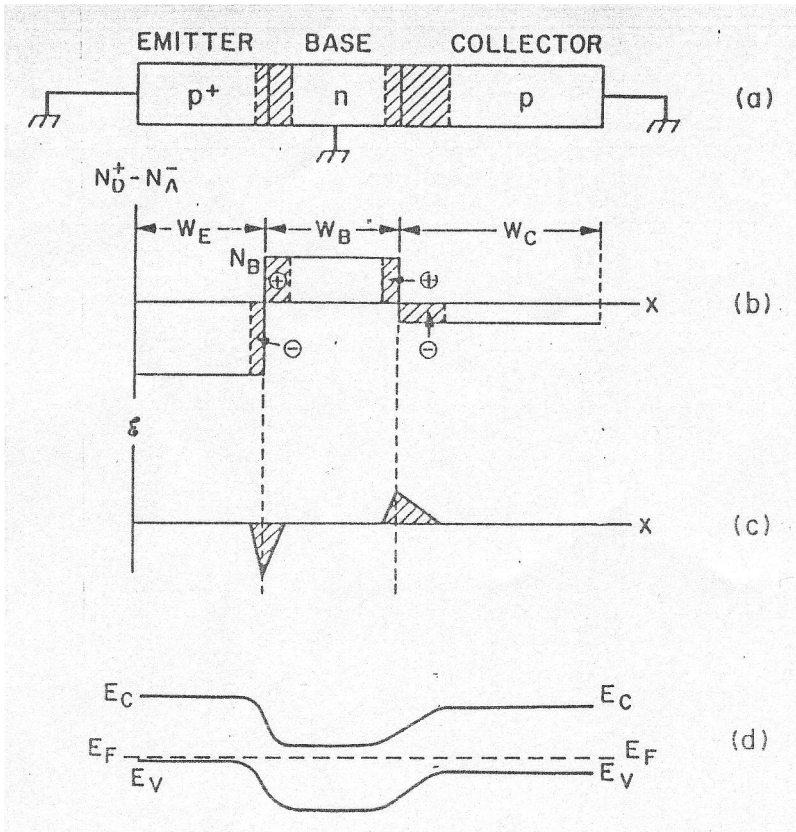
$p-n-p$ tranzisztor
(komplementer az $n-p-n$ tranzisztor)



Idealizált $p-n-p$ bipoláris tranzisztor

- egyenletes adalékolás
- p^+ **emitter** (injektáló elektroda)
- **Kirchoff törvény** szerint 2 független áram a 3 terminálos eszközben

Földelt elektródás állapot



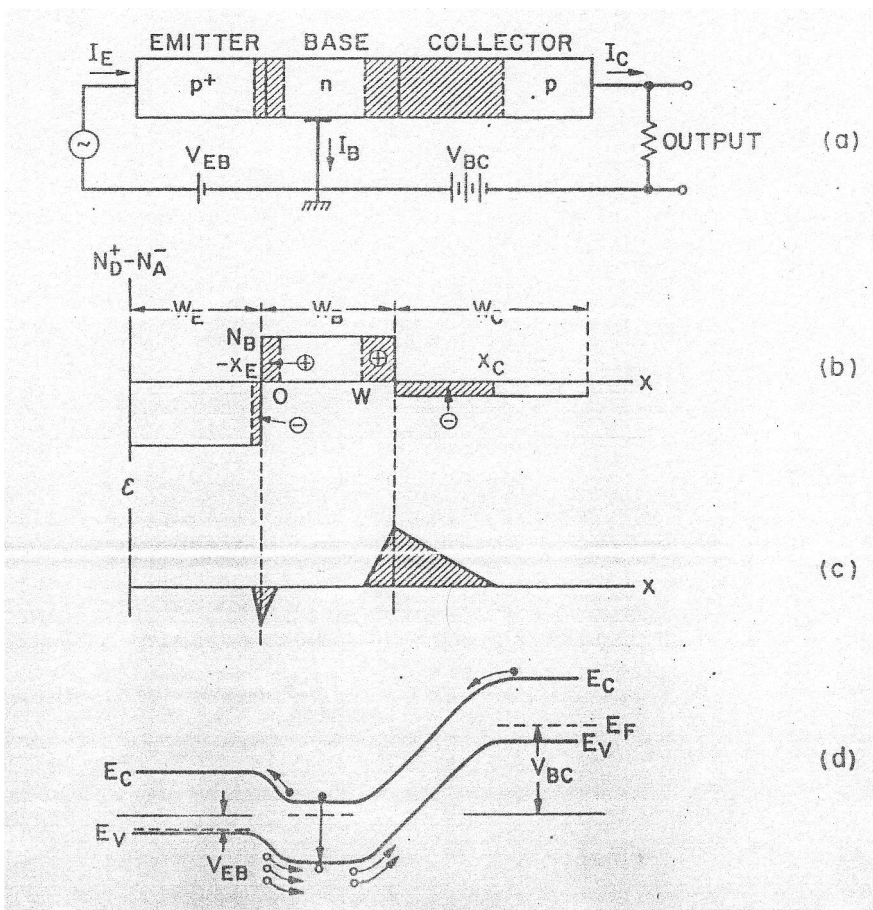
$p-n-p$ tranzisztor földelt terminál el.

adalekkoncentráció viszonyok jelezve a kiürített rétegen (tértöltési tartományok)

elektromos tereeloszlás (a tértöltési rétegekben)

energia sávdiaagram termikus egyensúlyban

Aktív működési mód (V_{EB} nyitó, V_{BC} záró)



Előfeszítés

Adalekprofilok és tértöltési tartományok (szélesebb a záróirányú előfeszítés bázis-kollektor átmeneten)

Térerősség eloszlás (ld. fent)

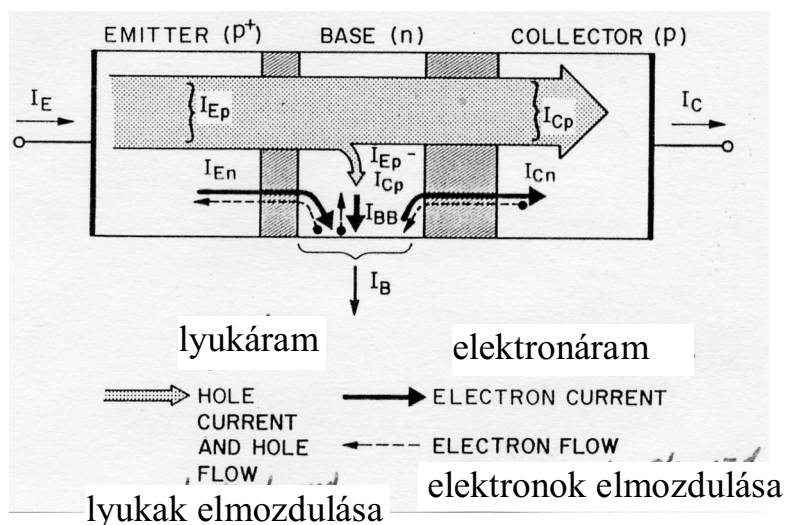
Energia sávdiaagram

Sáveltolás

$V_{EB} > 0$ – lefelé

$V_{BC} < 0$ – felfelé

Áramerősítés (ideális eset)



- nincs **generáció-rekombináció** a kiürített tartományokban;
- injektált lyukak az emitter oldalon → lyukáram I_{Ep} ;
- a legtöbb eléri a kollektort: I_{Cp} ;
- 3 bázisáram összetevő: I_{En}, I_{BB}, I_{Cn}

I_{En} - bázisból emitterbe injektált elektronok árama (nem kívánatos – minimalizálendő adalékolással);

I_{BB} - a rekombinálódó elektronok pótlására (lyukakkal): $I_{BB} = I_{Ep} - I_{Cp}$;

I_{Cn} - termikusan generált elektronok a **C-B** átmenet környezetében – driftáram.

$$I_E = I_{Ep} + I_{En}$$

$$I_C = I_{Cp} + I_{Cn}$$

$$I_B = I_E - I_C = (I_{Ep} - I_{Cp}) + I_{En} - I_{Cn}$$

Közös bázisú áramerősítési tényező (α_0)

$$\alpha_0 \equiv \frac{I_{Cp}}{I_E} = \frac{I_{Cp}}{I_{Ep} + I_{En}} \left(\frac{I_{Ep}}{I_{Ep} + I_{En}} \right) \left(\frac{I_{Cp}}{I_{Ep}} \right) = \gamma \alpha_T$$

$$\gamma \equiv \frac{I_{Ep}}{I_E} = \frac{I_{Ep}}{I_{Ep} + I_{En}} \quad \text{emitter hatásfok}$$

$$\alpha_T \equiv \frac{I_{Cp}}{I_{Ep}} \quad \text{bázis transzport tényező}$$

optimum:

CB szivárgási árama

A bipoláris tranzisztor sztatikus jelleggörbéi

Idealizálás:

- egyenletes adalékolás minden tartományban
- alacsony injekciós szint
- nincs generáció-rekombináció a tértöltési tartományokban
- nincsenek soros ellenállások (semleges tartomány)

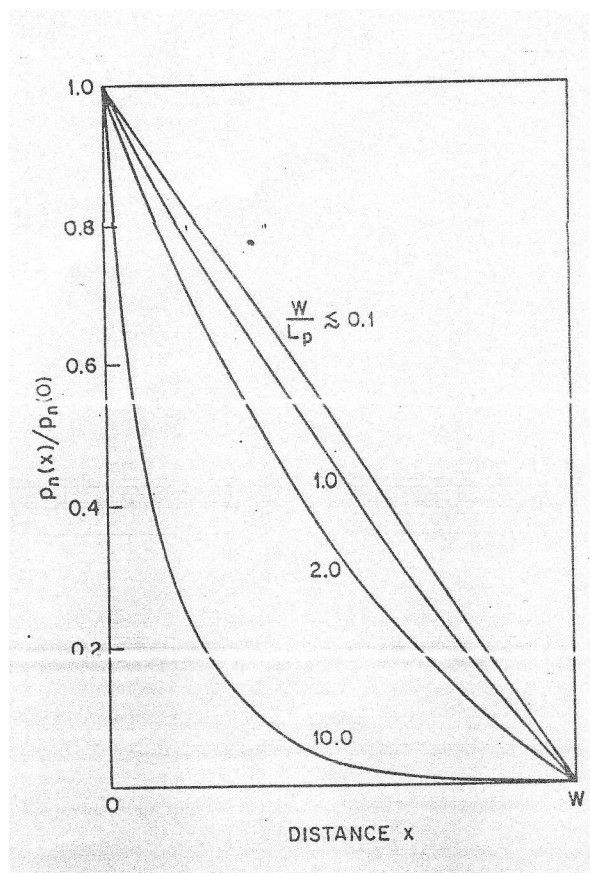
Aktív működési módban:

Kissebségi töltéshordozó sűrűség eloszlás a (térmentes, semleges) bázisban:

⇒ a térmentes sztatikus kontinuitási egyenletből:

$$D_p \left(\frac{d^2 p_n}{dx^2} \right) - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p}$$

$$p_{n0} = \frac{n_i^2}{N_{DB}} \leftarrow \text{bázis donorkoncentráció}$$



Nyitóirányban az **EB** átmenetnél ($x=0$)
injekció

$$p_n(0) = p_{n0} \cdot \exp \frac{qV_{EB}}{kT}$$

záróirányban a **BC** átmenet szélén ($x=W$)

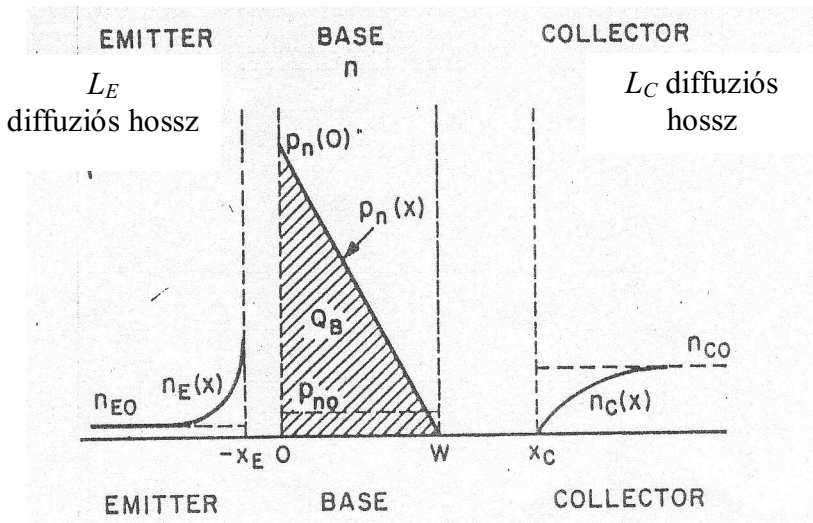
$$p_n(W) = 0$$

Megoldások a fenti perem-feltételekkel:

$$\frac{W}{L_p} \gg 1 \quad \text{exponenciális}$$

$$\frac{W}{L_p} \ll 1 \quad \text{lineáris egyenlet}$$

Kisebbségi töltéshordozó sűrűség eloszlás a tranzisztorban



$$w_E(x) = n_{E0} + n_{E0} \left(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}} - 1 \right) \exp\left[\frac{x+x_E}{L_E} \right] \quad x \leq -x_E$$

$$n_C(x) = n_{C0} - n_{C0} \cdot \exp\left[-\frac{x-x_C}{L_C} \right] \quad x \geq x_C$$

Kisebbségi töltéshordozó tárolás a bázisban $Q_B \cong \frac{qAWp_n(0)}{2}$

Áramegyenletek felírása a lyuk és elektronkomponensekkel

$$I_E = I_{Ep} + I_{En}$$

$$I_C = I_{Cp} + I_{Cn}$$

$$I_E = a_{11} \left(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}} - 1 \right) + a_{12}$$

$$a_{11} \cong qA \left[\frac{D_p n_i^2}{N_B W} + \frac{D_E n_{E0}}{L_E} \right]$$

W – bázisvastagság $\frac{W}{L_p} \ll 1$ $a_{12} \cong \frac{qAD_p n_i^2}{N_B W}$

N_B – bázis donorkoncentráció

$$I_C = a_{21} \left(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}} - 1 \right) + a_{22}$$

$$a_{21} \cong \frac{qAD_p n_i^2}{N_B W}$$

$\frac{W}{L_p} \ll 1$ $a_{22} \cong qA \left[\frac{D_p n_i^2}{N_B W} + \frac{D_C n_{C0}}{L_C} \right]$

Bázisáram: $I_B = I_E + I_C$

$$I_B = (a_{11} - a_{21}) \left(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}} - 1 \right) + (a_{12} - a_{22})$$

I_C felírható a bázisban tárolt töltéssel is:

$$I_C \cong \frac{qAD_p p_n(0)}{W} = \left[\frac{2D_p}{W^2} \right] Q_B \quad I_C \sim Q_B$$

Az ideális tranzisztor alapösszefüggései.

A bipoláris tranzisztor üzemmódjai

- kisebbségi töltéshordozó sűrűség vezérlése a terminálfeszültségekkel (V_{EB} , V_{CB}) az $\exp \frac{qV}{kT}$ összefüggéssel
- emitter- és kollektor áram arányos a bázis határain ($x=0$) ill. ($x=W$) vett kisebbségi töltéshordozó sűrűség gradienssel \rightarrow az áramok aránya a bázisban tárolt Q_B töltéssel
- a bázisáram az emitter- és kollektoráram különbsége

Emitter hatásfok cél $\gamma \cong 1$

$$(pnp) \quad \gamma \equiv \frac{I_{Ep}}{I_{Ep} + I_{En}} \cong \frac{1}{1 + \frac{D_E \cdot N_B \cdot W}{D_p \cdot N_E \cdot L_E}}$$

p^+np - abrupt **EB** átmenet

$|N_E| \gg |N_B| \rightarrow \gamma$ nő

Bázis transzportfaktor: cél $\alpha_T \cong 1$

$$\alpha_T \equiv \frac{I_{Cp}}{I_{Ep}} \cong 1 - \frac{W^2}{2L_p^2} \quad \text{növeléséhez } W \ll L_p$$

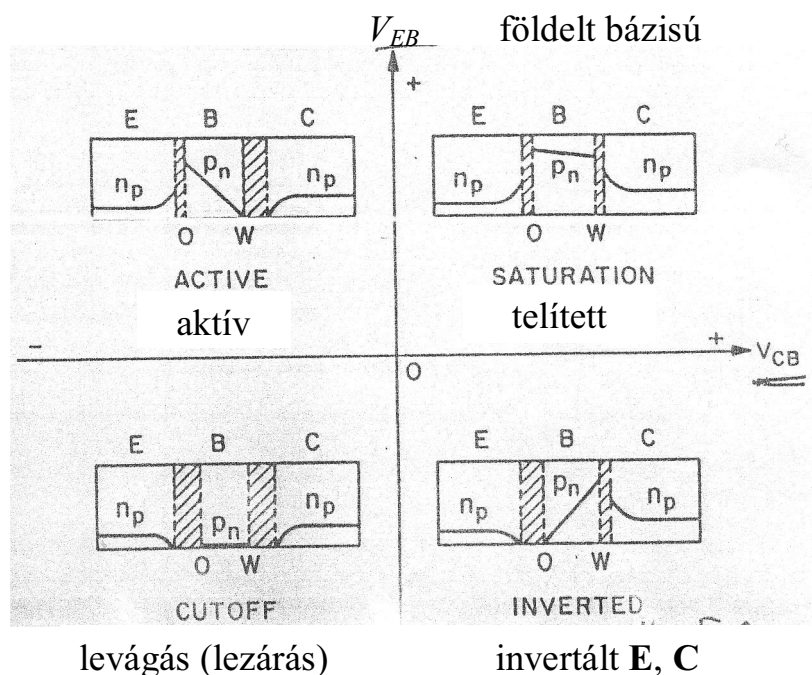
optimalizálás \rightarrow keskeny bázisstartomány mert $\alpha_p \approx const$

Működési módok:

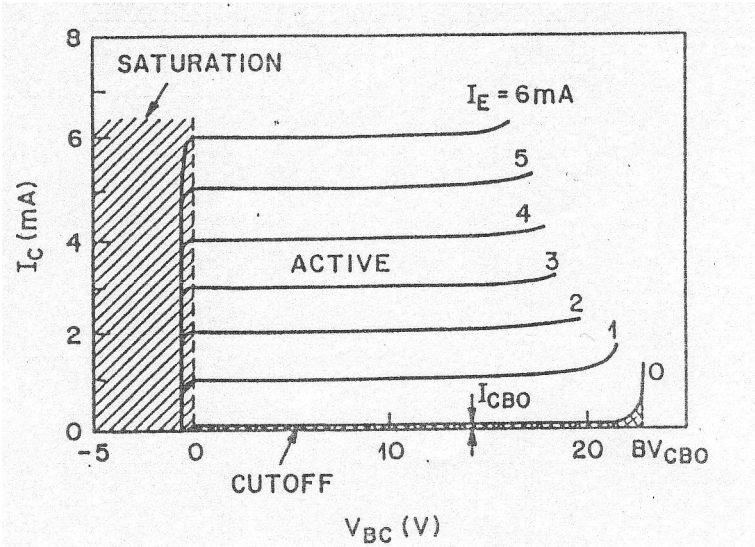
$$I_E = a_{11} \left(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}} - 1 \right) - a_{12} \left(e^{\frac{qV_{CB}}{kT}} - 1 \right)$$

$$I_C = a_{21} \left(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}} - 1 \right) - a_{22} \left(e^{\frac{qV_{CB}}{kT}} - 1 \right)$$

mind a négy esetben
érvényesek az általános
áramegyenletek



Földelt bázisú kapcsolás



- működési módok
 $I_C \approx I_E \quad \alpha_0 \approx 1$
- I_C független V_{BC} -től
- Ideális esetben homogén (bázis) adalékolást feltételezve

kisbelső töltéshordozó sűrűség eloszlás pnp tranzisztor bázisában

Aktív módban:

minimális gradiens változás



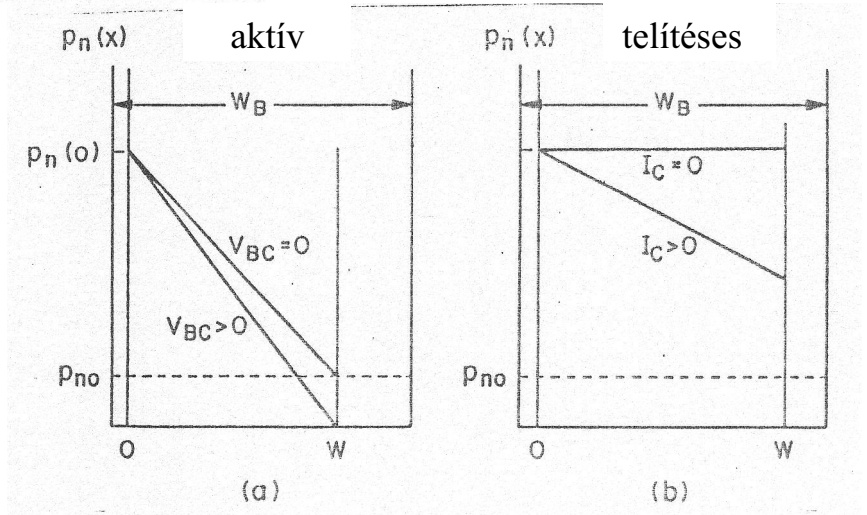
állandó áram

Telítésben:

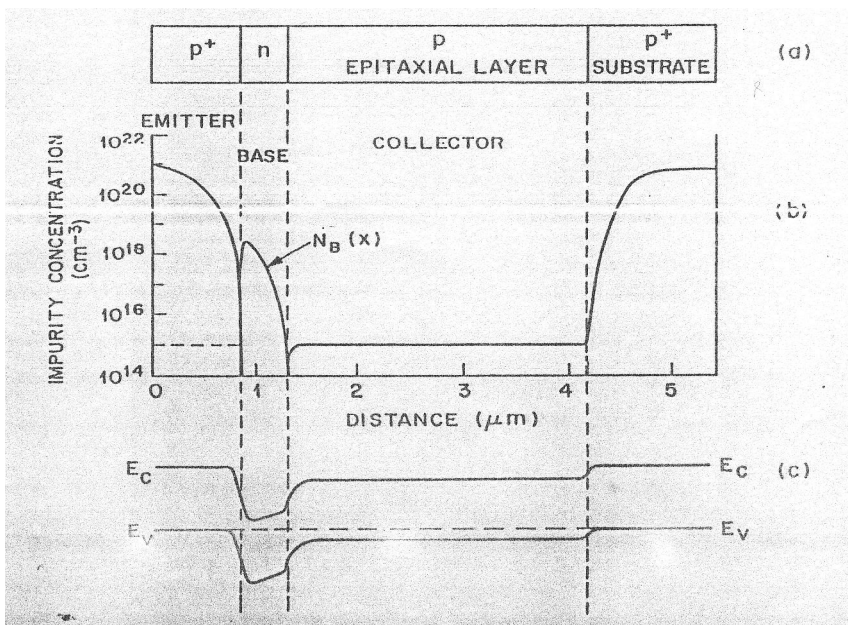
óriási gradiens változás



$$I_C \rightarrow 0$$



Gyakorlati esetek – inhomogén bázis (kettős diffúzió)



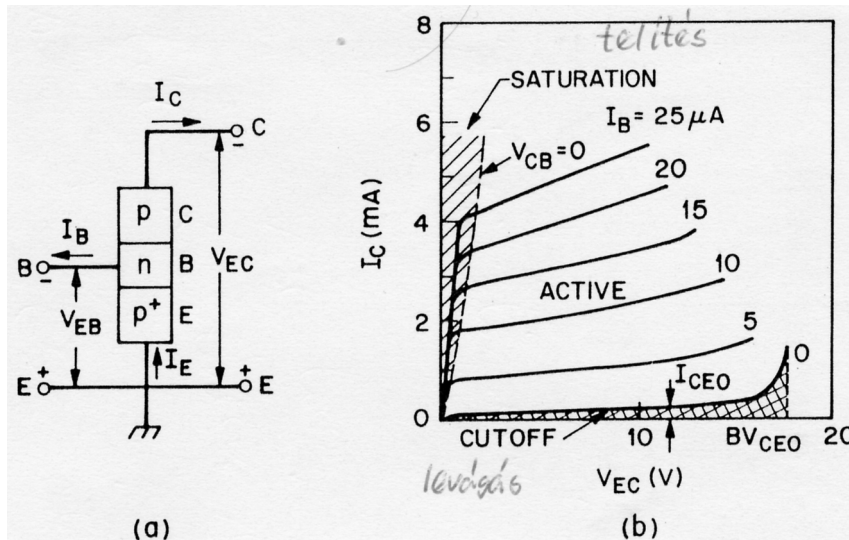
ún. graduális adalékolás esetén a tárolt bázistöltés:

$$Q_G = \int_0^W N_B(x) dx$$



áram egyenletekben a reális (diffundált vagy implantált) bázis adalékeloszlást kell figyelembe venni!

Bázisvastagság moduláció (Early-effektus)



$p-n-p$ tranzisztor
közös emitteres
kapcsolása

közös emitteres $p-n-p$ tranzisztor
kimeneti karakterisztikái

$$I_C = \alpha_0 (I_B + I_C) + I_{CB0}$$

$$I_C (1 - \alpha_0) = \alpha_0 I_B + I_{CB0}$$

Közös emitteres áramerősítés:

$$I_C = \frac{\alpha_0}{1 - \alpha_0} I_B + \frac{I_{CB0}}{1 - \alpha_0}$$

$$\beta_0 \equiv \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{\alpha_0}{1 - \alpha_0}$$

Kollektor szivárgási árama ($I_B = 0$ esetén):

$$I_{CE0} \equiv \frac{I_{CB0}}{1 - \alpha_0}$$

$$\alpha_0 \approx 1 \Rightarrow \beta_0 \gg 1$$

$$\alpha_0 = 0,99 \Rightarrow \beta_0 = 99$$

$$\alpha_0 = 0,998 \Rightarrow \beta_0 = 499$$

$$I_C = \beta_0 I_B + I_{CE0}$$

Vagyis alacsony bázisáram sokkal nagyobb kollektoráramot idéz elő.

Ideális esetben: $I_B = const$, I_C független V_{EC} -től;

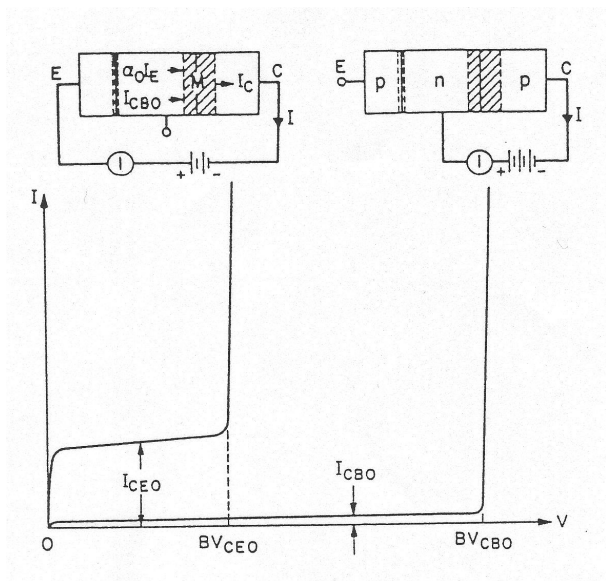
Reális tranzisztor: Early-hatás \Rightarrow nincs telítődés a kimeneti karakterisztikán
bázisvastagság-moduláció

Mivel $\gamma \approx 1$ (emitter hatásfok) ezért a

$$\beta_0 \equiv \frac{\alpha_0}{1 - \alpha_0} = \frac{\gamma \alpha_T}{1 - \gamma \alpha_T} \cong \frac{\alpha_T}{1 - \alpha_T} = \frac{2L_p^2}{W^2} \cdot \text{(Itt } \alpha_T \text{ a bázis transzportfaktor)}$$

$\beta_0 \sim W^{-2}$ (ha V_{EC} nő, W csökken (kiürülés) $\Rightarrow \beta_0$ növekszik)

Földelt bázisú és földelt emitteres kapcsolás összehasonlítása



Szivárgási áram:

$$I_{CE0} \cong \beta \cdot I_{CBO}$$

Letörési feszültség:

$$BV_{CE0} \cong BV_{CBO} (\beta_0)^{1/\eta}$$

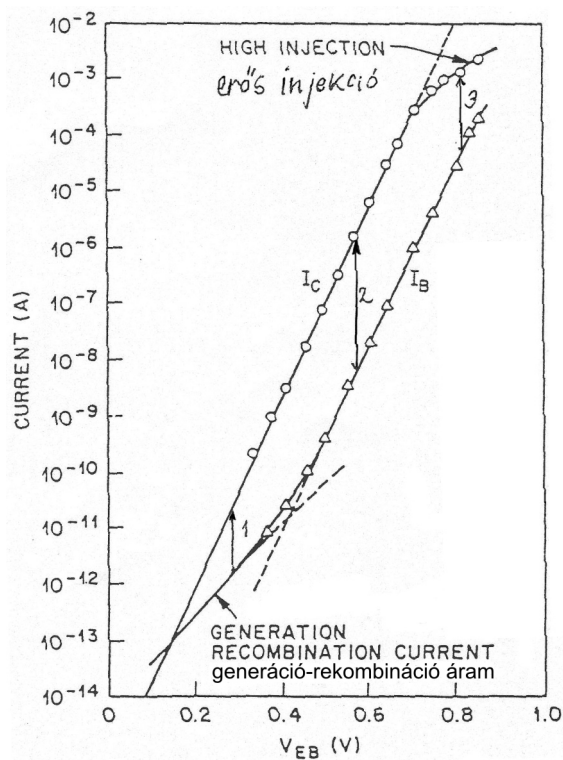
Si esetén $\eta = 2 \dots 6$.



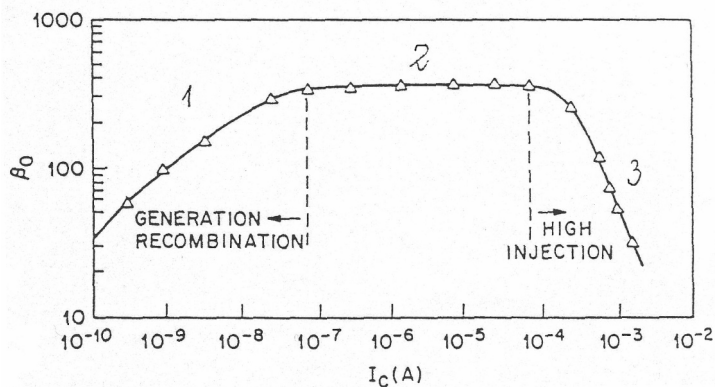
$$BV_{CE0} \ll BV_{CBO}$$

Szivárgási áram: generációs áram a kiürített rétegben (záró előfeszítés)

$$I_{CE0} \cong \beta_0 \cdot I_{CBO}$$



Kollektor-, illetve bázisáram függése az emitter-bázis feszültségtől



Közös-emitteres áramerősítés

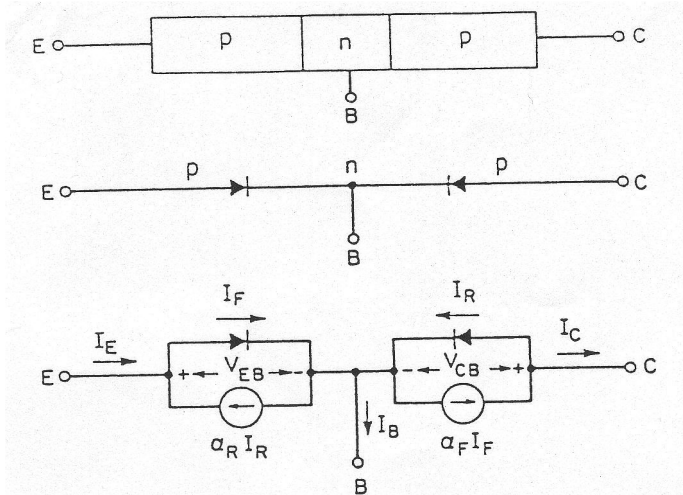
Nyitó irányú előfeszítés (V_{EB})



rekombinációs áram

1. generáció-rekombináció a kiürített rétegben
2. Plató: bázis diffúziós áram dominál $\Rightarrow \beta_0 = const$
3. Csökkenő: γ (emitter injekció hatásfok) β_0 csökken

Ebers-Moll modell



$p - n - p$ tranzisztor

két szembekapcsolt $p - n$ átmenet

Ebers-Moll modell áramkör diagramja

$$I_F = I_{FC} \left(e^{qV_{EB}/kT} - 1 \right) \quad \text{nyitó} \quad I_E = I_F - \alpha_R I_R$$

$$I_R = I_{RC} \left(e^{qV_{CB}/kT} - 1 \right) \quad \text{záró} \quad I_C = \alpha_F I_F - I_R$$

Ebers-Moll modell

Összefüggés a terminál feszültségek és áramok között

$$I_B = I_E - I_C = (1 - \alpha_F) I_F + (1 - \alpha_R) I_R$$

$$I_E = I_{F0} \left(e^{qV_{EB}/kT} - 1 \right) - \alpha_R I_{R0} \left(e^{qV_{CB}/kT} - 1 \right)$$

$$I_C = \alpha_F I_{F0} \left(e^{qV_{EB}/kT} - 1 \right) - I_{R0} \left(e^{qV_{CB}/kT} - 1 \right)$$

$$I_{F0} = a_{11}$$

$$\alpha_R I_{R0} = a_{12}$$

$$\alpha_F I_{F0} = a_{21}$$

$$I_{R0} = a_{22}$$

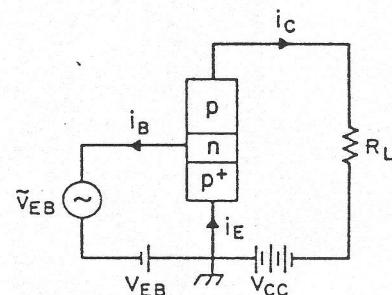
ideális tranzisztor esetén:

$$a_{12} = a_{21}$$

$$\alpha_R I_{R0} = \alpha_F I_{F0}$$

Az alap Ebers-Moll modell három független paramétert igényel:

$$\alpha_R, \alpha_F, I_{R0}$$

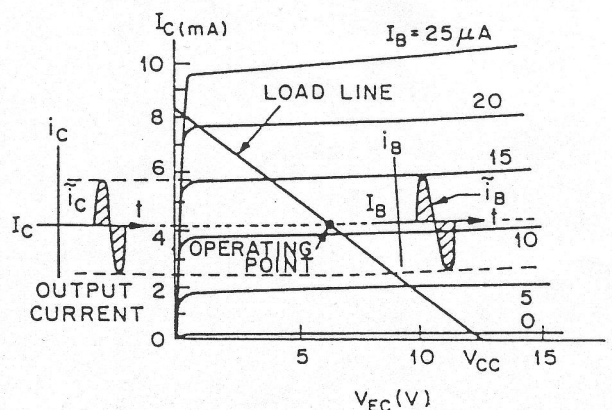


Nagyfrekvenciás viselkedés

Földelt emitteres kapcsolás R_L – terhelő ellenállás

Kisjelű működés

$$\tilde{i}_C = f(\tilde{i}_B) \quad \text{a munkapontban}$$



A kisjelű vezérlés hatásmechanizmusa

Közös emitteres kapcsolás

$\tilde{v}_{EB} \rightarrow$ a bázisba injektált lyukak (kisebbségi töltéshordozók) száma nő.

$$i_E = I_E + \tilde{v}_E \dots stb.$$

Transzkonduktancia:

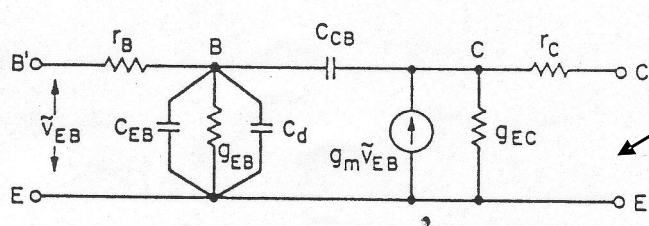
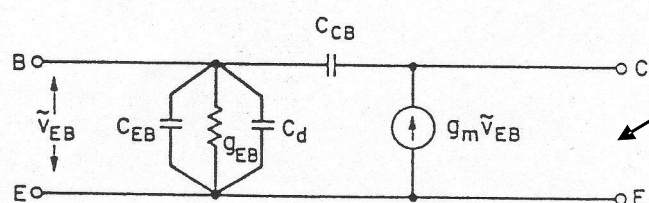
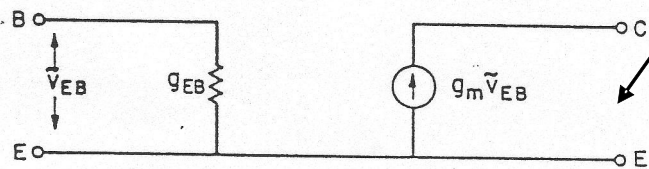
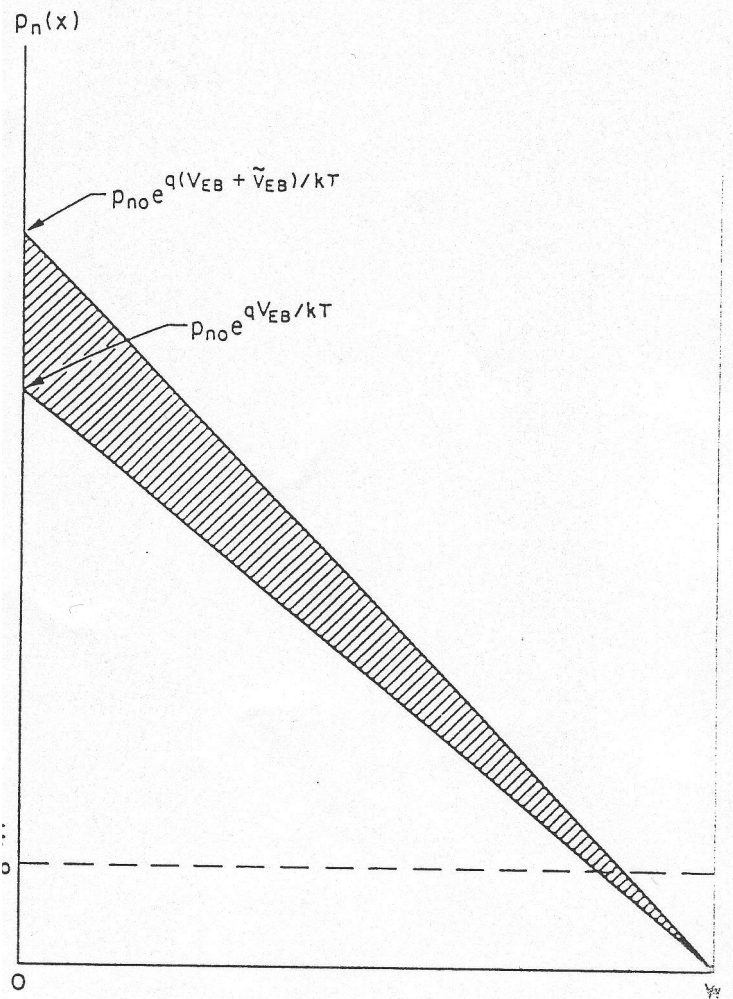
$$g_m \equiv \left. \frac{\partial i_B}{\partial V_{EB}} \right|_{V_{EC}} = \alpha_F \frac{q I_E}{kT}$$

Bemeneti konduktancia:

$$g_{EB} \equiv \left. \frac{\partial i_B}{\partial V_{EB}} \right|_{V_{EC}} = \frac{q(1-\alpha_F)}{kT} I_E$$

Kimeneti konduktancia:

$$g_{EC} \equiv \left. \frac{\tilde{i}_C}{\tilde{v}_{EC}} \right|_{\tilde{v}_{EB}=0}$$



Alacsony frekvenciás tranzisztor helyettesítő alapkapsolás

Magas frekvenciás tranzisztor helyettesítő kapsolás

(C_{EB} kiürítési és C_d diffúziós kapacitások (az E-B nyitó irányban van előfeszítve), illetve C_{CB} kiürítési kapacitás (a C-B záró irányban van előfeszítve) figyelembevételével)

Magas frekvenciás tranzisztor helyettesítő alapkapsolás ellenállás és konduktanciatagokkal

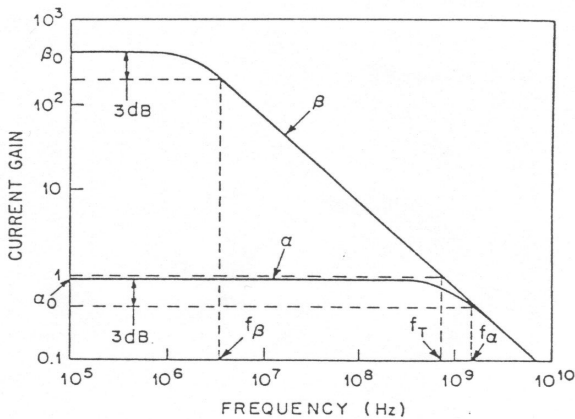
Az r_B és az r_C figyelembe veszi a bázis, illetve kollektor ellenállását; a g_{EC} kimeneti konduktancia - a bázisvastagság modulációt
Kiürítési kapacitás \equiv átmeneti kapacitás

Levágási frekvencia

Földelt bázisú áramerősítés:

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + j(f/f_x)}$$

f_α (a földelt bázisú levágási frekvencia) az a frekvencia f , ahol $\alpha = 0,707 \cdot \alpha_0$, azaz 3 dB áramerősítés csökkenés lép fel.



Földelt emitteres áramerősítés és levágási frekvencia:

$$\beta = \frac{\beta_0}{1 + j(f/f_\beta)}$$

$$f_\beta = (1 - \alpha_0) f_x$$

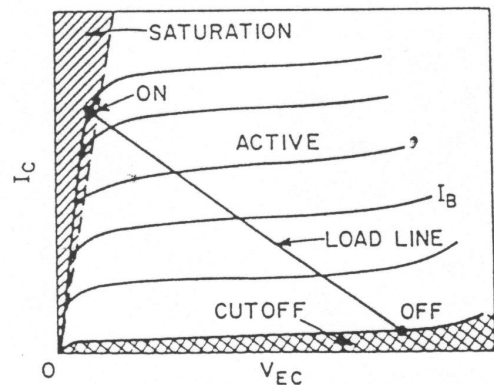
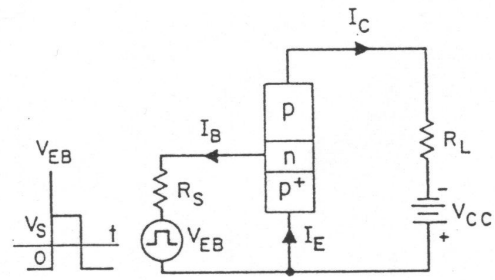
Levágási (ált.) frekvencia f_T :
az a frekvencia, ahol $\beta \rightarrow 1$ lesz!

$f_T \cong \alpha_0 f_\alpha$ a tranzisztor válaszidejét a kisebbségi töltéshordozó átfutási ideje (τ_B) a bázisban szabja meg

$f_T \rightarrow \max$

$$\tau_B = \frac{W^2}{2D_p} \rightarrow \min$$

Kapcsolási tranziensek



Kapcsolóüzemű működés (R_L)
(földelt emitteres kapcsolás)

Impedanciaviszonyok:

Bekapcsolásnál: (ideális: $R_{on} \rightarrow 0$)

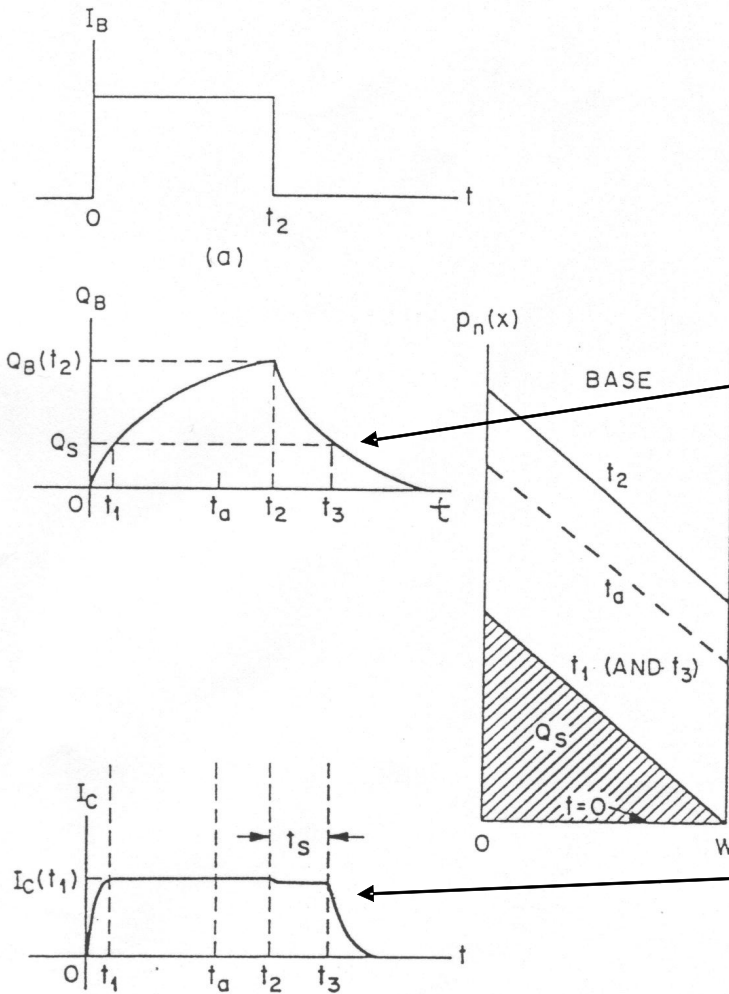
$$R_{on} = \frac{V_{EC} (on)}{I_c} = \frac{V_{EB} - V_{CB}}{I_c}$$

$$= \frac{kT}{qI_c} \left\{ \frac{I_{co} \left[1 + (1 - \alpha_R) \frac{I_c}{I_B} \right]}{I_{EC} \left[(1 - \alpha_F) \frac{I_C}{I_B} - \alpha_F \right]} \right\}$$

Kikapcsolásnál: (ideális $R_{off} \rightarrow \infty$)

$$R_{off} = \frac{V_c}{I_{c(off)}} = \frac{V_c (1 - \alpha_F \alpha_R)}{I_{co} - \alpha_F I_{EC}}$$

Kapcsolási idő



Bemenő bázisáram impulzus (referencia jelalak)

A bázisban tárolt töltés időbeni alakulása

A kisebbségi töltéshordozó koncentráció-eloszlás a megfelelő időpontokban

A kimeneti kollektoráram időbeni változása
→ **jelalak torzulás!!**

Bekapcsolás

$i_C(\tau_p)$ – telítési áram

$Q_B > Q_S$ – telítéses működés \Rightarrow

$$I_E, I_C \approx const$$

t_1 – bekapcsolási tranziens ideje

Csökkenthető:

– rövid kisebbségi töltéshordozó élettartam

$$\tau_p \rightarrow \max$$

– kis töltéstárolás a bázisban

$$Q_S \rightarrow \min$$

- nagy vezérlő áram

$$I_B \rightarrow \max$$

Kikapcsolás: $t = t_2 \rightarrow i_B = 0$

t_2 – kikapcsolási tranziens ideje

I_C - telítésben marad, míg a tárolt töltés $Q_B \geq Q_S \rightarrow$ kilépés a telítésből aktív módba.

t_S – tárolási idő késleltetés

Csökkenthető:

- mennél kevésbé kerül az eszköz telítésbe

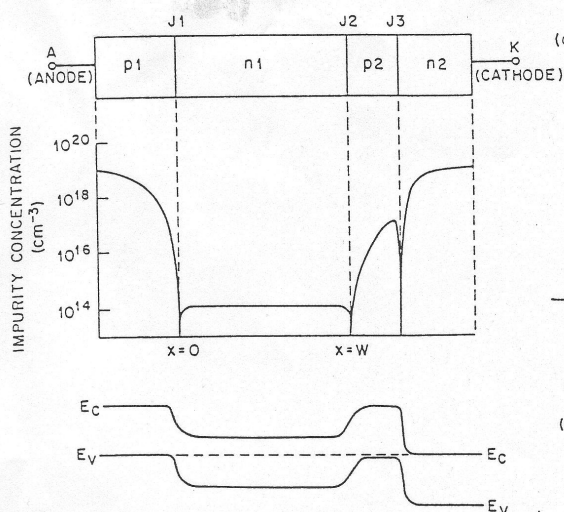
- mennél gyorsabb a kisebbségi töltéshordozó rekombináció \Rightarrow

τ_p csökkenthető **Au**

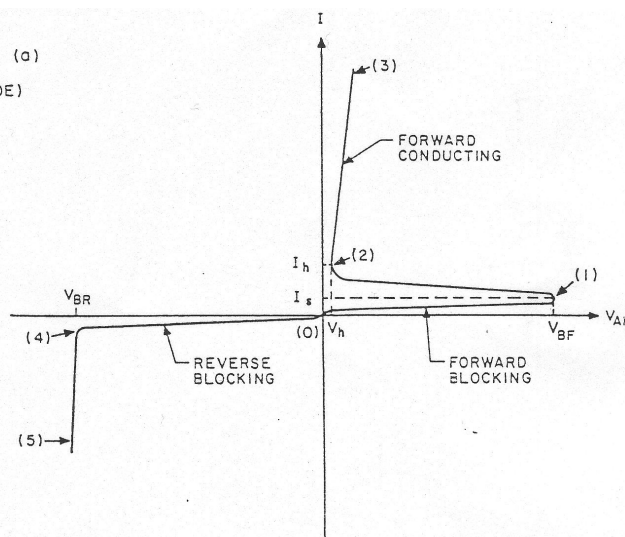
rekombinációs centrumok bevitelével (mély nívók)

Tirisztor

Bipoláris (lyuk-elektron) kapcsoló üzemű kétpólusú nagyteljesítményű eszköz
 ($I = 1 \text{ mA} - 5 \text{ kA} \Rightarrow V \geq 10 \text{ kV}$)



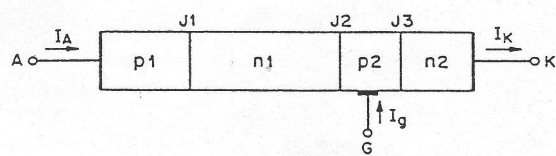
Négyrétegű $p-n-p-n$ dióda adalékprofilja és sávdigramja



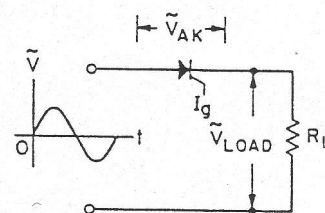
A tirisztor áram-feszültség jelleggörbéi működési módjai

(1) és (2) között „negatív” ellenállás
 I_h – tartó áram, V_h tartó feszültség

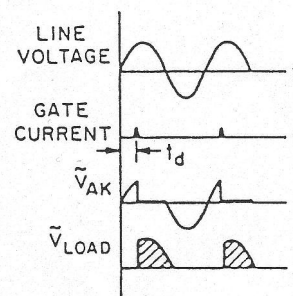
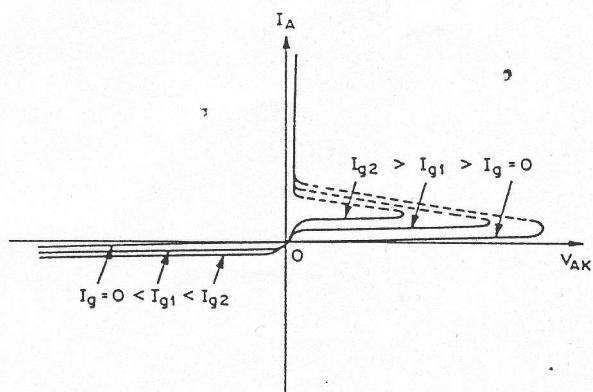
Vezérelt tirisztor (I_G)



Vezérelt kapus (**Gate**) tirisztor alkalmazása – teljesítményszabályozás



Tirisztoros alapkapsolás



Hálózati feszültség (váltó)

Kapuarám

Tirisztoron eső feszültség

Munkaellenálláson (R_L) eső feszültség (egyenirányított)