



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Elektronikus Eszközök Tanszéke

# MIKROELEKTRONIKA, VIEEAB01

## Bipoláris tranzisztor

# A bipoláris tranzisztor felépítése

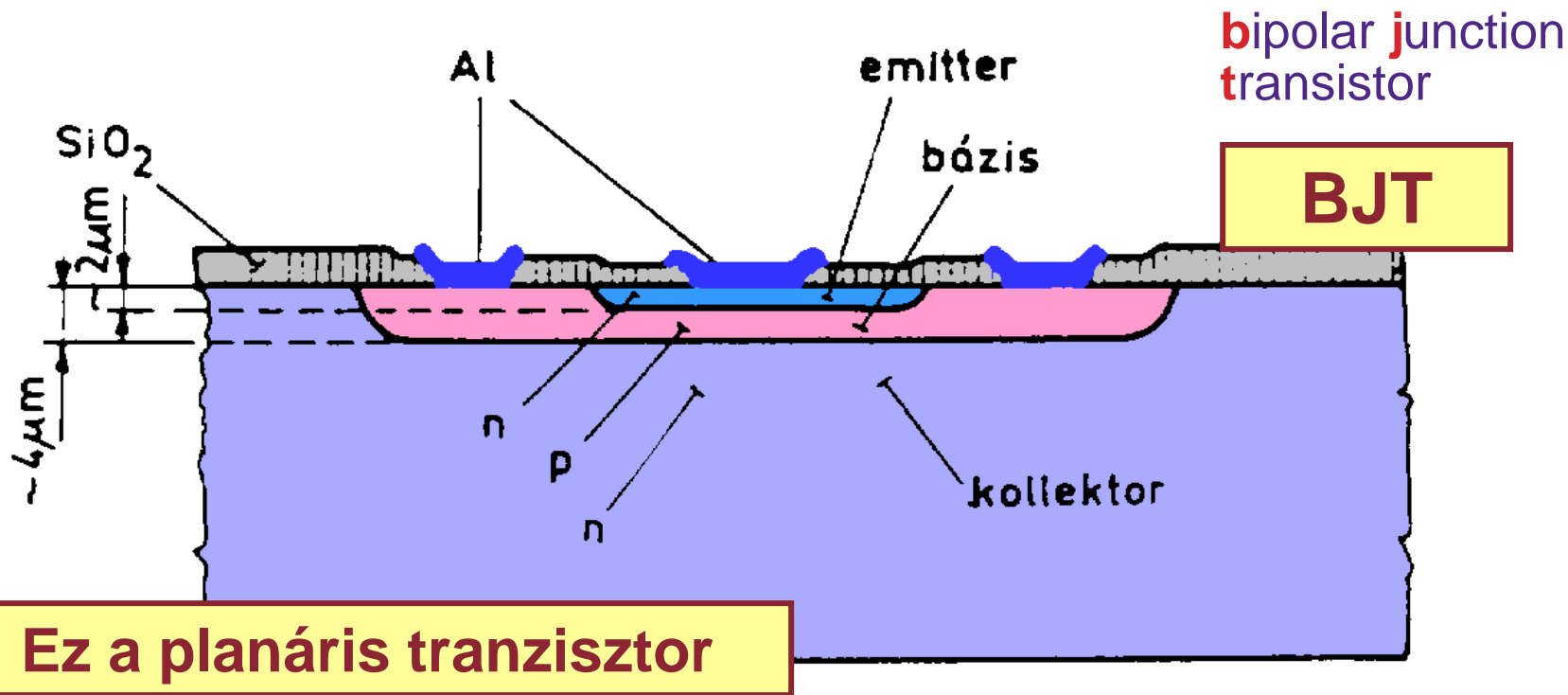
Keresztmetszeti rajz

Felülnézeti fotók

A belső tranzisztor

# A bipoláris tranzisztor felépítése

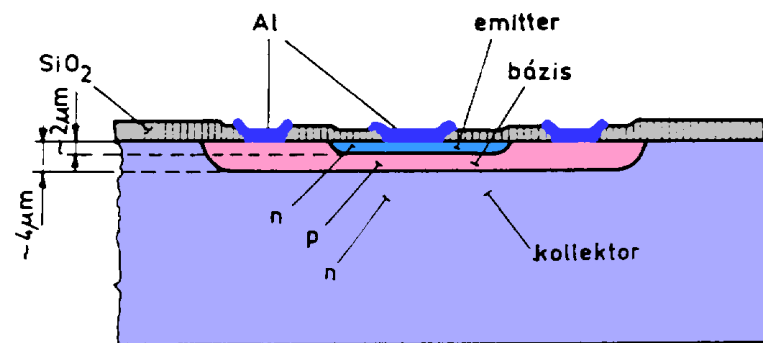
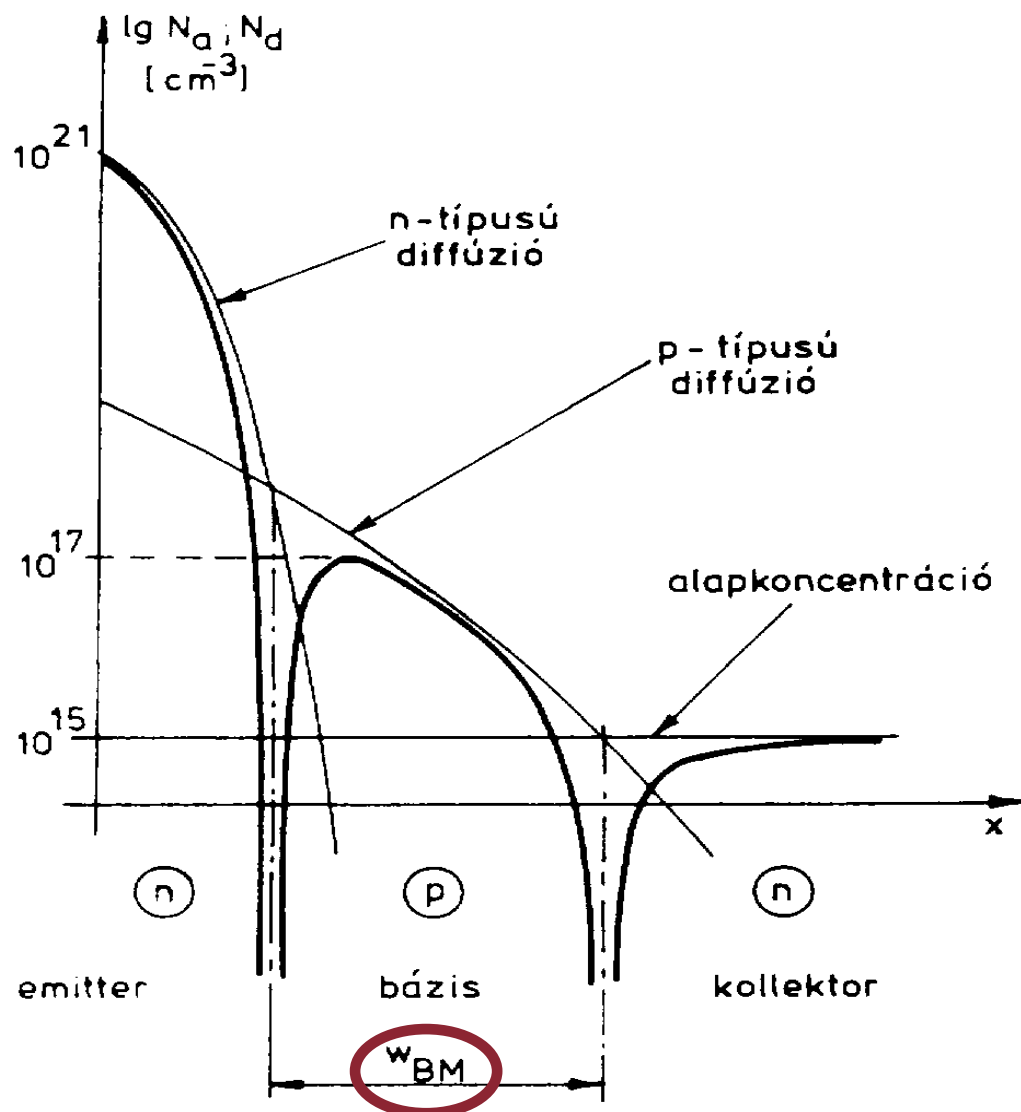
Két pn átmenet, szoros (néhány  $\mu\text{m}$ ) közelségben



Két lehetőség: **nnp** vagy **pnnp** struktúra

A működés azonos, általában csak az npn-t tárgyaljuk...

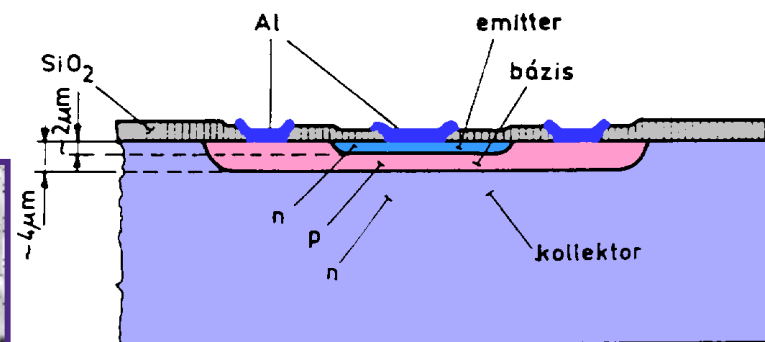
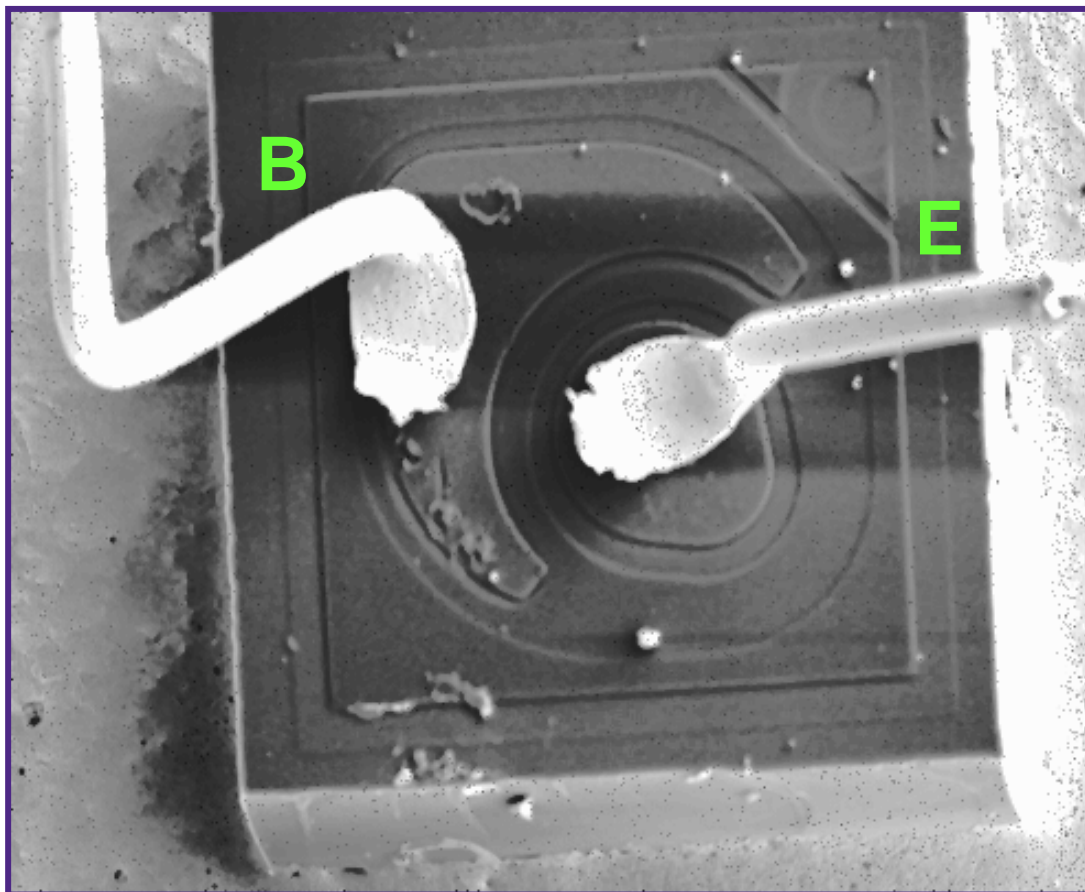
# A bipoláris tranzisztor felépítése



Elvileg szimmetrikus,  
gyakorlatilag nem az

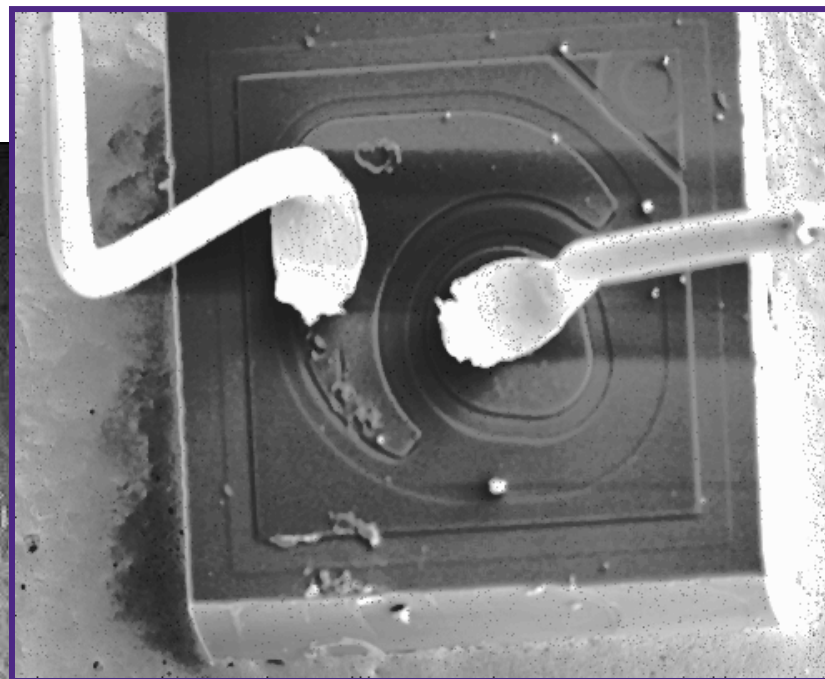
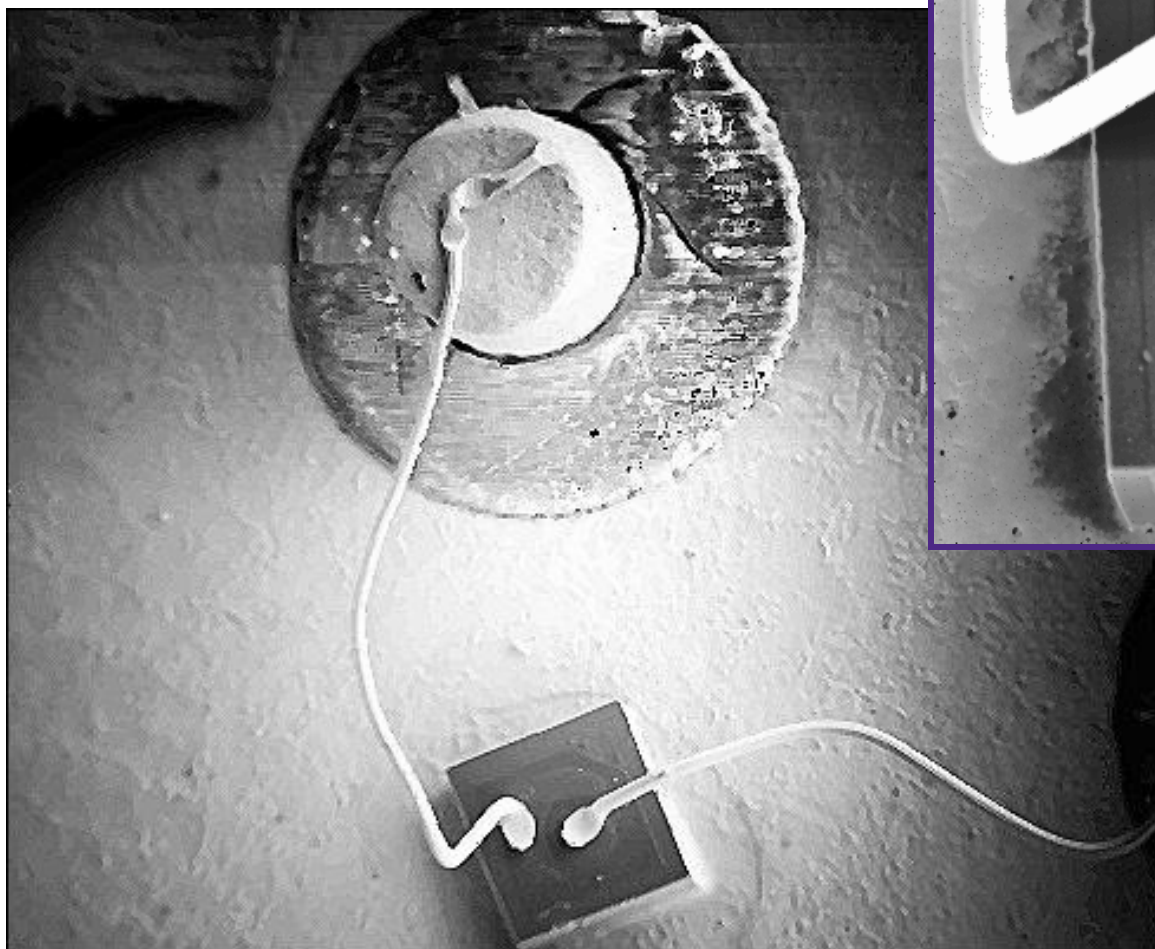
$w_{BM}$   
"metallurgiai"  
bázisvastagság

# A bipoláris tranzisztor felépítése



# A bipoláris tranzistor felépítése

## Kisteljesítményű tranzistor

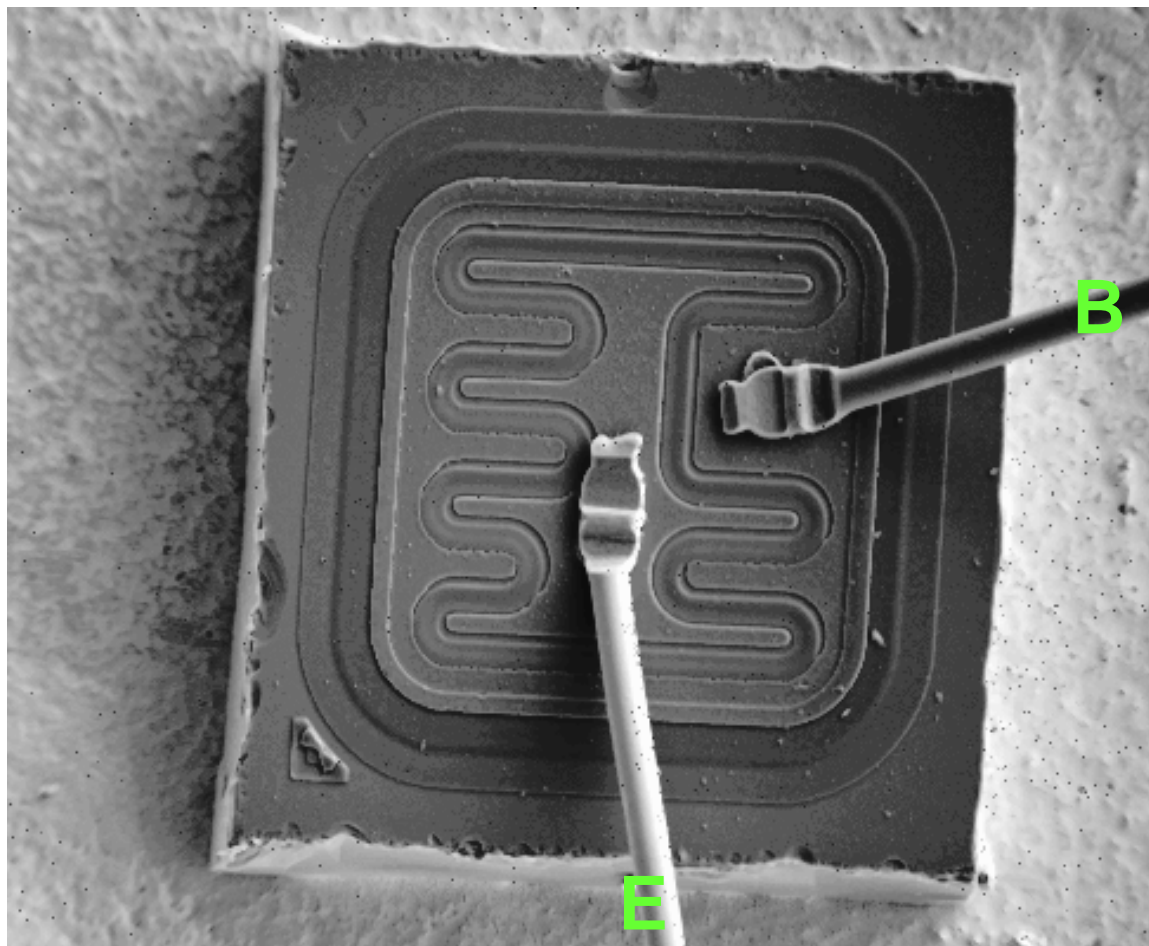


**Chip méret:**

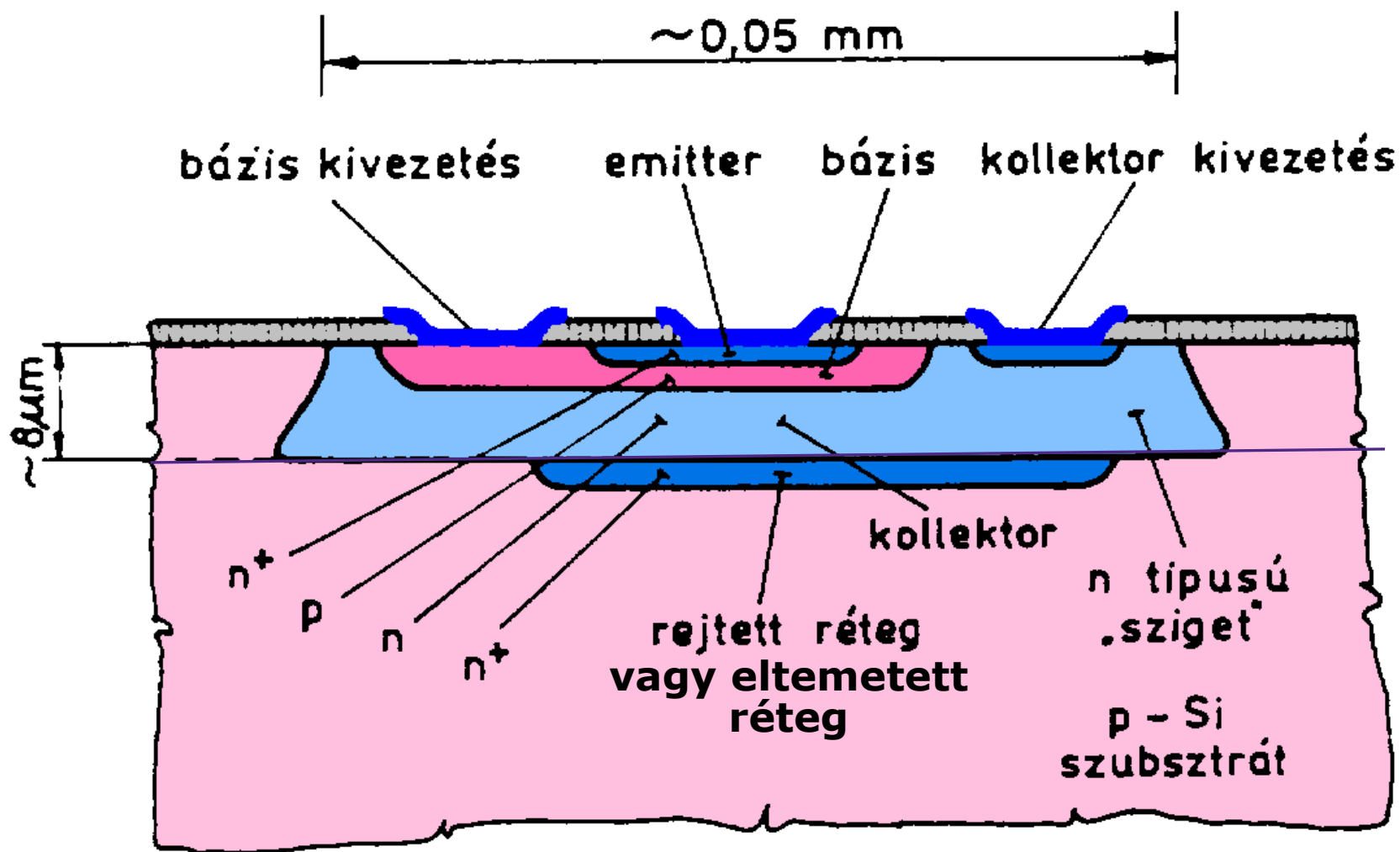
**$\sim 0,5 \times 0,5 \times 0,3$  mm**

# A bipoláris tranzisztor felépítése

## Közepes teljesítményű tranzisztor

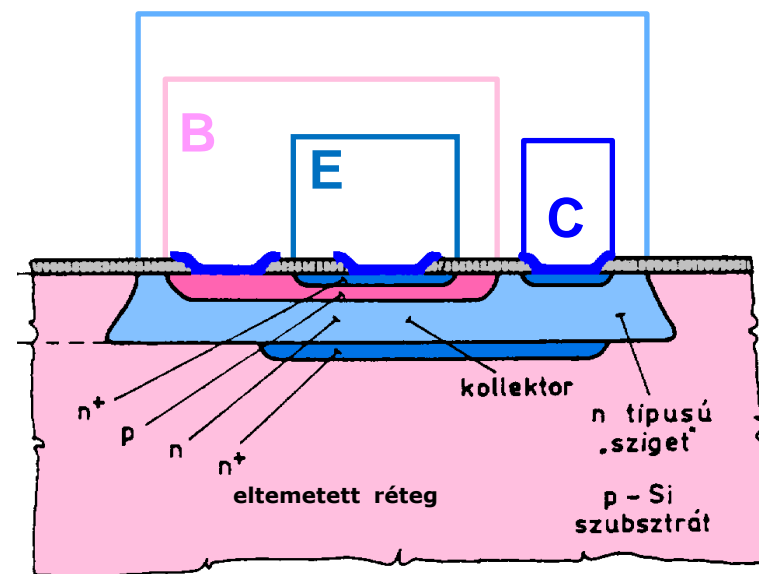
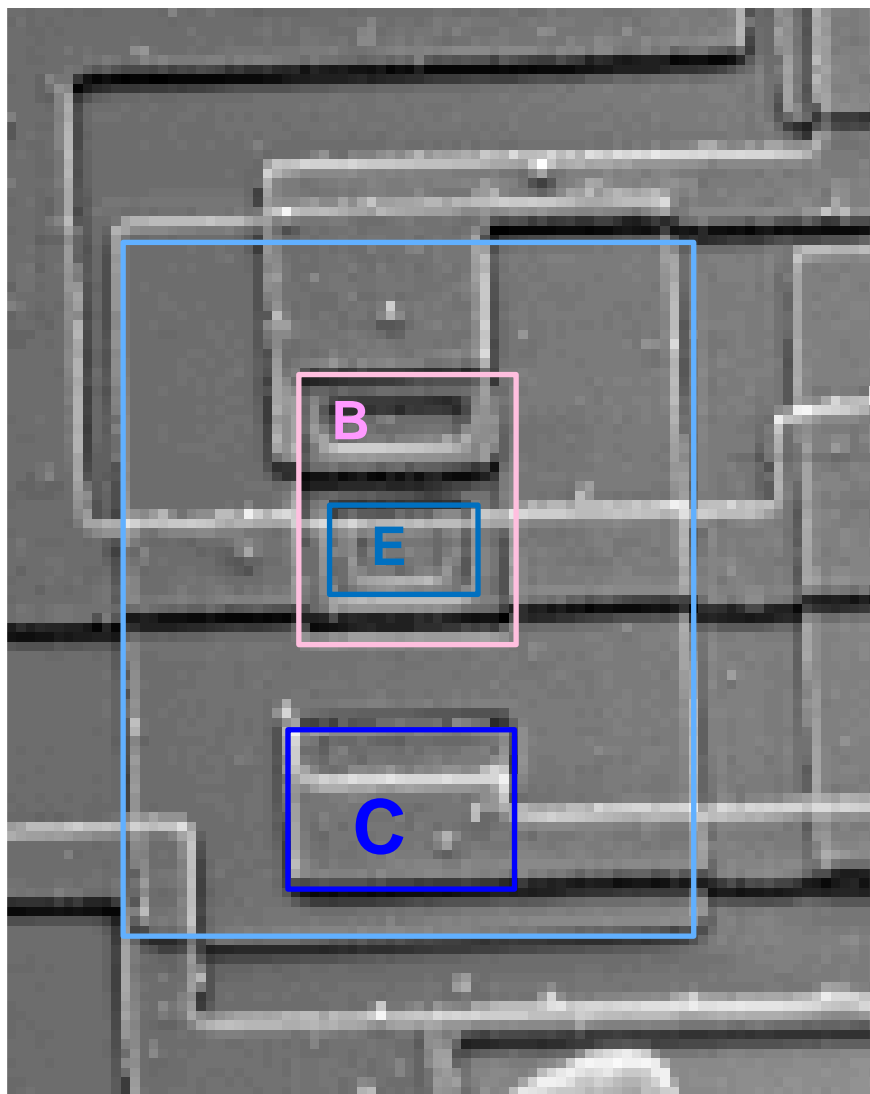


# Integrált áramköri BJT

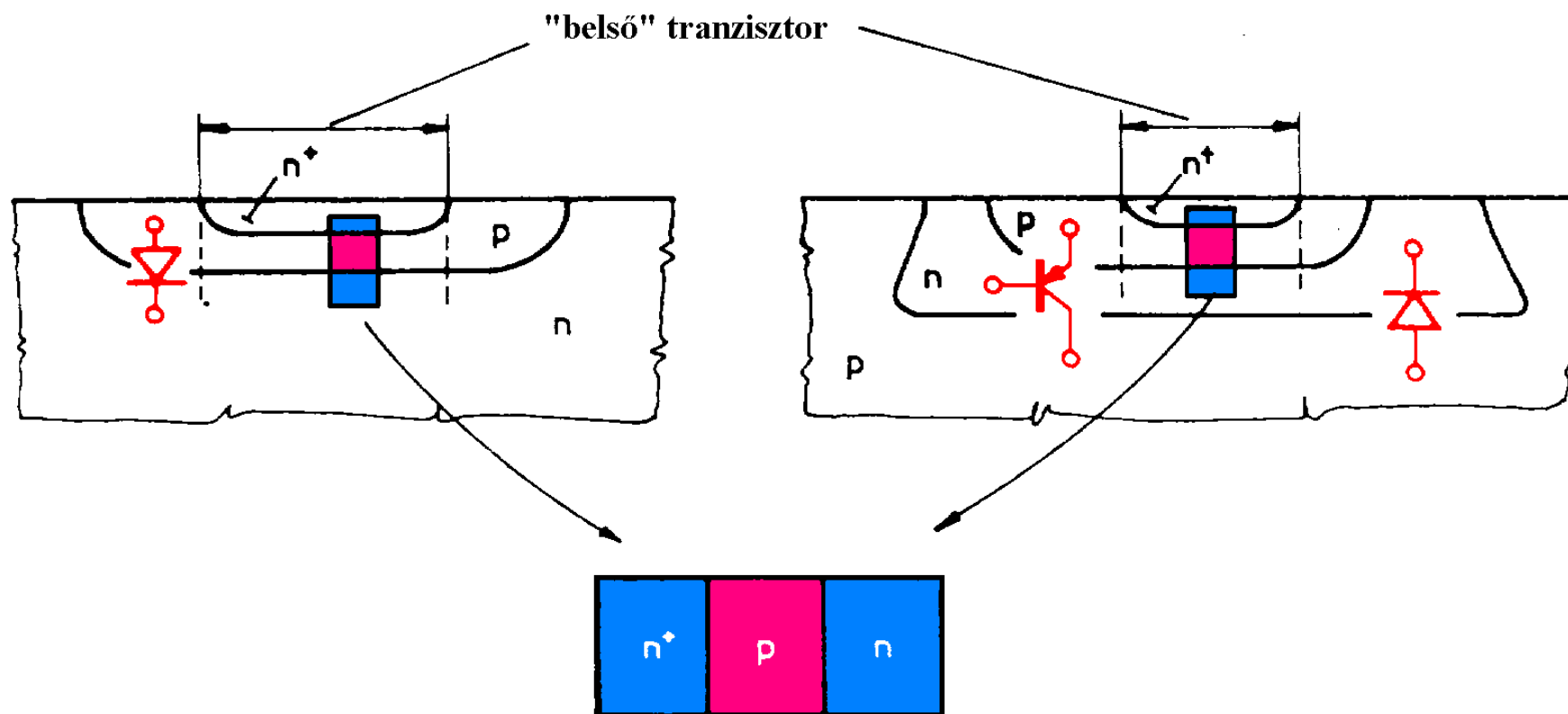




# Integrált áramköri BJT

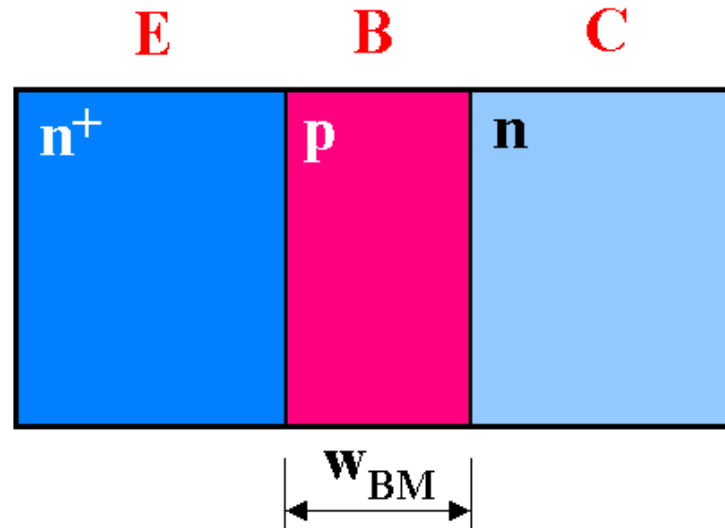


# A "belső tranzisztor" és a paraziták



**"Belső": ahol a 3 réteg (n,p,n) szemben áll egymással**

## A tranzisztor működés feltételei



1. Legalább az egyik szélső réteg (az emitter) nagyságrendekkel **erősebben adalékolt**, mint a középső.
2. A középső réteg (bázis) **sokkal vékonyabb**, mint a kisebbségi hordozók diffúziós hosszúsága.

# A bipoláris tranzisztor működése

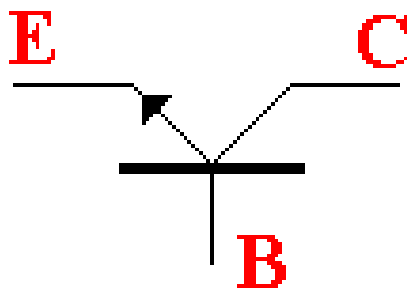
Tranzisztor hatás

A bipoláris tranzisztor áramai

Földelt bázisú kapcsolás működése

# A tranzisztor hatás

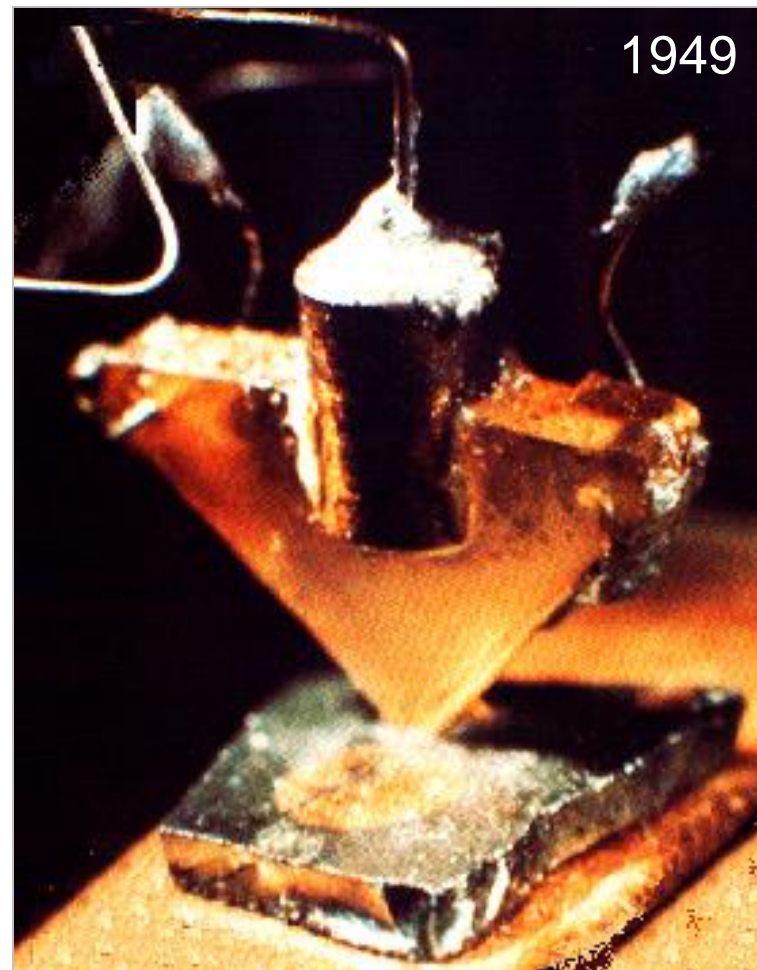
## A BJT rajzjele



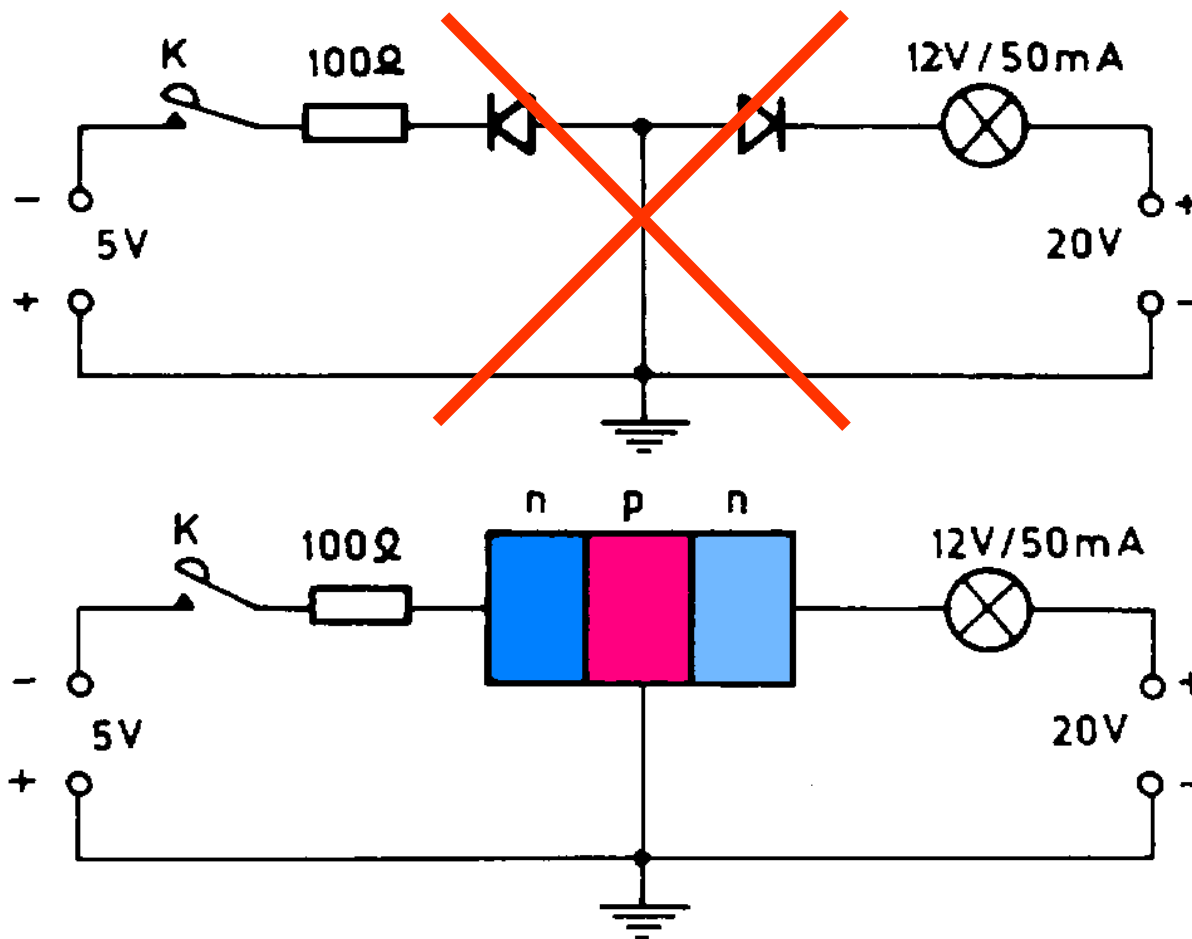
**E**mitter

**B**ázis

**K**ollektor



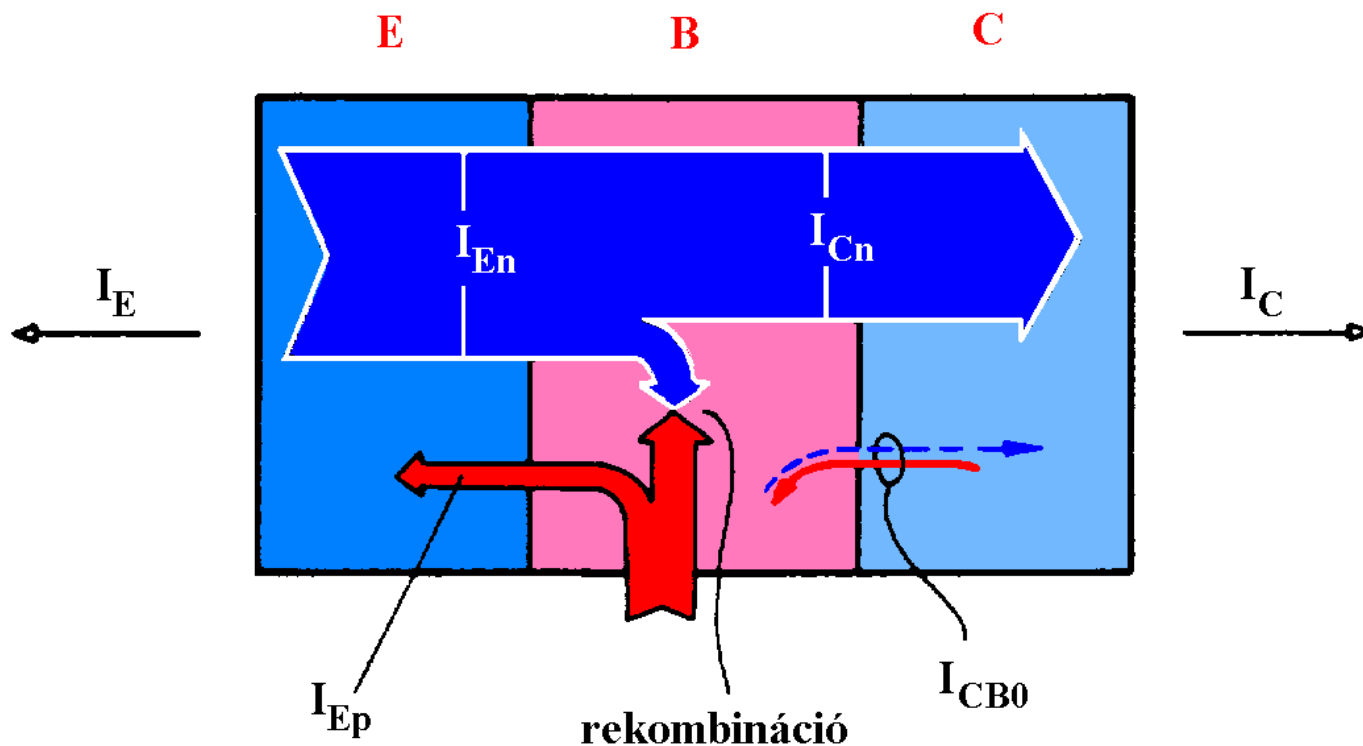
# A tranzisztor hatás



**A tranzisztor több, mint két dióda!**

# A bipoláris tranzisztor áramai

**Normál aktív beállítás:** EB átmenet nyitva, CB zárva



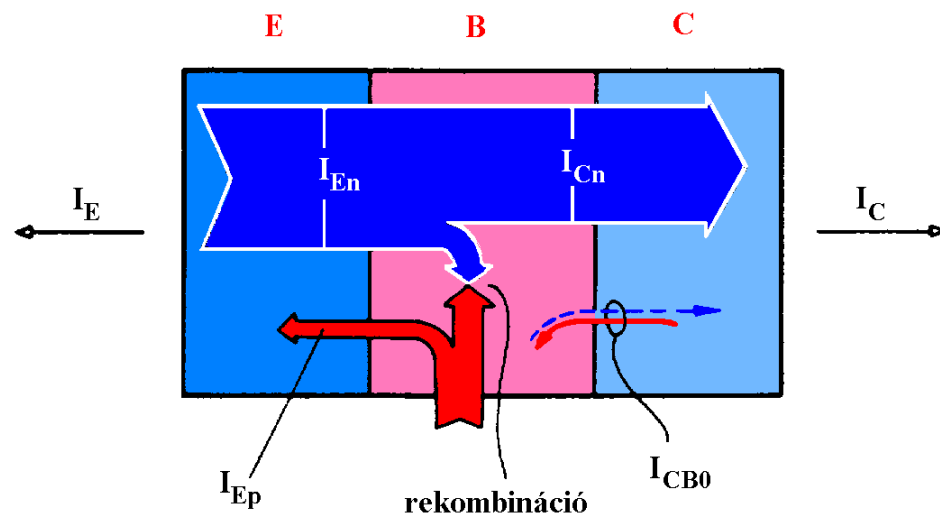
$$I_C = -A \cdot I_E - I_{CB0}$$

**A = áramerősítés**

(közös bázisú, egyenáramú, normál irányú)

# A bipoláris tranzisztor áramai

$$I_C = -A \cdot I_E - I_{CB0}$$



Injektálási hatások:

$$\eta_e = \frac{I_{En}}{I_E}$$

Transzport hatások:

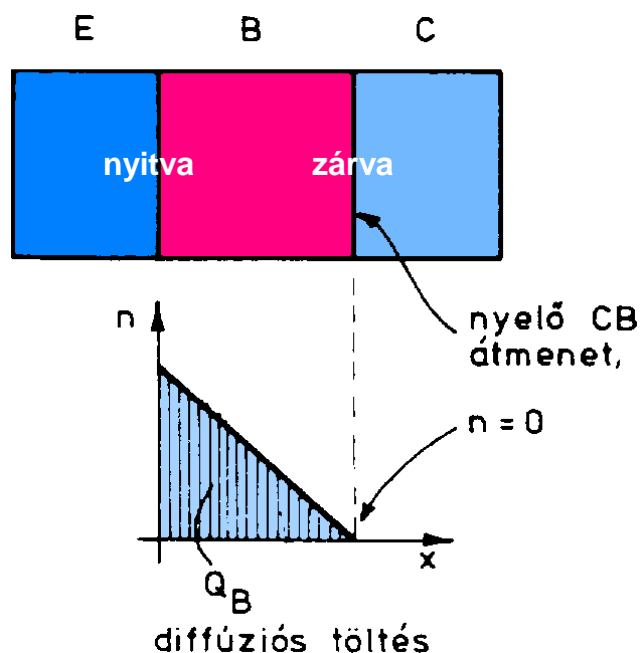
$$\eta_{tr} = \frac{I_{Cn}}{I_{En}}$$

$$A = \eta_e \cdot \eta_{tr}$$



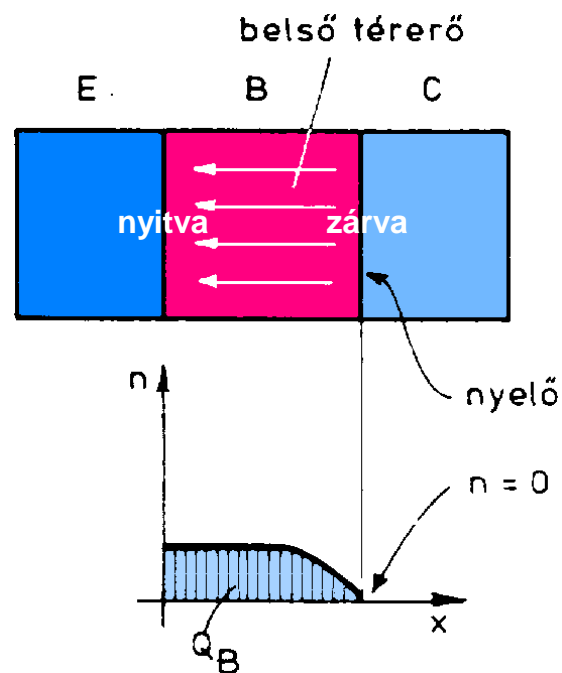
# A bipoláris tranzisztor áramai

## Töltés a bázisban. Homogén és inhomogén bázis



$Q_B$  bázistöltés:

az emitter által injektált  
kisebbségi hordozók töltése

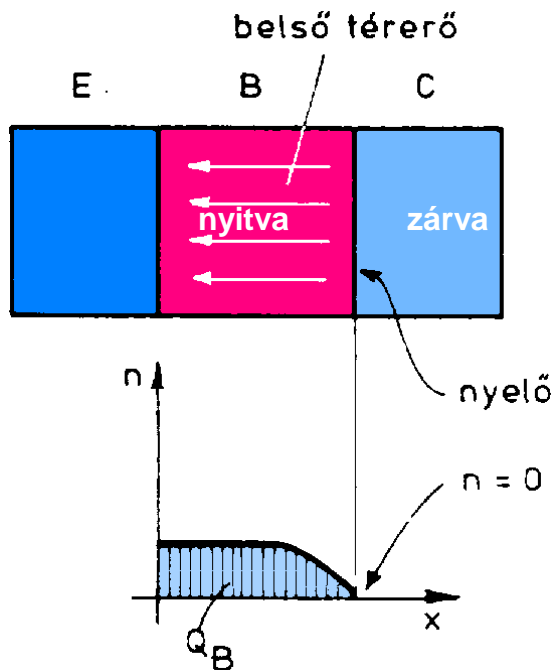


Inhomogén bázis:

“beépített” térerősség

Drift tranzisztor

# A bipoláris tranzisztor áramai



**Inhomogén bázis:**  
 “beépített” térerősség

**Drift tranzisztor**

## Előnyei:

- kisebb az azonos  $I_E$  emitteráram mellett felhalmozott  $Q_B$  bázistöltés, kisebb diffúziós kapacitás (gyorsabb működés)
- Nagyobb a tranzisztor áramerősítésére is, hiszen *kevesebb töltés, kevesebb rekombináció, így jobb a transzport hatásfok*

# Potenciál viszonyok

## Effektív bázisvastagság

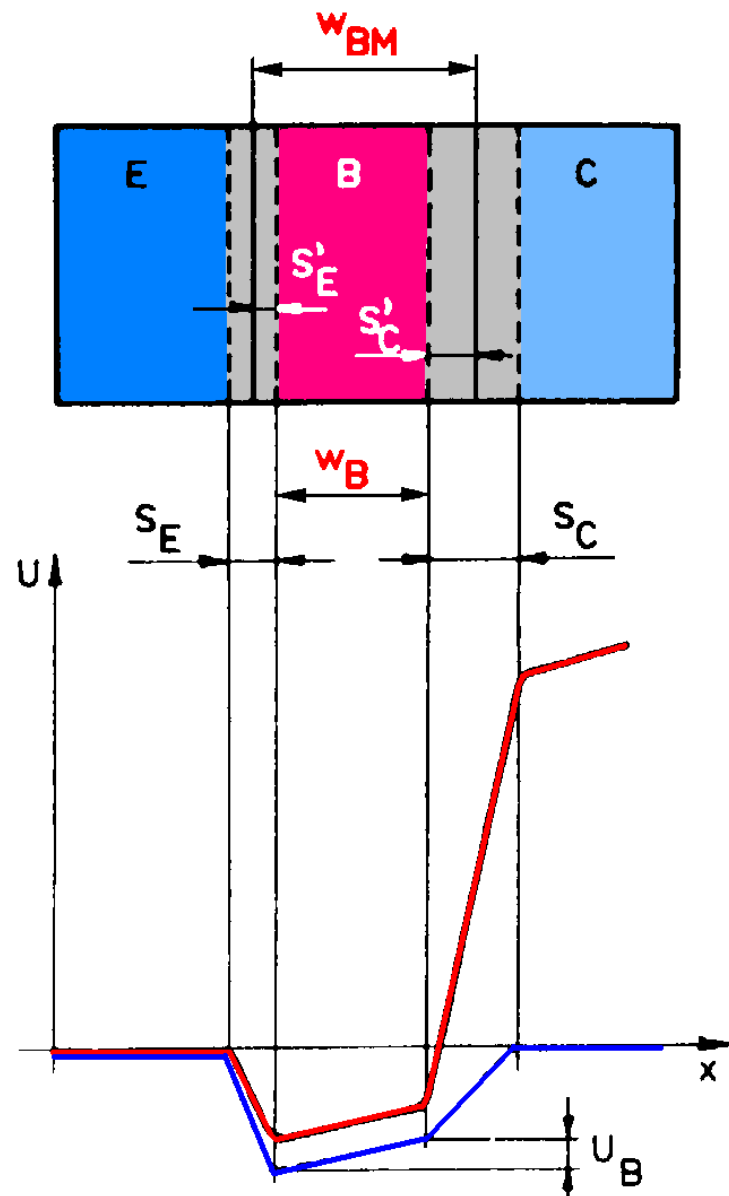
$$w_B = w_{BM} - S'_E - S'_C$$

$$S'_C \sim \sqrt{U_{Dc} - U_{BC}}$$

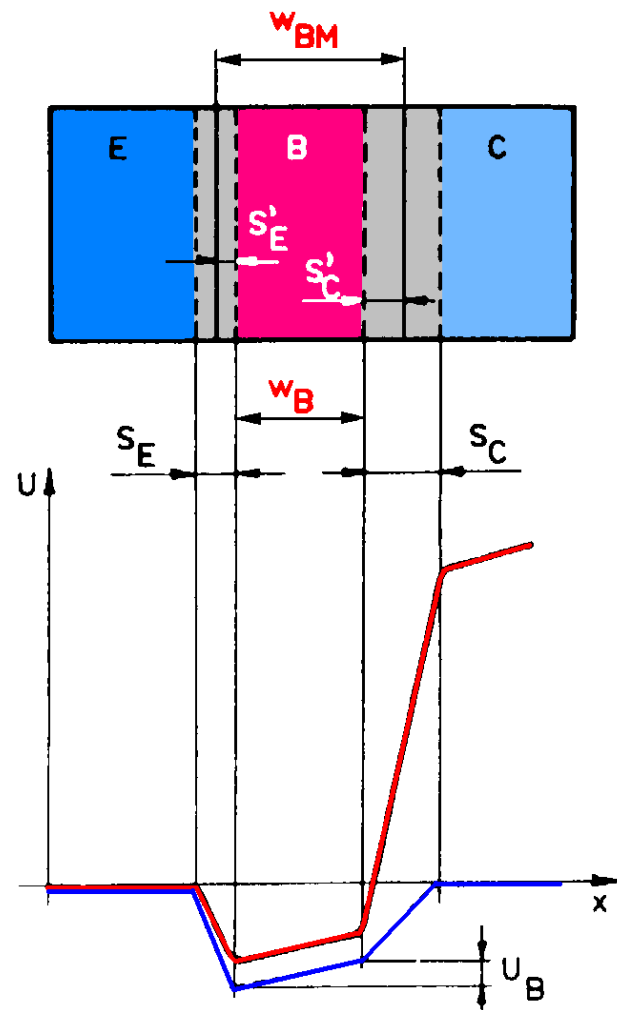
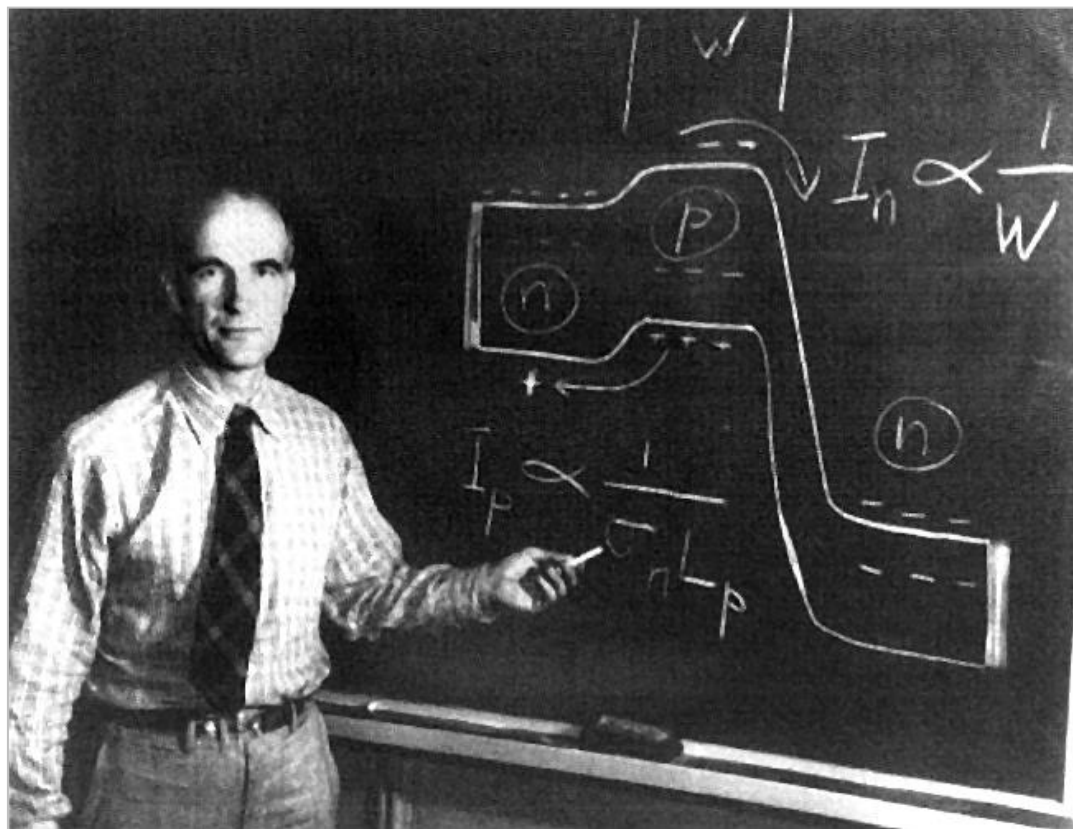
$$w_B = f(U_{CB})$$

## Bázisszélesség-moduláció

$U_B$  a bázis beépített potenciálja



# Potenciál viszonyok



# Bipoláris tranzistor megalkotói



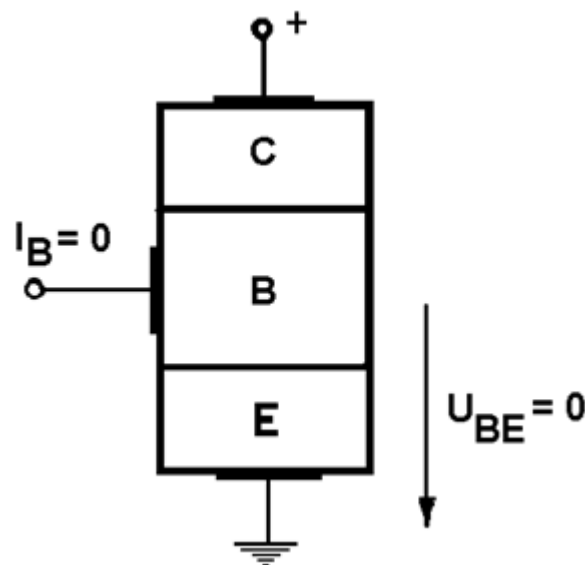
John Bardeen, William Shockley, Walter Brattain

# A bipoláris tranzisztor működése

Földelt emitteres kapcsolás működése

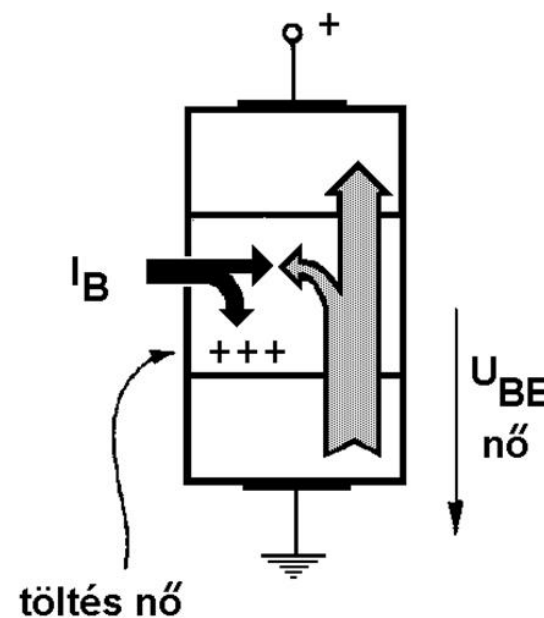
# Földelt emitteres kapcsolás működése

- Kiindulás:  $I_E$  és  $I_C$  elhanyagolhatóan kicsi,  $U_{BE}$  feszültség 0V körül van, a tranzisztor le van zárva.



# Földelt emitteres kapcsolás működése

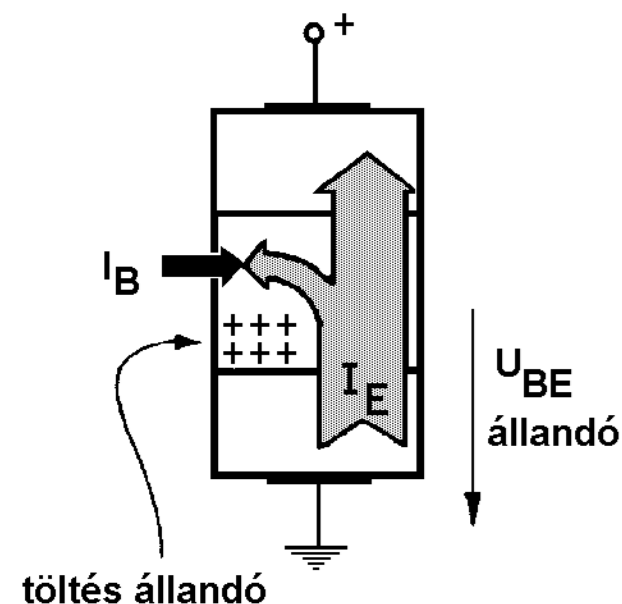
- Pozitív IB kapcsolva
- Megindul a pozitív töltésfelhalmozás a bázisban egészen addig, míg ki nem nyit EB dióda és elkezd folyni  $I_E$  (eléri  $U_D$  értékét)
- Emitteráramot alkotó elektronok egy része rekombinálódik a bázisban a beáramló lyukakkal.
- Ugyan lassabban, de tovább nő  $U_{BE}$ , folytatódik a töltésfelhalmozódás, tovább nő  $I_E$





# Földelt emitteres kapcsolás működése

- $I_E$  addig nő, míg a beáramló lyukáram és bázisban rekombinálódó elektronok száma ki nem egyenlíti egymást!
- Dinamikus egyensúly áll be.
- Ahhoz, hogy az  $I_E$  bázisban rekombinálódó része éppen kiegyenlítse a befolyó lyukáram (bázisáram) hatását, a bázisáram több százszorosát kitevő emitteráram szükséges.
- Ezért nagy a földelt emitteres kapcsolás erősítése.

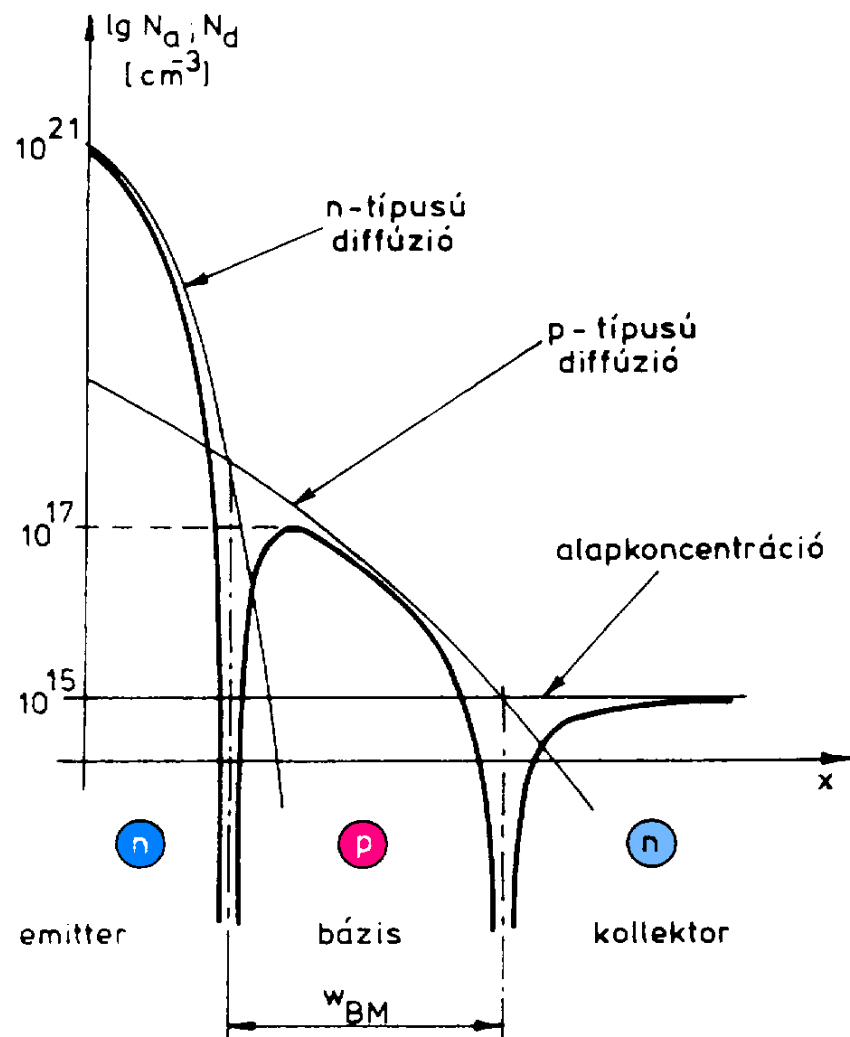


# A beépített tér, hatásfokok

Beépített tér számítása

Injektálási és transzport hatásfok

# A beépített tér számítása



A bázisban gradiense van a lyuksűrűségnek (diff. áram)

Többségi hordozók (lyukak) áramlása elhanyagolható

Kell legyen egy térerősség, amely az egyensúlyt tartó sodródási áramot kelti!

## A beépített tér számítása

$$0 = -\cancel{q}D_p \frac{dp}{dx} + \cancel{q}\mu_p p E(x) \quad / \mu_p p$$

$$E(x) = \frac{D_p}{\mu_p} \frac{1}{p} \frac{dp}{dx} = U_T \frac{1}{p} \frac{dp}{dx} \quad D = \frac{kT}{q} \mu$$

$$E(x) \cong U_T \frac{1}{N_B} \frac{dN_B}{dx} = U_T \frac{d \ln N_B(x)}{dx} \quad p(x) \cong N_B(x)$$

$$U_B = - \int_0^{w_B} E(x) dx = U_T \ln \frac{N_B(0)}{N_B(w_B)}$$

## A beépített tér számítása

$$U_B = U_T \ln \frac{N_B(0)}{N_B(w_B)}$$

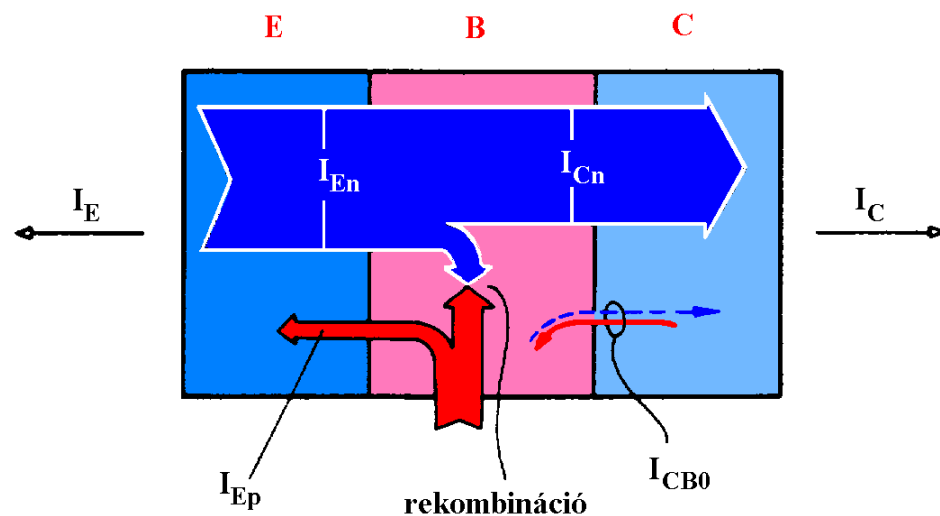
**PÉLDA**

Számítsuk ki a bázis beépített potenciálját az alábbi adatok ismeretében:

$$N_B(0) = 10^{17} \text{ /cm}^3, N_B(w_B) = 10^{15} \text{ /cm}^3$$

$$U_B = 0,026 \cdot \ln \frac{10^{17}}{10^{15}} = 0,026 \cdot \ln 100 = 0,12 \text{ V} = 120 \text{ mV}$$

# Injektálási- és transzporthatásfok



$$A = \eta_e \cdot \eta_{tr}$$

**Injektálási hatásfok:**  
vagy emitter hatásfok

$$\eta_e = \frac{I_{En}}{I_E}$$

**Transzport hatásfok:**

$$\eta_{tr} = \frac{I_{Cn}}{I_{En}}$$

## Az injektálási hatások számítása

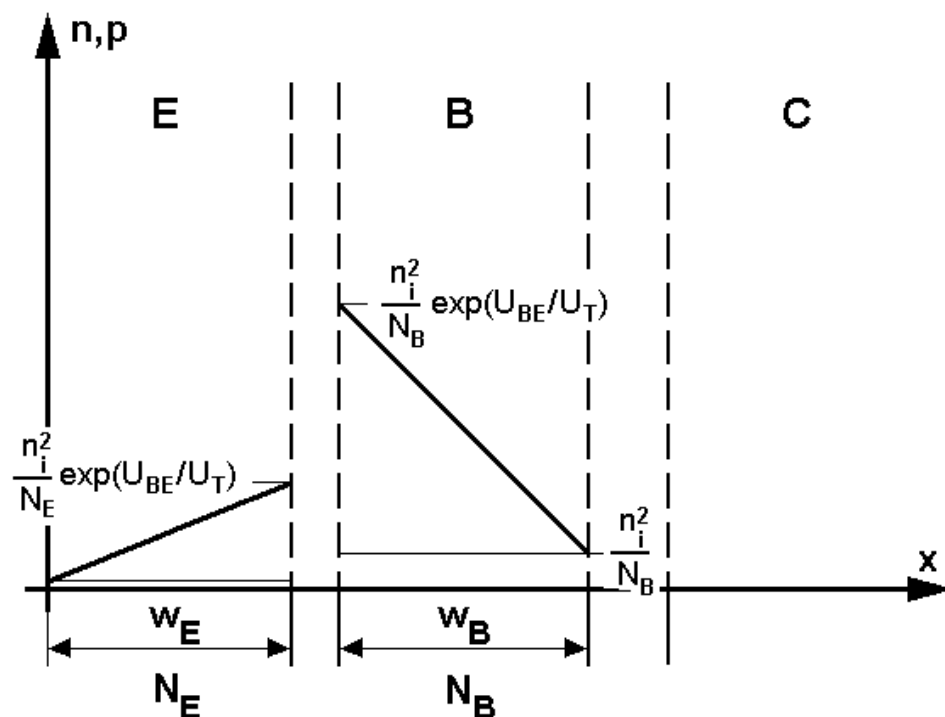
## Homogén bázisú tranzisztorral számolunk

$$n_0 = n_p \exp\left(\frac{U}{U_T}\right)$$

$$I_{En} = AqD_n \frac{dn}{dx} = AqD_n \frac{n_i^2 / N_B \exp(U_{BE} / U_T) - n_i^2 / N_B}{w_B}$$

$$I_{En} = \frac{AqD_n n_i^2}{w_B N_B} (\exp(U_{BE} / U_T) - 1)$$

$$I_{Ep} = \frac{AqD_p n_i^2}{w_E N_E} (\exp(U_{BE} / U_T) - 1)$$



## Az injektálási hatásfok számítása

$$I_{En} = \frac{AqD_n n_i^2}{w_B N_B} (\exp(U_{BE} / U_T) - 1)$$

$$I_{Ep} = \frac{AqD_p n_i^2}{w_E N_E} (\exp(U_{BE} / U_T) - 1)$$

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

$$\eta_e = \frac{I_{En}}{I_E}$$

$$\eta_e = \frac{I_{En}}{I_E} = \frac{I_{En} + I_{Ep} - I_{Ep}}{I_{En} + I_{Ep}} = 1 - \frac{I_{Ep}}{I_{En} + I_{Ep}} \cong 1 - \frac{I_{Ep}}{I_{En}}$$

$$\eta_e = \frac{I_{En}}{I_E} = \frac{I_E - I_{Ep}}{I_E} \cong 1 - \frac{I_{Ep}}{I_{En}} = 1 - \frac{D_p}{D_n} \frac{w_B N_B}{w_E N_E}$$



# Az injektálási hatások számítása

$$I_{En} = \frac{AqD_n n_i^2}{w_B N_B} (\exp(U_{BE} / U_T) - 1)$$

$$I_{Ep} = \frac{AqD_p n_i^2}{w_E N_E} (\exp(U_{BE} / U_T) - 1)$$

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

$$\eta_e = \frac{I_{En}}{I_E}$$

$$\eta_e = \frac{I_{En}}{I_E} = \frac{I_E - I_{Ep}}{I_E} \cong 1 - \frac{I_{Ep}}{I_{En}} = 1 - \frac{D_p}{D_n} \frac{w_B N_B}{w_E N_E}$$

**Inhomogén adalékolásnál:**

**Gummel szám**

$$\eta_e = 1 - \frac{D_p \int_0^{w_B} N_B dx}{D_n \int_0^{w_E} N_E dx}$$

# A transzportthatásfok számítása

Homogén bázisú tranzisztorral számolunk

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$$

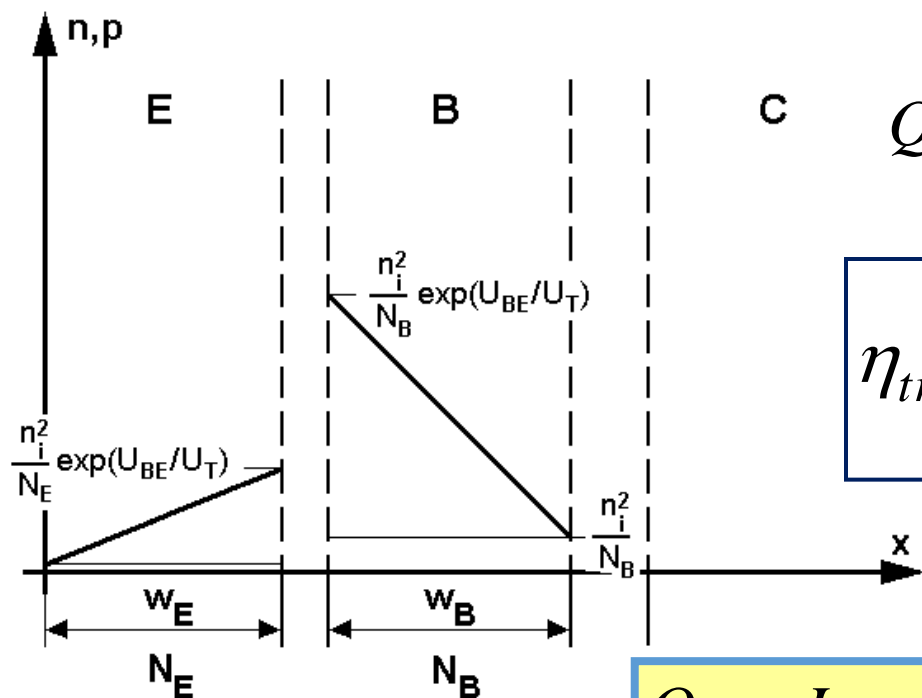
$$I_{En} = \frac{AqD_n n_i^2}{w_B N_B} (\exp(U_{BE} / U_T) - 1)$$

$$Q_B = \frac{1}{2} \frac{n_i^2}{N_B} (\exp(U_{BE} / U_T) - 1) w_B Aq$$

$$\eta_{tr} = \frac{I_{Cn}}{I_{En}} = \frac{I_{En} - I_r}{I_{En}} = 1 - \frac{Q_B / \tau_n}{I_{En}}$$

$$\eta_{tr} = 1 - \frac{1}{2} \frac{w_B^2}{D_n \tau_n} = 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{w_B}{L_n} \right)^2$$

$$Q_D = I \tau_{n(p)}$$



# Emitter- és transzporthatásfok

## PÉLDA

Számítsuk ki az alábbi adatokkal rendelkező, homogén bázisú tranzisztor emitter- és transzport hatásfokát, valamint áramerősítését!

$$\begin{aligned} N_E &= 10^{19} / \text{cm}^3, & w_E &= 2 \text{ } \mu\text{m}, \\ N_B &= 4 \cdot 10^{16} / \text{cm}^3, & w_B &= 1,5 \text{ } \mu\text{m}, \\ D_n &= 0,0026 \text{ m}^2/\text{s}, & D_p &= 0,0011 \text{ m}^2/\text{s}, & \tau_n &= 10^{-6} \text{ s}. \end{aligned}$$

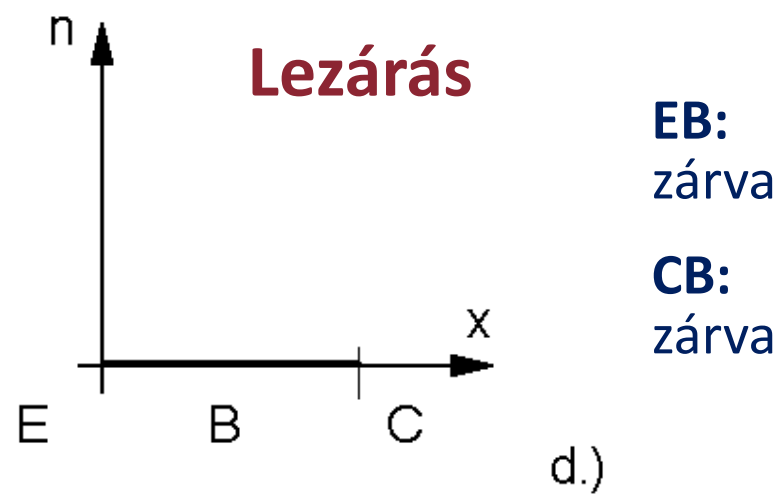
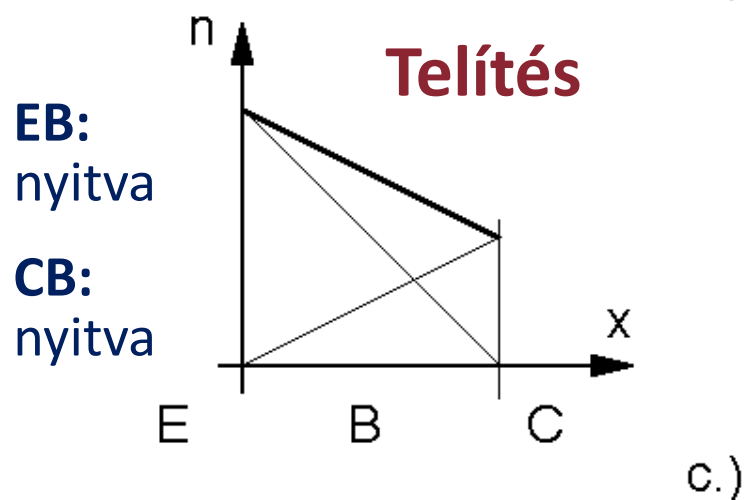
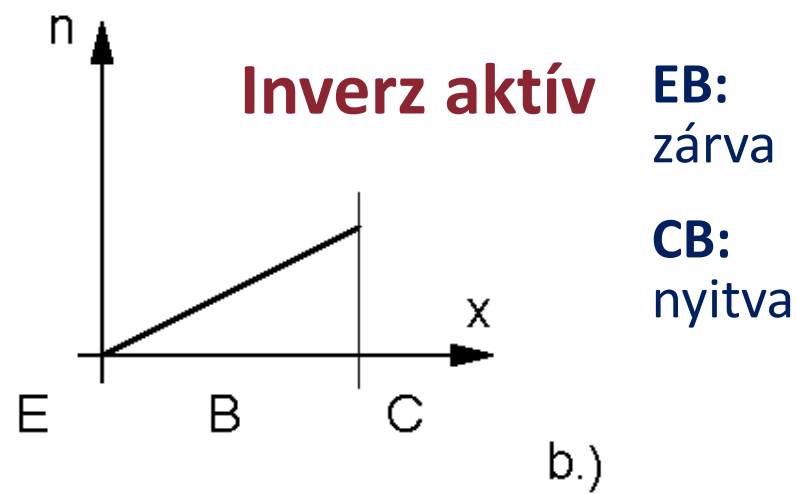
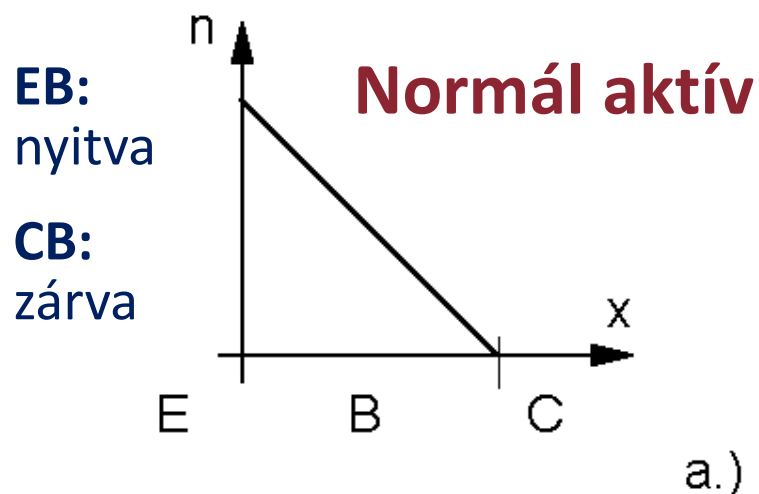
$$A = \eta_e \eta_{tr} = 0,9982$$

$$\eta_e = 1 - \frac{D_p}{D_n} \frac{w_B N_B}{w_E N_E} = 1 - \frac{0,0011}{0,0026} \frac{1,5}{2} \frac{4 \cdot 10^{16}}{10^{19}} = 0,9987$$

$$\eta_{tr} = 1 - \frac{1}{2} \frac{w_B^2}{D_n \tau_n} = 1 - \frac{1}{2} \frac{(1,5 \cdot 10^{-6})^2}{0,0026 \cdot 10^{-6}} = 0,99957$$

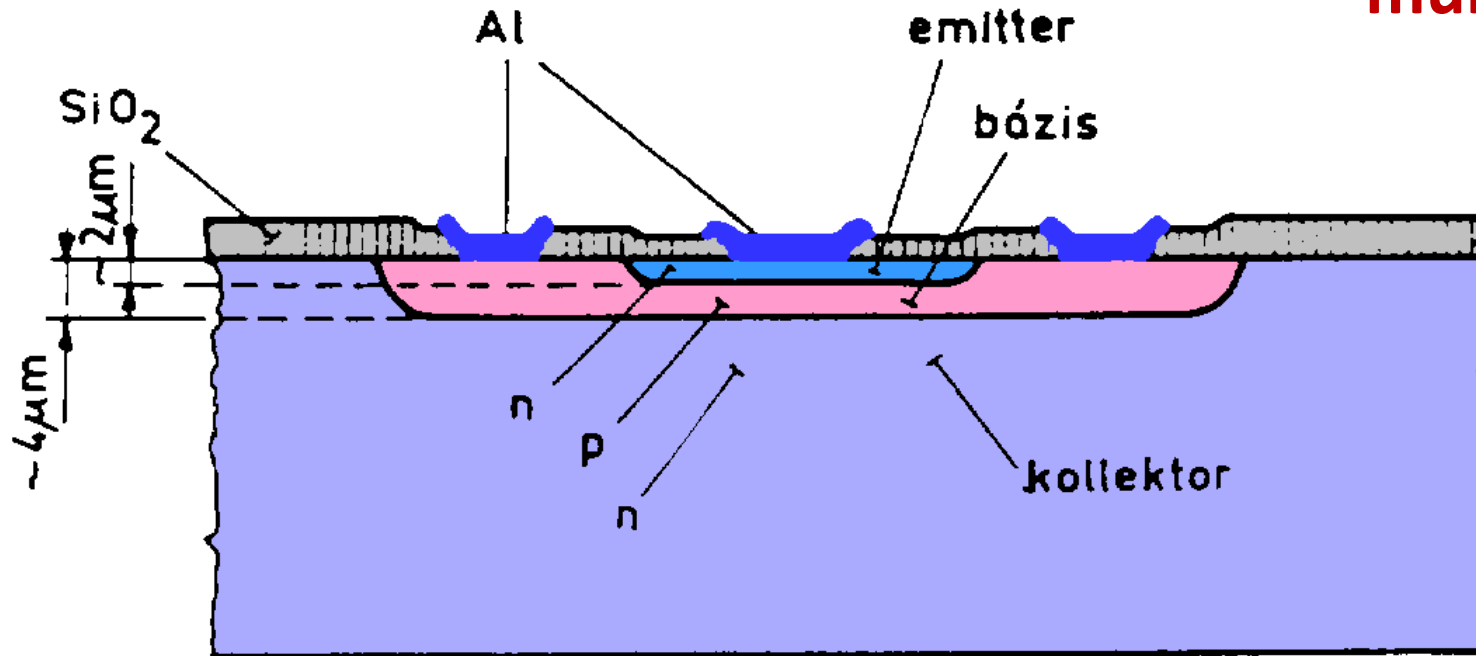
# A tranzisztor üzemmódjai, Ebers-Moll modell

# A tranzisztor üzemmódjai



# A bipoláris tranzisztor felépítése

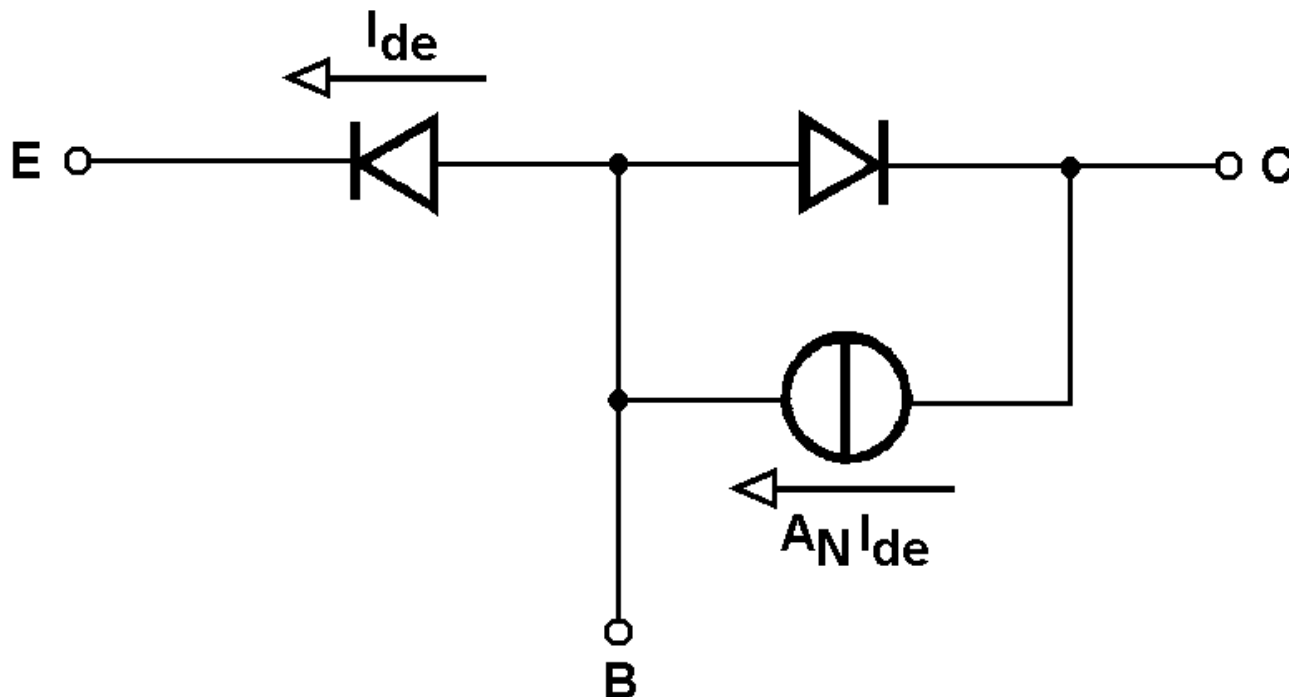
**Inverz aktív működés**



- Az **injektálási hatásfok nagyon rossz**, a kollektor és bázis közötti adalékolás különbség miatt
- **CB PN átmenetnek csak egy részével szemben EB PN átmenet.** Távoli részek diff. hosszon kívül.
- **Inhomogén adalékolás esetén ellentétes térerő!**

# Az Ebers - Moll modell

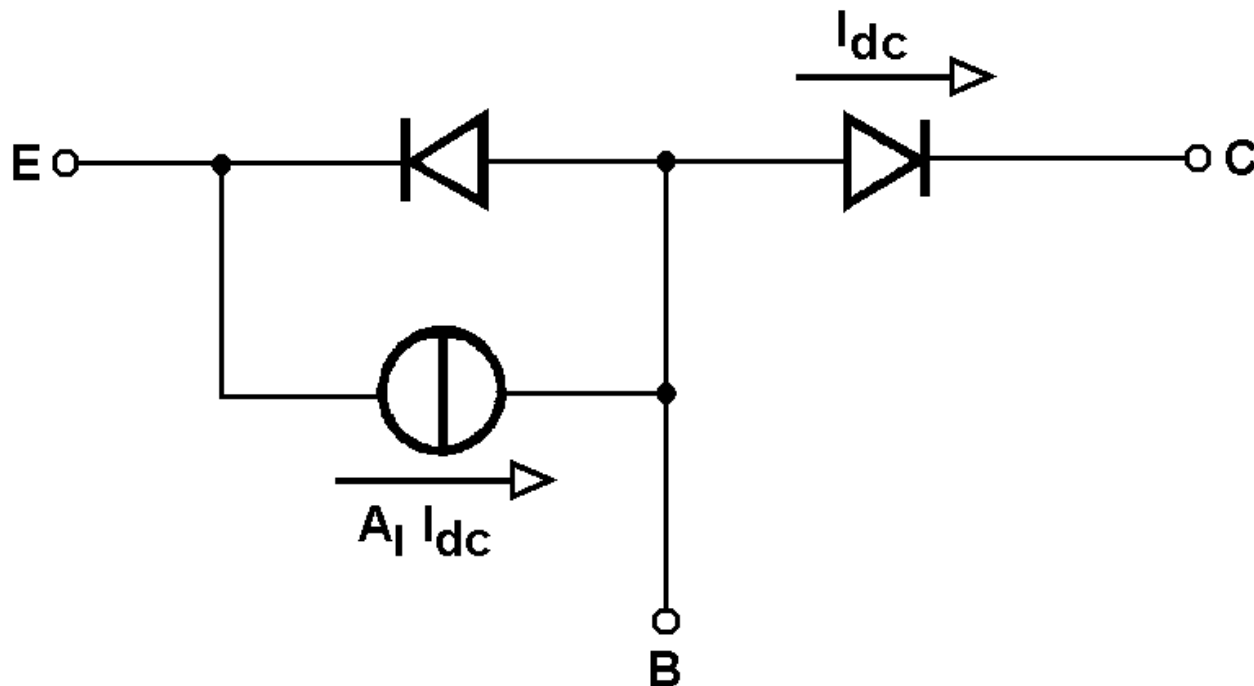
Helyettesítés a normál aktív beállításban:



$$I_{de} = I_{ES} \left( \exp(U_{BE} / U_T) - 1 \right)$$

# Az Ebers - Moll modell

Helyettesítés az inverz aktív beállításban:

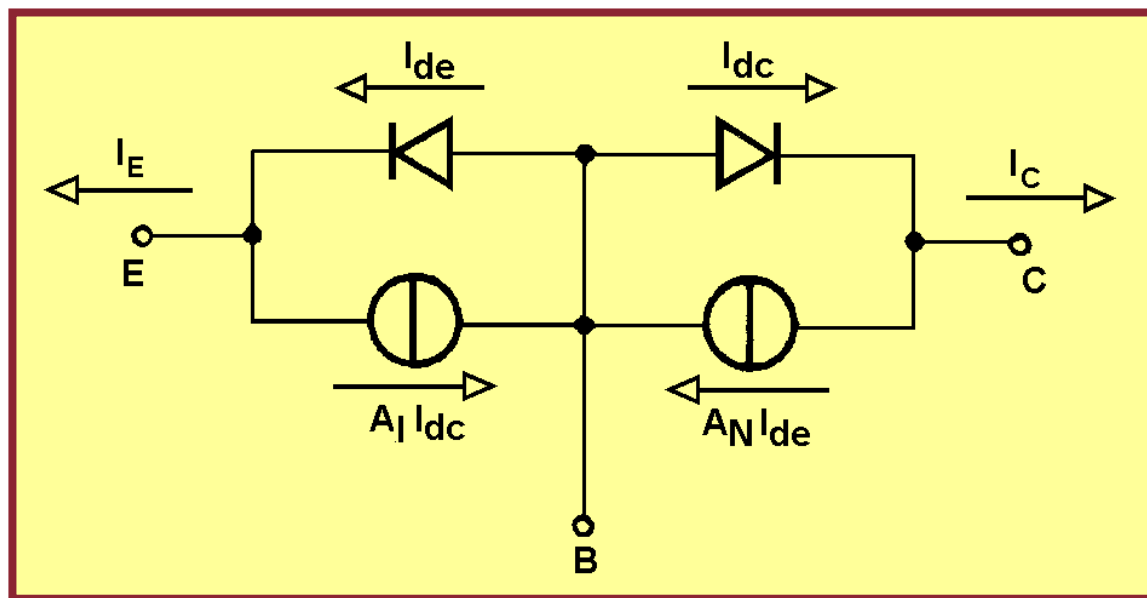
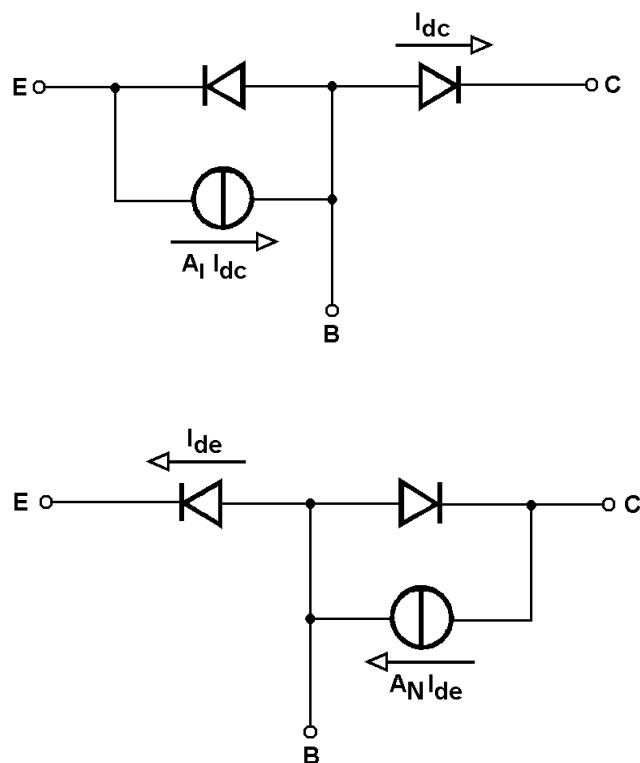


$$I_{dc} = I_{CS} (\exp(U_{BC} / U_T) - 1)$$

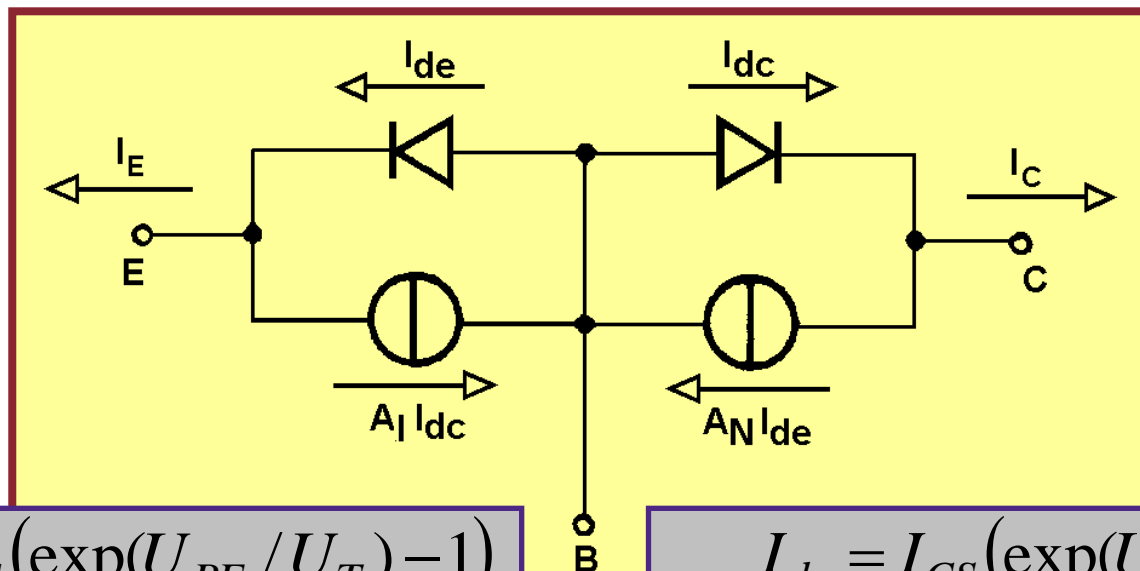


# Az Ebers - Moll modell

Telítéses üzemben a két modellt szuperponáljuk:



## Az Ebers - Moll egyenletek



$$I_{de} = I_{ES} (\exp(U_{BE} / U_T) - 1)$$

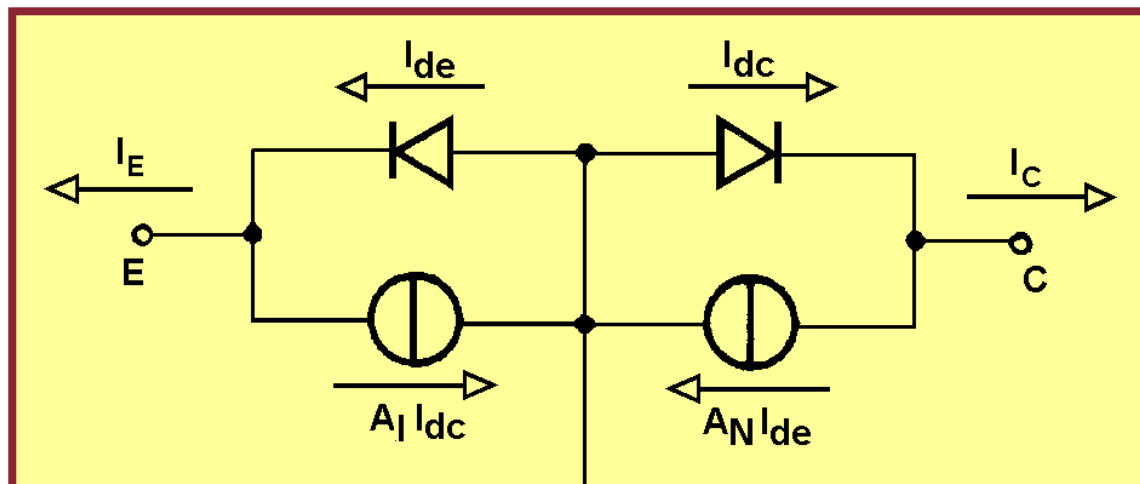
$$I_{dc} = I_{CS} (\exp(U_{BC} / U_T) - 1)$$

$$\frac{I_{ES}}{I_{CS}} = \frac{A_I}{A_N}$$

$$I_E = I_{ES} (\exp(U_{BE} / U_T) - 1) - A_I I_{CS} (\exp(U_{BC} / U_T) - 1)$$

$$I_C = -A_N I_{ES} (\exp(U_{BE} / U_T) - 1) + I_{CS} (\exp(U_{BC} / U_T) - 1)$$

## Az Ebers - Moll egyenletek



$$I_E = I_{ES} (\exp(U_{BE} / U_T) - 1) - A_I I_{CS} (\exp(U_{BC} / U_T) - 1)$$

$$I_C = -A_N I_{ES} (\exp(U_{BE} / U_T) - 1) + I_{CS} (\exp(U_{BC} / U_T) - 1)$$

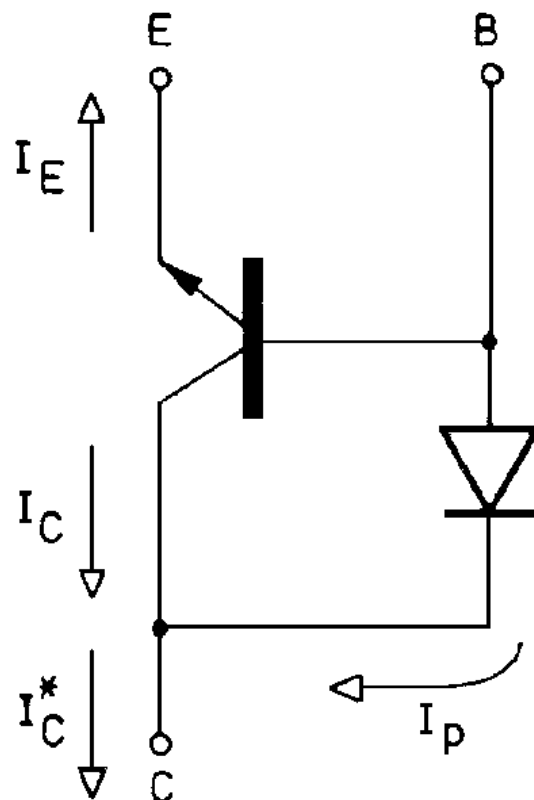
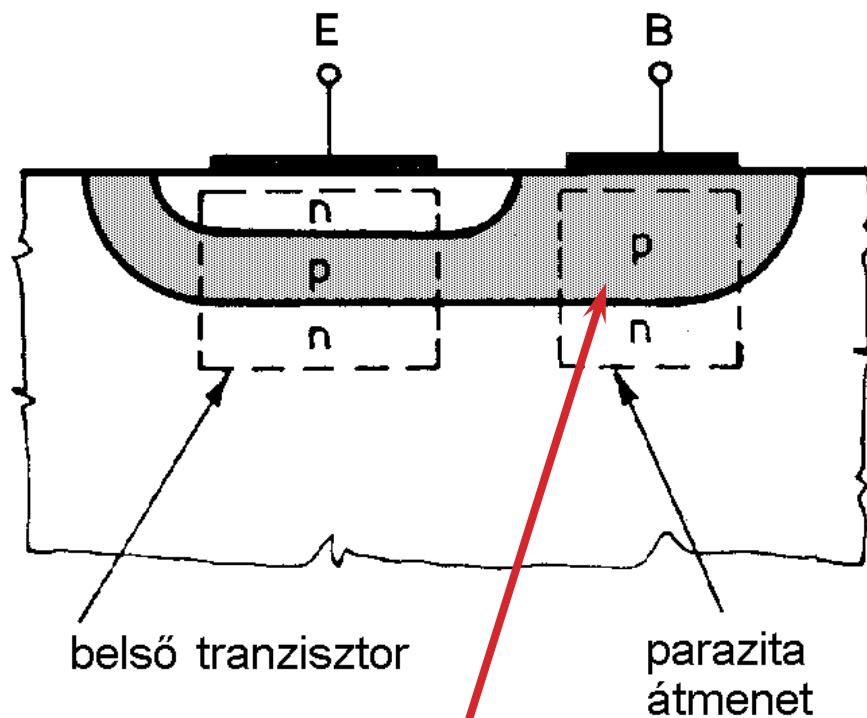
$$\begin{bmatrix} I_E \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -A_I \\ -A_N & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ES} (\exp(U_{BE} / U_T) - 1) \\ I_{CS} (\exp(U_{BC} / U_T) - 1) \end{bmatrix}$$

# A valóságos tranzisztor: parazita elemek

Parazita CB dióda

Soros ellenállások

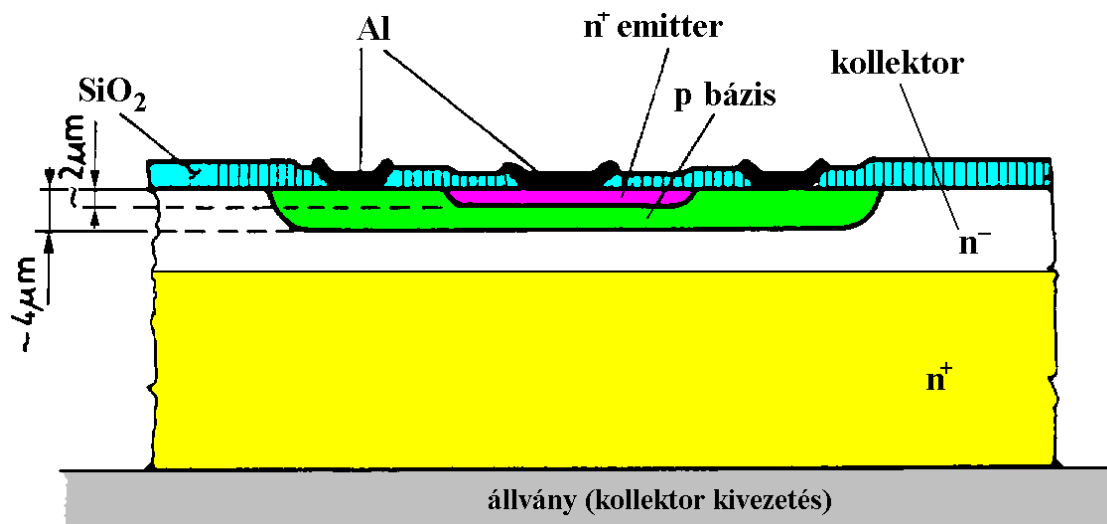
# A CB parazita dióda hatása



**Nincs vele szemben emitter**, így inverz működésben a kollektorból a bázisba injektált elektronok "elvesznek": **romlik az inverz aktív áramerősítési tényező.**

# A soros ellenállások

## Kollektorkivezetés



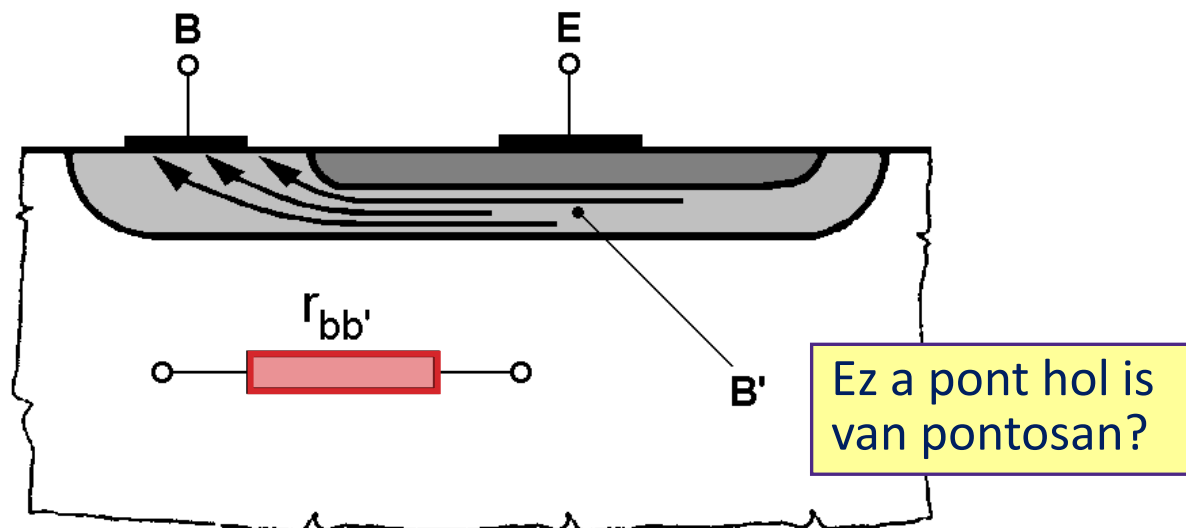
## $R_{CC}$ csökkentése

diszkrét tranzisztoroknál: epitaxiális szerkezet (mint a diszkrét diódánál)

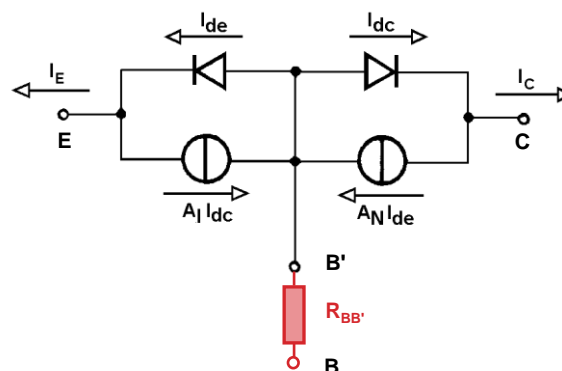
IC tranzisztoroknál: eltemetett réteg

# A soros ellenállások

## Báziskivezetés

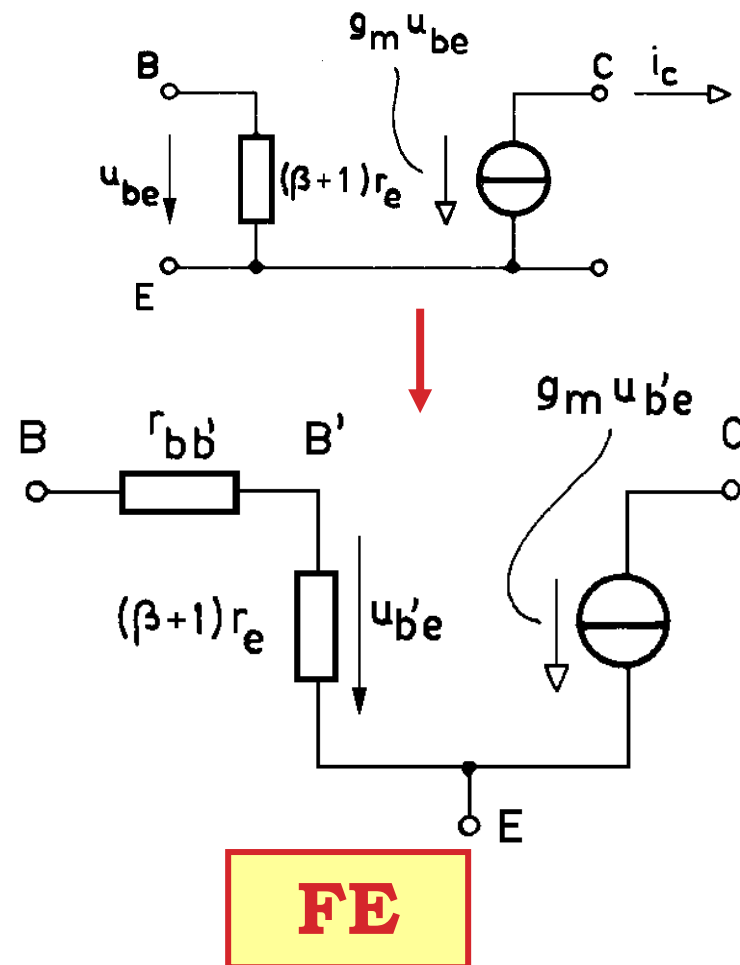
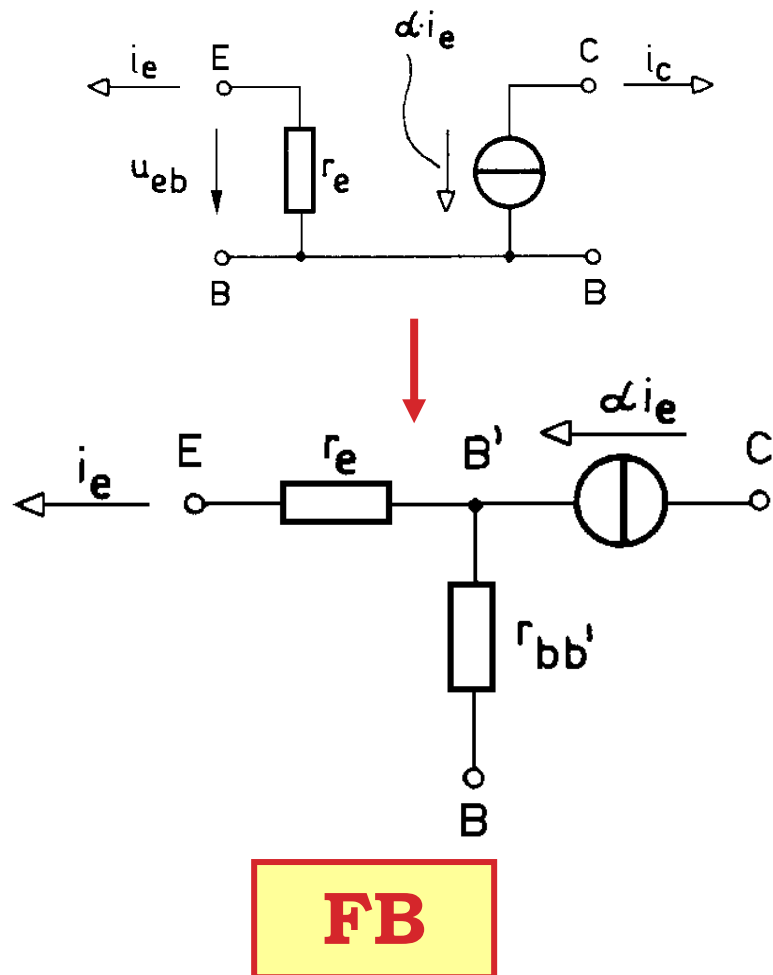


A "belső bázispont" – egyszerű közelítés:  $R_{BB'}$



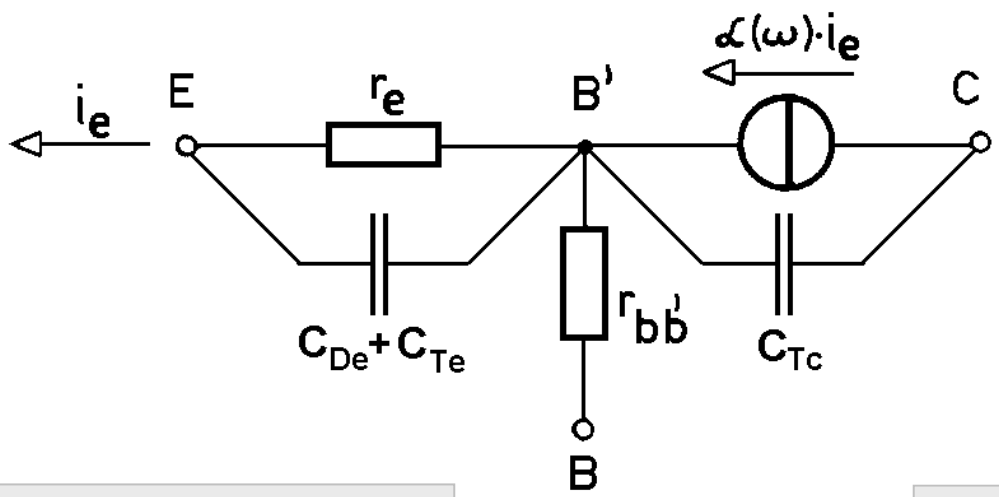
# Kisjelű fizikai helyettesítőképek

## Háromelemes – bázis soros ellenállása is





# A kapacitások figyelembevétele



$$C_{De} = \frac{dQ_B}{dU_{BE}} = \frac{dQ_B}{dI_E} \frac{dI_E}{dU_{BE}}$$

$$Q_B = I_E T_0$$

$$C_{De} = T_0 \frac{I_E}{U_T}$$

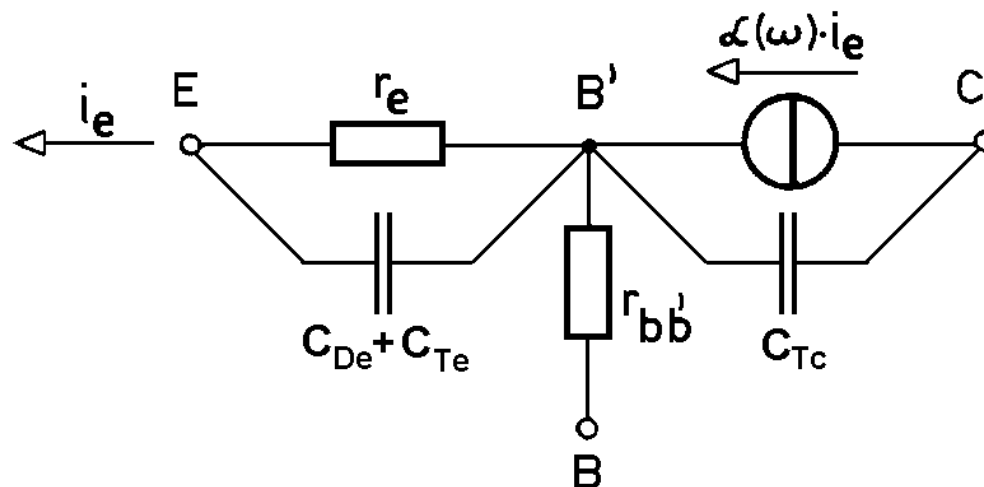
**T<sub>0</sub> a bázis-áthaladási idő**

$$\eta_{tr} = 1 - \frac{I_r}{I_{En}} = 1 - \frac{Q_B / \tau_n}{Q_B / T_0} = 1 - \frac{T_0}{\tau_n}$$

$$C_{De} = \tau_n (1 - \eta_{tr}) \frac{I_E}{U_T}$$

$$\eta_{tr} = 1 - \frac{Q_{B/\tau_n}}{I_{En}}$$

# A kapacitások figyelembevétele



$$C_{Te} = C_{Te0} \left( \frac{U_{De}}{U_{De} - U_{BE}} \right)^{n_e}$$

$$C_{Tc} = C_{Tc0} \left( \frac{U_{Dc}}{U_{Dc} - U_{BC}} \right)^{n_c}$$