

# Elektronika 1.

*(copyright)*  
Összefoglaló

Szkesztette: **Bagi Tamás**

(0620-342-3084)

## Tartalom jegyzék:

- (1) Az elektronika története
- (2) Félvezető eszközök fizikai összefoglaló
- (3) PN átmenet
- (4) Dióda
- (5) A bipoláris tranzisztor
- (6) Tervezérelt tranzisztor

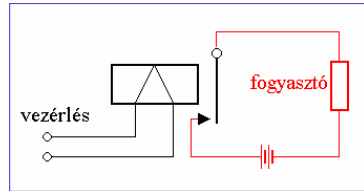
## 1. Az elektronika története az 1900as évek elejétől napjainkig:

(Rövid történeti áttekintés)

- 3 fő típusú generációt különböztethetünk meg:

### a) Elektromágneses térrel mozgatott mechanika

Jelfogó (relé)



### b) Elektromos és mágneses erőtérrel, vákumban mozgatott elektron

vákum-dióda



### c) Szilárd testben mozgó, potenciáltrekekkel vezérelt elektron

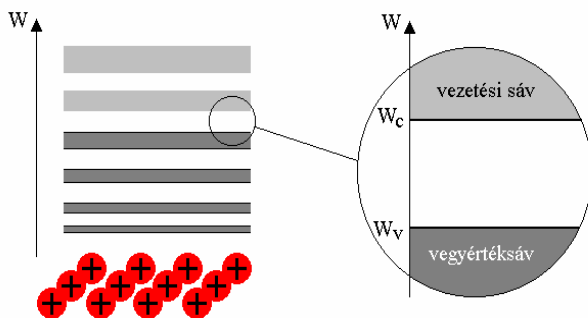
Tranzisztor



## 2. Félvezető eszközök Fizikai összefoglaló:

### a) sávszerkezet:

Tudjuk hogy az atom elektronhéjain lévő elektronok kvantált energiaszinteken foglalnak helyet. A függőleges tengelyen a megengedett energiaszinteket ábrázoltuk (W). Tudjuk hogy az elektronok a Pauli elv miatt lentől felfele kezdik betölteni a szerkezetet. A legfelső még szinten ahol még elektronok vannak vegyértéksávnak ill. vegyértékelektronoknak nevezzük. Továbbá tudjuk hogy a diszkrét energiaszintek sok atom esetén összemosódnak, mivel potenciálterük hatnak egymásra és az egykor azonos energiaszintek szétválnak. A szétválás mértéke sem egyforma, mert az atommaghoz közelebb lévők kevésbé hatnak egymásra. Itt kisebb mértékű a szétválás így az energiaszintek gyakorlatilag folytonos energia sávokká alakulnak.



Gerjesztetlen állapotban az elektronok alulról felfele kihagyás nélkül töltik be a megengedett energiaszinteket, állapotokat, de ugye a gerjesztetlen a termikus gerjesztést is kizárja (0K).

Gyakorlatban szobahőmérsékleten 1-1 elektron a teljesen betöltött sávból (vegyérték sáv,  $W_v$ ) egyel feljebb léphet a vezetési sávba ( $W_c$ ) és itt 0-nál nagyobb lesz a betöltöttség.

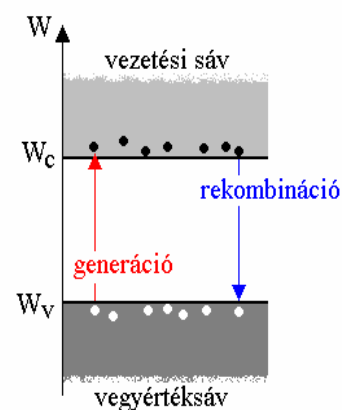
### b) elektronok és lyukak:

A termikus átlagenergia  $\frac{1}{2} kT$  (ahol  $k=1.38 \times 10^{-23} \text{ Ws/K}$  BOLTZMANN). A termikus generáció: az egyenlőtlen statisztikus megosztás folytán lehet az elektronsokaságnak olyan része amely a többletenergia miatt a vegyértéksávból felugrik a vezetési sávba.

Ugyanez a folyamat ha visszafelé történik akkor rekombinációról beszélhetünk. Ilyenkor lyuk és elektron párok keletkeznek. Az áramvezetést kétfajta részecske szolgálja a félvezető anyagokban: a vezetési sávban lévő elektronok és a vegyértéksávban lévő lyukak. van szó. A vezetési sáv elektronsűrűsége ezek egyensúlyából adódik.

{ **Elektron:** negatív töltés, pozitív tömeg  $\sim m_{eff}$  }

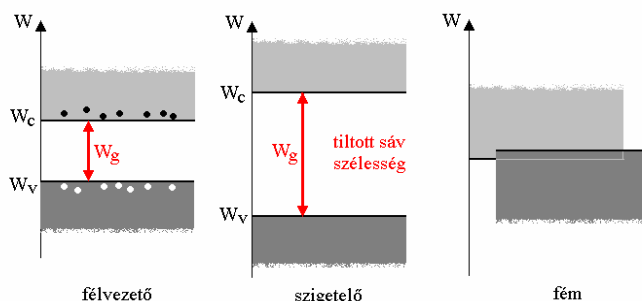
{ **Lyuk:** pozitív töltés, pozitív tömeg, mivel itt úgy viselkedik, mintha az effektív tömege negatív lenne }



### c) Félvezetők, szigetelők, vezetők:

Az hogy egy szilárd anyag melyik kategóriába tartozik azt csak a vezetési ill. a vegyértéksáv elhelyezkedése határozza meg. Ahhoz hogy létrejöjjön számottevő vezetési elektron és lyuk, a két sáv közötti tiltott résznek ( $W_g$ ) kicsinek kell lennie. Ez utóbbi paraméter igen fontos anyagi jellemző. Ha 2eV alatt van akkor az anyag félvezető. Ha felette van akkor az anyag inkább szigetelőnek kell tekinteni. A két kategória között az átmenet folytonosnak tekinthető. Az egyik legfontosabb félvezető anyagunk a szilícium és ebben az esetben a  $W_g=1.12\text{eV}$ . Mint tudjuk a fémek esetén a vezetési sáv és a vegyérték sáv átfedésben van.

Ezért van az hogy az abszolút nulla fok közelében is található a vezetési sávban bőven elektron. Ez magyarázza a szigetelők és a vezetők közti eltérést is.



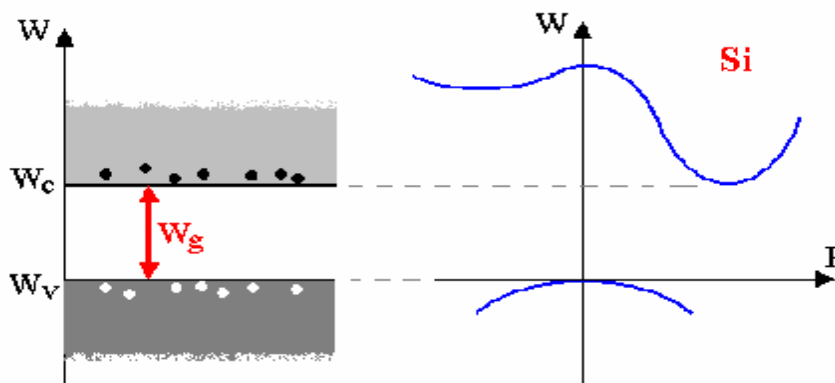
### d) A sávszerkezetéről bővebben:

Ha más szempontból kezdünk vizsgálni akkor egy összetettebb diagrammot kapunk. Ha szilícium P kristálybeli impulzusát ábrázoljuk akkor a következő ábra adódik:

A kristálybeli impulzus fogalom a „rendes” impulzus fogalmához, csak a mozgás törvénybe

$$F = \frac{dP}{dt} \text{ az alábbi összefüggést kell írni}$$

Ahol  $F$  az elektronra ható erő



és továbbá ismerjük az energia és impulzus összefüggését is, ami  $W = \frac{1}{2m} \cdot p^2$

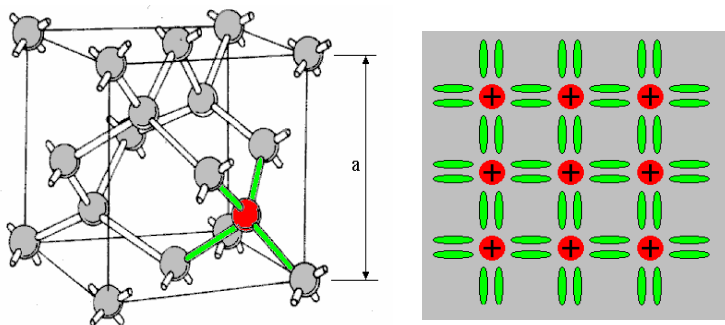
de lehet az  $m$  helyére  $m_{eff}$  is írni.

Fontos továbbá hogy ha tudjuk a sávszerkezetéről hogy egyaránt a  $P=0$ -nál van a vezetési sáv minimuma ill. a vegyértéksáv maximuma, akkor a sávszerkezetet **direktnak** tekintjük (pl. GaAs.) A direkt szerkezetű anyagoknak a fénykibocsájtásnál van nagy szerepük. A szilíciumnak **indirekt** sávszerkezete van.

e) A szilícium kristályszerkezete:

A szilícium a periódusos rendszer 14-es számú eleme. Négy vegyértékű, kristályosodási formája gyémántrács. Megfigyelhetjük hogy minden atomnak négy legközelebbi szomszédja van és ezekkel kapcsolódik össze.

A rácsállandó értéke:  $a=0.357\text{nm}$



f) Az elektronok és lyukak a szerkezeti félvezetőkben:

A kristály azon elemi részecskéit, amelyek mozgásképesek és töltéssel rendelkeznek, töltéshordozóknak nevezzük. Ezek képesek elektromos töltés szállítására, vagyis az áramvezetésre.

De azt is tudjuk hogy egy teljesen betöltött sáv nem járul hozzá a vezetéshez, mivel az elektronok nem tudnak „egymástól mozogni”,

A félvezető anyagokban kétféle töltéshordozóval számolunk:

- x A vezetési sávban lévő elektronok
- x A vegyértéksávban lévő lyukak

A termikus energia megoszlása emelhet egyes elektronokat a vezetési sávba és egy lyuk-elektron pár hozza ezzel létre. Az egészen tiszta félvezetőben ilyen módon alakulnak ki a töltéshordozók és ilyenkor hívjuk őket szerkezeti ill. intrinsic félvezetőknek. Azonban ilyen módon csak kevés töltéshordozó alakul ki. Az intrinsic anyagban ugyanannyi lyuk van mint elektron  $n_i = p_i$

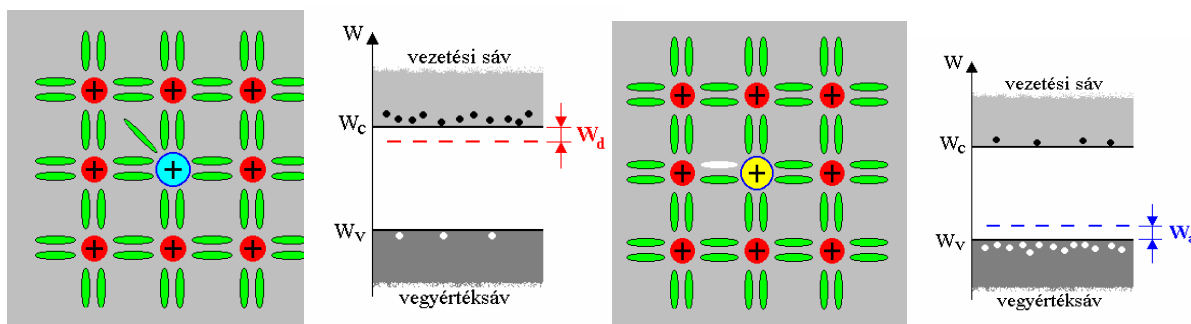
A lyukak és az elektronok sűrűsége azonos.

Si esetén a 
$$n_i = 10^{10} \frac{1}{\text{cm}^3}$$

Ezekre a kérdésekre ad megoldást az n ill. p típusú adalékolás, amit a következő bekezdésben bővebben is kifejtünk:

### g) Adalékolt félvezetők:

Mivel az intrinsec töltéshordozó sűrűség igen kicsi, ezért meg kell növelni valahogy. Kétféle adalékolás létezik az úgynevezett **Donor** adalékolás, ami egy 5 vegyértékű adalékolás, ahol az elektron válik a többségi töltéshordozóvá, ezeket hívjuk **n típusú** félvezetőknek. (As,P,,Sb) A másik adalékolási eljárás az ún. **Akceptor**, ahol egy 3 vegyértékű adalékolás. Ebben az esetben a lyukak válnak többségi töltéshordozóvá és ezek **p típusú** félvezetőknek nevezzük. (B, Ga, In)



### h) Elektron és lyuksűrűség számítása:

Az elektron-és lyuksűrűség számításhoz nem elegendő a megengedett állapotok mennyiségét tudni, azok betöltöttségének valószínűségét is ismerni kell. Az elektronokra a **Fermi-Dirac** statisztika adja meg ezen  $f(W)$  betöltési valószínűséget az energia függvényében.

$$f_{(W)} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{W - W_F}{kT}\right)}$$

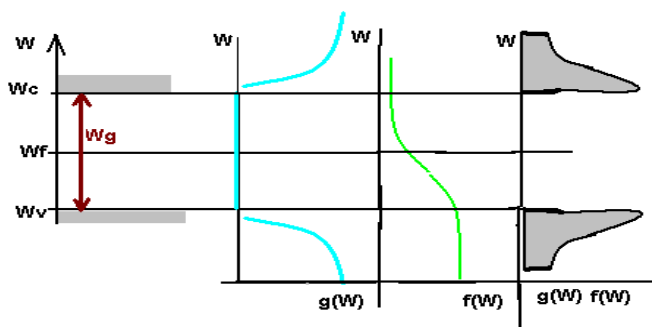
Továbbá ez a függvény felteszi hogy az elektronok

megkülönböztethetetlenek, eleget tesznek a Pauli elvnek ill. termikus energiájuk szabadsági fokonként  $\frac{1}{2} kT$ .

$$n = \int g_c(W) f(W) dW \quad p = \int g_v(W) [1 - f(W)] dW$$

A  $g(W)$  görbe azt adja meg hogy a megengedett tartományokban milyen sűrűségben vannak betölthető állapotok.

Az  $f(W)$  görbe adja meg a Fermi Dirac statisztikát a betöltöttségi valószínűséget az energia függvényében.



Az fenti integrálok kiértékelve:

$$n = \text{const} \cdot T^{\left(\frac{3}{2}\right)} \cdot \exp\left(\frac{-(W_c - W_f)}{kT}\right) \quad W_c - W_F = W_F - W_v$$

$$W_F = \frac{W_c + W_v}{2}$$

$$p = \text{const} \cdot T^{\left(\frac{3}{2}\right)} \cdot \exp\left(\frac{-(W_f - W_v)}{kT}\right) \quad = W_i = W_f \text{ azaz a fermi szint helyzete}$$

Ezt a két egyenletet összeszorozva nagyon fontos összefüggést kapunk, méghozzá a tömeghatás törvényét:  $n \cdot p = \text{const} \cdot T^3 \cdot \exp\left[\frac{(-W_g)}{kT}\right] = n_i^2$  {megjegyzés: Szilíciumra, 300 K hőmérsékleten  $n_i = 10^{10} / \text{cm}^3$  (10 elektron egy 0.01 mm élhosszúságú kockában)}

(Továbbá érdemes megjegyezni hogy 1 fok növekedés 15%-al növeli  $n_i^2$  értékét )

(vagy úgy is megjegyezhető ha minden  $\Delta T = 16,5$  fok után megtízszereződik )

PÉLDA:

x Mennyi az elektron és lyuksűrűség értéke??

Ha  $T = 300\text{K}$ , a donoradálék sűrűség  $n = N_d = 10^{17} \frac{1}{\text{cm}^3}$

$$p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{10^{20}}{10^{17}} = 10^3 \frac{1}{\text{cm}^3}$$

x Mekkora az adalék atomok relatív sűrűsége??

Egy  $1\text{cm}^3$  szilíciumban

$5^{22}$  db atom van, tehát  $\frac{10^{17}}{(5 \cdot 10^{22})} = 2 \cdot 10^{-6}$  vagyis a Szilícium tisztasága 0.999998

i) Áramok a félvezetőkben:

Félvezetők esetében kétféle áramról beszélhetünk:

I) sodródási áram, amit az elektromos térerősség kelt

II) a diffúziós áram, amit a hordozók sűrűség gradiense folytán jön létre.

A többi áramlási típus a félvezetőben másodrendű.

### I) A sodródási áram:

Mint tudjuk a félvezetőkben is van a részecskék általi rendezetlen hőmozgás, ami ugye ha nincs térerősség akkor a kezdeti ill. a végpont ugyanaz. Ezzel szemben ha van térerősség akkor egy határozott tendenciájú elmozdulás szuperponálódik. Tehát összegezve az elektron rendszertelen hőmozgást végződik miközben sodródik az erőhatás irányában, innen kapta az elnevezést: **sodródási, drift áram.**

$$\vec{v}_s = \mu \cdot \vec{E} \quad \left\{ \mu: \text{mozgékonyás } \frac{m^2}{Vs} \text{ és értéke elektronra ill. lyukakra különböző} \right\}$$

Az áramsűrűség a következő képletből számolható:  $\vec{J} = \rho \cdot \vec{v}$ ,  
ahol a  $\rho$  a hordozók töltéssűrűsége és a  $\vec{v}$  az áram irányába eső átlagsebbeségük

Differenciális ohm törvény:

$$\vec{J} = \sigma_e \vec{E}$$

Továbbá: A félvezető anyag fajlagos vezető képessége és fajlagos ellenállása:

$$\sigma_e = q(n\mu_n + p\mu_p) \quad \rho_e = \frac{1}{\sigma_e}$$

### PÉLDA:

Határozzuk meg  $\sigma_e - t$  ha adott

$$N_d = 10^{15} \frac{1}{cm^3} \text{ ill. } \mu_n = 0.12 \frac{m^2}{Vs};$$
$$\mu_p = 0.025 \frac{m^2}{Vs} \text{ és } n = 10^{15} \frac{1}{cm^3}$$

$$p = n_i^2 / n = 10^{15} \frac{1}{cm^3}$$

$$\sigma_e = q \cdot (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p) = 1.6 \cdot 10^{19} \cdot (10^{21} \cdot 0.12 + 10^{11} \cdot 0.025) = 19.2 \frac{A}{Vm}$$

ÜGYELJÜNK ARRRA HOGY  $\frac{1}{m^3}$  -be helyettesítsünk vissza

{megjegyzés:  $\mu \sim T^{\left(\frac{-3}{2}\right)}$  + Növekvő adalékolással csökken ill.

Szobahőmérsékleten növekvő hőmérséklettel csökken }



## II) A diffúziós áram:

A töltéshordozók sűrűség különbsége is képes áramlás létrehozására. Ugye az egyenletlen eloszlás következtében nagyobb valószínűséggel indulnak meg elektronok a sűrűbből a ritkább fele és ezáltal megindul a töltéshordozó áramlás és ezt nevezzük diffúziós áramnak.

Az eredő áramsűrűségek a következő módon kaphatóak:  $\bar{J}_n = qn\mu_n \bar{E} + q D_n \text{grad } n$

$$(J_n \text{ ill. } J_p \rightarrow \text{sodródási} + \text{diffúziósáramsűrűség}) \quad \bar{J}_p = qp\mu_p \bar{E} - q D_p \text{grad } p$$

Illetve ezekből megkapható az Einsteini összefüggés:  $D = \frac{kT}{q} \mu$

A termikus feszültség is ebből is számolható ill. fordítva:

$$U_T = \left. \frac{kT}{q} \right|_{T=300K} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} [\text{VAs/K}] \cdot 300 [\text{K}]}{1,6 \cdot 10^{-19} [\text{As}]} \approx 0,026 \text{ V} = 26 \text{ mV}$$

### j) Generáció, rekombináció, folytonossági egyenletek:

- Generációs rátának nevezzük a térfogategységben és időegység alatt generálódott töltéshordozók számát.
- Rekombináció rátának nevezzük a térfogategységben és időegység alatt rekombinálódott töltéshordozók számát.  $r_n = \frac{n}{\tau_n} \text{ ill. } r_p = \frac{p}{\tau_p}$
- Élettartam: annak az átlagos ideje amennyit az elektron a vezetési sávban tölt. Megkülönböztetjük a lyukak és az elektronokét.  $\tau_n \text{ ill. } \tau_p$

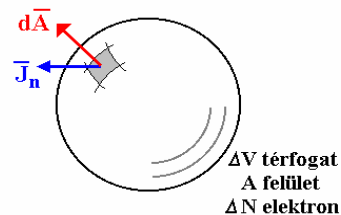
- Ha a  $Ha \ g_n = r_n \text{ egyensúlyi akkor } = \frac{n_o}{\tau_n}$   
ahol  $n_o$  egyensúlyi elektron sűrűség

- Folytonossági egyenlet: Ebben az esetben figyeljük az elektronok áramlását a félvezető anyag A felület,  $\Delta N$  elektron, egy kicsiny  $\Delta V$  térfogategységében.

$$\frac{\Delta N}{\Delta V} = dn$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{q} \text{div}(\bar{J}_n) + g_n - \frac{n}{\tau_n}$$

Hasonlóan kapható a lyukaké is.



A folytonossági egyenletből megkapható a diffúziós egyenlet, méghozzá úgy hogy a folytonossági egyenletbe behelyettesítjük a teljes áramsűrűség képletét:

$$\vec{J}_n = q \cdot n \cdot \mu_n \cdot \vec{E} + q \cdot D_n \cdot \vec{\text{grad}} n \quad \frac{dn}{dt} = \frac{1}{q} \text{div}(\vec{J}_n) + g_n - \frac{n}{\tau_n}$$

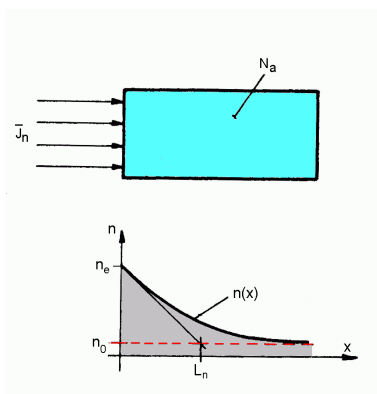
És ezekből kapjuk a diffúziós egyenletet:  $\frac{dn}{dt} = \mu_n \text{div}(n\vec{E}) + D_n \text{divgrad } n + g_n - \frac{n}{\tau_n}$

(amely a helytől és időtől függő elektron ill lyuksűrűségekre van értelmezve)

$$\frac{dp}{dt} = -\mu_p \text{div}(p\vec{E}) + D_p \text{divgrad } p + g_p - \frac{p}{\tau_p}$$

Egy újabb összefüggés kapható meg, a diffúziós hossz:

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



Az alábbi ábrán szemléltetjük, hogy érthető legyen miről is beszélünk. Egy kis magyarázat: ez az átlagos távolság, ameddig az injektált elektronok bediffundálnak a p típusú anyagba, mielőtt rekombinálnának.

### 3. A PN átmenet: (tulajdonsága, jellemzői és működése)

#### a) Kis általános összefoglalás:

Legfontosabb tulajdonsága: egyenirányít

A gyakorlatban sok -féle felhasználási területe létezik: kapacitásként, diódként, félvezető elemek egymástól való szigetelésére...

A pn átmenet (junction) egy félvezető darabnak azt a tartományát jelenti, amelyben egymás közvetlen szomszédságában egy p és egy n típusú adalékolású zóna helyezkedik el. A pn átmeneteket egykristályos anyagokban alakítják ki. A félvezető darab egyik oldala n, a másik p adalékolású, de ettől függetlenül, a teljes félvezető darab szabványos egykristály szerkezetű.

A pn átmenet ma szokásos struktúráját az ún. planáris technológiával, diffúzióval készült félvezető diódán mutatjuk be.

#### **Kiindulás: Si egykristály “szelet”**

**Oxidálás, ablaknyitás, n diffúzió, fémmezés**

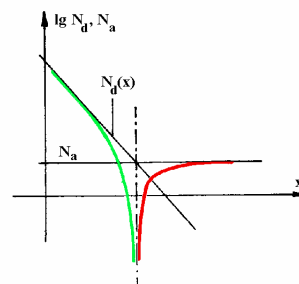
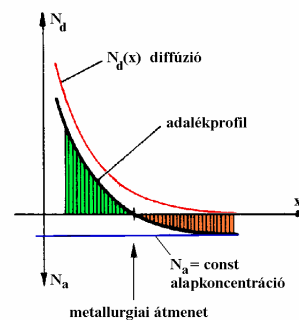
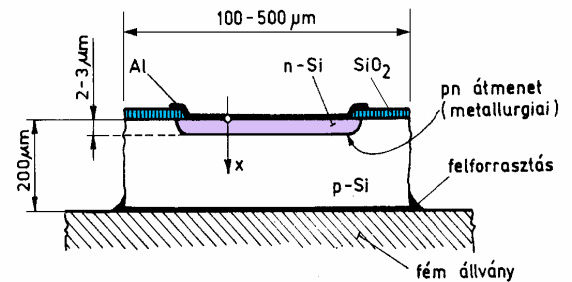
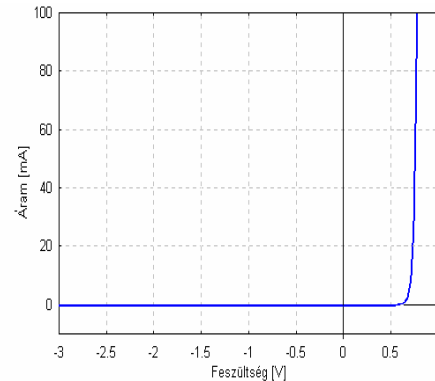
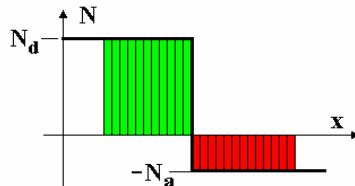
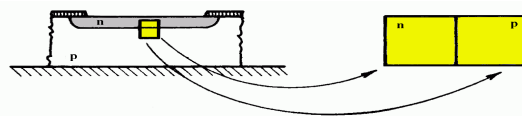
**Darabolás, felforrasztás, tokozás**

Itt még ki kell térni az adalék profil fogalmára illetve az alábbi ábra mutatja az adalékolás sűrűségét a mélység függvényében. (Donor ill. akceptor : nettó adalékolás)

A továbbiakban a Si egy kis darabját fogjuk vizsgálni, mivel az anyag homogén adalékolású és homogén viselkedésű.

És tudjuk hogy az egyik oldal erősebben adalékoltt.

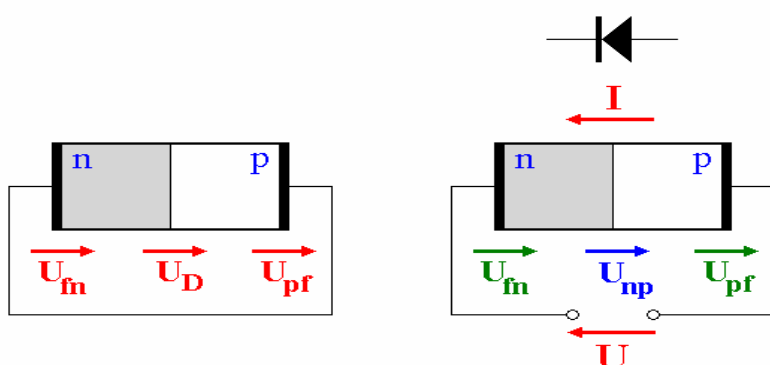
Az adalék profilt úgy kapjuk, hogy vegyük fel a metalurgiai átmenetre merőlegesen az x tengelyt. Ezekután már csak ábrázolni kell az adalék koncentráció helyfüggését.



b) Diffúziós potenciál, kontakt potenciál:

A kontaktpotenciált az átmenet környezetében kialakuló térerősség egyben azt is jelenti, hogy a p és az n oldal között potenciálkülönbség lép fel. Ez tulajdonképpen az érintkezési vagy kontakt potenciál, ami mindig előáll, ha különböző anyagi minőségű vezetőanyagok érintkezésénél.

Továbbá mivel a pn átmenetnél a mechanizmusban elsődleges szerepe van a diffúziós áramnak, az itt kialakuló érintkezési potenciálkülönbséget diffúziós potenciálnak nevezzük.  $\sim U_D$  (vagy built-in)



Kirchoff törvényeket felírva:

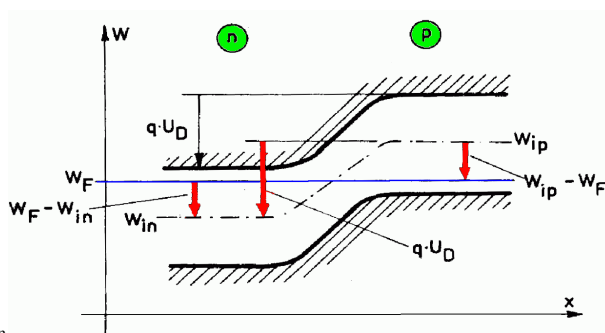
$$U_D + U_{fn} + U_{pf} = 0$$

$$U_{np} + U_{fn} + U_{pf} = -U$$

$$U_{np} = U_D - U$$

Diffúziós potenciál számítása:

Ahogy az ábrán láthatjuk ugyanazon a kvantumállapotban lévő elektronok energiája az ábrából az n oldalán kisebb, mint a p oldalon.  
(tehát pozitívabb az n oldal)



$$W_F - W_{in} = kT \ln \frac{n_n}{n_i} \quad W_F - W_{ip} = kT \ln \frac{n_p}{n_i}$$

$$W_{ip} - W_{in} = kT \ln \frac{n_n}{n_p}$$

$$U_D = \frac{W_{in} - W_{ip}}{-q} = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_n}{n_p} = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_n p_p}{n_i^2}$$

$$U_D = U_T \ln \frac{N_d N_a}{n_i^2} \quad 0.026 \cdot \ln 10 = 60 \text{ mV}$$

**PÉLDA: Egy abrupt Si dióda adalék adatai:**  
 $N_d = 10^{18} / \text{cm}^3$ ,  $N_a = 10^{16} / \text{cm}^3$ . Határozzuk meg a diffúziós potenciál értékét szobahőmérsékleten.

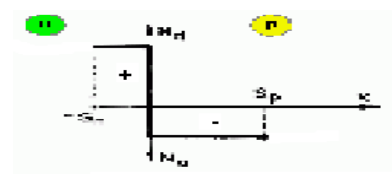
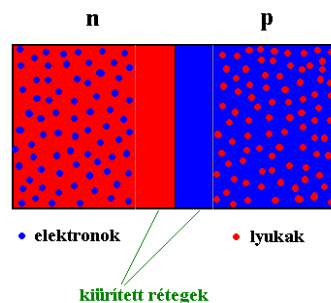
$$U_D = 0.026 \cdot \ln \frac{10^{18} \cdot 10^{16}}{10^{20}} = 0.026 \cdot \ln 10^{14} = 0.838 \text{ V}$$

## Töltés és potenciáeloszlás. Kiürített réteg:

Az eddigiekben igazoltuk hogy térerősségnek kell fellépnie a pn átmenet környezetében, de kérdés hogy mely töltések tartják fent ezt.

Vegyük a következő ábrát ahol a többségi töltéshordozókat kis pöttyökkel jelöltük. A pn átmenet környezetében a sűrűség lecsökken, és a nagy sűrűség gradiens miatt átdiffundálnak a túloldalra, ezért az átmenet mindkét oldalán kiürített réteg keletkezik.

Tehát meg is kaptuk, mivel így látszik hogy a két oldal potenciálkülönbsége tartja fenn. Egy adalékolt félvezetőben, mindig két -féle töltéssel számolhatunk: adalékatomok töltése és a a töltéshordozók töltése. Ezek egyensúlyban vannak ha nincs külső hatás.



## Az elektrosztatikus viszonyok közelítő számítása:

{megjegyzés : ha kiürített réteg szeretnénk számításokat végezni, akkor :

}

LEVEZETÉS:

$$\frac{dE_x}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon} \rightarrow E = -\frac{dU}{dx} \rightarrow qS_nN_d = qS_pN_a \rightarrow \frac{N_a}{N_d} = \frac{S_n}{S_p} \rightarrow E_{\max} = \frac{qN_a}{\epsilon}S_p$$

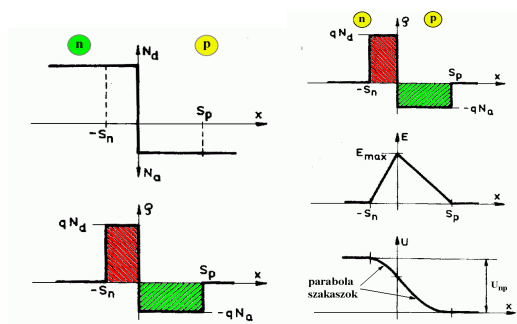
$$\rightarrow U_{np} = \frac{1}{2} \frac{qN_a}{\epsilon} S_p^2 \rightarrow S_p = \sqrt{\frac{2\epsilon}{qN_a}} \sqrt{U_{np}} = \sqrt{\frac{2\epsilon}{qN_a}} \sqrt{U_D - U} \rightarrow S_n = \frac{N_a}{N_d} S_p$$

PÉLDA: Egy abrupt Si dióda adalék adatai:

**$N_d=1018/\text{cm}^3$ ,  $N_a=1016/\text{cm}^3$ . Határozzuk meg a kiürített rétegek szélességét! ( $\epsilon_r=11,8$ ,  $U=0V$ )**

$$S_p = \sqrt{\frac{2 \cdot 11,8 \cdot 8,86 \cdot 10^{-12}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{22}}} \sqrt{0,838} = 0,331 \mu m \quad S_n = 0,003 \mu m$$

$$\text{és ha } U=-100V \quad S_p = 0,331 \cdot \sqrt{\frac{0,838 + 100}{0,838}} = 3,63 \mu m$$



c) A PN átmenet egyenáramú karakterisztikája:

A pn átmenet egyirányító működését próbáljuk megmagyarázni!

Nyitóirányú működés:

Mint korábban láttuk hogy a PN átmenet közti feszültségkülönbség a diffúziós potenciál és a külső feszültség előjeles összege.

A pozitív külső feszültség hatására lecsökkenti a p és n oldal közti potenciál lépcsőt és ezáltal az áramegyensúly felborul, az az egyensúlyi állapot ami a külső feszültség nélkül fenn állt .

Továbbá tudjuk hogy azt hogy az átmenet minden keresztmetszetében

nagy a térerősség és a hordozósűrűség gradiens is.

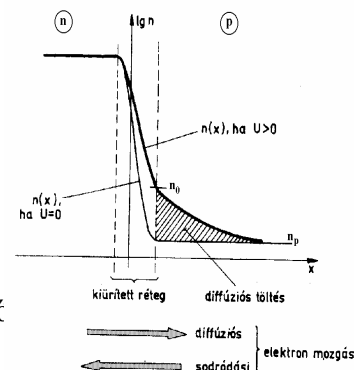
Az előbbi sodródási, az utóbbi diffúziós áramot hoz létre.

A pozitív külső feszültség hatására ez az egyensúly felborult

és csökken a potenciállépcső és akkor 
$$n(x) = n_p + (n_0 - n_p) \cdot e^{\left(\frac{-x}{L_n}\right)}$$

csökken a térerősség a töltésrétegben és

emiat kerül túlsúlyba a diffúziós áram.



Tehát a nyitófeszültség hatására az elektronok diffundálnak az n rétegből

a p oldal felé. A lyukakra vonatkozóan is hasonló a helyzet.

Végül is tehát: a nyitófeszültség hatására mindkét oldal többségi

töltéshordozói diffúzióval haladnak a szemben lévő oldal felé. (injektálódnak a túlsó rétegbe)

A nyitóirányban előfeszített pn átmenet áramát lényegében az erősebben adalékolt oldal többségi töltéshordozói szállítják.

Záróirányú működés:

Az elv itt hasonló a nyitófeszültségéhez! Ebben az esetben a p oldalra negatív feszültséget adunk az n oldalhoz képest, akkor itt a két oldal közti potenciálkülönbség (potenciállépcső megnő). Ebben az esetben is fel fog borulni az áramegyensúly, ezáltal nőni fog a térerősség és most a sodródási áram kerül túlsúlyba.

Ez az elektronok sodródását jelenti az n oldal felé ill. a lyukakét a p oldal felé. Tehát összegezve mondhatjuk hogy a záróáram mindkét oldal kisebbségi töltéshordozóinak sodródása a másik irányba.

{A PN átmenet zárófeszültség alatt nyelőként viselkedik a kisebbségi töltéshordozókkal szemben}

d) Az ideális dióda karakterisztika egyenlete:

A karakterisztika megadásához néhány feltételt ki kell kötnünk előtte:

- x egydimenziós vizsgálatot végzünk
- x stacionárius állapotot vizsgálunk
- x egyenlőre nem számolunk a kiürített rétegben keletkező ill. rekombinálódó hordozókkal
- x nem számolunk másodlagos jelenségekkel a nagy térerősség ill. a nagy áramsűrűségek esetén

E megszorításokkal kapjuk meg az egyenletet:  $I = I_0 \cdot (e^{\frac{U}{U_T}} - 1)$   $\{I_0$  a kisebbség töltéshordozóval arányos}

ill. kifejezhető a feszültséggel is:  $U = U_T \cdot \ln\left(\frac{I}{I_0} + 1\right)$

### PÉLDA:

Egy Si dióda telítési árama  $I_0 = 10^{-13} \text{ A}$ . Mekkora a nyitófeszültség, ha az áram 10 mA?

$$U \approx 0,026 \cdot \ln(10^{-2} / 10^{-13}) = 0,658 \text{ V}$$

Mennyivel kell a nyitó feszültséget növelnünk ahhoz, hogy a nyitó áram tízszeres legyen?

$$\Delta U = U_2 - U_1 \approx U_T (\ln(I_2 / I_0) - \ln(I_1 / I_0)) = U_T \ln(I_2 / I_1)$$

$$\Delta U = 0,026 \cdot \ln 10 \approx 0,06 \text{ V} = 60 \text{ mV}$$

### e) Másodlagos jelenségek:

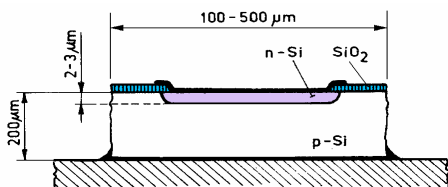
A PN átmeneteket jelentős része megfelel az ideális karakterisztikának kisebb, nagyobb eltéréssel. Ezek közül a fontosabbakat tekintjük át:

- x soros ellenállás
- x generációs és rekombinációs áram
- x letörési jelenségek

### Soros ellenállás:

Ez a jelenség nagy áramoknál jelentkezik, mivel a karakterisztika ekkor eltér az ideálistól, a dióda feszültsége nagyobb lesz, mint az ideális. Ezt két dologra lehet visszavezetni, az egyik a soros ellenállás, a másik ambipoláris diffúzió, amivel nem foglalkozunk.

A PN átmenetet egy p és n típusú félvezető réteg határolja. Ezek vezetnek ugyan az áramot de nagyságrendekkel kisebb, mint a fémeké. Emiatt a két félvezető réteg ohmos ellenállása nem elhanyagolható el, annak ellenére hogy  $100 \mu\text{m}$  nagyságrendű.

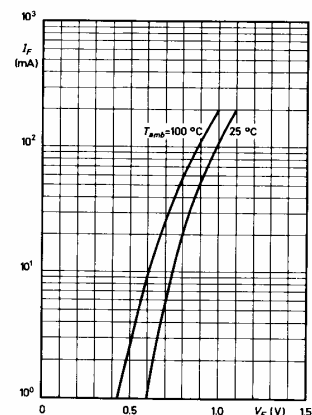


$$U = U_F - I \cdot r_s$$

$$I = I_0 \cdot \left( e^{\frac{(U_F - I \cdot r_s)}{U_T}} - 1 \right)$$

$$U_F = U_T \cdot \ln\left(\frac{I}{I_0} + 1\right) + I \cdot r_s$$

Forward characteristics  $I_F = f(V_F)$

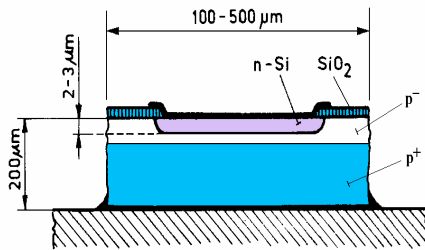


A nem mellékes mellékhatásként a dióda nyitóirányú feszültségesését. Az egyenirányító romlását eredményezi

Erre a megoldást az epitaxiális réteg bevezetése adja.

Az erősen adalékolt  $p^+$  rétegre egy gyengébben adalékolt  $p^+$  réteget rakunk. Így 1-2 nagyságrendet csökkenthet az ellenállása.

#### PÉLDA:



$$\Delta U = 160 \text{ mV}$$

$$I = 200 \text{ mA}$$

$$r_s = 160 / 200 = 0,8 \Omega$$

#### Generációs és rekombinációs áram:

Nem szabad elhanyagolni hogy a kiürített réteg belsejében is fellép töltéshordozó generáció, ill. a rekombináció.

A záró tartományban a kiürített rétegben többlet generáció lép fel. Az így keletkező áram hozzáadódik a dióda áramához. A többlet generáció értéke a teljes kiürített rétegben

$$g = \frac{n_i}{(2 \cdot \tau)}$$

Mindezek alapján arra számíthatunk, hogy ha a záró tartományban a generációs áram a domináló, akkor a záró karakterisztika árama kb. négyzet gyökösen növekszik a zárófeszültséggel.

$$I_R = \text{const} \cdot n_i \sqrt{-U_R}$$

A nyitótartományban a kiürített rétegben rekombináció lép fel és ez a nyitóáramhoz hozzáadódó további áramot jelent. Az áram következő képen módosul:

$$I_r = \text{const} \cdot e^{\left(\frac{U}{2 \cdot U_T}\right)}$$



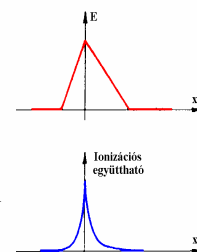
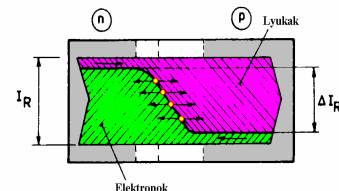
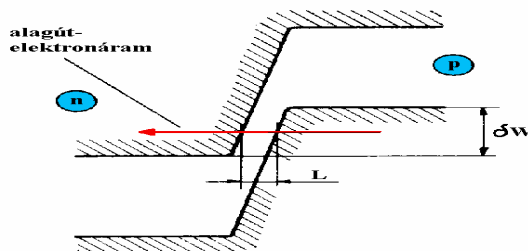
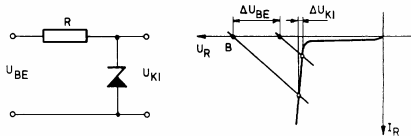
## Letörési jelenségek:

A PN átmenet záróirányban nem vehető igénybe tetszőleges feszültségig. Közeledve a letörési feszültségig az áram meredeken nőni kezd. A nagy árammal együtt jelentős hőteljesítmény szabadul fel a PN átmeneten. Ez az eszköz termikus tönkremeneteléhez vezet. A gyakorlatban három ilyen mechanizmus léphet fel: lavinaletörés, Zehner letörés és érintkezési jelenség.

A lavinaletörés alapjelensége az ütközési ionizáció. A sokszorozódási tényezővel szokták jellemezni.

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{U_R}{U_L}\right)^m}$$

A Zehner letörés alapjelensége az alagút hatás. A nagy adalékolás következtében a kiürített réteg keskeny és ezáltal a tiltott sáv is lecsökken és már véges valószínűséggel a kvantummechanikai alagúthatás következtében átjussanak az akadályokon, így alakul ki a Zehner letörés.



A Zehner dióda egyik alkalmazási módja a feszültség stabilizálás, az láthatjuk hogy nagy  $U_{be}$  változás kicsi  $U_{ki}$  változást eredményez. A Zehner diódákat még jellemezhetjük a hőmérsékletfüggésükkel is. Itt a legjobb az 5V-os.

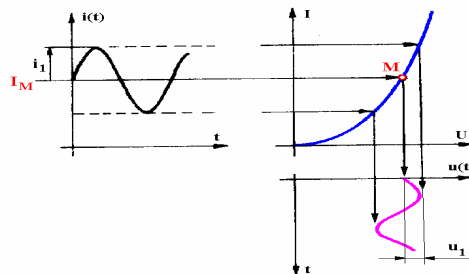
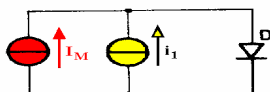
$$\frac{dU}{dT} = \frac{700 - 3 \cdot 26 - 1120}{300} = -1,66 \text{ mV}/^\circ\text{C}$$

## f) A PN átmenet differenciális ellenállása:

A dióda karakterisztikának van egy olyan szakasza, ahol lineárisnak tekinthető és a kis jelű vezérlés hatására a vezérlő áram arányos a kimeneti árammal. Ezen a szakaszon szoktuk általában definiálni a munkapontot amihez képest történik a vezérlés.

Ha az  $i_1$  -es amplitúdó kicsi az

$I_M$  -hez képest, úgy mondjuk, hogy kicsi a vezérlés, akkor a karakterisztika lineáris szakaszán mozgunk, s felharmonikusok csak elenyésző mértékben keletkeznek.



Ilyenkor beszélhetünk kisjelű működésről. A működés határain belül vagyunk addig a bemeneten levő váltakozó feszültség amplitúdója megegyezik a kimeneti feszültség amplitúdó változásával.

Tehát a dióda kisjelű váltakozó feszültség hatására úgy viselkedik mint egy ohmos ellenállás. Ez a dióda váltakozó áramú ellenállása. Az áram és feszültség kapcsolatát a karakterisztika munkapontbeli meredeksége, differenciál hányadosa határozza meg.

$$u_1 = r_d \cdot i_1$$

$$r_d = \frac{dU}{dI} \text{ ha } I = I_M \quad \text{Továbbá tudjuk hogy a differenciális ellenállás munkapont függő.}$$

$$U = m \cdot U_T \cdot \ln\left(\frac{I}{I_0} + 1\right) + I \cdot r_s$$

### PÉLDA:

Egy dióda soros ellenállása 2 ohm. Számítsuk ki a differenciális ellen-állását az  $I=1$  mA, 10 mA, 100 mA munkapontokban!

$$r_d|_{1mA} = \frac{26}{1} + 2 = 28 \, \Omega \quad r_d|_{10mA} = \frac{26}{10} + 2 = 4,6 \, \Omega \quad r_d|_{100mA} = \frac{26}{100} + 2 = 2,26 \, \Omega$$

### g) A dióda kapacitásai:

A diódák vizsgálata során azt tapasztalhatjuk hogy kétféle kapacitása típus figyelhető meg:

- × Tértöltés kapacitás (záró irányban domináns)
- × Diffúziós kapacitása (csak nyitóirányban van)

### Diffúziós kapacitás:

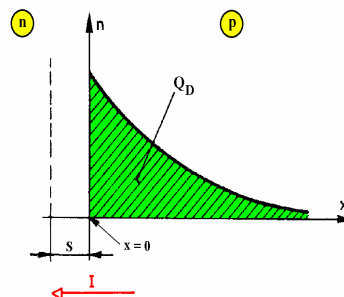
Korábban már megfigyelhettük, hogy nyitóirányban a többségi töltéshordozók injektálódnak a túloldal felé. Mindeközben ahogy távolodnak rekombinálódnak az átdiffundáltak. A nyitófeszültség a többlettöltés felhalmozódással és jár ezt hívjuk diffúziós töltésnek. Továbbá már láttuk hogy arányos a nyitóárammal. A feszültség változás hatására a töltés is változik. Ahogy már azt korábban megtanultuk a kapacitás a töltés megváltozása deriváltja a feszültség megváltozása szerint.

$$C = \frac{dQ}{dU} \text{ és arányos munkaponti egyenárammal}$$

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

$$C_D = \text{const} \cdot I$$

Káros jelenség, lassítja a működést, csökkenthető ha keskeny bázis



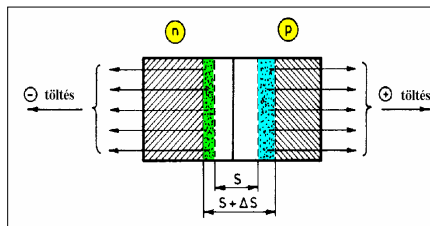
### Tértöltés kapacitás:

Itt már láttuk hogy a kiürített réteg szélessége a diódára kapcsolt feszültségtől függ. Minél nagyobb a zárófeszültség annál nagyobb. Ez csak úgy lehetséges ha a PN átmenet szomszédságából töltések elszállítunk, hiszen csak így lehet kiürített réteg.

{ Tehát a  $\Delta U$  megváltozáshoz fog mindig tartozni egy  $\Delta S$  megváltozás. } Mindezekből láthatjuk hogy a feszültségváltozás a töltés oda- vagy elszállítással jár együtt; a dióda kapacitásként viselkedik. Az ebből származó kapacitást nevezzük tértöltés kapacitásnak.

$$C_T = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{S} \quad S_p = \sqrt{\frac{2\epsilon}{qN_a}} \sqrt{U_D - U}$$

$$C_T = \frac{const}{\sqrt{U_D - U}}$$



### PÉLDA:

Számítsuk ki a Si dióda tértöltési kapacitását, ha a kiürített réteg szélessége 0,33  $\mu\text{m}$  és a dióda felülete 0,02  $\text{mm}^2$ .

$$C_T = \epsilon \frac{A}{S} = 11,8 \cdot 8,86 \cdot 10^{-12} \frac{2 \cdot 10^{-8}}{0,33 \cdot 10^{-6}} = 6,34 \cdot 10^{-12} \text{ F} = 6,34 \text{ pF}$$

Számítsuk ki a diffúziós kapacitást az  $I=1 \text{ mA}$  munkapontban, ha  $\tau=100 \text{ ns}$ .

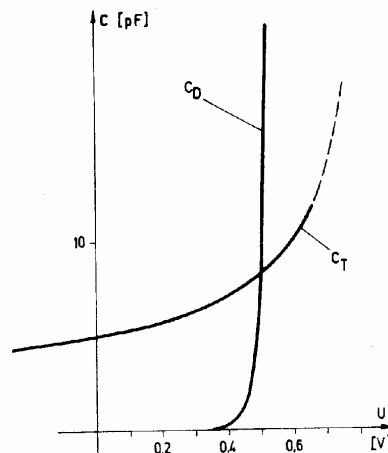
$$C_D = \tau \frac{I}{U_T} = 10^{-7} \frac{10^{-3}}{0,026} = 3,85 \cdot 10^{-9} \text{ F} = 3,85 \text{ nF}$$

### Nagyságrendek:

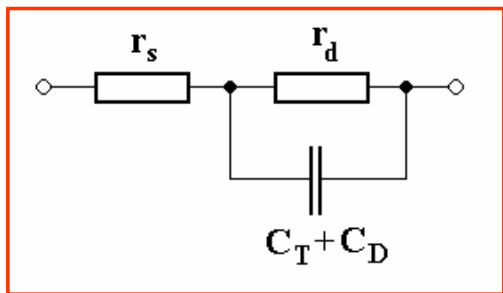
CT 1-10 pF

CD nF-ok

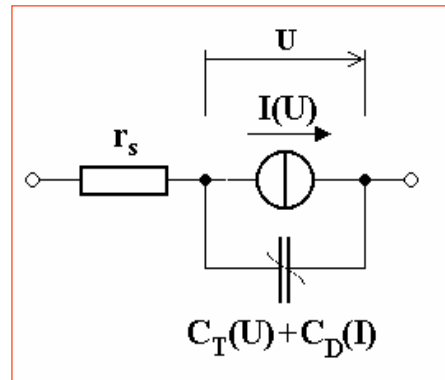
(egy kis teljesítményű diódára)



h) A dióda kisjelű helyettesítőképe:

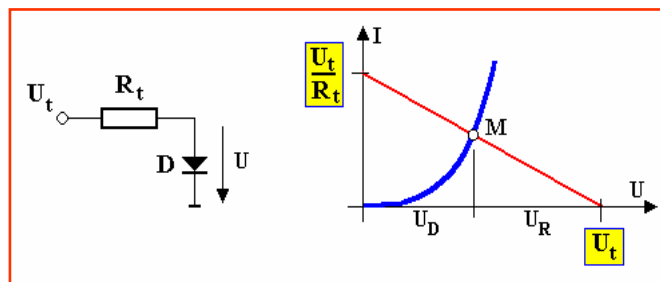


i) A dióda nagy jelű helyettesítő képe:



Mindegyik elem munkapontfüggő.

j) A munkaegyes szerkesztése: (a fő gond: egy lineáris ill. egy nem lineáris elem sorba kapcsolása)  
grafikus megoldás:



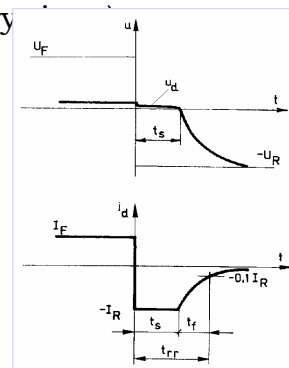
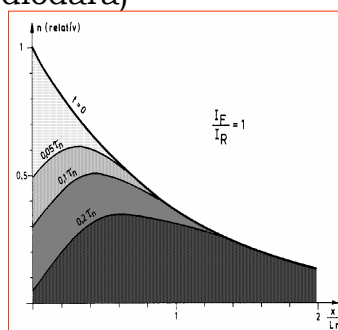
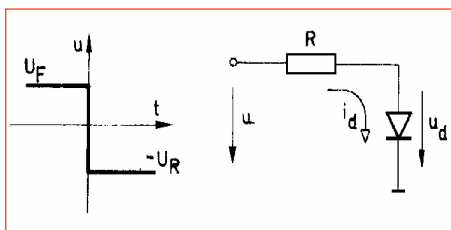
Tudjuk hogy ha a munkapont vagy az  $U_t$  változik akkor a munkaegyes önmagával párhuzamosan mozdul el.

Ezzel szemben ha  $R_t$  változik akkor a meredeksége fog változni.

(az az  $U_t$  pont körül fordul el az egyenes)

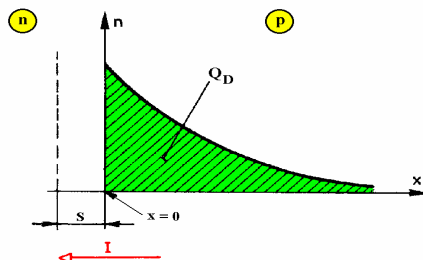
k) A dióda kapcsoló működése:

Nem igazán tekinthető ideálisnak mivel ha a nyitó tartományból a záró tartományba szeretnénk kapcsolni akkor dióda kapacitások miatt még véges ideig vezetni fog. Ez a záróirányú feléledési jelenség. Záróirányú feléledési idő ( Reverse recovery  $t_{rr}$  (2-3 ns egy gyors diódára)



l) A dióda tranziens működése:

A dióda áram két dologra fordítódik: a rekombináció pótlására ill. a töltés növekményre / fogyasztásra.



$$I = \frac{Q_D}{\tau_{n(p)}} + \frac{dQ_D}{dt}$$

Ugye eddig hallgatólagosan feltételeztük hogy a jelváltozások lassabbak mint a dióda saját tranziensei.

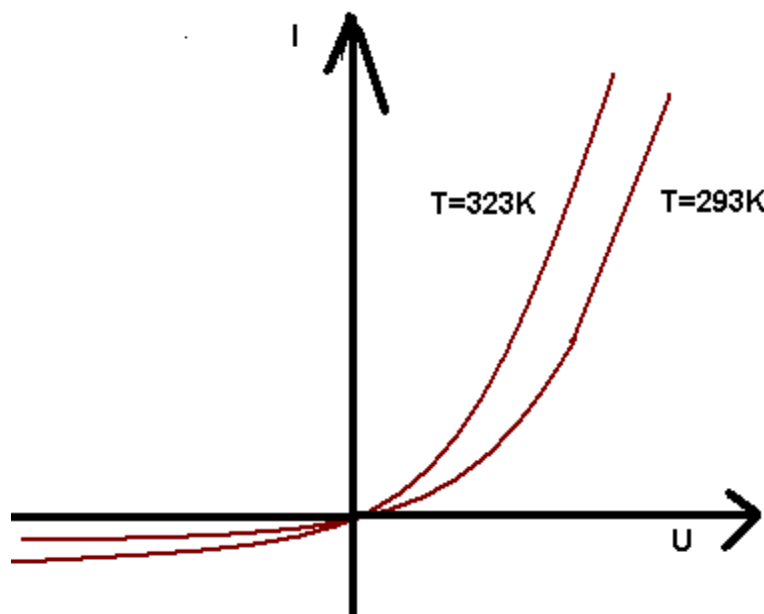
Tehát a kimenet statikusan függött a bemenettől és a dióda dinamikus tulajdonságaitól meg nem. Sajnos már a MHz-es tartományba nem hanyagolhatjuk el a dióda tulajdonságait.

Ilyen tranziens jelenségek még a a bekapcsolás ill. a kikapcsolás

m) A pn átmenet hőmérsékletfüggése:

Záróirányban a Si dióda árama erősen függ a hőmérséklettől, mivel meredeken emelkedik a növekvő hőmérséklettel.

Nyitóirányban pont fordított a helyzet, itt növekvő hőmérséklettel csökken a dióda nyitófeszültsége, kb.  $-1.7\text{mV}/^\circ\text{C}$



#### 4) A Bipoláris tranzisztor:

##### a) A bipoláris tranzisztor felépítése:

2 db PN átmenetet kell elképzelni néhány  $\mu m$  közelségben, Ennek következtében nem függetlenek az átmenetek egymástól. Befolyásolják egymás áramát és vezérelni képesek egymást.

Kétféle elrendezés létezik: npn, pnp

Mi általában csak az npn tranzisztor működését nézzük meg.

Az alábbi ábrán egy planáris (BJT= bipolar junction tranzisztor) tranzisztort láthatunk.

Elviekben szimmetrikus az elrendezés, de gyakorlatban nem az.

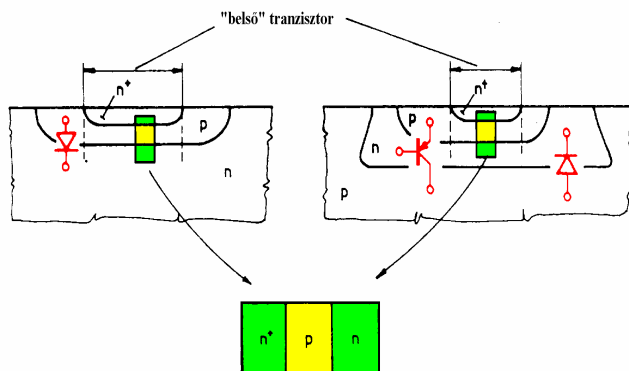
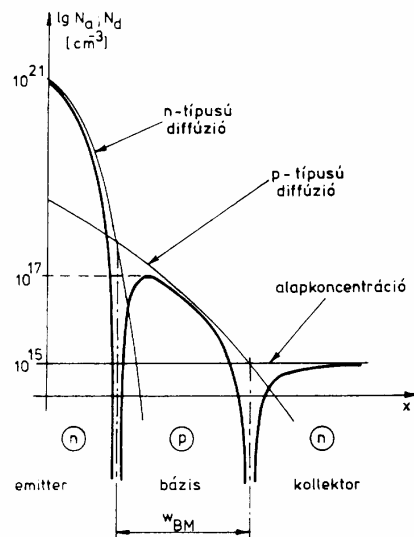
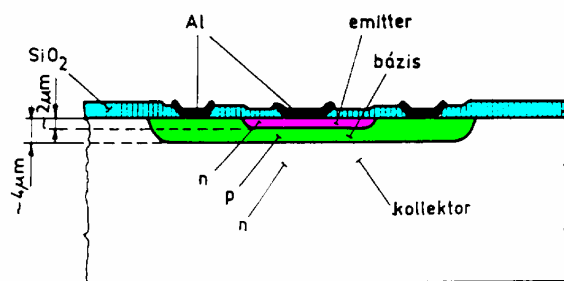
Ugye diffúzióval állítjuk ezt is elő. Először az n rétegre egy p réteget diffundálnak az ablakon át, ezzel kialakítva az első pn átmenetet, majd ezután ismét diffúzióval egy n típusú réteget, aminek kisebb a mélysége mint az első diffúzióé. Majd ismét az ablakon át kialakul a második pn átmenet.

Az alábbi ábra mutatja az egyes rétegek koncentrációjának, adalékolásának mértékét, ahol a  $W_{BM}$  a metalurgiai bázisvastagság.

Planáris tranzisztor esetében a bázis, emitter és kollektor elnevezések használatosak. Az emitter a legfelső réteg a bázis a középső és a legalsó, az alapelem a kollektor.

A tranzisztorokban tulajdonképpen a hasznos az az aktív rész, ahol szemben áll a két PN átmenet. EB közti ill. a CB közti.

A következő ábrán látszik a diszkrét esetben ill. az IC esetén hogy néz ki az említett rész:



A tranzisztor működésének feltételei tömören: Legalább az egyik szélső réteg (az emitter) nagyságrendekkel erősebben adalékolt legyen, mint a középső ill. a középső réteg (bázis) sokkal vékonyabb legyen, mint a kisebbségi töltéshordozóinak diffúziós hosszúsága.

#### b) A bipoláris tranzisztor működése:

##### A tranzisztor hatás:

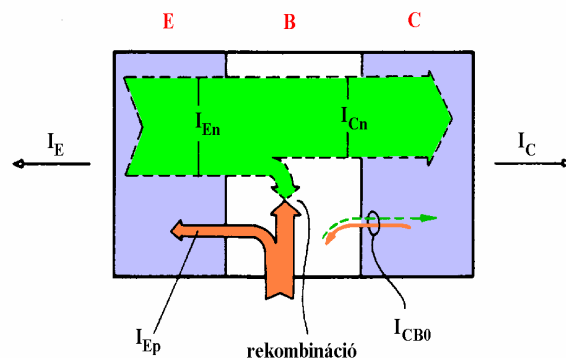
Mint már korábban is láttuk két db PN átmenetből áll, ami a tőlük elvárható sajátosságokkal bír: nyitóirányban kis feszültség mellett nagy áramot vezetnek, míg záróirányban meglehetősen nagy feszültség értékekig egészen csekély záróáram folyik. Azonban a tranzisztor több mint két dióda együttese. Ezt egy izzólámpás kísérlettel igazolni tudjuk, ezt a következtetés vonhatjuk le hogy nem ekvivalens a kettő. A tranzisztor hatásnak pedig azt a mechanizmust nevezzük, melynek útján a baloldali PN átmenet nyitóárama befolyásolni tudja a jobboldali átmenet záróáramát.

Ezt egy ábrán is szemléltetjük a tranzisztor normál aktív tartományban az áramait:

A baloldali pn átmenet nyitófeszültség hatására elektronáramot injektál a középső rétegbe. Az elektronok egy része találkozik a bázisvezetéken beáramló lyukakkal és rekombinálódik. A fentmaradó rész eljut a jobboldali átmenethez és átsodródva rajta hozzáadódik a záróáramhoz. Minál több halad át, és nem rekombinálódik annál jobb a tranzisztor.

Ez a leggyakoribb működése, amikor az emitter oldali PN átmenet nyitva, a másik zárva.

##### Az áramerősítés:



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

$$A = \frac{I_{CN}}{I_E} \text{ áramerősítés}$$

Injektált hatásfok:  $\eta_e = \frac{I_{En}}{I_E}$   $\frac{(\text{Bázisba injektált elektron áram})}{(\text{teljes emitter áram})}$

Transzport hatásfok:  $\eta_{tr} = \frac{I_{Cn}}{I_{En}}$   $\frac{(\text{kollektorig eljutott elektronáram})}{(\text{bázisba injektált elektronáram})}$

E kettőt összetéve kapjuk az áramerősítést, mivel az emitter és a transzport hatásfok szorzata:

$$A = \frac{I_{CN}}{I_E} = \eta_e \cdot \eta_{tr}$$

### PÉLDA:

Beépített tér számítása:

$$U_B = U_T \cdot \ln \frac{N_B(0)}{N_B(W_B)} \quad \text{Számítsuk ki a bázis beépített potenciálját az alábbi adatok ismeretében:}$$

$$N_B(0) = 10^{17} \frac{1}{\text{cm}^3} \quad N_B(W_B) = 10^{15} \frac{1}{\text{cm}^3}$$

$$U_B = 0.026 \cdot \ln \left( \frac{10^{17}}{10^{15}} \right) = 0.026 \cdot \ln 100 = 0.12 \text{ V} = 120 \text{ mV}$$

Emitter hatásfok számítása:

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

Transzport hatásfok számítása:

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

### PÉLDA:

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

$$N_E = 10^{19} / \text{cm}^3, \quad w_E = 2 \text{ } \mu\text{m},$$

$$N_B = 4 \cdot 10^{16} / \text{cm}^3, \quad w_B = 1,5 \text{ } \mu\text{m},$$

$$D_n = 0,0026 \text{ m}^2/\text{s}, \quad D_p = 0,0011 \text{ m}^2/\text{s}, \quad \tau_n = 10^{-6} \text{ s}.$$

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

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

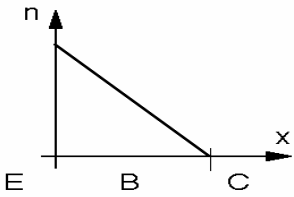
$$A = \eta_e \eta_{tr} = 0,9982$$



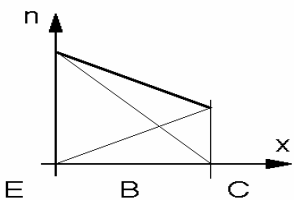
c) A tranzisztor üzemmódjai:

|                       |        | <i><b>EB átmenet</b></i> |                           |
|-----------------------|--------|--------------------------|---------------------------|
|                       |        | nyitott                  | zárt                      |
| <b>CB<br/>átmenet</b> | nyitva | <i><u>Telítéses</u></i>  | <i><u>Inverz akt.</u></i> |
|                       | zárva  | <i><u>Normál</u></i>     | <i><u>Lezárás</u></i>     |

*Normál aktív ahogy eddig néztük*



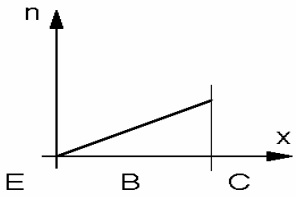
a.)



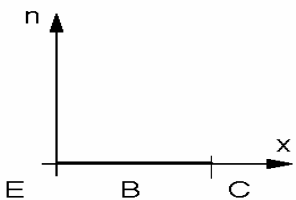
c.)

Telítéses

*Inverz aktív*



b.)



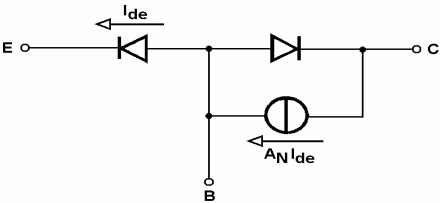
d.)

Lezárásos

d) Ebers- Moll Modell:

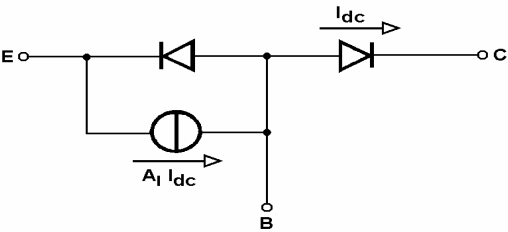
x Helyettesítés a normál aktív beállításban:

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

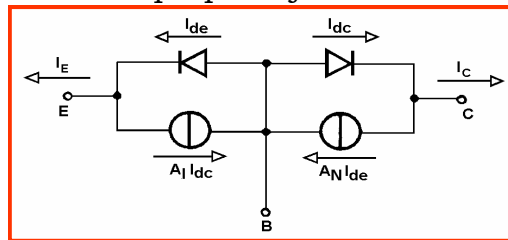


x Helyettesítés az inverz aktív beállításban:

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



x Telítéses helyettesítőt úgy kapjuk hogy a kettőt szuperponáljuk:



Ebers-Moll egyenletek:

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

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

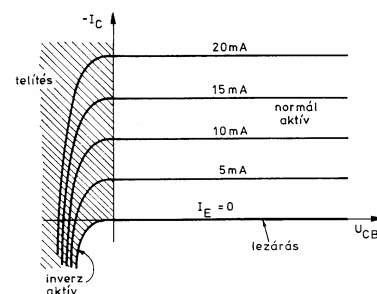
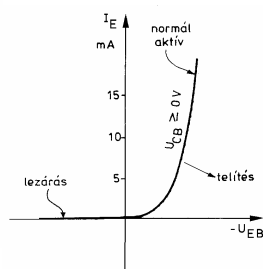
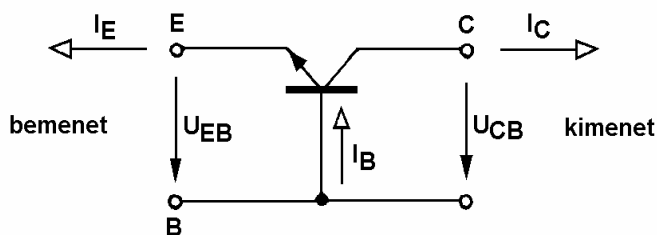
$$\frac{I_{ES}}{I_{CS}} = \frac{A_I}{A_N}$$

Ugyanaz mátrix alakban így néz ki:

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

e) Tranzisztor karakterisztikái:

Közös bázisú alapkapcsolás:



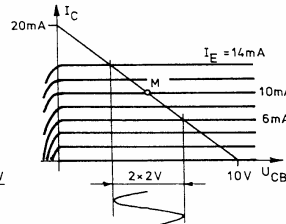
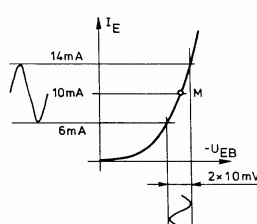
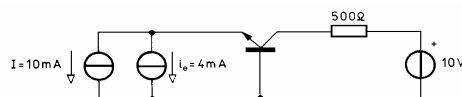
Az erősítés folyamata:

$$r_d = \frac{U_T}{I_E} = \frac{26 \text{ mV}}{10 \text{ mA}} = 2,6 \Omega$$

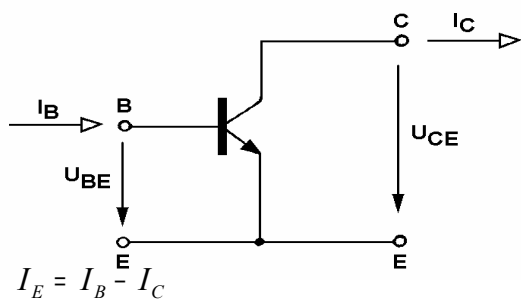
$$u_{be} = i \cdot r_d = 4 \text{ mA} \cdot 2,6 \Omega = 10,4 \text{ mV}$$

$$u_{ki} = i \cdot R_t = 4 \text{ mA} \cdot 500 \Omega = 2000 \text{ mV}$$

$$A_u = \frac{u_{ki}}{u_{be}} \approx \frac{2000}{10} = 200$$



## Közös emitteres alapkapcsolás:



$$U_{CES0} = U_T \ln \frac{1}{A_I}$$

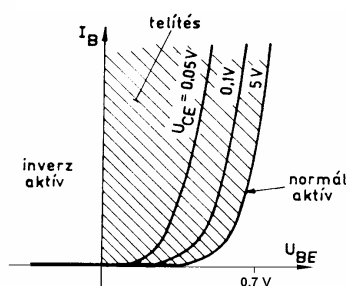
A telítés határa:

$$\begin{aligned} U_{BC} &= 0 \\ U_{BE} &= U_{CE} \end{aligned}$$

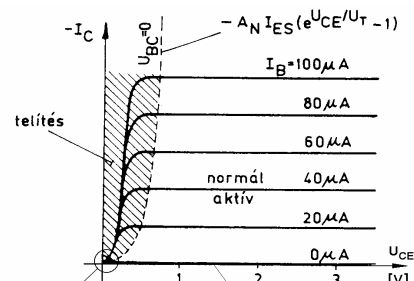
B: közös emitteres  
nagyjelű áramerősítés

$$I_C = -B_N I_B - I_{CE0}$$

$$B_N = \frac{A_N}{1 - A_N}$$



a.)



b.)

## f) Valóságos tranzisztor karakterisztikák:

Ilyenkor foglalkozunk a másodlagos hatásokkal is:

- × Parazita CB dióda
- × Soros ellenállások
- × Early hatásokkal
- × Áramkiszorítás
- × Az áramerősítés munkapontfüggése

### Parazita CB Dióda:

A planáris tranzisztor kapcsán elkerülhetetlen, hogy a kollektor bázis átmenettel párhuzamosan jelen legyen a parazita átmenet. Mint ahogy az az ábrán is láthatjuk hogy párhuzamosan lesz a CB -vel, tehát ha a CB nyitva, akkor ez is vezet, áramot injektál. De sajnos az utóbbinál nincs emitter és ezért veszendőbe megy, ezzel rontva a tranzisztor működését.

$$U_{CES0} = U_T \ln \frac{1}{A_I}$$

### Soros ellenállások hatása:

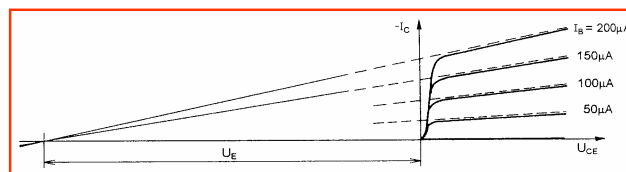
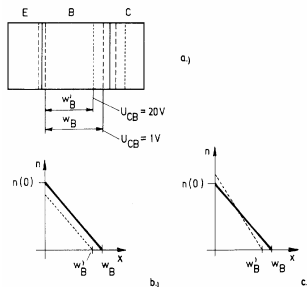
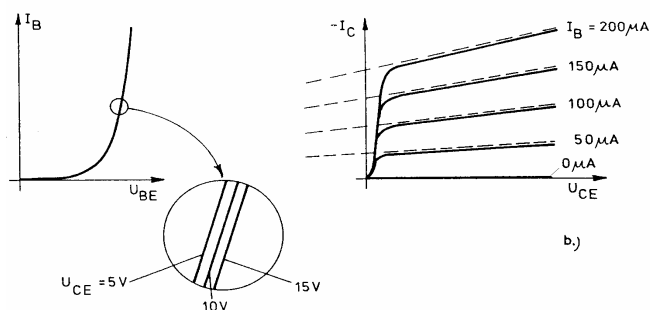
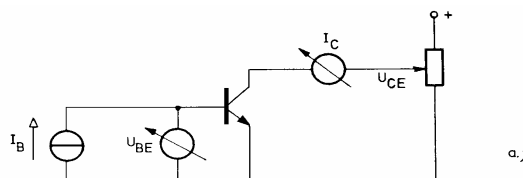
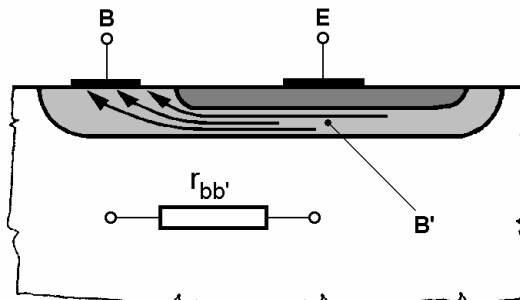
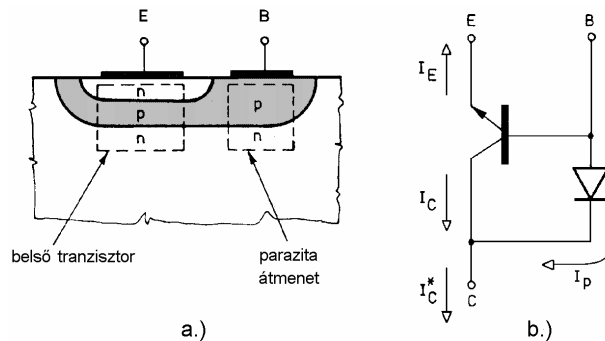
Ahogy a PN átmenetnél itt sem lehet elhanyagolni , hogy az eszköz aktív térfogata és a kivezetések között kisebb nagyobb kiterjedésű passzív félvezető zónák vannak jelen, amiknek az ellenállása nem elhanyagolható. Elvileg mindhárom kivezetésnél számolhatunk ilyenekkel. Illetve még számolnunk kell egy bázisköri soros ellenállással, ami meglehetősen nagy. Nem csökkenthető mivel, mivel ha növelnénk az adalékolást (közepesről erősen adalékoltra), akkor az injektálási hatások romlana.

### Early hatás:

( Kimenő vezetés és visszahatás )

Ezt a kísérletet elvégezve, azt kaphatjuk, hogy  $I_C$  nagyjából arányos  $U_{CE}$ -vel. Továbbá azt is megfigyelhetjük hogy ha a kollektor feszültséget növeljük nőni fog a bázis és emitter között mérhető feszültség is.

Ez a hatás nem túl erős, de azért észlelhető. Összegezve: a kimenő feszültség hat a bemenő feszültségre. Ezt nevezzük visszahatásnak



### PÉLDA:

Mekkora a földelt emitteres kimeneti ellenállása a tranzisztornak, ha az Early feszültség 80 V és a munkaponti kollektoráram 5 mA?

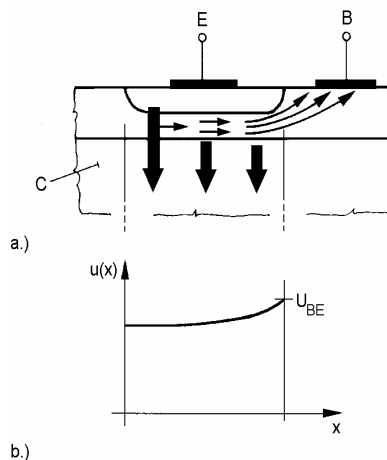
$$r_{ki} = \frac{U_E}{|I_C|} \quad r_{ki} = \frac{80 \text{ V}}{5 \text{ mA}} = 16 \text{ k}\Omega$$

### Áramkiszorítás:

Ebben az esetben arra a hatásra gondolunk, amikor azt feltételeznénk hogy a tranzisztor árama az emitteren egyenletesen oszlik meg, tehát a tranzisztor szektor egyformán vezet. Kis áramsűrűségek esetén ez így is van, de ez már nem lesz így nagy áramsűrűségek esetén. De ebben az esetben az emitter területén sokkal nagyobb lesz az áramsűrűség. Ezt a hatást nevezzük áramkiszorításnak.

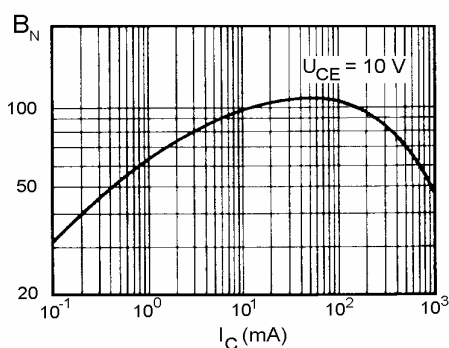
### Az áramerősítés munkapontfüggése:

Akár a KB, akár a KE kapcsolást tekintjük, azt tapasztalhatjuk hogy a gyakorlati tranzisztorok esetében a paraméterek értéke nem állandó, hanem függ a munkapontbeli feszültségtől és annak áramától.



A feszültségfüggést már az Early hatás kapcsán láthattuk. (a kollektorfeszültség befolyásolja az effektív bázis szélességét, ez utóbbi pedig mind az injektálási, mind a transzport hatásfokkal összefügg.

Az áramfüggés, pedig az áramerősítés függésére utal. Az alábbi ábrán láthajuk hogy egész más az erősítés a különböző tartományokban:

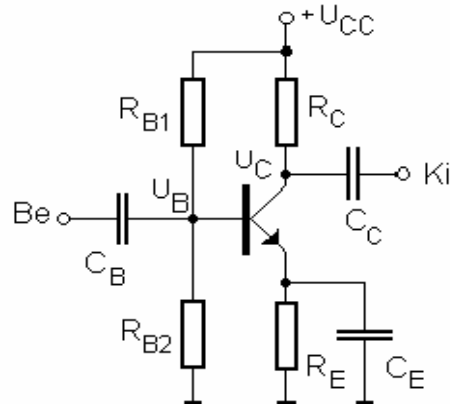
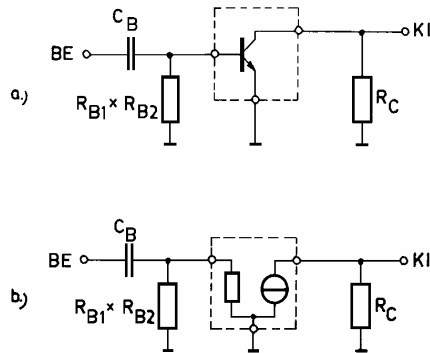


g) Kisjelű helyettesítő képek, kapacitások:

A kisjelű működés jellege: a munkaponti beállításhoz képest kis megváltozások

$$U_B = U_t \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \quad U_C = U_t - I_C \cdot R_C \approx U_t - I_E \cdot R_C$$

$$I_E \approx \frac{U_B - 0,7}{R_E}$$



Feszültséggenerátor, nagy kapacitás: rövidzár  
Áramgenerátor: szakadás

“Fekete doboz” (négy pólus)

Helyettesítő képek fajtái:  $h$  paraméteres vagy  $y$  paraméteres vagy  $s$  paraméteres

Fizikai:

“kételemes”

“háromelemes”

“ötelemes”

Lássuk most ábrákkal is: Kételemes

FB:  $I_E$  arányosan vezérli  $I_C$ -t

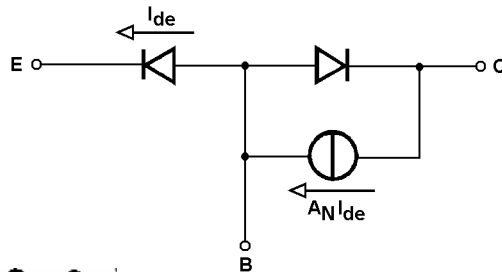
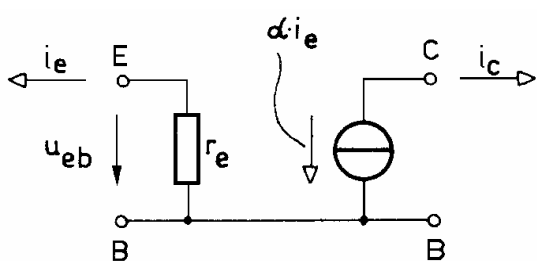
$$\alpha = - \frac{\partial I_C}{\partial I_E} = - \frac{i_c}{i_e}$$

$$-u_{eb} = r_e i_e$$

$$-i_c = \alpha i_e$$

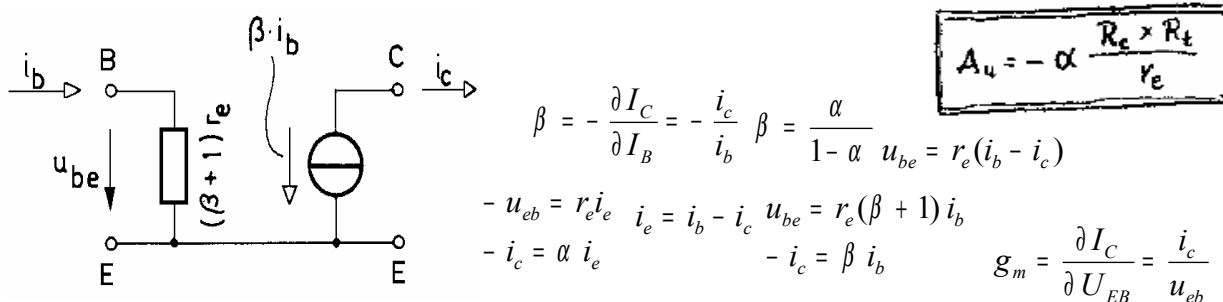
véges bemeneti ellenállás

$$r_e = \frac{dU_{BE}}{dI_E} = \frac{U_T}{I_E}$$

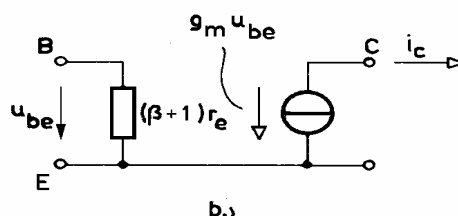
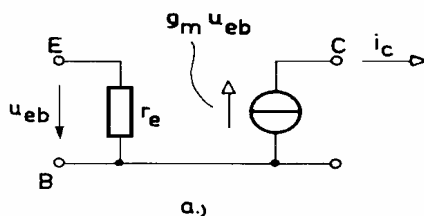


$$A_u = \frac{u_{ui}}{u_{se}} = \frac{-\alpha i_e (R_C \times R_t)}{-i_e r_e} = \alpha \frac{R_C \times R_t}{r_e}$$

## Kételemes FE:



Összegezve:



## PÉLDA:

Egy tranzisztor kisjelű áramerősítési tényezője az  $I_E = 1 \text{ mA}$  munkapontban  $\beta = 200$ . Határozzuk meg a kételemes közös bázisú és közös emitteres helyettesítőkép elemértékeit!

## FÖLDELT BÁZISU:

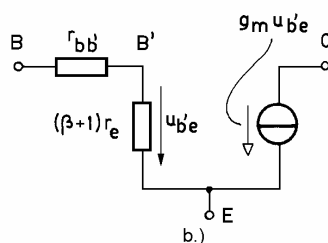
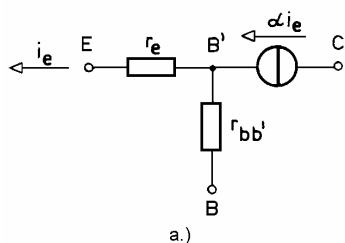
$$r_e = \frac{U_T}{I_E} = \frac{26 \text{ mV}}{1 \text{ mA}} = 26 \Omega$$

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} = \frac{200}{201} = 0,995$$

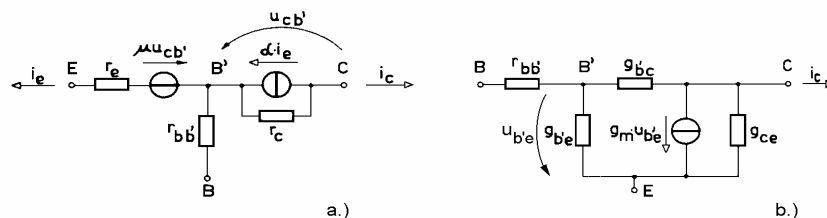
## FÖLDELT EMITTER:

$$r_e(\beta + 1) = 26 \cdot 201 \approx 5200 \Omega$$

## Háromelemes helyettesítő képek:

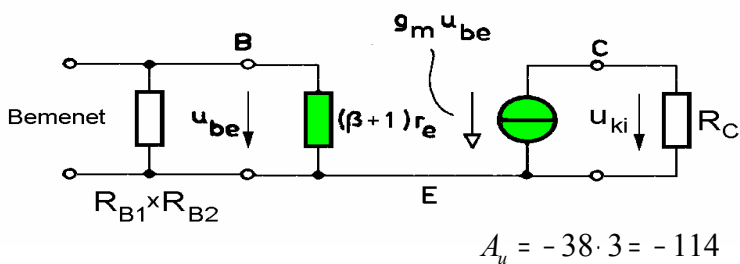
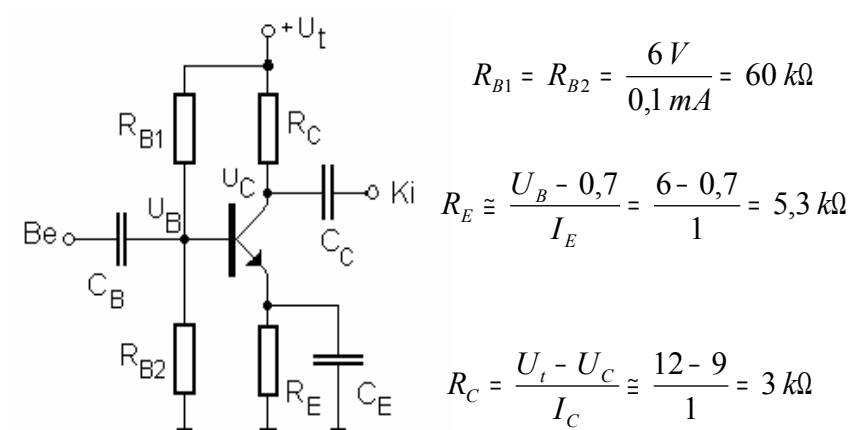


## Ötelemes helyettesítő képek:



**PÉLDA:** Határozzuk meg az alábbi kapcsolás erősítését és bemeneti ellenállását!

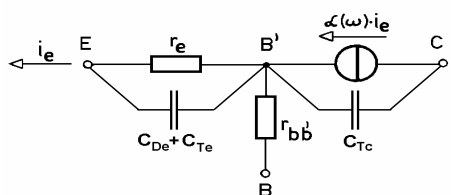
Adatok:  $\beta = 200$ ,  $U_t = 12 \text{ V}$ ,  $U_B = 6 \text{ V}$ ,  $I_E = 1 \text{ mA}$ , a bázisosztó árama  $0,1 \text{ mA}$ ,  $U_C = 9 \text{ V}$ .



$$A_u = \frac{u_{ki}}{u_{be}} = \frac{-g_m \cdot u_{be} \cdot R_C}{u_{be}} = -g_m \cdot R_C$$

$$g_m = \frac{I_C}{U_T} \approx \frac{I_E}{U_T} = \frac{1 \text{ mA}}{0,026 \text{ V}} = 38 \text{ mA/V}$$

A kapacitások figyelembe vétele:



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

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

$T_0 = a$  bázis áthaladási idő

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

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



### A négypólus helyettesítő képek:

|                                                                                                           |                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| $h_{11} = \left. \frac{u_1}{i_1} \right _{u_2=0} = \left. \frac{dU_1}{dI_1} \right _{U_2=\text{állandó}}$ | a bemeneti ellenállás rövidrezárt kimenet mellett |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|

|                                                                                                           |                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| $h_{12} = \left. \frac{u_1}{u_2} \right _{i_1=0} = \left. \frac{dU_1}{dU_2} \right _{I_1=\text{állandó}}$ | a feszültség visszahatás szakadt bemenet mellett |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|

|                                                                                                           |                                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| $h_{21} = \left. \frac{i_2}{i_1} \right _{u_2=0} = \left. \frac{dI_2}{dI_1} \right _{U_2=\text{állandó}}$ | az áramerősítés rövidrezárt kimenet mellett |
| $h_{22} = \left. \frac{i_2}{u_2} \right _{i_1=0} = \left. \frac{dI_2}{dU_2} \right _{I_1=\text{állandó}}$ | a kimeneti vezetés szakadt bemenet mellett  |

### PÉLDA:

Határozzuk meg a  $h_{21e}$  és a  $h_{22e}$  paramétereket az  $I_c=50 \text{ mA}$ ,  $U_{CE}=20 \text{ V}$  munkapontban!

$$h_{21e} = \frac{66 - 36 \text{ mA}}{0,2 - 0,1 \text{ mA}} = 300 \qquad h_{22e} = \frac{57 - 44 \text{ mA}}{30 - 10 \text{ V}} = 0,65 \text{ mS}$$

### Nagyfrekvenciás működés:

A tranzistor határfrekvenciái:

Az a freki ahol a tulajdonságok romlanak

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

$$f_\beta = (1 - \alpha_0) f_\alpha = f_\alpha / (\beta_0 + 1)$$

$$f_1 \approx \beta_0 \cdot f_\beta \approx f_\alpha$$

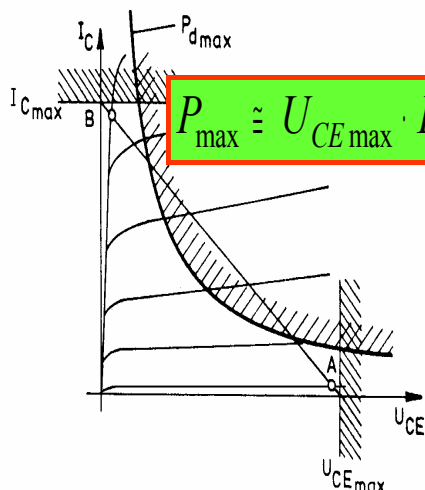
### Kapcsoló üzemű működés:

Ilyenkor mindig meg kell gondolni, hogy mekkora teljesítményt és mekkora idő alatt kell kapcsolni. Továbbá vannak bizonyos határadatok amit nem lehet túllépni:

#### PÉLDA:

A BD 442 tranzisztorra  $P_{dmax} = 36 \text{ W}$ ,  $U_{CEmax} = 80 \text{ V}$ ,  $I_{Cmax} = 4 \text{ A}$ . Mekkora az optimális terhelő ellenállás és mekkora a maximális kapcsolható teljesítmény? Legalább mekkora bázisáram kell a bekapcsoláshoz, ha  $B=80$ ?

$P_{dmax}$   
disszipációs  
hiperbola  
rövid időre  
túlléphető



$$R_{topt} = \frac{U_{CEmax}}{I_{Cmax}} = \frac{80 \text{ V}}{4 \text{ A}} = 20 \Omega$$

$$P_{max} \approx U_{CEmax} \cdot I_{Cmax} = 80 \text{ V} \cdot 4 \text{ A} = 320 \text{ W}$$

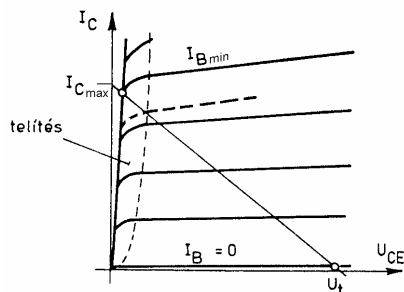
$$P_d \approx 4 \text{ A} \cdot 0,1 \dots 0,3 \text{ V} = 0,4 \dots 1,2 \text{ W}$$

#### PÉLDA:

A BD 442 tranzisztorra  $P_{dmax} = 36 \text{ W}$ ,  $U_{CEmax} = 80 \text{ V}$ ,  $I_{Cmax} = 4 \text{ A}$ . Mekkora az optimális terhelő ellenállás és mekkora a maximális kapcsolható teljesítmény? Legalább mekkora bázisáram kell a bekapcsoláshoz, ha  $B=80$ ?

n: túlvezérlési tényező

$$n = \frac{I_B}{I_{Bmin}} = 2 \dots 5 \quad I_{Bmin} = \frac{I_{Cmax}}{B} = \frac{4 \text{ A}}{80} = 50 \text{ mA}$$



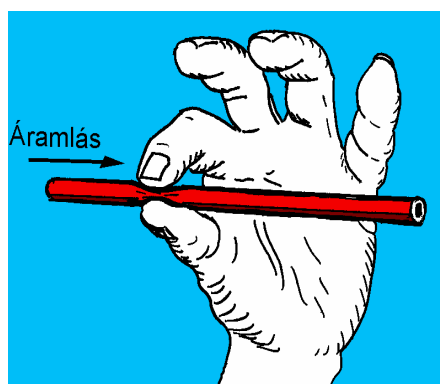
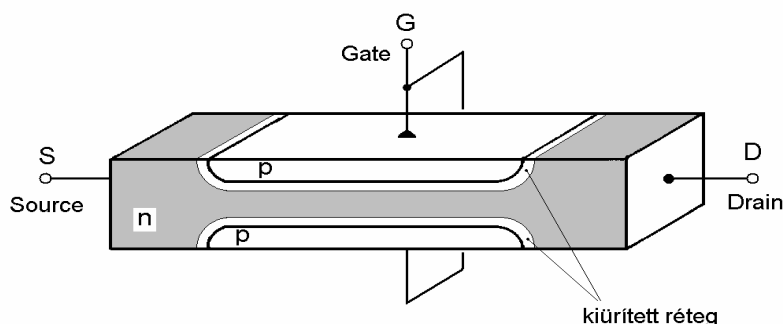
## Térvezérelt tranzisztorok (FET-ek Field Effect Tranzisztor-ok):

### Működési elv:

Mint ahogy az előző fejezetekben láthattuk a bipoláris tranzisztorokat árammal (az emitter vagy bázis árammal vezérelhetjük, szemben ezzel, a tervezérelt tranzisztorokat elektromos térerősség, feszültség vezérli. Ezeket az eszközöket olyan ellenállásoknak tekinthetjük, amelyeknek a keresztmetszete a merőleges térrel vezérelhető.

Szemléltethetjük:

Most ezt valósítsuk meg félvezetők esetében  
(az ábrán egy J-FET, záróréteges FET látható):



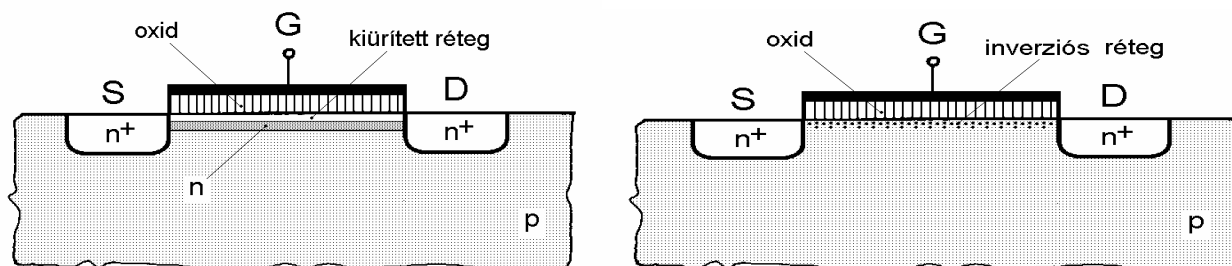
Ugye veszünk egy n típusú félvezető hasábot a két végén ohmos kontaktussal és a felső és alsó részén p típusú adalékkal látjuk el és így alakulhat ki a pn átmenet. Ennek a kiürített rétege leszűkíti a kiürített réteg vastagságát, de ezzel szemben ha zárófeszültséget kapcsolunk rá akkor meg kiszélesedik. Az eszközt el is lehet zárni, megközelítőleg 2..4V-os feszültséggel. Tehát látjuk hogy az áramvezérlés ténylegesen a merőleges térerősséggel történik. Tehát jogos az elnevezés. Az eszköz bemeneti ellenállása  $\sim 100 \text{ M}\Omega$  feletti tartományba esik.

Továbbá abban is különböznek a bipoláris tranzisztoroktól a tervezérelt tranzisztorok, hogy itt csak a többségi töltéshordozók játszanak szerepet a működésben. Ezért is szokták őket unipoláris tranzisztoroknak nevezni . (továbbá pozitívumnak tekinthető még a kicsi a hőfüggés is )

### Megnevezések:

Az áram útjának azt a részét, ahol a keresztirányú erőter vezérlő hatást fejt ki *csatornának* nevezzük. A csatorna egyik végét, ahonnan a töltéshordozók jönnek *source*-nak (forrás), a csatorna másik végét, ahova érkezeknek *drain*-nek (nyelő) nevezzük . A kereszt irányú erőteret létrehozó elektróda, a *gate* vagy *vezérlőelektróda* .

Azokat a típusú FET-eket, amelyeknél az áramot az elektronok szállítják azokat n-vezetési FET tranzisztoroknak nevezzük, de itt is létezik p típusú is. Ugyanúgy itt is a két fajta komplementere egymásnak. De további változatok is léteznek. Manapság igen elterjedt a MOS FET tranzisztor, amelyeknél a vezérlés szerepét nem a pn átmenet,



hanem egy fém oxid félvezető (Metal Oxid Semiconductor) síkkondenzátor szerkezet veszi át. Ilyen tranzisztorok vázlatát láthatjuk a következő ábrákon:

Kétféle alaptípus létezik a kiürítési ill. a növekményes (jobb ill. bal oldali).

Ugye a baloldali ábrán egy p alaprétgre egy  $n^+$  réteggel hozzák létre a source és a drain elektróda területét. Ugye a csatorna felett egy vékony szigetelő oxid réteg található és a felett a vezető elektróda ezzel kialakult a gate is. (működési elve hasonló a JFET-hez, mivel kellően nagy zárófeszültséggel a csatorna elzárható, csak itt nem pn átmenet van, hanem oxidos)

Ha a jobboldali ábrát tekintjük, akkor az előzőhöz képest annyi a különbség, hogy nem hoztunk létre a source és a drain között csatornát. Úgy gondolhatnánk hogy nem folyhatna áram, de mégis lehetséges, mivel a félvezetőknek van egy olyan tulajdonsága, amit inverziónak nevezünk. Ennek a felületi jelenségnek az a magyarázata hogy ha a vezetőelektródára kellően nagy pozitív feszültséget adunk, akkor olyan potenciál viszonyok alakulnak ki az oxid réteg alatt, hogy az elektronok lesznek többségben. Ez a rész igen gyorsan kialakul, feltelik elektronokkal és létrejön a csatorna. ( $\ll 1\text{ns}$ ). Azt a gate feszültséget aminél ez kialakul küszöbfeszültségnek nevezzük. ( $U_T = U_{\text{Threshold}} = 0,4 \dots 0,7 \text{ V}$ )

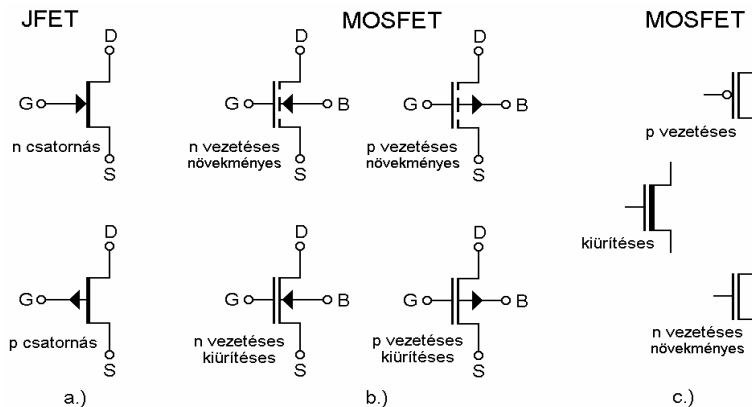
Létezik még egy felületi jelenség is az akkumuláció, ez akkor jelentkezik, ha egy p típusú félvezetőben igen nagy számban lévő pozitív lyukak áramlanak a felülethez és ott az egyensúlyinál nagyobb sűrűséget hoznak létre. A töltéshordozók ilyen típusú felgyülemlését hívják akkumulációnak.

Fontos jelenség még az erős inverziós határ, ami akkor áll elő, ha a felületen éppen annyi az inverziós töltések sűrűsége, mint az anyagban a többségieké.

$$U_F = 2 \cdot \Phi_F = 2 \cdot U_T \cdot \ln \frac{N_a}{n_i}$$

További jó tulajdonságuk a MOSFET-eknek, hogy még a JFET-ekhez képest is nagy a bemeneti ellenállásuk:  $10^{12} \Omega$ , de sajnos ennek van egy nagy hátránya is hogy a dörzselektromos feszültséget nem képes elvezetni és tönkremehet.

## Tranzisztor jelölések:



## A MOS FET struktúra potenciál viszonyai:

A teljes  $U_{GB}$  potenciál lépcső három részből tevődik össze: az első az oxidon eső feszültség, a második a félvezető belseje és a felülete közötti potenciálkülönbség (felületi potenciál), és a harmadik az érintkezési potenciálkülönbség.

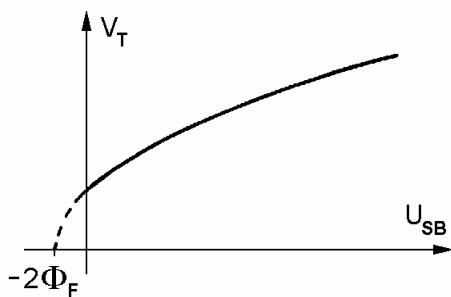
$$U_{GB} = U_{OX} + U_F + \Phi_{MS}$$

(  $Q_i$  az inverziós réteg töltése,  $C_0$  oxid kapacitás, )

$$Q_i = C_0(U_{GB} - U_F - \Phi_{MS}) - \sqrt{2\epsilon_s q N_a} \sqrt{U_F + U_{SS}}$$

## MOS tranzisztor küszöbfeszültsége:

$$V_T = U_{GS}|_{Q_i=0} \quad V_T = 2\Phi_F + \Phi_{MS} - \frac{Q_{SS}}{C_0} + \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_a}}{C_0} \sqrt{2\Phi_F + U_{SB}}$$



Továbbá megfigyelhetjük, hogy a küszöbfeszültség a konstrukciós adatok mellett még egy elektromos adattól is, az  $U_{SB}$  bulk feszültségtől is függ. A függés mértéke a bulk

$$P = \frac{\sqrt{2\epsilon_s \cdot q \cdot N_a}}{C_0}$$

Mindezekből a következőt kapjuk:  $Q_i = C_0 \cdot (U_{GS} - U_T)$

### PÉLDA:

Egy MOS struktúra adatai:  $N_a = 4 \cdot 10^{15} / \text{cm}^3$ , a Si relatív dielektromos állandója 11,8, az oxidé 3,9, az oxid vastagsága  $d_{ox} = 0,03 \mu\text{m}$ ,  $\Phi_{MS} = 0,2 \text{ V}$ ,  $Q_{SS}$ -t elhanyagoljuk. Számítsuk ki a Fermi potenciált, az oxid kapacitást, a bulk állandót és a küszöb-feszültséget  $U_{SB} = 0 \text{ V}$  mellett!

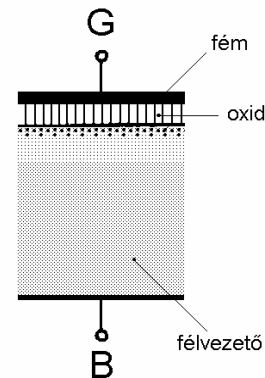
$$\Phi_F = U_T \ln \frac{N_a}{n_i} = 0,026 \cdot \ln \frac{4 \cdot 10^{15}}{10^{10}} = 0,335 \text{ V} \quad C_0 = \frac{\epsilon_{ox}}{d_{ox}} = \frac{8,86 \cdot 10^{-12} \cdot 3,9}{3 \cdot 10^{-8}} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ F/m}^2 = 1100 \text{ pF/mm}^2$$

$$P = \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_a}}{C_0} \quad P = \frac{\sqrt{2 \cdot 8,86 \cdot 10^{-12} \cdot 11,7 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4 \cdot 10^{21}}}{1,1 \cdot 10^{-3}} = 0,331 \text{ V}^{1/2}$$

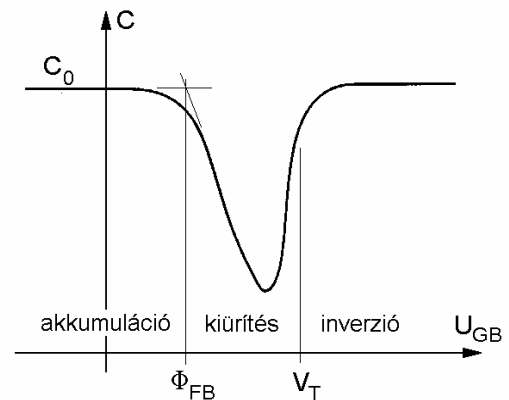
$$V_T = 2\Phi_F + \Phi_{MS} - \frac{Q_{SS}}{C_0} + \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_a}}{C_0} \sqrt{2\Phi_F + U_{SB}} \quad V_T = 2 \cdot 0,335 + 0,2 + 0,331 \sqrt{2 \cdot 0,335} = 1,14 \text{ V}$$

### A C-V görbe:

A MOS szerkezetek tulajdonságainak megállapítására gyakran használják az ún. C-V görbét. Ez egy feszültség és kapacitás függvény, amit kételektrodás MOS kondenzátoron mérünk. A kondenzátorra kapcsolt egyenfeszültséget változtatjuk, miközben mérjük a kapacitását.



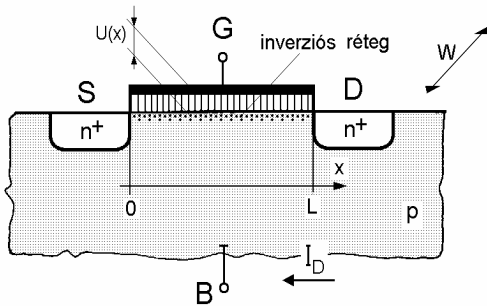
a.)



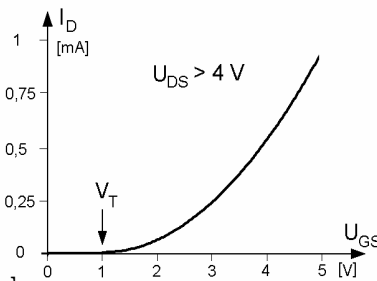
b.)

### A növekményes MOS tranzisztor karakterisztikái:

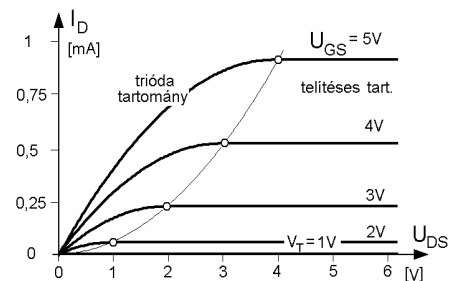
(W=weight, L= length)



$$I_D = \frac{W}{L} \frac{\mu C_0}{2} \left[ (U_{GS} - V_T)^2 - (U_{GD} - V_T)^2 \right]$$



a.)



b.)

$$U_{GD} = U_{GS} - U_{DS}$$

Telítési működés: (ebben az esetben a képlet egyszerűsödik)

**Telítés:**  $U_{GS} < V_T$

**vagy**  $U_{GS} - V_T < U_{DS}$

$$I_D = \frac{W}{L} \frac{\mu C_0}{2} (U_{GS} - V_T)^2$$

### PÉLDA:

Határozzuk meg a  $C_0 = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ F/m}^2$  oxid kapacitású n-MOS tranzisztor áram állandóját! Az elektron mozgékonyaságot  $0,1 \text{ m}^2/\text{Vs}$  értékkel vegyük számításba!

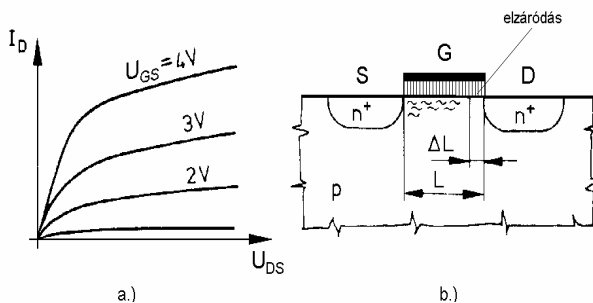
$$I_D = \frac{W}{L} \frac{\mu C_0}{2} (U_{GS} - V_T)^2 \quad K = \frac{\mu C_0}{2} = \frac{0,1 \cdot 1,1 \cdot 10^{-3}}{2} = 55 \cdot 10^{-6} \text{ A/V}^2 = 55 \mu\text{A/V}^2$$

Számítsuk ki, hogy mekkora az előbbi tranzisztor telítési árama  $U_{GS} = 5 \text{ V}$  vezérlő feszültség mellett, ha  $V_T = 1 \text{ V}$  és a tranzisztor mérete  $W = 10 \mu\text{m}$ ,  $L = 0,8 \mu\text{m}$ !

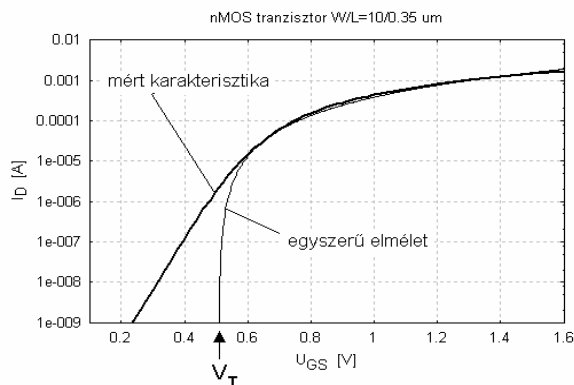
$$I_D = \frac{W}{L} K (U_{GS} - V_T)^2 = \frac{10}{0,8} 55 \cdot 10^{-6} (5 - 1)^2 = 11 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 11 \text{ mA}$$

### Másodlagos jelenségek:

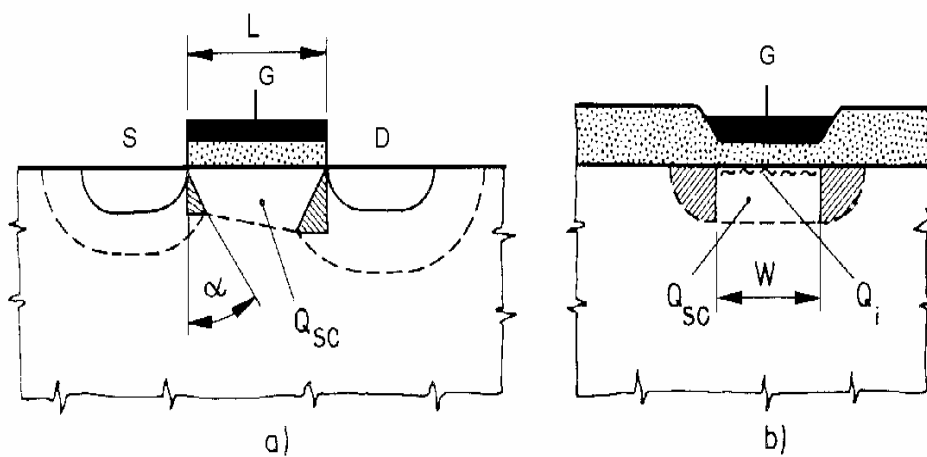
x Csatornarövidülés:



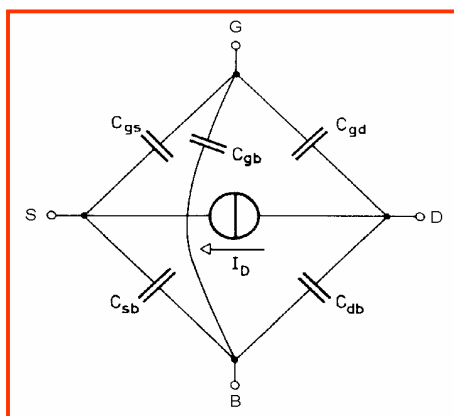
x Küszöb alatti áram:



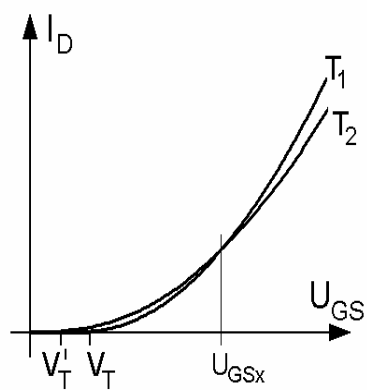
x Küszöbfeszültség függése a geometriától:



x Kapacitások:



x Hőmérsékletfüggés:

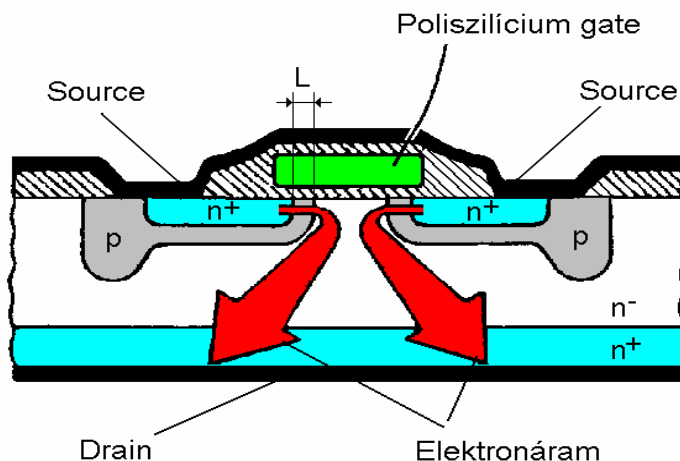




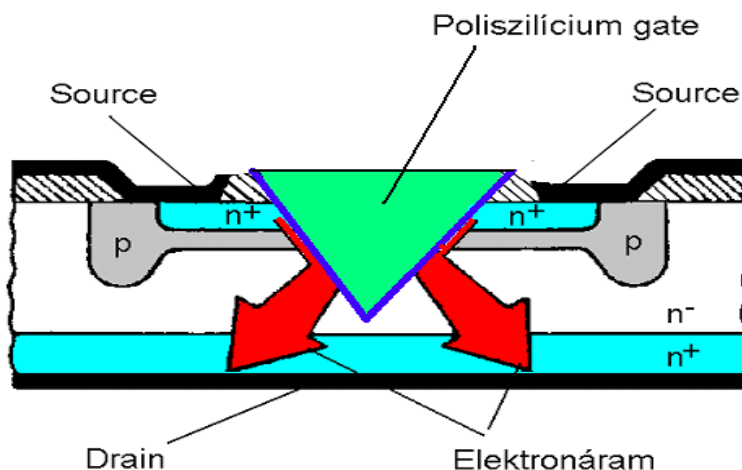
## Teljesítmény MOS tranzisztorok (DMOS)

A növekményes MOS tranzisztorokat gyakran használatosak teljesítmény kapcsoló célra is. Az ehhez szükséges nagy áram különleges felépítést igényel: igen rövid, de nagy csatornaszélességű tranzisztor kell. A nagy csatornaszélességet sok egyforma tranzisztor egymással párhuzamosan kapcsolásával érik el (DMOS).

(ez a szám elérheti az  $n \cdot 10000$  db tranzisztort is)

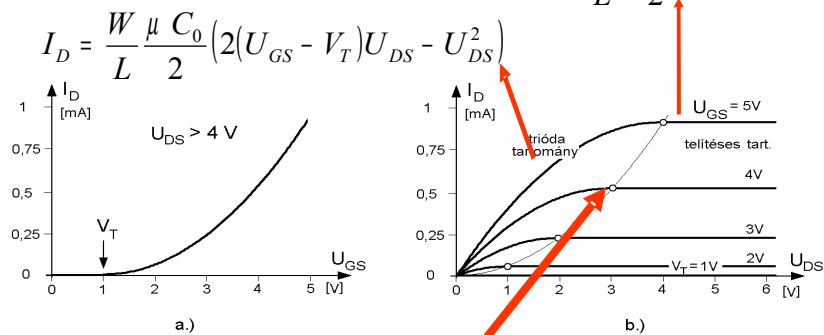


## A másik ilyen elrendezés a VMOS:



Növekményes ill. kiürítéses  $U_T$  beállítása:

$$I_D = \frac{W}{L} \frac{\mu C_0}{2} (U_{GS} - V_T)^2$$

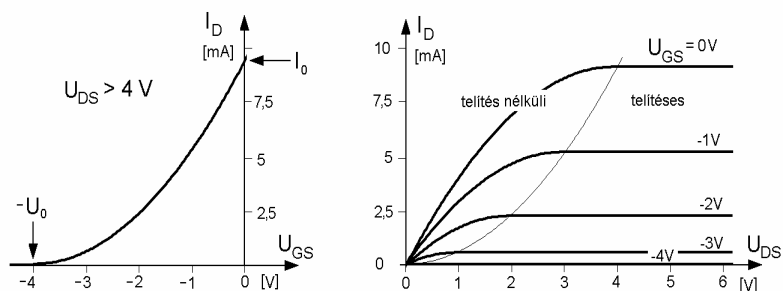


$$U_{GS} - V_T = U_{DS}$$

## FET karakterisztikák:

Itt is a legfontosabb jellemző az elzáródási feszültség:  $U_0$

$$U_0 = \frac{qN_d}{8\epsilon} d^2$$



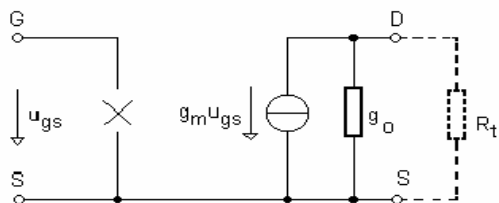
## Karakterisztika egyenletek:

$$F(U) = \begin{cases} 3 \frac{U}{U_0} + 2 \left( \frac{-U}{U_0} \right)^{3/2} & \text{ha } U \geq -U_0 \\ F(-U_0) = -1 & \text{ha } U < -U_0 \end{cases} \quad I_D = I_0 [F(U_{GS}) - F(U_{GD})]$$

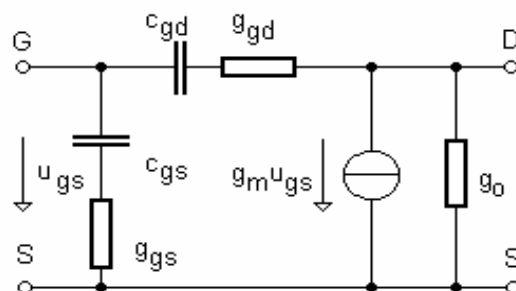
**PÉLDA:** Határozzuk meg a Si JFET elzáródási feszültségét, ha a csatorna vastagsága  $d = 4 \mu\text{m}$  és adalékolása  $N_d = 10^{15}/\text{cm}^3$ !

$$U_0 = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{21}}{8 \cdot 11,8 \cdot 8,86 \cdot 10^{-12}} (4 \cdot 10^{-6})^2 = 3,06 \text{ V}$$

## Kisjelű helyettesítő kép:

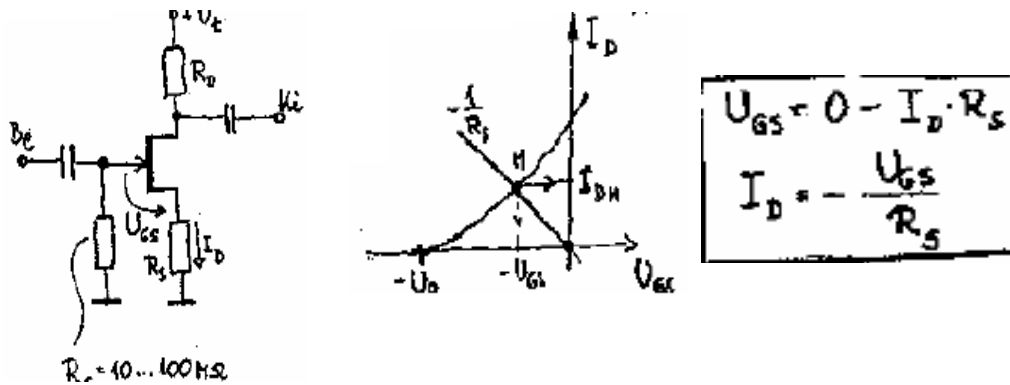


## Nagyfrekvenciás helyettesítőkép:



## Kiegészítés a kézzel írt elektronika jegyzetből:

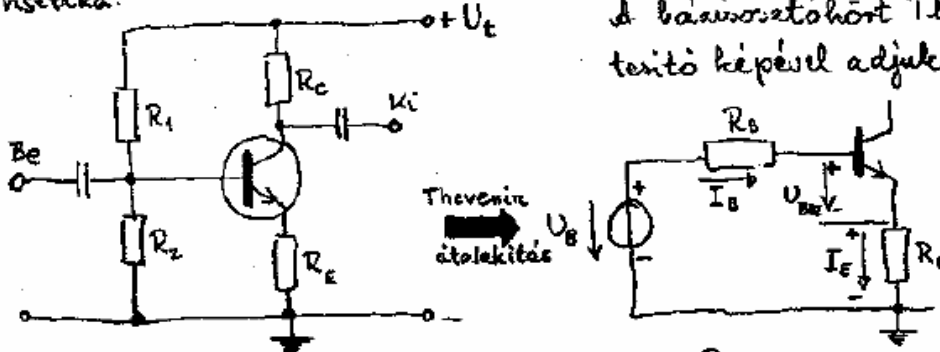
### I. JFET munkapont beállítása:



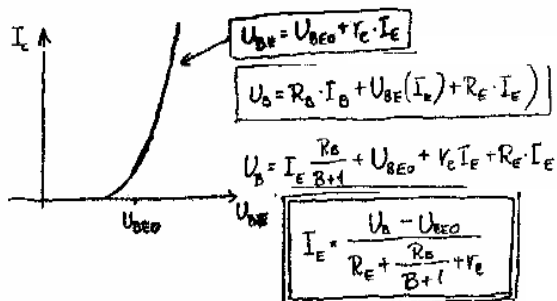
### II. Bipoláris tranzisztornál munkapont beállítása:

Bipoláris tranzistoros erősítőkapcsolás. Nyitólipumi karakterisztika.

A bázisvezetőhöz Thevenin helyettesítő képpel adjuk meg

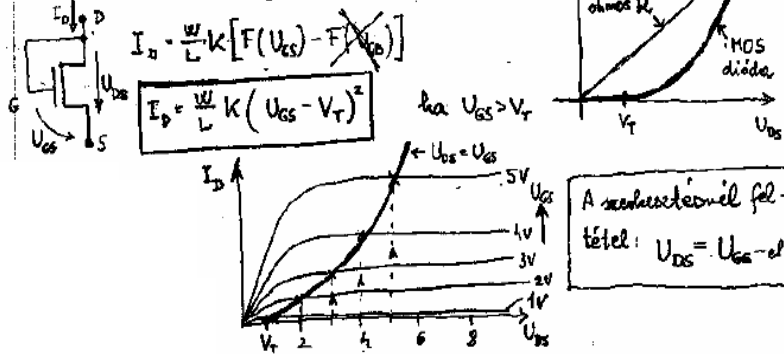


$$U_B = U_t \frac{R_2}{R_1 + R_2}; \quad R_B = R_1 \times R_2;$$

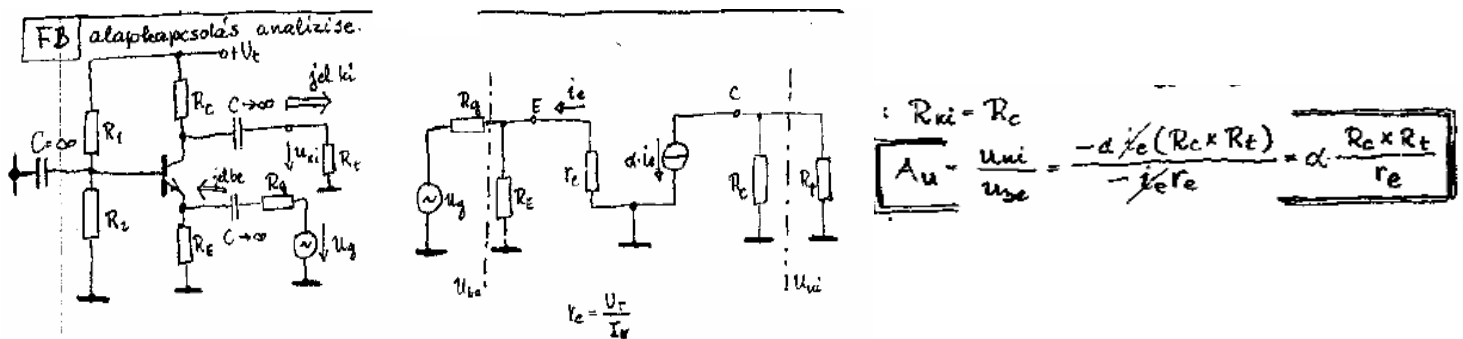


### III. MOS tranzisztorok:

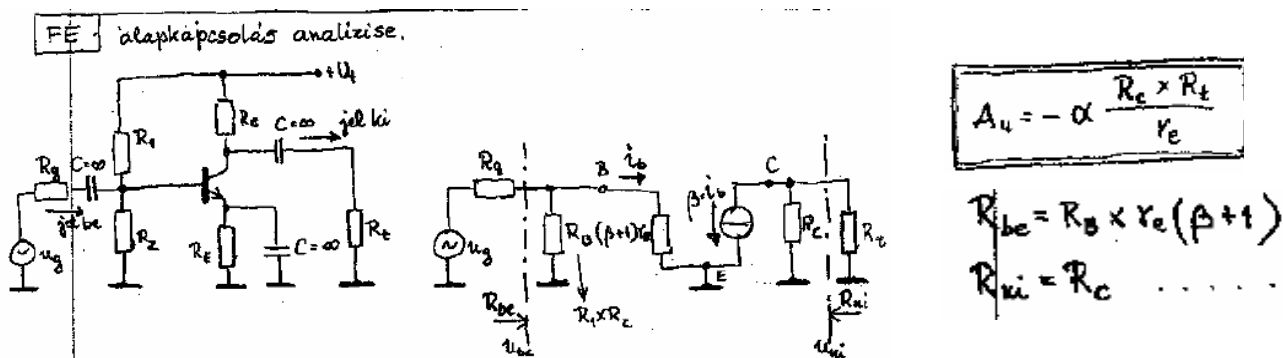
**MOS TRANZISZTOROS ALKATELEMEK.**  
 MOS diódát kapunk, ha a Drain-t összekötjük a Gate-val. Iukább  
 ellenállásként használják, és kétpólusú eszköz



### IV. FB alapkácsolás:

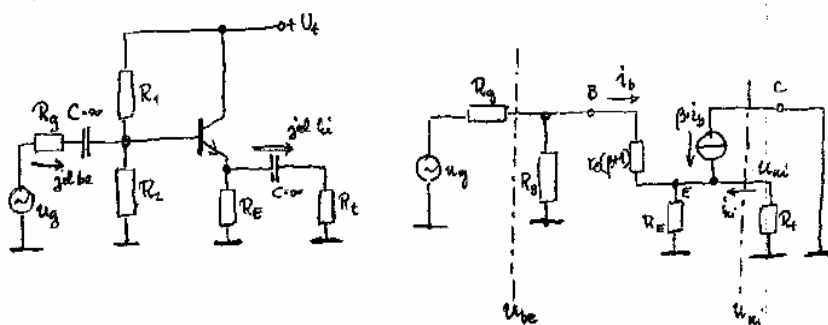


### V. FE alapkácsolás:



## VI. FC alapkioscsolás ill. emitterkövető

FC kapcsolás analízise. Emitterkövető kapcsolásnak is nevezik.



$$A_u = \frac{u_{ki}}{u_{be}} = \frac{(\beta+1) \cdot \frac{1}{\beta} (R_E \times R_t)}{(\beta+1) \cdot \frac{1}{\beta} (R_E \times R_t) + \frac{1}{\beta} r_c (\beta+1)} = \frac{R_E \times R_t}{r_c + (R_E \times R_t)} < 1$$

$$R_{ki} = \frac{u_{ki}}{i_{ki}} = \left[ r_c + \frac{(R_g \times R_B)}{\beta+1} \right] \times R_E$$

$$R_{be} = \frac{u_{be}}{i_b} \times R_B = \left[ (\beta+1) (R_E \times R_t) + r_c (\beta+1) \right] \times R_B$$