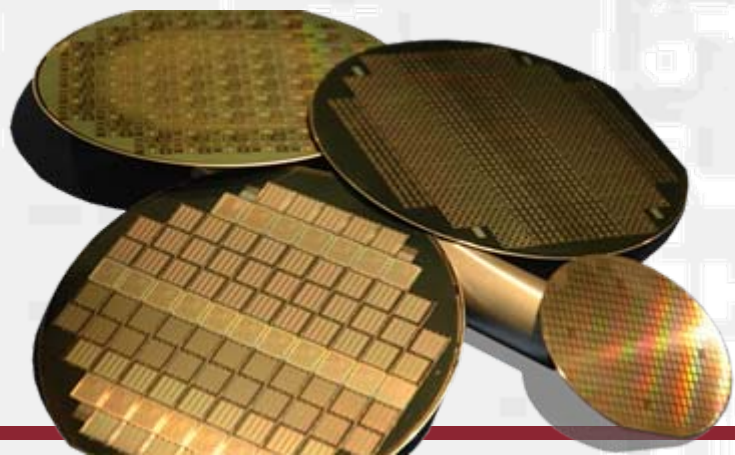




**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**  
**Elektronikus Eszközök Tanszéke**

# **A mikroelektronika félvezető fizikai alapjai**



**Elektronika előadás**  
Mérnök informatikus szak

Dr. Rencz Márta, Dr. Ress Sándor

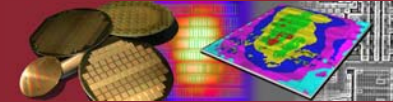
<http://www.eet.bme.hu>



# Mai témák

- ▶ *Ismétlés: Szilárdtest fizikai alapok*
- ▶ **Töltéshordozó koncentrációk számítása félvezetőkben, egyensúlyban**
  - A Fermi szint elhelyezkedése a különböző adalékoltságú félvezető anyagokban, egyensúlyban
- ▶ **Áramok félvezetőkben**
  - Drift áram
  - Diffúziós áram

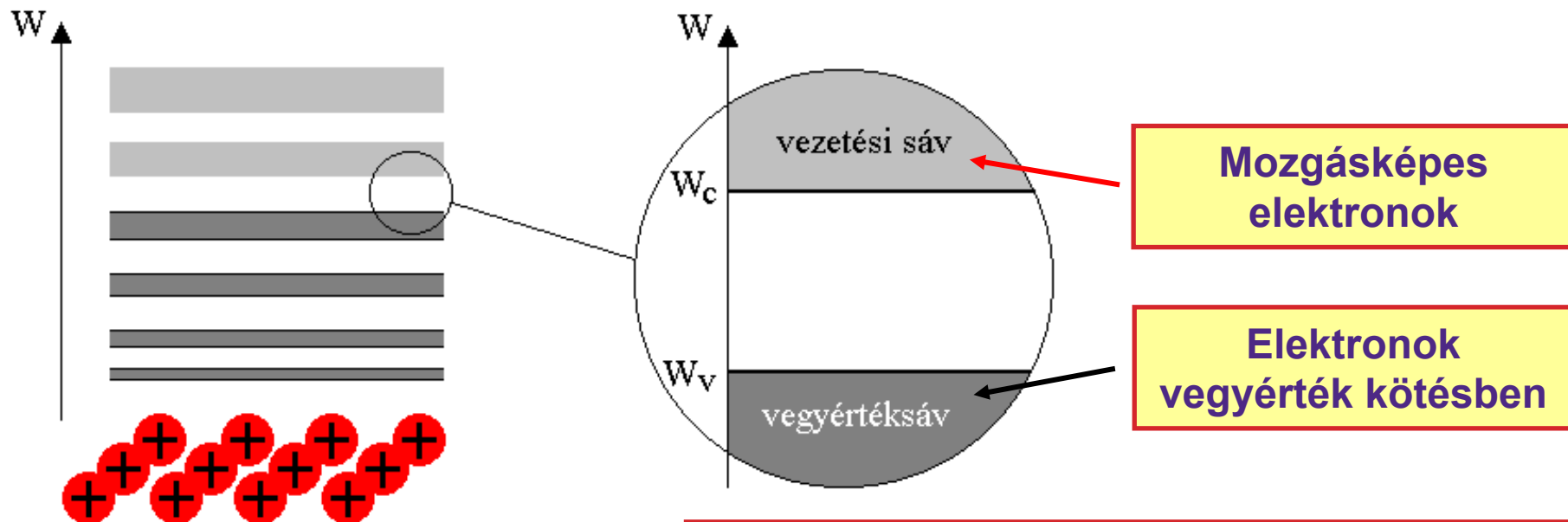




# Vegyérték sáv, vezetési sáv

$W$ : az elektronok megengedett energia értékei szilárd testekben

**Sávos szerkezetű, a megengedett sávokat tiltott sávok választják el.**



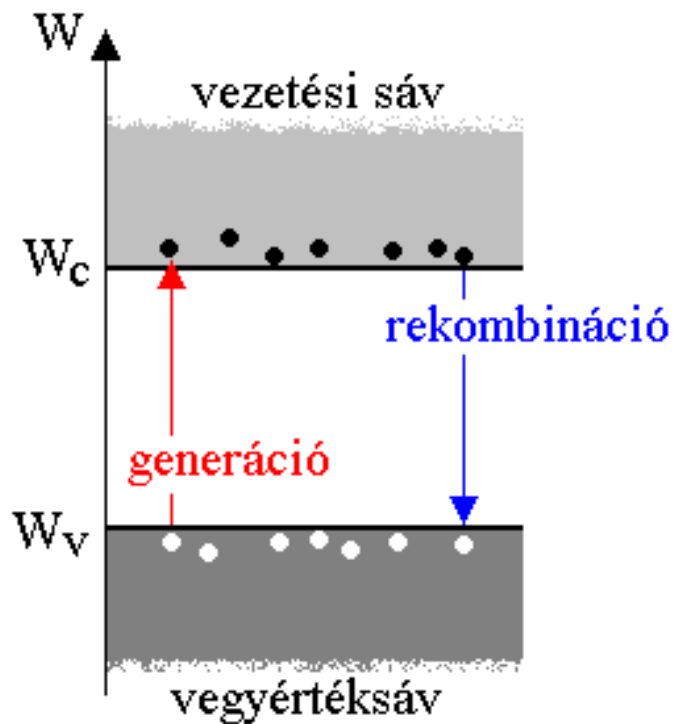
**V = valence band**  
**C = conduction band**

**Áramvezetési szempontból fontos:**

- a legfelső, (majdnem) teli sáv
- a fölötte levő, (majdnem) üres sáv
- a köztük lévő tiltott sáv



# Elektronok és lyukak (ismétlés)



- **Generáció:** a termikus átlagenergia ( $kT$ ) felhasználásával
- **Elektronok** a vezetési sáv alján
- **Lyukak** a vegyértéksáv tetején
- Mindkettő szolgálja az áramvezetést!

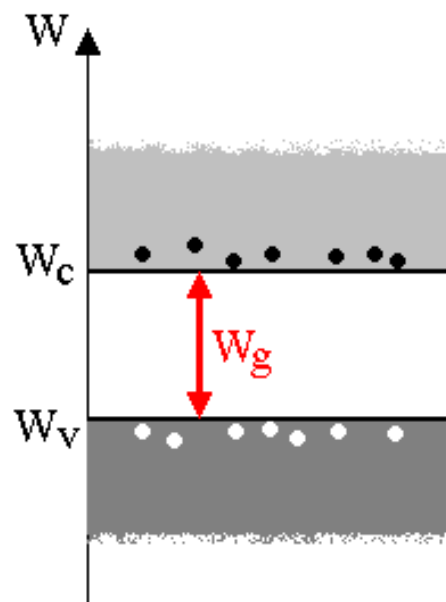
**Elektron** negatív töltés, pozitív tömeg

**Lyuk** pozitív töltés, pozitív tömeg

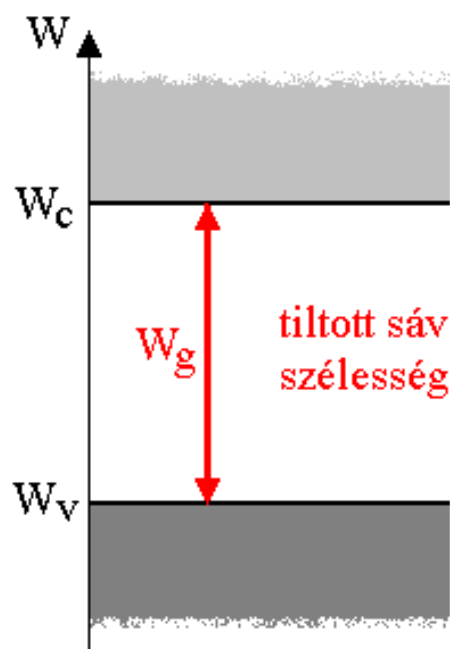




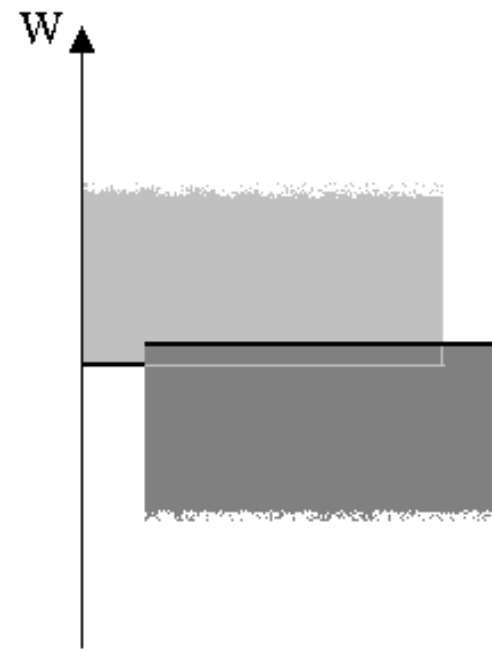
# Vezetők és szigetelők (ismétlés)



félvezető



szigetelő

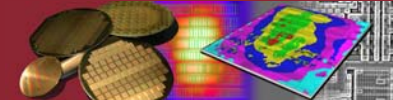


fém

$W_g = 1,12 \text{ eV}$  szilíciumra;  $4,3 \text{ eV}$   $\text{SiO}_2$ -ra

$1 \text{ eV} = 0,16 \text{ aJ} = 0,16 \cdot 10^{-18} \text{ J}$





# A szilícium kristályszerkezete

**Si**

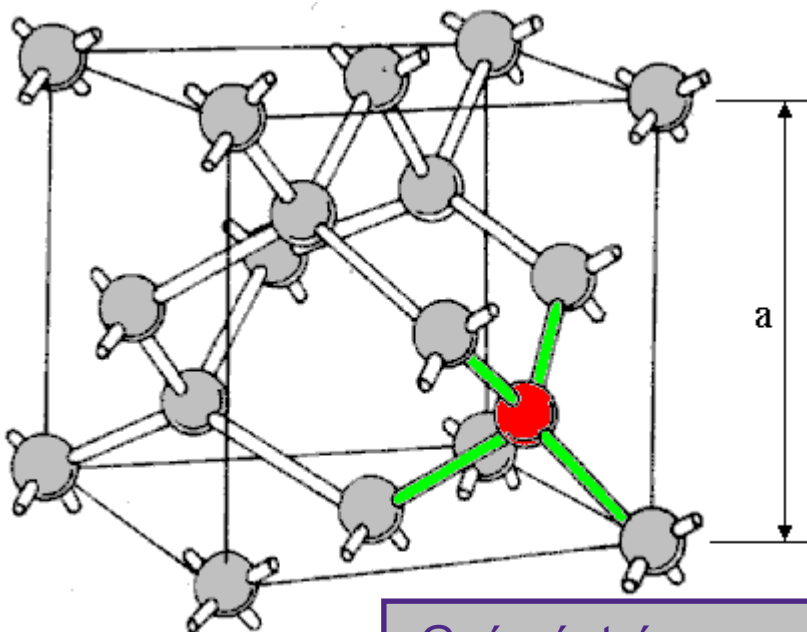
**N = 14**

**4 vegyérték**

**IV. főcsoport**

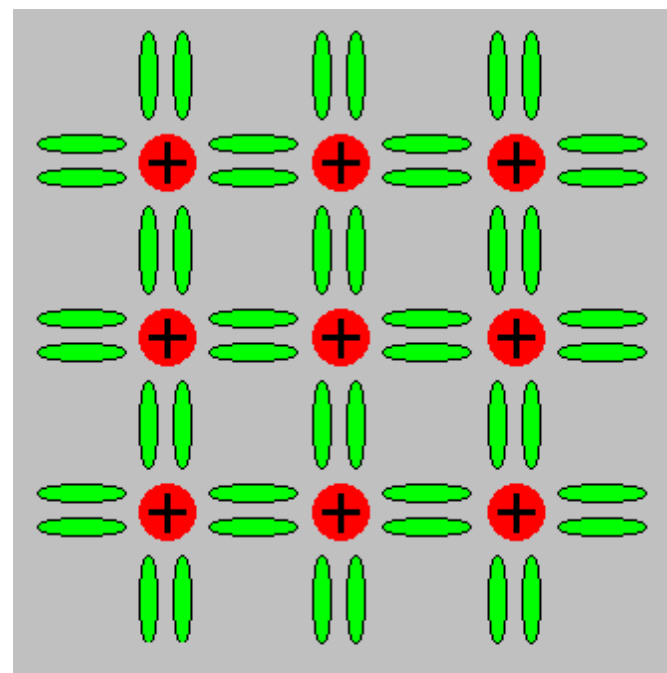
**$\rho = 2,33 \text{ g/cm}^3$**

**A térbeli elrendezés**



**Gyémántrács szerkezet**

**Egyszerűsített síkbeli kép**



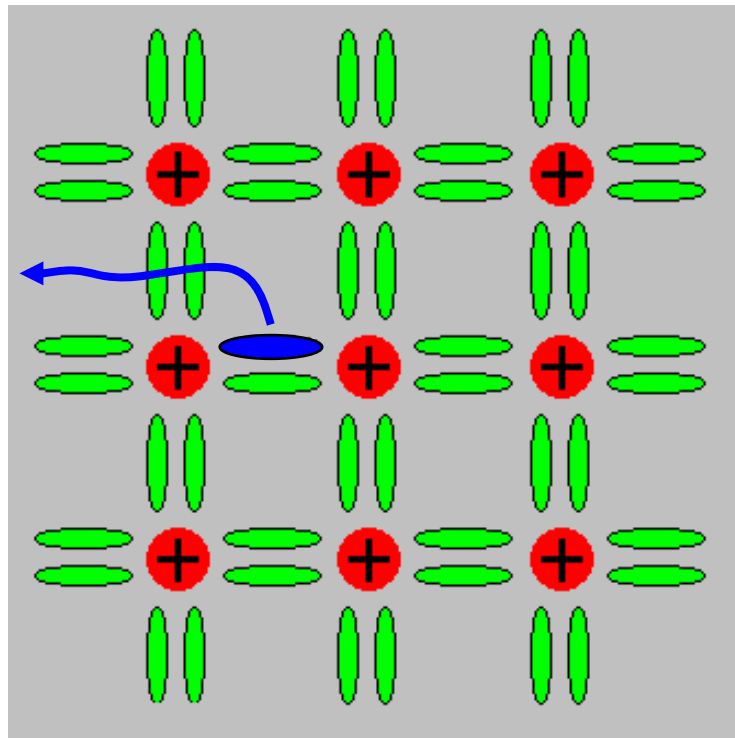
**Minden atomnak 4 közeli szomszédja van**

**Rácsállandó:  $a = 0,357 \text{ nm}$**

**Intrinsic Si: adalékolatlan**



# Az intrinsic félvezető (Si)



$T \neq 0$  esetén  $kT$  energia hatására néhány elektron kiszabadul a vegyértékkötésből

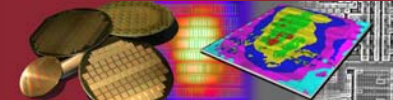
$n_i$ : elektron koncentráció

$p_i$ : lyuk koncentráció

$$n_i = p_i$$

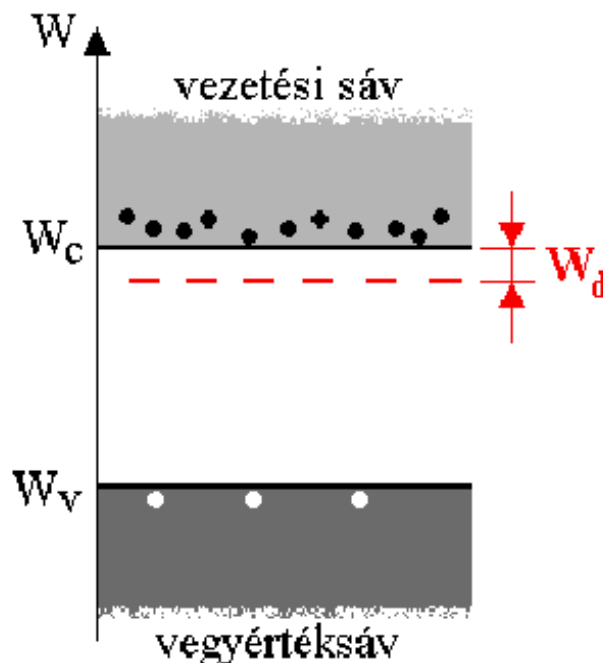
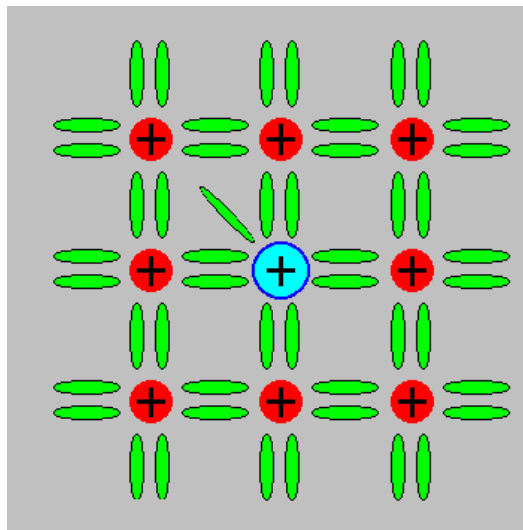






# n típusú félvezető (Si)

Adalék pl. P, As, Sb



## Elektronok

► többségi  
töltéshordozók

## Lyukak

► kisebbségi  
töltéshordozók

$N_D^+$  : donor koncentráció [ $1/\text{cm}^3$ ]

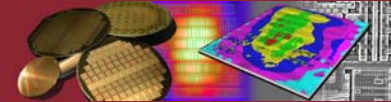
$n_n$ : elektron koncentráció

$p_n$ : lyuk koncentráció

$$n_n \sim N_D^+$$

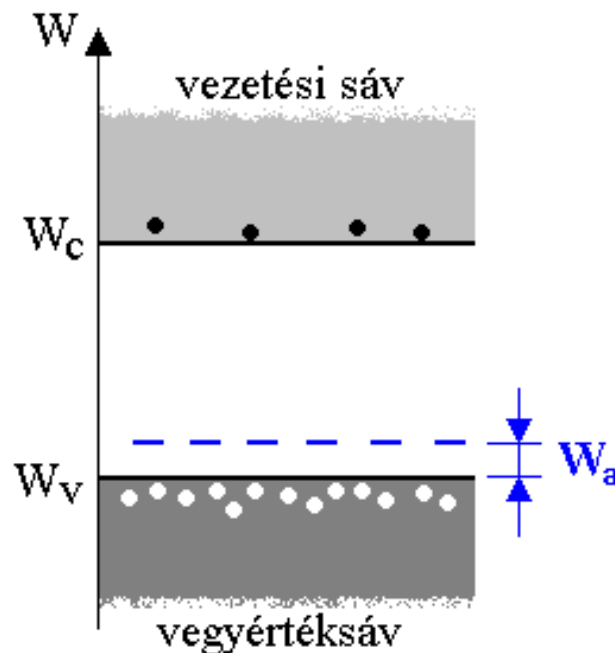
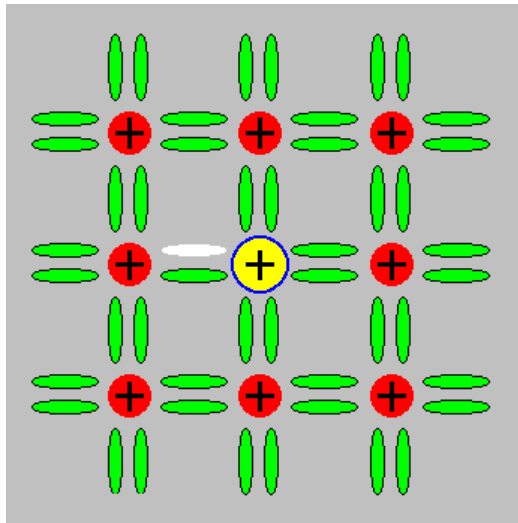
$$n_n > p_n$$





# p típusú félvezető (Si)

Adalék pl. B, Ga, Al, In



## Lyukak

► többségi  
töltéshordozók

## Elektronok

► kisebbségi  
töltéshordozók

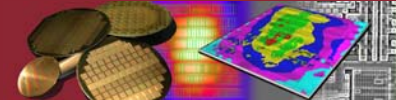
$N_A^-$  : akceptor koncentráció [ $1/\text{cm}^3$ ]

$n_p$ : elektron koncentráció

$p_p$ : lyuk koncentráció

$$p_p \sim N_A^-$$

$$p_p > n_p$$



# Töltéshordozó koncentrációk számítása félvezetőkben, egyensúlyban





# Termikus egyensúly 1.

- **Dinamikus** egyensúlyi állapot, minden folyamat egyensúlyban van az inverzével:

$$\tau_n, \tau_p$$

a **generáció** a **rekombinációval**

- **Élettartam** ( $\tau$ ): az az átlagos idő, amit egy elektron a vezetési sávban tölt  
**1 ns...1  $\mu$ s**
- **Rekombinációs ráta** (**R**): időegység alatt, térfogategységben rekombinálódó töltéshordozó párok száma
- **Generációs ráta** (**G**): időegység alatt, térfogategységben generálódó töltéshordozó párok száma

$$R_n = \frac{n}{\tau_n}$$

$$G_n = R_{n, \text{egyensúlyi}} = \frac{n_0}{\tau_n}$$

Lyukakra hasonlóképpen...





# Termikus egyensúly 2.

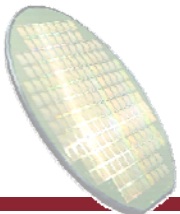
- Az **intrinsic töltéshordozó koncentráció** ( $n_i$ ) nagyságát a hőmérséklet határozza meg.

$$n_i^2 = f(T)$$

- Adott hőmérsékleten termikus egyensúlyban:

$$n \cdot p = n_i^2$$

Tömeghatás törvénye





# Töltéshordozó koncentrációk 1.

## Félvezetőkben, egyensúlyban

- Elektromosan semleges félvezetőkben a pozitív és negatív töltések összege = 0.

- **Pozitív töltések**

- ionizált donorok  $N_D^+ \approx N_D$
- mozgásképes lyukak:  $p$

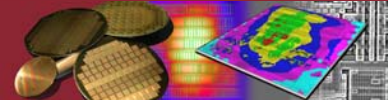
**Semlegességi törvény**

- **Negatív töltések**

- ionizált akceptorok  $N_A^- \approx N_A$
- mozgásképes elektronok:  $n$

$$N_D^+ + p = N_A^- + n$$





# Töltéshordozó koncentrációk 2.

Félvezetőkben, egyensúlyban

**Mérnöki közelítések!**

## ► n típusú félvezetőre

$$N_D \gg N_A \quad N_D \gg n_i$$

$$n \approx N_D$$

$$p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{n_i^2}{N_D}$$

## ► p típusú félvezetőre

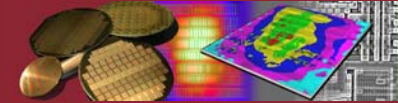
$$N_A \gg N_D \quad N_A \gg n_i$$

$$p \approx N_A$$

$$n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{n_i^2}{N_A}$$

Az adalékkoncentrációk ismeretében a töltéshordozó koncentrációk számíthatók.





# Példa

- ▶ **Határozzuk meg n típusú Si tömbben az elektronok  $n$  és a lyukak  $p$  koncentrációját**, ha a donor koncentráció  $N_D = 5 \cdot 10^{14}$ . (Ez azt jelenti, hogy  $10^8$  Si atomra jut egy adalékatom.)

- ▶ **Megoldás:**

$$n = N_D = \underline{\underline{5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}}}$$

$$p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{(1,45 \cdot 10^{10})^2}{5 \cdot 10^{14}} = \underline{\underline{4,2 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}}} \quad n \gg p$$

- ▶ **Kérdés: mennyire változtatta meg ez az adalékolás a Si vezetőképességét?** (Az intrinsic Si fajlagos ellenállása =  $2,3 \cdot 10^5 \Omega\text{cm}$ )

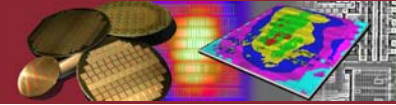
$$\sigma = q\mu_n n = \dots = 0,12 (\Omega\text{cm})^{-1}$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \underline{\underline{8,3 \Omega\text{cm}}}$$

- ▶ A vezetőképesség **5 nagyságrenddel** növekedett  $10^8$  Si atomra jutó **egyetlen donor** atomos adalékolás esetén.







# Töltéshordozó koncentrációk

## Fermi-szintek

- Az energiaszintek betöltöttségének valószínűségét a Fermi-Dirac eloszlási függvény határozza meg:

$$f_D(W) = \frac{1}{1 + \exp[(W - W_F) / kT]}$$

- $W_F$ : Fermi-energia vagy Fermi-szint
- $k$ : Boltzmann-állandó
- $T$ : hőmérséklet

$$f_D(W_F) = \frac{1}{2}$$

$$k \cdot T |_{300K} = 26meV$$

**A Fermi-Dirac eloszlási függvény annak a valószínűségét adja meg, hogy a  $W$  energia szintű állapot be van töltve.**





# Töltéshordozó koncentrációk 2.

## Fermi-szintek

A töltéshordozó koncentrációk felírhatók a

**$W_F$  (vagy  $E_F$ ) Fermi-energia, vagy Fermi-szint**

függvényében

$$n = \text{const} \cdot T^{3/2} \cdot \exp\left[-\frac{W_C - W_F}{kT}\right]$$

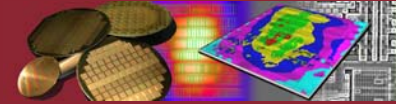
$$p = \text{const} \cdot T^{3/2} \cdot \exp\left[-\frac{W_F - W_V}{kT}\right]$$

ahol

**$W_C$** : a vezetési sáv aljához tartozó energia érték

**$W_V$** : a vegyérték sáv tetejéhez tartozó energia érték



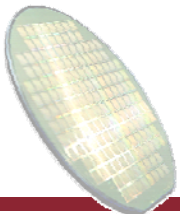


# Az energiaszintek helyzete

## Egyensúlyi állapotban

- ▶ Egy anyag egyensúlyi állapotban van, ha a nettó elektrontranszport minden energiaszinten = 0.
- ▶ Erre a helyzetre az jellemző, hogy a Fermi-szint állandó a rendszerben.

**Termikus egyensúly = állandó  $W_F$**



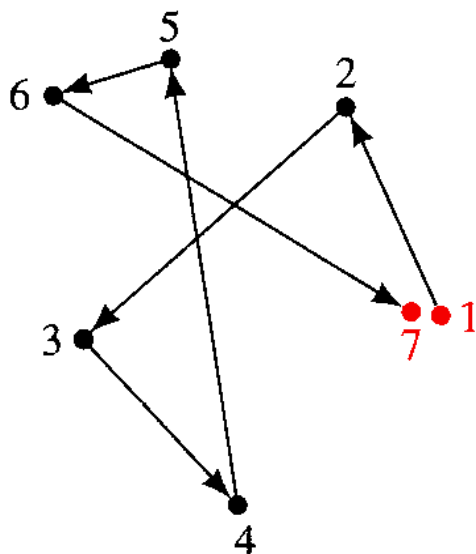


# Áramok félvezetőkben

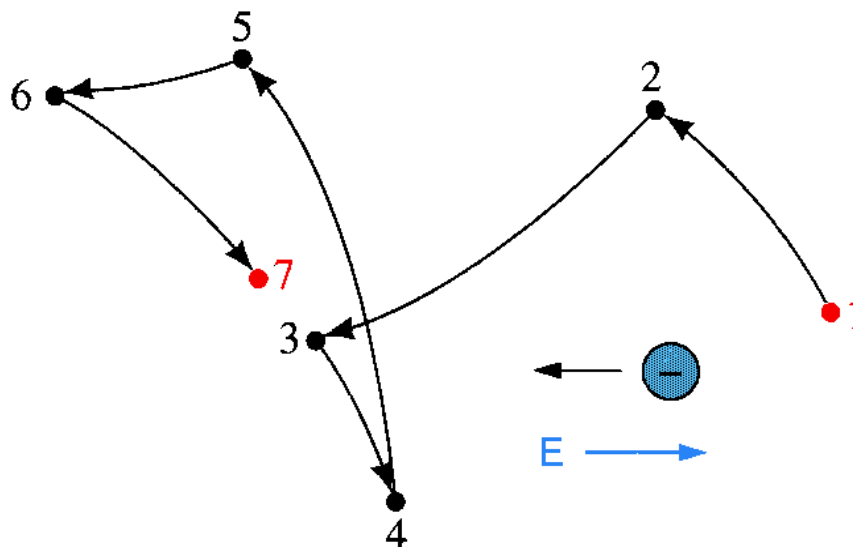


# Drift áram (sodródási áram) 1.

Töltéshordozóknak elektromos erőter hatására történő mozgása.



Nincs térerősség



Van térerősség





# Drift áram (sodródási áram) 2.

- ▶ Töltéshordozóknak elektromos erőter hatására történő mozgása.
- ▶ Drift sebesség ( $v_D$ ): a töltéshordozóknak az erőter irányában történő elmozdulásának sebessége.

$$v_D = -\mu_n \cdot E$$

$$v_D = \mu_p \cdot E$$

ahol

- **E**: elektromos térerősség
- $\mu_n$ : az elektronok mozgékonyága
- $\mu_p$ : a lyukak mozgékonyága

$$\mu_n |_{Si} = 1500 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$$

$$\mu_p |_{Si} = 475 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$$





# Drift áram, vezetőképesség

- A drift áram áramsűrűsége:

$$J_{n_{drift}} = -qnv_D = q\mu_n nE$$

$$J_{p_{drift}} = qnv_D = q\mu_p pE$$

$$J_{drift} = J_{n_{drift}} + J_{p_{drift}} = (q\mu_n n + q\mu_p p) \cdot E$$

- A differenciális Ohm törvény szerint:

$$J_{drift} = \sigma \cdot E$$

- Amiből az anyag **vezetőképessége**:

$$\sigma = q\mu_n n + q\mu_p p = q \cdot (\mu_n n + \mu_p p)$$

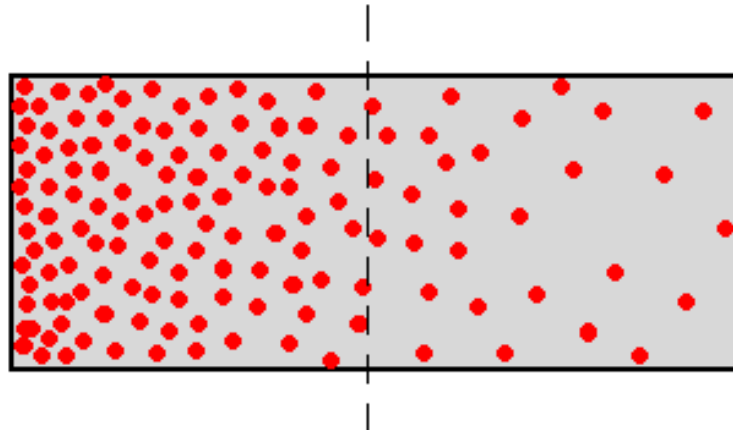




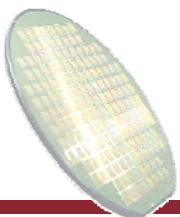


# Diffúziós áram 1.

- **Diffúzió:** a részecskéknek a térbeli koncentrációkülönbség megszüntetésére irányuló mozgása.



**Oka:** a sűrűségkülönbség és a hőmozgás





# Diffúziós áram 2.

- **Diffúziós áram:** a töltéshordozóknak a nagyobb koncentrációjú helyről a kisebb koncentrációjú hely irányában történő mozgása.

$$J_{n_{diff}} = qD_n \cdot \text{grad } n$$

$$J_{p_{diff}} = -qD_p \cdot \text{grad } p$$

ahol

- $D_n$ ,  $D_p$ : az elektronok ill. a lyukak **diffúziós állandója**

$$D = \frac{kT}{q} \mu$$

**Einstein-reláció**





# Folytonossági egyenletek

- ▶ Végtelenül kis térrészben a töltéshordozók mennyiségének időbeli változását írják le.
- ▶ A térrészbe az áram által be-, ill. abból kiszállított, valamint az ott generálódó vagy rekombinálódó töltéshordozók változtatják meg adott térrészben a koncentrációt:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla J_n + G_n - R_n$$
$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \nabla J_p + G_p - R_p$$

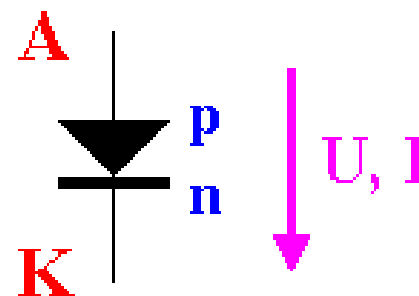
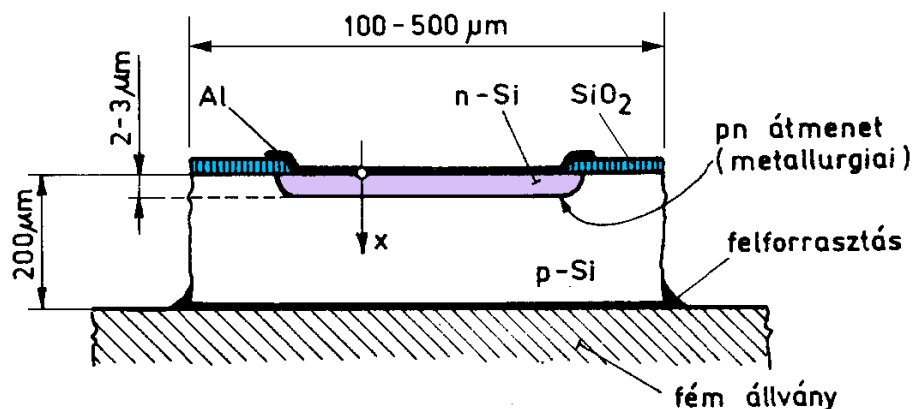




# pn átmenet, félvezető dióda

- **pn átmenet**: olyan **egykristályos félvezető** tartomány, amelyben egymással **érintkezik egy p és egy n** típusú zóna.
- Az 1 db. pn átmenetből álló **eszköz a dióda**

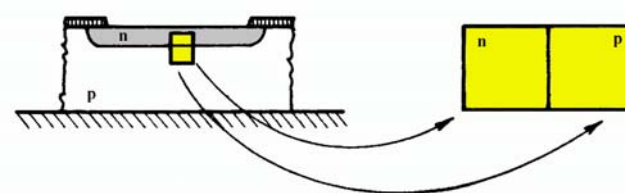
*Pl. dióda megvalósítás:*



**A** = anód, **K** = katód

- Az ábra **torzított**, a keresztmetszeti méretek általában sokkal kisebbek mint az oldalirányúak.
- **Planáris szerkezet!**

Ezt vizsgáljuk:



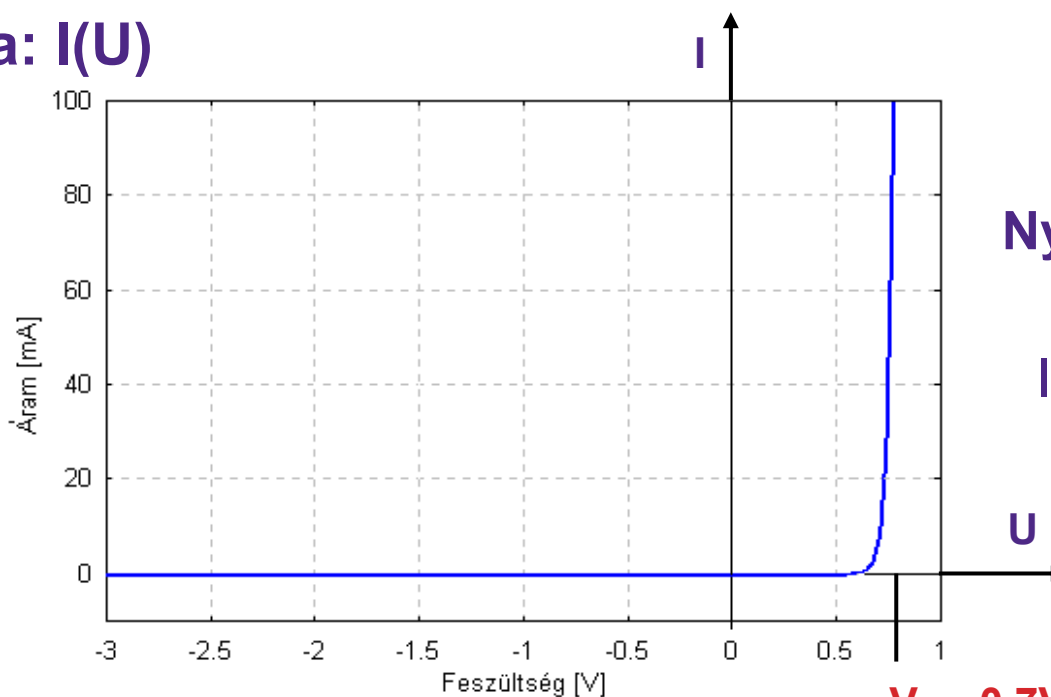
# A dióda legfőbb tulajdonságai

- ▶ Pozitív feszültségekre (p típusú anyag pozitívabb potenciálon, **nyitófeszültség**), a struktúrán a feszültségtől exponenciálisan függő áram folyik.
- ▶ Negatív feszültségekre (p oldal negatívabb, **zárófeszültség**) a struktúrán nagyon kis, gyakorlatilag feszültségfüggetlen áram.

## Karakterisztikája: $I(U)$

**Záró (reverse)**  
tartomány

$I \sim 10^{-12} \text{ A/mm}^2$   
(Si,  $T=300 \text{ K}$ )



**Nyitó (forward)**  
tartomány

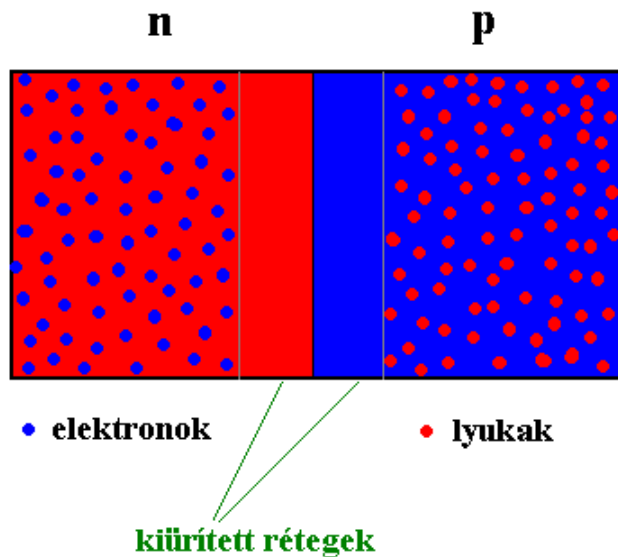
$I \sim \exp(U/U_T)$

**$V_F \approx 0.7V$**





# A *pn* átmenet statikus viszonyai 1.



A mozgásképes töltések diffúziója után helyhez kötött, kompenzálatlan töltések maradnak az átmenet két oldalán.



Megszűnik a semlegesség.

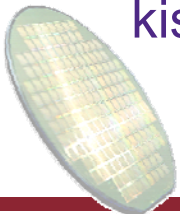


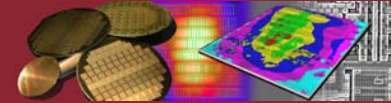
Erőtér jön létre.

- ▶ A többségi töltéshordozók az átmenet környezetében átdiffundálnak a túloldalra → töltéshordozóktól **kiürített réteg** vagy **tértöltésréteg** jön létre az átmenetnél.

## Egyensúly:

- ▶ A többségi töltéshordozók diffúziós árama egyensúlyban van a kisebbségi töltéshordozók drift áramával,  **$I = 0$**





# A *pn* átmenet statikus viszonyai 2.

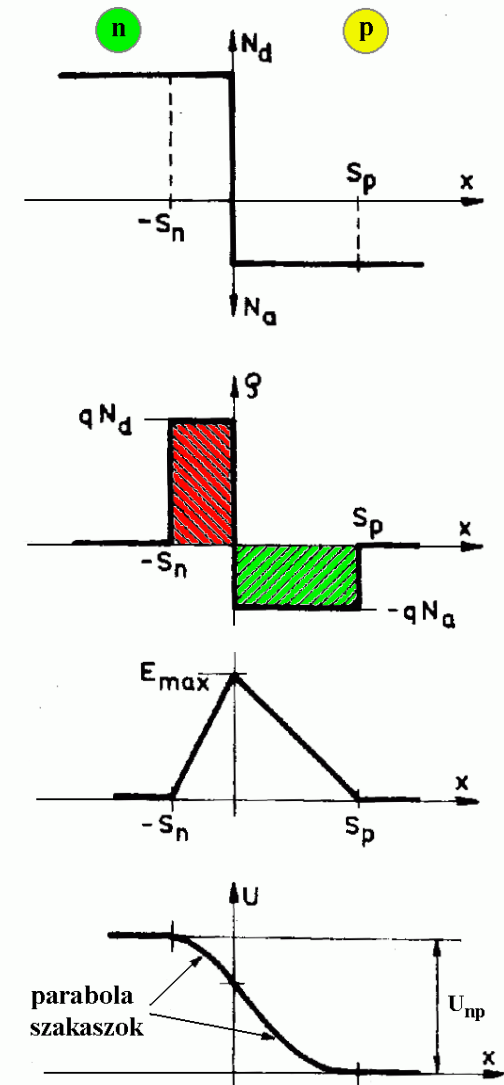
A töltésegyenségből:

$$q S_n N_d = q S_p N_a$$

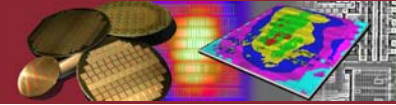
$$\frac{N_a}{N_d} = \frac{S_n}{S_p}$$

A kiürített réteg annál **keskenyebb**,  
minél nagyobb az  
adalékkoncentráció a tartományban.

A valóságban általában több nagyságrend  
különbség van a két oldal adalékkoncentrációi  
között → a kiürített réteg az átmenetnek főként  
a gyengébben adalékolt oldalára terjed ki.







# A *pn* átmenet statikus viszonyai 3.

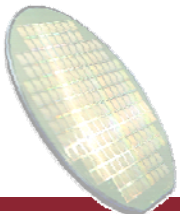
- ▶ **Csak a kiürített rétegben van tértöltés**, a p és az n tartományok elektromosan semlegesek  
→ Csak a kiürített rétegekben van térerősség, ill. potenciál esés.
- ▶ A pn átmeneten egyensúlyban kialakuló ún. **beépített feszültség (diffúziós potenciál)**:

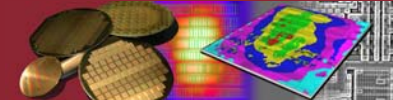
$$U_{bi} = U_T \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

$$U_T = \frac{kT}{q}$$

termikus feszültség  
(26mV 300K-en)

- ▶ A beépített feszültség értéke szokásos adalékkoncentrációk mellett szilíciumban  $\approx 0,75\text{-}0,8\text{ V}$

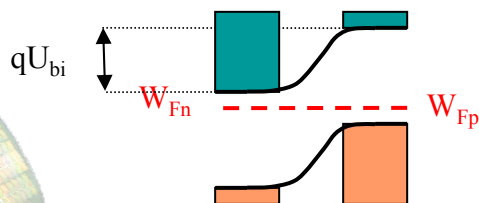
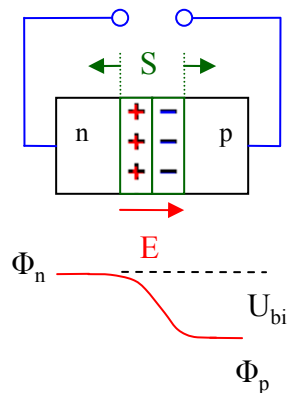




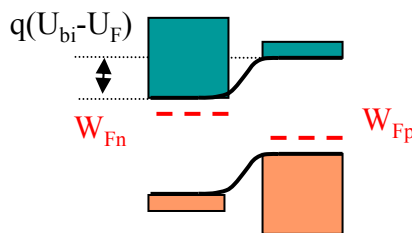
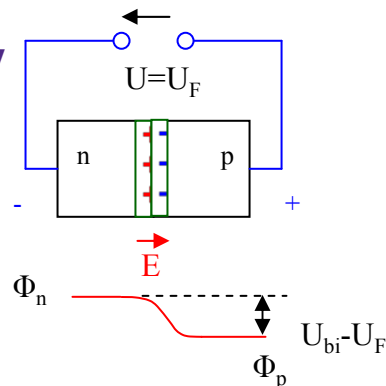
# Külső feszültség *pn* átmeneten

- A külső feszültség hozzáadódik a *pn* átmenet beépített feszültségéhez.
- **Egyensúly**: a többségi töltéshordozók diffúziós árama egyensúlyban van a kisebbségi töltéshordozók drift áramával,  $I = 0$
- **Nyitóirány (forward)**: a nyitófeszültség csökkenti a *pn* átmenet potenciálgátját, a többségi töltéshordozók diffúziós árama megnő,  $I_F$ : **nagy**
- **Záróirány (reverse)**: a zárófeszültség hozzáadódik a beépített feszültséghez, a kisebbségi töltéshordozók drift árama kerül túlsúlyba, de ezek kis száma miatt az így kialakuló áram  $I_R$ : **kicsi**

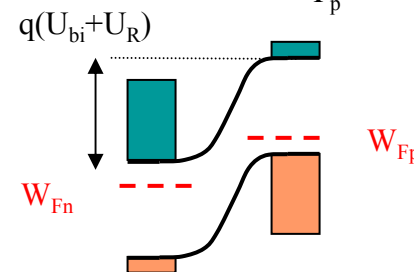
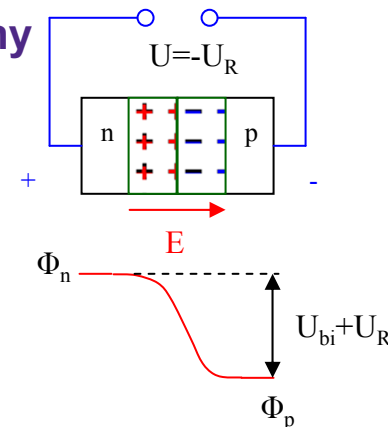
Egyensúly

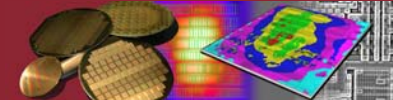


Nyitó irány

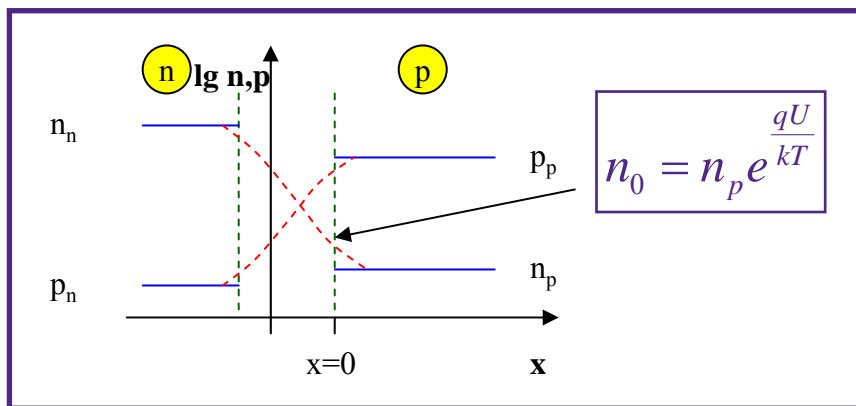


Záró irány





# A karakterisztika egyenlete 1.



► **A folytonossági egyenleteket oldjuk meg az adott határfeltételekkel, állandósult állapotra**

1. Inhomogén másodrendű lineáris differenciálegyenletek a töltéshordozó koncentrációk helyfüggésére
2. A megoldást exp. függvények összegeként keressük, és a határértékek behelyettesítésével keressük meg az állandókat
3. Az adódó eloszlások gradiensét számoljuk az  $x=0$  helyen, ahol csak diffúziós áram van
4. Az elektron és lyukáram összegeként felírjuk a teljes áramot **= 0**

$$\frac{dn}{dt} = D_n \frac{d^2 n}{dx^2} + G - R$$

$$R = \frac{n}{\tau_n}$$

$$G = \frac{n_p}{\tau_n}$$

$$\frac{dn}{dt} = D_n \frac{d^2 n}{dx^2} - \frac{n - n_p}{\tau_n}$$

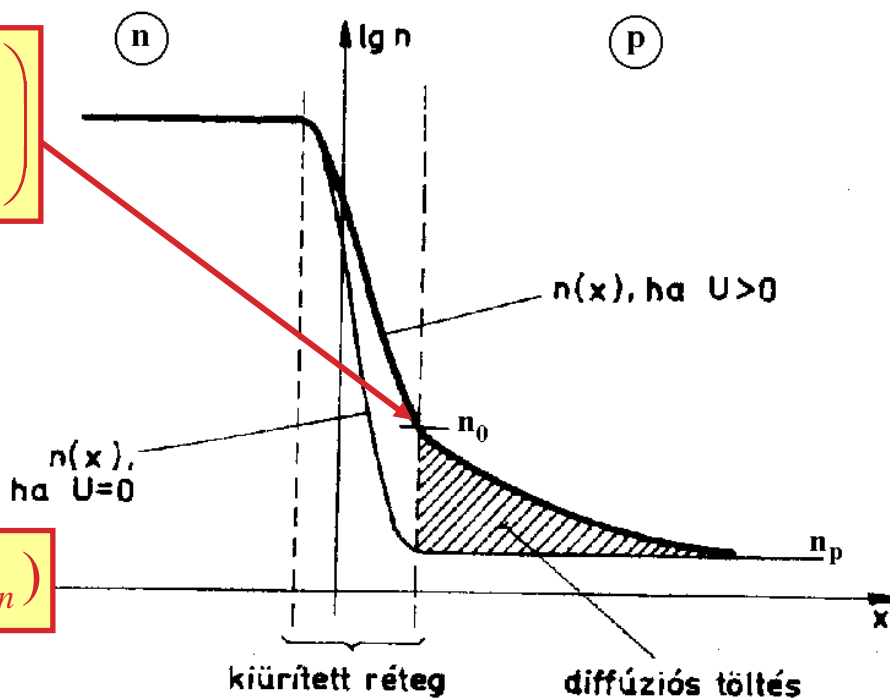


# A karakterisztika egyenlete 2.

- A folytonossági egyenletek megoldásával nyert eloszlás függvény az elektronokra (1 dim.):



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

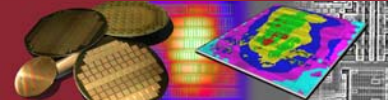
Boltzmann-tényező



$$n(x) = n_p + (n_0 - n_p) \exp(-x / L_n)$$

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \quad \text{diffúziós hossz}$$

 diffúziós  
 sodródási
 } elektron mozgás



# A karakterisztika egyenlete 3.

- Az adódó eloszlások gradiensét számoljuk az  $x=0$  helyen, ahol csak diffúziós áram van.

$$n(x) = n_p + (n_0 - n_p) \exp(-x / L_n)$$

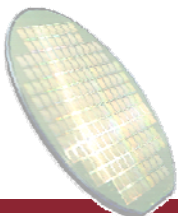
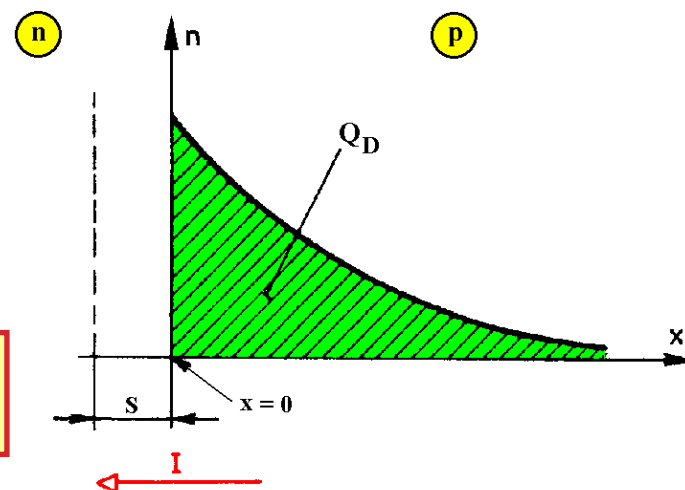
$$n_0 = n_p \exp\left(\frac{U}{U_T}\right)$$

$$J_n(x) = -qD_n \frac{dn}{dx} = -qD_n (n_0 - n_p) \exp(-x / L_n) \left(\frac{-1}{L_n}\right)$$

$$J_n|_{x=0} = \frac{qD_n}{L_n} (n_0 - n_p) = \frac{qD_n n_p}{L_n} (\exp(U / U_T) - 1)$$

$$J_p = \frac{qD_p p_n}{L_p} (\exp(U / U_T) - 1)$$

$$I = A(J_n + J_p)$$





# A karakterisztika egyenlete 4.

- Az elektron és lyukáram összegeként felírjuk a teljes áramot

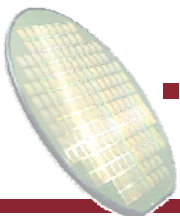
$$I = A(J_n + J_p)$$

$$I = Aq \left( D_n n_p / L_n + D_p p_n / L_p \right) (\exp(U / U_T) - 1)$$

$$I = I_0 (\exp(U / U_T) - 1)$$

- Ez az **ideális dióda egyenlet**

- $I_0$  a pn átmenet **szaturációs** vagy **záróáram konstansa**, csak anyagállandóktól és az adalékkoncentrációktól függ, a kisebbségi töltéshordozó koncentrációval arányos,  $I_0 \approx 10^{-14} \dots 10^{-15} \text{ A}$  Si diódán.
- A szokásos nyitófeszültség értéke:  $U_F \approx 0,7 \text{ V}$  Si dióda esetén





# Példa: ideális dióda karakterisztika

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

**Megoldás:**

$$I = I_0 (\exp(U / U_T) - 1)$$

$$U = U_T \ln(I / I_0 + 1)$$

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

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

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

$$\Delta U = 0,026V \cdot \ln 10 \cong 0,06 V = 60 mV$$

