



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

MIKROELEKTRONIKA, BMEVIEEAB01

A pn átmenet működése: Statikus viszonyok

A félvezető dióda

Amit tudhatunk róla...

Hogyan készül?

Hogyan működik?

Diódák – amit eddig tanultunk

- ...dióda egy félvezetőgyártó adatlapján:

Félvezető anyaga
Gyártástechnológia
Tokozás jellemzők
Jelölések
Alkalmazás célja

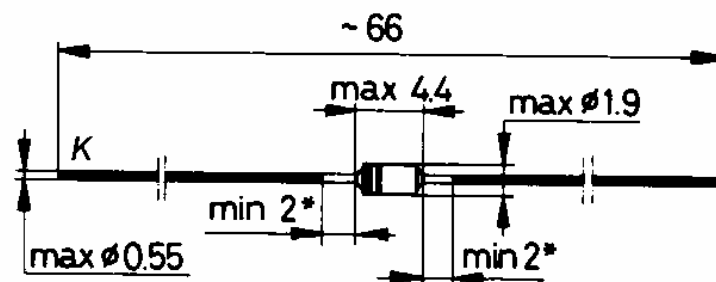
1N 4151 (BAY 95), 1N 4154 (BAY 94)

Silicon Epitaxial Planar Low-Capacitance Diodes

for very fast switching applications.

Dimensions in mm

Band: cathode

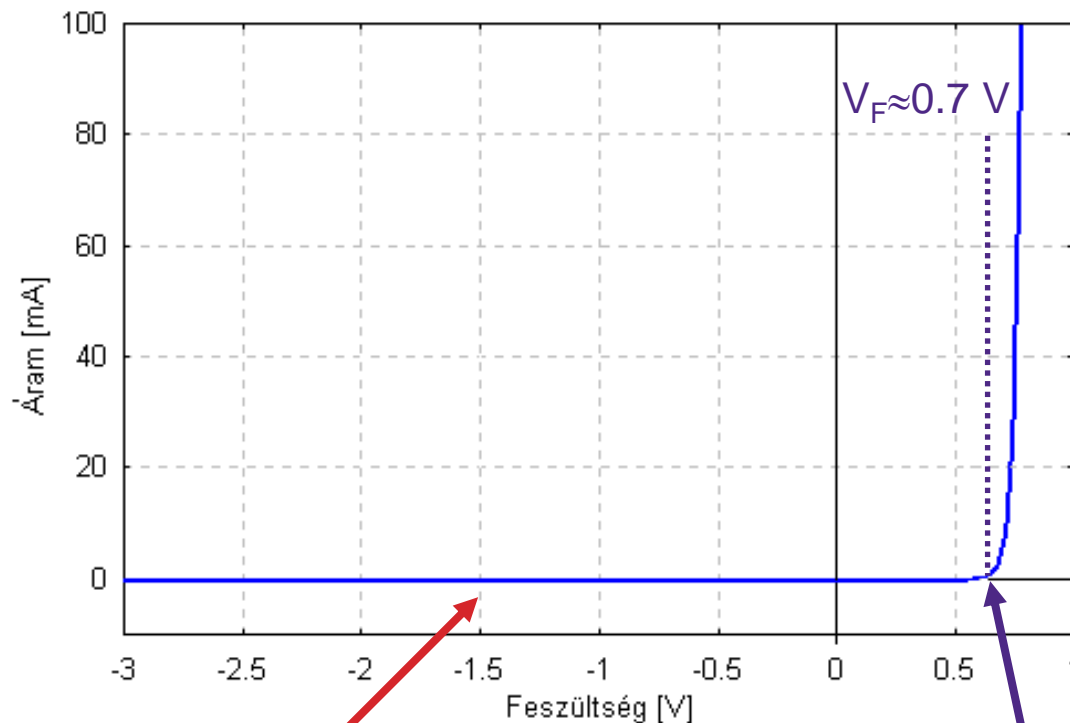


* not tinned

Case: DO-35

Mass: approx. 0.15 g

A dióda fontosabb tulajdonságai



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

Nyitó tartomány
(forward)
 $I \sim \exp(U/U_T)$

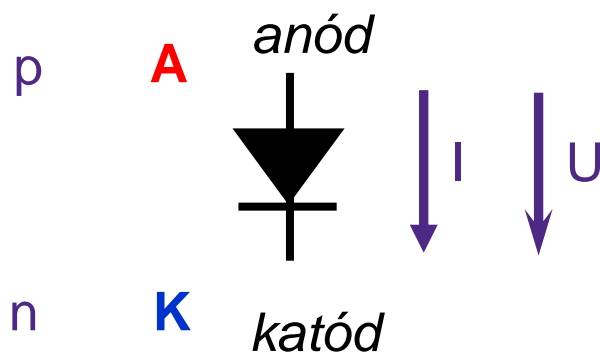
Egyenirányít!

**A karakterisztika
fogalma
 $I = f(U)$
stacionárius**

$$I \cong e^{U/U_T}$$

A dióda fontosabb tulajdonságai

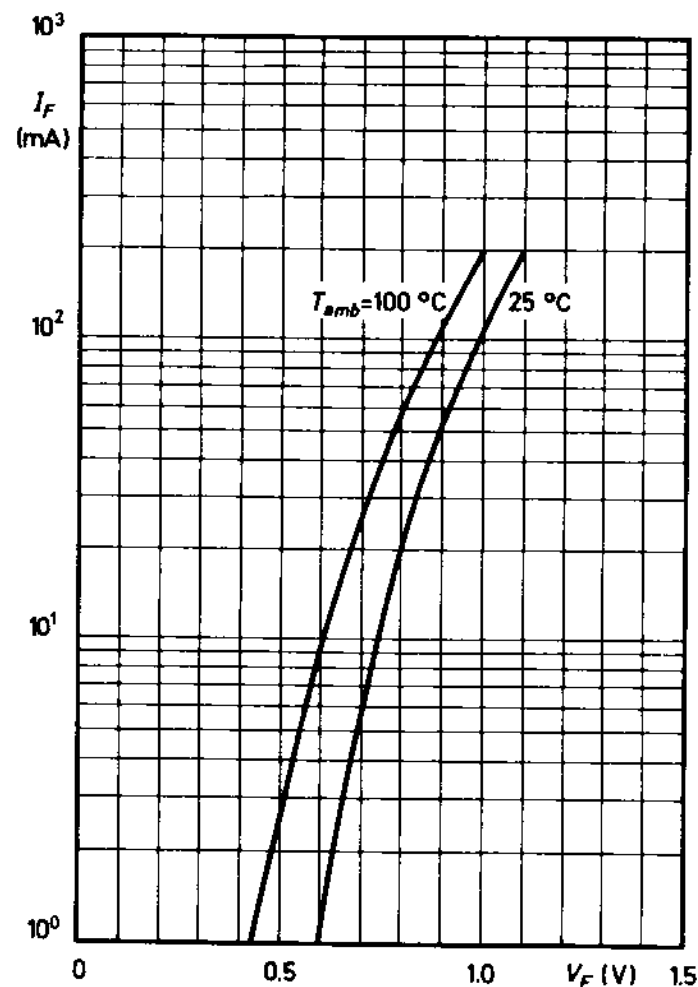
Szimbólum, mérőirány



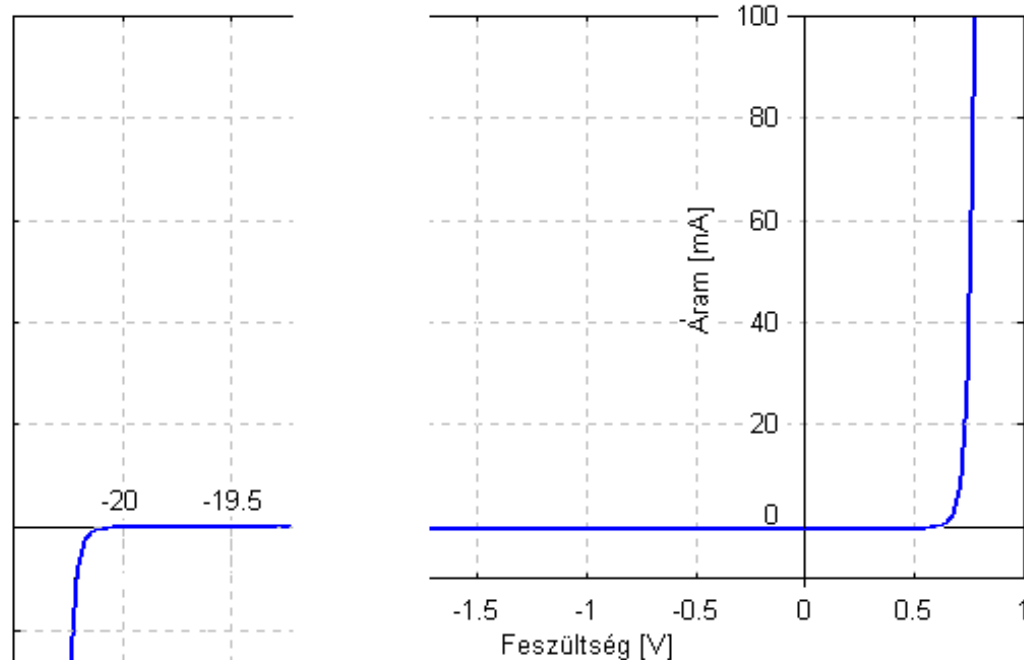
U_F vagy V_F nyitó feszültség
(forward voltage)

I_F nyitó áram
(forward current)

Forward characteristics $I_F = f(V_F)$



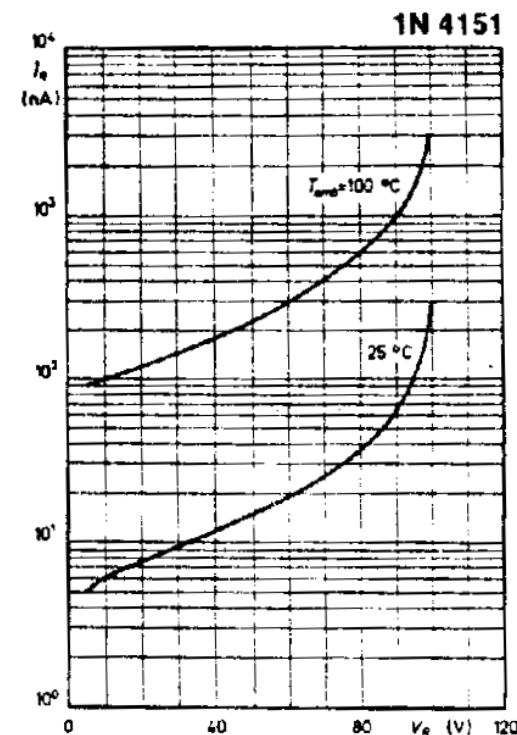
A dióda fontosabb tulajdonságai



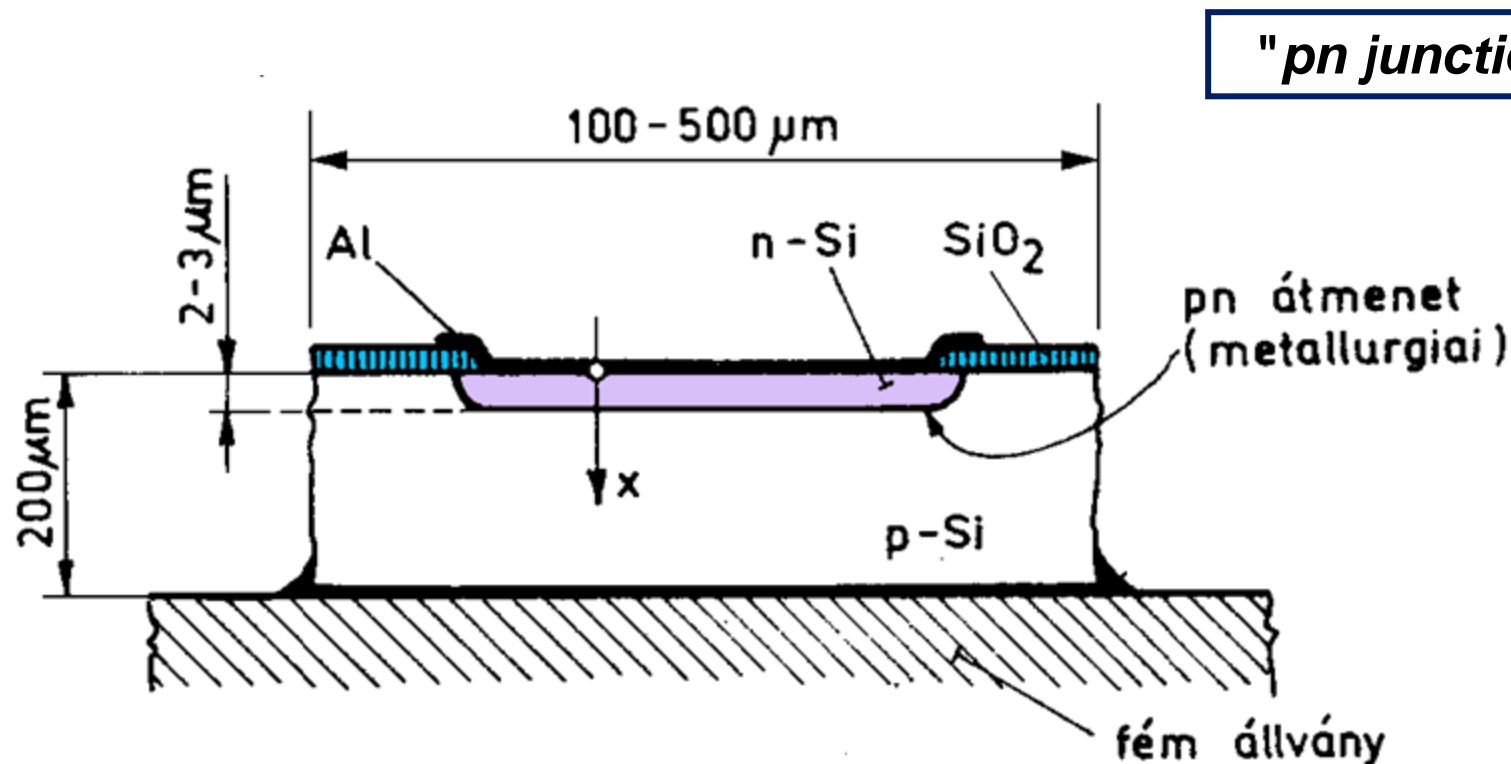
Másodlagos jelenségek
például: letörési jelenségek

**Dinamikus
tulajdonságok:
kapacitás, véges
működési sebesség**

Reverse characteristics



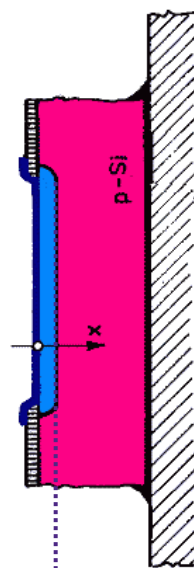
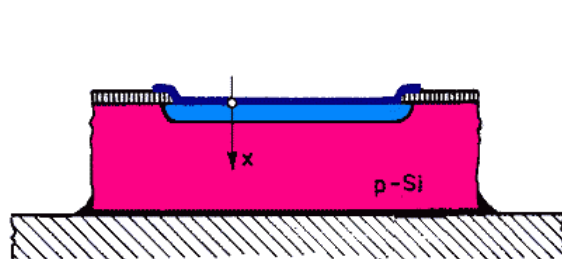
A dióda kivitele



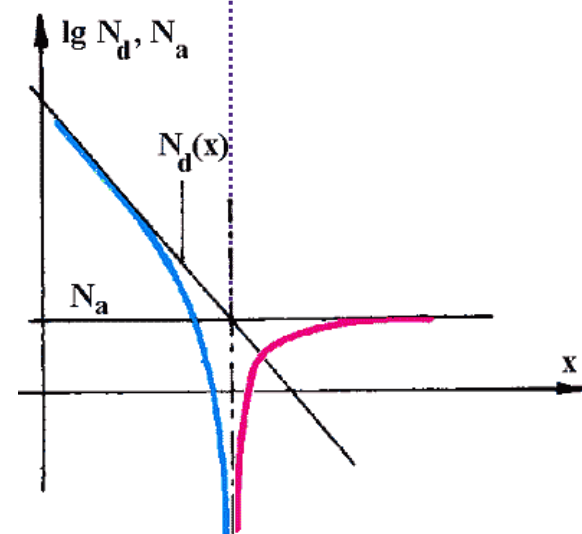
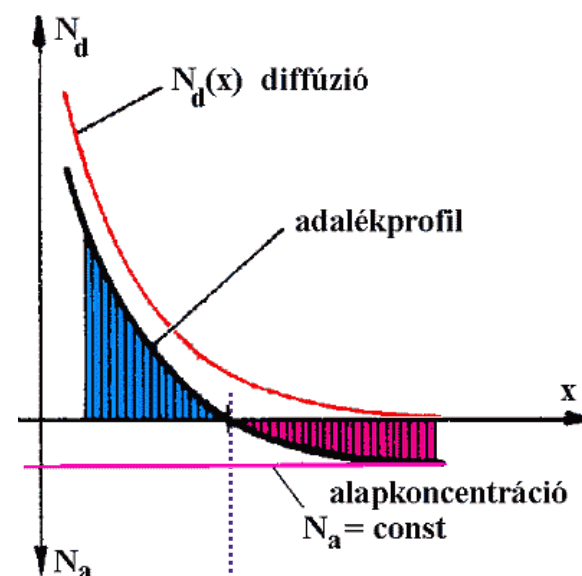
"pn junction"

- PLANÁRIS technológia
- Kiindulás: Si p (alap)adalékolású egykristály szelet
- Oxidálás, ablaknyitás, n diffúzió, telefémmezés, mintázás, darabolás, felrögzítés, tokozás

A dióda kivitele – adalékprofil



metallurgiai átmenet



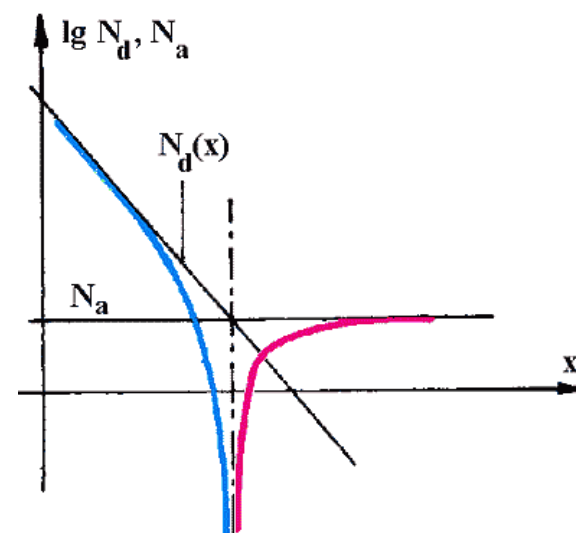
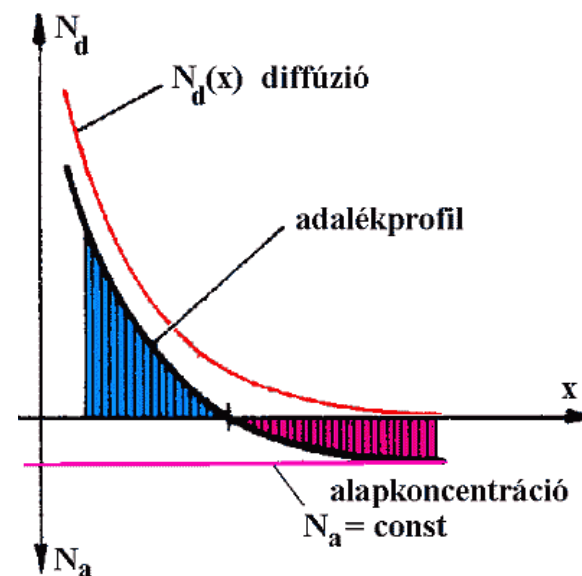
Adalékprofil: adaléksűrűség a mélység függvényében

A dióda kivitele – adalékprofil

Adalékprofil: adaléksűrűség a mélység függvényében

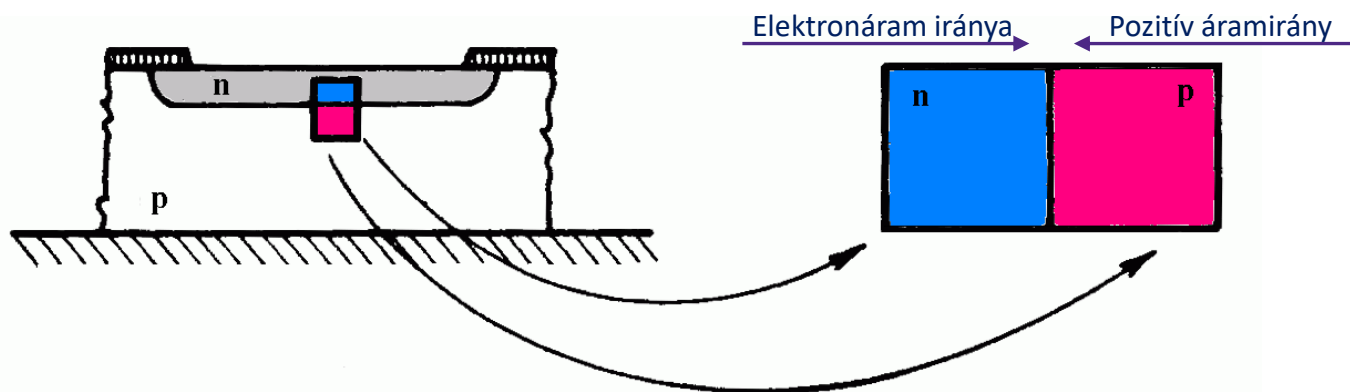
Adalékprofil az előállítás technológiájától, a későbbi céloktól és a dióda alk. területétől függ!

- **diffúzió** (exponenciális eloszlás)
- **epitaxiális réteg növesztés** (hirtelen/abrupt átmenet, 0.1 μ m távolság alatt megy át p adalékolás n-be, homogén adalékolás)
- **ion-implantáció** (hirtelen átmenet, homogén adalékolás és speciális adalékolás – pl.: mélyben erősebben adalékolt – lehetősége)

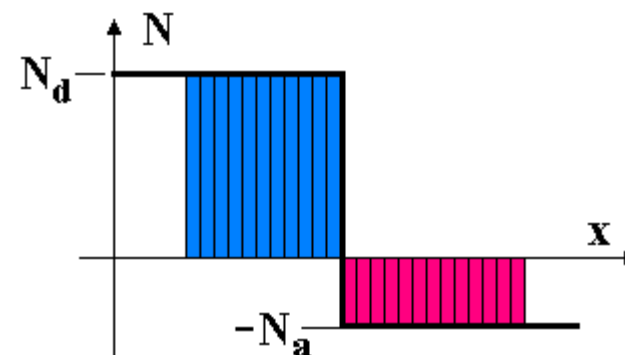


Vizsgálati módszerünk

1. Egydimenziós vizsgálat, “kihasított hasáb”



2. Homogén adalékolás (állandó adalékkoncentrációk)
3. Hirtelen/abrupt átmenet
4. Egyik oldal erősebben adalékolt (legyen ez az n oldal)



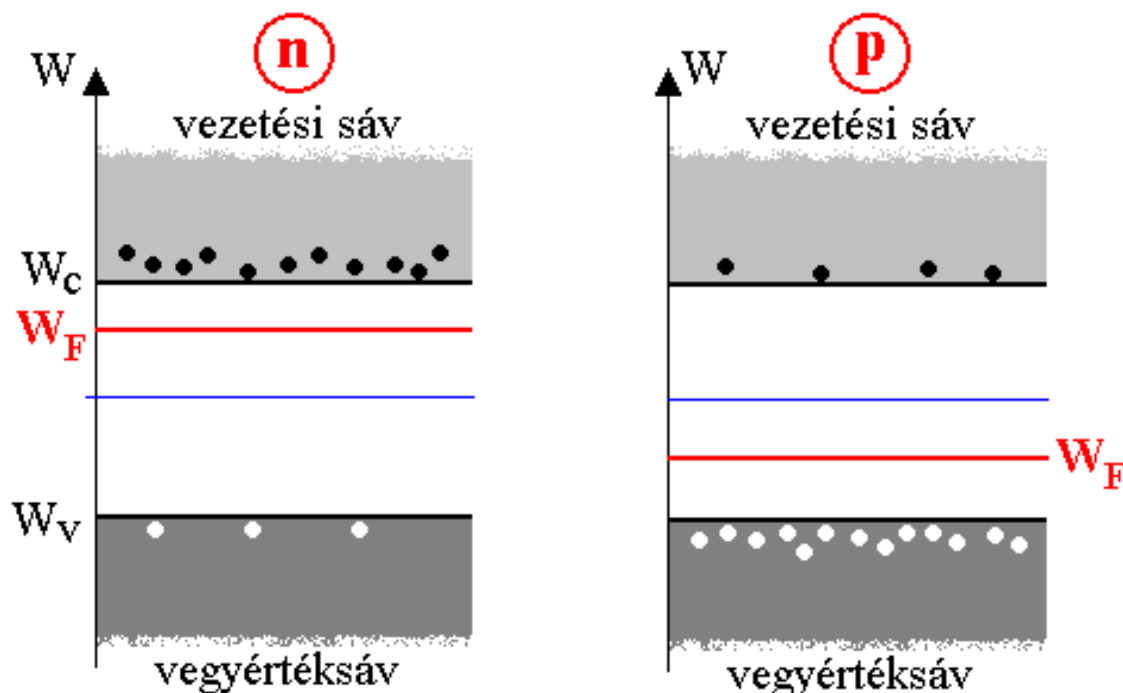
$$N_d \gg N_a$$

Meg fogjuk vizsgálni:

- Hogy injektálódnak a töltéshordozók, pl. az elektronok a p oldalon
 - Diffúziós egyenlet megoldása
- Hogy alakul a sávszerkezet a átmenet mentén?
 - W_c , W_v , W_F
 - Mi lesz ennek a következménye?
 - Elektrosztatikus viszonyok
- Mindezekből hogy jön ki az ideális diódakarakterisztika?

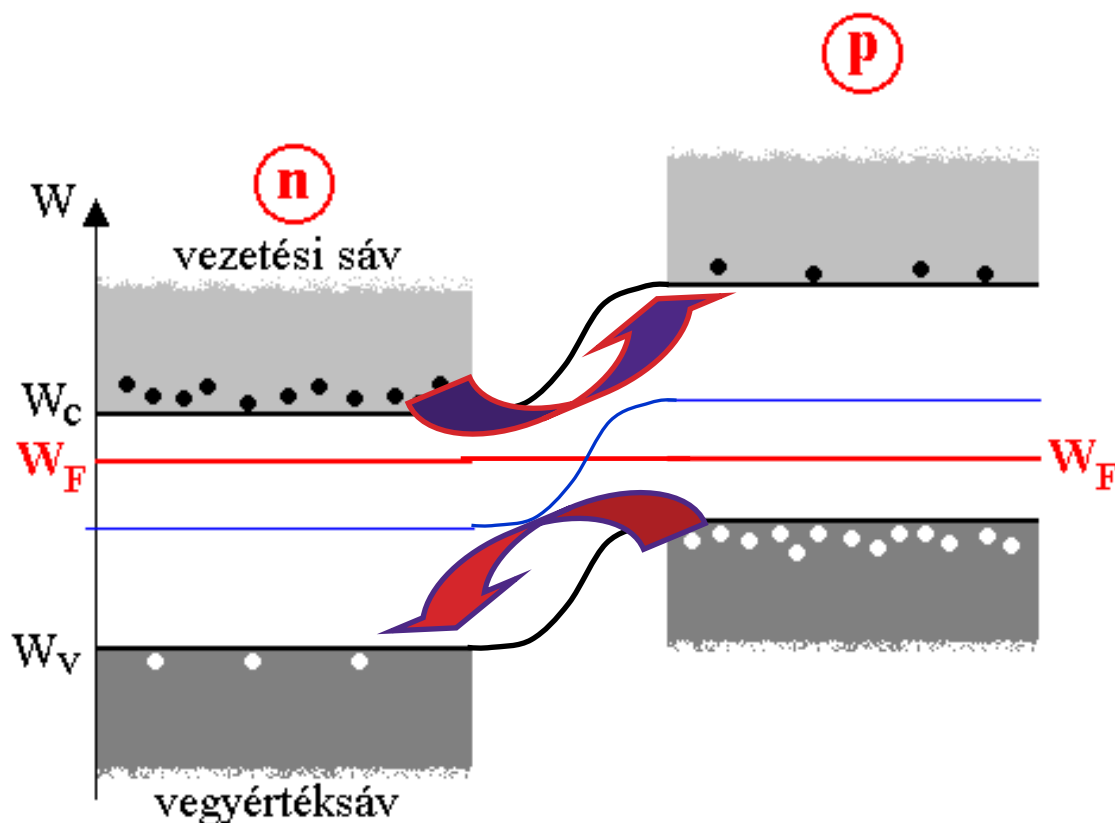
Két külön darab

- Fermi szintek az intrinsic szinthez képest az adalékolásnak megfelelően eltolódnak:



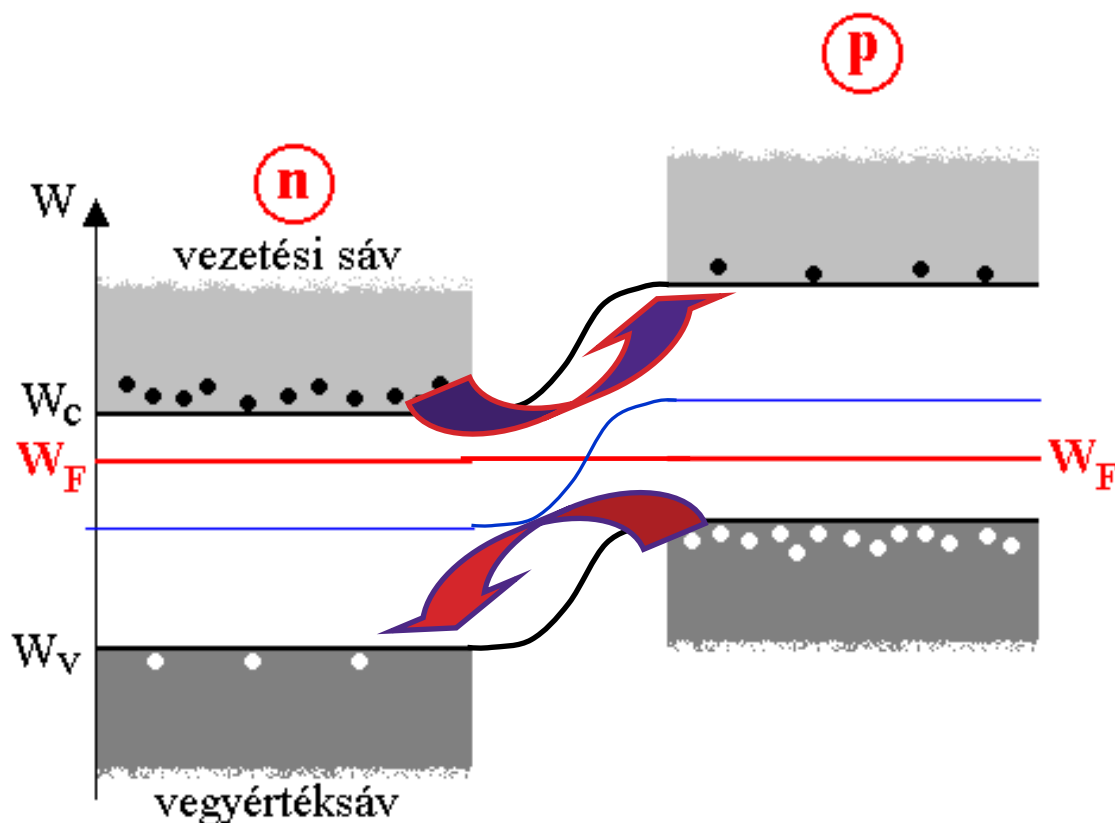
PN átmenet

- Fermi szintek az intrinsic szinthez képest az adalékolásnak megfelelően eltolódnak:



PN átmenet

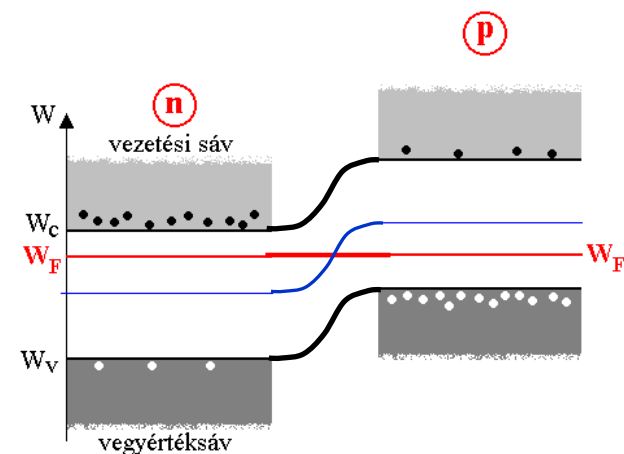
- A P és az N oldal között potenciál lépcső alakul ki. Ez pont akkora lesz, hogy kiegyenlítődjön a Fermi-szint



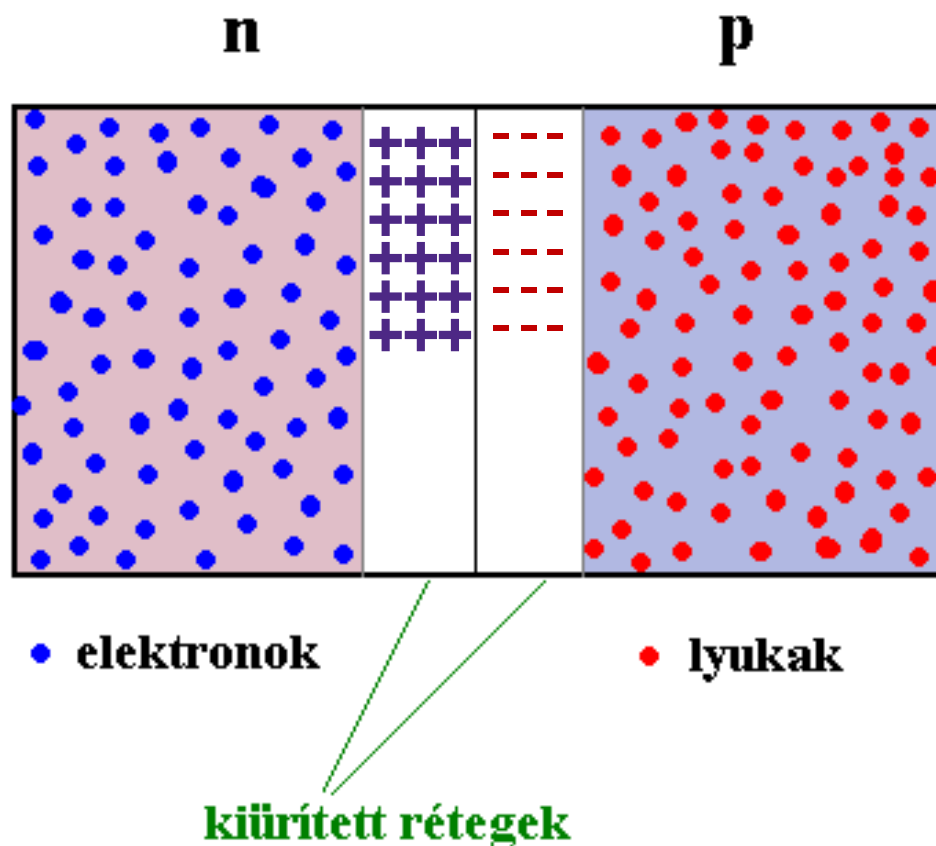
PN átmenet működése

- Nagy töltéshordozó különbség áll fenn a két oldalon
- n oldalon e^- , p oldalon lyukak többségben
- A sűrűség gradiens ($\text{grad } n$) diffúziós áramot okoz
- p oldalról lyukak, n oldalról e^- áramlanak (ua. irány!)
- Ezzel ellentétes hatás kell, hogy egyensúlyi állapot!
- Sodródási áramhoz azonban \bar{E} kell!
- Ki kell alakulnia egy potenciál lépcsőnek (*kontaktpotenciál, érintkezési potenciál különbség*)

$$J_n(x) = -qD_n \frac{dn}{dx}$$



Elektrosztatikus viszonyok



Kiürített rétegek (tértöltés réteg, töltés kettősréteg)

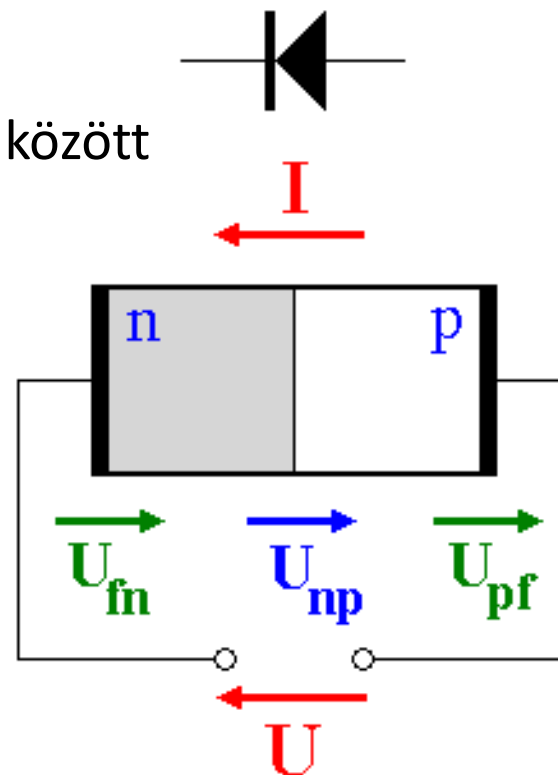
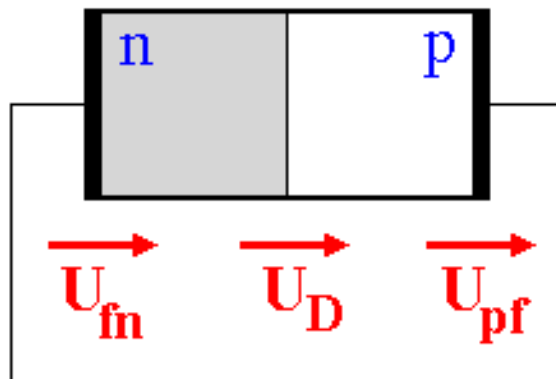
Ezen a területen a szabad töltéshordozók koncentrációja lecsökken

Érintkezési és diffúziós potenciál

U_{fn} fém – n-Si kontaktpotenciál

U_D diffúziós potenciál a p és n oldal között

U_{pf} p-Si – fém kontaktpotenciál



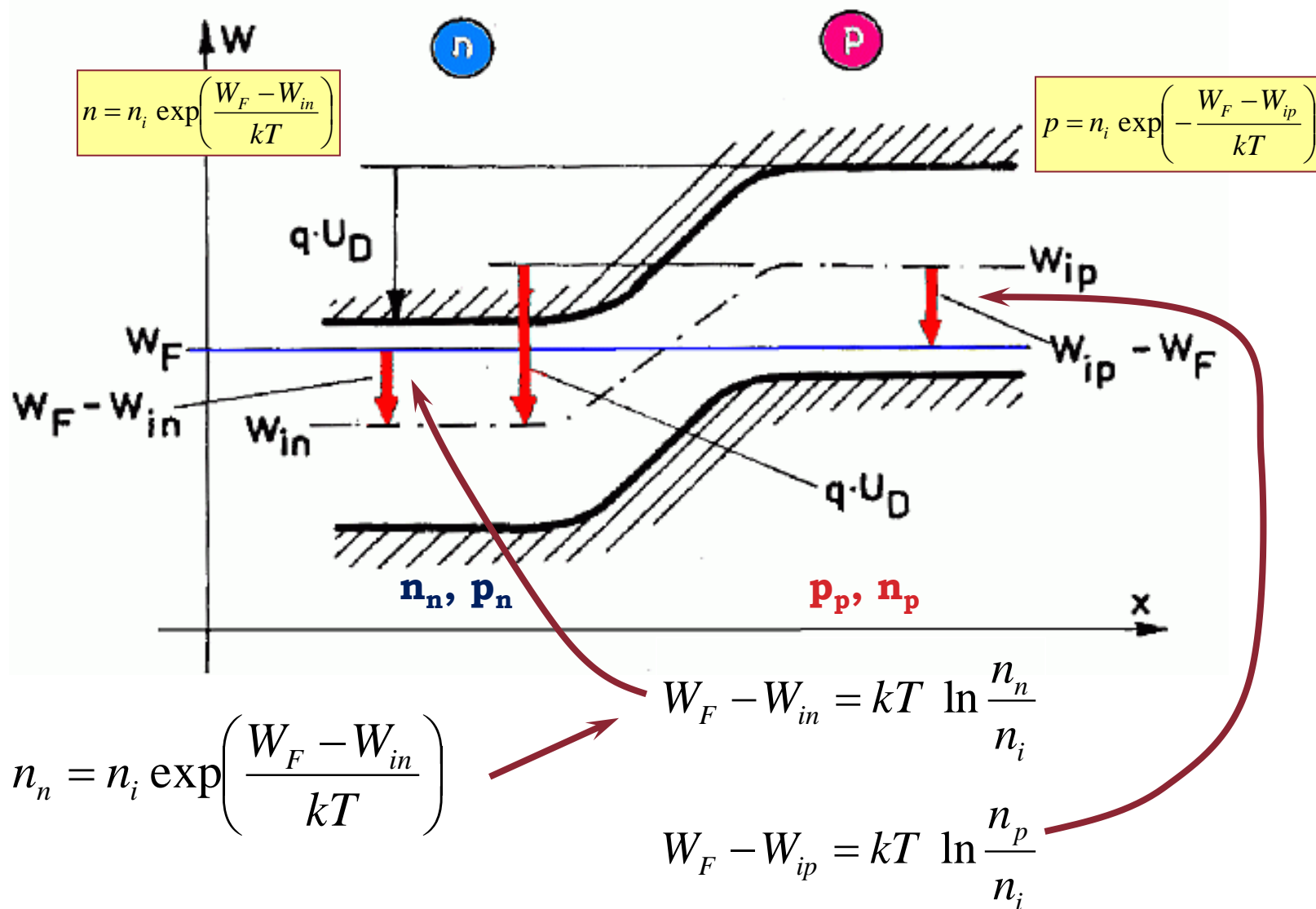
A huroktörvény értelmében:

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

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

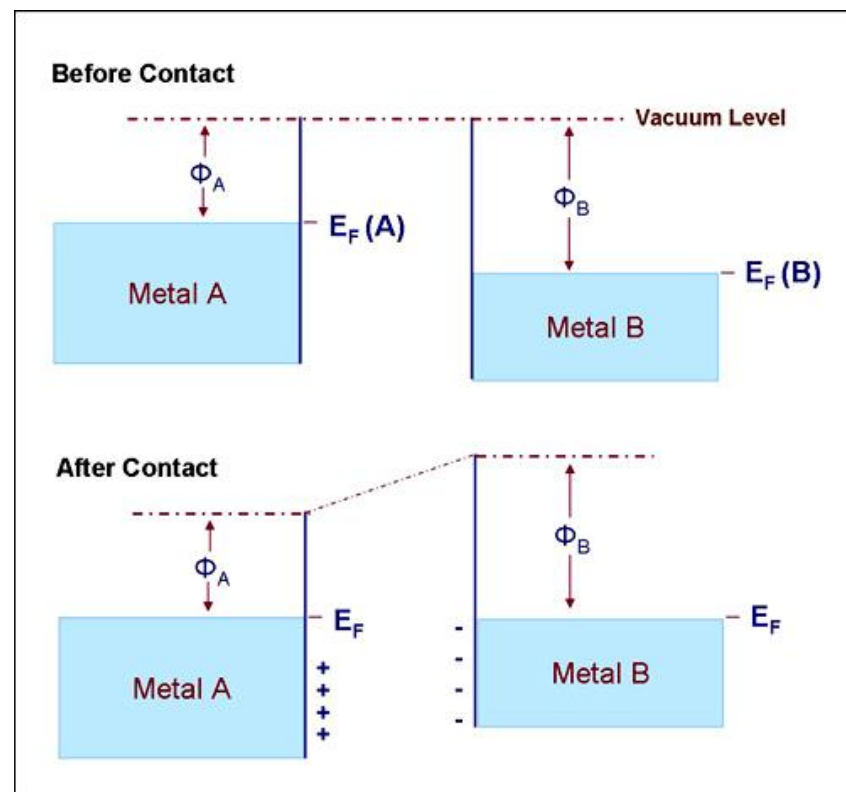
$$U_{np} = U_D - U$$

A diffúziós potenciál számítása



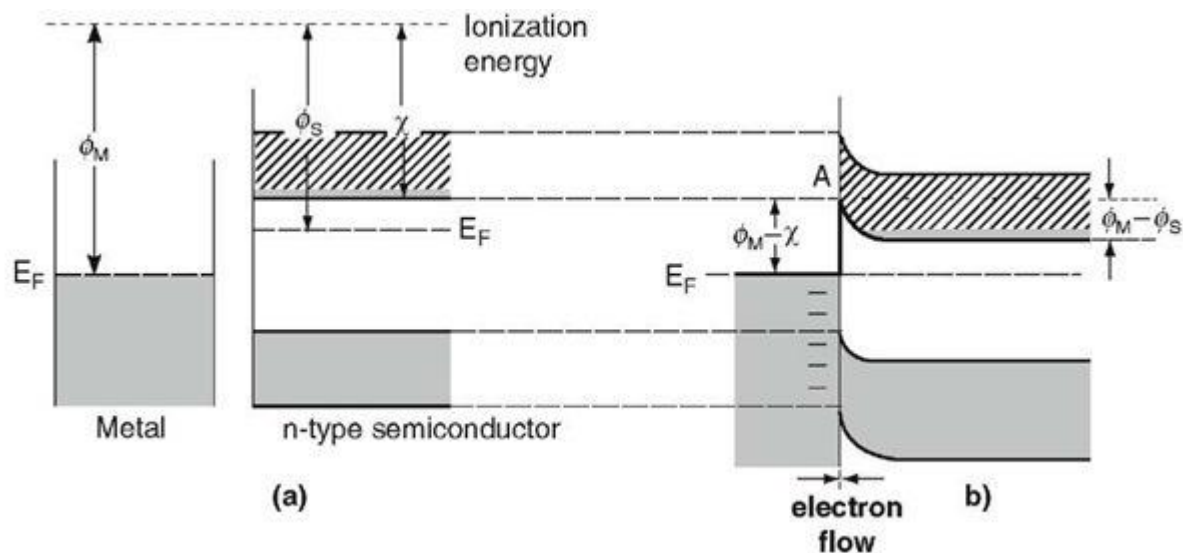
Kontaktpotenciál fém - fém

- Hőmérsékletfüggő
Peltier, Seebeck eff.
- Érintkezés előtt különböző kilépési munkájú fémek
Einstein formula: $E = h \cdot \nu = \phi_A + \frac{1}{2}mv^2$
- Fermi nívók különböznek
- Összeérintés után e^- áram
- Kisebb ϕ_A fémbe (magasabb E_f) e^- hiány, látszólagos pozitív többlet, E_f lesüllyed
- Másik fém (alacsonyabb E_f) potenciálja negatívabbá válik, E_f megemelkedik



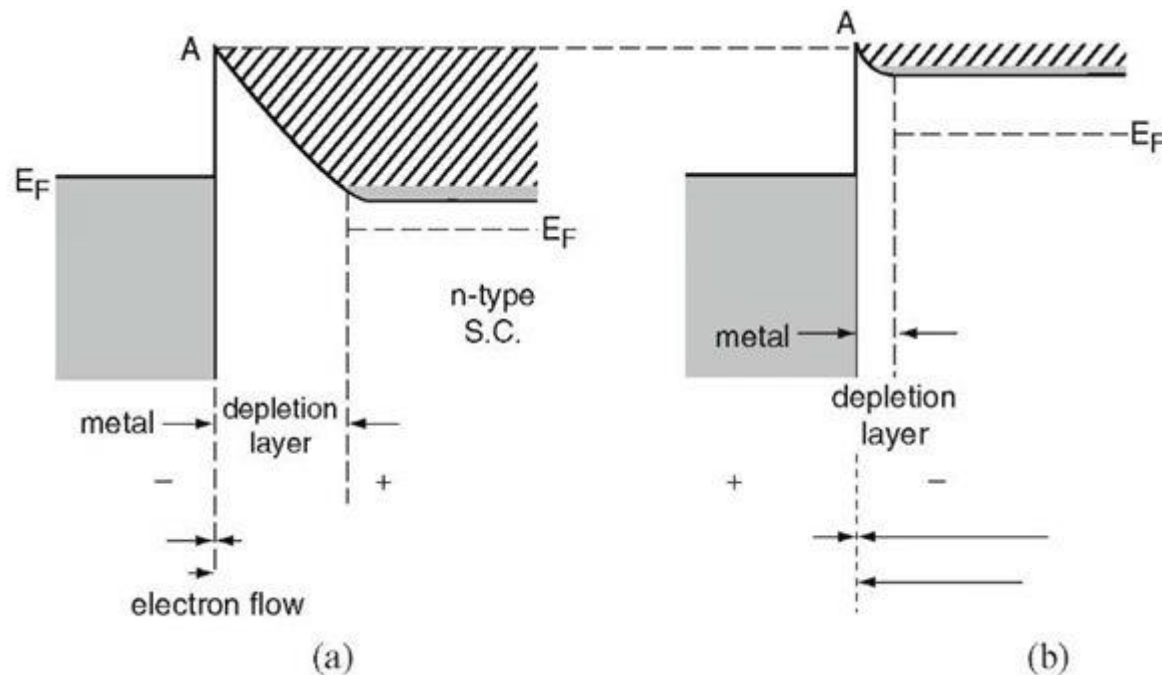
Kontaktpotenciál fém – n típusú félvezető

- Összeérintés után az n típusú félvezetőből e- áram a fémbe
- Fémbe: e- többlet, látszólagos negatív potenciál alakul ki
- Félvezetőben: e- hiány, sávelhajlás!
- Potenciálgát: $\Phi_{barrier} = \Phi_M - X$
- X elektronaffinitás



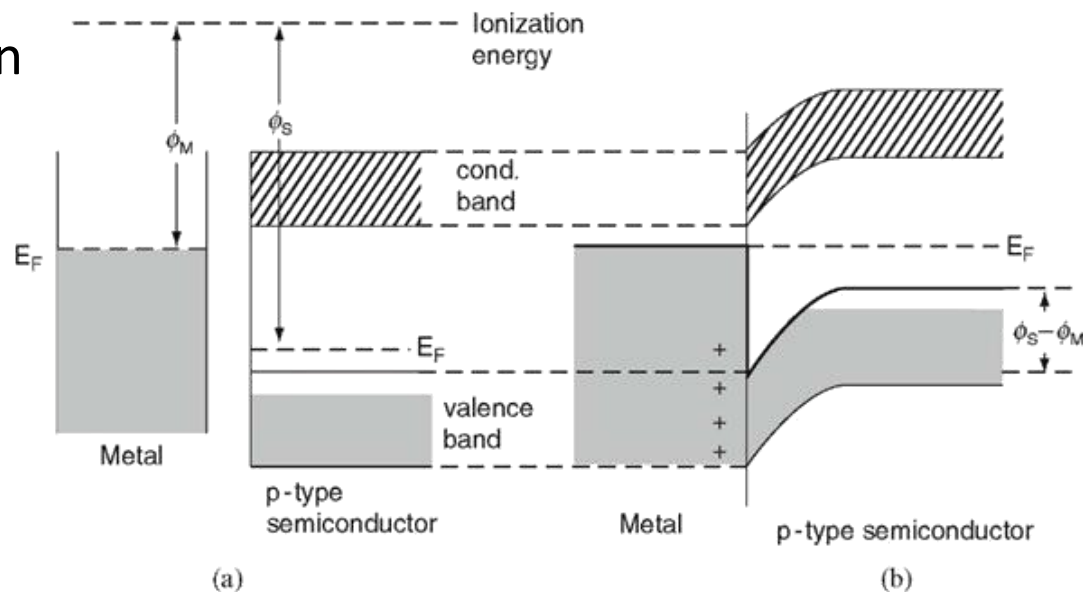
Kontaktpotenciál fém – n típusú félvezető

- Gyakori példa: **alumínium fémezés – n típusú szilícium** kontaktusa (Schottky átmenet)
- „Nyitó-” és „záróirányban” előfeszítve
- Nyilak hossza arányosan mutatja az átfolyó áram nagyságát



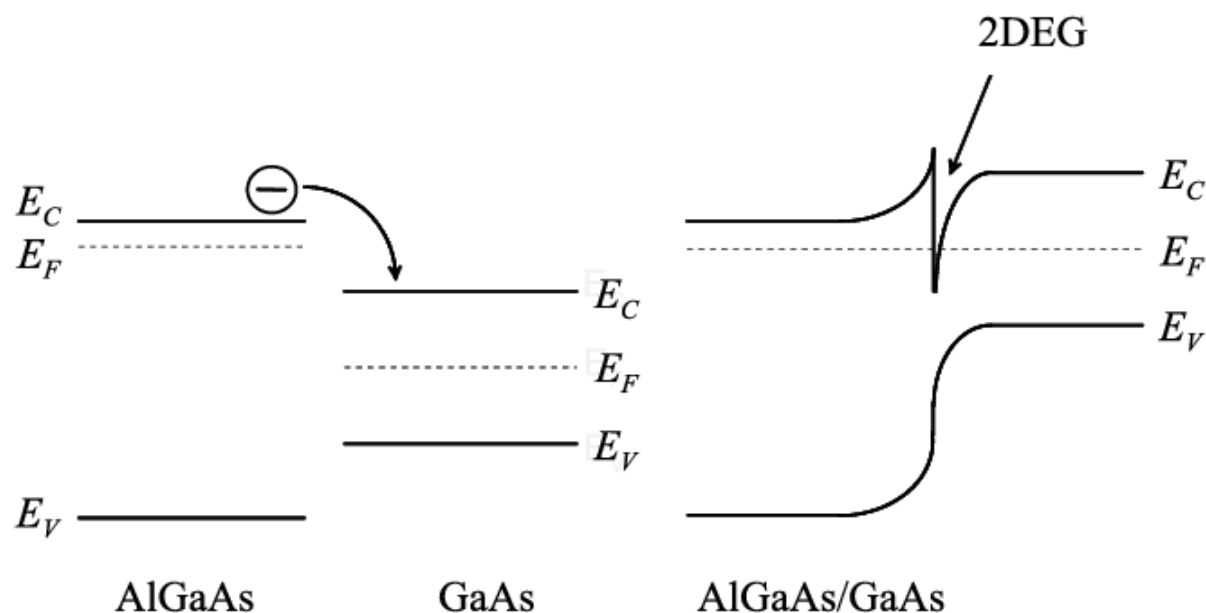
Kontaktpotenciál fém – p típusú félvezető

- Összeérintés után a fémből e- áram a p típusú félvezetőbe
- Fémbe: e- hiány, látszólagos pozitív potenciál
- Félvezetőben: e- többlet, sávelhajlás!
- Potenciálgát: $\Phi_b = E_g - (\Phi_M - X)$
- Befolyásolja értékét:
 - Határfelületi állapotok
 - Energianívók a tiltott sávban
 - Határfelületi réteg vastagsága



Heteroátmenet

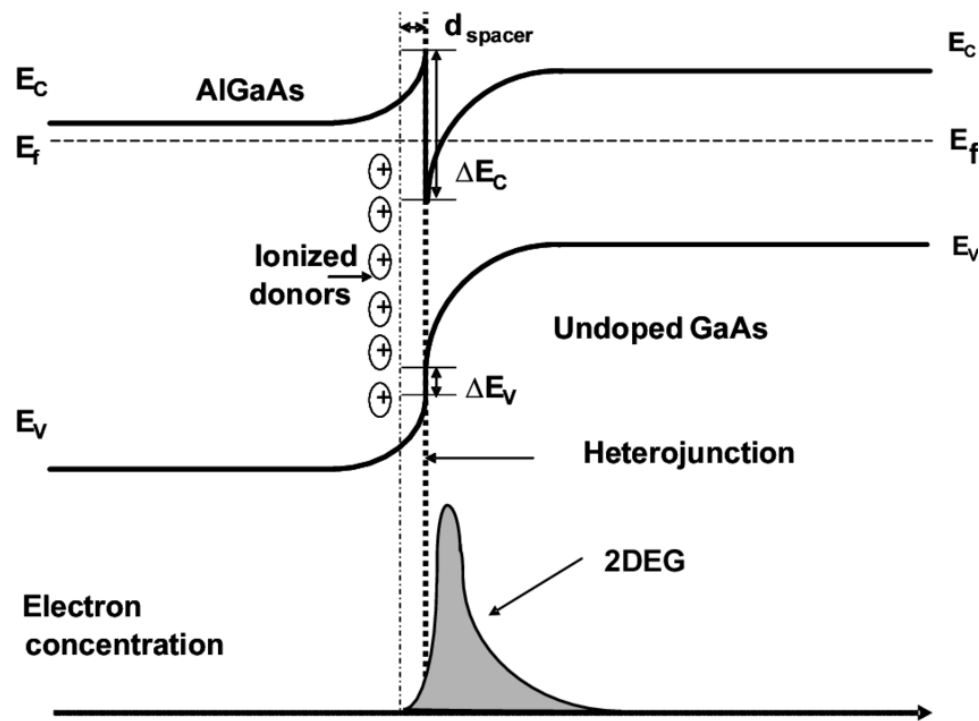
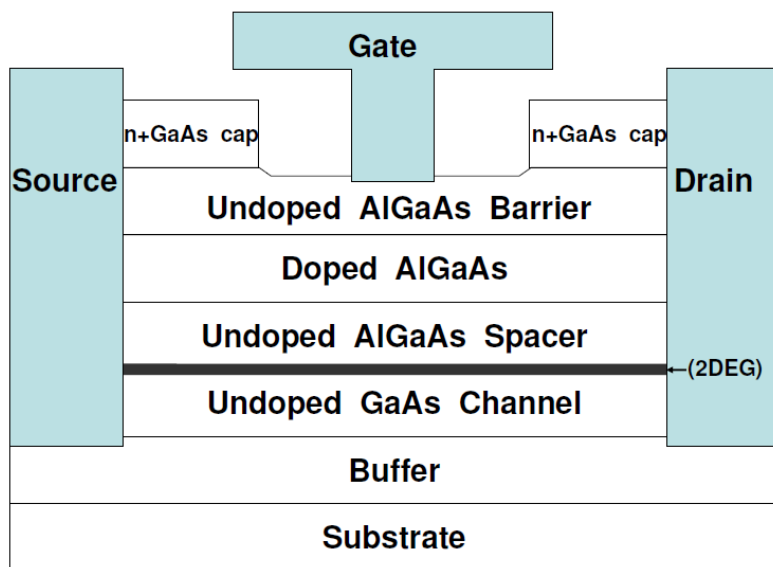
- Két eltérő tiltott sáv szélességű réteg.
- Nem csak a W_c és W_v szintje van különböző helyen!
- Fermi-nívó (továbbra is) állandó, vezető kapcsolatban lévő rétegek esetén, termikus egyensúlyban!
- 2D e^- gáz a kevésbé adalékolt, nagyobb rácsállandójú rétegben



Juin J. Liou et al., Evolution and recent advances in RF/microwave transistors, Journal of Telecomm and Inf. Tech., 2004/01

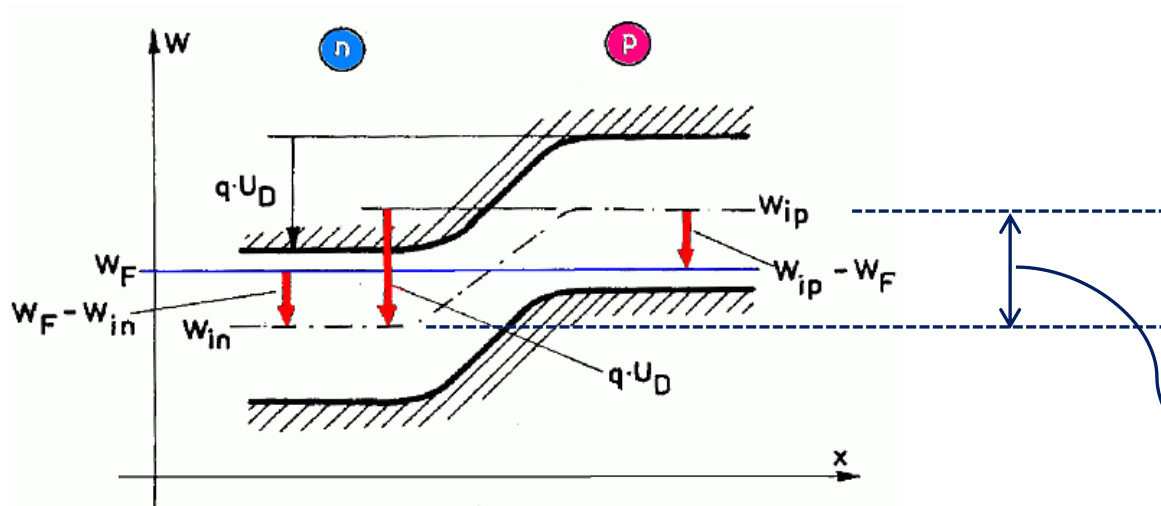
Heteroátmenet

- Két eltérő tiltott sáv szélességű réteg
- **HEMT** eszközök pl.: **n+ AlGaAs – adalékolatlan GaAs**
- **LED** eszközök esetén ún. **dupla heteroátmenetes szerkezet**



Dogmin Liu, DESIGN, FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF INALAS/INGAAS/INASP COMPOSITE CHANNEL HEMTS, PhD Dissertation, Ohio State University, 2008

A diffúziós potenciál számítása



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

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

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

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

$$U_D = U_T \ln \frac{N_d N_a}{n_i^2}$$

„beépített”
potenciál
„built-in”
voltage

$n_p = n_i^2 / p_p$
tömeghatás tv.

A diffúziós potenciál számítása

$$U_D = U_T \ln \frac{N_d N_a}{n_i^2}$$

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!

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

Nyilván $U_D < U_g$, általában 70-80 %-a.

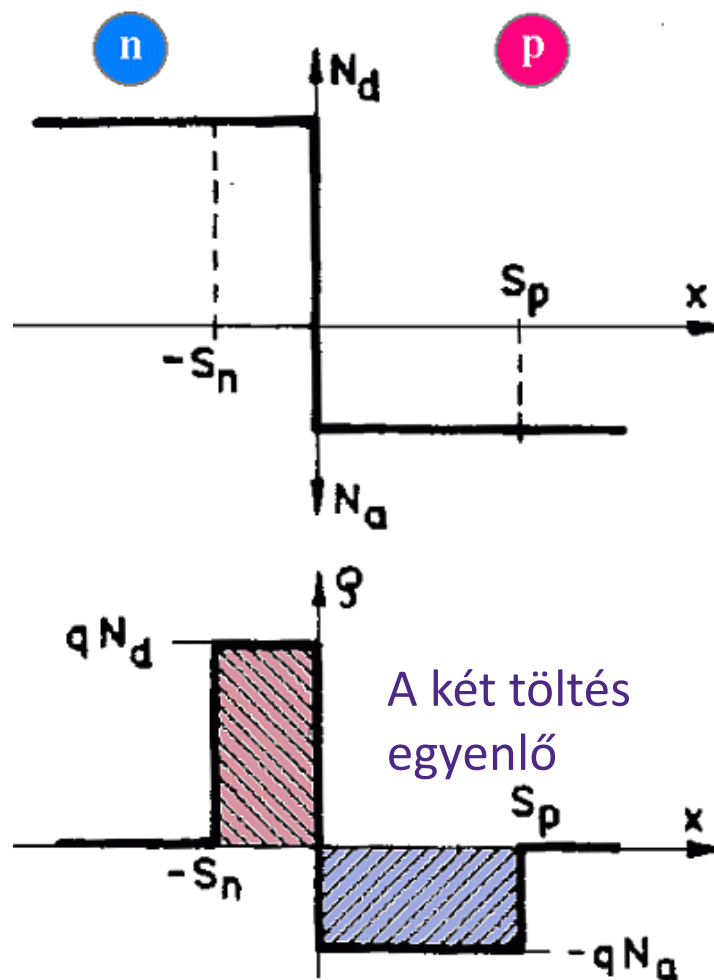
Számítások a kiürített rétegre

Adalékionok töltéssűrűsége!

$$q S_n N_d = q S_p N_a$$

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

A gyengébben adalékolt oldalon szélesebb a kiürített réteg.

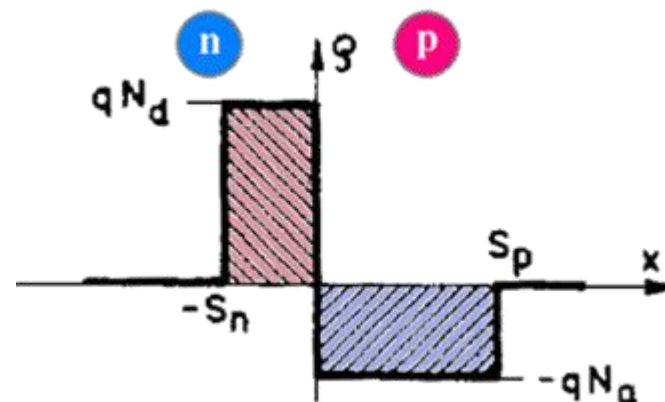


Számítások a kiürített rétegre

- Abrupt, homogén átmenet feltételezve
- Töltéssűrűség és a térerősség közötti kapcsolat

- Gauss törvény:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho(x)}{\varepsilon}$$



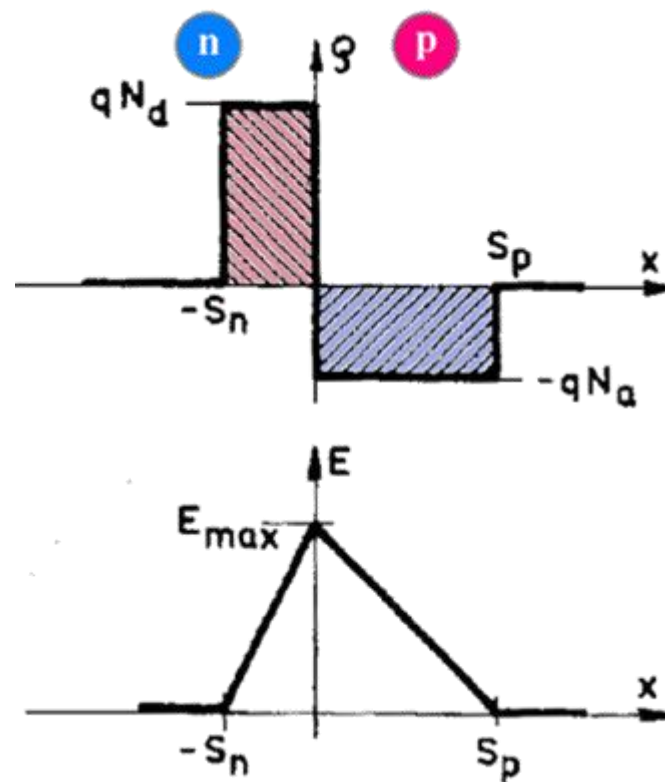
Számítások a kiürített rétegre

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho(x)}{\varepsilon}$$

$$E(x) = \frac{1}{\varepsilon} \int_{-\infty}^x \rho(\xi) d\xi$$

$$E_{\max} = \frac{1}{\varepsilon} \int_{-S_n}^0 q \cdot N_d dx$$

$$E_{\max} = \frac{q N_d S_n}{\varepsilon} = \frac{q N_a S_p}{\varepsilon}$$



Számítások a kiürített rétegre

- Poisson egyenlet – kapcsolat potenciál különbség és térerősség eloszlás között

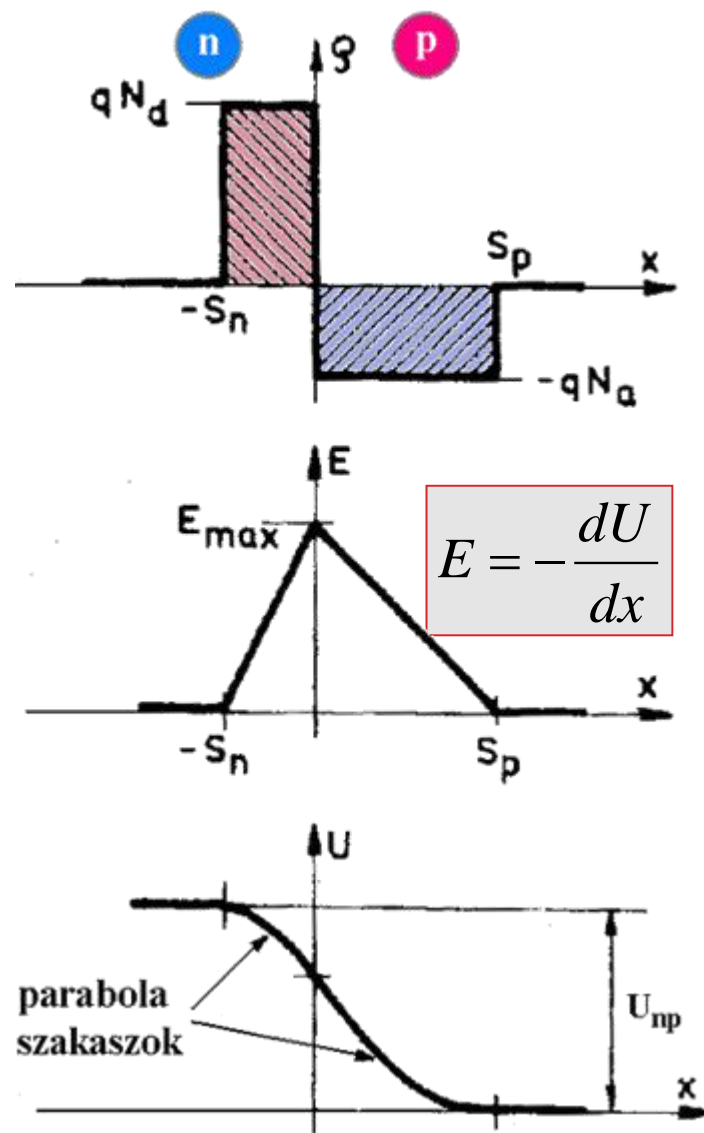
$$U = \phi(S_n) - \phi(0) = \int_{S_n}^0 -E(x) dx$$

- $E(x)$ alatti terület:

$$U_{np} = \frac{1}{2} E_{\max} (S_n + S_p) \cong \frac{1}{2} E_{\max} S_p$$

$$E_{\max} = \frac{q N_a S_p}{\varepsilon}$$

$$U_{np} \approx \frac{1}{2} \frac{q N_a}{\varepsilon} S_p^2$$



Számítások a kiürített rétegre

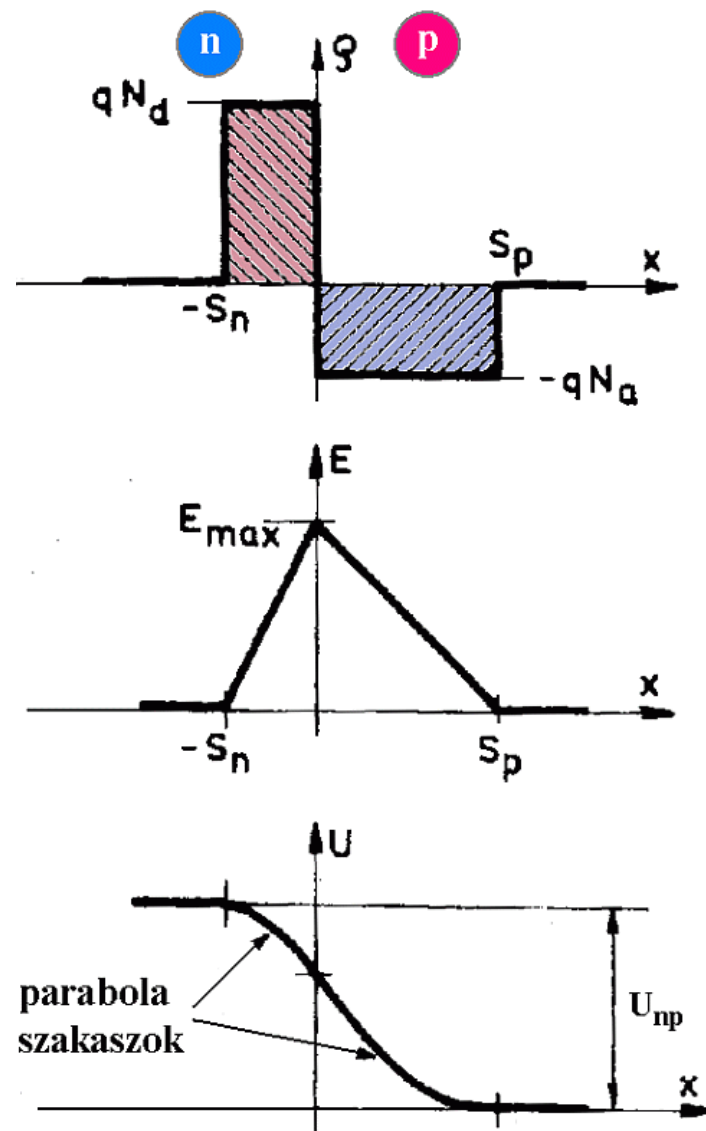
$$U_{np} \approx \frac{1}{2} \frac{q N_a}{\varepsilon} S_p^2$$

$$S_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q N_a}} \sqrt{U_{np}} = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q N_a}} \sqrt{U_D - U}$$

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

$$E_{\max} = \frac{q N_a}{\varepsilon} S_p$$

$$E_{\max} = \frac{q N_a}{\varepsilon} \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q N_a}} \sqrt{U_D - U} = \sqrt{\frac{2q N_a}{\varepsilon}} \sqrt{U_D - U}$$



Számítások a kiürített rétegre

$$S_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{qN_a}} \sqrt{U_{np}} = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{qN_a}} \sqrt{U_D - U}$$

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

PÉLDA

Egy abrupt Si dióda adalék adatai:
 $N_d=10^{18}/\text{cm}^3$, $N_a=10^{16}/\text{cm}^3$.

Határozzuk meg a kiürített rétegek szélességét!
 $(\varepsilon_r=11,8, U=0\text{V})$

$$S_p = \sqrt{\frac{2 \cdot 11,8 \cdot 8,86 \cdot 10^{-12}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{22}}} \sqrt{0,838} = 0,331 \mu\text{m} \quad S_n = 0,003 \mu\text{m} = 3 \text{ nm}$$

És ha $U = -100\text{V}$?

$$S_p = 0,331 \cdot \sqrt{\frac{0,838 + 100}{0,838}} = 3,63 \mu\text{m}$$

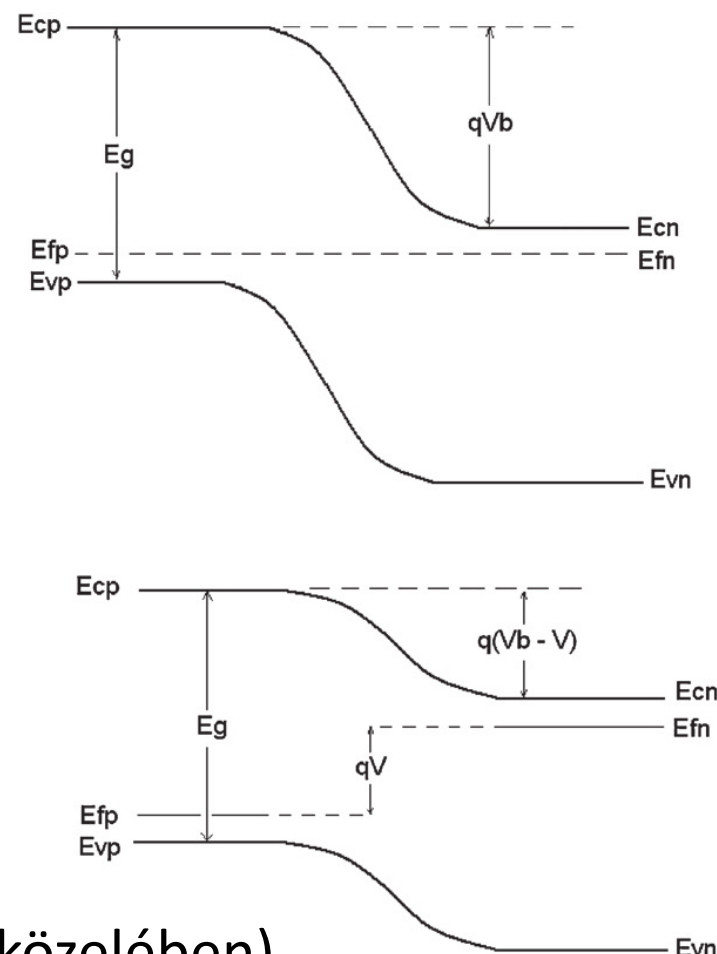
Dióda karakterisztika

Dióda nyitó/záróirányú működése

Az ideális diódakarakterisztika

Dióda nyitóirányú működése

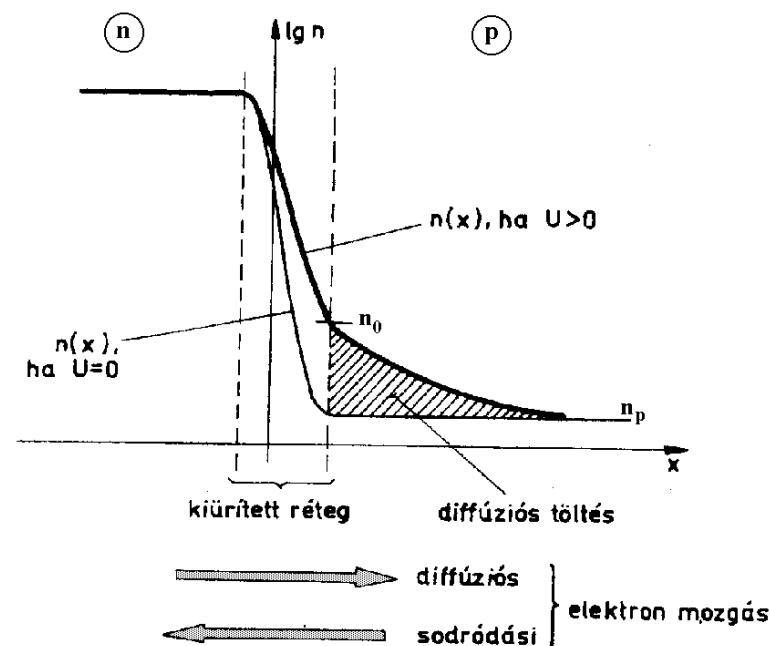
- Pozitív (nyitóirányú) külső U hatására
 - csökken a potenciállépcső, így csökken a térerősség a tértöltés-rétegben
 - emiatt felborul az áramegyensúly: diffúziós áram túlsúlyba kerül, e- diffundál n rétegből p oldal felé
- Mindkét oldal többségi töltéshordozói diffúzióval haladnak/injektálódnak a másik oldal felé (többlet töltés jelenik meg)
- e- felhalmozódnak p oldalon (átmenet közelében)
- diffúziós töltés megjelenik L_D -vel összemérhető ($10\mu\text{m}$) távolságban



Dióda nyitóirányú működése

■ Diffúziós töltés felhalmozódása:

- csökken a kiürített réteg mentén a $\text{grad}(n) \rightarrow$ csökken az e^- áram a kiürített rétegben
- p oldalon $\text{grad}(n)$, így átjutott e^- távoldó mozgás (diff. áram) az átmenettől a kontaktus felé
- addig növekszik diffúziós töltés, amíg a két hatás kiegyenlítődik



■ Ez az egyensúly határozza meg a PN átmenet áramát!

- *Megj: A kiürített réteg egyensúlyi áramát (diff., sodródási) nem befolyásolja jelentős mértékben ez a megjelenő makroszkópikus áramösszetevő! (kb. 0.1%)*

Dióda nyitóirányú működése

▪ Keskenybázisú struktúra

- p réteg vastagsága kisebb, mint diffúziós hossz, az e^- csak egy része rekombinálódik

▪ Szélesbázisú struktúra

- p oldalra jutott minden e^- rekombinálódik a p oldalon

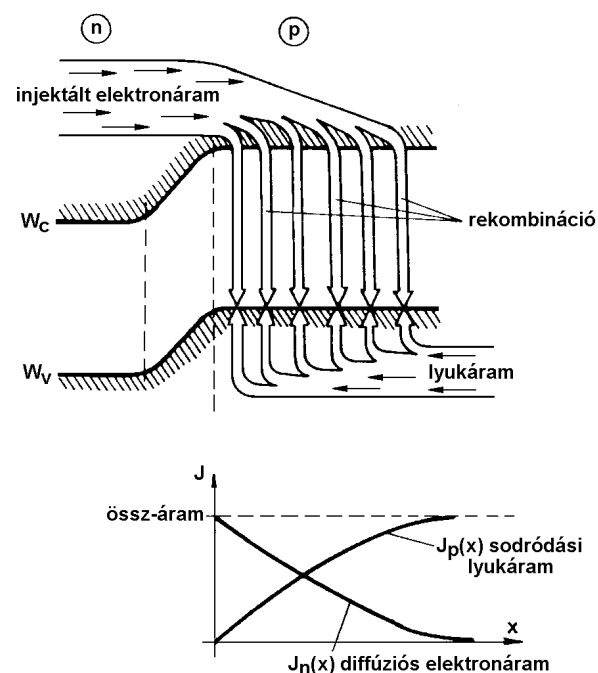
▪ De akkor hogyan jut el a töltéshordozó a kontaktusig?

- e^- áram szerepét fokozatosan a lyukak veszik át!

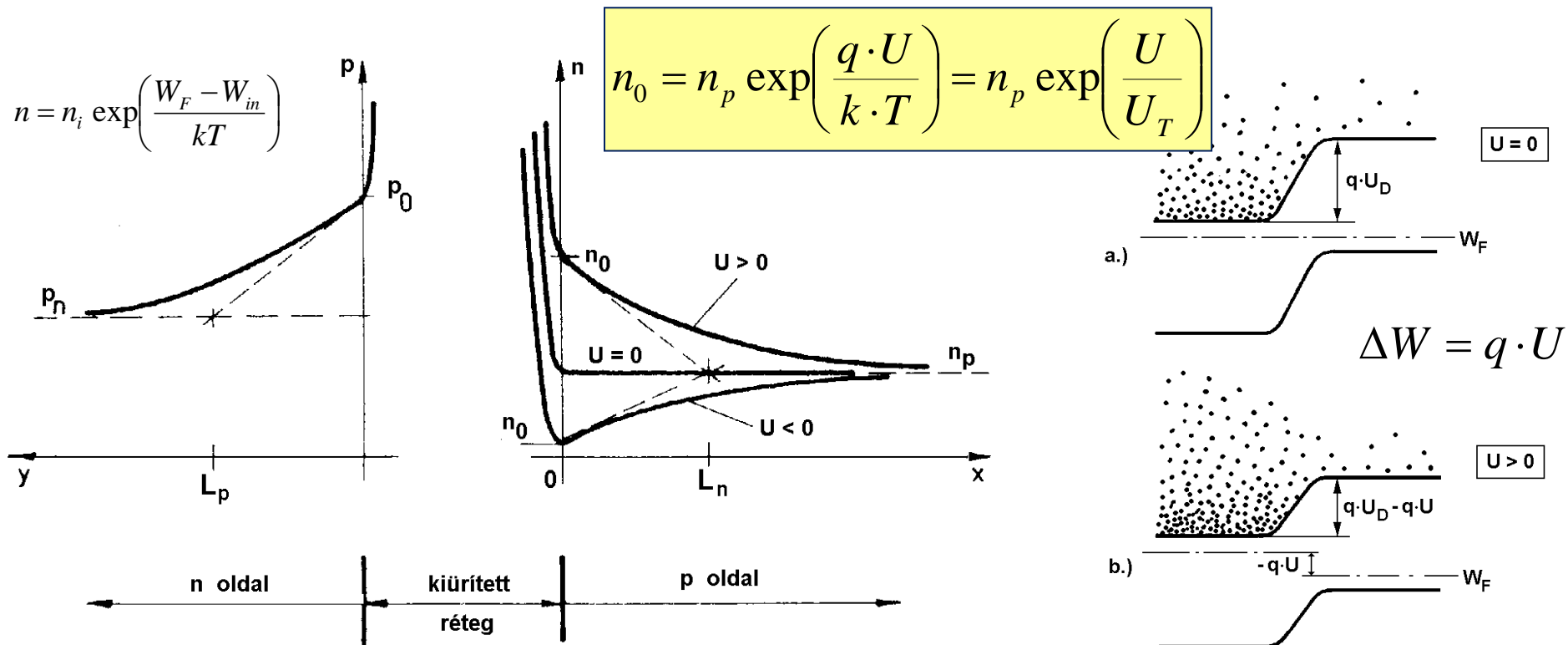
▪ Lyukakat kontaktustól PN átmenetig térerő mozgatja

- A nyitófesz egy kis része esik itt.
- A lyuk a többségi töltéshordozó p oldalon, elektron kisebbségi.
- Az e^- esetén ez a térerő okozta sodródási áram elhanyagolható!

*Áramvezetés
szempontjából
semmi különbség!*



Az ideális dióda karakterisztika



- A vezetési sávban a betöltési valószínűség (FD) $e^{\frac{\Delta W}{k \cdot T}}$ szerint igen erősen változik az energiával
- Az n oldalon szabadon mozgó elektronok legnagyobb része képtelen átmenni a p oldalra ($q \cdot U_D$ nagyságú energiagát)
- $U > 0$ hatására energiagát $q \cdot U$ -val csökken, így az n oldal elektronjainak nagyobb része tud átlépni a p oldalra

Az ideális dióda karakterisztika

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

$$n_0 = n_p \exp\left(\frac{q \cdot U}{k \cdot T}\right) = n_p \exp\left(\frac{U}{U_T}\right)$$

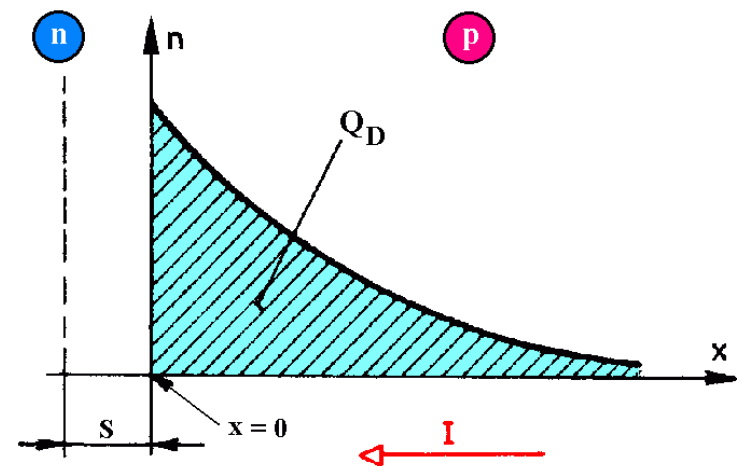
$$J_n(x) = -qD_n \frac{dn}{dx} = -qD_n (n_0 - n_p) \exp(-x / L_n) \left(\frac{-1}{L_n}\right)$$

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

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

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

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



Az ideális dióda karakterisztika

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

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

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

I_0 a kisebbségi hordozó sűrűséggel arányos!

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

$$I = Aq \overbrace{\left(\frac{D_n n_p}{L_n} + \frac{D_p p_n}{L_p} \right)}^{I_0} (\exp(U / U_T) - 1)$$

Az ideális dióda karakterisztika

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

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

PÉLDA

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

$$U \cong 0.026 \cdot \ln(10^{-2} / 10^{-13}) = 0.658 \text{ V}$$

PÉLDA

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

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

$$\Delta U = 0.026 \cdot \ln 10 \cong 0.06 \text{ V} = 60 \text{ mV}$$