



Az Információ-technika és a Bionika Fizikája

Statisztikus fizika 4

2016 Tavasz

Dr. Csurgay Árpád István

Saját vezetésű (intrinsic) félvezetők egyensúlyi makro állapotban

Saját vezetésű (intrinsic) félvezetőkben a Fermi szintet a „töltés neutralitás” elvéből lehet meghatározni:

Az elektronok száma a vezetési sávban egyenlő a lyukak számával a valencia sávban:

$$n = p$$

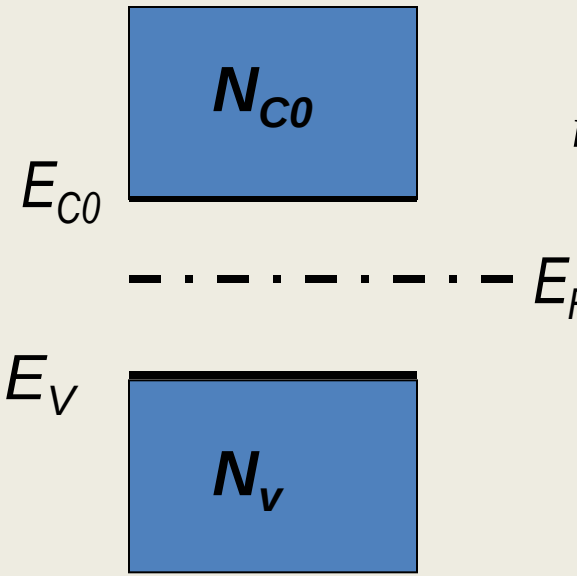
$$n = N_C e^{\frac{E_F - E_{C0}}{kT}} = p = N_V e^{\frac{E_V - E_F}{kT}}$$

$$\ln \frac{N_V}{N_C} = -\frac{E_V - E_F}{kT} + \frac{E_F - E_{C0}}{kT} \rightarrow E_F = \frac{E_V + E_{C0}}{2} + \frac{1}{2} kT \ln \frac{N_V}{N_C}$$

$$E_F = \frac{E_V + E_{C0}}{2} + \frac{3}{4} kT \ln \frac{m_{\text{eff}}^{(p)}}{m_{\text{eff}}^{(n)}}$$

Jelöljük a „tiltott” energiasáv szélességét $E_{C0}-E_V = \Delta E$ -vel.

A negatív töltéshordozók (elektronok) száma:



$$n_i = \sqrt{N_C N_V} e^{-\frac{\Delta E}{2k_B T}}$$

$$n_i = N_C e^{\frac{E_F - E_{C0}}{k_B T}}$$

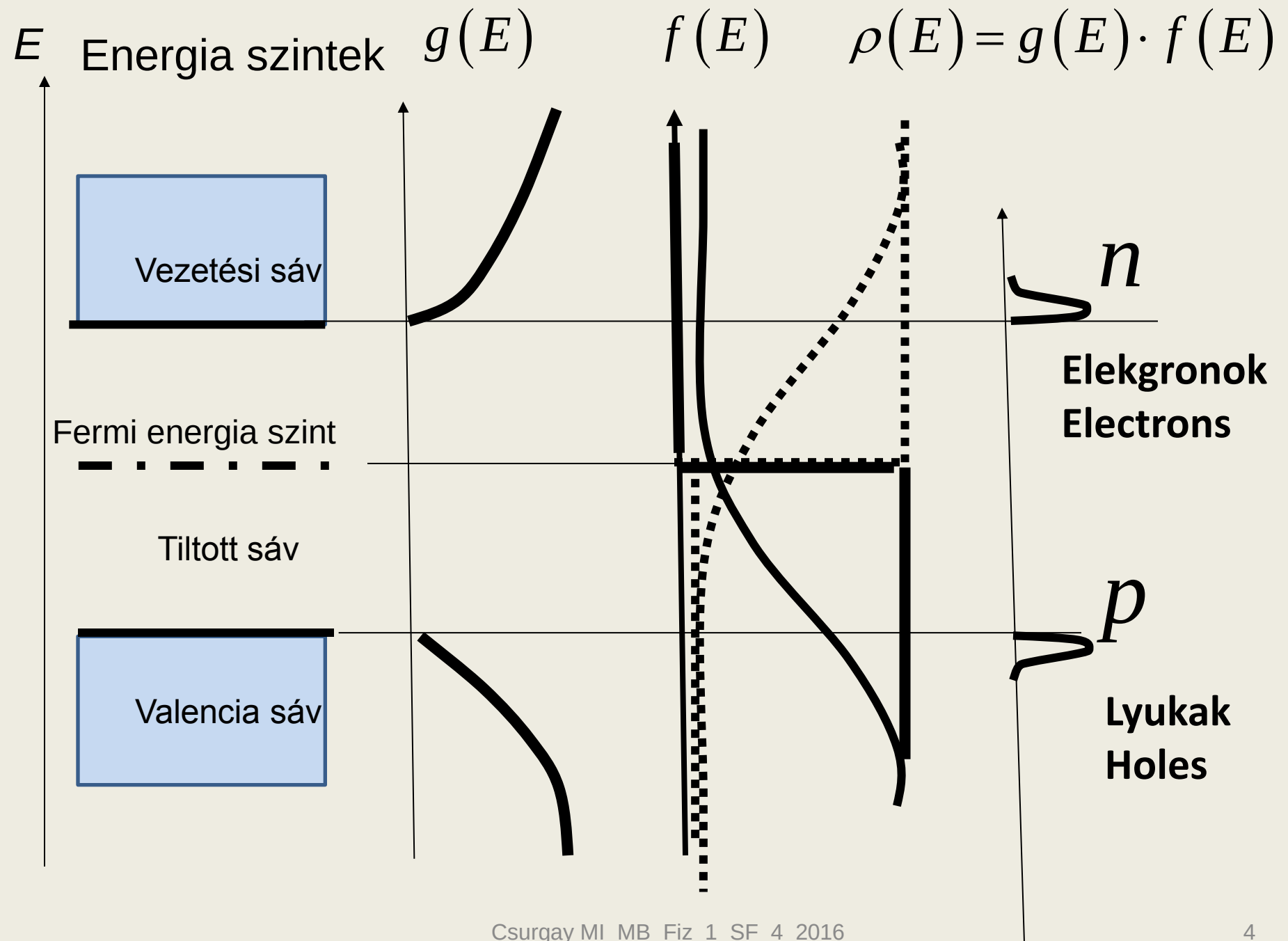
$$N_C = 2 \frac{(2\pi m_{\text{eff}}^{(n)} k_B T)^{3/2}}{h^3}$$

$$p_i = N_V e^{\frac{E_V - E_F}{k_B T}}$$

$$N_V = 2 \frac{(2\pi m_{\text{eff}}^{(p)} k_B T)^{3/2}}{h^3}$$

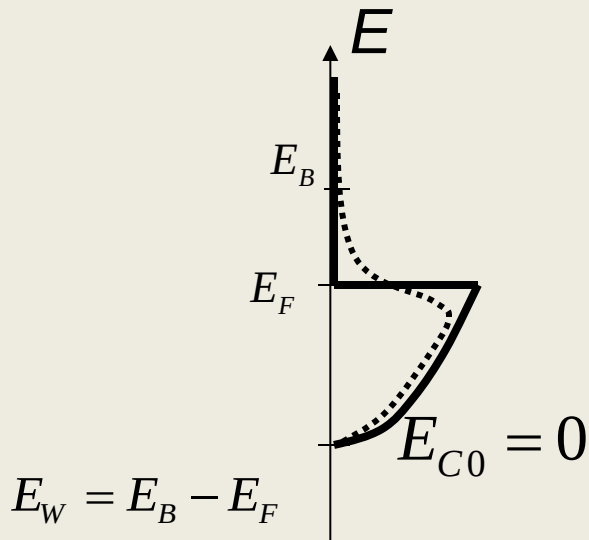
$$g_n(E) = \frac{4\pi V (2m_{\text{eff}}^{(n)})^{3/2}}{h^3} \sqrt{E - E_{C0}}$$

$$g_p(E) = \frac{4\pi V (2m_{\text{eff}}^{(p)})^{3/2}}{h^3} \sqrt{E_{V0} - E}$$



Szilárd állapotú anyagok (metals, insulators, intrinsic semiconductors)

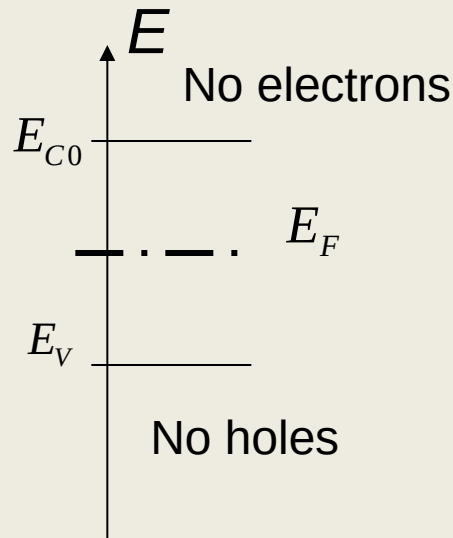
Vezetők
(metals)



$$E_{F0} = \frac{h^2}{8m} \left(\frac{3n}{\pi} \right)^{2/3}$$

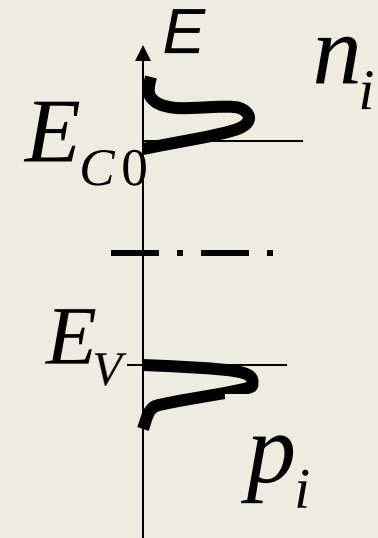
Sommerfeld
“bath tub” = „kád” model

Szigetelők
(dielectrics)



$$E_F = \frac{E_{C0} + E_V}{2}$$

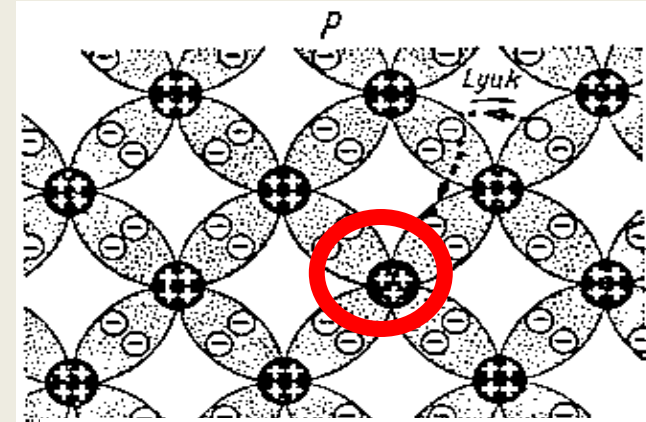
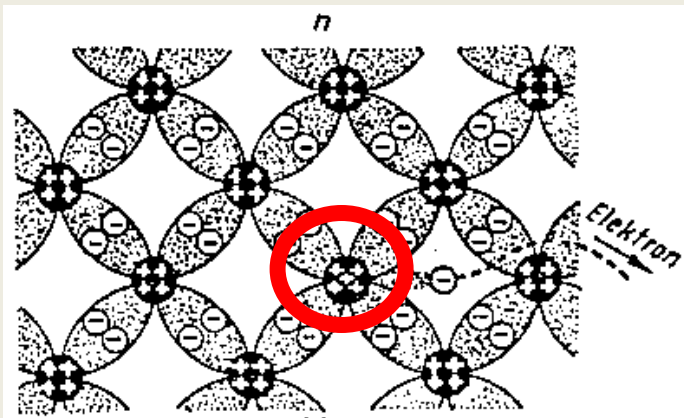
Saját vezetésű (Intrinsic)
félvezetők



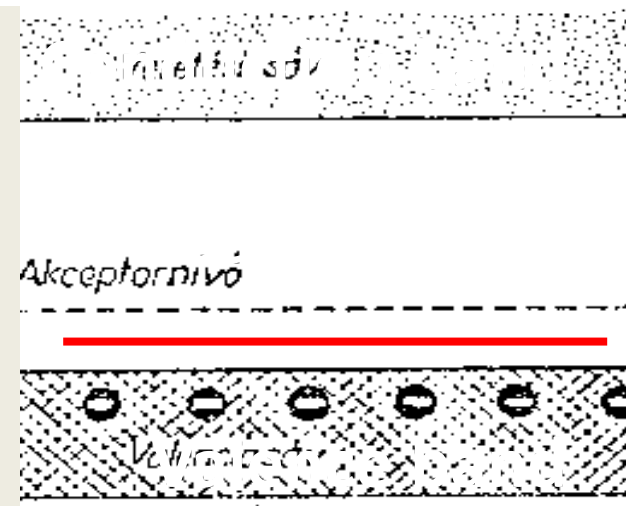
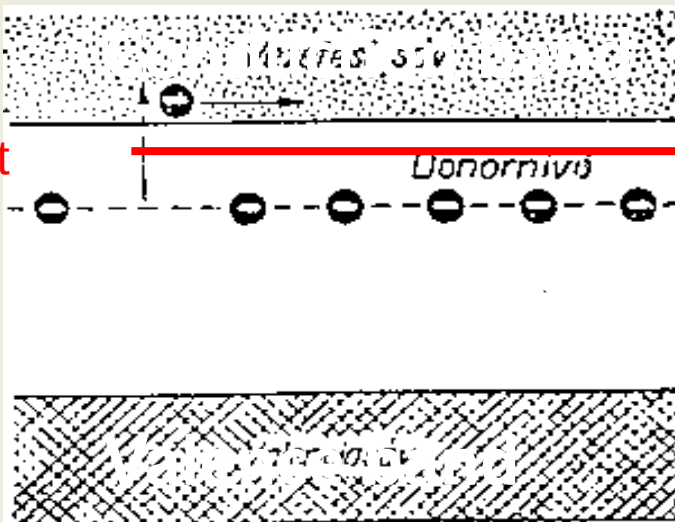
$$n_i = p_i$$

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} e^{-\frac{\Delta E}{2k_B T}}$$

„Adalékolt” „Doped” félvezetők egyensúlyi makro állapotban



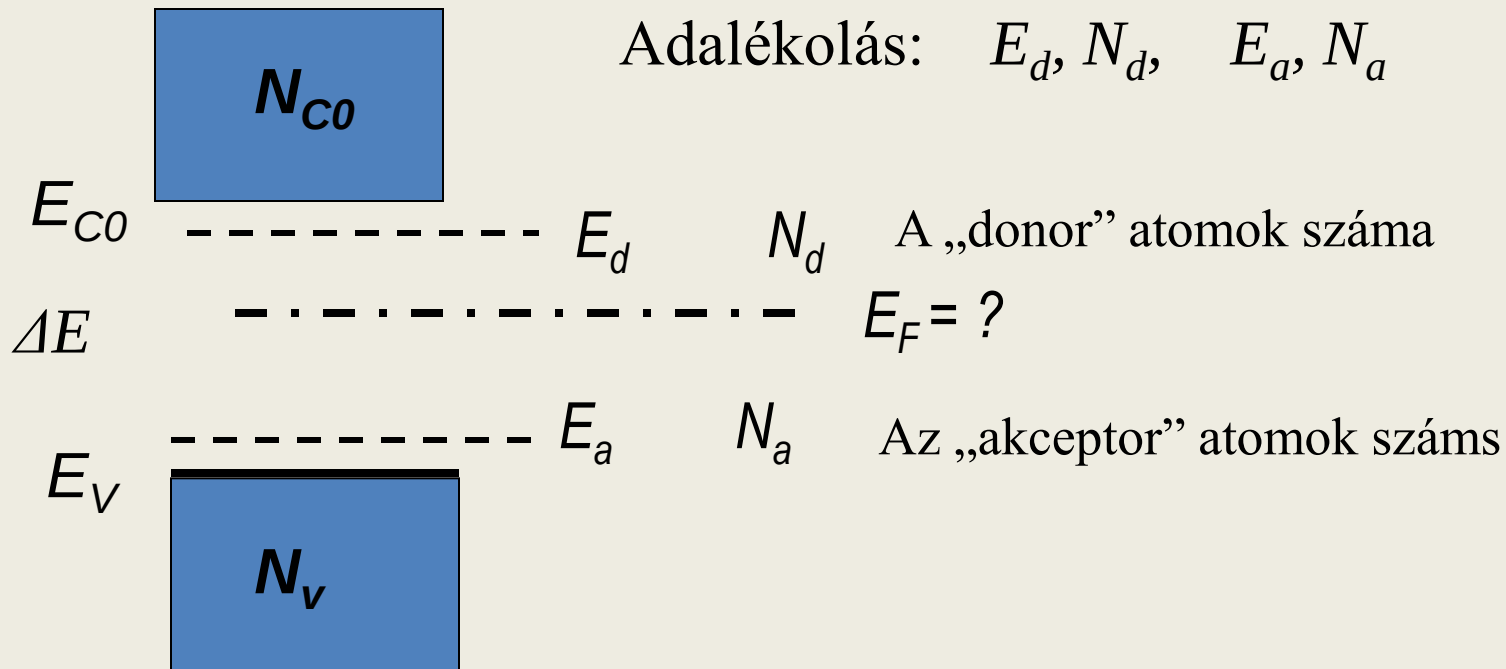
Fermi szint



Fermi szint

“Adalékolt” félvezetők

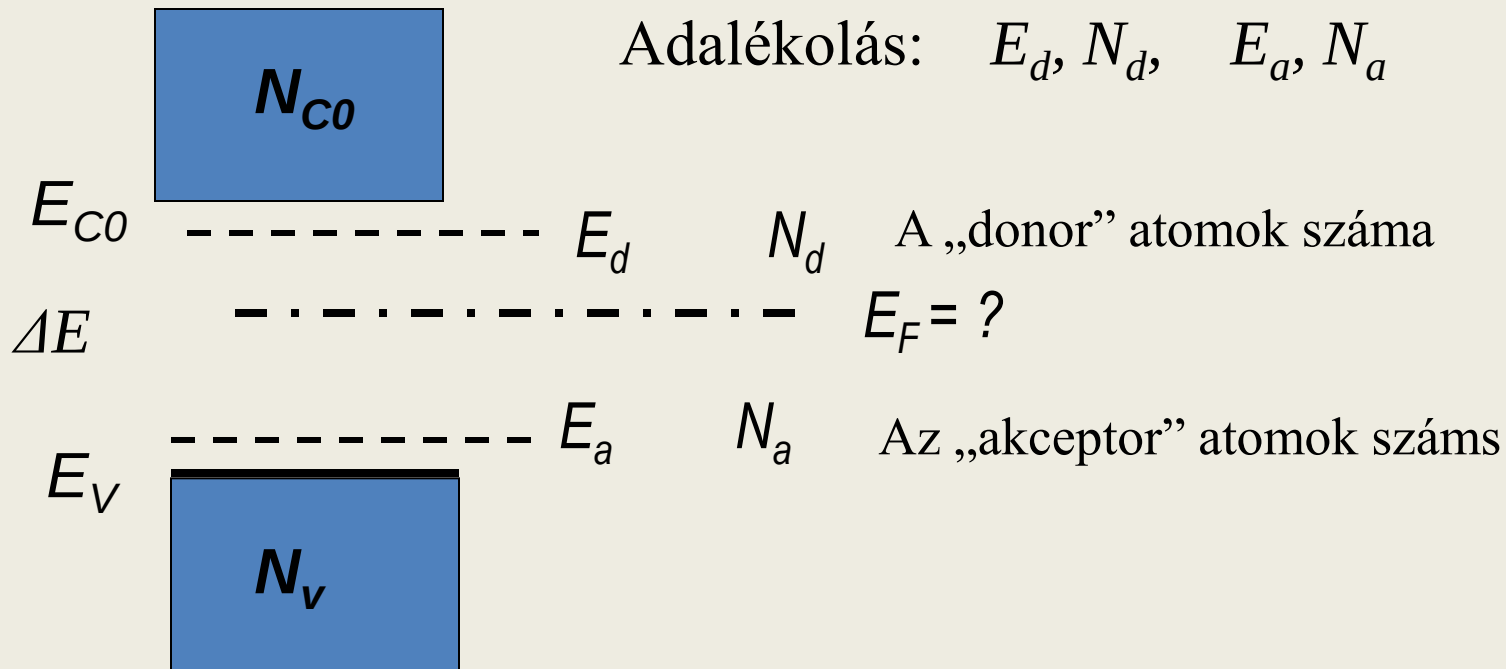
Intrinsic félvezető: N_{C0} , N_V , E_{C0} , E_V , ΔE



Töltés neutralitás:
$$n + n_a = p + N_d - n_d$$

“Adalékolt” félvezetők

Intrinsic félvezető: N_{C0} , N_V , E_{C0} , E_V , ΔE



Töltés neutralitás:
$$n + n_a = p + N_d - n_d$$

n-típusú és p-típusú adalékolt félvezetők egyensúlyi állapotban

Intrinsic félvezetők N_{C0} , N_V , E_{C0} , E_V , ΔE

Adalékolás, Doping: E_d , N_d , E_a , N_a

$$E_F = ?$$

$$dN = g(E) \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{kT}} + 1} dE$$

$$g_n(E) dE = N_C \sqrt{E - E_{C0}} dE, \quad E > E_{C0}$$

$$g_p(E) dE = N_V \sqrt{E_V - E} dE, \quad E < E_V$$

$$n_d = dN_{(E=E_d)} = \frac{g(E_d) dE}{e^{\frac{E_d-E_F}{kT}} + 1} = \frac{N_d}{e^{\frac{E_d-E_F}{kT}} + 1}$$

$$n_a = \frac{N_a}{e^{\frac{E_a-E_F}{kT}} + 1}$$

$$n = N_C e^{\frac{-(E_{C0}-E_F)}{kT}}$$

$$p = N_V e^{\frac{-(E_F-E_V)}{kT}}$$

$$E_F = ?$$

Charge neutrality: $n + n_a = p + N_d - n_d$

Intrinsic félvezetők: N_{C0} , N_V , E_{C0} , E_V , ΔE

Adalékolás - Doping: E_d , N_d , E_a , N_a $E_F = ?$

Töltés neutralitás:

$$n + n_a = p + N_d - n_d$$

$$n = N_C e^{\frac{-(E_{C0} - E_F)}{kT}}$$

$$p = N_V e^{\frac{-(E_F - E_V)}{kT}}$$

$$n_a = \frac{N_a}{e^{\frac{E_a - E_F}{kT}} + 1}$$

$$n_d = \frac{N_d}{e^{\frac{E_d - E_F}{kT}} + 1}$$

$$N_C e^{\frac{-(E_{C0} - E_F)}{kT}} + \frac{N_a}{e^{\frac{E_a - E_F}{kT}} + 1} = N_V e^{\frac{-(E_F - E_V)}{kT}} + N_d - N_d \frac{1}{e^{\frac{E_d - E_F}{kT}} + 1}.$$

A töltés-neutralitás transzcendens egyenletének közelítő megoldása

n – típusú félvezető

p – típusú félvezető

$$n_n \cong N_d \quad \text{Többségi töltéshordozók} \quad p_p \cong N_a$$

$$N_C e^{\frac{-(E_{C0}-E_F)}{k_B T}} = N_d$$

$$N_V e^{\frac{-(E_F-E_V)}{k_B T}} = N_a$$

$$E_F = E_{C0} + k_B T \ln \frac{N_d}{N_C}$$

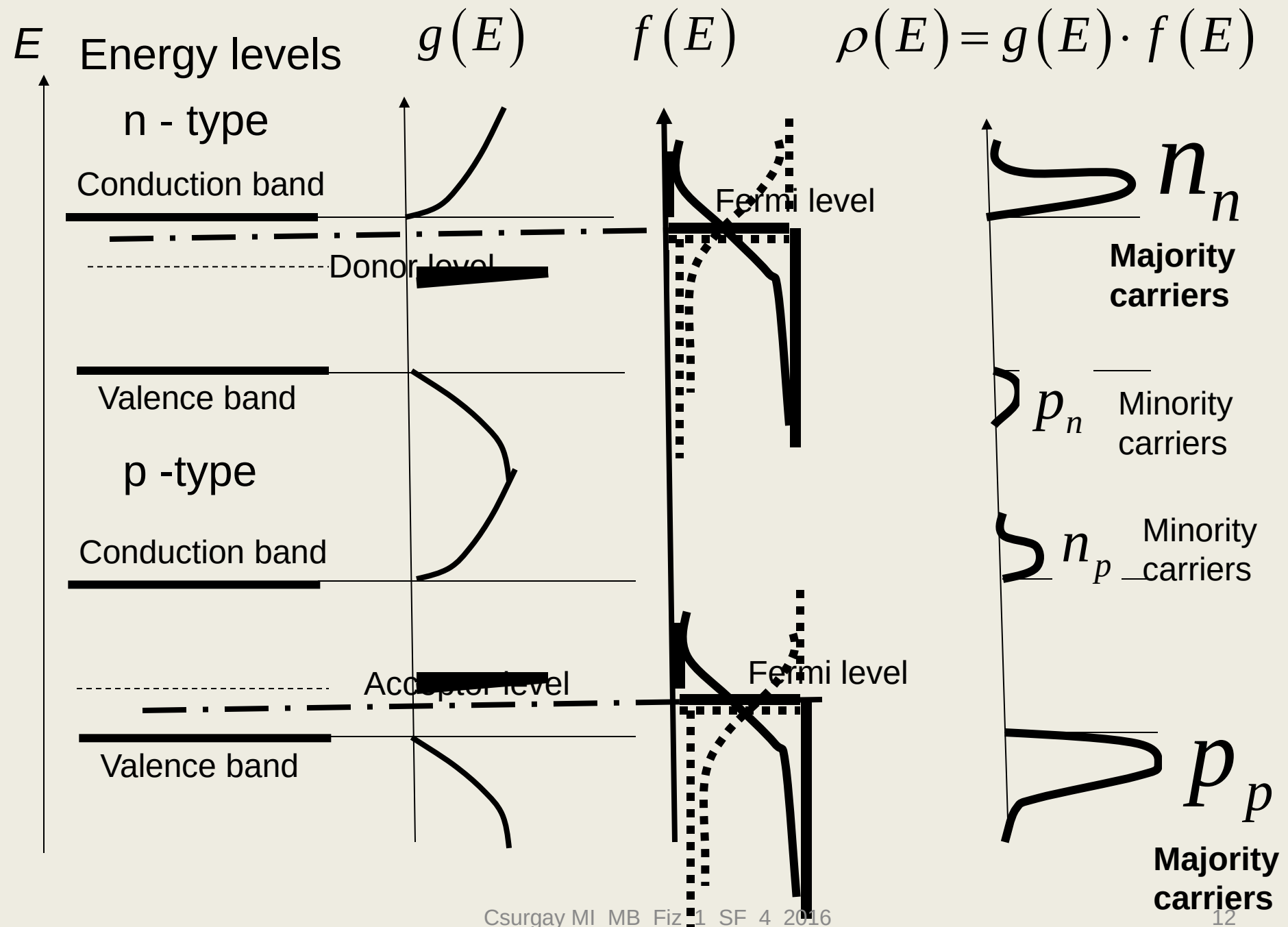
$$E_F = E_V + k_B T \ln \frac{N_V}{N_a}$$

$$p_n = N_V e^{\frac{-(E_F-E_V)}{k_B T}} = \frac{N_C N_V}{N_d} e^{\frac{-(E_{C0}-E_V)}{k_B T}} = \frac{n_i p_i}{n_n}$$

$$n_p = \frac{N_C N_V}{N_a} e^{\frac{E_{C0}-E_V}{k_B T}}$$

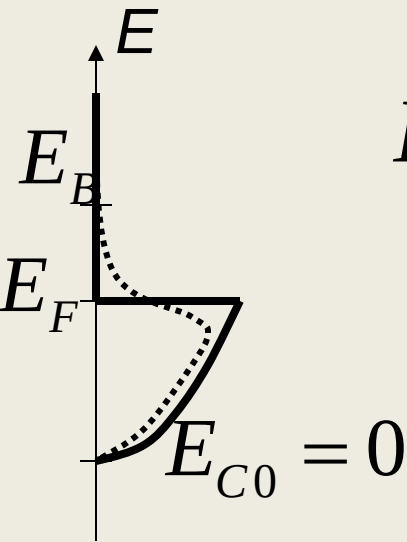
Kisebbségi töltéshordozók

$$n_n p_n = n_i p_i \sim n_i^2 \sim p_i^2 = n_p p_p = N_C N_V e^{-\frac{E_{C0}-E_V}{k_B T}} \sim C T^3 e^{\frac{\Delta E}{k_B T}}$$



Szilárd anyagok (fémek, szigetelők, félvezetők) – Összefoglalás

**Conductors
(fémek)**

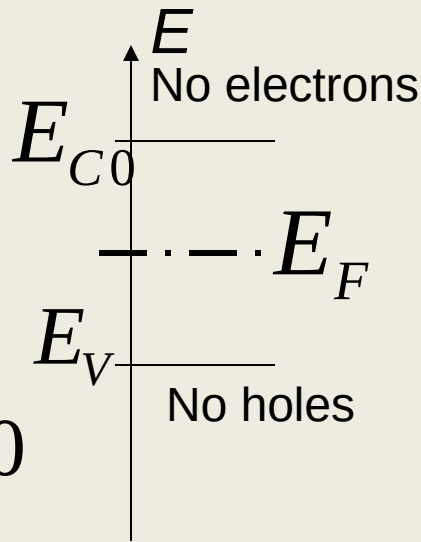


$$E_W = E_B - E_F$$

$$E_{F0} = \frac{h^2}{8m} \left(\frac{3n}{\pi} \right)^{2/3}$$

**Sommerfeld
model**

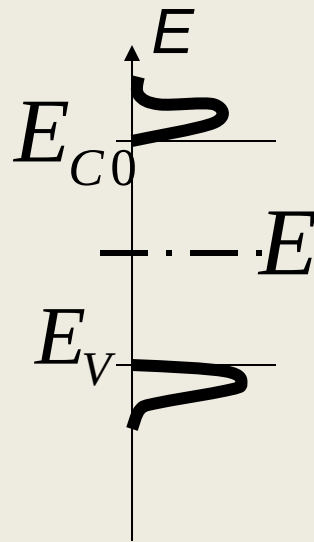
**Insulators
(szigetelők)**



$$E_F = \frac{E_{C0} + E_V}{2}$$

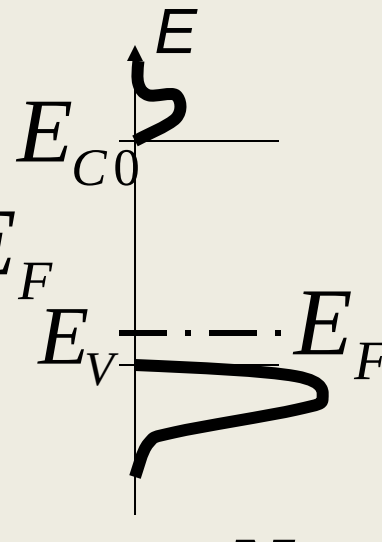
$$n_i = \sqrt{N_C N_V} e^{-\frac{\Delta E}{2k_B T}}$$

Intrinsic



$$n_i = p_i$$

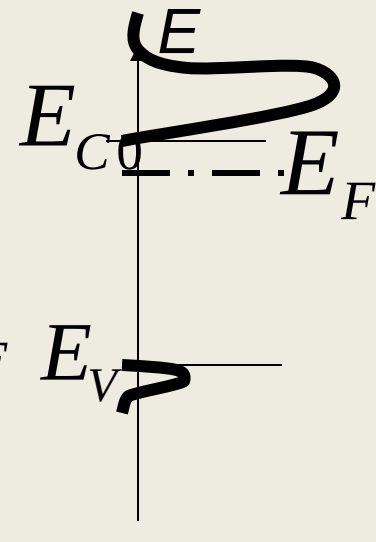
**p – típus
félvezetők**



$$p_p \cong N_a$$

$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p}$$

n – típus

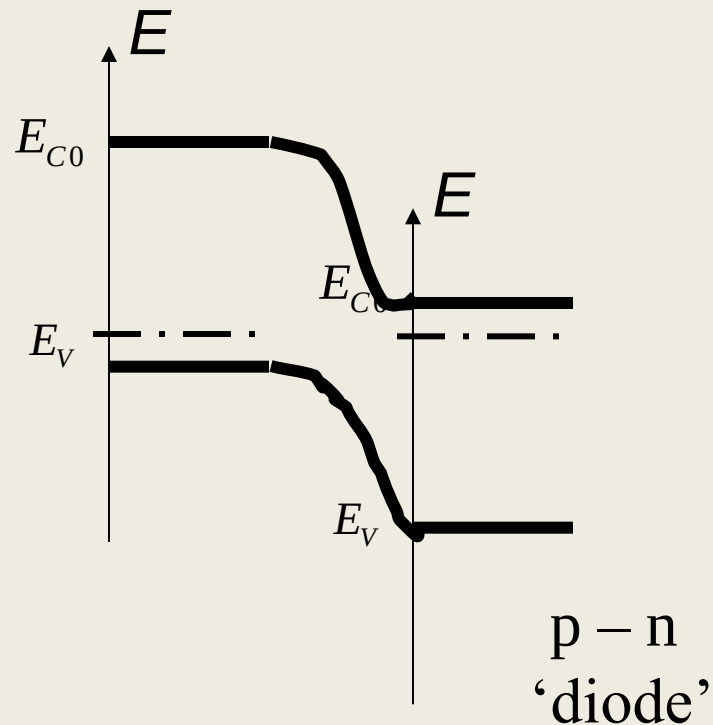
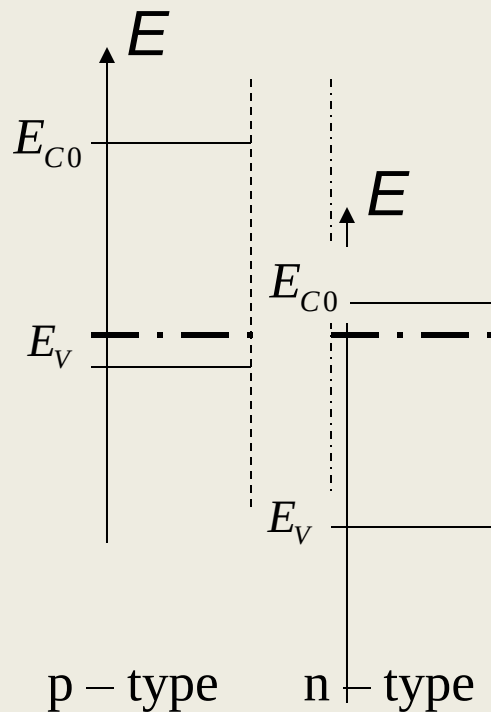


$$n_n \cong N_d$$

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n}$$

Félvezetők termikus egyensúlyban

Az építőkövek Fermi szintjei kiegyenlítődnek!
Kontakt potenciálok termikus egyensúlyban!



p – n – p
'tranzisztor'

