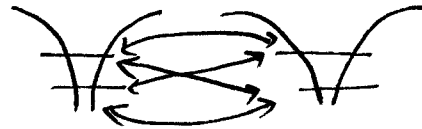
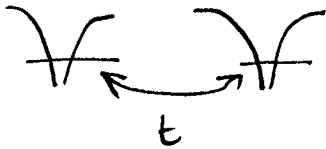


(II/E) Felvezetők

① Egyatomos lánc modellje

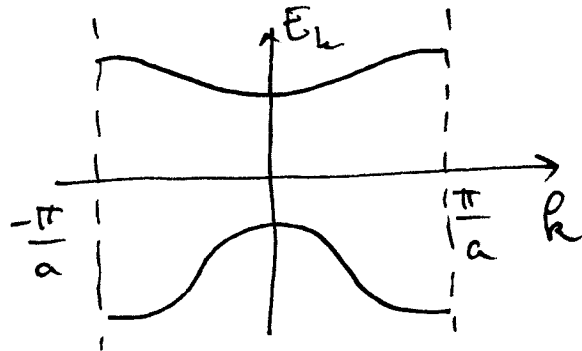
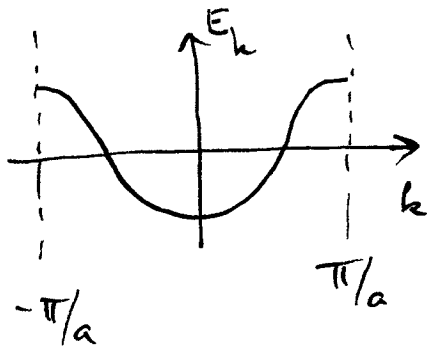
eddig: 1 pálya/atom

igazából: több pálya/atom



alagutazási
mátrixelem

több különböző
alagutazási mátrixelem

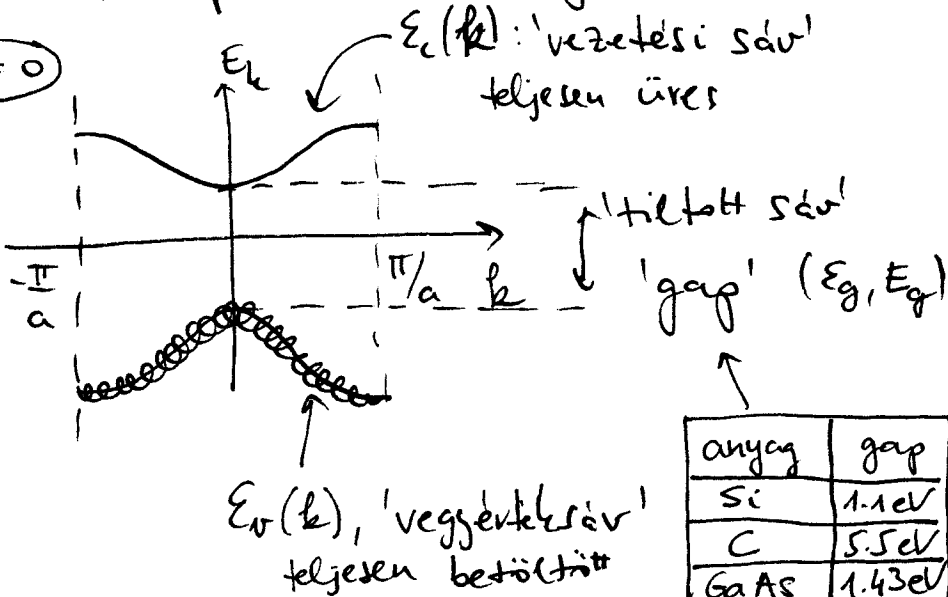


egyetlen sáv

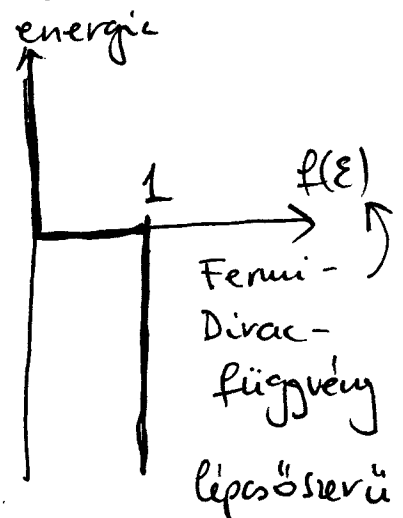
több sáv
"Sávrendszer"

② Sávok / állapotok betöltöttsége tiszta félvezetőben

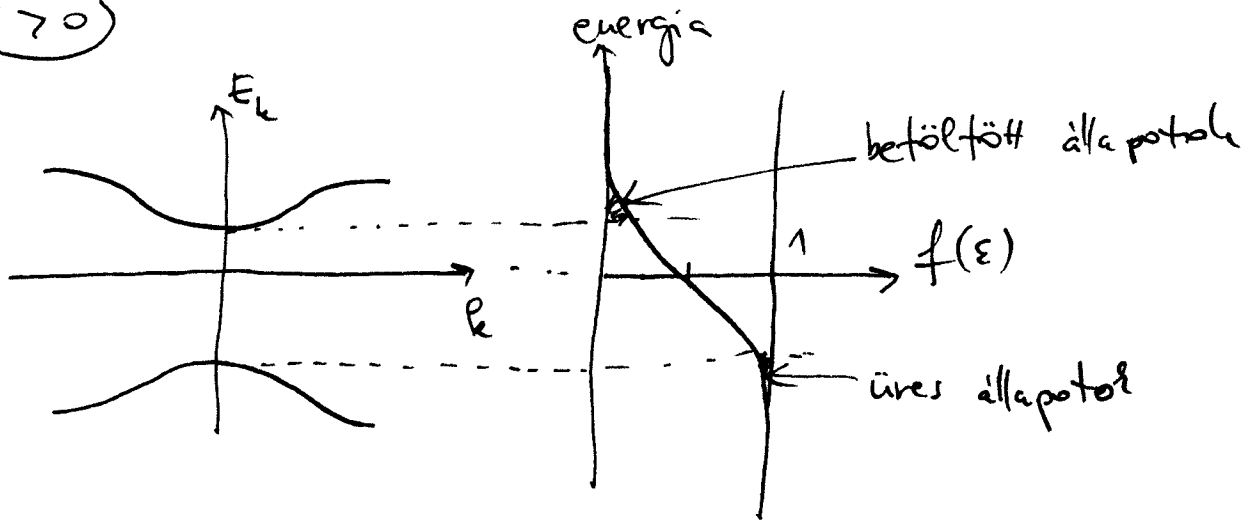
$T=0$



anyag	gap
Si	1.1 eV
C	5.5 eV
GaAs	1.43 eV



(170)



résilegesen betöltött vezetési sáv / vegyértéksáv

"termikusan gerjentesített töltéshordozók":

extra elektronok a vezetési sávban

hiányzó elektronok ('lyukak') a vegyértéksávban

③ Tiszta félvezető kémiai potenciálja (μ)

$$f(\epsilon, T, \mu) = \frac{1}{e^{\frac{\epsilon - \mu}{k_B T}} + 1}$$

$\epsilon_v(k), \epsilon_c(k), T$ adott

$\mu = ?$

μ meghatározó

$$\sum_k f(\epsilon_c(k), T, \mu) = \sum_k [1 - f(\epsilon_v(k), T, \mu)]$$

"a vezetési sávba a vegyértéksávból gerjentesödhetnek e-ek"

④ töltéshordozók száma/sűrűsége:

elektronok \leftarrow spin

$$n = \frac{N}{L} = \frac{2}{L} \sum_k f(\epsilon_c(k), T, \mu) \quad (1D)$$

lyukak:

$$p = n \leftarrow$$

$$n = \frac{N}{V} = \frac{2}{V} \sum_k f(\epsilon_c(k), T, \mu) \quad (3D)$$

⑤ példa: 3D, sávok parabolikus (effektív tömeg) közelítés:

$$n(T) = 2.5 \left(\frac{m_n^*}{m_e} \right)^{3/4} \left(\frac{m_p^*}{m_e} \right)^{3/4} \left(\frac{T}{300\text{K}} \right)^{3/2} e^{-\frac{E_g}{2k_B T}} \times 10^{19} \frac{1}{\text{cm}^3}$$

" "
p(T)

$m_n^* = m_p^* = m_e$ $\rightarrow n(300\text{K}) \approx 10^{11} \frac{1}{\text{cm}^3}$ ("félvezető")
 $E_g = 1\text{eV}$

$E_g = 5\text{eV} \Rightarrow n(300\text{K}) \approx 2.5 \times 10^{-23} \frac{1}{\text{cm}^3}$ ("szigetelő")

fém: $a = 2\text{\AA}$ rácslátszó, 1 e/atom a vezetési sávban

$$\Rightarrow n \approx 1,25 \times 10^{23} \frac{1}{\text{cm}^3}$$

⑥ vezetőképesség: Drude-modell: $\sigma = \frac{n e^2 \tau}{m^*}$

félvezetőben e- és lyukak járuléka: $\sigma = \sigma_e + \sigma_h$

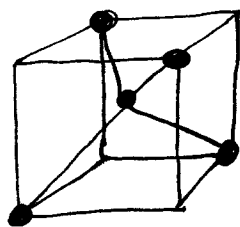
σ értékegy hőm.-re \rightarrow hőmérs.

pl: $n(E_g = 1\text{eV}, T = 303\text{K}) \approx 1.22 \times 10^{11} \frac{1}{\text{cm}^3}$

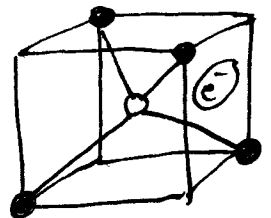
3K hőm.-növekedés \rightarrow 20% ellenállás-csökkenés

⑦ adalékolt félvezető; pl: Si (gyémántstruktúra)

III.	IV.	V.
13 Al	14 Si	15 P
31 Ga	32 Ge	33 As



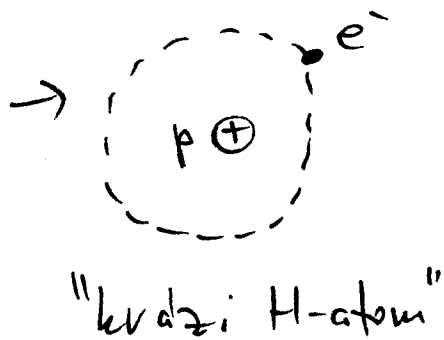
• Si 4 vegyjéklet-e \rightarrow 4 kötés



• P: 5 vegyjéklet-e
4 kötés

⑧ 'donornívő' a vezetési sáv alatt

P-atom Si kristályban } pozitívan töltött P ion }
 5 vegyérték-e } + 1 db kötött elektron }
 4 kötés }

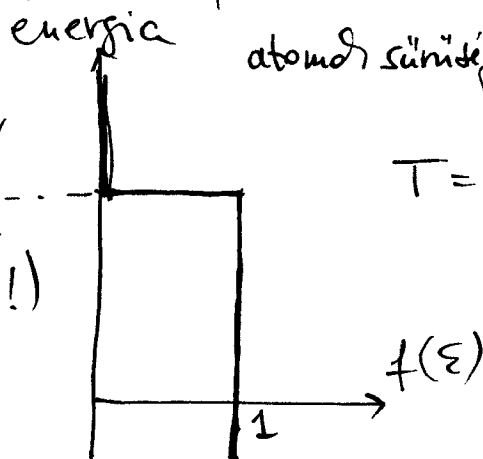
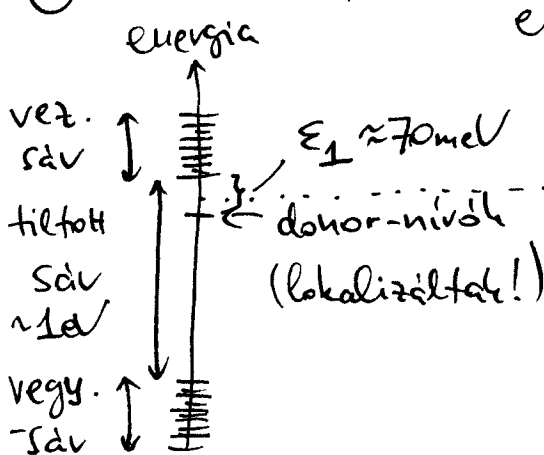


$$\epsilon_1 = \epsilon_c(0) - \frac{1}{2} \frac{m^* e^4}{(4\pi \epsilon_0 \epsilon_r)^2 \hbar^2}$$

$$\begin{aligned} m_e &\rightarrow m^* \\ \epsilon_0 &\rightarrow \epsilon_0 \epsilon_r \end{aligned}$$

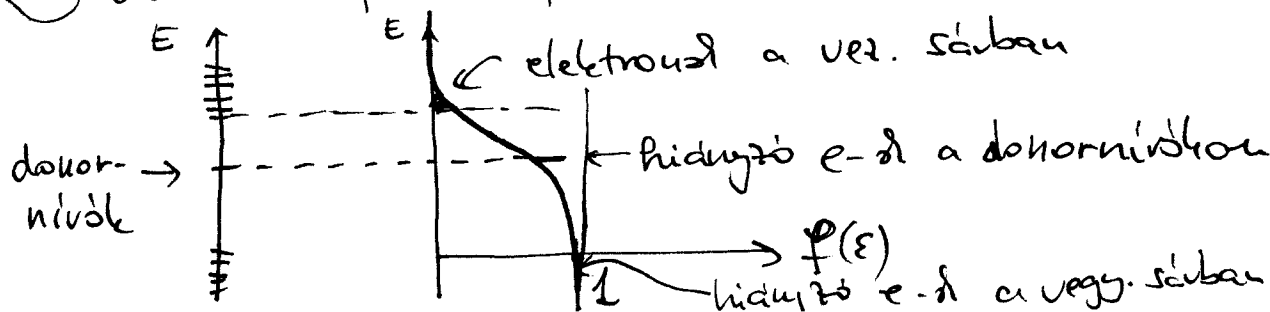
pl: Si, $\epsilon_g \approx 1.1 \text{ eV}$, $m^* \approx 0.5 m_e$, $\epsilon_r \approx 10 \rightarrow \epsilon_1(\text{P@Si})$
 $\approx 0.02 \epsilon_1(\text{H})$
 $\approx 70 \text{ meV}$

⑨ adalékolt félvezető, $T=0$; adalékatomok sűrűsége: $10^{13} - 10^{18} \frac{1}{\text{cm}^3}$
 atomok sűrűsége (Si+P): $\approx 5 \times 10^{22} \frac{1}{\text{cm}^3}$



$T=0 \rightarrow$ vezetési sáv üres
 \rightarrow szigetelő

⑩ adalékolt félvezető, $T > 0$



(11) adalékolt félvezető, $T > 0$: töltéshordozót száma?

ν_d : donoratomok sűrűsége

n_d : donorokban lévő e-ek sűrűsége

"a vez. e-ek és a donorokban lévő e-ek vagy a vegyértéksávból, vagy a donoratomokból származnak":

$$n + n_d = p + \nu_d$$

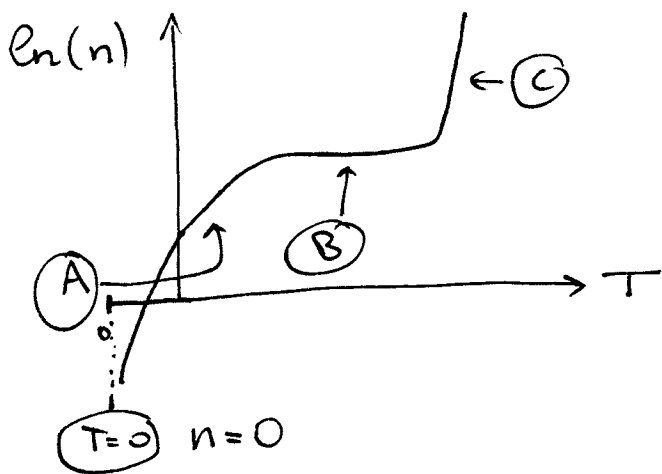
← adott paraméter

$$\frac{2}{V} \sum_k f(\epsilon_c(k), T, \mu) \quad \frac{2}{V} \sum_k f(\epsilon_v(k), T, \mu)$$

$$\frac{2}{V} \sum_k f(\epsilon_c(k), T, \mu) \quad 2\nu_d f(\epsilon_1, T, \mu)$$

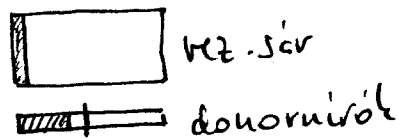
→ ebből μ -t meghatározjuk, $\mu = \mu(T, \nu_d, \dots) \rightarrow n(T), p(T)$
 megkapható
 (megj: e-e-ek-t elhanyagoltuk)

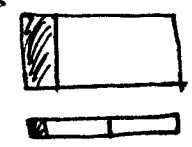
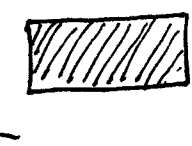
(12) vezetőképesség / töltéshordozó-sűrűség típusos T-függése:

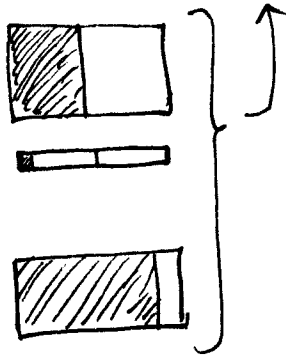


(A) kifagyási tartomány

$$n \sim e^{-\epsilon_1/2k_B T}$$



(B) "szaturációs tartomány", $n \approx n_d \rightarrow$ 
 (C) "intrinszik" tartomány, $n \sim e^{-E_g/2k_B T}$ 
 = "tisza", "intrinsic"



(13) (i) vezetőképesség nő ha T nő.

nem trivialis: $\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$, ha T nő $\rightarrow n$ nő
 $\rightarrow \tau$ is nő

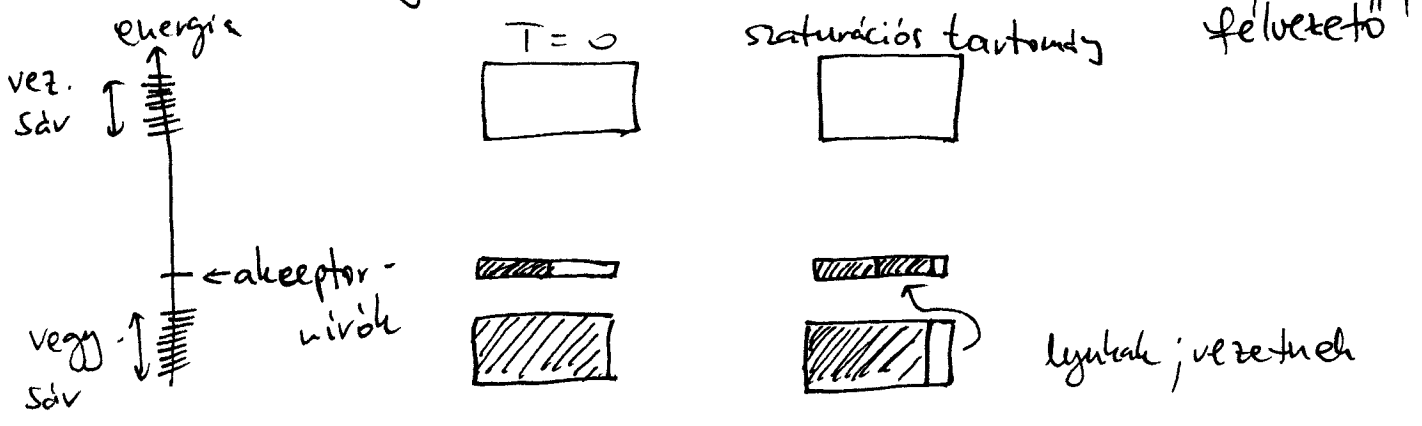
(ii) vezetőképesség nő, ha n_d nő.

(vadás jobban mozog \rightarrow több szóródás)

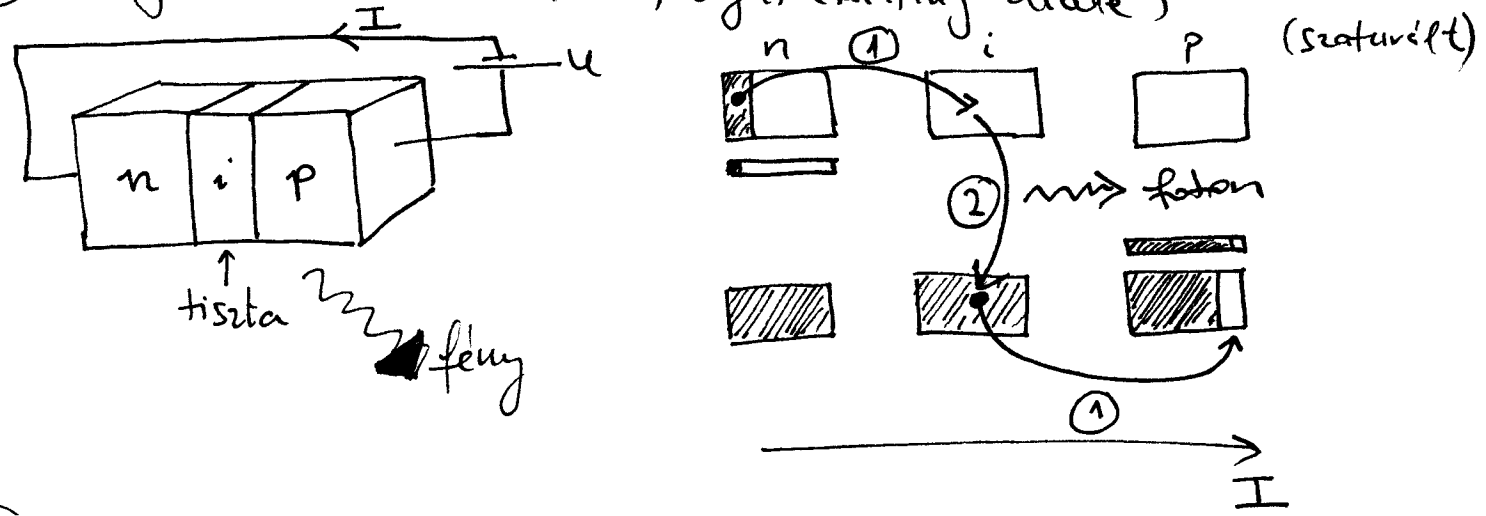
nem trivialis: n_d nő $\rightarrow n$ nő
 $\rightarrow \tau$ is nő (donor-atomokon szóródnak az e-ek)

(14) eddig: P@Si: donor ($Z_P = Z_{Si} + 1$), 'n-típusú félvezető'

másik lehetőség: Al@Si: akceptor ($Z_{Al} = Z_{Si} - 1$), 'p-típusú félvezető'



15) Fénykibocsátó dióda (LED, light-emitting diode)



16) feladat: $I = 1 \text{ mA}$, minden átmenő e-ből 1 foton kelet. hány foton/sec? mekkora teljesítmény, ha az anyag GaAs?

$$\text{foton\#} = e\# = \frac{1 \text{ mC}}{e} = \frac{10^{-3} \text{ C}}{1,6 \times 10^{-19} \text{ C}} \approx 0,7 \times 10^{16}$$

sugárzási teljesítmény: $P = \text{fotonáram} \cdot \text{fotonenergia} \approx$

$$\approx 0,7 \times 10^{16} \frac{1}{\text{sec}} \cdot 1,43 \text{ eV} \approx 1,6 \text{ mW}$$

↑
 $E_g(\text{GaAs})$

megj: a fen. forrás teljesítménye $P_{\text{ff}} = U \cdot I > P$ (Joule-fűtés)

17) Piezorezistív mechanizmusok félvezetőben (pl: n-típusú)

