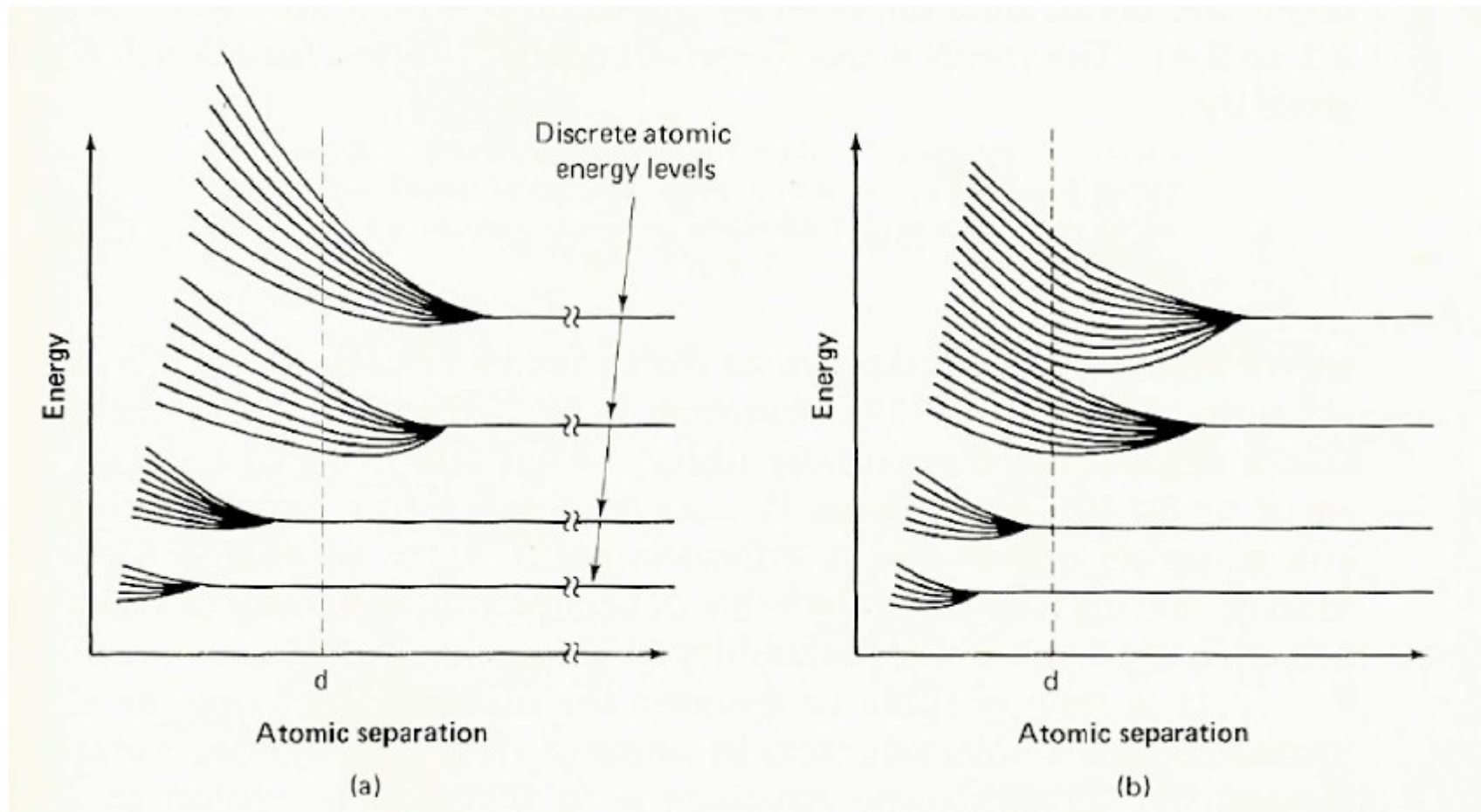


Modern fizika vegyészmérnököknek

8. óra: Félvezetők adalékolása (dópolása)

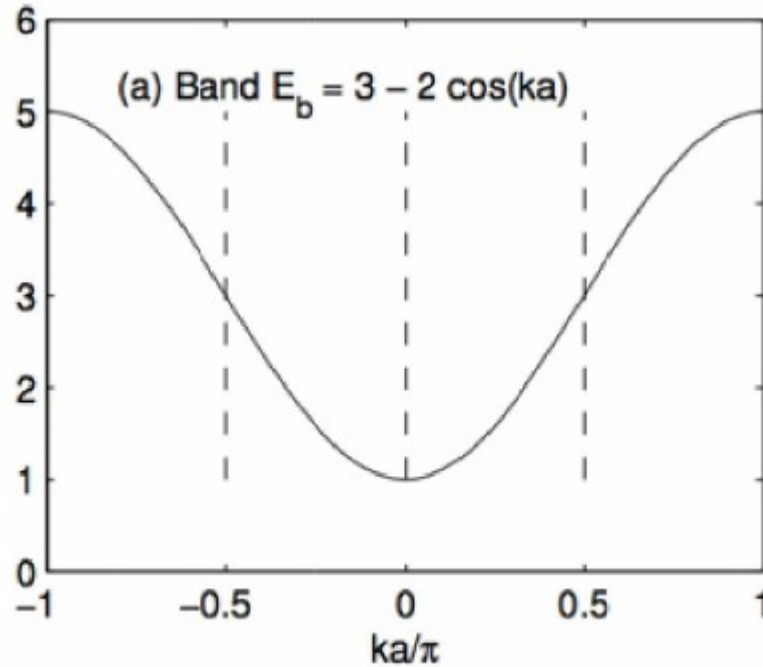
Ismétlés: Elektronok sávokban

Ismétlés: Elektronok sávokban



N atom, s, p, d, ... pályák: $2N$, $6N$, $10N$... elektronállapot (kötött)
→ 1 sáv, $2N$, $6N$, $10N$... elektronállapotból (síkhullám)

Sávban az elektron: effektív tömeg



$$\left(\frac{d^2 E}{dk^2} \right)^{-1} = \frac{1}{\hbar^2} m_e.$$

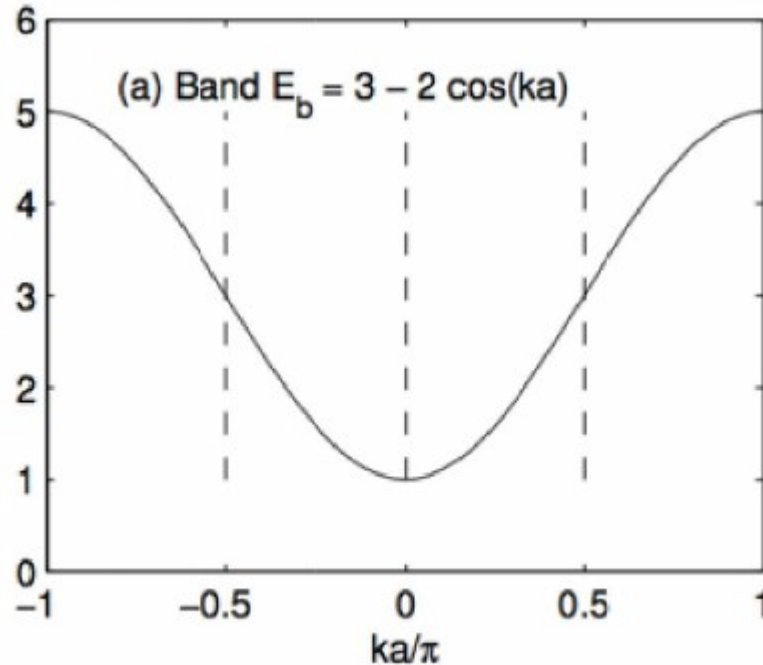
csoportsebesség $\hbar v = dE/dk$

laposabb sáv $\rightarrow$ lassabban nő a sebesség az impulzussal

$\rightarrow$ nagyobb tömeg ($\hbar k = m v$)

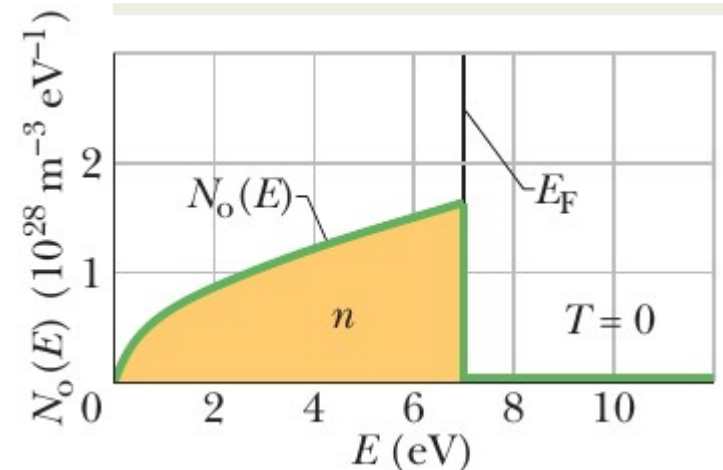
$\rightarrow$ több állapot dE energiaablakban

Lapos sávokban nagyobb az elektron tömege, sűrűbben vannak az állapotok



sáv aljához közel:
állapotok száma
 $dN = N(E) dV dE$,
állapotsűrűség:

$$N(E) = \frac{8\sqrt{2}\pi m^{3/2}}{h^3} \sqrt{E}$$

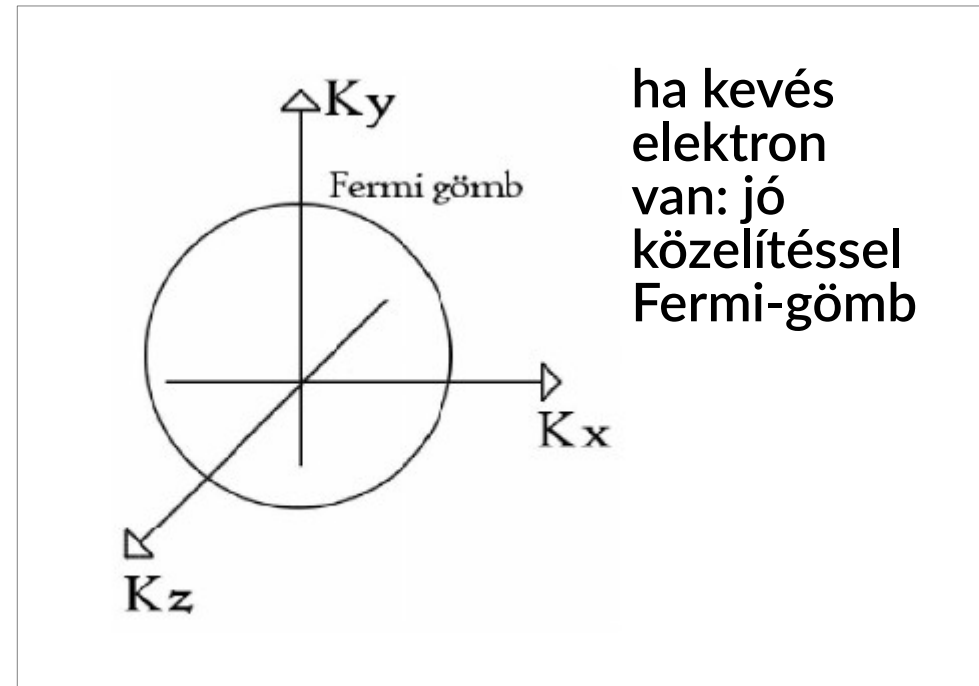
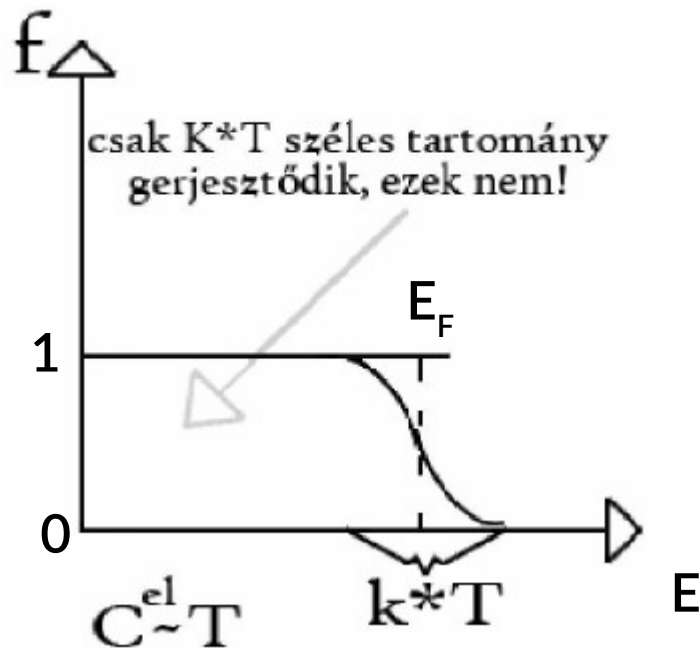


laposabb sáv $\rightarrow$ lassabban nő a sebesség az impulzussal

$\rightarrow$ nagyobb tömeg ($\hbar k = m v$)

$\rightarrow$ több állapot dE energiaablakban

Az állapotok betöltöttségét a Fermi-Dirac-eloszlás adja meg



ha kevés elektron van: jó közelítéssel Fermi-gömb

$$f_{FD}(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{kT}} + 1}$$

ha $E - E_F \gg k_B T$: $f(E) \approx e^{-\frac{E-E_F}{k_B T}}$

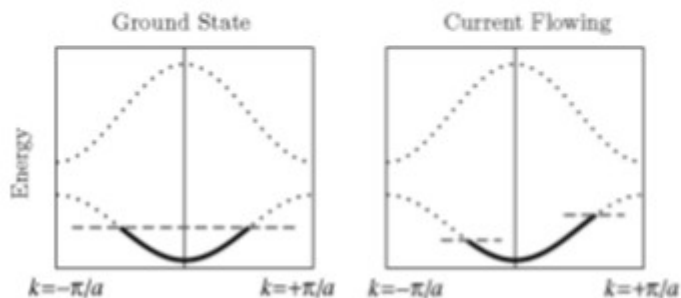
Boltzmann-eloszlással közelíthető

Na de hol van a kémiai potenciál? Ezt úgy kell meghatározni, hogy az összes elektron bekerüljön a rendszerbe

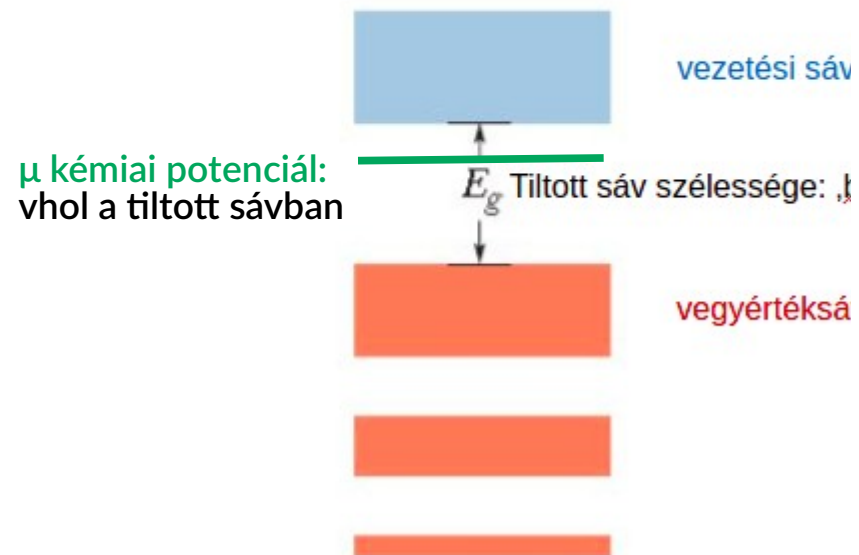
5 vegyértékű atomokból
kristály: 3. sáv félig töltött
→ fém



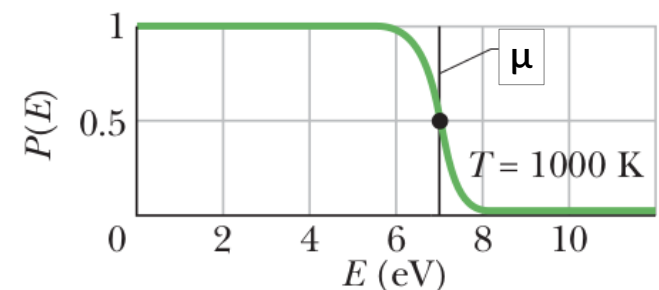
Jó elektromos vezető!



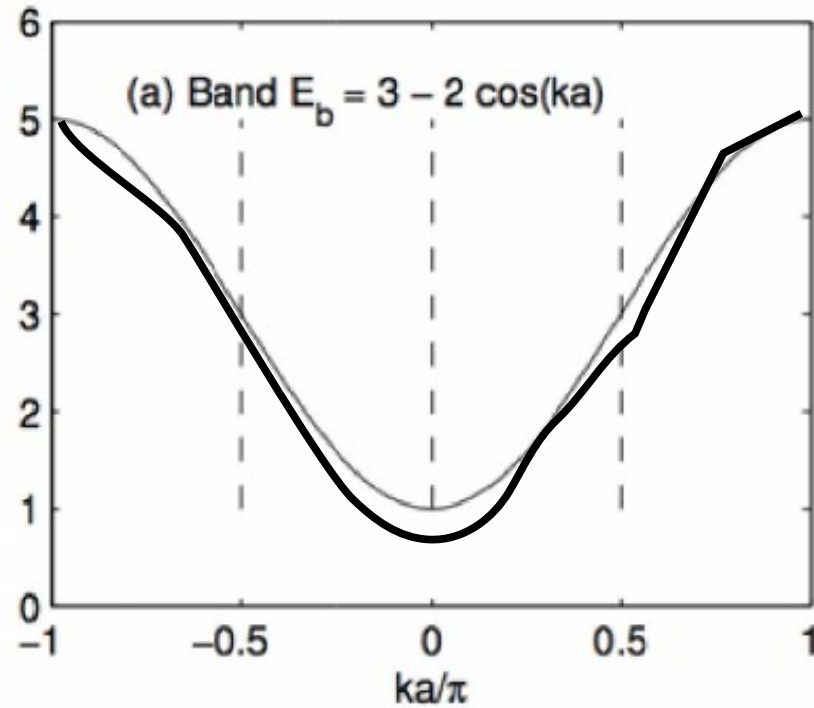
6 vegyértékű atomokból kristály:
teljesen töltött és üres sávok
között tiltott sáv → szigetelő



Nem vezet az áramot!

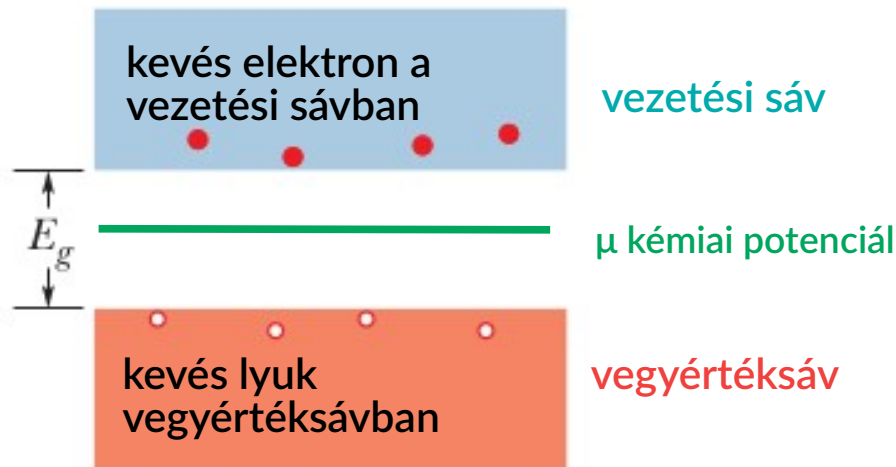


Elektromos vezetéshez részben betöltött sáv kell

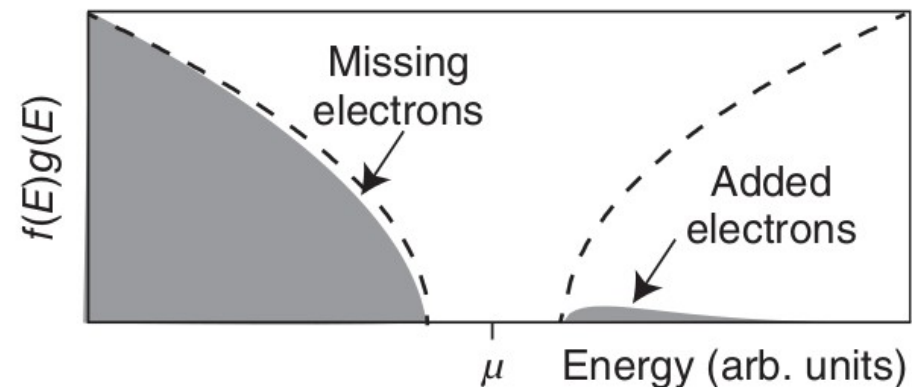
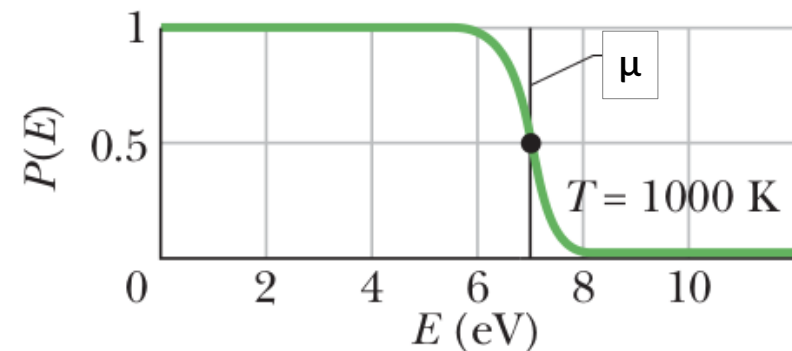


Félvezetők: olyan szigetelők, ahol a hőmérsékleti kiszélesedés akár a tiltott sáv nagyságrendjébe eshet. $E_g < 2 \text{ eV} \rightarrow$ megjelennek elektron- és lyukgerjesztések

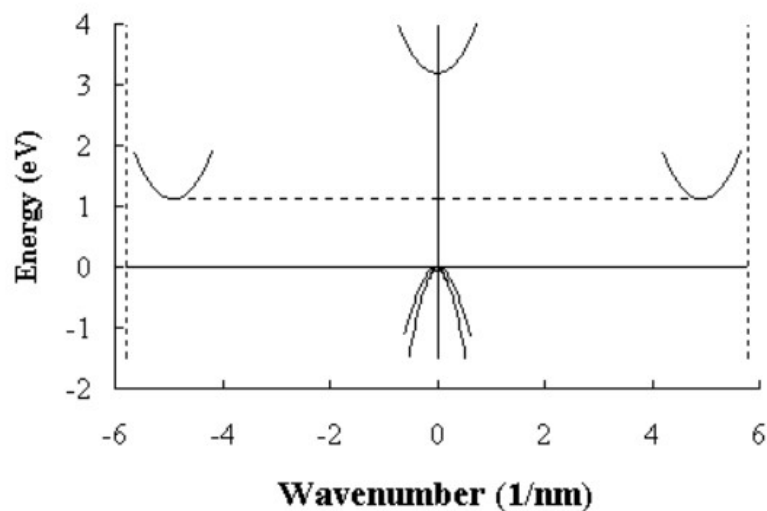
Félvezető:



$$P(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-\mu}{k_B T}} + 1}$$



Valódi anyagokban több helyen lehet
vezetésisávminimum (CBM) → több “elektron”
vegyértéksávmaximum (VBM) → több “lyuk”



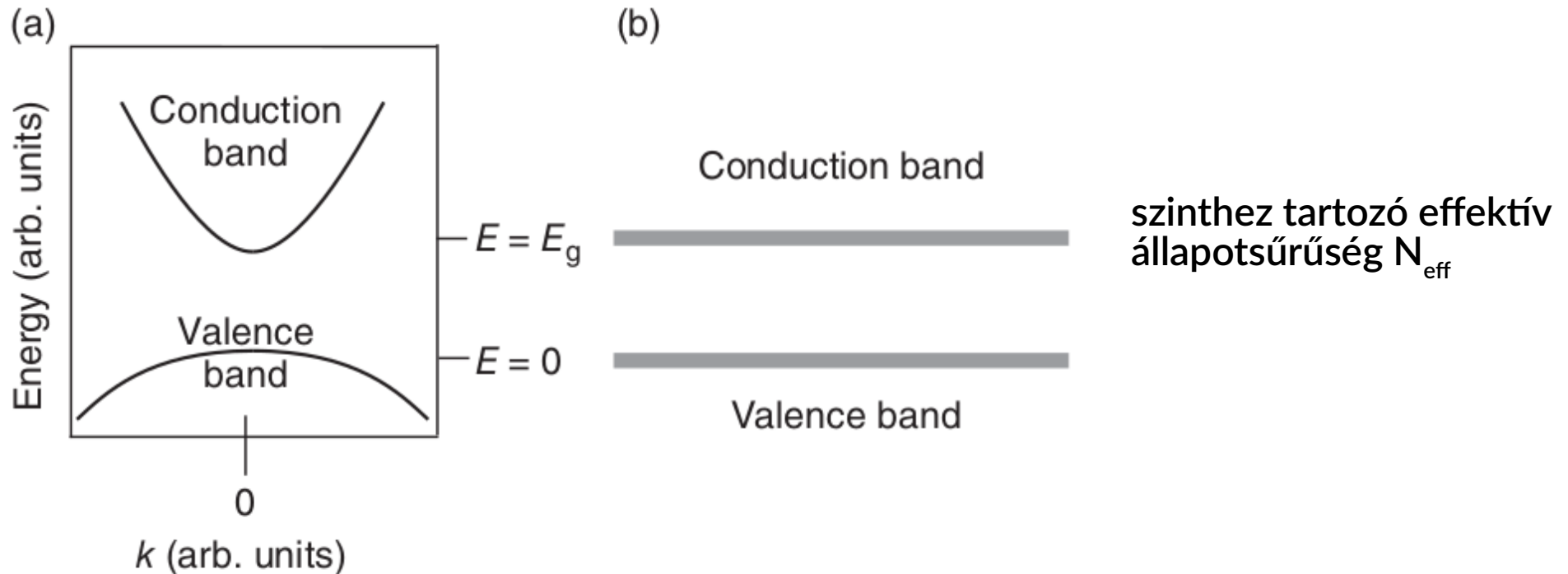
Pl. Si: 2 féle elektron, 2 féle lyuk,

Density	2.329 g cm ⁻³
Dielectric constant	11.7
Effective electron mass	m _e =0.98m ₀
Effective electron mass	m _t =0.19m ₀
Effective hole mass	m _h =0.49m ₀
Effective hole mass	m _{lp} =0.16m ₀

effektív tömeghez ezeket kell vhoagy kombinálni

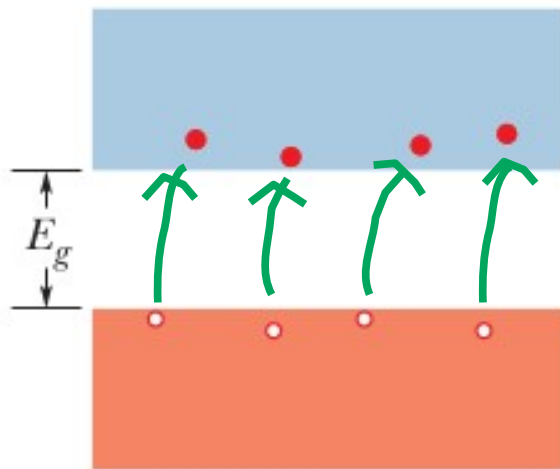
Name	Symbol	Germanium	Silicon	Gallium Arsenide
Smallest energy bandgap at 300 K	E_g (eV)	0.66	1.12	1.424
Effective mass for density of states calculations				
Electrons	$m_{e,dos}^*/m_0$	0.56	1.08	0.067
Holes	$m_{h,dos}^*/m_0$	0.29	0.57/0.81 ¹	0.47
Effective mass for conductivity calculations				
Electrons	$m_{e,cond}^*/m_0$	0.12	0.26	0.067
Holes	$m_{h,cond}^*/m_0$	0.21	0.36/0.386 ¹	0.34

Leegszerűsítő kép: a vegyértéksáv tetejét és vezetési sáv alját egy-egy sokszorososan degenerált energiaszinttel közelítjük – állapotsűrűsége függ az effektív tömegtől és hőmérséklettől



$$N_{\text{eff}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{m^* k_B T}{\pi \hbar^2} \right)^{3/2}$$

Tiszta (intrinszik) félvezetők: az elektronok és lyukak száma megegyezik, mert párosával jönnek létre (felgerjesztés) és párosával semmisülnek meg (rekombináció)

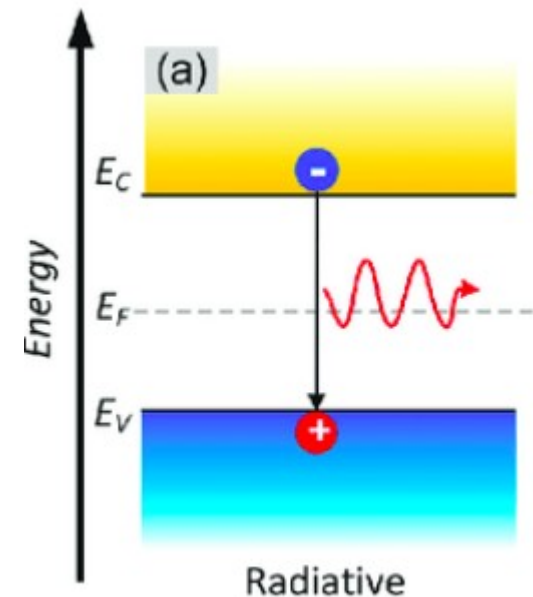


hőmérsékleti gerjesztés,
rátája

$$\propto N_{\text{eff}}^C N_{\text{eff}}^V e^{-E_g/(k_B T)} dV^2$$

n = (negatív) elektronok száma
térfogategységenként a vezetési
sávban
 p = (pozitív) lyukak száma
térfogategységenként a
vegyértéksávban

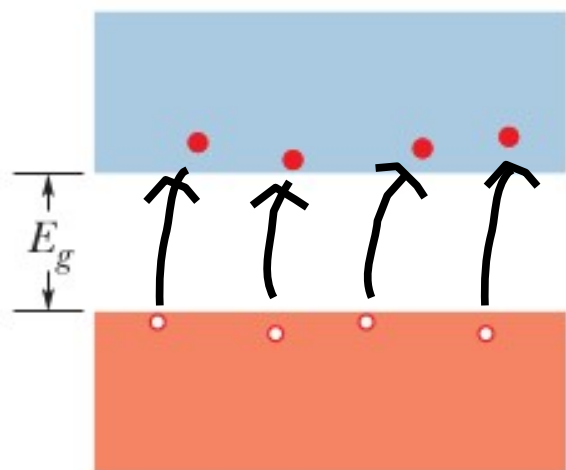
$$n_i = p_i$$



foton/fononkibocsájtással
rekombináció, rátája

$$\propto np dV^2$$

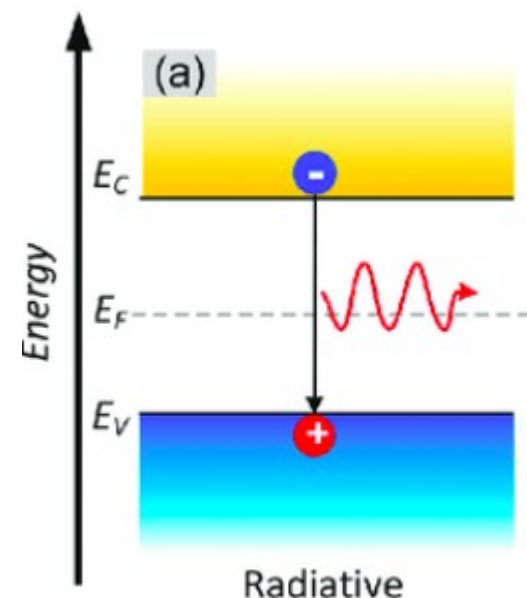
Egyensúly: e-lyuk párok keletkezése és rekombinációja
azonos rátával történik
→ sűrűségük gyorsan nő a hőmérséklettel



hőmérsékleti gerjesztés,
rátája

$$\propto N_{\text{eff}}^C N_{\text{eff}}^V e^{-E_g/(k_B T)} dV^2$$

$$n_i = p_i$$



foton/fononkibocsájtással
rekombináció, rátája

$$\propto np dV^2$$

$$np = N_{\text{eff}}^C N_{\text{eff}}^V e^{-\frac{E_g}{k_B T}} = 4 \left(\frac{k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^3 (m_e^* m_h^*)^{3/2} e^{-\frac{E_g}{k_B T}}$$

Példa: 1g tiszta szilíciumban szobahőmérsékleten hány szabad elektron és hány lyuk van? És 80 Celsius fokon?

Hőmérséklet növelésével fémek vezetőképessége csökken, félvezetőké nő (több szabad töltéshordozó)

tiltott sávon keresztül felgerjesztődés
vszínűsége

$$\Delta \gg k_B T : p_{\text{fel}} \approx e^{-\frac{\Delta}{k_B T}}$$

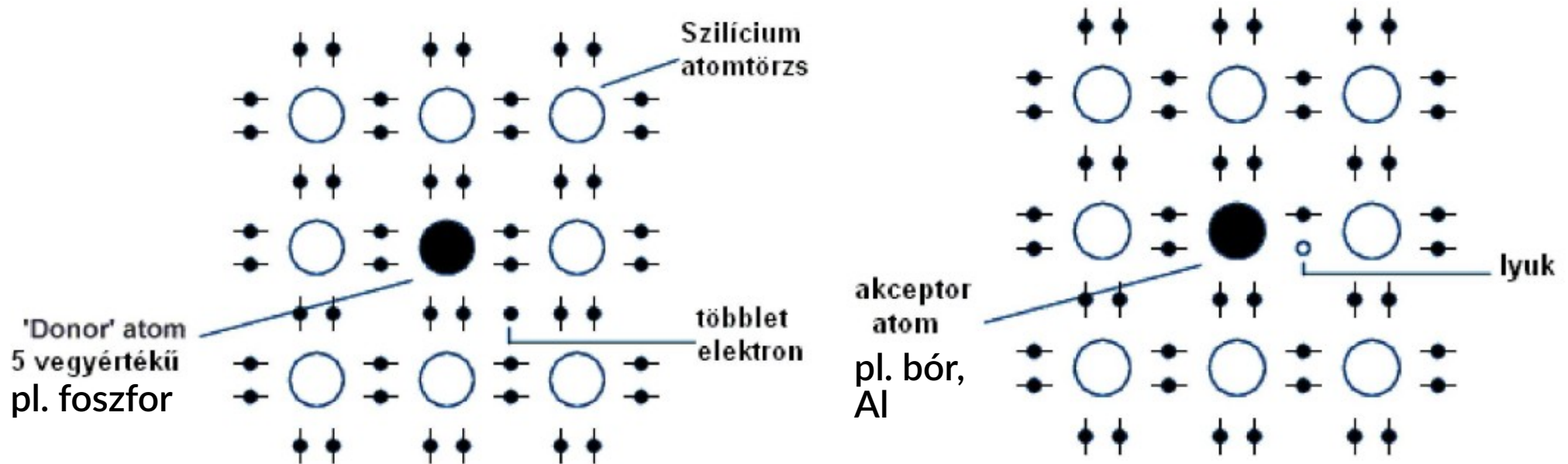
Property	Unit	Material	
		Copper	Silicon
Type of conductor		Metal	Semiconductor
Resistivity, ρ	$\Omega \cdot \text{m}$	2×10^{-8}	3×10^3
Temperature coefficient of resistivity, α	K^{-1}	$+4 \times 10^{-3}$	-70×10^{-3}
Number density of charge carriers, n	m^{-3}	9×10^{28}	1×10^{16}

^aAll values are for room temperature.

A Fermi-energia $T=0$ hőmérsékleten a tiltott sáv közepén van, növelve a hőmérsékletet a kisebb tömegű sáv felé mozdul el

- Kívánságok:
- Hangelható töltéssűrűség
 - Hőmérsékletfüggés gyenge legyen (robosztus)

Megoldás: Szennyezés (dópolás)



Szennyező atom több v kevesebb vegyértékelektronnal
→ lazán kötött pályáról könnyen leugró elektron/lyuk
→ szennyező donor/akceptor lesz
→ szennyezők száma = töltéshordozók száma,
kb. hőmérsékletfüggetlenül

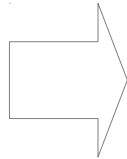
Szennyező donoratom extra elektronja gyengén kötött:
mint hidrogénatom, csak kisebb tömeg, nagyobb
dielektromos állandó → óriásatom

$$E_n = -Z^2 \underbrace{\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2}}_{13.6\text{eV}} \frac{1}{n^2}$$

$$a = \frac{\hbar^2 4\pi\epsilon_0}{Zme^2} = 53\text{pm}$$

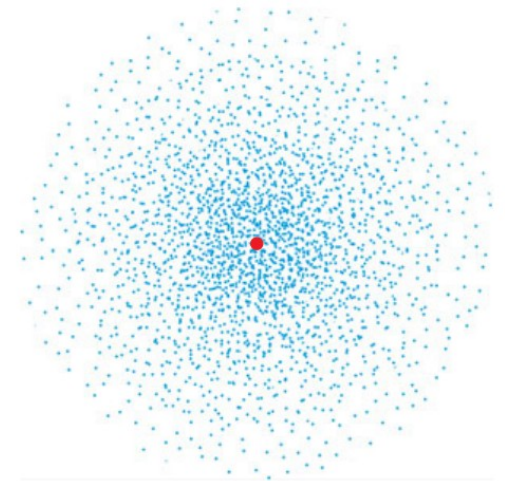
$$\epsilon_0 \rightarrow \epsilon_{\text{rel}}\epsilon_0 = 11\epsilon_0$$

$$m \rightarrow m_{\text{eff}}^* = 0.4m$$



$$E_1 \approx 40\text{meV}$$

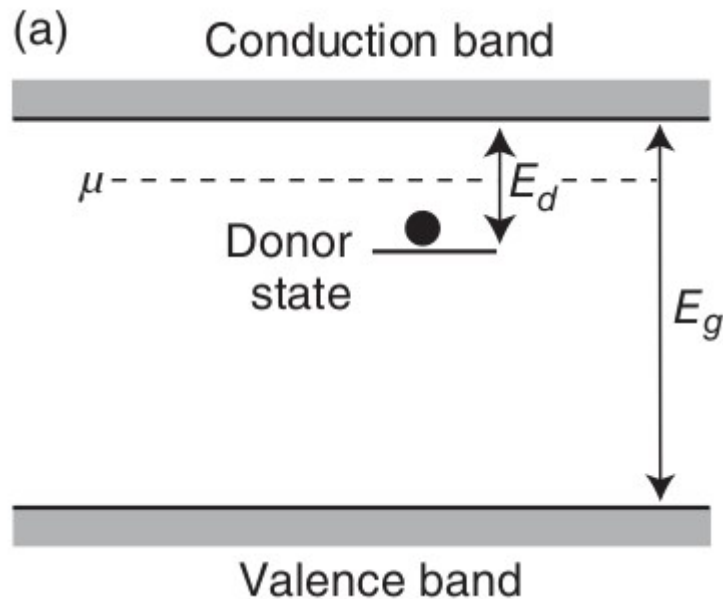
$$r \approx 30a = 1.5\text{nm}$$



$$\psi(r) = \frac{1}{\sqrt{\pi}a^{3/2}} e^{-r/a}$$

n-dópolás: A donoratomról könnyen leszakítható elektron
a vezetési sávba kerül → donoratomok energiaszintjei a
vezetési sáv alatt kicsivel

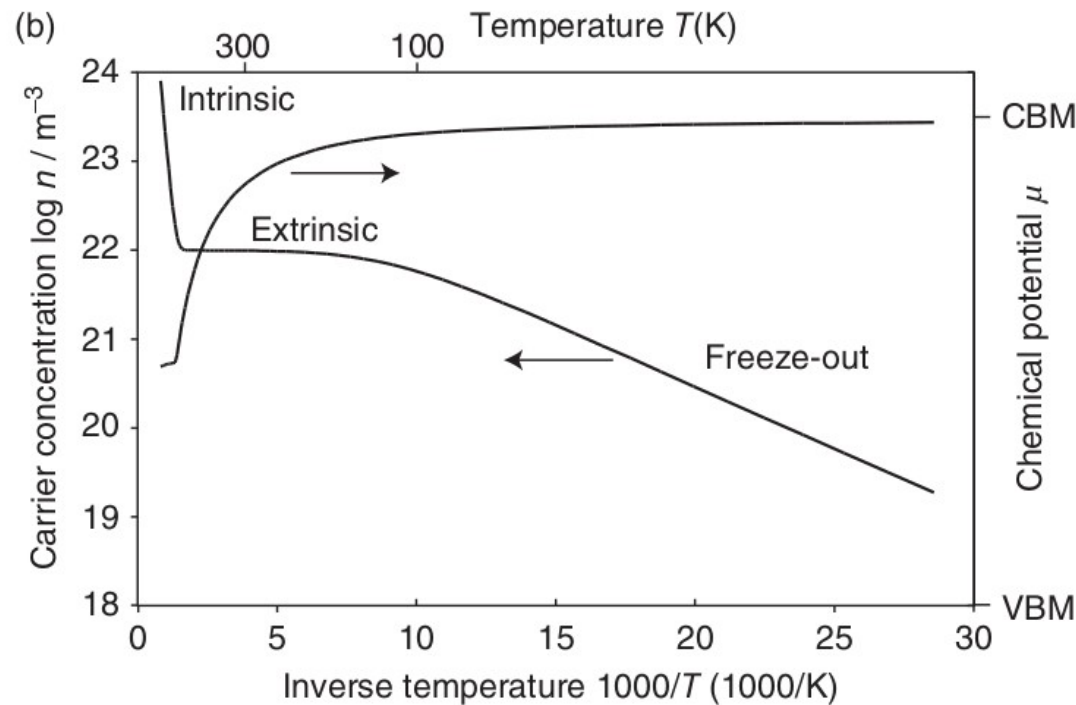
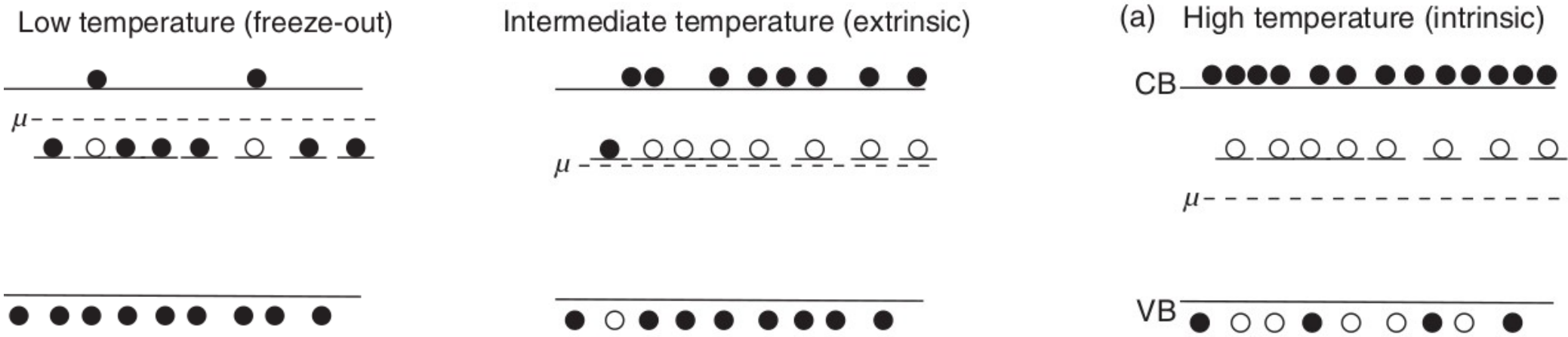
pl. foszforral dópolt szilícium



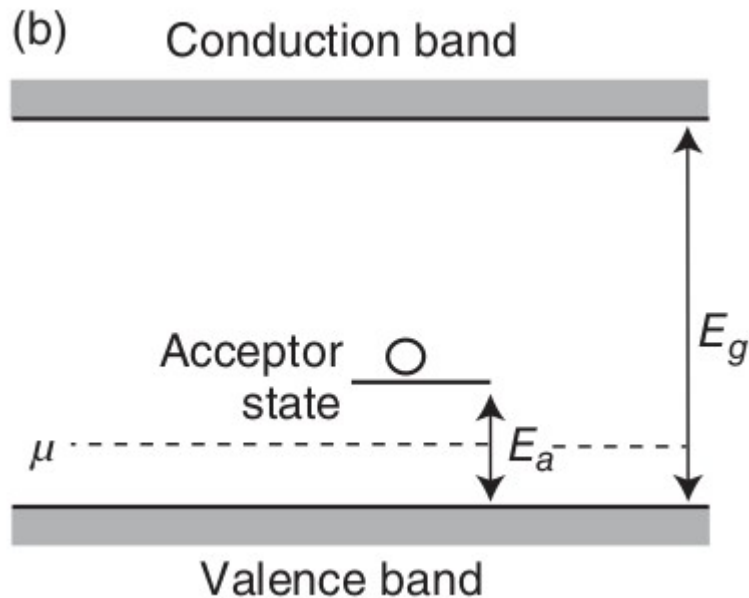
$$E_d \approx E_1 \approx 40meV$$

$$E_g = 1.14eV$$

Közepes hőmérsékleten majdnem minden donoratom leadja az elektronját a vezetési sávba
 → robusztus, hangolható töltéshordozó-sűrűség



p-dópolás: akceptoratomra ugyanez, lazán kötött állapot
nincs még betöltve, könnyen betöltődik a
vegyértéksávból = lazán kötött lyuk



pl. alumíniummal dópolt szilícium

$$E_g = 1.14eV$$

$$E_a \approx E_1 \approx 70meV$$

Tömeghatás törvénye:
n-dópolás → több elektron → több rekombináció →
kevesebb lyuk

$$np = 4 \left(\frac{k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^3 (m_e^* m_h^*)^{3/2} e^{-\frac{E_g}{k_B T}}$$

elektron- és lyukkonzentráció szorzata nem függ a dópolástól

igaz n-dópolásra és p-dópolásra is

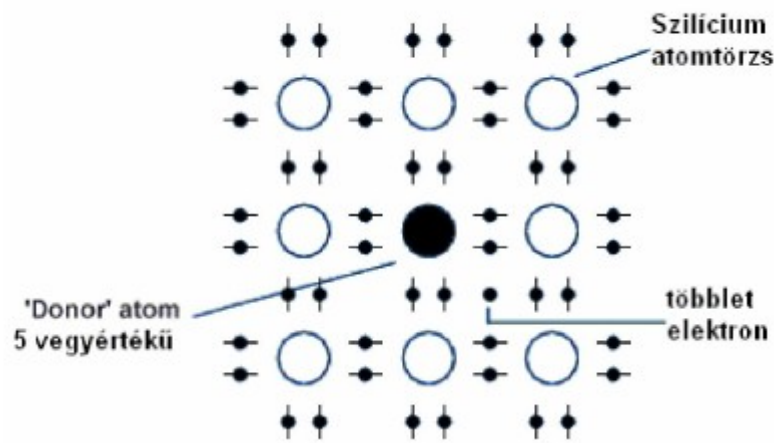
n-dópolás: sok elektron (többségi töltéshordozó),
 keves lyuk (kisebbségi)

p-dópolás: sok lyuk (többségi), kevés elektron (kisebbségi)

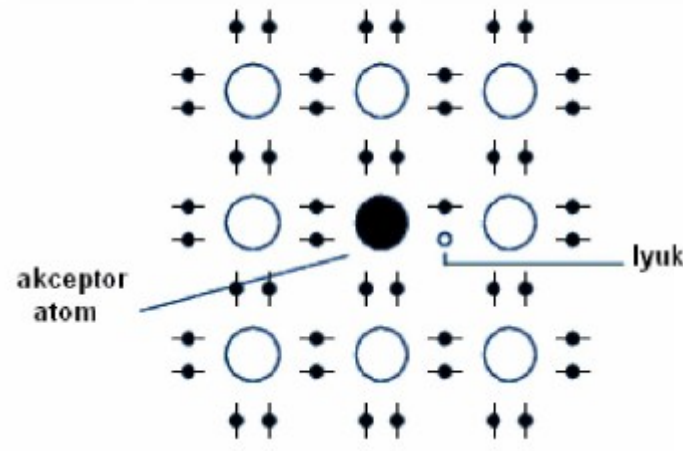
p-dópolás → több lyuk → több rekombináció → kevesebb elektron

Dópolással szabad töltéshordozókat viszünk a félvezetőbe. Kb. annyit, ahány dópoló atom, hőmérséklettől kb. függetlenül (az extrinszik tartományban)

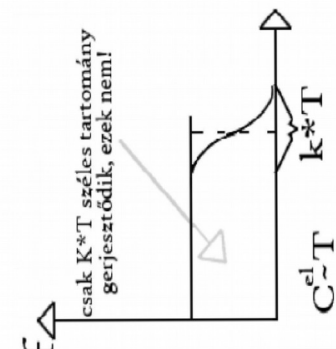
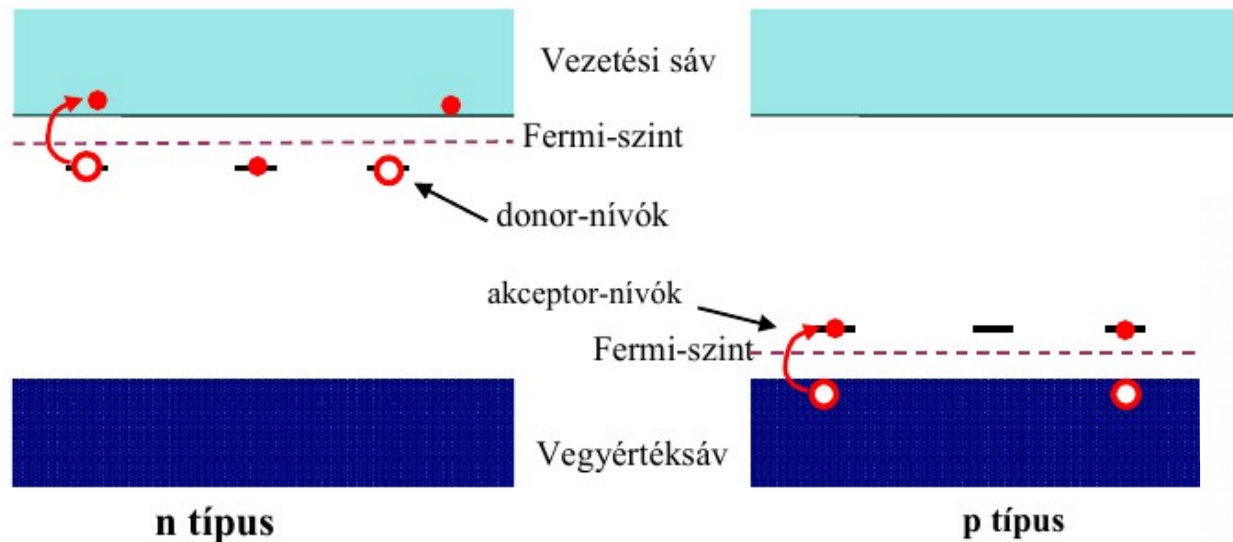
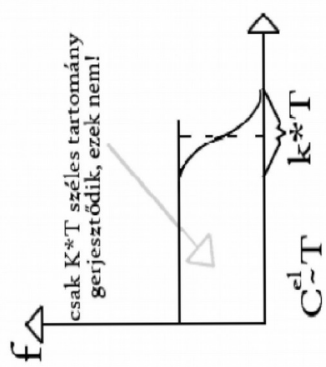
Si + P
n-dópolt



Si + Al
p-dópolt



$$f_{\text{FD}}(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{kT}} + 1}$$



energiaszintek távolsága a sávban

Egy sávban a szomszédos energiaszintek energiakülönbsége mitől nem függ?

- A) Milyen anyagot tekintünk
- B) Mekkora a minta mérete
- C) Mi a hőmérséklet
- D) A sávon belül milyen energián nézzük

Példa: Félvezető kristály

Egy szigetelő anyagból készült kristály 295 nm-nél hosszabb hullámhosszú fényt átereszt, de rövidebbet csak alig. Mekkora benne a tiltott sáv, hány eV?

Félvezető vezetőképessége

Hogyan változik egy (tisztá, azaz intrinsic) félvezető vezetőképessége, ha emeljük a hőmérsékletet?

- A) Nő, hőmérsékleti gerjesztés miatt
- B) Csökken, atomtörzsek hőrezgése miatt
- C) Nem változik (egyik hatás sem lényeges)
- D) Nő vagy csökken, aszerint, hogy lyukak vagy elektronok adják a vezetést

Dópolt félvezető tömbi töltéssűrűsége

Egy dópolt félvezetőben milyen tértöltés alakul ki a tömbi részben?

- A) Pozitív
- B) Negatív
- C) Semmilyen (elektromosan semleges)
- D) Pozitív vagy negatív, attól függően, hogy p- vagy n-dópolt

Példa: 1g tiszta szilíciumban szobahőmérsékleten hány szabad elektron és hány lyuk van? És 80 Celsius fokon?

Számolós feladat

- Szobahőmérsékleten Si-ban 10^{10} 1/cm^3 a vezetési elektronok koncentrációja. Dópolással ezt fel akarjuk vinni az egymilliószorosára. Mekkora lesz ekkor a lyukak koncentrációja? A szilíciumatomok hányadrészét kell ehhez foszforatommal helyettesíteni?

2.33 g/cm^3

28.1 g/mol

Példa: Szilíciumban kémiai potenciál

Szilíciumban a szennyező atomok energiaszintje 0.11 eV -tal van a vezetési sáv alatt. Ha az energiaszint betöltési valószínűsége 300K -en $4e-5$, hol van a kémiai potenciál, mennyi eV -tal a vezetési sáv alatt?

Példa: Félvezető kristály

Egy szigetelő anyagból készült kristály 295 nm-nél hosszabb hullámhosszú fényt átereszt, de rövidebbet csak alig. Mekkora benne a tiltott sáv, hány eV?