

Bevezetés az anyagtudományba

XI. előadás

2010. április 22.

Definíciók

Elektromos tulajdonságok:
az anyagok elektromos tér hatására adott „válasza”

Az anyag válasza lehet:

- töltésmozgás (vezetés)
- töltéseltolódás (dielektromos viselkedés)
- ferroelektromosság
- piezoelektromosság

Töltéshordozók

- a legtöbb szilárd test esetén elektronok vezetnek, bár
- ionok mozgása is adhat járulékot (pl. folyadékokban)

Elektromos vezetés

Ohm-törvény:

$$U = I R$$

feszültség (V) → U = I R ← ellenállás (Ohm, Ω)
 =potenciálesés áramerősség ($A = C/s$)

- Az ellenállás értéke függ a vezető geometriájától:

$$R = \frac{\rho l}{A} = \frac{l}{A \sigma}$$

l : a vezető hossza
 A : keresztmetszet

- Fajlagos ellenállás, ρ és fajlagos vezetőképesség, σ : már mintától független anyagállandók

fajlagos vezetőképesség ($\Omega \cdot m$)⁻¹ → $\sigma = \frac{1}{\rho}$

Differenciális Ohm-törvény:

$$\frac{U}{l} = \frac{I}{A} \rho$$

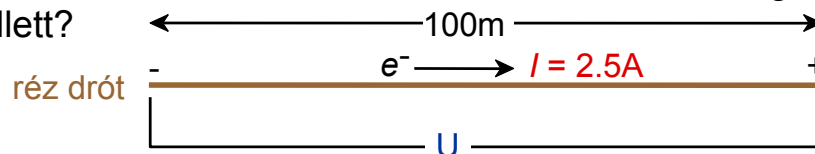
az elektromos térerősség, E nagysága → $\frac{U}{l}$
 fajlagos ellenállás ($\Omega \cdot m$) → ρ
 $\sigma E = J$ → J : áramsűrűség

XI/3

Probléma

Két számpélda

- 1) Mekkora legyen egy rézből készült vezeték átmérője, hogy a belőle készült 100m hosszú darabon 1.5 V-nál kisebb feszültség essen 2,5A áram mellett?

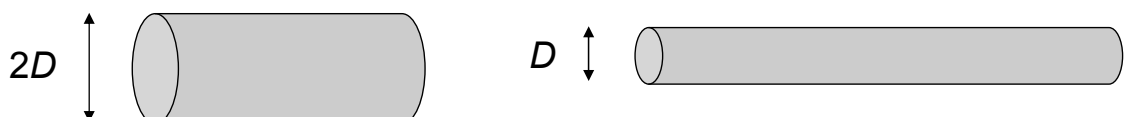


$$R = \frac{l}{A \sigma} = \frac{\Delta V}{I}$$

$100m$ → l
 $\Delta V < 1.5V$
 $I = 2.5A$
 $\sigma = 6.07 \times 10^7 (\Omega \cdot m)^{-1}$
 $A = \frac{\pi D^2}{4}$

Megoldva azt kapjuk, hogy $D > 1.87 \text{ mm}$

- 2) Melyik vezet jobban?



Hf

XI/4

Anyagcsaládok fajlagos vezetőképességének összehasonlítása

Szobahőmérsékleten (Ωm)⁻¹ egységekben

FÉMEK

ezüst	6.8×10^7
réz	6.0×10^7
arany	4.5×10^7
vas	1.0×10^7

vezetők

$10^2 - 10^8 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$

KERÁMIÁK

nátron-üveg	$10^{-10} - 10^{-11}$
beton	10^{-9}
alumínium-oxid	$< 10^{-13}$

MŰANYAGOK

polisztirén	$< 10^{-14}$
polietilén	$10^{-15} - 10^{-17}$
szigetelők	$10^{-20} - 10^{-9} \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$

FÉLVEZETŐK

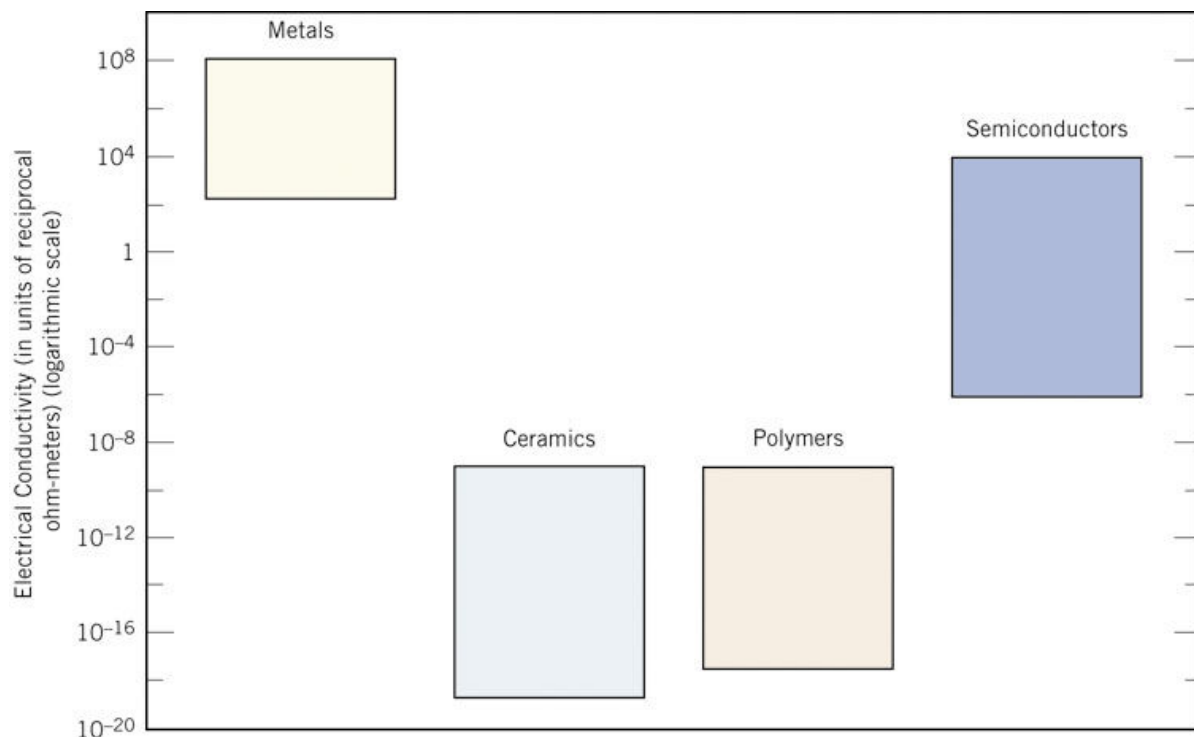
szilícium	4×10^{-4}
germánium	2×10^0
GaAs	10^{-6}

félvezetők

$10^{-6} - 10^4 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$

XI/5

Elektromos vezetőképesség

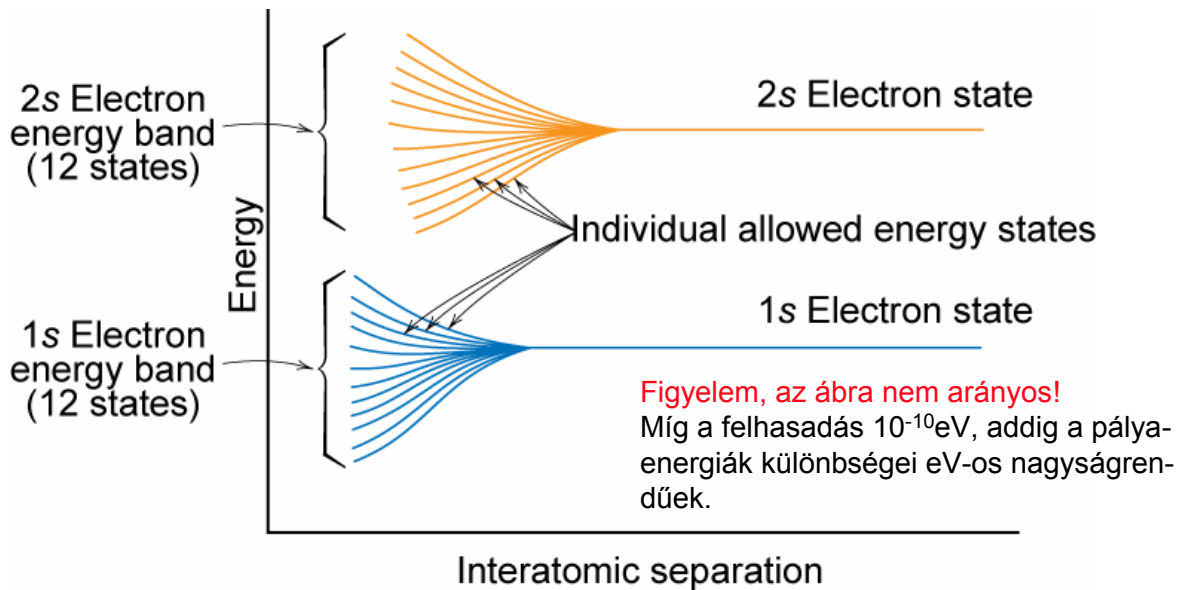


27 nagyságrend!!

XI/6

Elektromos sávszerkezet

A szabad atomok elektronszerkezete (ld. II. előadás) sokatomos szilárd anyagban módosul. A szomszédos elektronok és magok elektromos mezeje perturbálja a pályákat, így azok felhasadnak.

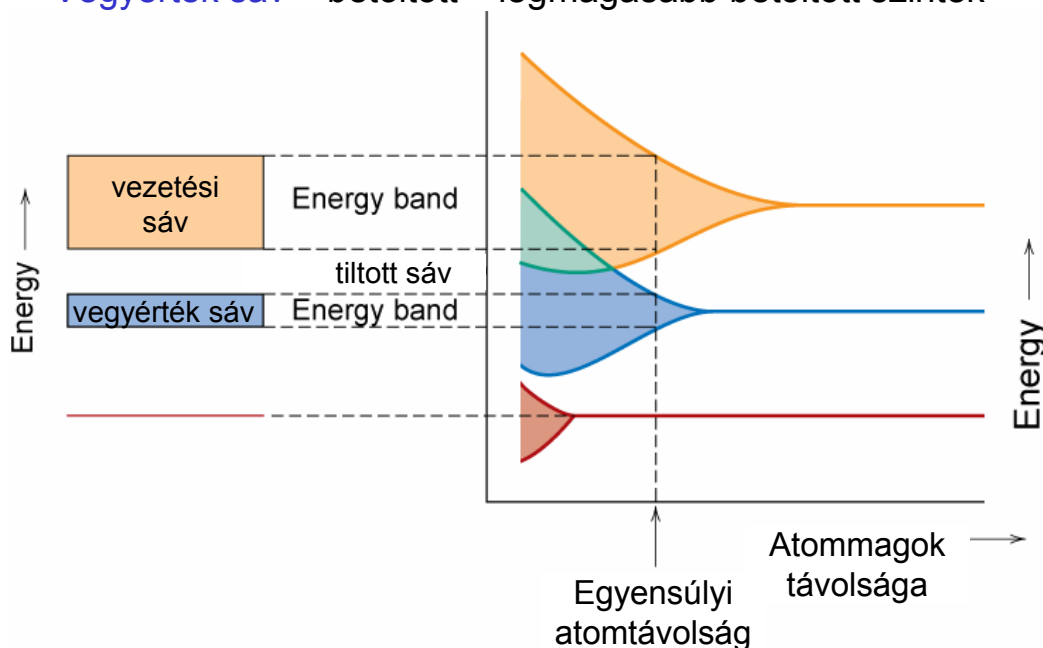


pl. N=12 db atom közelítésekor

XI/7

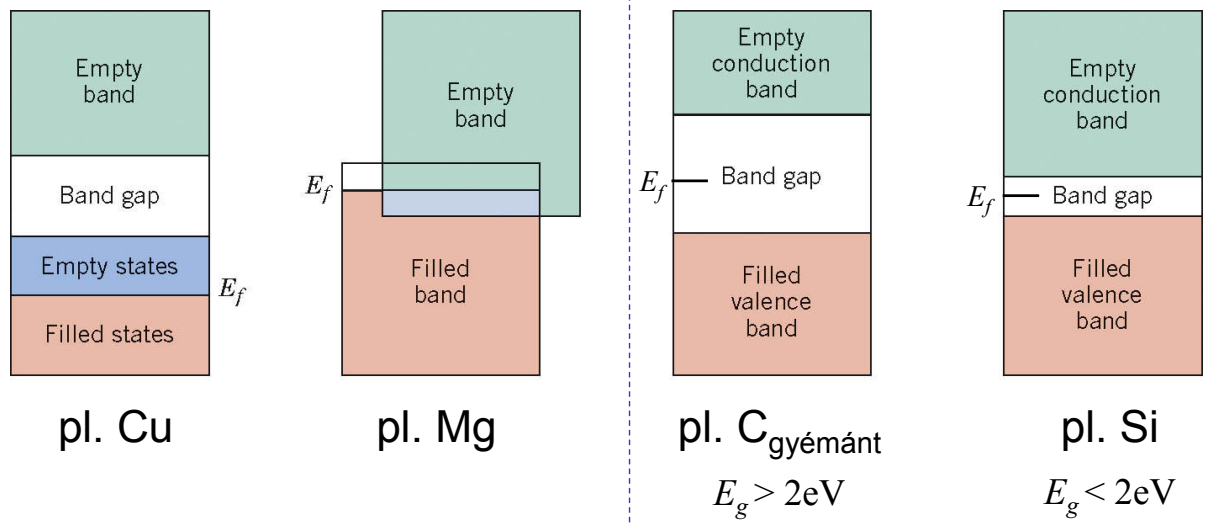
Sávszerkezet

- **Vezetési sáv** – betöltetlen – legalacsonyabb betöltetlen szintek
- **Vegyérték sáv** – betöltött – legmagasabb betöltött szintek



XI/8

Lehetséges sáv szerkezet típusok T=0K-en



Fermi szint, E_f : a legmagasabb betöltött pálya energiája 0K hőmérsékleten

Csak az E_f -nél magasabb nívókon lévő e-ok (illetve alacsonyabb nívókon lévő lyukak) szabadok és vesznek részt a vezetésben!

Tiltott sáv szélesség, E_g : a vezetési sáv alja és a vegyértéksáv teteje közti energiakülönbség. XI/9

Mozgékonyág

- A kvantummechanika szerint az ideális kristályban a rács és a benne gyorsuló szabad töltéshordozó nem hat kölcsön! Külső tér jelenlétében az áram határ nélkül nőhetne.
- A valós kristályrács hibahelyein azonban mindig van szórás, melynek mértékét a töltéshordozók mozgékonyágával $[\mu]$, vagy a drift sebességgel $[v_d]$ szokás leírni.

$$v_d = \mu E$$

$$[\mu] = \text{m}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$$

- A mozgékonyág segítségével a fajlagos vezetőképesség a következőképp fejezhető ki

$$\sigma = n |e| \mu$$

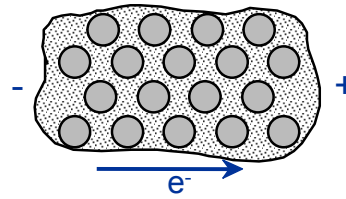
ahol n az egységnyi térfogatban levő töltéshordozók száma,
 $|e|$ pedig az elektron töltésének abszolút értéke.

Hogyan viszonyul a szupergyorsan lehűtött fémolvadék (ún. fémüveg) vezetőképessége a hagyományos féméhez?

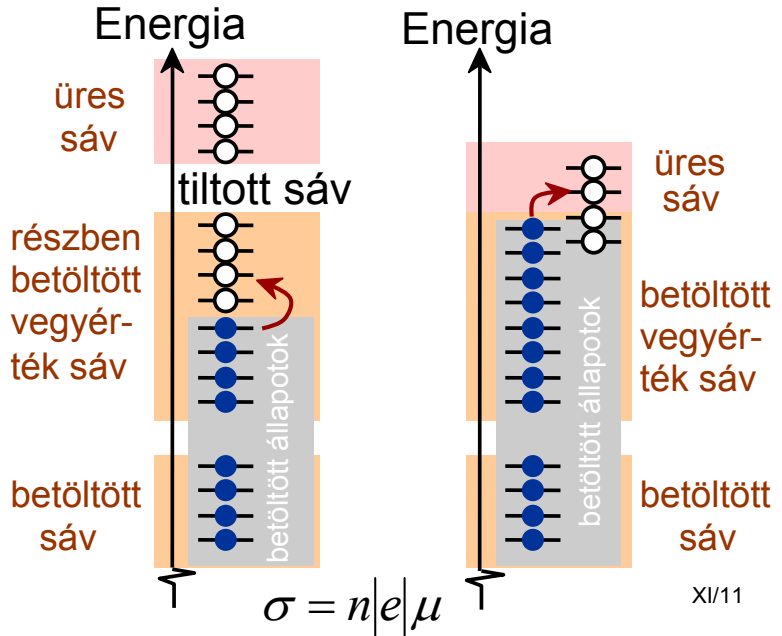
Vezetés és elektrontranszport: Fémek

Fémek (**vezetők**):

- A termikus energia sok elektront a Fermi szint fölé emel \rightarrow szabad e^- -ok.



Energia állapotok:
- A fémek üres energiaállapottai már a termikus fluktuációk révén elérhetőekké válnak.



Mitől függ a fémek fajlagos ellenállása?

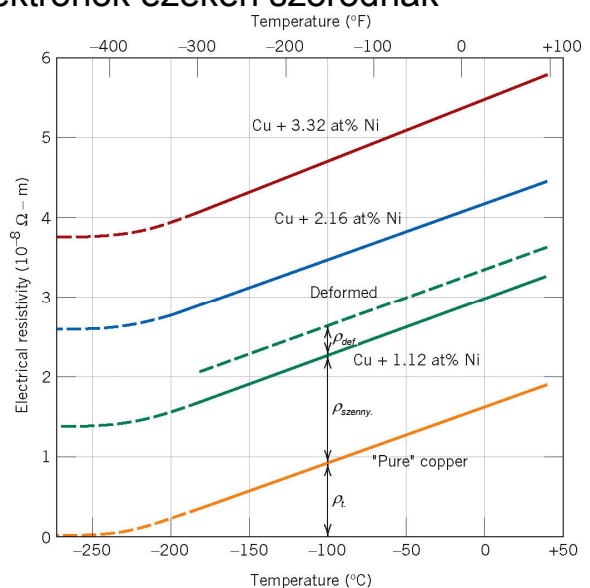
- A rácshibák növelik a (fajlagos) ellenállást
 - szemcsehatár
 - diszlokációk
 - szennyező atomok
 - rácshibák
- A fajlagos ellenállás függ
 - hőmérséklettől
 - szennyező atomok mennyiségétől
 - képlékeny alakváltozástól

az elektronok ezeken szóródnak

$$\rho = \rho_t + \rho_{szenny.} + \rho_{def.}$$

Matthiessen-szabály

$$\rho_t = \rho_0 + aT$$



J.O. Linde, *Ann. Physik* **407**, p. 219 (1932)

kétfázisú rendszer:

$$\rho_{szenny.} = \rho_\alpha V_\alpha + \rho_\beta V_\beta$$

szilárd oldat:

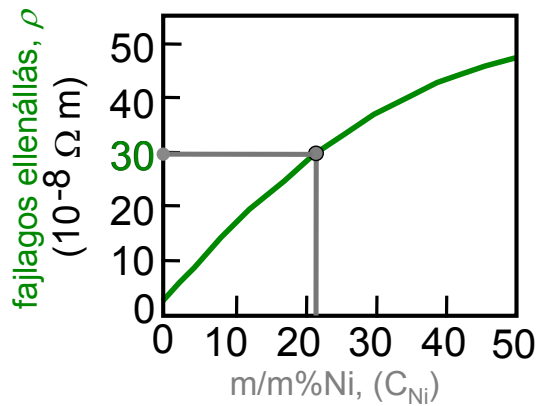
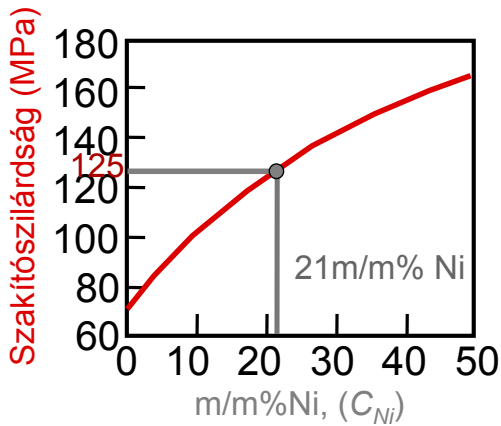
$$\rho_{szenny.} = A \cdot c_{szenny.} (1 - c_{szenny.})$$

$$[c_{szenny.}] = \text{at\%/100}$$

XI/12

Becsüljük meg ρ -t, ill. σ -t!

Becsülje meg annak a Cu-Ni ötvözetnek a fajlagos elektromos vezetőképességét, melynek szakítószilárdsága **125 MPa**!



Az első lépésben:

$$C_{Ni} = 21\text{m/m\% Ni}$$

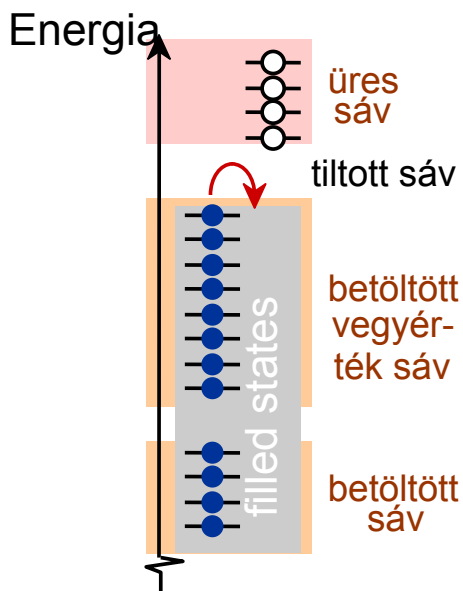
$$\rho = 30 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = 3.3 \cdot 10^6 (\Omega \cdot m)^{-1}$$

Vezetés és elektrontranszport: szigetelők és félvezetők

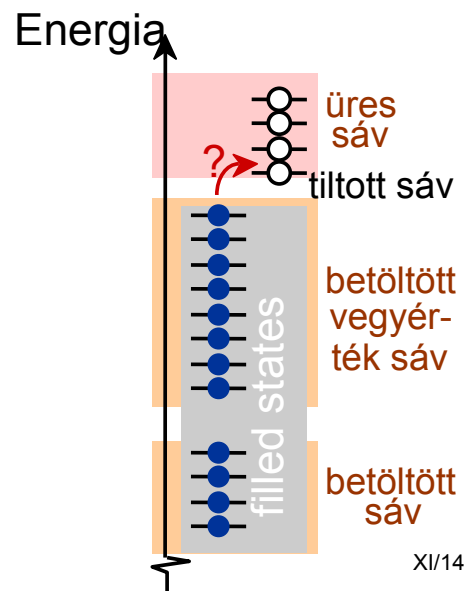
Szigetelők:

- Az e^- -ok termikusan nem gerjeszthők a vezetési sávba.

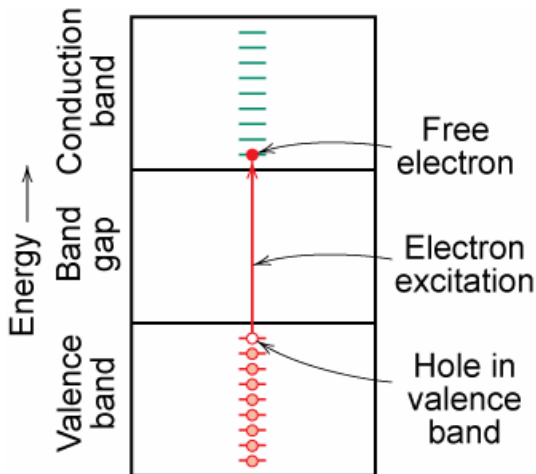


Félvezetők:

- A tiltott sáv kisebb (kb. 2 eV), s így nő a vezetési sávba történő gerjeszthetőség valószínűsége.



Töltéshordozók



Két mechanizmus

Elektron – negatív töltés

Lyuk – azonos nagyságú pozitív töltés

Eltérő (**drift**) sebességgel vándorolnak!

A hőmérséklet növelésével több elektron képes a vezetési sávba jutni

$\therefore \sigma \uparrow$ ha $T \uparrow$

A töltéshordozók szóródnak szennyezéseken, szemcsehatárokon, stb.

XI/15

Intrinsic és extrinsic félvezetők

- Intrinsic félvezetők:**

- elektromos viselkedését a tiszta anyag elektronszerkezete határozza meg (pl. Si, Ge, GaAs, stb.)
- az elektronok száma = lyukak száma ($n = p$)

Material	Band Gap (eV)	Electrical Conductivity [$(\Omega\text{-m})^{-1}$]	Electron Mobility ($\text{m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	Hole Mobility ($\text{m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)
Elemental				
Si	1.11	4×10^{-4}	0.14	0.05
Ge	0.67	2.2	0.38	0.18
III-V Compounds				
GaP	2.25	—	0.03	0.015
GaAs	1.42	10^{-6}	0.85	0.04
InSb	0.17	2×10^4	7.7	0.07
II-VI Compounds				
CdS	2.40	—	0.03	—
ZnTe	2.26	—	0.03	0.01

- Extrinsic félvezetők:**

- a mátrixétól eltérő számú vegyértékelektront tartalmazó szennyező anyag adagolásával (adalekcolás=dópolás) előállított félvezető
- az elektromos viselkedést a szennyező atom határozza meg
- $n \neq p$

XI/16

Intrinsic félvezetők

- **Elemi félvezetők:**
 - A IVA főcsoport elemei
 - pl. szilícium, germánium
- **Vegyület félvezetők:**
 - III-V vegyület félvezetők
 - pl. GaAs, InSb
 - II-VI vegyület félvezetők
 - pl. CdS, ZnTe
 - Minél nagyobb az elektronegativitás különbség az elemek között, annál nagyobb a tiltott sáv szélessége.

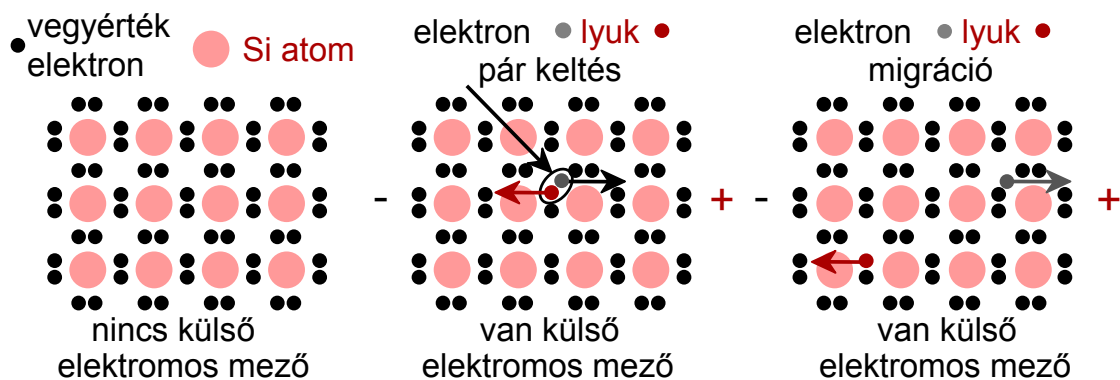
Periodic table of the elements

Numbering system adopted by the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC).
 ** Numbering system widely used, especially in the U.S., from the mid-20th century.
 *** Discoveries of elements 113–118 are claimed but not confirmed. Element names and symbols in parentheses are temporarily assigned by IUPAC.

© 2010 Encyclopædia Britannica, Inc.

XI/17

Elektron- és lyukvezetés



- A fajlagos vezetőképesség:

$$\sigma = n|e|\mu_e + p|e|\mu_h$$

elektron/m³ elektron mozgékonyosság

lyuk/m³ lyuk mozgékonyosság

XI/18

A töltéshordozók mennyisége

Intrinsic fajlagos vezetőképesség

$$\sigma = n|e|\mu_e + p|e|\mu_h$$

- az intrinsic félvezetőkre $n = p$
 $\therefore \sigma = n|e|(\mu_e + \mu_n)$

n , ill. p mérése Hall-effektussal lehetséges:

$$V_H = \frac{R_H I_x B_z}{d}$$

ahol $R_H = \frac{1}{n|e|}$

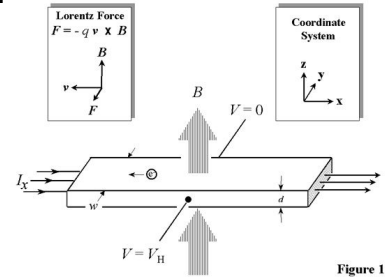


Figure 1

- pl.: GaAs

$$n = \frac{\sigma}{|e|(\mu_e + \mu_n)} = \frac{10^{-6} (\Omega \cdot m)^{-1}}{(1.6 \cdot 10^{-19} C)(0.85 + 0.04 m^2/V \cdot s)}$$

így GaAs-re $n = 7.0 \cdot 10^{12} m^{-3}$

Hasonlóan Si-ra $n = 1.3 \cdot 10^{16} m^{-3}$



Edwin Herbert HALL (1855-1938)

Már csekély (Si-ra RT-n kb. $1:10^{11}$) szennyezés extrinsic-ké teszi a vezetést!

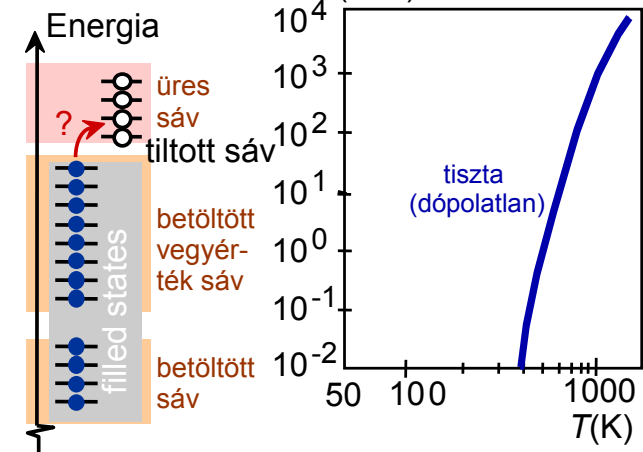
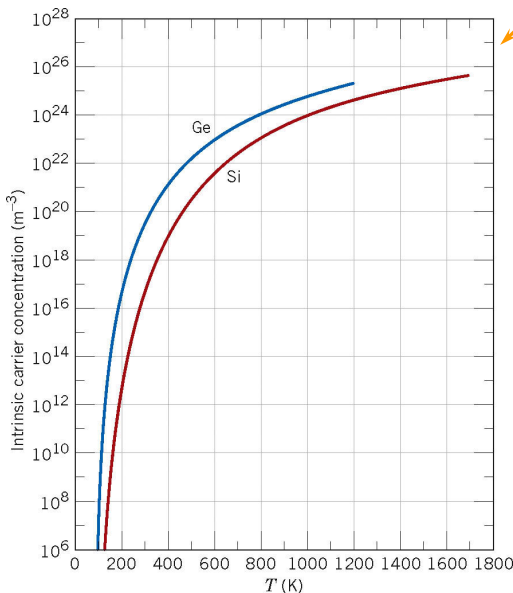
Intrinsic félvezetők: $\sigma(T)$

- Tiszta szilícium:
 - σ nő T -vel
 - a fémekkel ellentétes!

$$\sigma_{nem\ adalékolt} \propto e^{-E_{gap}/kT}$$

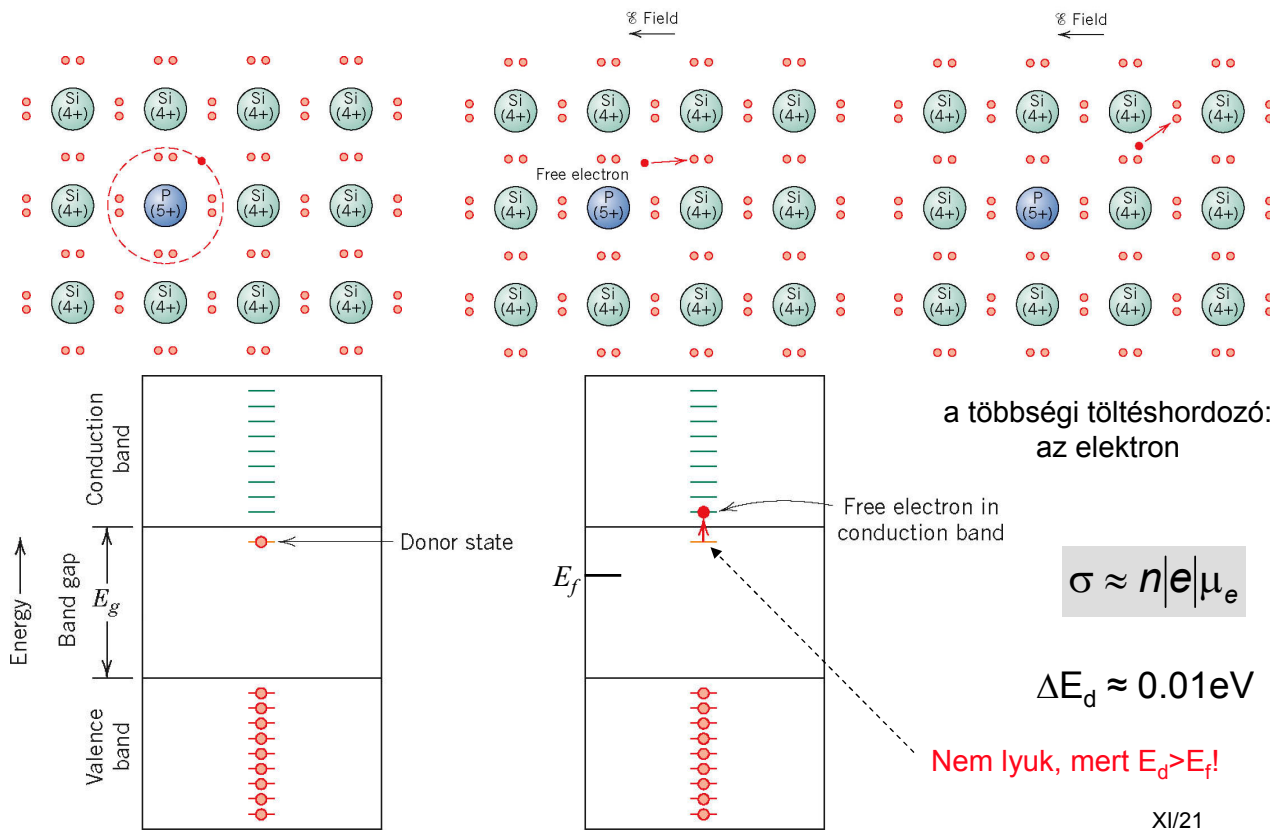
Igazolják!

Elektromos vezetőképesség, σ

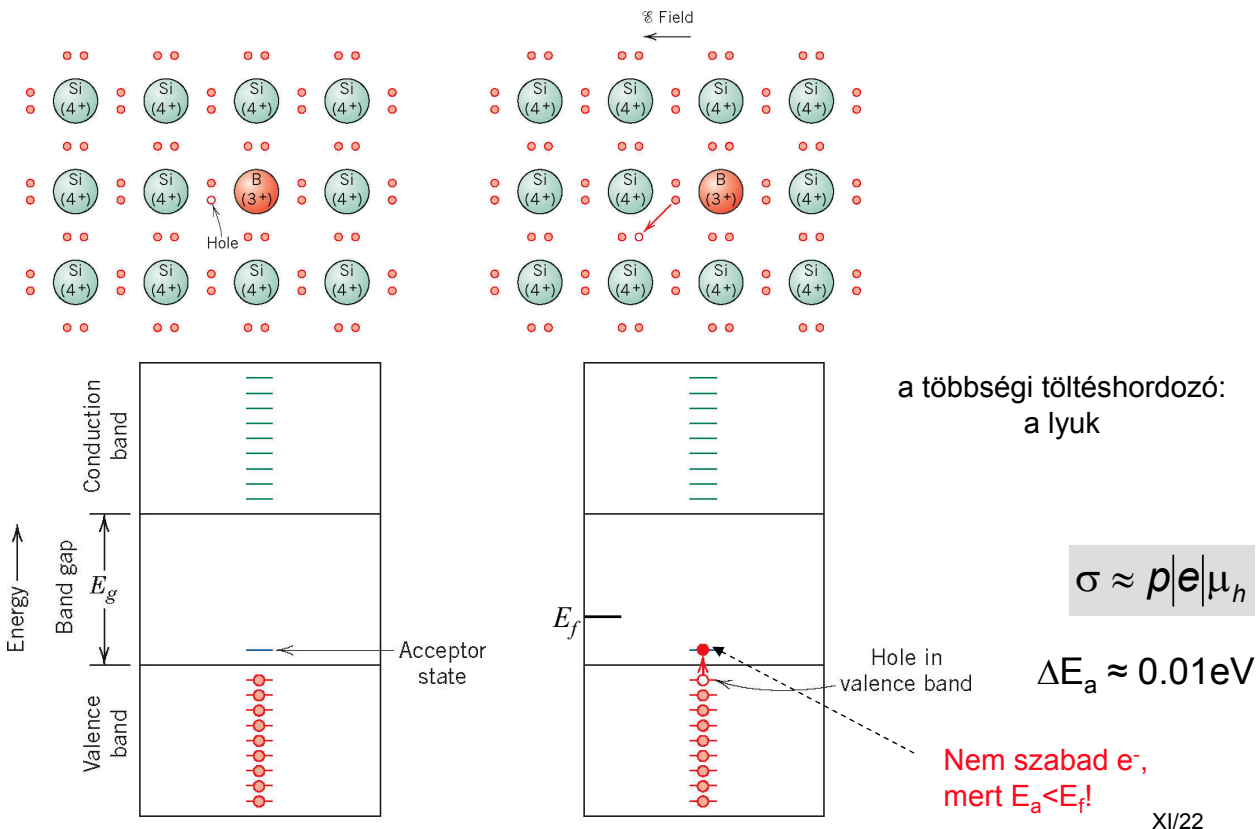


az elektronok magasabb T-n könnyebben tudják átlépni a tiltott sávot

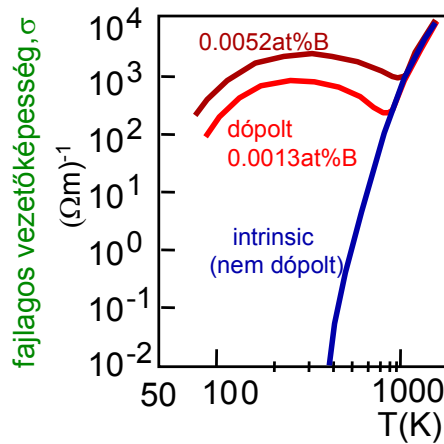
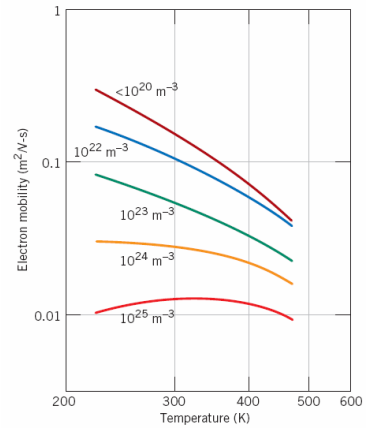
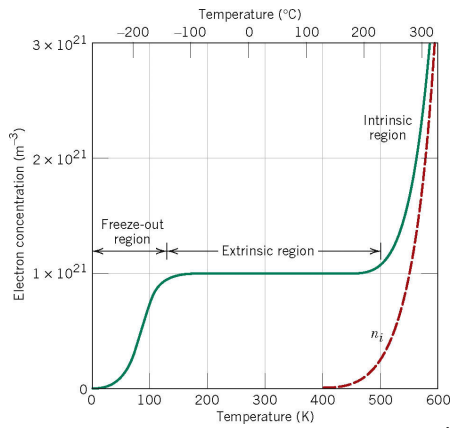
n-típusú extrinsic félvezető



p-típusú extrinsic félvezető

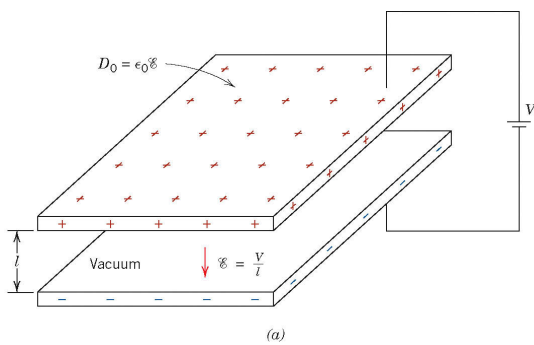


Adalékolt félvezetők: $\sigma(T)$



XI/23

Dielektromos viselkedés

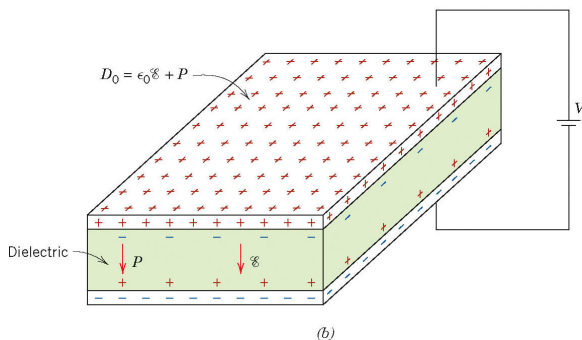


Vákuum esetén

$$C_{\text{vákuum}} = \epsilon_0 \frac{A}{l}$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$$

a vákuum dielektromos állandója



Dielektrikumban

$$C_{\text{dielektrikum}} = \epsilon \frac{A}{l}$$

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

relatív permittivitás,
vagy dielektromos állandó

Kapacitás: (elektromos) töltéstároló képesség

XI/24

Kerámiák és műanyagok dielektromos állandója

Table 18.5 Dielectric Constants and Strengths for Some Dielectric Materials

Material	Dielectric Constant		Dielectric Strength (V/mil) ^a
	60 Hz	1 MHz	
<i>Ceramics</i>			
Titanate ceramics	—	15–10,000	50–300
Mica	—	5.4–8.7	1000–2000
Steatite (MgO–SiO ₂)	—	5.5–7.5	200–350
Soda–lime glass	6.9	6.9	250
Porcelain	6.0	6.0	40–400
Fused silica	4.0	3.8	250
<i>Polymers</i>			
Phenol-formaldehyde	5.3	4.8	300–400
Nylon 6,6	4.0	3.6	400
Polystyrene	2.6	2.6	500–700
Polyethylene	2.3	2.3	450–500
Polytetrafluoroethylene	2.1	2.1	400–500

kondenzátor, nagyfeszültségű szigetelés

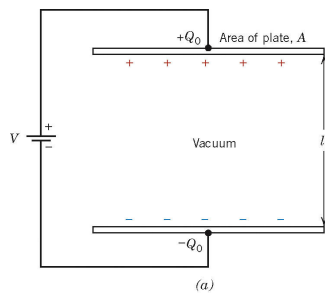
szigetelés (pl. kábelek)

^a One mil = 0.001 in. These values of dielectric strength are average ones, the magnitude being dependent on specimen thickness and geometry, as well as the rate of application and duration of the applied electric field.

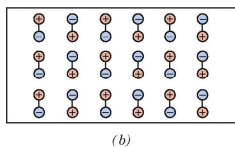
átütési szilárdság (dielektromos erősség)

XI/25

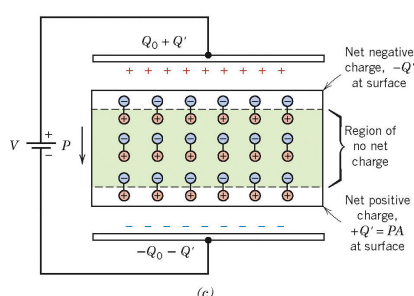
Töltéstárolás



$$\vec{D}_0 = \epsilon_0 \vec{E}$$



$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$



$$\vec{P} = \frac{Q'}{A}$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

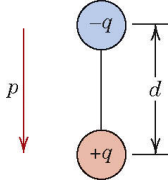
D: eltolódás vektor
P: polarizáció vektor

XI/26

Elektromos dipól

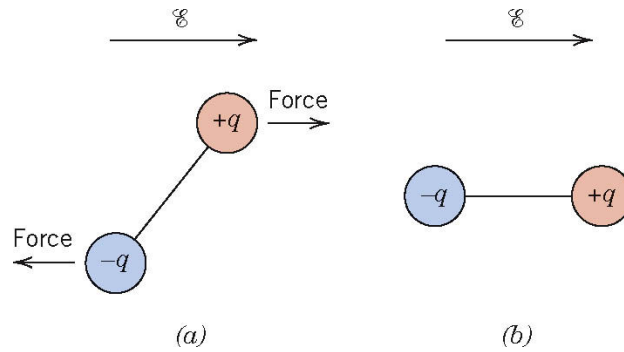
Dipól: olyan részecske, melyben a pozitív és negatív töltések középpontja nem esik egybe.

Dipól-momentum (p)



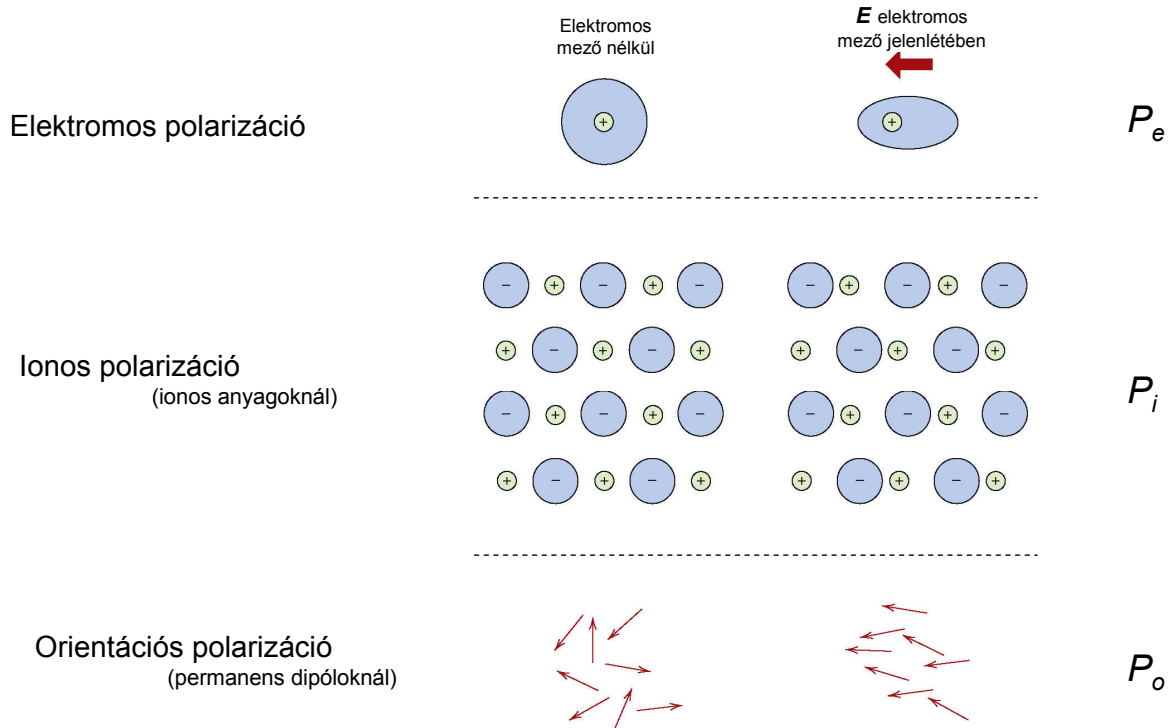
$$p = qd$$

Elektromos térben a dipólok orientálódnak -> **polarizáció**



XI/27

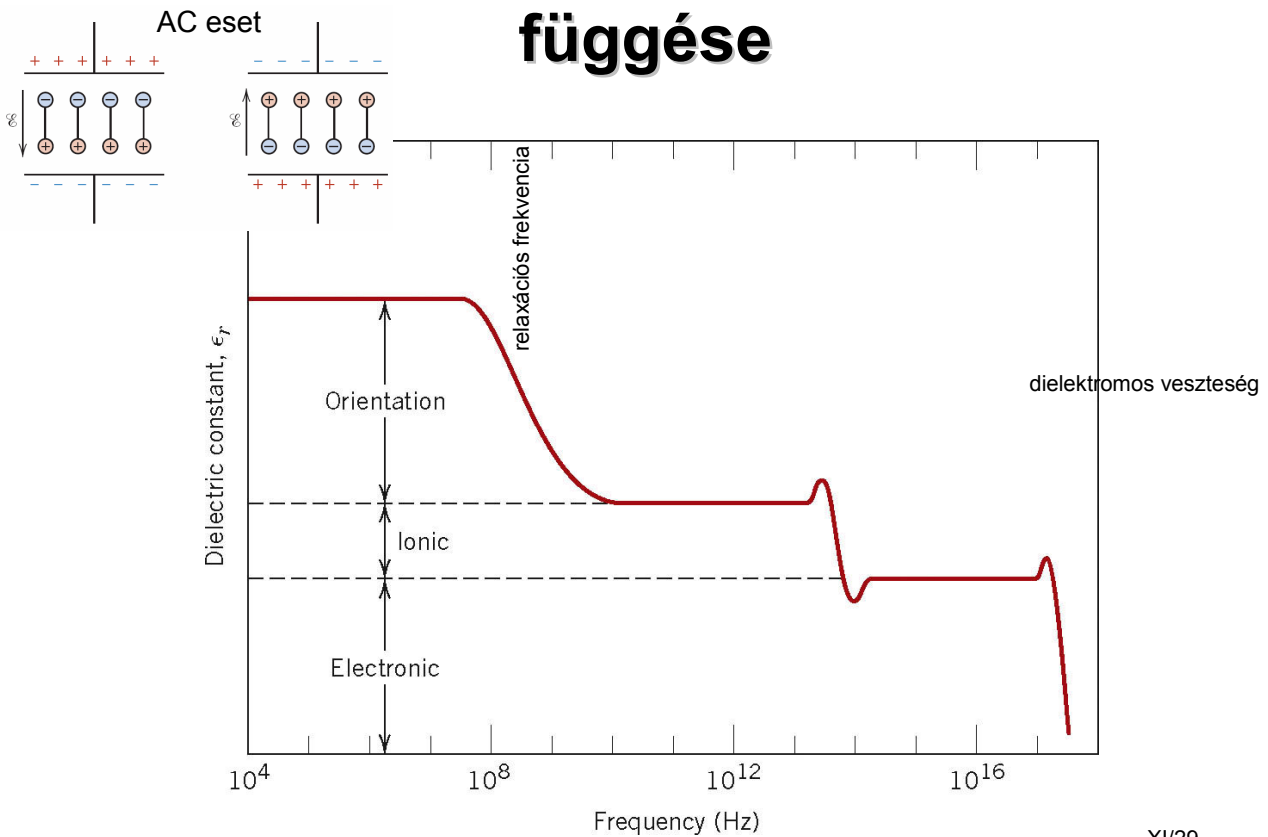
A polarizáció típusai



$$P = P_e + P_i + P_o$$

XI/28

A dielektromos állandó frekvencia függése



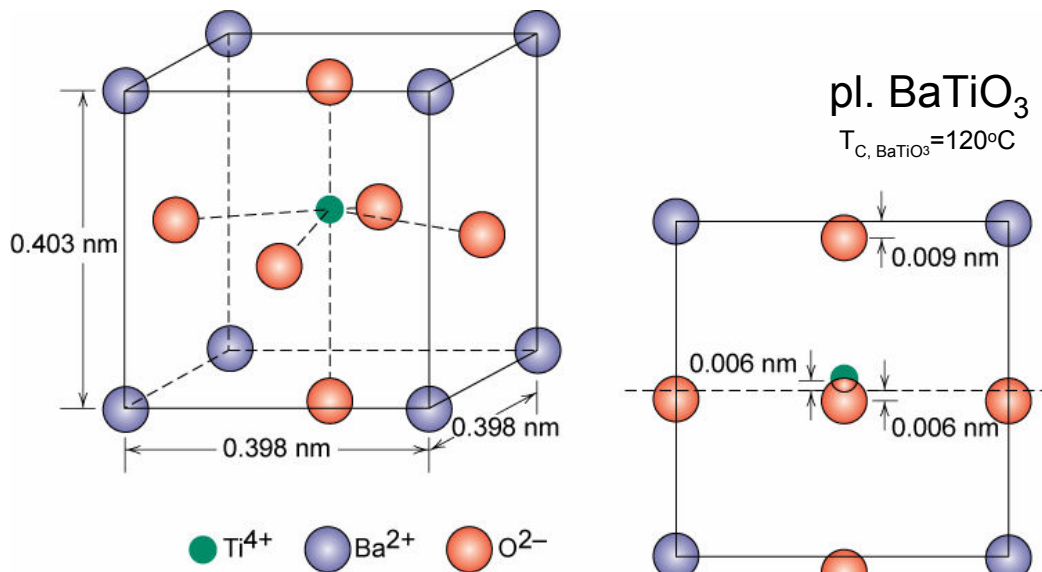
XI/29

Ferroelektromos kerámiák

Ferroelektromosság: elektromos tér hiányában spontán polarizáltak (a ferromágneses viselkedés elektromos analógiája)

A ferroelektromos kerámiák a Curie hőmérséklet alatt polárisak.

- Ha erős elektromos térben hűtjük T_c alá nagy dipól-momentumú anyagot kapunk.

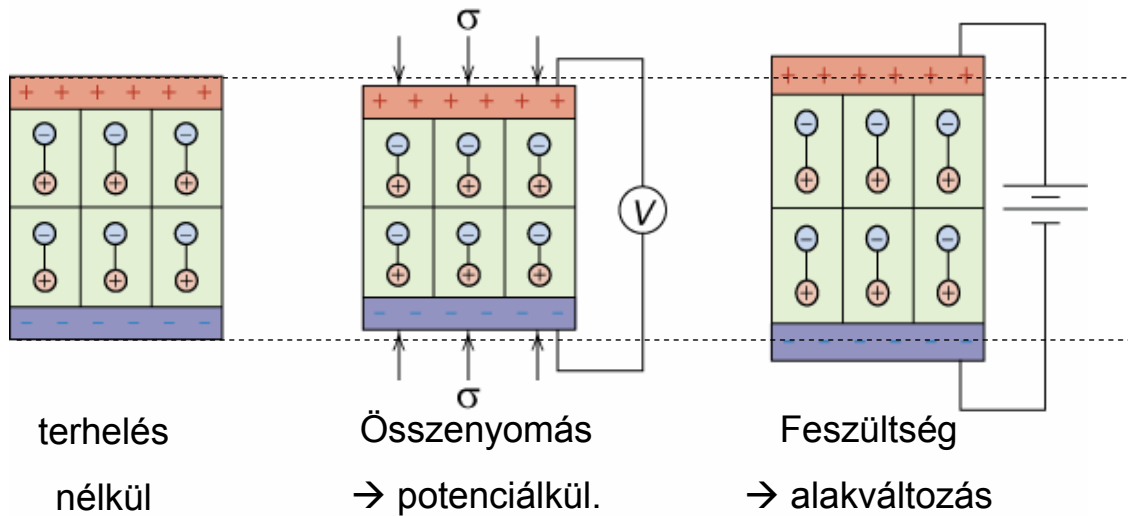


extrém magas ϵ_r

XI/30

Piezelektromosság

Piezelektromosság – feszültség hatására bekövetkező alakváltozás, illetve nyomás hatására történő polarizáció



pl. PbZrO_3 , $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, kvarc

Alk.: pick-up, mikrofon, ultrahangos képalakotás, környezeti rezgések hasznosítása

XI/31

Kisdolgozati témák

Határidő: optimálisan 2010. 05. 07.
legkésőbb 2010. 05. 14.

A fajhő meghatározása

- Ismertesse röviden milyen módszerekkel határozható meg egy anyag fajhője!
- Elemezze, hogy melyik eljárás lenne a legmegfelelőbb abban az esetben, ha a mérendő anyagból csak 0,1g mennyiség áll rendelkezésre!
- Miként lenne lehetséges a fajhő hőmérsékletfüggésének meghatározása?

Hővezetőképesség meghatározása

- Ismertesse röviden milyen módszerekkel határozható meg egy anyag hővezetőképessége!
- Azt kapta feladatul, hogy egy 20nm átmérőjű, 300nm hosszú (tömör) szilícium „nanoszál” esetében határozza meg ezt az anyagi jellemzőt. Milyen módszert javasolna a méréshez és miért?

Hőtágulási együttható

- Meg szeretnénk mérni egy fém hőtágulási együtthatóját. Milyen lehetőségeink vannak?
- Kell-e speciális eljárást kidolgozni ahhoz, hogy a NASA űrsiklójának hőpajzsához kifejlesztett HRSI anyagra is meg tudjuk mérni a hőtágulási együtthatót? Válaszát indokolja is!

Abszorpciós együttható

- Milyen eljárásokkal határozható meg egy minta abszorpciós együtthatója?
- Mit lehet tenni akkor, ha a mérendő anyag
 - csak nagyon csekély, vagy éppen
 - nagyon nagy mértékbenelnyelőd a vizsgált hullámhosszon? Javasoljon eljárást, mellyel ilyen körülmények között is pontosan mérhető ez az anyagi paraméter!

Abszolút törésmutató mérése

- Sorolja fel és röviden jellemezze azokat a módszereket, melyekkel meghatározható egy minta törésmutatója?
- Miként járna el akkor, ha azt kapja feladatul, hogy az optikai viselkedése szempontjából *anizotrop* kvarc esetében mérje meg ezt az optikai jellemzőt?

Reflexiós tényező

- Milyen eljárásokkal határozható meg egy minta reflexiós tényezője?
- Hasonlítsa össze a módszereket az általuk elérhető mérési pontosság alapján!
- Milyen megoldást javasolna R mérésére akkor, ha
 - a) nem egy rögzített hullámhosszon, hanem egy hullámhossz-tartományban vagyunk kíváncsiak R értékére?
 - b) egy hullámhosszon, de a minta hőmérsékletének függvényében kellene meghatározni R-et?

Dielektrikum vékonyrétegek optikai viselkedése

- Milyen elven alapul az egy- illetve *többrétegű* dielektrikum vékonyréteg(rendszer)rel bevont anyagok optikai jellemzőinek megváltozása?
- Mekkora veszteséggel kell számoljunk, ha az 532nm-es hullámhosszúságú lézerünk fényét egy BK7-es üvegből készült párhuzamos ablakon keresztül 45 fokos szög alatt vezetjük be egy mintakamrába?
- Milyen anyagokból készülhet egy olyan bevonat, mellyel azt szeretnénk elérni, hogy
 - a) az üveg hordozónk transzmissziója 99%-nál nagyobb legyen?
 - b) egy ömlesztett kvarc (fused silica) minta reflexiós tényezője lézerünk 266nm-es hullámhosszán meghaladja a 99%-ot?

A dolgozat önmagában értelmes, teljes legyen, ugyanakkor a felhasznált forrásokat kérem mindig tüntessék fel és hivatkozzák is meg a szöveg releváns részein. Állításait mindig szakmai érvekkel támasszák alá! A dolgozatok terjedelme kb. 5-10 oldal. **Beadás elektronikusán: zsolt.geretovszky@gmail.com** XI/32