

Szenzorteknika

BOJTOS ATTILA
BME - MOGI TANSZÉK



M Ú E G Y E T E M 1 7 8 2



Tematika

Bevezetés a szenzorteknikába

- csoportosítás,
- méréstechnikai tulajdonságok,
- Jelfeldolgozás

Anyagszerkezet

- Atomszerkezet
- Kémiai kötések
- Sávszerkezet
- Félvezetők
- Fémek

Érzékelési elvek fizikai alapjai (szenzor)

- Termikus elvek, hőmérsékletmérés
- Ellenállásváltozás elvén működő érzékelés
- Kapacitás
- Mágneses mérési elvek
- Piezoelektronos mérési elvek
- Optikai-elvek
- Akusztikai elvek

Érzékelési módszerek, alkalmazások (jelátalakító)

- Hossz-, távolság-, elmozdulás-, elfordulásmérés szenzorai
- Sebesség-, térfogatáram-, gyorsulásmérés szenzorai
- Nyomás-, erő-, nyomatékmérés szenzorai
- (Kémiai érzékelés szenzorai)

Aktuátorok

- Motorok
- Piezoelektronos aktuátorok
- Magnetostrikciós aktuátorok

Integrált érzékelő és beavatkozó rendszerek (vendégelőadás)

- Technológiai alapok, MEMS, NEMS, OEMS
- Szenzorhálózatok, IoT



1. Előadás: Bevezetés a szenzorteknikába

Szenzorok fogalma

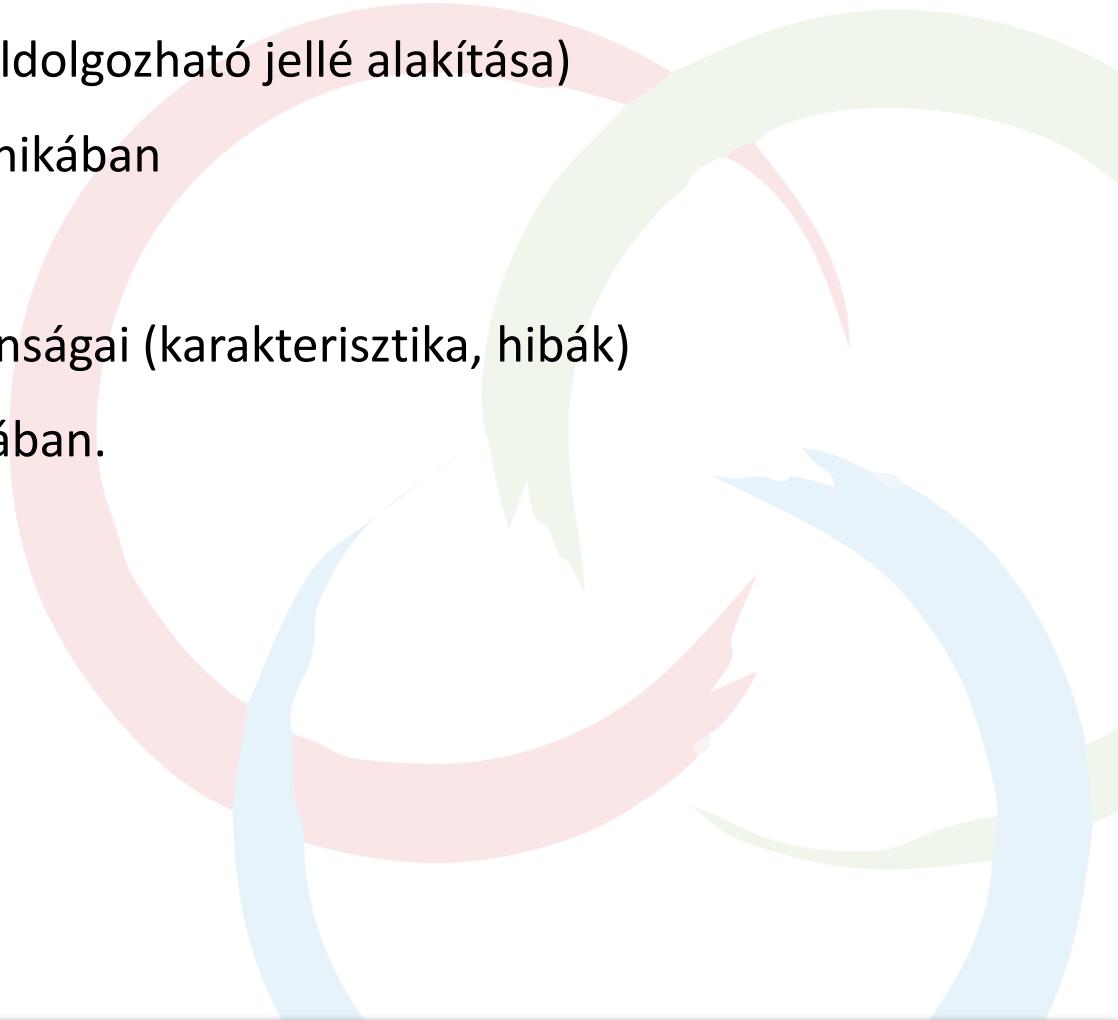
A mérőlánc (analóg mennyiségek feldolgozható jellé alakítása)

A szenzorok szerepe a irányítástechnikában

A szenzorok csoportosítása

A szenzorok méréstechnikai tulajdonságai (karakterisztika, hibák)

A szenzorok szerepe a mechatronikában.



A szenzor fogalma

Szenzor: érzékelőelem, mérőelem, jelátalakító

Valamilyen fizikai mérési elv felhasználásával a mérendő mennyiség változásával arányos kimenő jelet szolgáltatnak.

Alkalmazása: méréstechnika, irányítástechnika, fogyasztói elektronika, ...

Mérés: összehasonlítás az etalonnal.



Fogalmak, Definíciók

Jelátalakító (transducer)

- A mérőkör első tagja, többnyire komplex egység. A **mérendő** fizikai mennyiséget olyan reprodukálhatóan detektálható változássá (**mérhető/elérhető mennyiséggé**) formálja, amely egy alkalmasan választott szenzor segítségével villamos (esetleg optikai, pneumatikus, stb.) jellé alakítható át.

Érzékelő (sensor)

- A **mérhető/elérhető** fizikai mennyiséget alakítja át feldolgozható fizikai mennyiséggé (többnyire villamos jellé).
- Megegyezhet a jelátalakítóval, de gyakran csak egy kis részegysége.

Távadó

- Szabványos kimenetű (0...10V, -10...+10V, 0...5V, -5...+5V, 0...20mA, 4...20mA), érzékelő vagy annak kiegészítő elektronikája, amely lehetővé teszi a mérőjel továbbítását nagyobb távolságra (akár több km.)

Integrált érzékelő

- Integrált elektronika segítségével plusz jelfeldolgozási feladat, előerősítő, digitális kimenet (pl. MEMS).
- Több mennyiség egyidejű mérésére alkalmas (pl. gázérzékelő, IMU).

Intelligens szenzor

- Mikroprocesszorral integrált, digitális jelfeldolgozás, automatikus kompenzáció, méréshatár.
- Döntéshozatal, autonóm szabályozási kör, beavatkozó jel kiadása, információ továbbítása nagyobb rendszereknek.

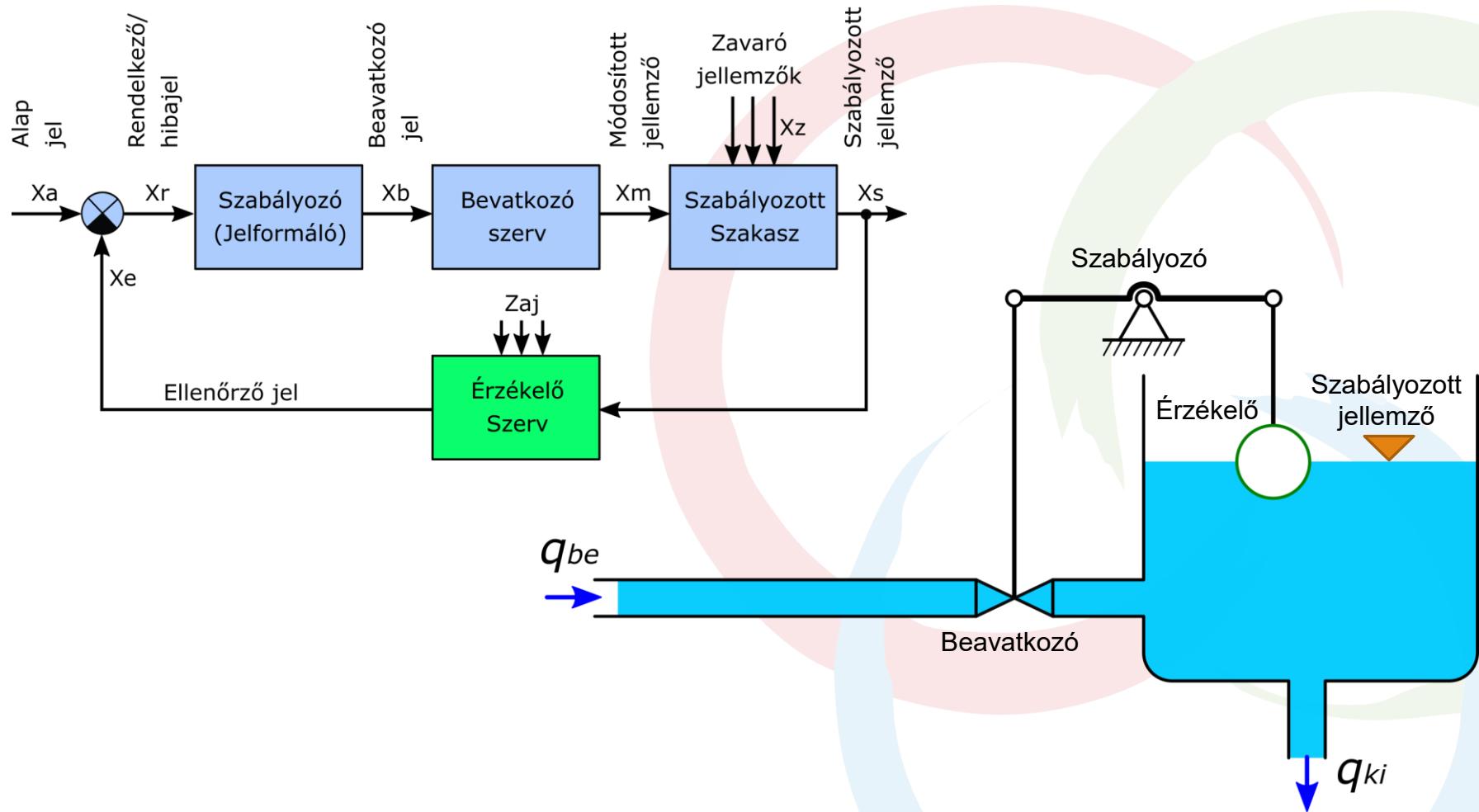


A szenzorok analógiája a minden nap életben (A folyamatszabályozás elve)

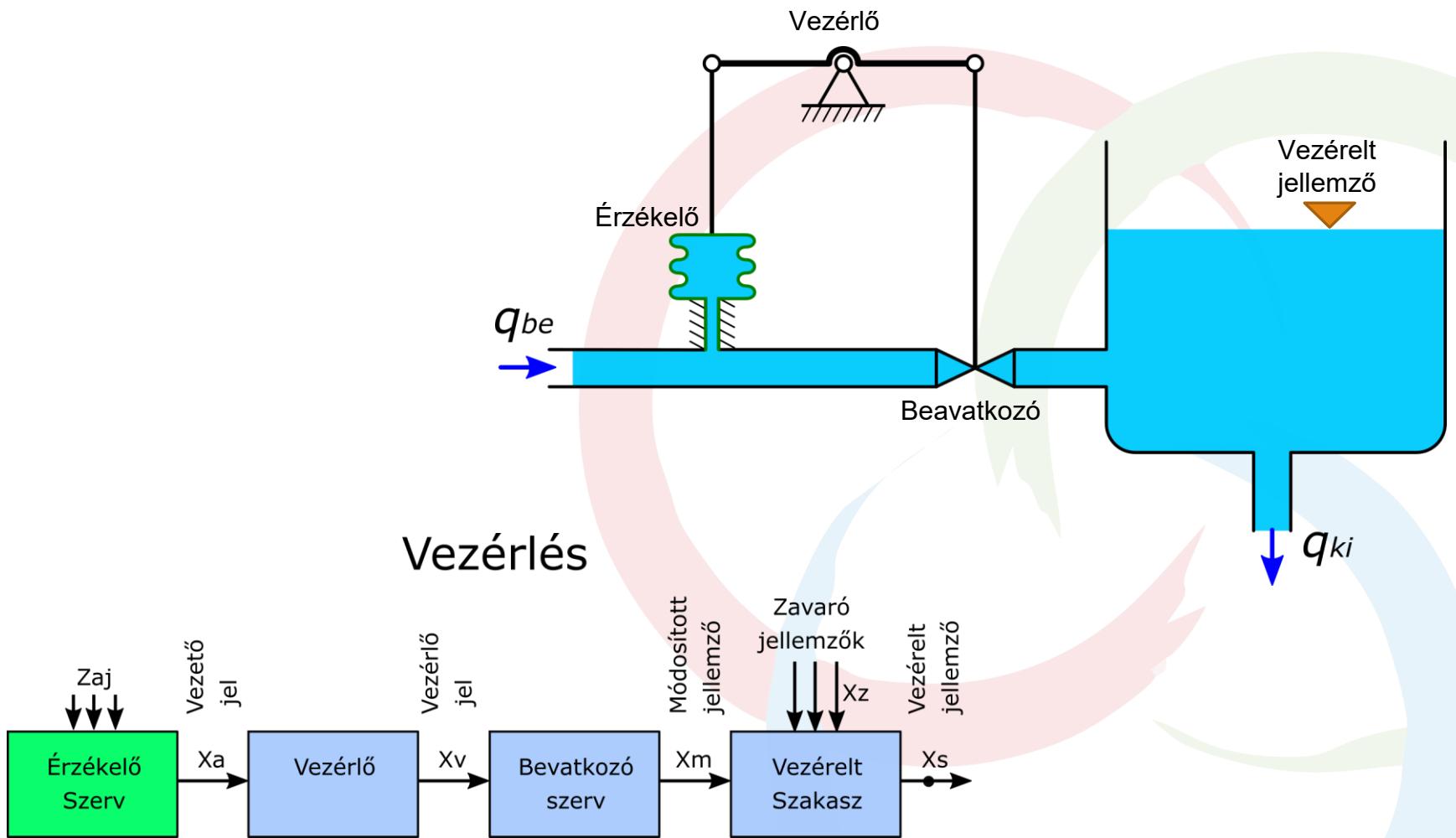


A szenzorok szerepe az irányítástechnikában (Szabályozás)

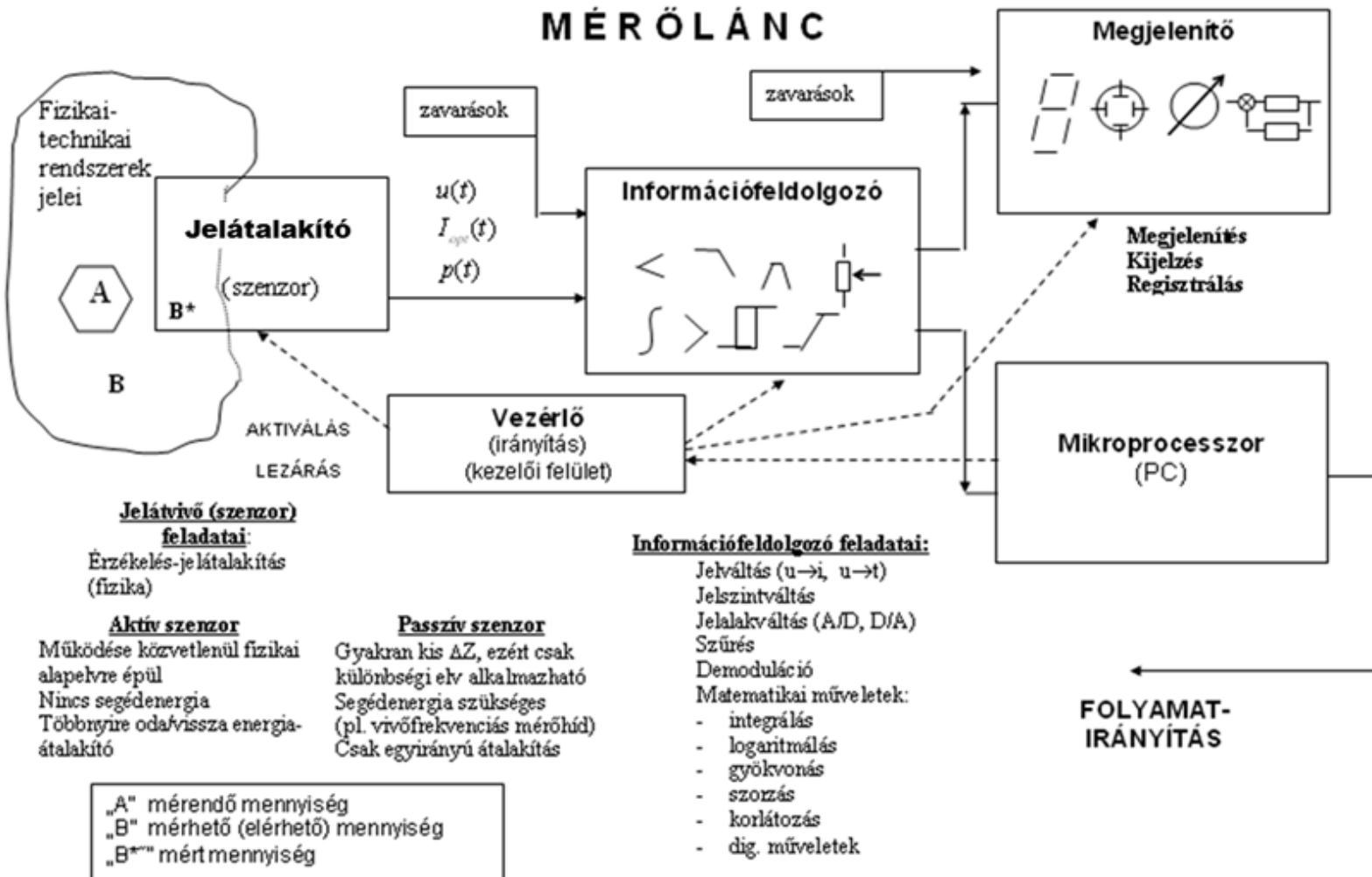
Szabályozás



A szenzorok szerepe az irányítástechnikában (Vezérlés)



A szenzor szerepe a mérőláncban



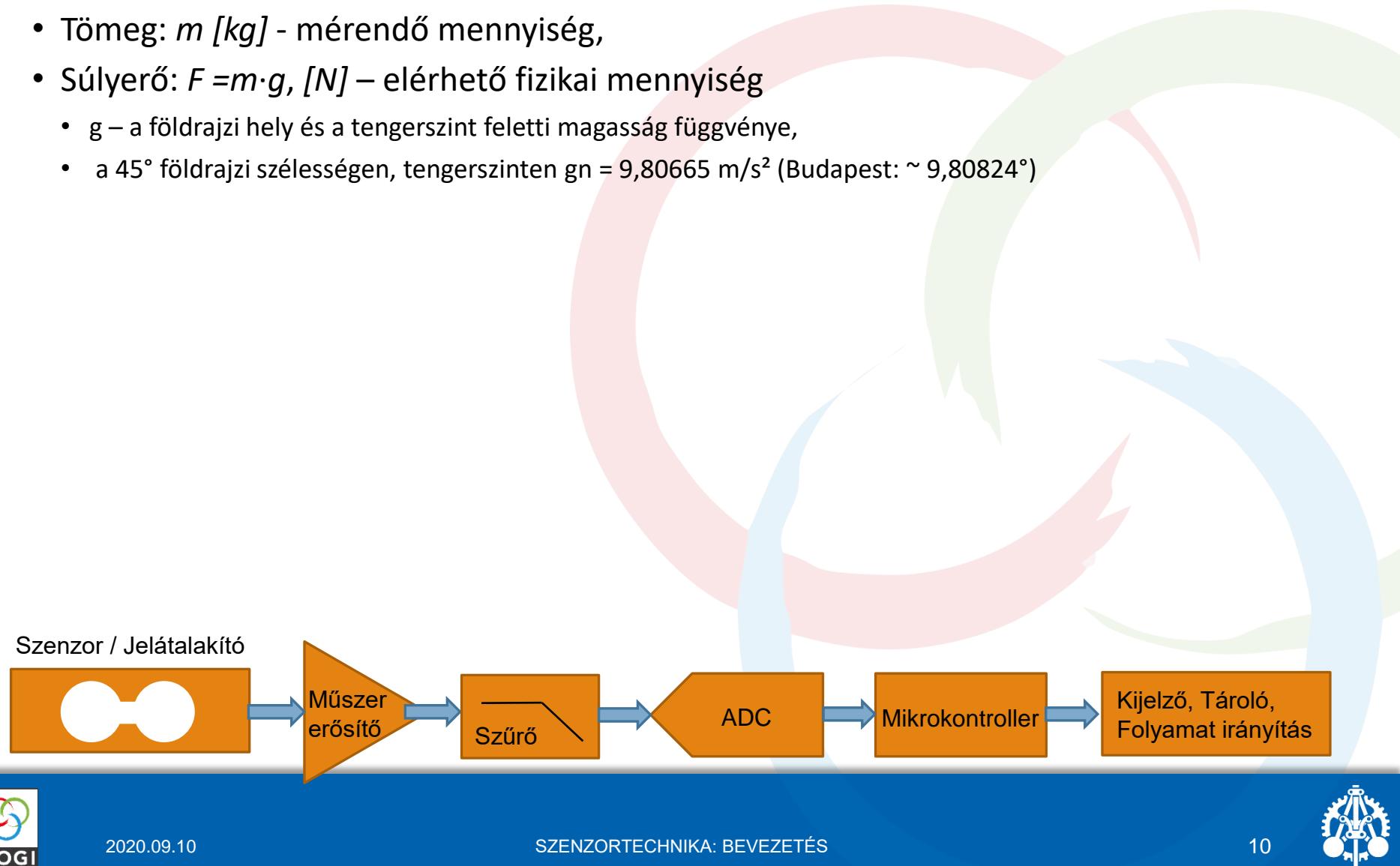
[Forrás: Dr. Huba Antal., Dr. Lipovszki, György: Méréselmélet]



Mérőlánc példa (tömeg mérése)

• Fizikai mennyiség

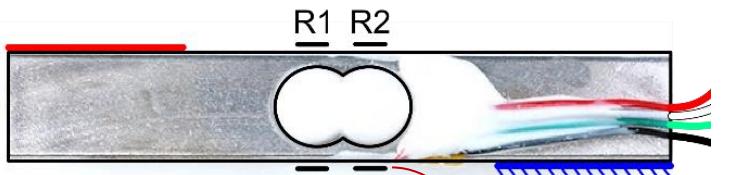
- Tömeg: $m \text{ [kg]}$ - mérendő mennyiség,
- Súlyerő: $F = m \cdot g, \text{ [N]}$ – elérhető fizikai mennyiség
 - g – a földrajzi hely és a tengerszint feletti magasság függvénye,
 - a 45° földrajzi szélességen, tengerszinten $gn = 9,80665 \text{ m/s}^2$ (Budapest: $\sim 9,80824^\circ$)



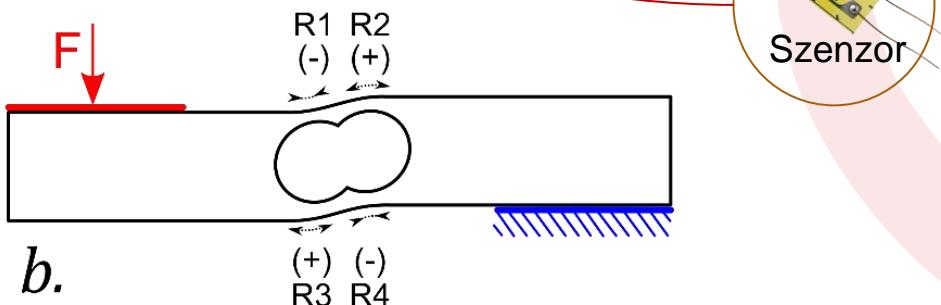
Mérőlánc Példa (alkalmas jelátalakító)

• Jelátalakító

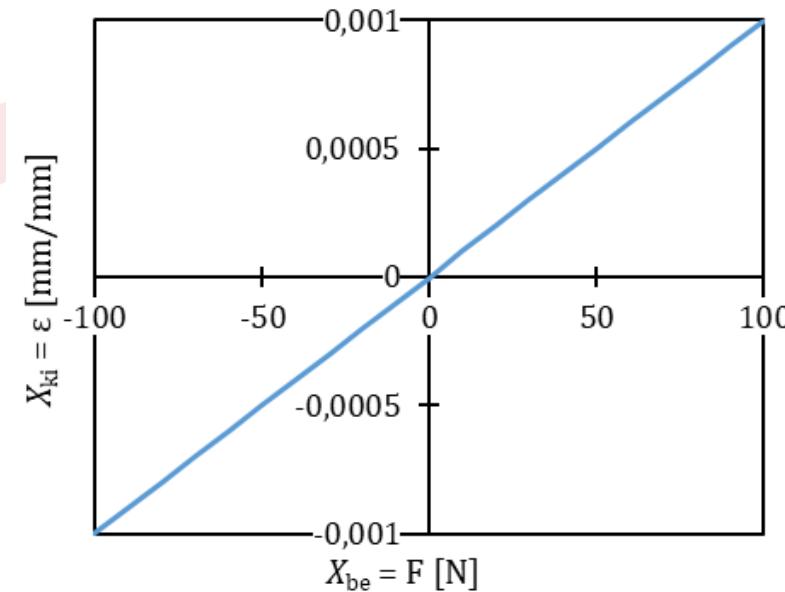
- mérőtest deformációja (fajlagos nyúlás):
 $\varepsilon(F)$ – köztes fizikai mennyiség.
- A mérőtest optimalizálása a megfelelő érzékenység létrehozásához: $F_{max} \rightarrow \varepsilon_{max}$



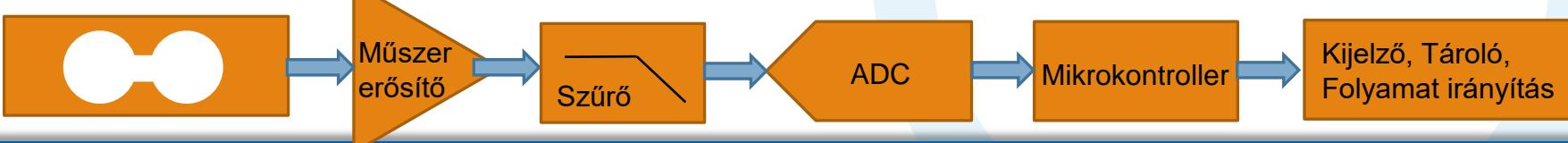
a.



b.



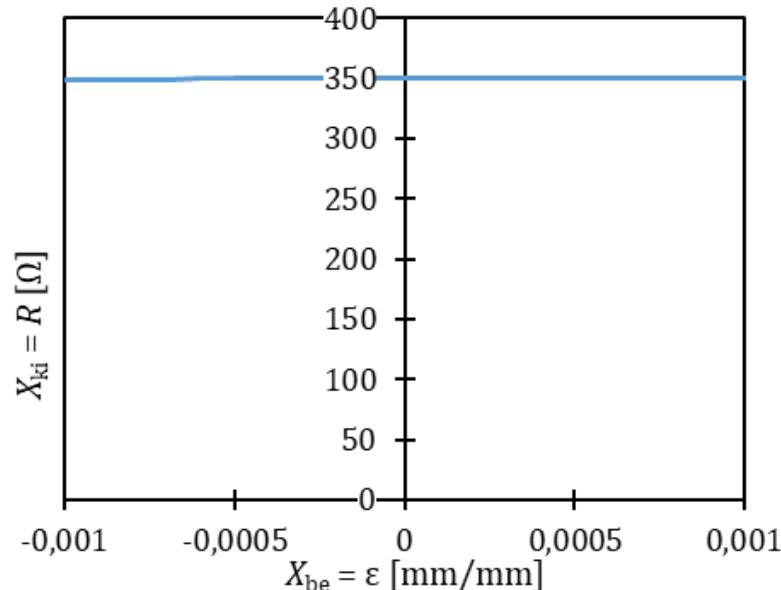
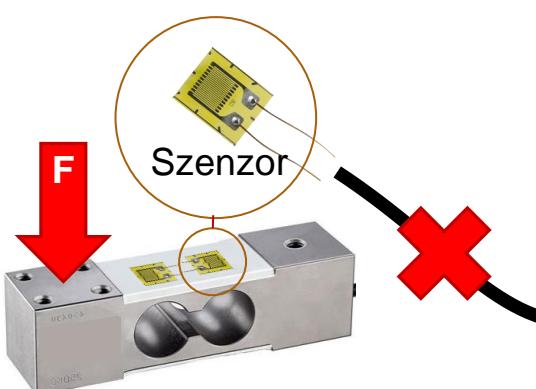
Szenzor / Jelátalakító



Mérőlánc Példa (mivel mérjük?)

• Jelátalakító

- mérőtest deformációja (fajlagos nyúlás): $\varepsilon(F)$ – köztes fizikai mennyiség,
- nyúlásmerő bélyeg (**Érzékelő**) ellenállás változása: $\Delta R/R = g \cdot \varepsilon$,

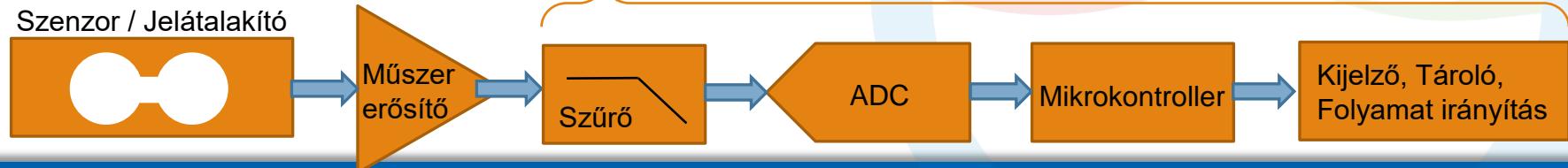


X_{ki} közvetlen mérése **nem lehetséges**:

- $\varepsilon_{max} = 0,001$, $R = 350 \Omega$, $g = 2$ (gauge factor / bélyegállandó)
- $dR = 0,7 \Omega$ (a maximális terhelésnél)
- Műszer felb. = 1Ω

3 ½ Digit (Kijelezhető legnagyobb érték: 1999)

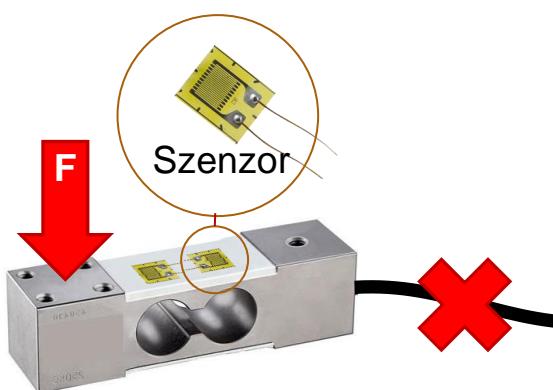
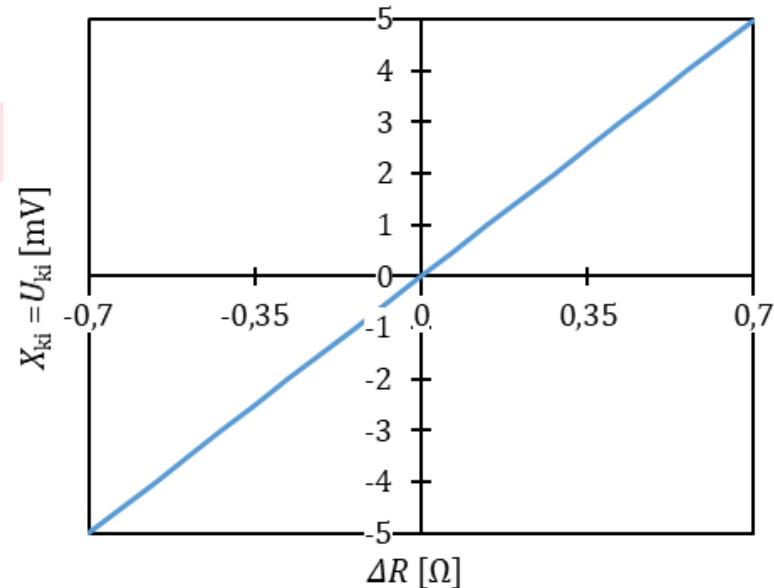
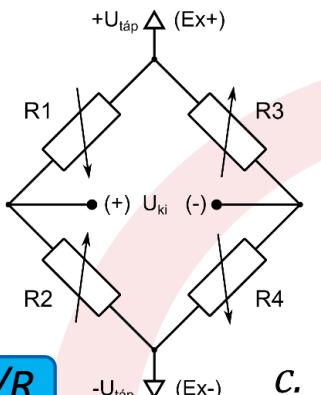
Az adott méréshatáron 1999 $\Omega \rightarrow$ felbontás: 1Ω



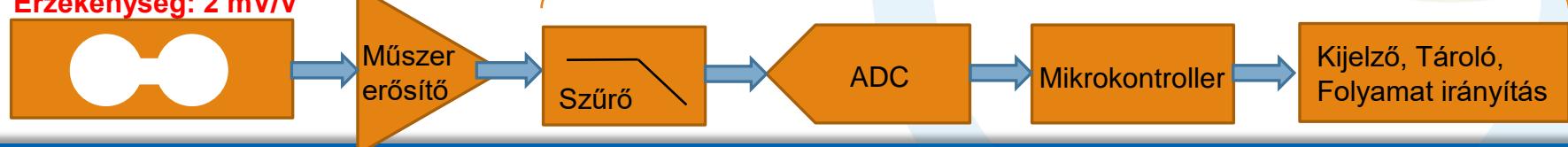
Mérőlánc Példa (Wheatstone híd alkalmazása)

• Jelátalakító

- mérőtest deformációja (fajlagos nyúlás): $\epsilon(F)$ – köztes fizikai mennyiség,
- nyúlásmérő bélyeg (**Érzékelő**) ellenállás változása: $\Delta R/R = g \cdot \epsilon$,
- Wheatstone-híd kimenő jele feszültség változás: $U_{ki}/U_{híd} = \Delta R/R$



Szenzor / Jelátalakító
Érzékenység: 2 mV/V



X_{ki} közvetlen mérése **nem ajánlott**:

- $\epsilon_{max} = 0,001$, $R = 350 \Omega$, $g = 2$, $U_{híd} = 2,5 \text{ V}$
- $U_{ki} = 5 \text{ mV}$ (a maximális terhelésnél)
- Műszer felb. = 0,1 mV

3 ½ Digit (Kijelezhető legnagyobb érték: 1999)

Legkisebb m.határ: 200 (199,9) mV → felbontás: 0,1 mV

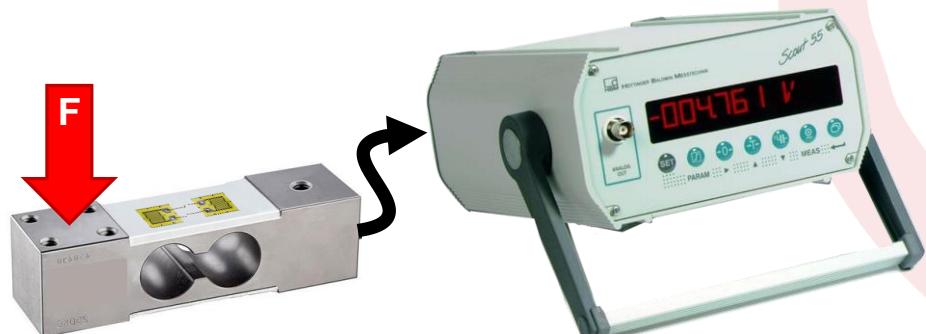


Mérőlánc Példa (Wheatstone híd alkalmazása)

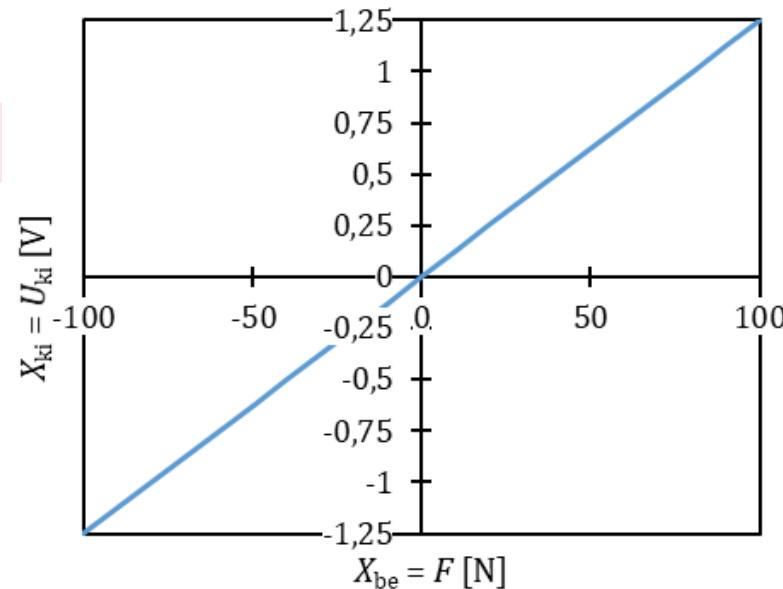
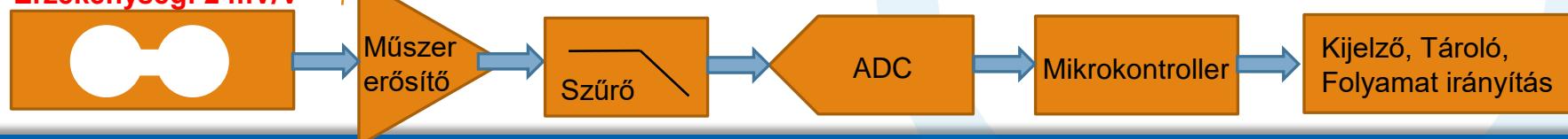
Információ feldolgozó

- Erősítő, (itt: $A = 250$)
- Szűrő,
- A/D átalakító,
- Matematika műveletek (összegzés, átlagolás, Stb.).

Digitális kijelző



Szenzor / Jelátalakító
Érzékenység: 2 mV/V



Vivőfrekvenciás mérőerősítő (mérőhíd)
Transducer type: Full bridge
Híd táp (Excitation): 2.5 V
bemenet (Input): 4 mV/V
Kimenet: RS232
Pontossági osztály: 0,1



Mérőlánc példa (tömeg mérése)



Fizikai mennyiség

- Tömeg: m [kg] - mérendő mennyiség,
- Súlyerő: F [N] = $m \cdot g$, – elérhető fizikai mennyiség,

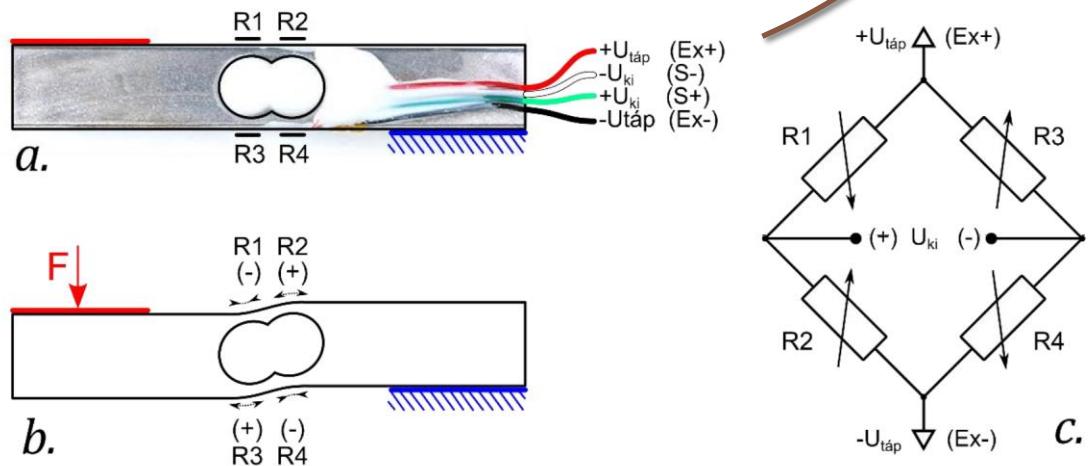
Jelátalakító

- mérőtest deformációja (fajlagos nyúlás): $\varepsilon(F$ [N]) – köztes fizikai mennyiség,
- nyúlásmérő bélyeg (Érzékelő) ellenállás változása: $dR/R = g \cdot \varepsilon$,
- Wheatstone-híd kimenő jele feszültség változás: $U_{ki} / U_{híd} = dR/R$

Információ feldolgozó

- Erősítő,
- Szűrő,
- A/D átalakító,
- Matematika műveletek, Stb.

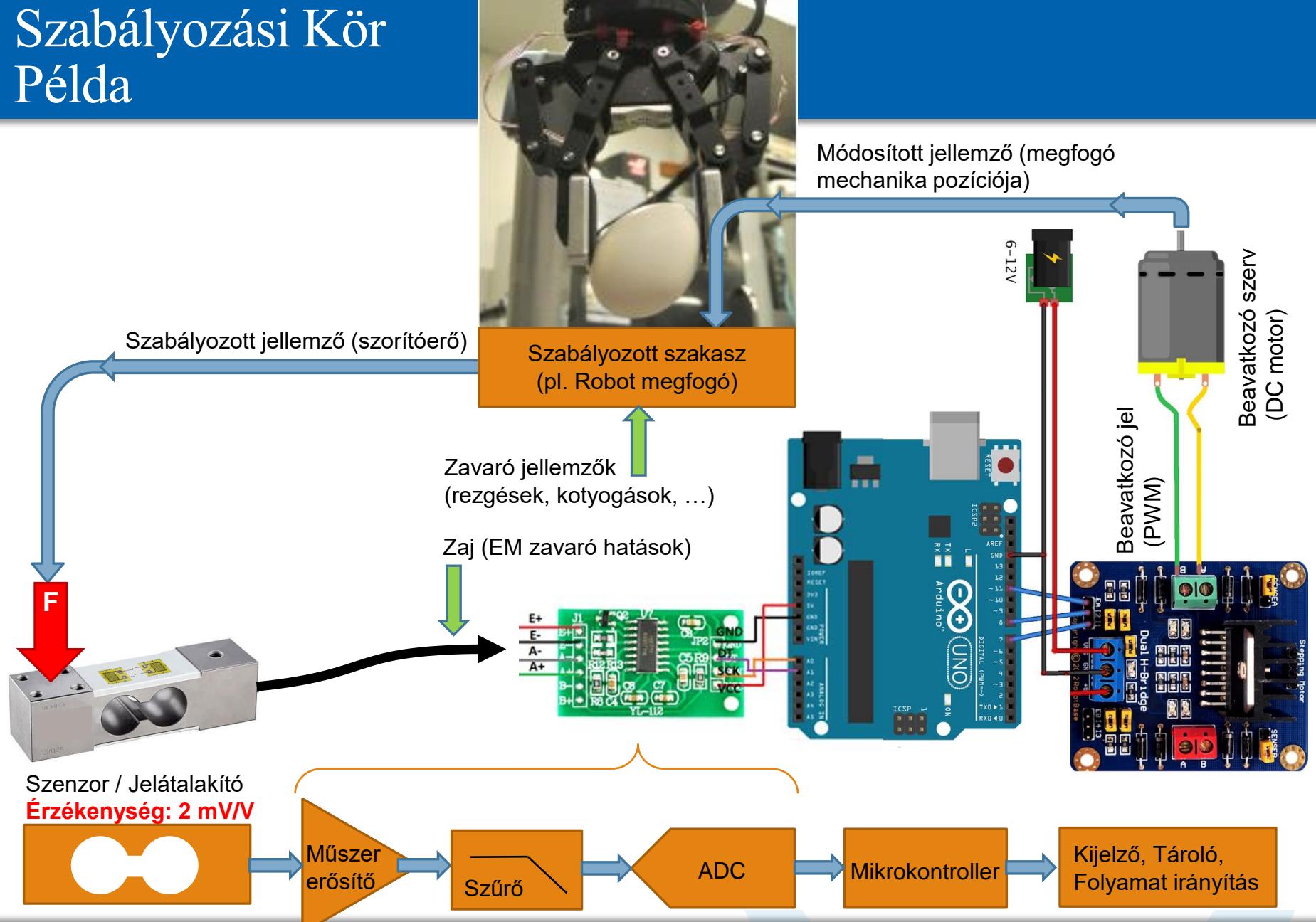
Digitális kijelző, tároló.



[Forrás: Dr. Huba Antal., Dr. Lipovszki, György: Méréselmélet; Lambert Miklós: Szenzorok.]

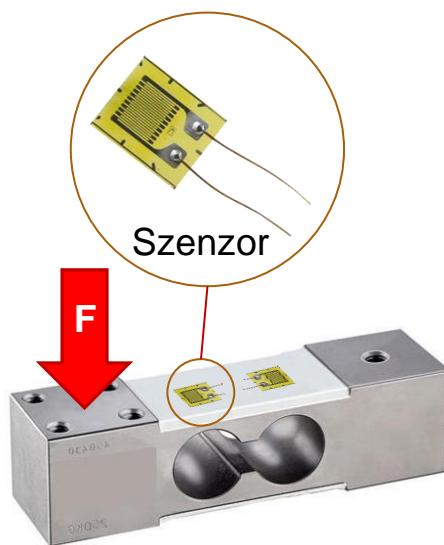


Szabályozási Kör Példa

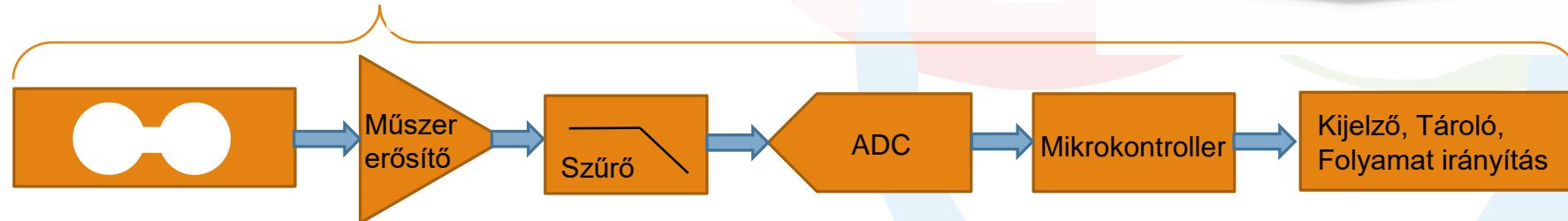


Mérőlánc Példa (Intelligens (Smart) Szenzorok)

- Belső jelfeldolgozás,
 - Erősítés, szűrés, AD konverzió,
 - Matematikai funkciók (pl. alakfelismerés),
 - Döntési funkciók (következtetés), szabályozás, beavatkozás,
- Kommunikáció (digitális kimenet)
 - Jelenleg: Profibus, I²C, CAN, M-bus, ...
 - Egyvezetékes (+föld) kommunikáció (parazita szenzor)
 - Fejlesztési irányok:
 - szabványosítás (**IEEE 1451**)
 - ZigBee kis fogyasztású vezeték nélküli komm.
- Azonosítás: RFID, TEDS, ...



Intelligens szenzor



	mérési (fizikai) elv	hossz. elmozd. szög	szint, távol- ság, vastag- ság	seb., szög- seb., ford. szám	gyor- sulás, szög- gyors.	erő	forgató nyoma- ték	nyo- más	terf. áram	hőmér- séklet	mágne- ses induk- ció	fény- erösség
A K T I V	elektrodinamikus			⊕				⊕	⊕			
	örvényáramú			⊕			+					
	piezoelektromosság				⊕	+		⊕				
	Seebeck (hőelem)									⊕		⊕
	piroelektromosság											⊕
	...											
P A S S Z Í V	nyúlásmbélyeg (kis ΔR)	⊕			⊕	⊕	⊕	⊕				
	induktív	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕			
	kapacitív	⊕	⊕		⊕	⊕		⊕				
	rezisztív (nagy ΔR)	⊕	⊕			+		+				
	magnetoelasztikus					⊕						
	rezgőhúr					⊕						
	Hall-efektus										⊕	
	pneum. (tolónyomás)	⊕		⊕		+		⊕				
	termorezisztív								⊕	⊕		
	optokapu, analóg	⊕	⊕	+	+	+	⊕	+				⊕
	optoel. inkrem.	⊕		⊕								
	optoel. absz.	⊕	⊕									
	interferometriás	⊕	⊕	⊕	+	*	*	*				
	moiré				*	*	*	*				
	radiometriás		⊕									
	ultrahangos	⊕	⊕	⊕					⊕			
	optikai szál	+	+	⊕	⊕	+		⊕				
	...											

Magyarázat: ⊕ Kereskedelemi forgalomban kapható jelátalakító

+ Intenzív fejlesztés alatt álló jelátalakító típus. A mérési elv a szakirodalomban jól feldolgozott

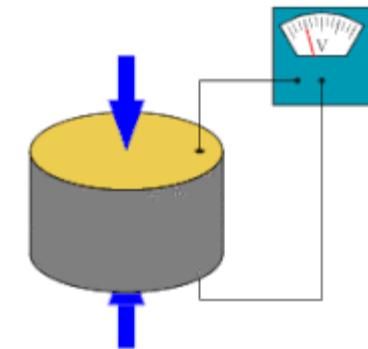
* A bemenő mennyiség villamos (optikai) jelé való átalakítása a megjelölt elv alapján lehetséges.



A szenzorok felosztása (Segédenergia szerint)

Aktív

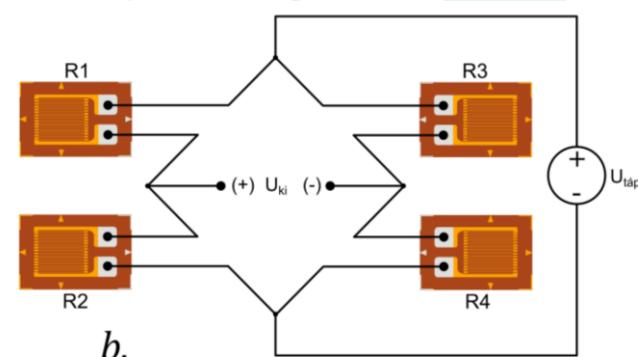
- segédenergiát nem igényel, maguk állítják elő a jelet a méréndő folyamat energiából,
- Energiaátalakítók, közvetlen fizikai elvre épül a működésük,
- Gyakran inverz működés is lehetséges,
- piezoelektromos, elektrdinamikus, seebeck, ...



Piezoelektromos szenzor,
[Animáció: [Wikipedia](#)]

Passzív

- segédenergiát (tápellátást) igényel,
- rezisztív (NyMB, FSR), induktív, kapacitív, ...
- Gyakori a Wheatstone-híd alkalmazása a kis jelváltozás miatt.



Rezisztív (NyMB) szenzor.

[Forrás: Bánlaki Pál, Lovas Antal, BME; Lambert Miklós: Szenzorok.]



A szenzorok felosztása (Mérendő fizikai mennyiség szerint)

Mechanikai

- Erő, nyomaték, nyomás, tömeg, áramlás, helyzet, sebesség, frekvencia, ...

Sugárzás

- Látható fény, Infravörös, UV, Gamma, Röntgen, rádió, mikrohullámú sugárzás, ...

Villamos

- Feszültség, áram, ellenállás, kapacitás, induktivitás, töltés, frekvencia, ...

Mágneses

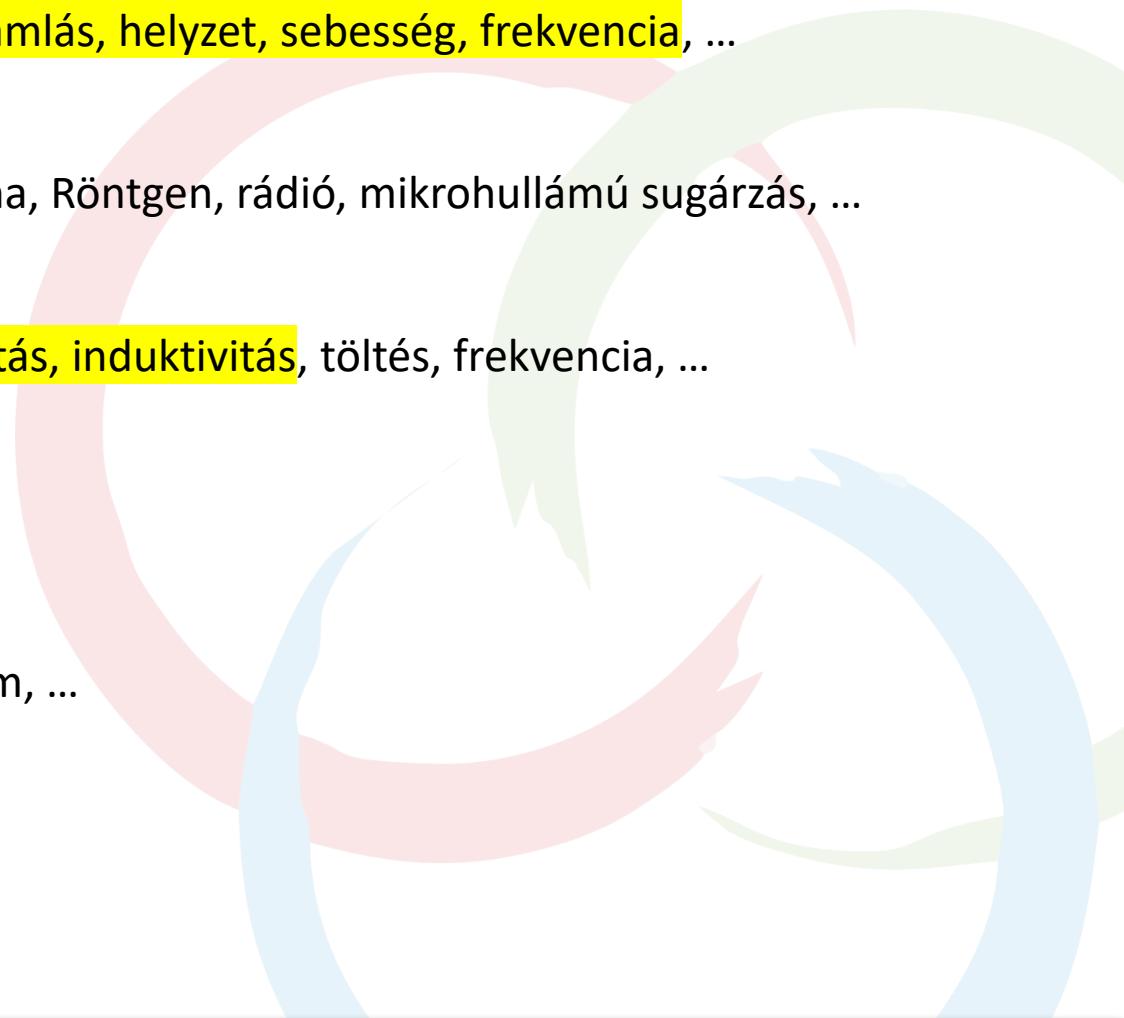
- Mágneses tér, indukció, fluxus, ...

Hő

- Hőmérséklet, hőmennyiség, hőáram, ...

Kémiai

- pH, nedvesség, koncentráció, ...



A szenzorok felosztása (Energia felhasználás és átalakítás szerint)

Energia szemlélet (Miller-indexes jelölés)

A bementi (Φ), kimeneti (E) és segéd (P) energiák lehetnek:

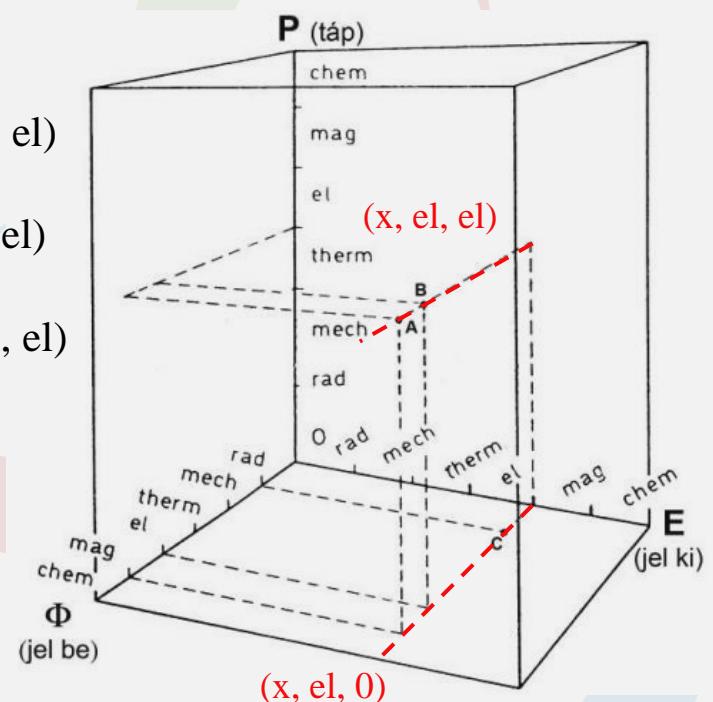
- Sugárzási (rad),
- Mechanikai (mech),
- Hő (therm),
- Villamos (el),
- Mágneses (mag),
- Kémiai (chem) energia.

Passzív szenzorok:

- A: Hall-érzékelő (mag, el, el)
- B: $\cos \varphi$ mérő (el, el, el)
- Potenciométer: (mech, el, el)
- Fotoellenállás (rad, el, el)
- Magnetorezisztor (mag, el, el)

Aktív szenzorok:

- Hőelem (therm, el, 0)
- pH-mérő (chem, el, 0)
- C: Fényelem (rad, el, 0)



[Forrás: Lambert Miklós: Szenzorok. Bánlaki Pál, Lovas Antal, BME;]



A szenzorok felosztása (A kimenő jel típusa szerint)

Analóg (a mért jellet arányos feszültség / áram a kimenő jel),

- Híd: 2 (1-3) mV/V (néhány méter)
- Feszültség kimenő jel: 0-10V, \pm 10V, 0-5V, \pm 5V, (max 30m)
- Áram kimenet: 0-20mA, 4-20mA (több 10 km)

Digitális (a kimenő jel kvantálva jelenik meg),

- Vezetékes: RS232C, RS422, RS488, Profibus, I2C, ASI, CAN, Interbus, M-bus, LIN, FlexRay-Bus, ByteFlight-bus, Neurális hálózati meghajtó IC-k ...
 - Soros, 1 vezetékes (parazita)
- Vezeték nélküli: IRDA, FIR,SIR, BT, WiFi, ZigBee, ...

Intelligens (a mért jel további átalakítása / kiegészítő információ hordozása)



A szenzorok felosztása (Méret / Technológia szerint)

Hagyományos (pl. nyúlásmérő bélyeges)

Mikroelektromechanikai (MEMS)

Nanotechnológiai

Eszköz	Rétegvastagság (µm)	Kritikus méret (µm)	Aspect ratio	Topográfia (µm)	Eszköz méret (mm)
IC	<1	0,15	2:1	«1	1
MEMS	2-6	1,00	>6:1	1-10	100

IC / MEMS technológiai követelmények összehasonlítása

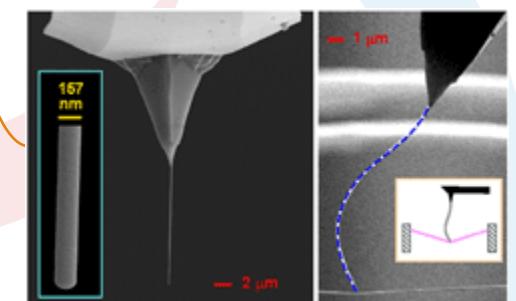
MEMS/NEMS és PV K+F művelhető a hazai technológiai bázison!



Nyúlásmérő bélyeges erőmérő



[MTA-MFA, PPKE-ITK:
3 tengelyes MEMS erőmérő]

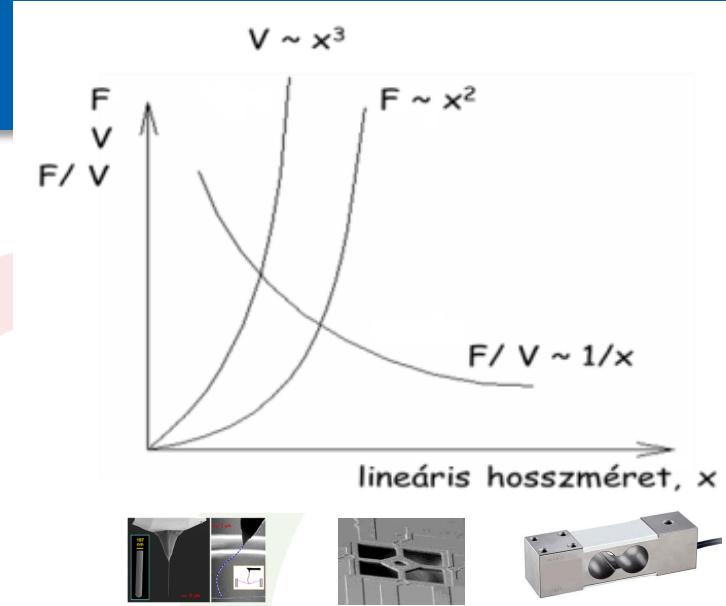


[Vladimir V. Dobrokhotov:
Nanoneedle grows into force sensor]

A szenzorok felosztása (Méret szerint)

Kis méretek hatása (lásd finommechanika)

- Lineáris méretek változása: $x = a \cdot x_0$
- Felület változása: $F = a^2 \cdot F_0$
- Térfogat (tömeg) változása: $V = a^3 \cdot V_0$

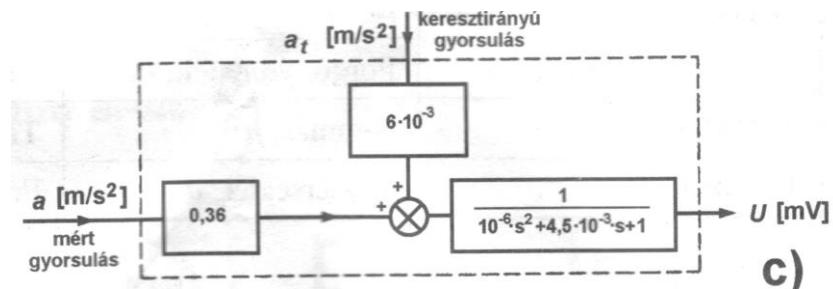
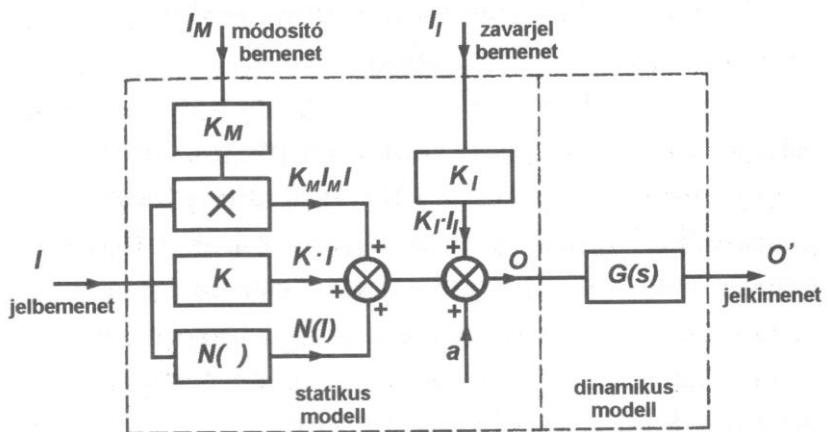


[Halmai, Samu: Mikromechanika]

- A méretek csökkentésével $a < 1$:
- Relatív lineáris *méret / térfogat* arány növekszik $x/V = x_0/(V_0 \cdot a^2)$, tömeg (súlyerő) hatása elhanyagolható → nem kell rá méretezni.
- Relatív *felület/térfogat* arány növekszik $F/V = F_0/(V_0 \cdot a)$ → jobb hűtés.
- Nagyobb sajátfrekvencia $\omega_{n0} = (k/m)^{1/2}$; $k \sim x$; $m \sim V$; $\omega_n \approx \omega_{n0}/a$ → gyorsabb működés nagyobb sávszélesség.
- Kisebb elektromos kapacitás $C = \epsilon \cdot A/d = \epsilon \cdot F/x$; $C \approx a \cdot C_0$ → gyorsabb működés nagyobb sávszélesség.
- Új fizikai hatások előtérbe kerülése → Kvantummechanikai, felületi, stb. hatások.

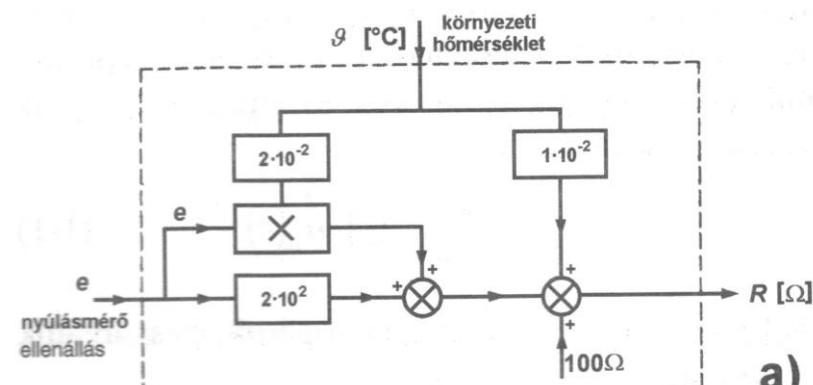


Példa a szenzorok statikus és dinamikus modelljére

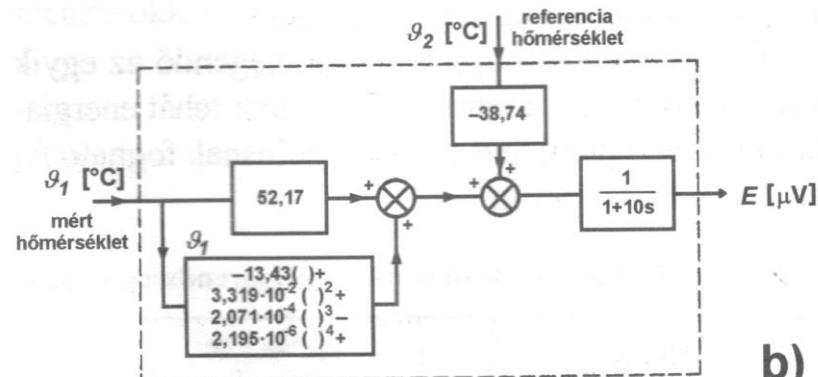


Gyorsulásmérő

$G(s)$ Dinamikus rész 3 példán bemutatva



Nyúlásmérő ellenállás



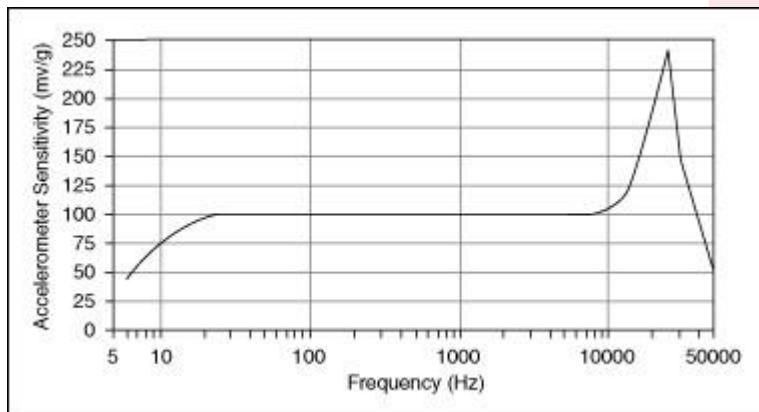
Réz-konstantán hőelem



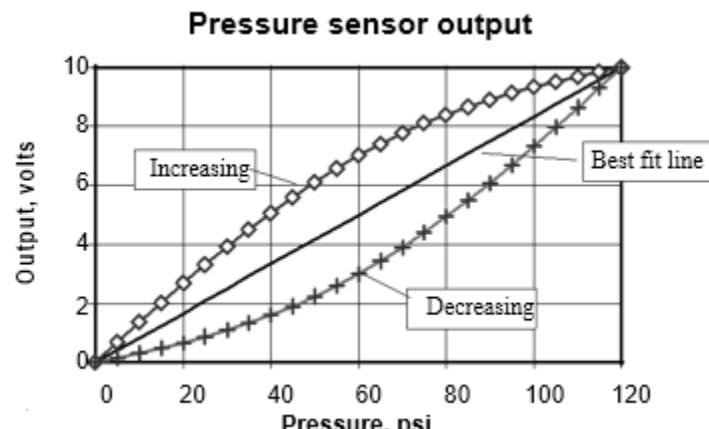
A szenzorok karakterisztikái

Időfüggése szerint

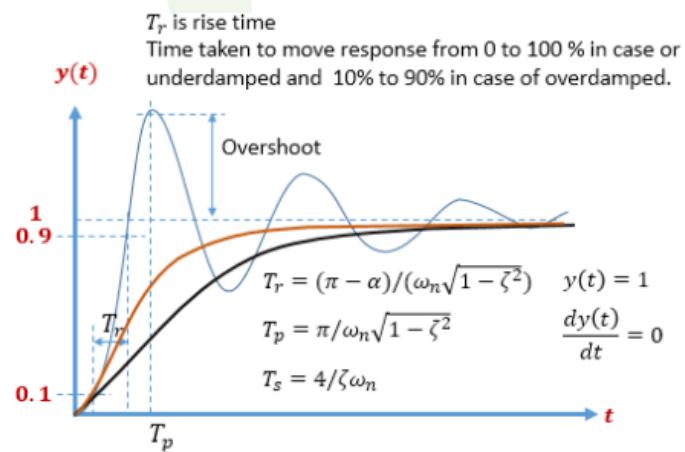
- Statikus karakterisztika
 - időben állandósult (B) be és (K) kimenő jelek közötti összefüggés.
 - Definiált környezeti feltételek (hőmérséklet, páratartalom, nyomás) kell felvenni, (kalibrálás).
- Dinamikus karakterisztika
 - Frekvenciatartománybeli viselkedés.
 - Transziens jelenségek figyelembevétele.



Piezoelektronos gyorsulásérzékelő frekvencia tartománybeli viselkedése
[Forrás: ni.com]



Egy nyomásszenzor statikus karakterisztikája.
[Forrás: <https://vijayonline.in>]



Egy lengő tulajdonságokkal rendelkező szenzor viselkedése időtartományban.
[Forrás: <https://vijayonline.in>]

[Forrás: Huba Antal., Dr. Lipovszki, György: Méréselmélet; Lambert Miklós: Szenzorok.]



A szenzorok karakterisztikái a megadási módja szerint

Analitikus (érzékenységi együttható, egyszerűbb függvény)

Táblázatos (határértékek megadásánál, interpoláció)

Grafikus (bonyolultabb, nemlineáris karakterisztikák esetén)

Példák a szenzorkarakterisztika megadására

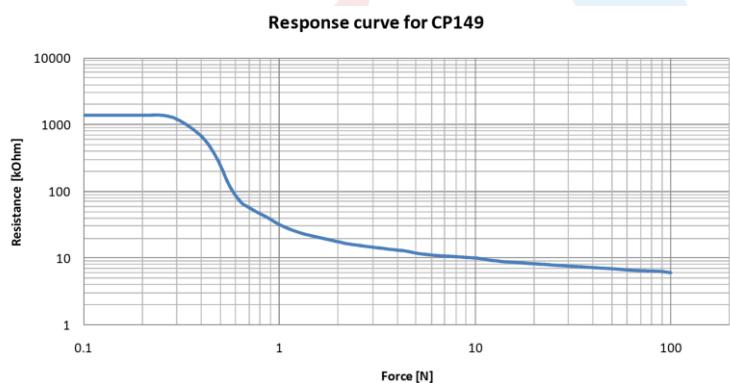
PT1000

$$R_T = R_0 (1 + 3,90802 \cdot 10^{-3} \cdot T + 5,802 \cdot 10^{-7} \cdot T^2)$$

NTC

T(°C)	Rmin(kΩ)	Rcent(kΩ)	Rmax(kΩ)	DR(%)	DT(°C)
-40	292.3	305.6	319.4	4.51%	0.67
-39	275.8	288.2	301.0	4.45%	0.67
-38	260.26	271.7	283.7	4.39%	0.66
-37	245.57	256.22	267.32	4.33%	0.66
-36	231.70	241.61	251.93	4.27%	0.65
-35	218.63	227.85	237.43	4.21%	0.65
-34	206.30	214.88	223.79	4.15%	0.64

FSR



[Forrás: Huba Antal., Dr. Lipovszki, György: Méréselmélet; Lambert Miklós: Szenzorok.]



A szenzor karakterisztika felvétele (Kalibráció)

Nyomaték mérő cella kalibráló pad

Kalibrálás a szenzor statikus karakterisztikájának felvétele.

Definiált környezeti feltételek mellett

- hőmérséklet,
- páratartalom,
- nyomás,
- ...

Etalonnal reprodukált méréndő érték

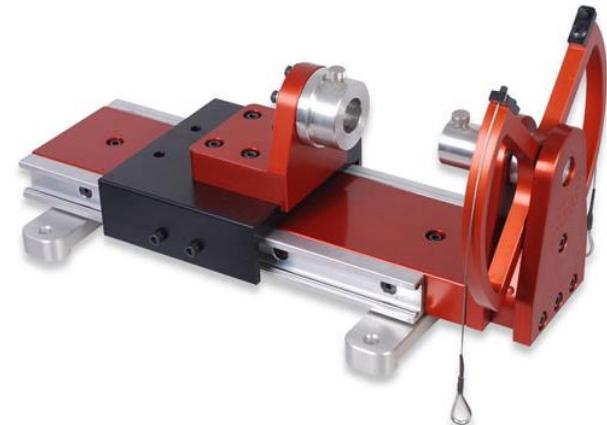
- Súlyszorozat,
- Hitelesített mestercella, ...

Regresszió

- Legkisebb négyzetek módszere,
- Wald módszer, ...

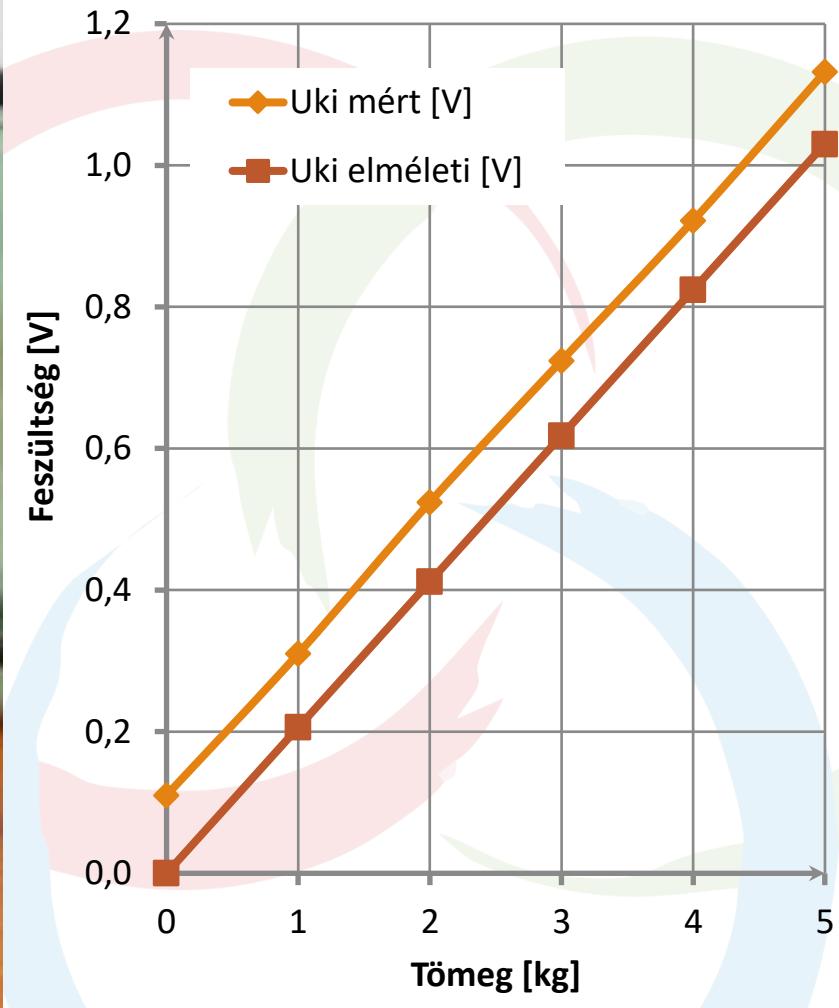
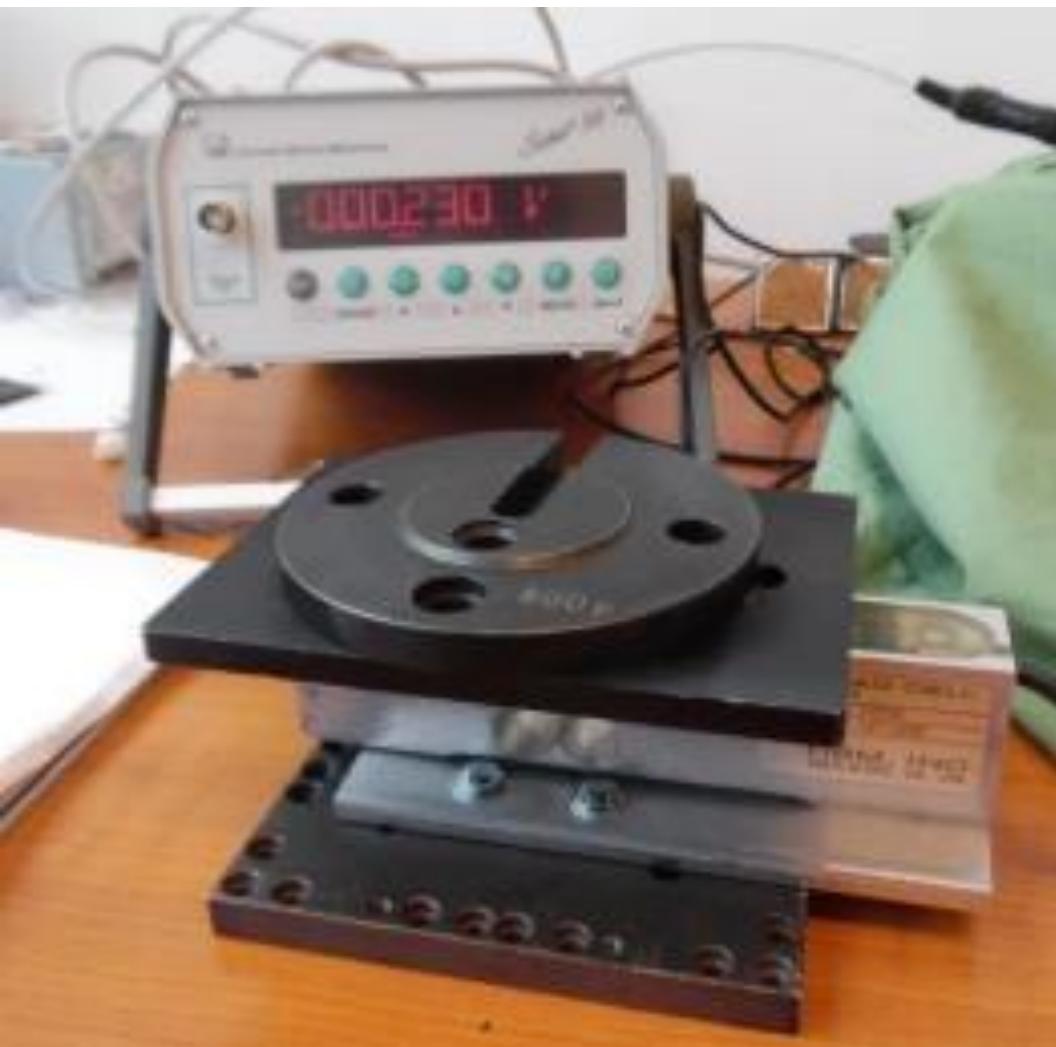


[Forrás: <https://www.closuretesting.com/>]



[Forrás: <https://www.checkline.com/>]

A szenzorok karakterisztikái (Erőmérő cella kalibrálása)



[Forrás: Bodai Kristóf István: Oktatási célú erőmérő állomás tervezése, Szakdolgozat, 2015.]



Hőmérséklet Szenzorok Kalibrálása

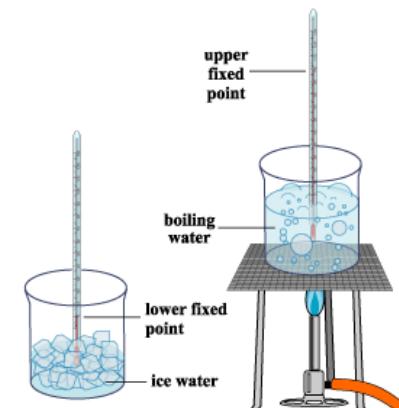
R – T összefüggés felvétele,

Nemzetközi Hőmérsékleti Skála (International Temperature Scale of 1990 - ITS-90)

- Kiadta: [International Committee for Weights and Measures](#) (CIPM) / Consultative Committee for Thermometry (CCT)
- Célja a nemzetközileg összehasonlítható termodinamikai abszolút hőmérsékleti skála megvalósítása.
- 14 fix pont: 0.65 K ... 1 357.77K (-272.50°C ... 1 084.62°C)
- A teljes tartományt átfedéssel lefedő sztandard hőmérők:
 - hélium gőznyomás hőmérők (0,65 – 5,0 K),
 - hélium gáz hőmérők (3,0 – 24.5561 K),
 - Standard platina ellenállás-hőmérő (SPRTs, PRTs, Platinum RTDs) (13.8033 – 1234.93 K),
 - monokromatikus sugárzás hőmérők (pirométer) (1234.93 – ∞ K),

Szokásos eljárások:

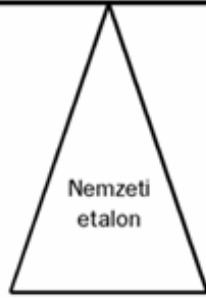
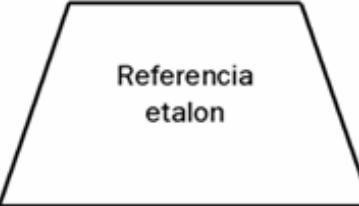
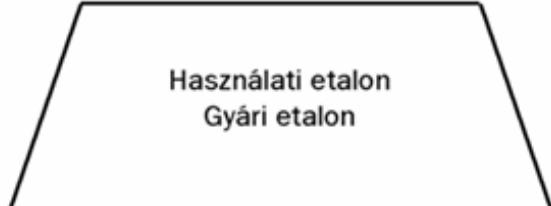
- Fix pont (abszolút) kalibráció (Fixed point calibration),
- Összehasonlító (Comparison calibrations).



[Forrás: https://en.wikipedia.org/wiki/International_Temperature_Scale_of_1990]



A szenzorok karakterisztikái (Kalibráció)

Etalon (mérőeszköz)	Felelős	Feladat	A kalibrálás vagy mérés alapja	A kalibrálás vagy mérés dokumentálása
 Nemzeti etalon	Nemzeti metrológiai intézet	A nemzeti etalonok fenn-tartása és leszármaztatása	Az SI egységek bemutatásának és a nemzetközi összehasonlíttásnak törvényes kötelezettsége	Kalibrálási bizonyítvány a referencia etalon számára
 Referencia etalon	Akkreditált kalibráló laboratórium	Az ország metrológiai infrastruktúrájának meg-övása	Kalibrálási bizonyítvány a nemzeti metrológiai intézettől vagy más akkreditált laboratóriumtól	Kalibrálási bizonyítvány a használati etalon vagy gyári etalon számára
 Használati etalon Gyári etalon	Házon belüli kalibrálási osztály	A vizsgáló eszközök fel-ügyelete saját célra	Kalibrálási bizonyítvány a nemzeti metrológiai intézettől vagy más akkreditált laboratóriumtól	Gyári kalibrálási bizonyítvány, kalibrálási bélyeg vagy más hasonló a vizsgáló eszköz számára
 Mérőeszköz	A cég minden osztálya	Mérések és vizsgálatok, mint a minőségügyi rendszer intézkedései	Gyári kalibrálási bizonyítvány, kalibrálási bélyeg vagy hasonló	Vizsgálati bélyeg vagy hasonló

Az ideális szenzor

Ideális statikus karakterisztika

- Lineáris,
- Érzékenysége nagy és állandó a teljes mérési tartományon,
- Ofszethiba $\rightarrow 0$ (karakterisztika átmegy a nullán),
- Reprodukálható, zajmentes,
- Feloldás $\rightarrow 0$,
- Alsó méréshatár $\rightarrow 0$,
- Felső méréshatár: kalibrált maximum.

Dinamikus karakterisztika

- Végtelen nagy sávszélesség,
- Felfutási idő $\rightarrow 0$.

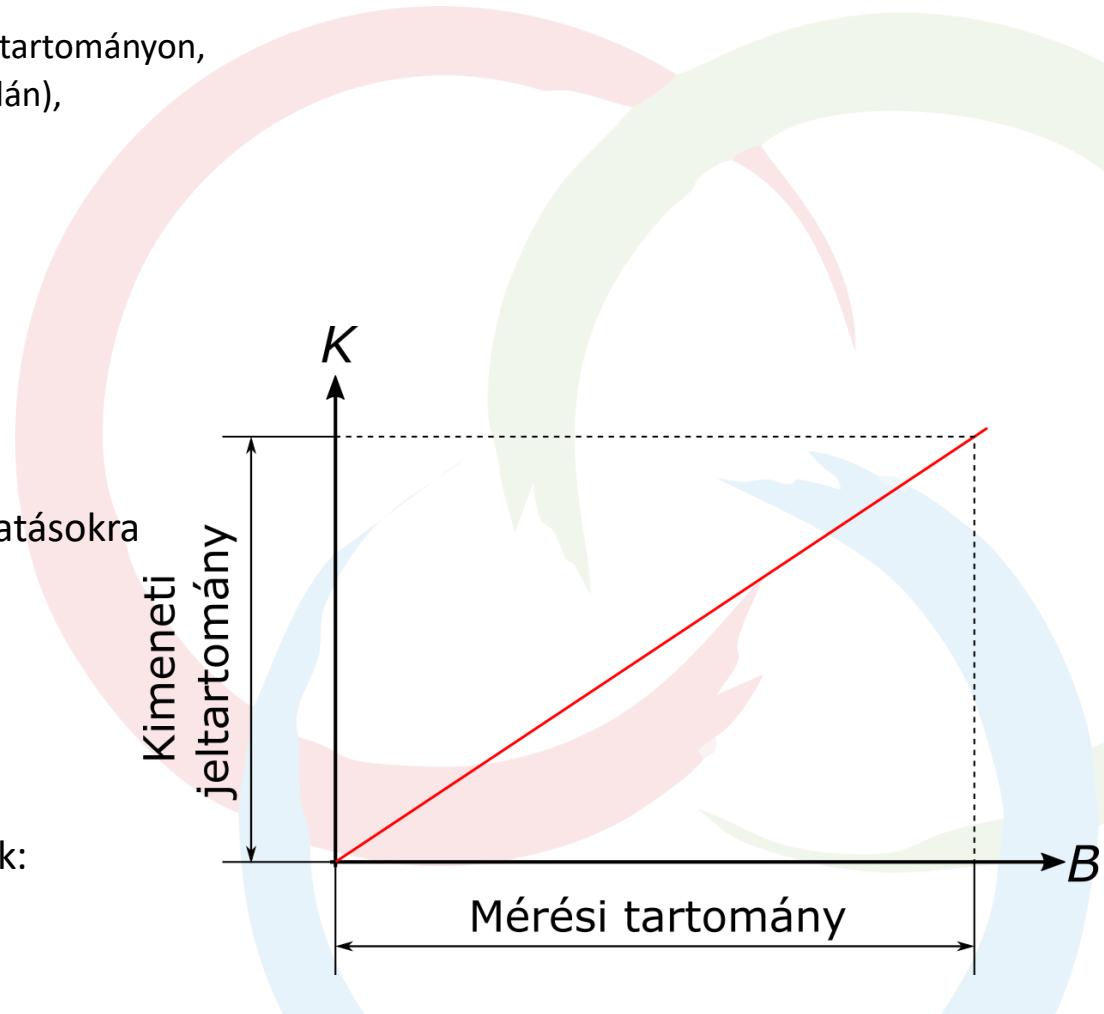
Mérés Hőmérsékletre és egyéb környezeti hatásokra érzéketlen,

Hosszú távú stabilitás (öregedésálló),

Megbízható.

A valós szenzor mérési hibái visszavezethetők:

- A szenzor ideálisztól eltérő tulajdonságaira,
- A mérés során előforduló zavaró hatásokra.



A szenzorok karakterisztikája (Statikus)

$0-B_{\min}$: Érzéketlenségi sáv

- A zaj elnyomja a jelet.
- B_{\min} : zajhatár/ megszólalási küszöb.

$B_{\min}-B_{\max}$: Mérési tartomány

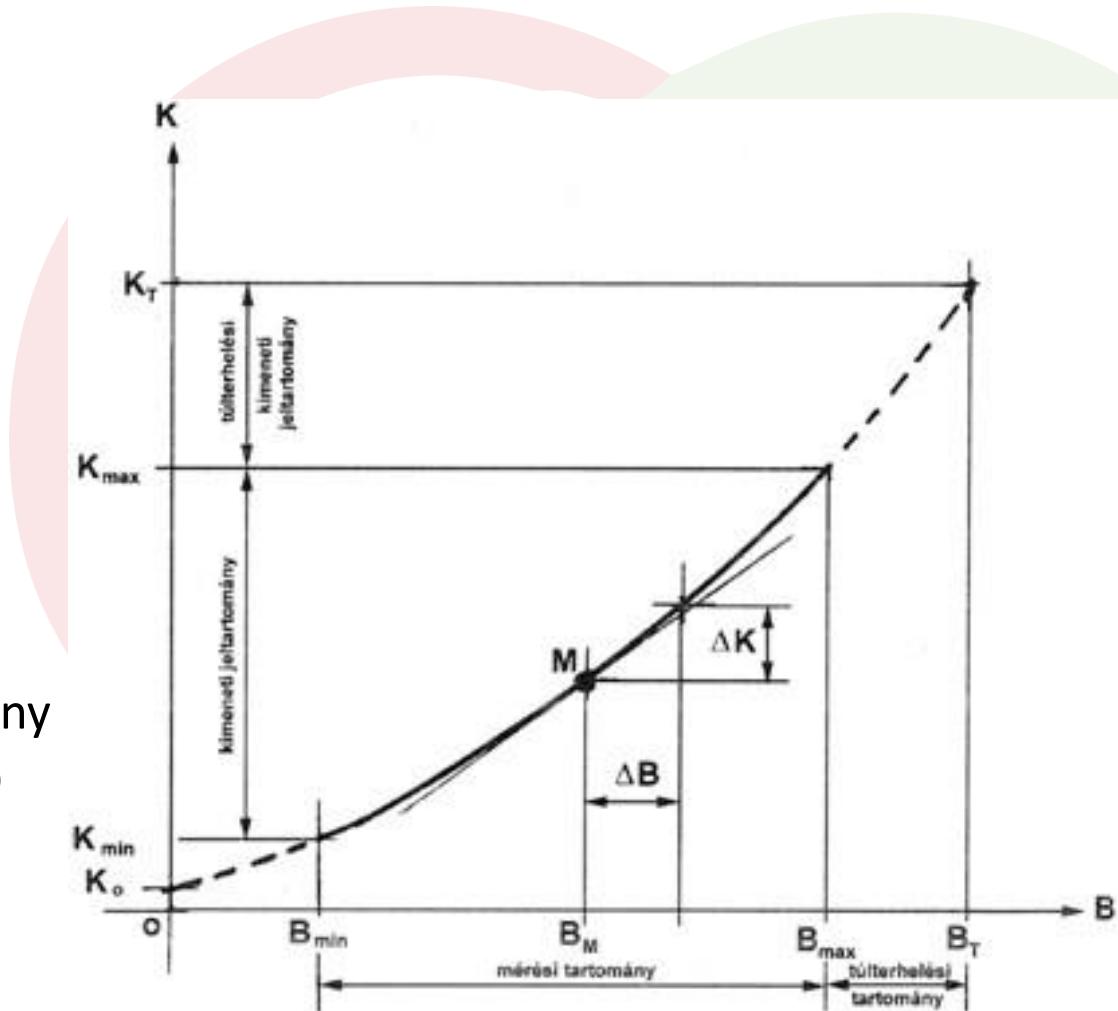
- a mérőműszer hibája a megadott határok között marad.

$B_{\max}-B_T$: Túlterhelési tartomány

- Nem működik üzemeltetésben,
- de nem megy tönkre.
- B_T : Túlterhelési határ

$20\lg(B_{\max}/B_{\min})$: Dinamikus tartomány

- A mérhető legkisebb és legnagyobb érték aránya dB-ben megadva.



[Forrás: Lambert Miklós: Szenzorok. Bp. 2009.]



A szenzorok karakterisztikái (Statikus)

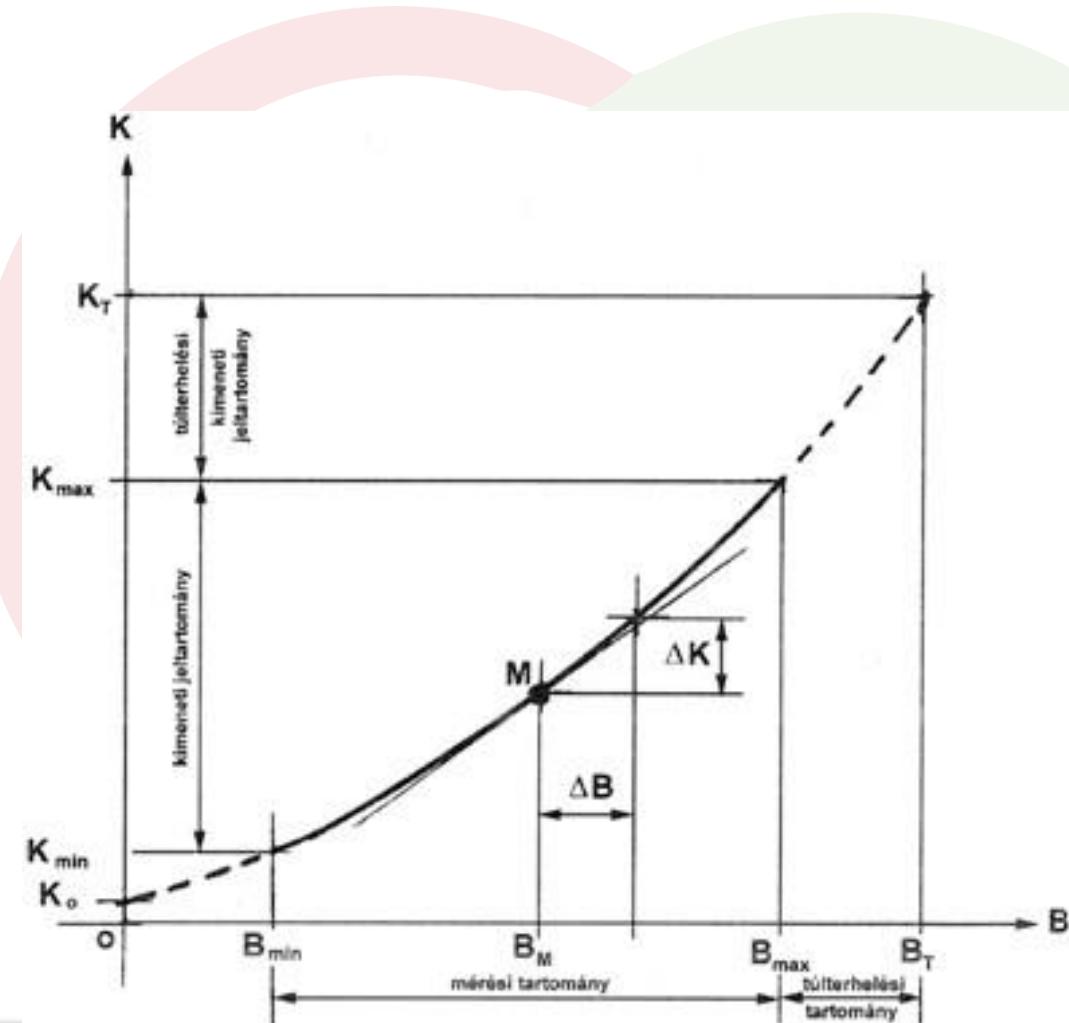
Érzékenység (Statikus átviteli tényező)

– a karakterisztika meredeksége (a mérési tartományon).

$$E = \frac{\partial K}{\partial B} \approx \frac{\Delta K}{\Delta B}$$

Műszerállandó – a mérődő fizikai mennyiség és a kijelzett érték hányadosa.

Ofszet – 0 bemenet mellett mérhető kimenő jel (K_0).



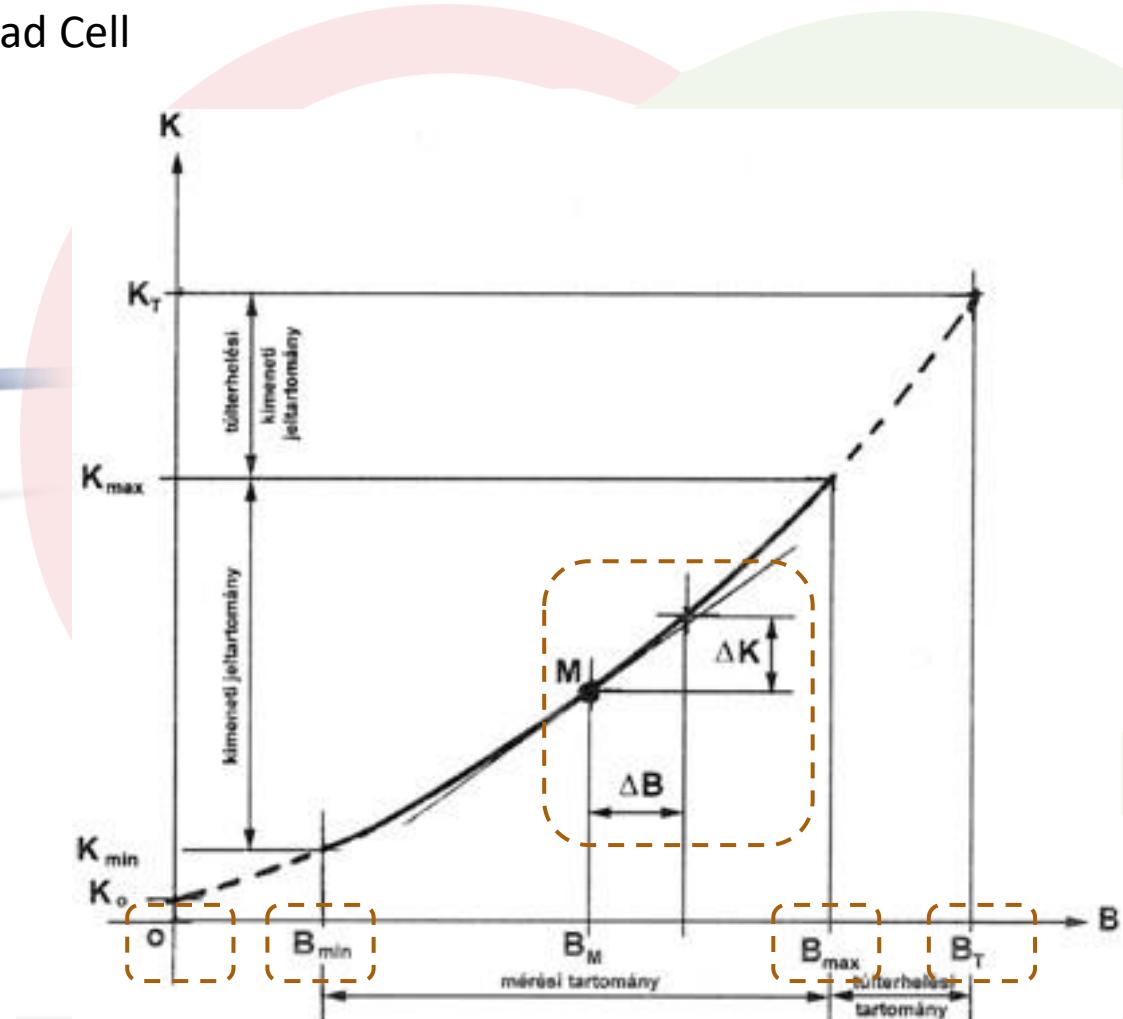
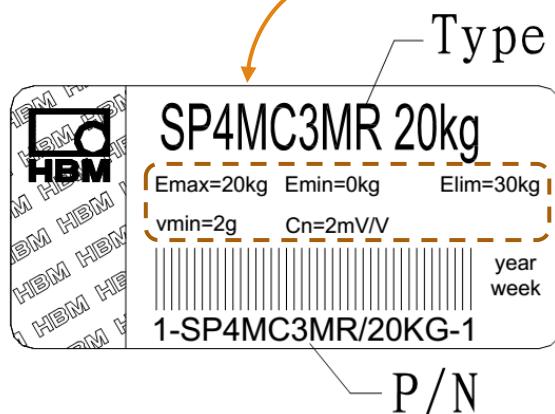
[Forrás: Lambert Miklós: Szenzorok. Bp. 2009.]



A szenzorok karakterisztikái (Statikus)

Példa: HBM SP4M

- Maximum Accuracy Single Point Load Cell



[Forrás: Lambert Miklós: Szenzorok. Bp. 2009., HBM adatlap]

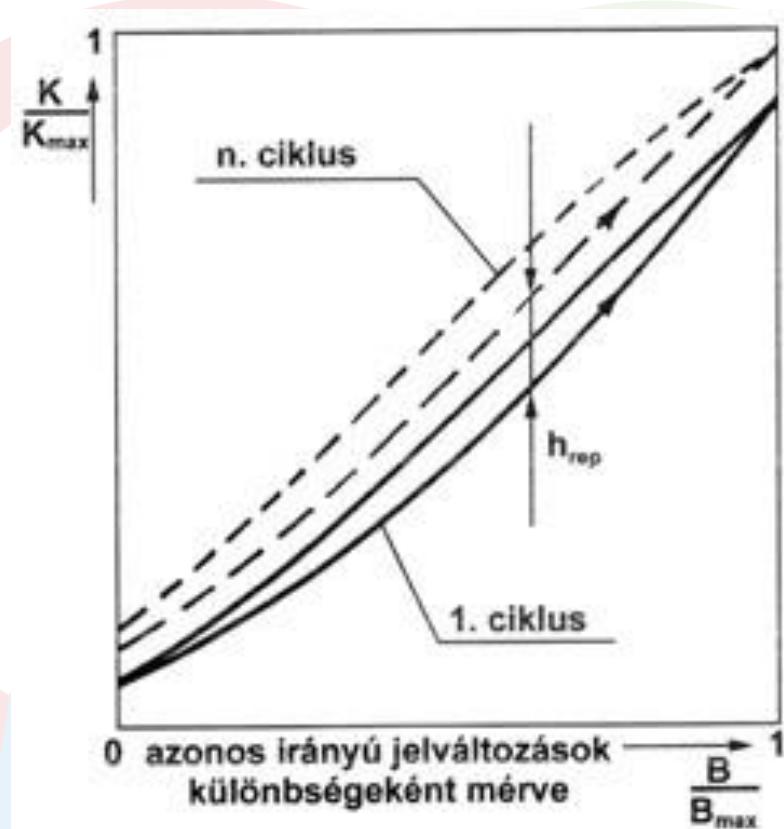


Statikus karakterisztika hibák (Ismétlőképesség (Repeability/Precision))

Azonos bemenő jel többszöri mérésekor

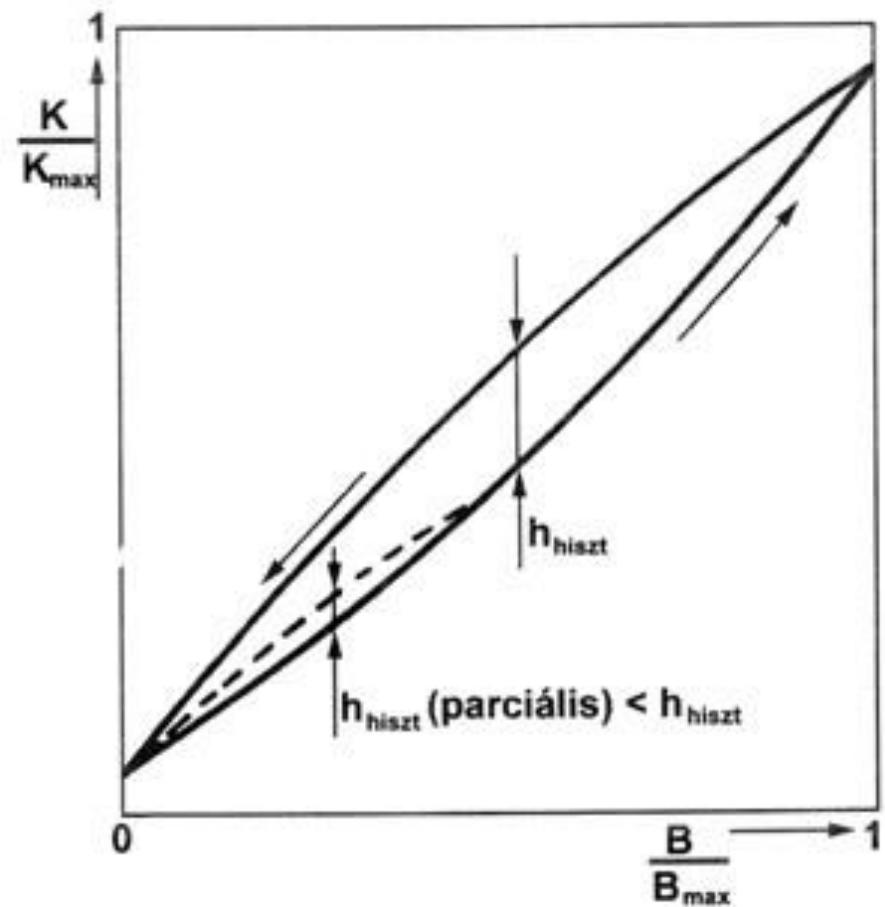
- azonos irányú megközelítéssel,
- Azonos mérési eljárással,
- Azonos körülmények között.

a kimeneten adódó eltérés.



Statikus karakterisztika hibák (Hiszterézishiba)

Bemenő jel növekvő és csökkenő megközelítéssel eltérő.



[Forrás: Lambert Miklós: Szenzorok. Bp. 2009.]



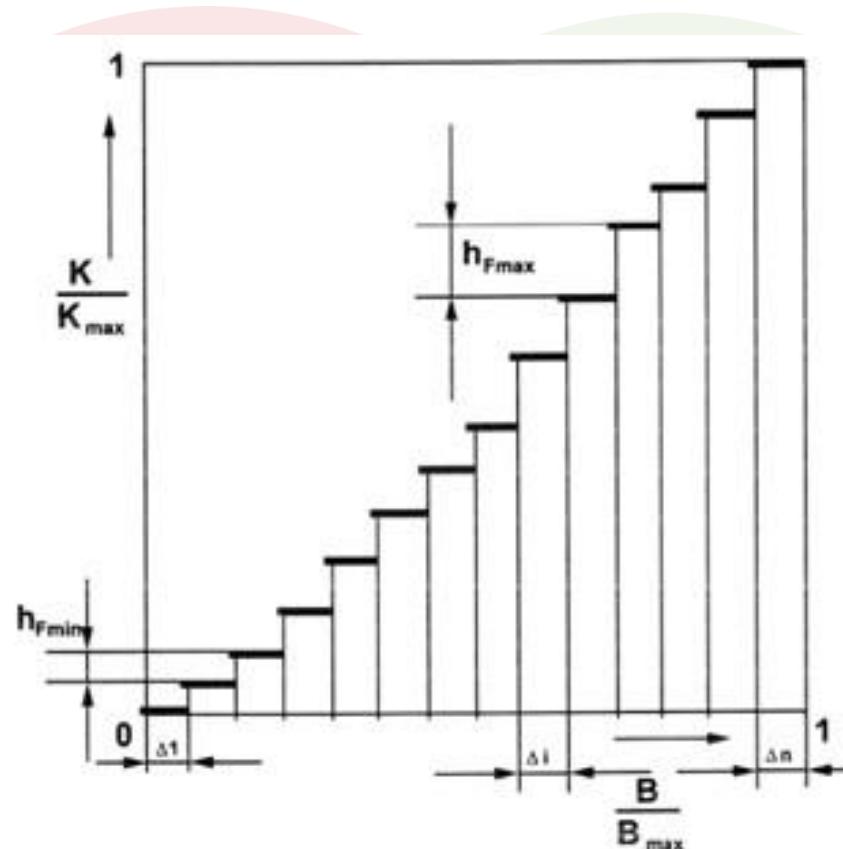
Statikus karakterisztika hibák (Felbontás / Feloldás)

Feloldás, érzékenységi küszöb (Resolution)

- Az a legnagyobb (lassú) bemenő jel változás, amely mellett a kimeneti jel még változatlan marad.
- A nullpont közelében ezt érzékenységi küszöbnek nevezük.
- (Mutató műszereknél az a legnagyobb bemenő jel változás aminél még nem mozdul meg a mutató.)

Felbontás (Resolution)

- A mérés elérhető legkisebb növekménye.
- Az a legkisebb bemenő jel, amelynél a kimeneten használható (bizonytalanságtól mentes) jelet kapunk.
- Optimális esetben a feloldás 3-5-szöröse.
- (Mutató műszereknél az osztás reprezentálja.)



[Forrás: Huba Antal., Dr. Lipovszki, György: Méréselmélet; Lambert Miklós: Szenzorok.]



Statikus karakterisztika hibák (Alakhiba / linearitási hiba)

Alakhiba

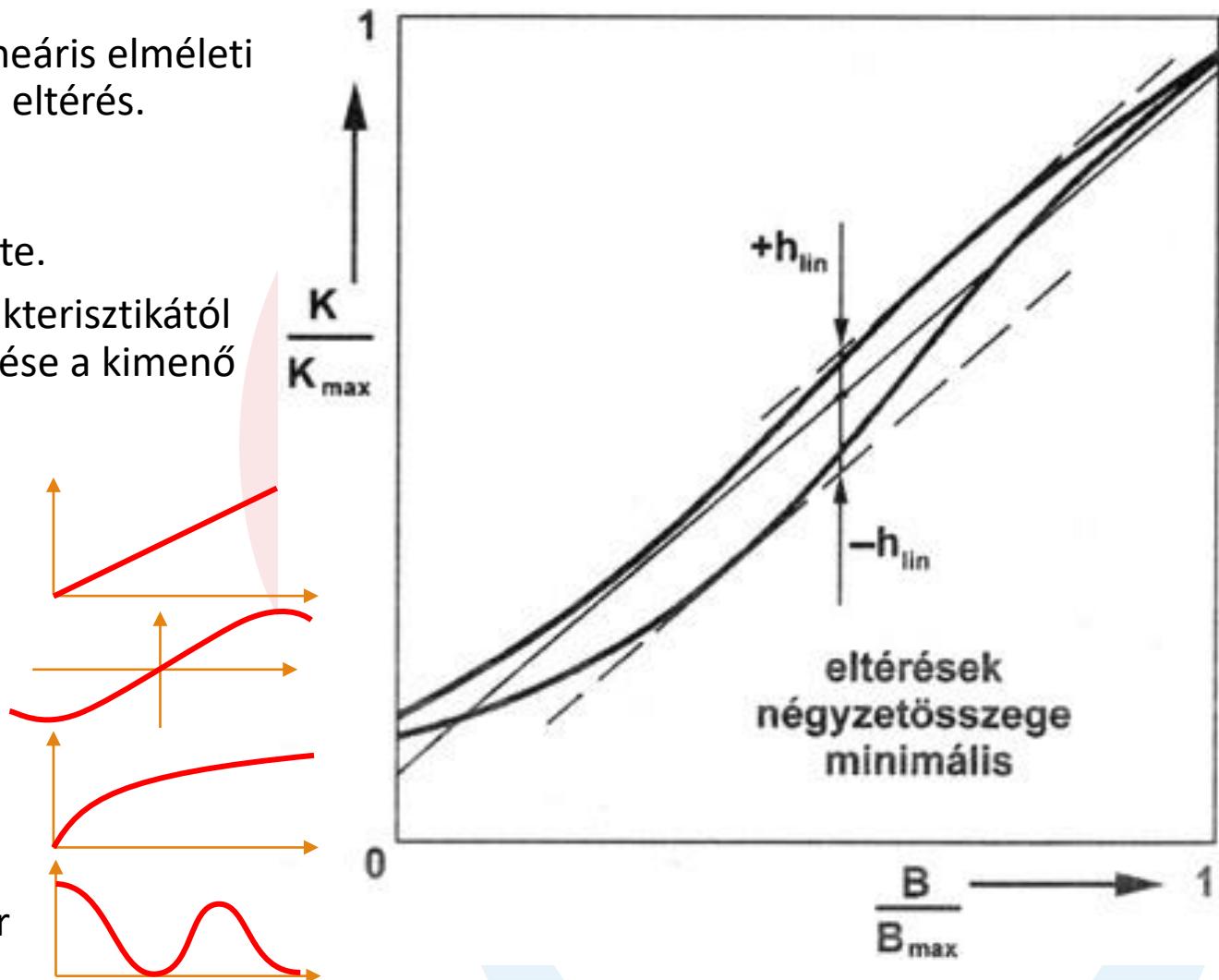
- Általános eset, nemlineáris elméleti karakterisztikától való eltérés.

Linearitási hiba

- Alakhiba speciális esete.
- Egyenes elméleti karakterisztikától való legnagyobb eltérése a kimenő jelnek.

Példák

- Nyúlásmérő bélyeges jelátalakító
- Induktív útadó
- FSR szenzor
- Fotoelasztikus szenzor



[Forrás: Lambert Miklós: Szenzorok. Bp. 2009.]



Statikus karakterisztika hibák (Hosszú idejű stabilitási hibák)

0-pont eltolás (ofszet hiba)

- időben megváltozó kimenő jel, 0 bemenő jel és állandó környezeti körülmények mellett.
- A karakterisztika párhuzamos eltolódása.

Érzékenységváltozás

- A karakterisztika meredekségének megváltozása.

Kúszás

- időben megváltozó kimenő jel állandó (nem nulla) bemenő jel és környezeti körülmények mellett.
- 30 perces időtartamra adják meg maximális terhelés mellett.



Statikus karakterisztika hibák (Környezeti hatások)

Hőmérséklet hatása

- 0-pont hőmérsékleti hibája (drift):
 $h_{0T} = \Delta K / K_{max}$; [% / 10°C]
- érzékenység hőmérsékleti hibája:
 $h_{0T} = (\dot{E}_T - \dot{E}_{ref}) / \dot{E}_{ref}$; [% / 10°C]
- Tranziens hőmérsékleti hiba.

Mechanikai rezgések hatása

Környezeti nyomás hatása

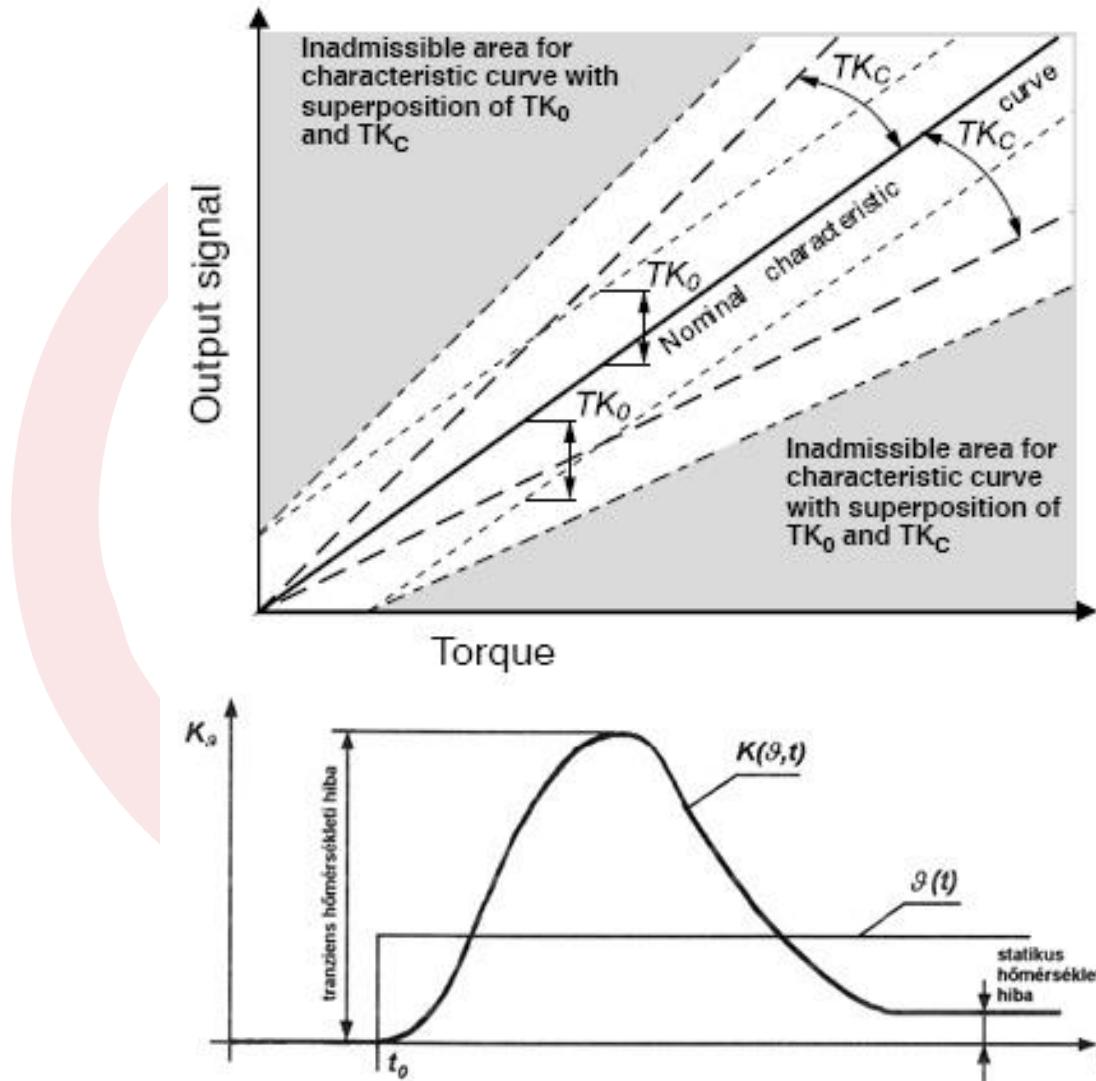
Nedvesség hatása,

Korrózió hatása,

Elektromágneses tér,

Szerelési hatások,

Élettartam,



[Forrás: Huba Antal., Dr. Lipovszki, György: Méréselmélet; Lambert Miklós: Szenzorok.]



A szenzorok karakterisztikái (Erőmérő cella méréstechnikai paraméterei)

Erőmérő cella adatlap

Paraméter	Jel	M.e.	Érték	Ref.	Eloszl.	Hatás
Méréshatár		kg	20			
Érzékenység	C_n	mV/V	$2,0 \pm 10\%$	AV		Nincs
Ofszet hiba	H	mV	$0 \pm 0,1$	NV		Nincs
0-pont hőméréséklei hibája	TK_0	%/10K	$\pm 0,0140$	NV		Nincs
Érzékenység hőm. hibája	TK_C	% /10K	$\pm 0,0175$	AV		Van
Nemlinearitás	d_{lin}	% of C_n	$\pm 0,0166$	NV		Van
Hiszterézis	d_{hy}	% of C_n	$\pm 0,0166$	NV		Van
Kalibráló súly, kijelző, stb...						

- B-típusú becslés:

- $y = x - H \pm U$
- Nullázás: $H \rightarrow 0$

$$U = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} = \sqrt{u_{TKC}^2 + u_{dlin}^2 + u_{dhy}^2 + \dots + u_n^2}$$

$$D = 0,58a$$

$$D = \sigma$$

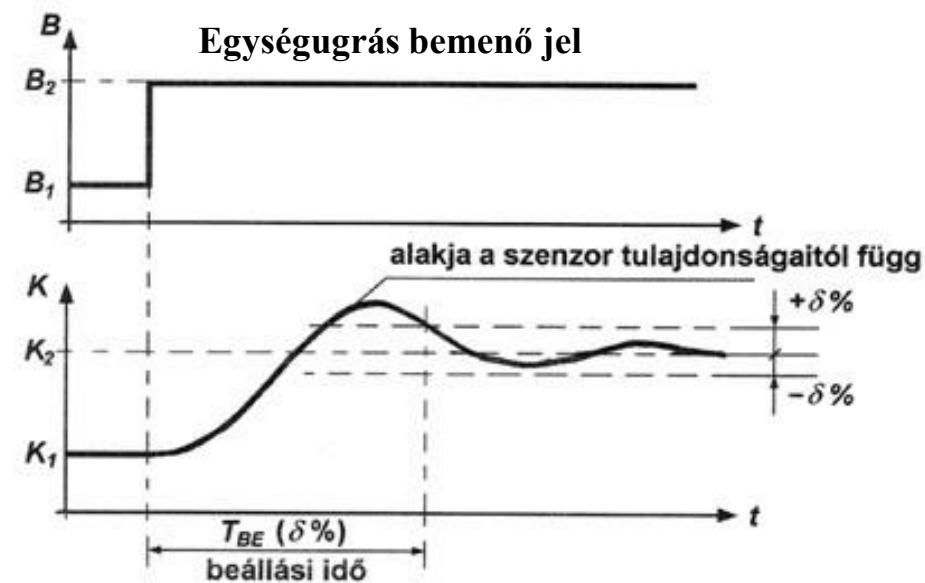
Végérték - Nominal Value (NV),
Full Scale Output (FSO)
Aktuális érték - Actual Value (AV)

Rövid idejű mérésekben: Nullázás | Nullázás | Kalibrálás



A szenzorok dinamikus karakterisztikái (időtartományban)

- A szenzor be és kimenő jelei közötti pillanatnyi kapcsolatot az **időfüggő differenciálegyenlete** adja meg.
- Felvétele szabványos vizsgálójelekkel
 - Egységugrás,
 - Egység-impulzus (Dirac delta),
- Din. karakterisztika tulajdonságai
 - Tüllendülés – szenzortól függ,
 - Megengedett hibasáv – az állandósult kimeneti érték körül,
 - Beállási idő – után a kimenő jel a hibasávban marad.
 - Hibasáv növelése → beállási idő csökkenése.



A szenzorok dinamikus karakterisztikái (Frekvencia tartományban)

Átviteli függvény (Transfer Function,

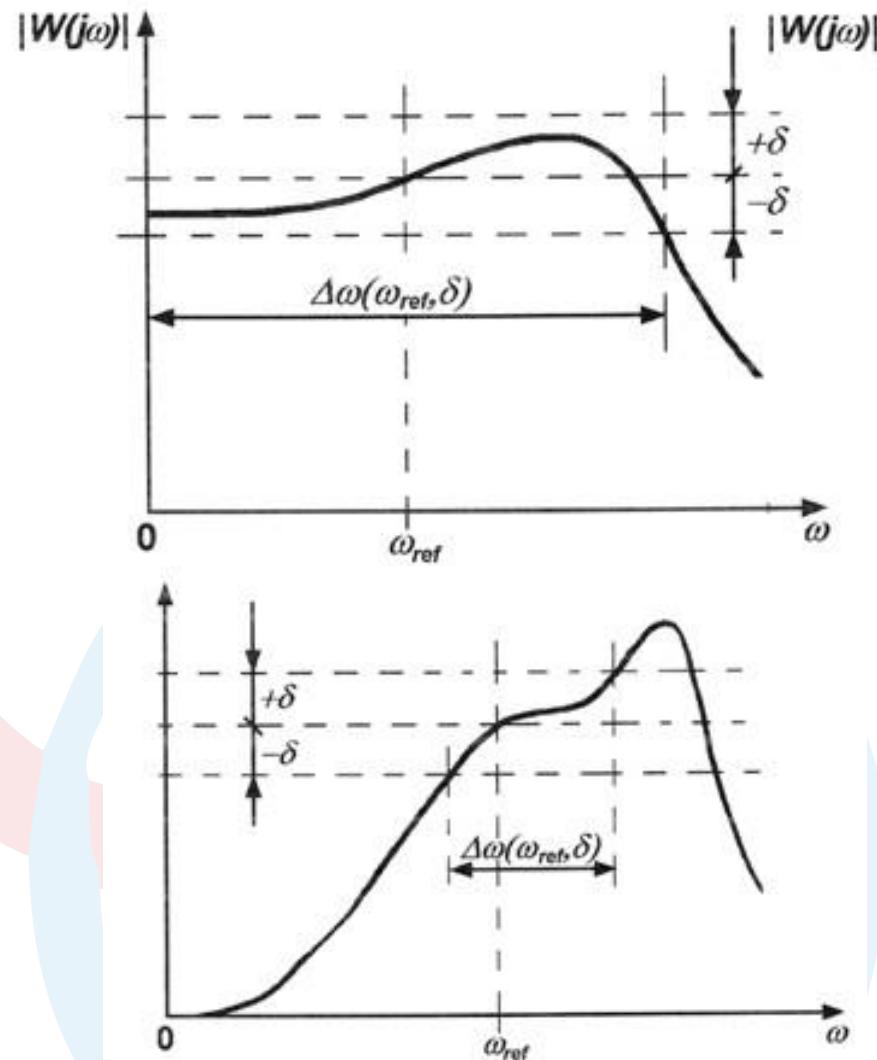
Frequency F.): A szenzor be és kimenő jelei közötti frekvenciafüggő kapcsolatot adja meg.

Felvétele szabványos vizsgálójelekkel

- Harmonikus (sin) gerjesztés a vizsgált frekvenciatartományt pásztázva.
- Impulzus gerjesztés.

Din. karakterisztika tulajdonságai

- Sávszélesség (Bandwidth) – a megengedett hibasávhoz tartozó (állandó erősítés és lineáris), (az alsó és felső vágási körfrekvencia közé eső) frekvenciatartomány,
- Rezonancia csúcs,
- vágási körfrekvencia,
- Csillapítás.



[Forrás: Huba A.; Lambert M.; <https://www.slideshare.net/ajsatienna/sensors-13692410>]

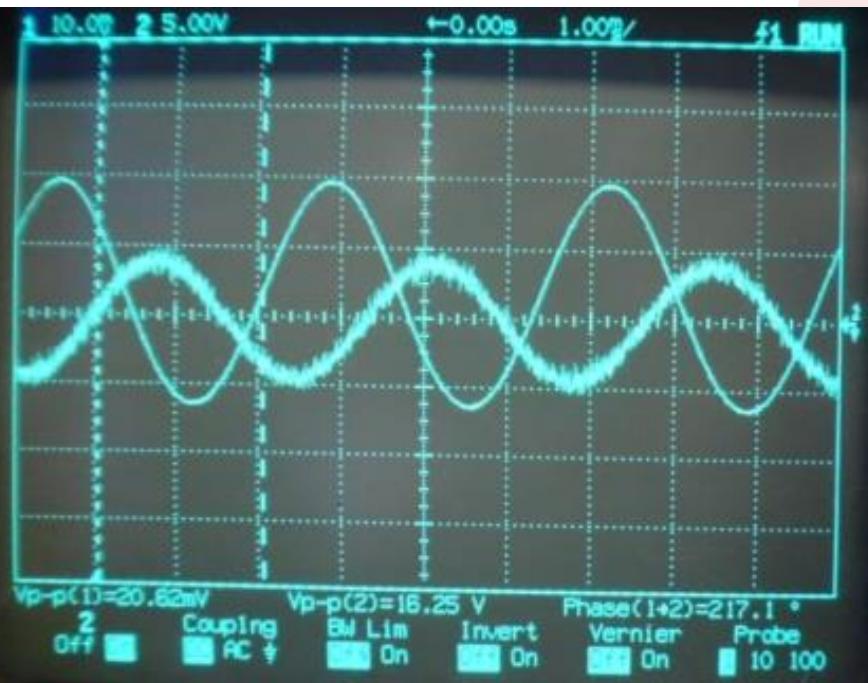


A szenzorok dinamikus karakterisztikái

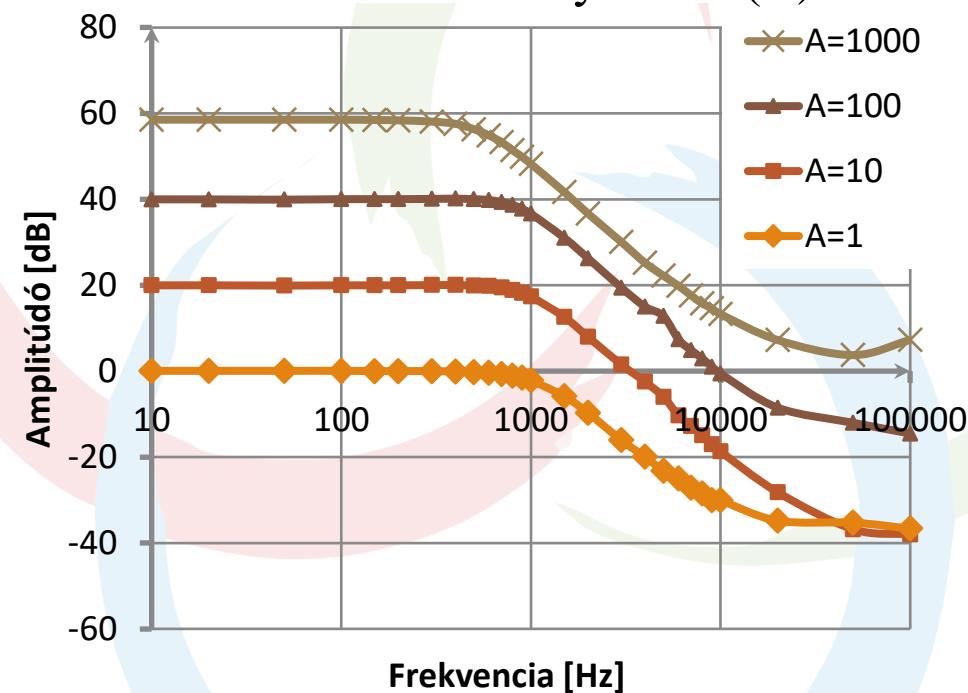
A szenzorok jelét feldolgozó elektronika átviteli tulajdonságait is figyelembe kell venni a mérőrendszer tervezésekor.

Az alábbi ábrán látható műszererősítő amplitúdó átviteli diagramja aluláteresztő szűrőként viselkedik. A vágási frekvencia gyakran függ az erősítéstől.

Időtartományban: $U(t)$



Frekvencia tartományban: $U(\omega)$



[Forrás: Bodai Kristóf István: Oktatási célú erőmérő állomás tervezése, Szakdolgozat, 2015.]



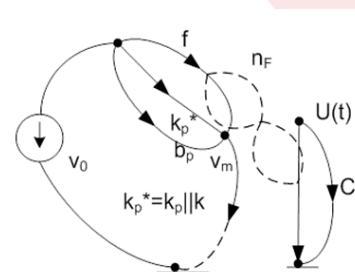
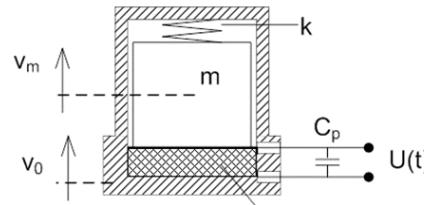
A szenzorok dinamikus karakterisztikái (Pl.: Piezoelektronos Gyorsulásérzékelő)

A piezoelektronos gyorsulásérzékelő sávszélességét balról az elektronikai tulajdonságai (töltésszivárgás miatt statikus mérésre nem alkalmas), jobbról a kéttárolós rendszer mechanikai viselkedése (rezonanciacsúcs) korlátozza.

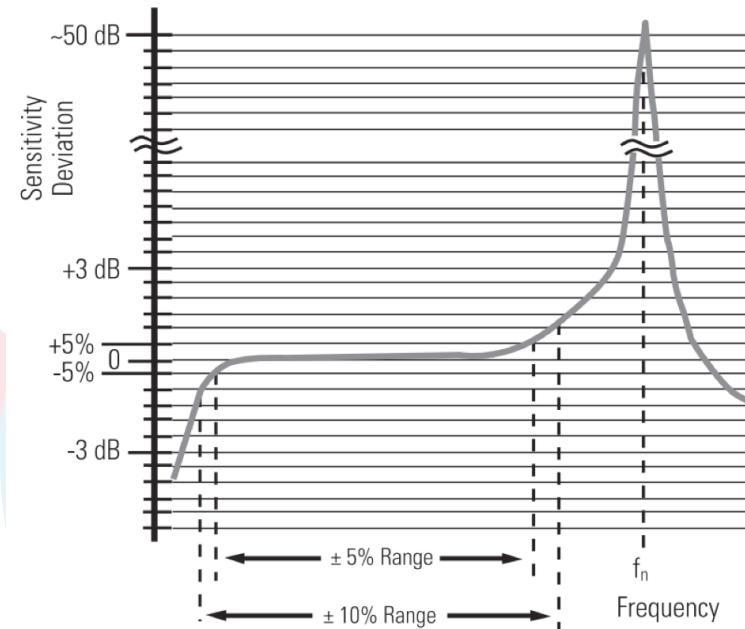
**4513 - CCLD accelerometer, 10 mV/g, side connector,
insulated base, excl. cable**



Overview	Specifications	Accessories	Services
Frequency	1 - 12000 Hz		
Sensitivity	10 mV/g		
Temperature	-51 - 121 °C		
Residual Noise Level in Spec Freq Range (rms)	$\pm 0.4 \text{ mg}$		
Maximum Operational Level (peak)	500 g		
Maximum Shock Level (\pm peak)	5000 g		
Weight	8.6 gram		
Electrical Connector	10-32 UNF		
Mounting	Stud		
Accessory Included	None		
Clip/Stud/Screw included	10-32 Stud		
Output	CCLD		
Unigain	No		
Triaxial	No		
TEDS	No		
Dynamic Range			
Resonance Frequency	32 kHz		



$$G(s) = \frac{U_p(s)}{a(s)} = \frac{n_F}{C_p k_e} \cdot \frac{m}{s^2 \frac{m}{k_e} + s \frac{b}{k_e} + 1}$$

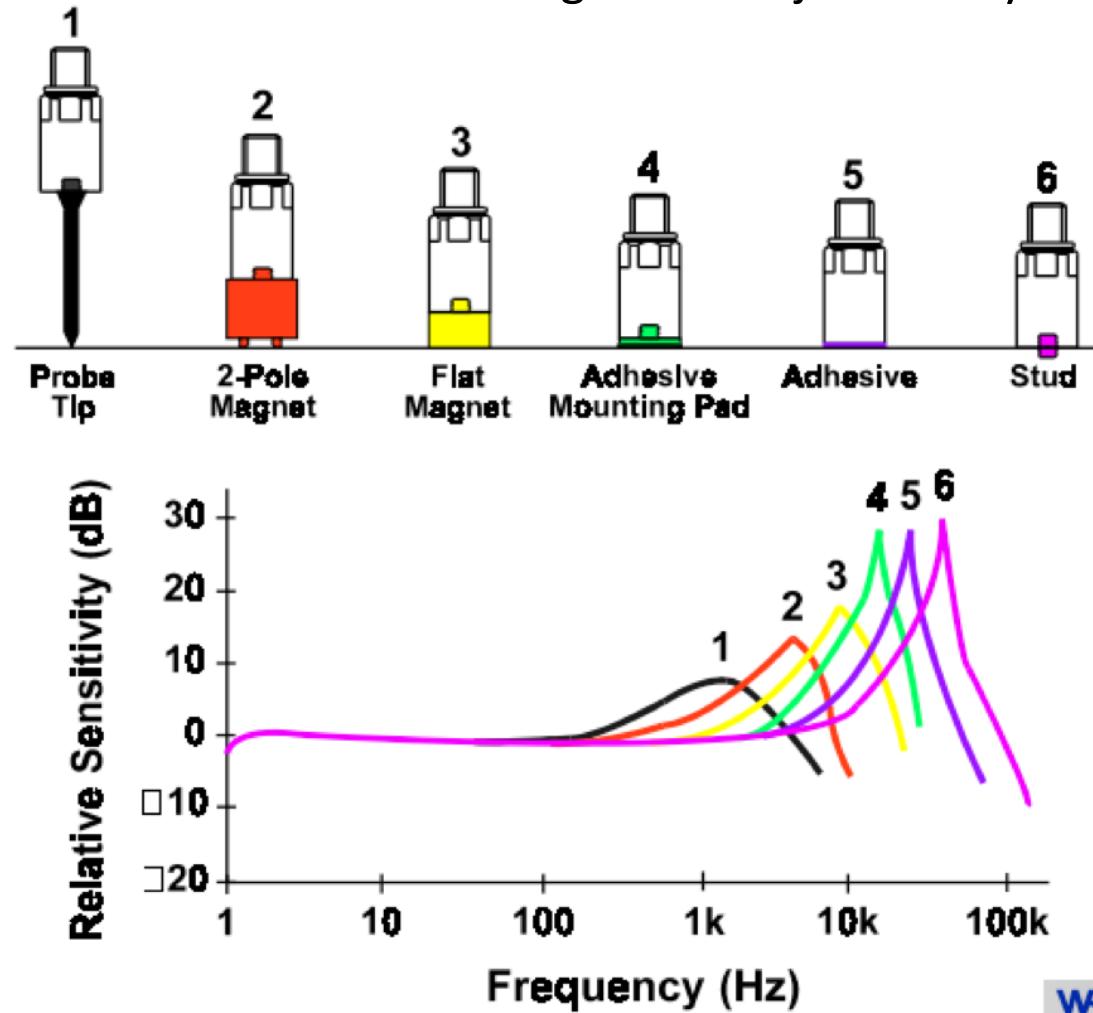


[Forrás: Dr. Huba A., et al.: Mechatronikai berendezések tervezése, Elektronikus jegyzet, Bp. 2014;
<https://www.slideshare.net/ajsatienza/sensors-13692410>]



A szenzorok dinamikus karakterisztikái (Pl.: Piezoelektrikus Gyorsulásérzékelő)

A gyorsulásérzékelő frekvenciaátvitelét a rögzítés módja is befolyásolja.



[Forrás: <https://esteq.co.za/2016/07/05/accelerometer-mounting-considerations/>]

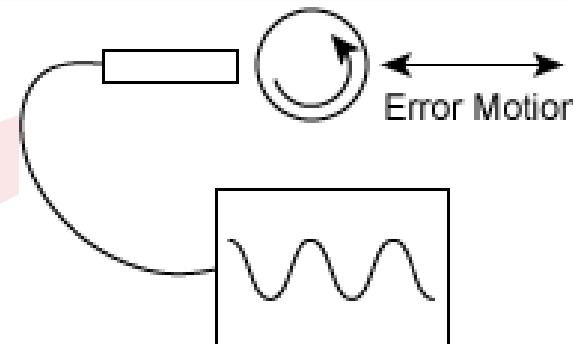


A szenzorok dinamikus karakterisztikái (Pl.: kapacitív távolságérzékelő)

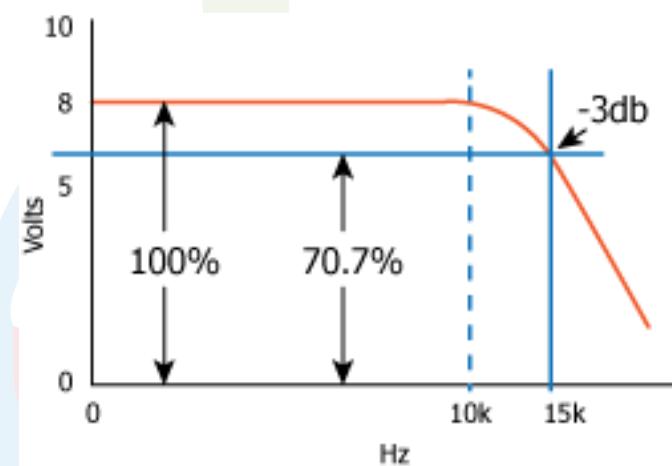
Bandwidth of Sensors

Lion Precision CPL190 and CPL290 capacitive sensors are "flat" to about 10 kHz, meaning that measurements of targets moving at 10 kHz are accurate.

While they are flat to 10 kHz, the "bandwidth" is 15 kHz. It is critical to understand that the bandwidth specification of any sensor is the frequency at which the output voltage is reduced to 70.7% (-3dB) of lower frequency (or DC) output levels. This means that a target moving at 15 kHz with a displacement of 10 μm will only be measured as 7 μm .



A noncontact sensor measures error motions of a rotating spindle in one axis. The frequency of motion in that axis determines the sensors needed bandwidth.

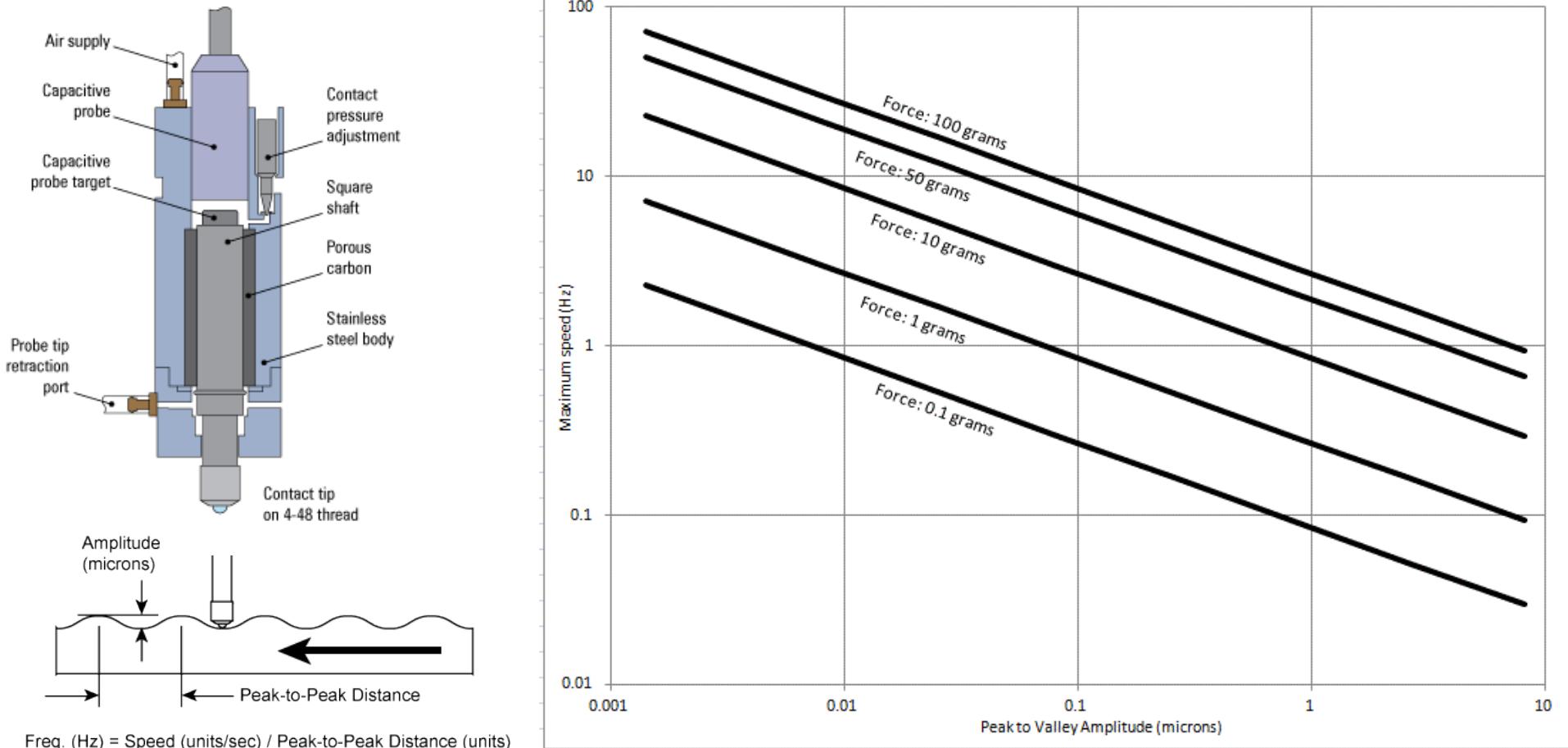


With a 15 kHz bandwidth, sensor output is reduced to 70% at 15 kHz. Frequency response is flat until about 10 kHz.



A szenzorok dinamikus karakterisztikái (Pl.: mechanikai finomtapintó sávszélessége)

Az alábbi pneumatikusan előfeszített mechanikai tapintók esetén az alkalmazható sebesség a leszorítóerő és mért amplitúdó függvénye.



[Forrás: <http://www.lionprecision.com/tech-library/technotes/cap-0027-C-LVDT-Bandwidth-Speed.html>]

A pontosság és ismétlőképesség értelmezése (Méréstechnika ismétlés)

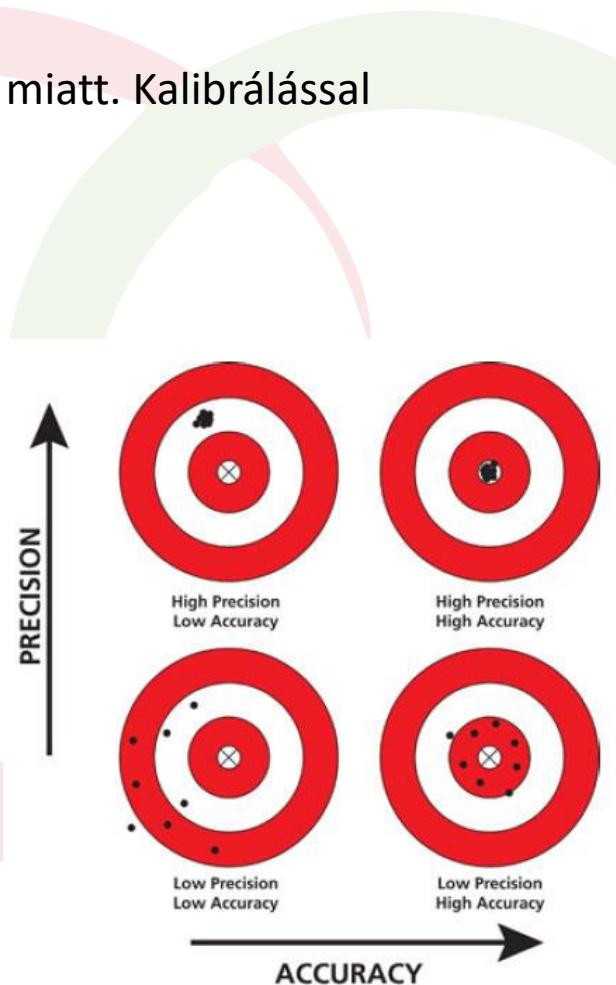
Pontosság (accuracy)

- A mért és a valós érték közötti rendszeres hiba (H) jellemzi,
- Rendszer hiba: a mérőrendszer tökéletlensége és a közelítés miatt. Kalibrálással kiküszöböltető.

Ismétlőképesség (Repeatability/Precision),

- A mérési bizonytalanság (U) jellemzi,
- Véletlen hiba, nem kontrollált paraméterek statisztikus változása.
- Átlagolással, szűréssel csökkenthető.
- Alkalmazott eloszlások: Normál, Egyenletes, ...

A mérési eredmény megadása: $y = x - H \pm U$
(B típusú becslés)



[Forrás: Huba Antal., Dr. Lipovszki, György: Méréselmélet; Lambert Miklós: Szenzorok.]



A szenzor hibáinak megadása

Megadható

- abszolút (pl. 10mV) vagy
- relatív (pl. 0,05%; 500 ppm) módon
- ppm (parts per million) – az egész milliomod része (pl: $0,01 = 1\% = 10000 \text{ ppm}$)

Vonatkoztatható

- a mért aktuális értékre (Actual value, Reading value) vagy
- a végértékre (méréshatár, Full Scale (FS), Nominal Value, Rated output).

[Forrás: Huba Antal., Dr. Lipovszki, György: Méréselmélet]



Metrológiai fogalmak (Méréstechnika ismétlés)

Valódi érték – egy mennyiség definíció szerinti értéke, a gyakorlatban nem érhető el (csak tökéletes mérés esetén).

Helyes érték (x_h) - egy konkrét mennyiségnak tulajdonított, adott célnak megfelelő bizonytalanságú, megegyezés alapján elfogadott érték, pl. etalon.

Mérési hiba:

- Abszolút hiba (H_a): a mért (x_m) és a helyes (x_h) érték különbsége.
- Relatív hiba (h_r): az abszolút hiba és a helyes érték hányadosa, vagy annak %-osan megadott értéke ($h_r \%$).
- Végkitérésére (FS) vonatkoztatott relatív hiba (h_v).
- Redukált hiba: a terjedelemre vonatkoztatott relatív hiba.

Mérési bizonytalanság (U)

- Véletlen hibát okozó paraméterek súlyozott négyzetösszege.

$$H_a = x_m - x_h$$

$$h_r = \frac{H_a}{x_h}; \quad h_{r\%} = \frac{H_a}{x_h} 100\%$$

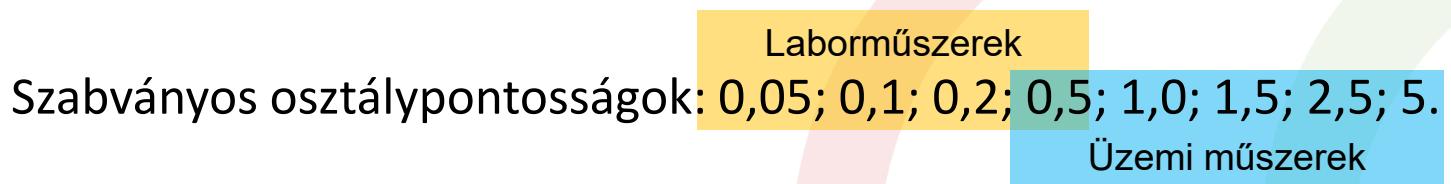
$$h_v = \frac{H_a}{x_v} 100\%$$



Statikus karakterisztika hibák (A szenzor osztálypontossága (OP))

A mérőeszköz hibájának, pontosságának jellemzésére szolgál.

A végkitérésre vonatkoztatott relatív hiba határértéke, felkerekítve egy szabványos értékre.



pl.: OP: 0,5; $x_v = 100 \text{ N} \rightarrow h_v = h_r\% = 0,5\% \rightarrow H_a = \pm 0,5 \text{ N}$

- Ha a mért érték a mérési tartomány felénél van:
- $x = 50 \text{ N}; H_a = \pm 0,5 \text{ N} \rightarrow h_r\% = 1\%$
- Ha a mért érték a mérési tartomány felénél van:
- $x = 10 \text{ N}; H_a = \pm 0,5 \text{ N} \rightarrow h_r\% = 5\%$

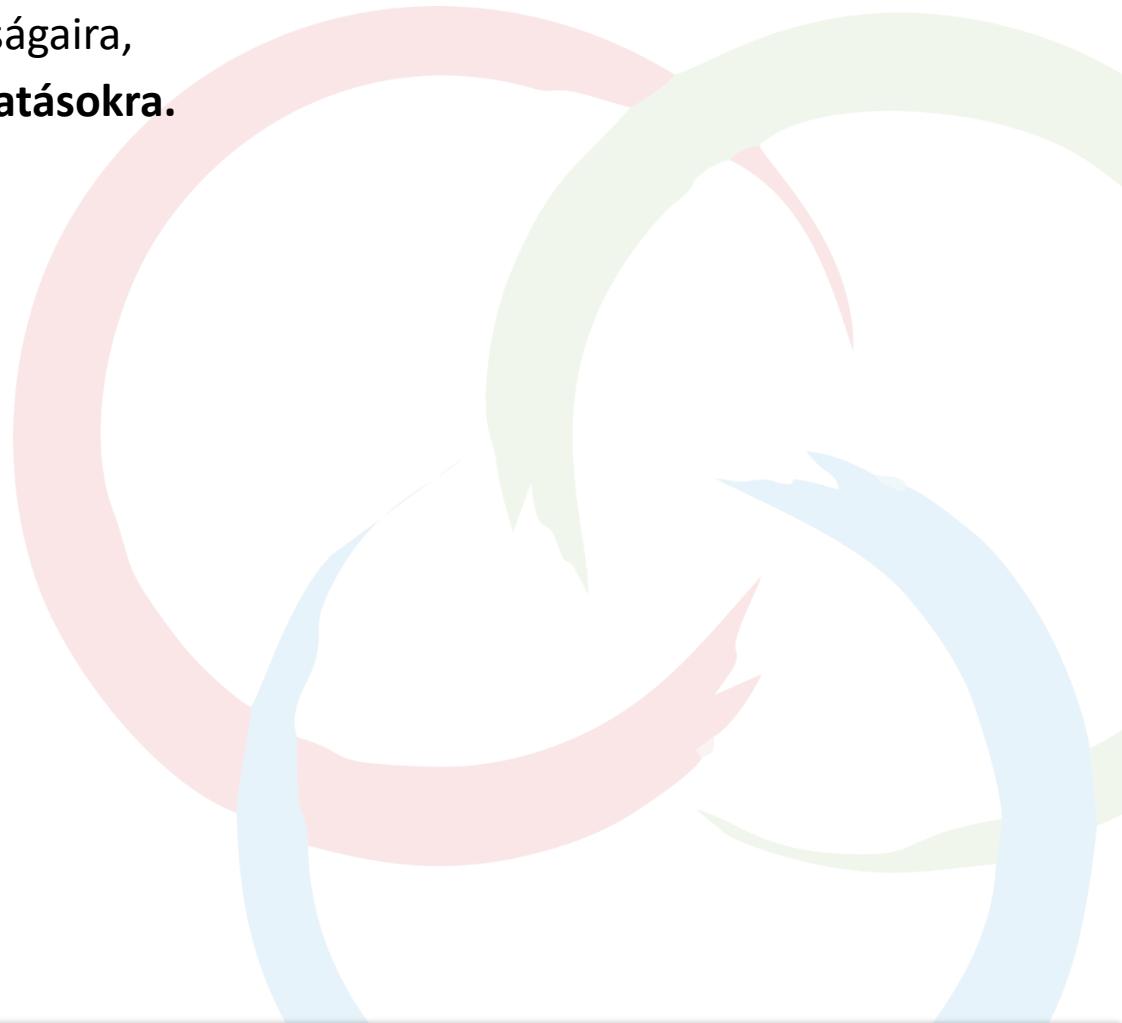
[Forrás: Huba Antal., Dr. Lipovszki, György: Méréselmélet]



Statikus karakterisztika hibák (Ideálistól eltérő karakterisztika)

A szenzor mérési hibái visszavezethetők:

- A szenzor ideálistól eltérő tulajdonságaira,
- **A mérés során előforduló zavaró hatásokra.**



[Forrás: Huba Antal., Dr. Lipovszki, György: Méréselmélet; Lambert Miklós: Szenzorok.]

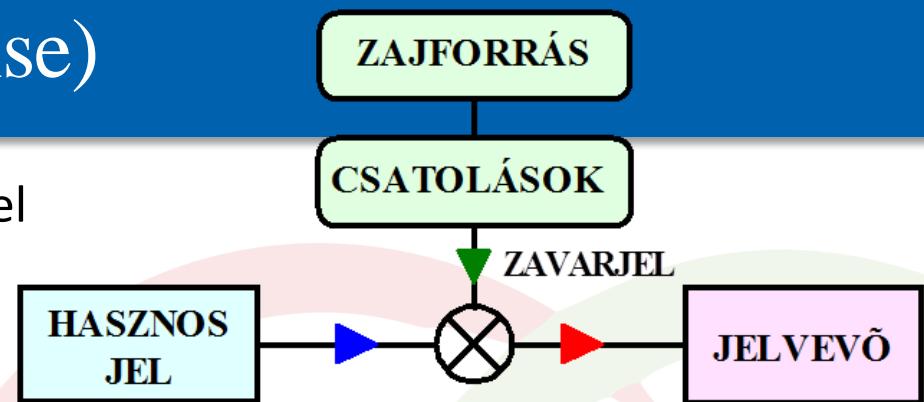


Zavaró hatások (Zaj – Noise)

A zaj a bemenő jel információveszteséggel járó torzulása.

Csatolás jellege

- Konduktív (galvanikus kapcsolat)
 - Csatlakozási potenciál,
 - Termikus potenciál (termoelem)
 - Átmeneti ellenállás
- Induktív (EM indukció),
 - A környezettel való mágneses kapcsolat eredménye,
 - Főként ellenfázisú zavar,
 - Csavart érpár, Koaxiális kábel, mágneses (vas) árnyékolás,
- Kapacitív (Elektrosztatikus),
 - Szort kapacitások,
 - Ellenfázisú és azonos fázisú is lehet,
 - Távolság növelése, elektrosztatikus (pl. Réz) árnyékolás,



[Forrás: Huba Antal., Dr. Lipovszki, György: Méréselmélet]

[Forrás: Huba Antal., Dr. Lipovszki, György: Méréselmélet; Lambert Miklós: Szenzorok.]



Zavaró hatások (Zaj – Noise)

Áramkör ki/bekapcsolása

- Konduktív, induktív és kapacitív zavart is okozhat,
- Elsősorban tranziens zavarokat okoz,

Rádiófrekvenciás zavarok

- Kis (néhány méter) távolságra közvetlen elektromágneses, elektrosztatikus csatolás,
- Nagyobb távolságra, EM hullámok közvetítik, 500kHz – 1GHz, ezek kis teljesítményűek,

Tápellátásból származó zavarjel,

- Hálózati áram 50Hz (60Hz) búgása
- Kapcsolóüzemű táp 100kHz nagyságrendű zaj,
- Tápellátás szűrése, nagy táp zaj elnyomású disszipatív feszültség szabályzó alkalmazása.

Kábelhajlításból származó zavarjel

[Forrás: Huba Antal., Dr. Lipovszki, György: Méréselmélet; Lambert Miklós: Szenzorok.]



Zavaró hatások (Zaj – Noise)

Időbeli tulajdonságuk alapján:

- Egyenfeszültségű → Ofszet hiba, (rendszeres hiba)
- Váltakozó feszültségű → Zaj, (véletlen hiba)
- Tranziens

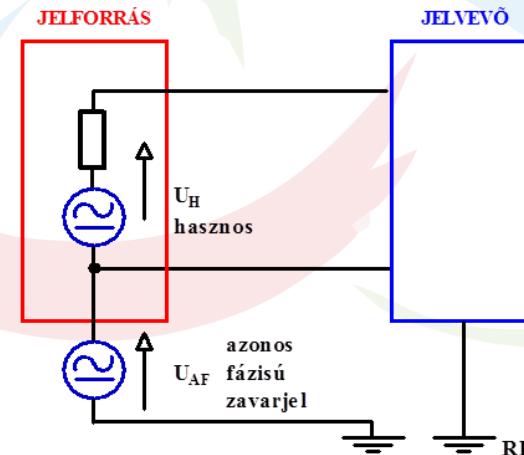
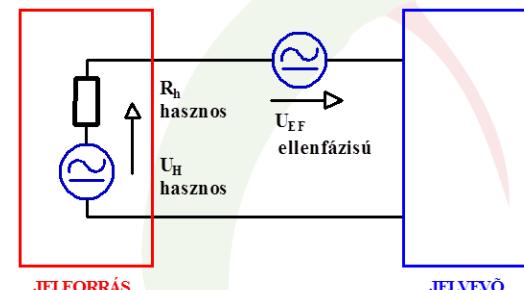
Eloszlás / frekvencia spektrum szerint:

Fehér zaj

1/f zaj

A zaj típusai áramkörben való megjelenés szerint:

- Ellenfázisú (normal mode interference, differential),
- Azonos fázisú (common mode interference),



Zavaró hatások (A zaj megszüntetésének lehetőségei)

Zajforrás megszüntetése

Csatolás megszüntetése

- Árnyékolás
- Csavart érpár

Kiszűrés a hasznos jelből

- Átlagolás
- Passzív (RC, LRC)
 - Ideális / Valós szűrő karakterisztika
- Aktív (Műveleti erősítő)
- Digitális szűrők



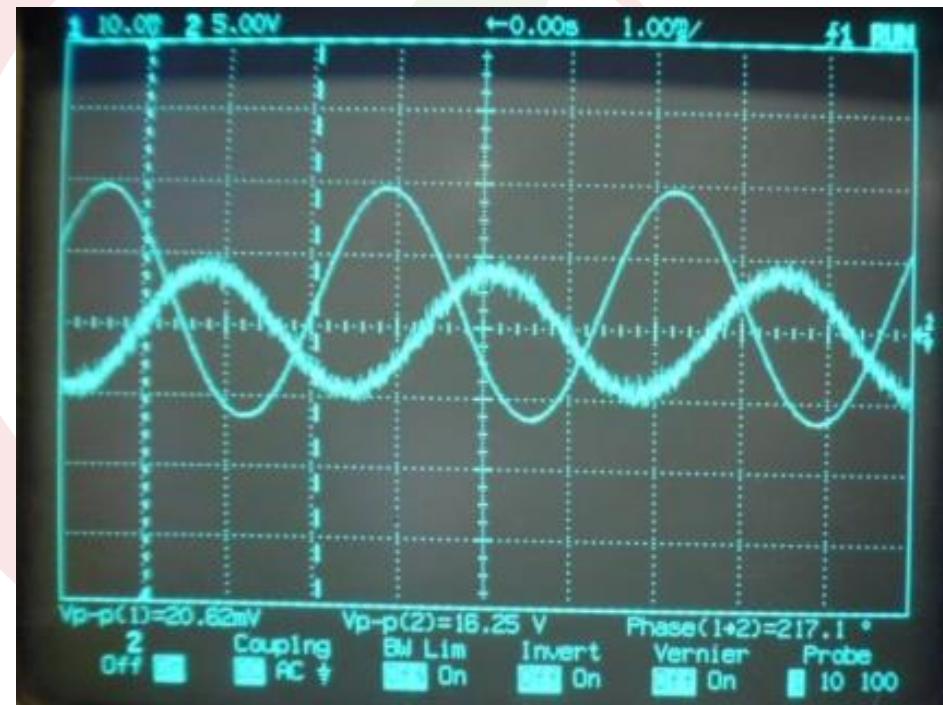
[Forrás: Huba Antal., Dr. Lipovszki, György: Méréselmélet; Lambert Miklós: Szenzorok.]



Zavaró hatások (Zaj – Noise)

A zaj mérőszáma:

- NEP (Noise Equivalent Power) –
Zaj-egyenértékű teljesítmény:
 $NEP = W_z / (\Delta f)^{1/2}$; [W/(Hz) $^{1/2}$]
- W_z - zajteljesítmény,
 Δf - sávszélesség,

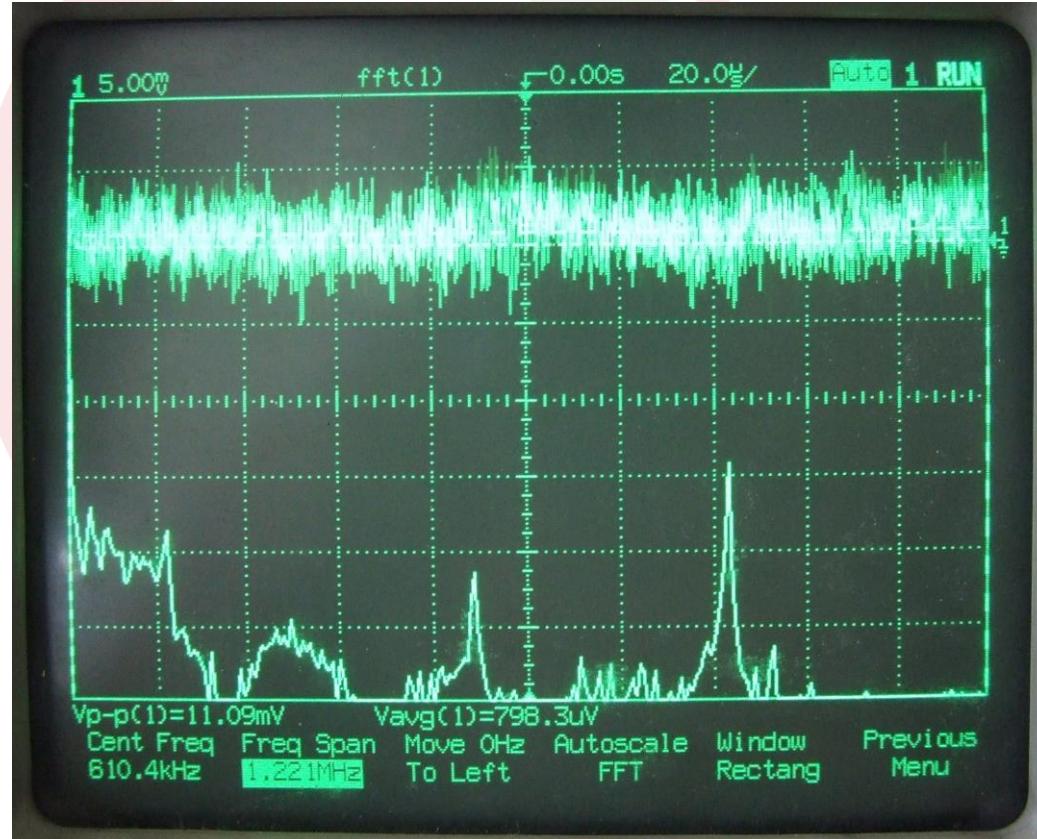
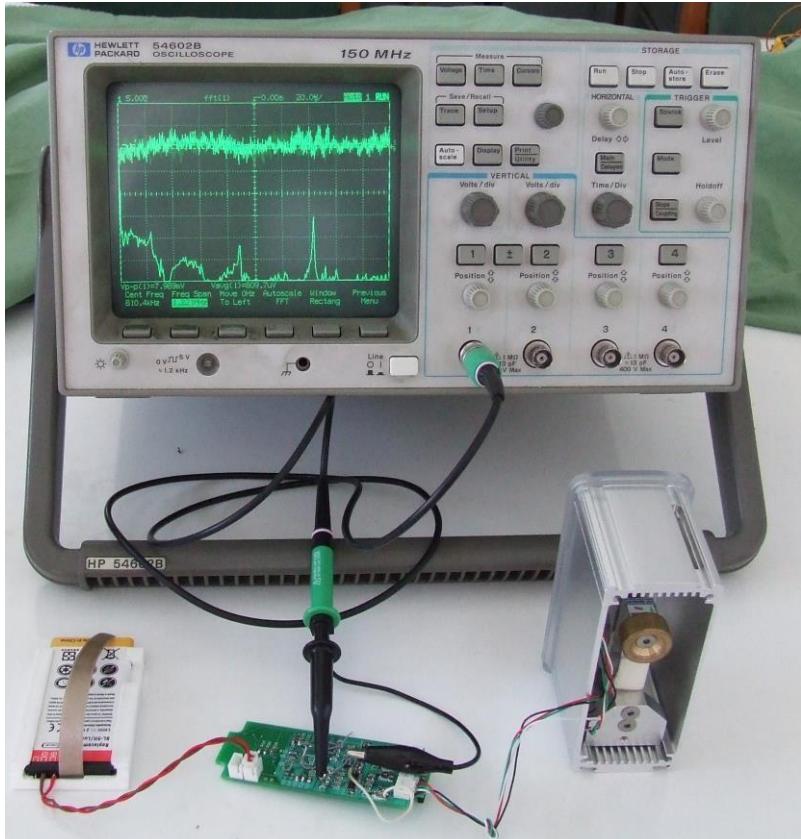


Oszcilloszkóppal mért Zajos és szűrt + erősített jel

[Forrás: Huba Antal., Dr. Lipovszki, György: Méréselmélet; Lambert Miklós: Szenzorok.]



Zavaró hatások (Pl. Műszer mért zaja)



A szenzorok helye a mechatronikában (Robotversenyek hallgatóknak)



www.eurobot.org



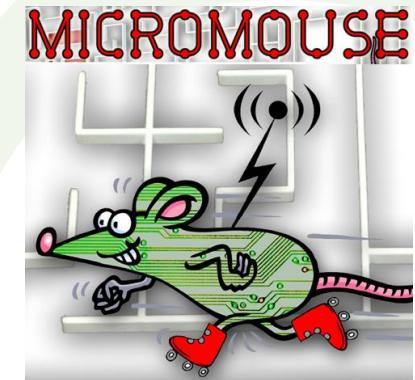
www.robocup.org



www.wroboto.org



www.robonaut.hu



micromouse.mogi.bme.hu



A szenzorok helye a mechatronikában (WRO, A Lego Mindstorms érzékelői)



Érintésérzékelő



fényérzékelő



hangérzékelő



ultrahangos érzékelő



színérzékelő



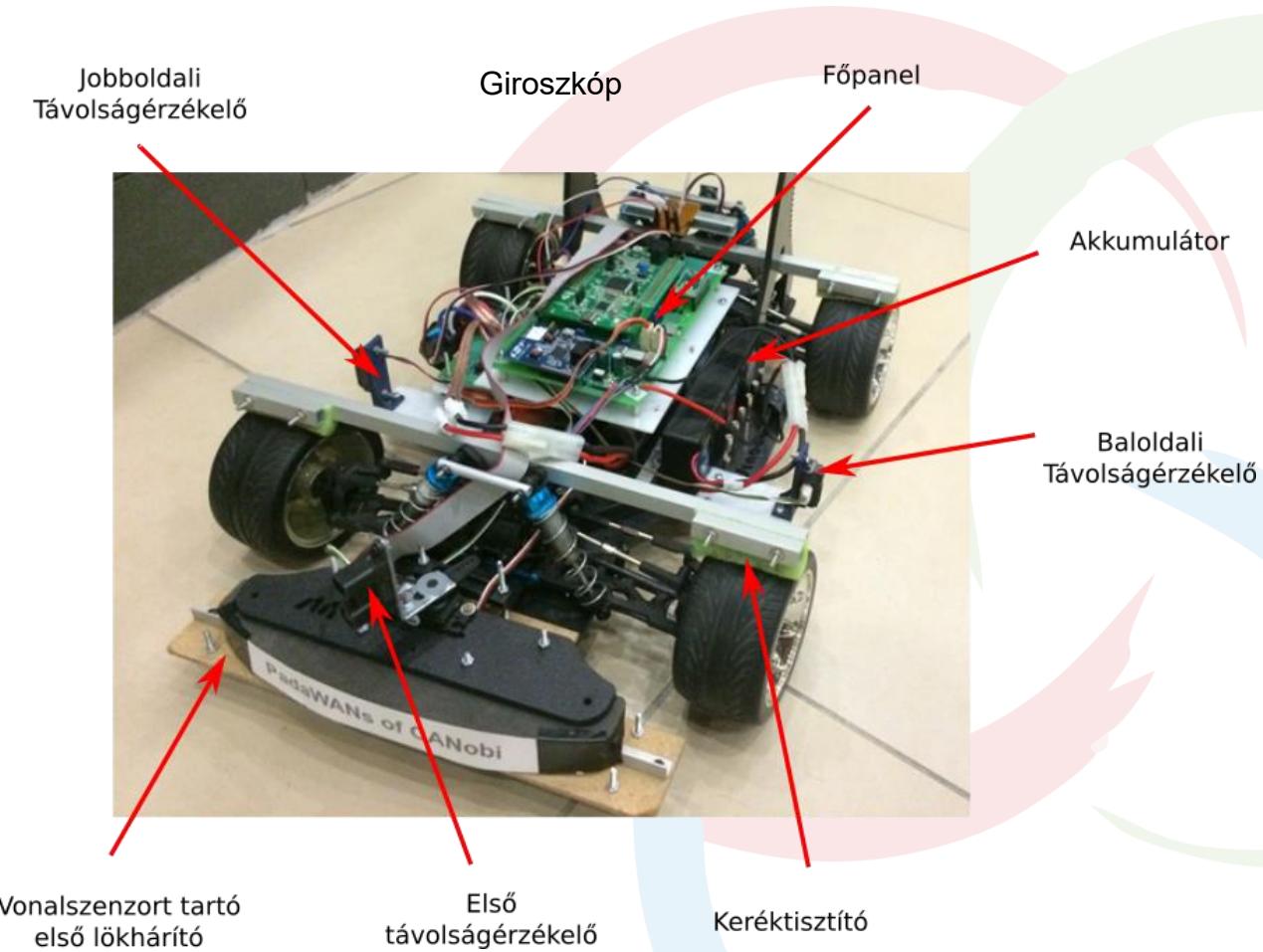
gyorsulás és dőlés é.



Szög érzékelő



A szenzorok helye a mechatronikában (RobonAUT)

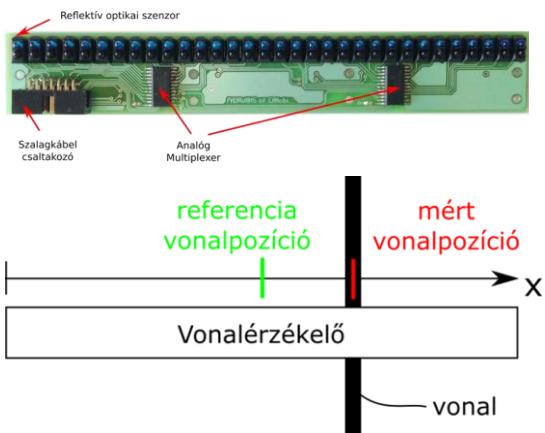


[Forrás: Kurucsó Bence, Szántó Csaba, Peschka Alfréd, Az elmélet gyakorlatban, Esettanulmány, 2016.]

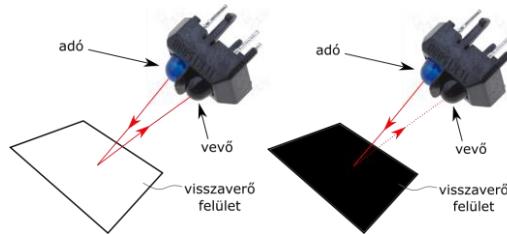


A szenzorok helye a mechatronikában (RobonAUT)

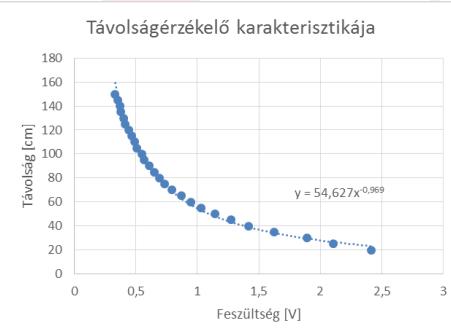
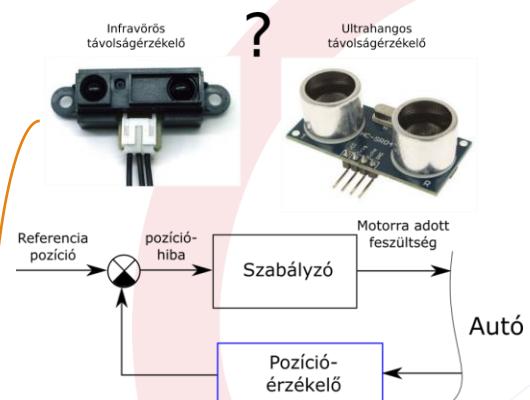
• Vonaldetektor



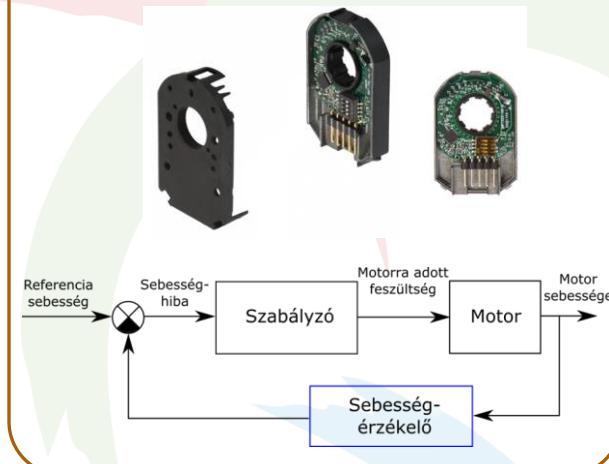
• Reflektív optikai szenzor



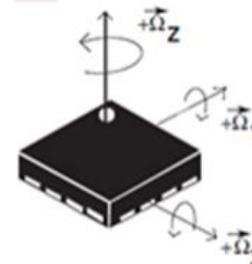
• Távolságmérő



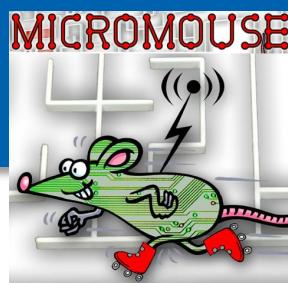
• Enkóder



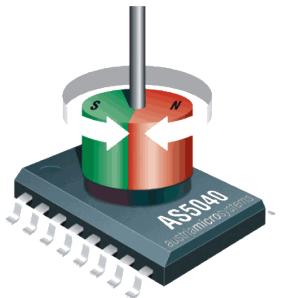
• Giroszkóp



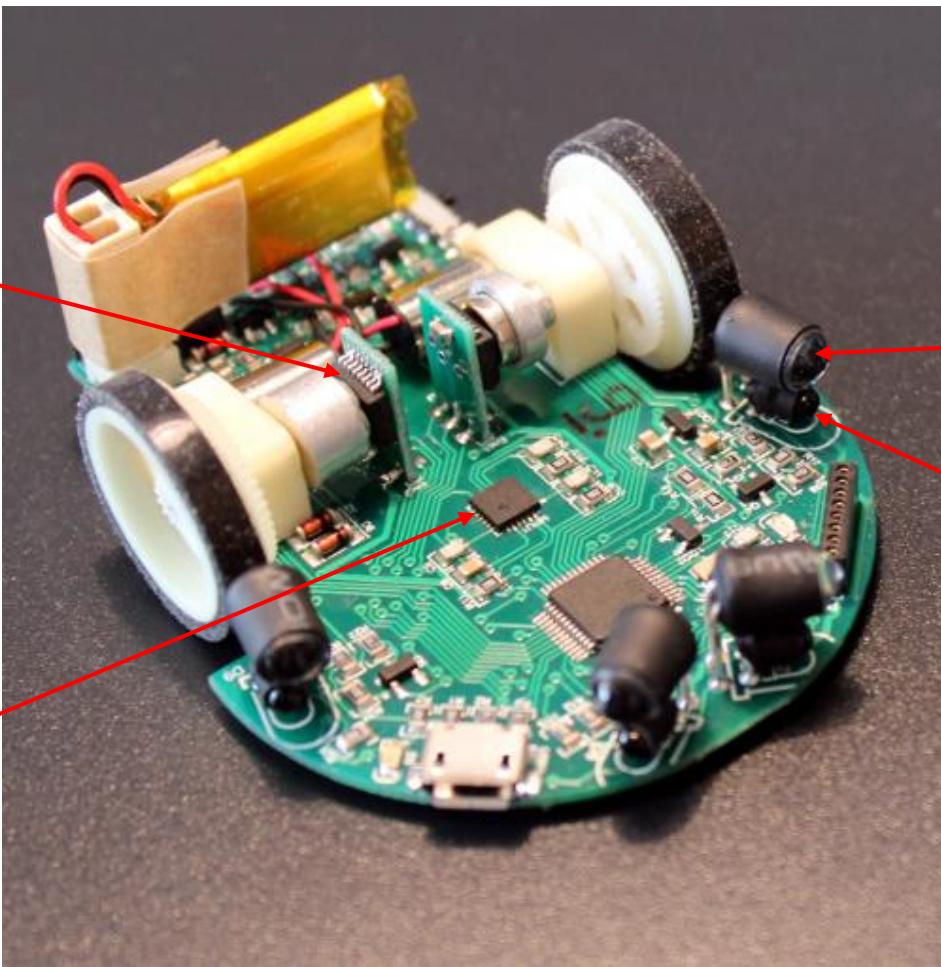
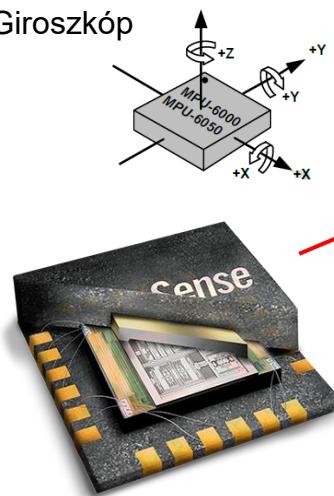
A szenzorok helye a mechatronikában (Micromouse)



Mágneses enkóderek



Giroszkóp



Infravörös LED



Fototranzisztor



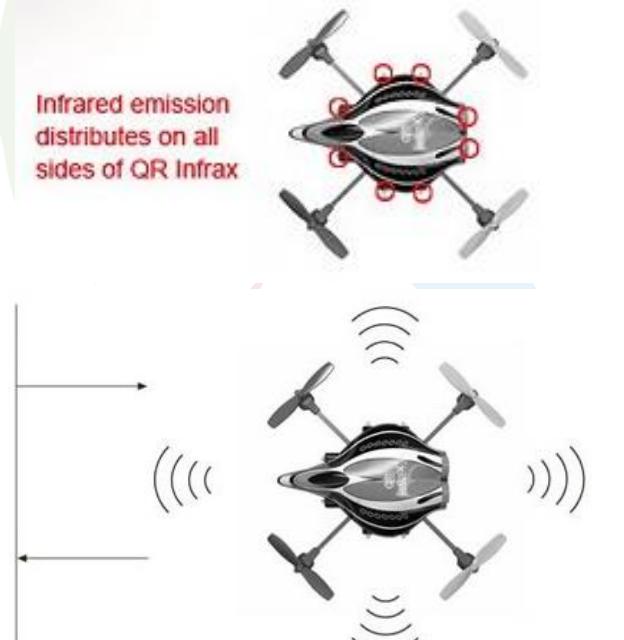
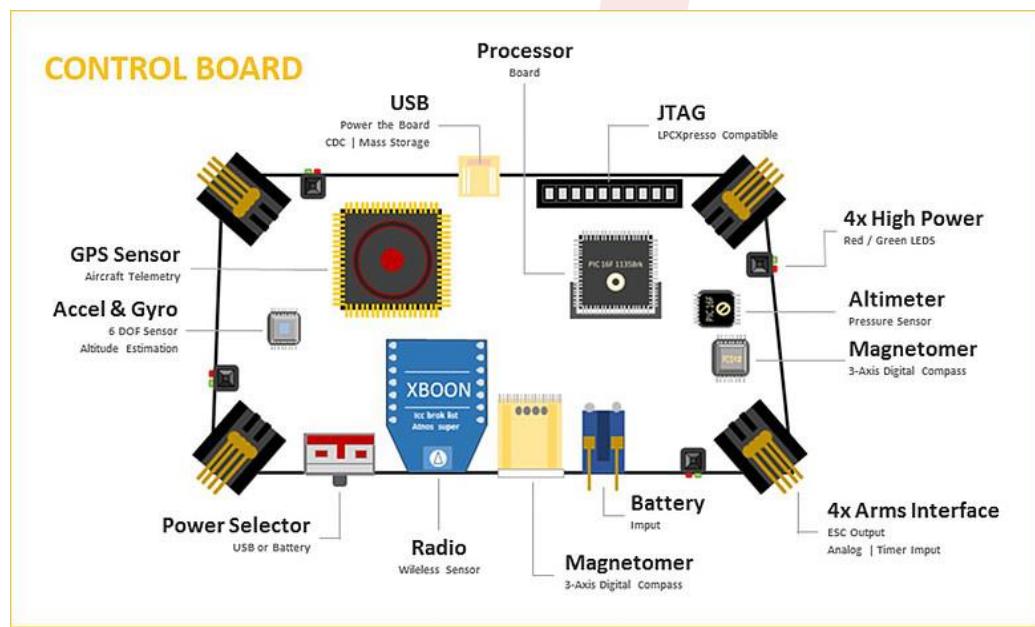
[Forrás: Hably Alexandra, Szériában gyártható half-size MicroMouse robot tervezése, TDK dolgozat, 2014.]



A szenzorok helye a mechatronikában (Quadrokopterek szenzorai)



- Giroszkóp, gyorsulásérzékelő,
- Magasságmérő (altimeter) – légnyomás-mérés,
- Mágneses iránytű (magnetometer),
- Infravörös távolságmérő ,
- Ultrahangos távolságmérő,
- Kamera,
- GPS,
- ...

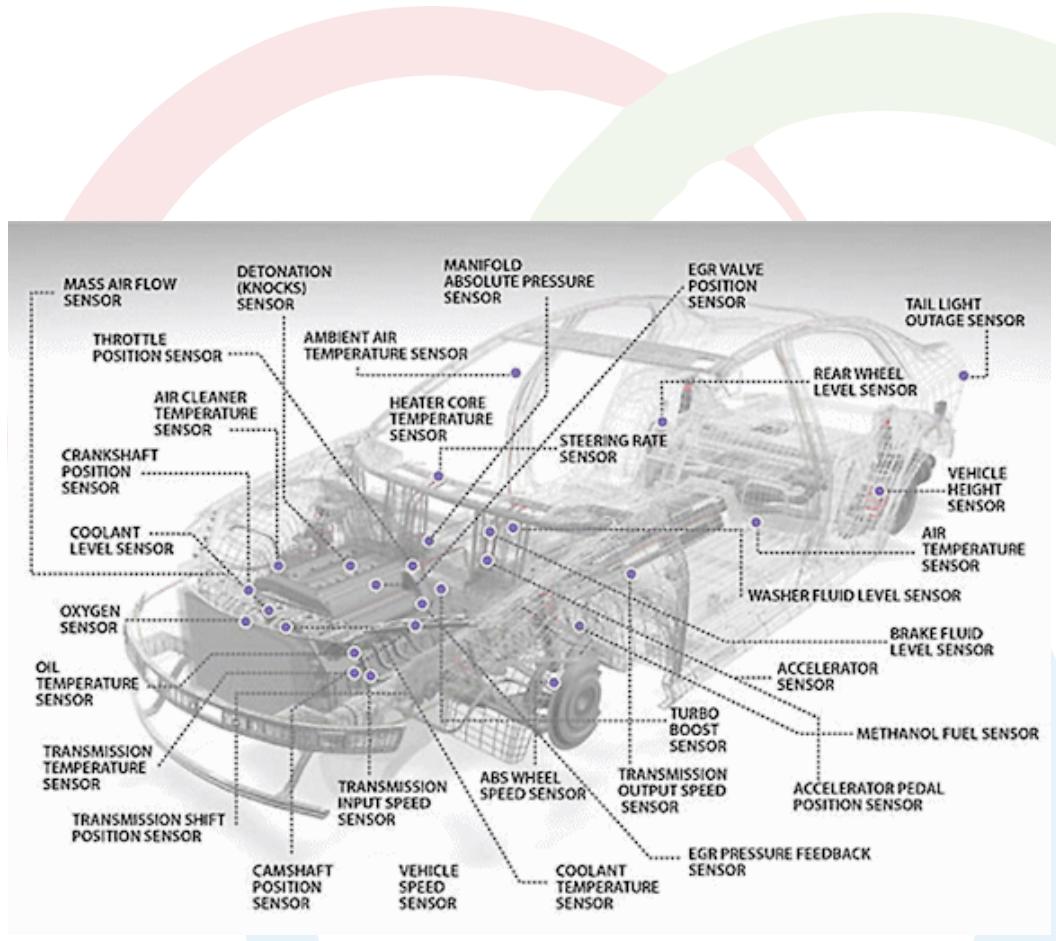


Avoid from crashing to obstacles.



A szenzorok helye a mechatronikában (Szenzorok a járműmechatronikában)

- Motordiagnosztikai szenzorok (hőmérésklet, kopogás, olajszint, nyomás, ...)
- Utastér szenzorai (hőmérésklet,
- Tempomat (fordulatszám, sebesség szenzorok)
- Automata váltó (pozíció szenzorok)
- Szervókormány (szögjel adó)
- Légsák (gyorsulásmérő)
- Menetstabilizálás szenzorai: ABS, EDS, ABR
- Sávkövető rendszer,
- Adaptív távolságtartó rendszer és a
- Parkolást segítő távolság szenzorok,
- ...

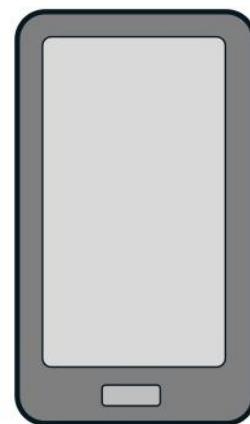


[Forrás: <http://www.sensorsmag.com/components/test-considerations-for-automotive-sensors>]



A szenzorok helye a mechatronikában (Okostelefonokban lévő szenzorok)

Accelerometer
Gyroscope
Magnetometer
Barometer
Proximity
Light Sensor
Touch Screen



GPS
WiFi
Bluetooth
GSM/CDMA
NFC
Camera





KÖSZÖNÖM A FIGYELMET!

BOJTOS Attila
BME - MOGI Tanszék
bojtos@mogi.bme.hu

Szenzorteknika



AZ ELŐADÁST ÖSSZEÁLLÍTotta:

DR. BÁRSZKY ISTVÁN
(KUTATÓPROFESSZOR) EMERITUS

MTA
MŰSZAKI FIZIKAI ÉS ANYAGTUDOMÁNYI INTÉZET

ELŐADÓ:
BOJTOS ATTILA
BME - MOGI TANSZÉK



M Ú E G Y E T E M 1 7 8 2



Tematika

Bevezetés a szenzorteknikába

- csoportosítás,
- méréstechnikai tulajdonságok,
- Jelfeldolgozás

Anyagszerkezet

- Atomszerkezet
- Kémiai kötések
- Sávszerkezet
- Félvezetők
- Fémek

Érzékelési elvek fizikai alapjai (szenzor)

- Termikus elvek, hőmérsékletmérés
- Ellenállásváltozás elvén működő érzékelés
- Kapacitás
- Mágneses mérési elvek
- Piezoelektromos mérési elvek
- Optikai-elvek
- Akusztikai elvek

Érzékelési módszerek, alkalmazások (jelátalakító)

- Hossz-, távolság-, elmozdulás-, elfordulásmérés szenzorai
- Sebesség-, térfogatáram-, gyorsulásmérés szenzorai
- Nyomás-, erő-, nyomatékmérés szenzorai
- (Kémiai érzékelés szenzorai)

Aktuátorok

- Motorok
- Piezoelektronos aktuátorok
- Magnetostrikciós aktuátorok

Integrált érzékelő és beavatkozó rendszerek (vendégelőadás)

- Technológiai alapok, MEMS, NEMS, OEMS
- Szenzorhálózatok, IoT

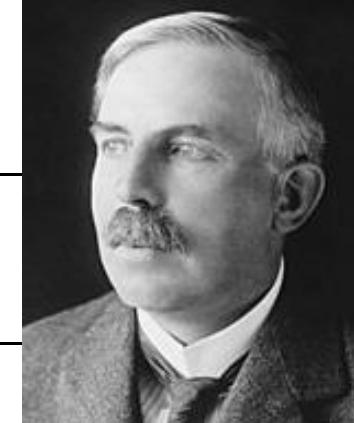


1. Anyagszerkezet

a. Atomszerkezet (ismétlés)

Elemi részecskék jellemzői

	Proton	Neutron	Elektron
Töltés	$e_0 = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$	0	$-e_0 = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$
Nyugalmi tömeg	$m_p = 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	$m_N = 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	$m_E = 9,105 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
Forgási impulzus	$s_p = 5,3 \cdot 10^{-35} \text{ Js}$	$s_N = 5,3 \cdot 10^{-35} \text{ Js}$	$s_E = 5,3 \cdot 10^{-35} \text{ Js}$
Mágneses momentum	$\mu_p = 1,4 \cdot 10^{-26} \text{ Am}^2$	$\mu_N = -1,0 \cdot 10^{-26} \text{ Am}^2$	$\mu_E = -9,3 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2$

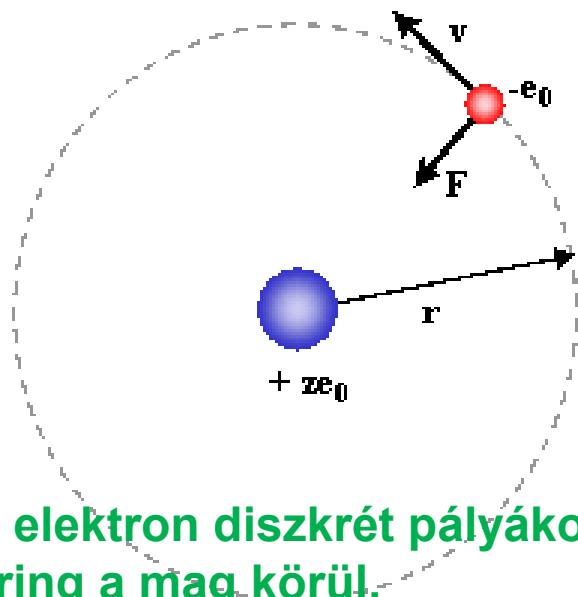


Ernest Rutherford
(1871-1937)



Niels Bohr
(1885-1962)

A Bohr-féle atommodell



Az elektron diszkrét pályákon kering a mag körül.

- Pozitív töltésű atommag $(+ze_0)$

$$d_{\text{Kern}} \approx 10^{-15} \text{ m}$$

$$d_{\text{Atom}} \approx 0,8 \cdot 10^{-10} \dots 3 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

- Negatív töltésű elektron $(-e_0)$

$$\rightarrow |F| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ze_0^2}{r^2} = \frac{m_e v^2}{r}$$

Coulomb erő

Centripetális erő

Probléma (a klasszikus fizika törvényei szerint):

A körpályán mozgó elektron energiát sugároz le elektromágneses hullámok formájában

Bohr-féle posztulátumok

- 1.) Az atomon belül az elektronok meghatározott E_n ($n=1,2,3\dots$) diszkrét körpályákon mozognak.**
- 2.) Az elektronok mozgása sugárzásmentesen történik, a magasabb energiájú pályáról egy alacsonyabbra történő átmenet ($v = (E_1 - E_2) / \hbar$) energiájú foton kibocsátásával, ill. fordított esetben annak elnyelésével jár.**
- 3.) Stacionárius állapotban az elektron forgási impulzusa csak meghatározott diszkrét értékeket vehet fel:**

$$m_e v r = \frac{n\hbar}{2\pi} = n\hbar \quad n = 1,2,3\dots$$

Bohr-féle atommodell

A hidrogénatom sajátértékei

$$E_n = -\frac{m_e e_0^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2} = \frac{E_1}{n^2}$$

Legalacsonyabb energiaszint: n=1
(a szabad elektronra vonatkoztatva)

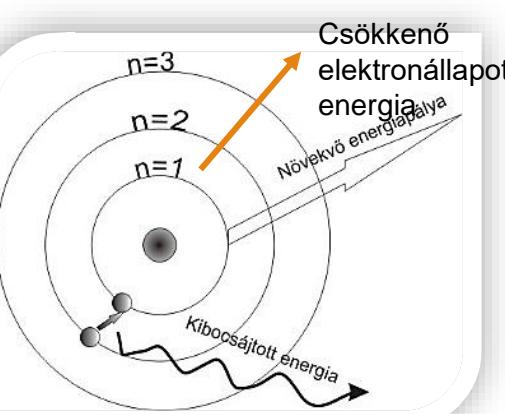
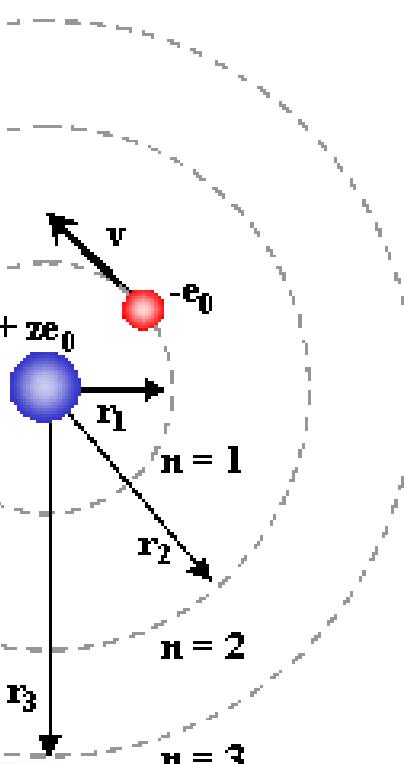
$$E_1 = -\frac{m_e e_0^4}{8\epsilon_0^2 h^2} = -13,6 \text{ eV}$$

A hidrogénatom ionizációs energiája
 $\text{H} \rightarrow \text{H}^+ + \text{e}^-$: 13,6 eV

$$r_n = n^2 \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e_0^2}$$

$$r_n = n^2 a_0$$

$$r_1 = a_0 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e_0^2} \approx 0,0529 \text{ nm}$$



Hullám - részecske dualizmus

Kvantummechanika

Klasszikus részecskék:

- kicsiny tömör golyók,
- tartózkodási helyük minden pontosan ismert,
- impulzusuk és energiájuk meghatározott,
- interferencia ill. elhajlási jelenség fellépése kizárt.

Klasszikus hullám:

- az energia és impulzus a térben folytonosan oszlik el,
- interferencia és elhajlás jelenségét mutatja.

- a klasszikus modellek nem kielégítően írják le az elektronok tulajdonságait,
- a részecskének feltételezett elektronok interferencia és elhajlási jelenséget mutatnak

Schrödinger (1926)

A saját tömeggel rendelkező részecskék hullámegyenlete



Louis de Broglie
1892-1987



Clinton Davisson (1881-1958)
és Lester Germer (1896-1971)

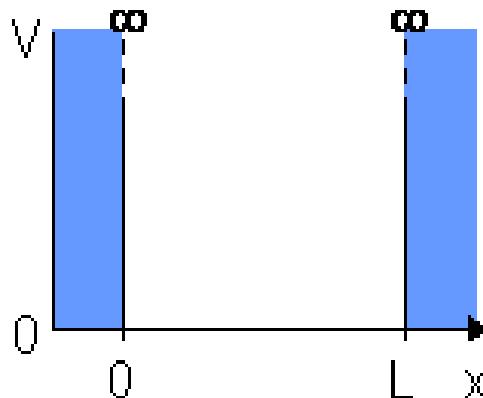


Erwin Schrödinger
1887-1961

Részecske egydimenziós mozgása

(dobozmodell)

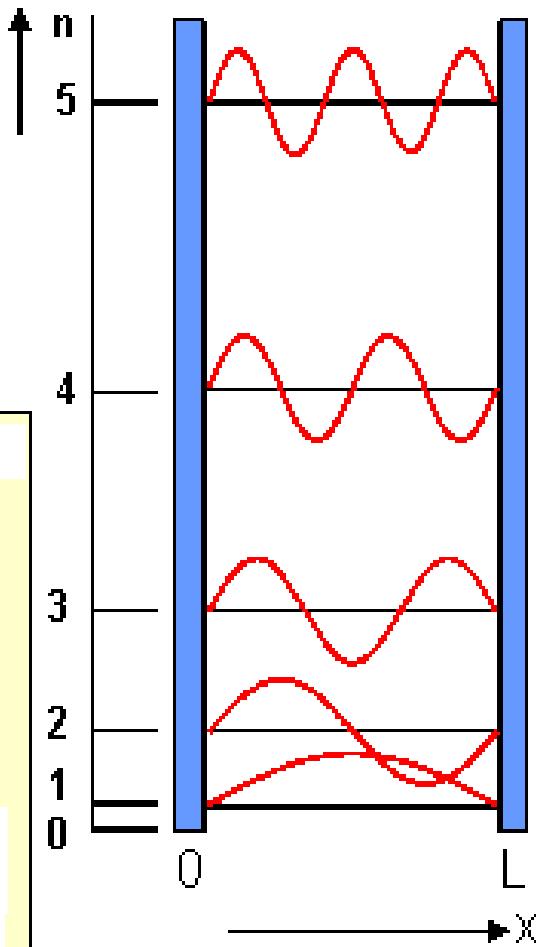
Modell



- Potenciális energiája**
 $V(x) = 0 \quad 0 < x < L$
 $V(x) = \infty \quad x \leq 0 \text{ oder } x \geq L$
- Schrödinger** egy. $V=0$ -ra

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = E\Psi$$
- Részecske végtelen nagy doboz-potenciálon belül**
 $\Psi=0 \quad x=0 \text{ és } x=L \text{ esetén}$

Megoldás



⇒ A részecske hullámfüggvénye

$$\Psi_n = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$$

⇒ A részecske energiaállapotai

$$E_n = \frac{n^2 \hbar^2}{8mL^2} \quad \text{ha} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

n: az energia kvantáltsága
Nullponti energia

$$E_1 = \frac{\hbar^2}{8mL^2}$$

Az elektronok Ψ^2 tartózkodási valószínűségsűrűsége egy adott gömbfelületen

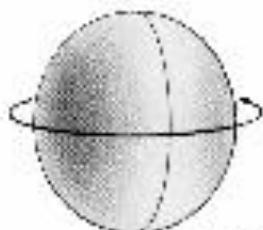
I: Pályák orientációja

m: Lehetséges pályák száma

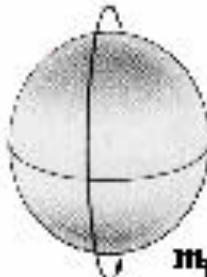
$$l = 0$$



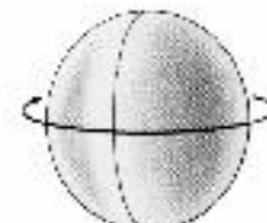
$$l = 1$$



$$m_l = +1$$

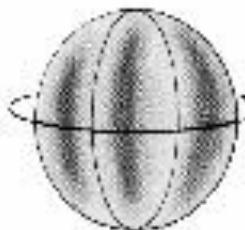


$$m_l = 0$$

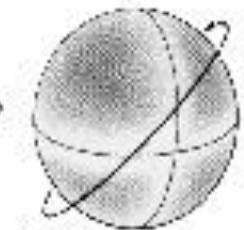


$$m_l = -1$$

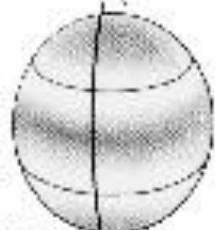
$$l = 2$$



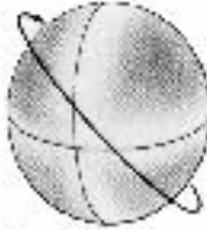
$$m_l = +2$$



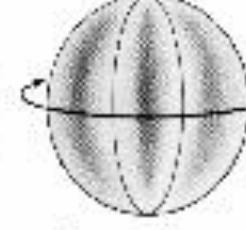
$$m_l = +1$$



$$m_l = 0$$



$$m_l = -1$$

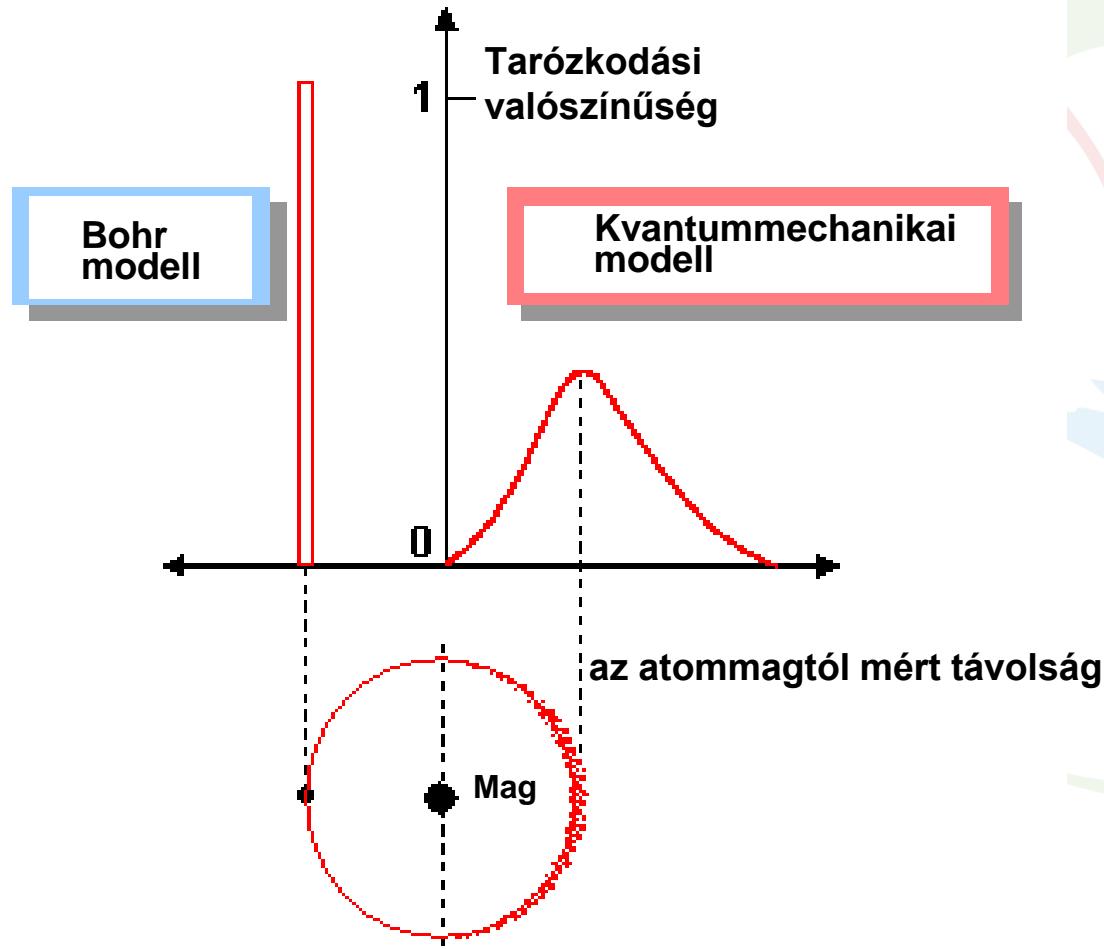


$$m_l = -2$$

Elektron héj
s
p
d

Kvantummechanika

Az elektron tartózkodási valószínűsége a hidrogénatomban



Figyelem: Az elektronsűrűség a centrumban a legnagyobb!

Kvantummechanikailag megengedett elektron energiaállapotok

Fő kvantumszám n	Héj Alhéj	Állapotok száma	Elektronok az alhéjon atomban	
1	K	s	1	2
2	L	s	1	2
		p	3	6
3	M	s	1	2
		p	3	6
		d	5	10
4	N	s	1	2
		p	3	6
		d	5	10
		f	7	14
•	•	•	•	•
USW.	•	•	•	•
stb.	•	•	•	•

Kvantummechanika

Az energiaszintek betöltésének szabályai az atomon belül

Pauli elv:

Az egy atomon belüli elektronok mind a négy kvantumszámukban nem egyezhetnek meg!



Wolfgang Ernst Pauli
1900-1958

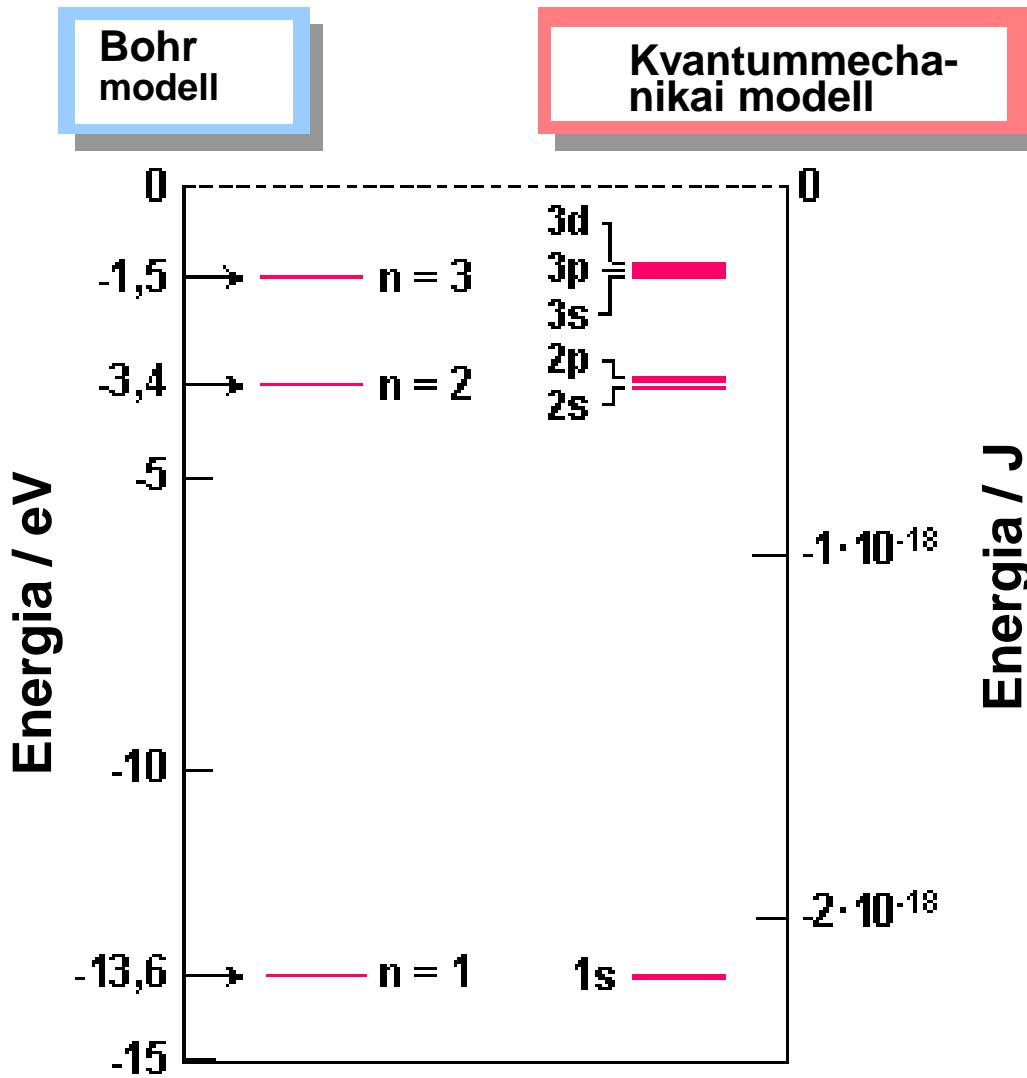
→ Egy adott főhéjon elhelyezkedő elektronok maximális száma:

$$\sum_{l=0}^{n-1} (2l+1) \cdot 2 = 2n^2$$

m_l m_s

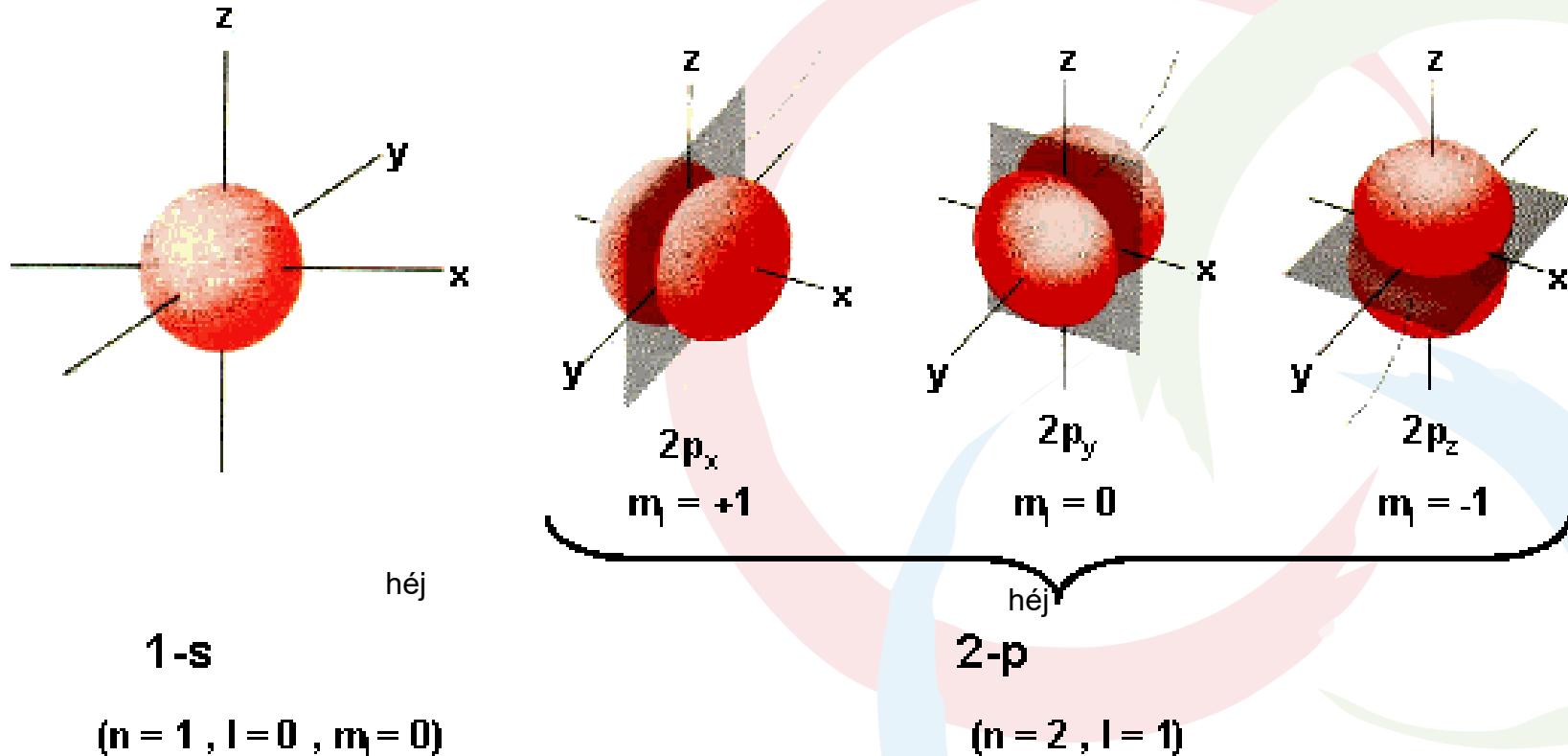
Kvantummechanika

Az elektron energiája a hidrogénatomban



Kvantummechanika

Az elektronpályák 3 dimenziós ábrázolása



Az elektron Ψ^2 tartózkodási valószínűség-függvénye

Kvantummechanika

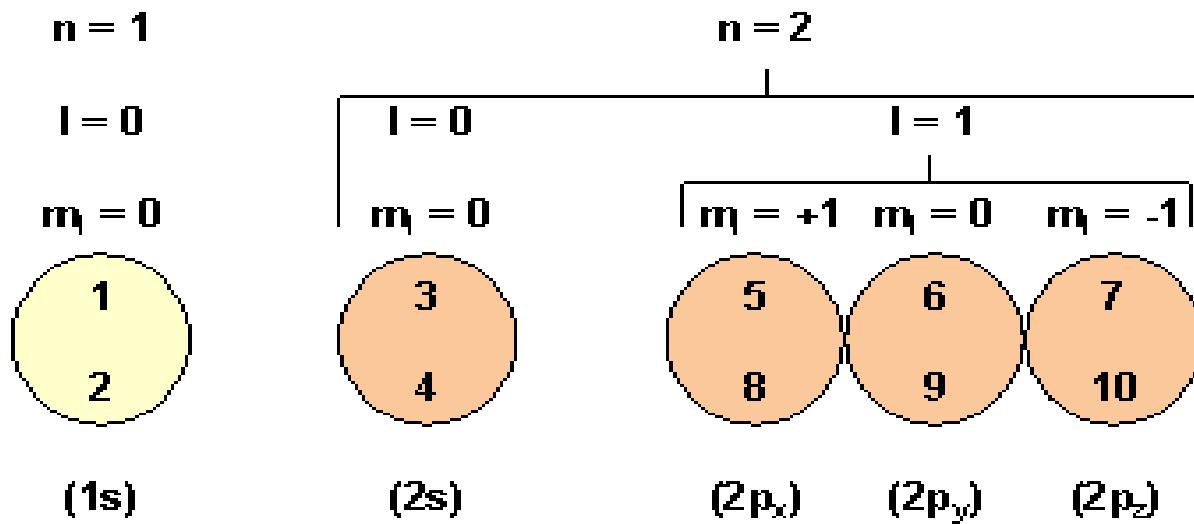
Az elektronhéjak betöltésének szabályai

Atom orbitális pálya: n és l kombinációja

⇒ pályánként két elektron de ellenétes irányú spinnel

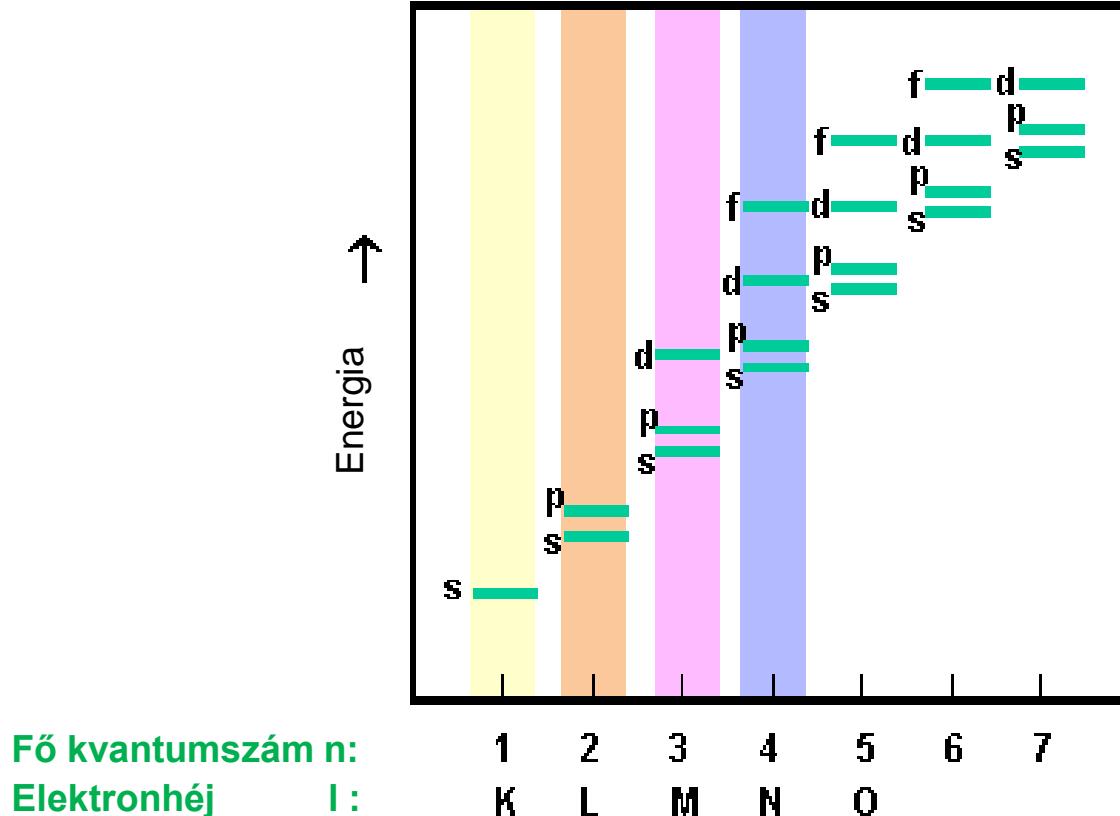
Hund-féle szabály (a legnagyobb multiplicitásról):

⇒ a pályák betöltése először a pár nélküli elektronokkal

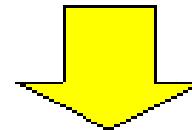


Kvantummechanika

Az állapotok energiaszintjei



Az elektronok először minden a legalacsonyabb energiaszintű üres pályákat töltik be



Az elemek periódusos rendszere

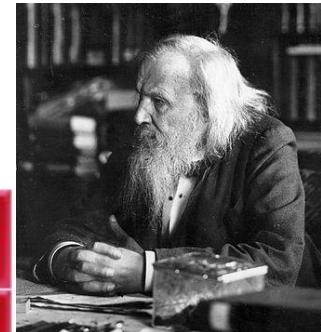
Az elemek elektronkonfigurációja

1	H	$1s^1$
2	He	$1s^2$
3	Li	$1s^2 2s^1$
4	Be	$1s^2 2s^2$
5	B	$1s^2 2s^2 2p^1$
6	C	$1s^2 2s^2 2p^2$
7	N	$1s^2 2s^2 2p^3$
8	O	$1s^2 2s^2 2p^4$
9	F	$1s^2 2s^2 2p^5$
10	Ne	$1s^2 2s^2 2p^6$
11	Na	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$
12	Mg	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$
13	Al	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$
14	Si	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$
15	P	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^3$
16	S	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^4$
17	Cl	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^5$
18	Ar	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$
19	K	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^1$

17	Cl	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^5$	
18	Ar	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	
19	K	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$4s^1$
20	Ca	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$4s^2$
21	Sc	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$3d^1 4s^2$
22	Ti	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$3d^2 4s^2$
23	V	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$3d^3 4s^2$
24	Cr	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$3d^5 4s^1$
25	Mn	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$3d^5 4s^2$
26	Fe	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$3d^6 4s^2$
27	Co	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$3d^7 4s^2$
28	Ni	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$3d^8 4s^2$
29	Cu	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$3d^{10} 4s^1$
30	Zn	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$3d^{10} 4s^2$
31	Ga	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$3d^{10} 4s^2 4p^1$
32	Ge	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$3d^{10} 4s^2 4p^2$
33	As	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$3d^{10} 4s^2 4p^3$
34	Se	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$3d^{10} 4s^2 4p^4$
35	Br	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$3d^{10} 4s^2 4p^5$
36	Kr	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$3d^{10} 4s^2 4p^6$

Az elemek periódusos rendszere

		Periodic Table of Elements																																																
		Period 1							Period 2							Period 3							Period 4																											
		Group 1 IA		Group 2 IIA		Group 3 IIIB		Group 4 IVB		Group 5 VB		Group 6 VIB		Group 7 VIIIB		Group 8 VIII		Group 9 VA		Group 10 VIA		Group 11 VIIA		Group 12 VIIIA		Group 13 VIIIA		Group 14 VIIIA		Group 15 VIIIA		Group 16 VIIIA		Group 17 VIIIA		Group 18 VIIIA														
1	H	2	He	3	Li	4	Be	5	Na	6	Mg	7	Al	8	Si	9	P	10	S	11	Cl	12	Ar	13	B	14	C	15	N	16	O	17	F	18	Ne															
1	Hydrogen 1.008	2	Helium 4.003	3	Lithium 6.941	4	Beryllium 9.012	5	Sodium 22.990	6	Magnesium 24.305	7	Aluminum 26.982	8	Silicon 28.086	9	Phosphorus 30.974	10	Sulfur 32.066	11	Chlorine 35.453	12	Argon 39.948	13	Boron 10.811	14	Carbon 12.011	15	Nitrogen 14.007	16	Oxygen 15.999	17	Fluorine 18.998	18	Neon 20.197															
19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr															
Potassium 39.098	Calcium 40.078	Scandium 44.956	Titanium 47.867	Vanadium 50.942	Chromium 51.996	Manganese 54.938	Iron 55.845	Cobalt 58.933	Nickel 58.693	Copper 63.546	Zinc 65.38	Gallium 69.723	Germanium 72.631	Arsenic 74.922	Selenium 78.971	Bromine 79.904	Krypton 83.798	Rubidium 84.468	Sr	Yttrium 88.906	Zr	Zirconium 91.224	Nb	Niobium 92.906	Mo	Molybdenum 95.95	Tc	Technetium 98.907	Ru	Ruthenium 101.07	Rh	Rhodium 102.906	Pd	Palladium 108.42	Ag	Silver 107.888	Cd	Cadmium 112.414	In	Indium 114.818	Sn	Tin 118.711	Sb	Antimony 121.760	Te	Tellurium 127.6	I	Iodine 126.964	Xe	Xenon 131.294
55	Cs	56	Ba	57-71	Hf	72	Ta	73	W	74	Re	75	Os	76	Ir	77	Pt	78	Au	79	Hg	80	Tl	81	Pb	82	Bi	83	Po	84	At	85	Rn	86	Rn															
Ceesium 132.905	Barium 137.328	Hafnium 178.49	Tantalum 180.948	Tungsten 183.84	Rhenium 186.207	Osmium 190.23	Iridium 192.217	Platinum 195.085	Gold 196.967	Mercury 200.592	Thallium 204.383	Lead 207.2	Bismuth 208.980	Polonium 208.982	Astatine 209.987	Radon 222.018	Francium 223.020	Ra	Rutherfordium (261)	104	Rf	105	Db	106	Sg	107	Bh	108	Hs	109	Mt	110	Ds	111	Rg	112	Cn	113	Uut	114	Fl	115	Uup	116	Lv	117	Uus	118	Uuo	
Rutherfordium (261)	Dubnium (262)	Seaborgium (263)	Bohrium (264)	Hassium (265)	Méiténium (266)	Darmstadtium (267)	Roentgenium (272)	Copernicium (277)	Ununtrium unknown	Ununpentium unknown	Ununhexium (289)	Ununseptium unknown	Ununoctium Unknown	Ununnonium Unknown	Ununoctium Unknown	Ununnonium Unknown	Ununpentium Unknown	Ununhexium Unknown	Ununtrium Unknown	Ununtrium (283)	Ununpentium Unknown	Ununhexium Unknown	Ununtrium Unknown																											



Dmitri Ivanovich Mendeleev 1834-1907

57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
La Lanthanum 138.905	Ce Cerium 140.116	Pr Praseodymium 140.908	Nd Neodymium 144.243	Pm Promethium 144.913	Sm Samarium 150.36	Eu Europium 151.964	Gd Gadolinium 157.25	Tb Terbium 158.925	Dy Dysprosium 162.500	Ho Holmium 164.930	Er Erbium 167.259	Tm Thulium 168.934	Yb Ytterbium 173.055	Lu Lutetium 174.967
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Ac Actinium 227.028	Th Thorium 232.038	Pa Protactinium 231.036	U Uranium 238.029	Np Neptunium 237.048	Pu Plutonium 244.064	Am Americium 243.061	Cm Curium 247.070	Bk Berkelium 247.070	Cf Californium 251.080	Es Einsteinium [254]	Fm Fermium 257.096	Md Mendelevium 258.1	No Nobelium 259.101	Lr Lawrencium [262]

Alkali Metal

line th

Basic Metal

Semimetal

Nonmetal Halides

Noble
Gas

Lanthanide

Actinide

Az elemek periódusos rendszere

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 1005 H Vízzelolv.																	1 1003 He Gáz
2	3 694 Li Lávav.	8 901 Be Dagasz.																
3	11 12,9 Na Nátron	12 11,91 Mg Mágnesz																
4	19 39,9 K Soda	10 40,6 Ca Cálium	11 18,96 Sc Zsir.	11 17,90 Ti Tákn.	12 20,9 V Távol.	13 24,00 Cr Krom	15 26,98 Mn Mangan	16 28,97 Fe Fém	17 30,93 Co Kobalt	18 35,45 Ni Nikkel	19 45,95 Cu Cupper	20 65,37 Zn Zink	21 69,71 Ga Gálik	21 70,99 Ge Gélik	23 74,91 As Aasan	24 76,9 Se Sélik	25 79,90 Br Brom	26 80,20 Kr Kriptón
5	35 86,95 Rb Raktárm.	36 87,61 Sr Szentgy.	39 88,91 Y Yttrium	40 91,11 Zr Zirkón.	41 91,91 Nb Nóbján	42 92,94 Mo Mólikid.	43 96,0 Tc Tákn.	44 101,1 Ru Ródium	45 101,9 Rh Ródium	46 104,9 Pd Pódium	47 107,9 Ag Argán	48 111,9 Cd Cádium	49 113,9 In Indium	50 115,9 Sn Szenes	51 118,9 Sb Szenes	52 119,9 Te Tellúm	53 121,9 J Jód	54 131,2 Xe Kseni.
6	55 132,9 Cs Cálium	56 133,3 Ba Bárium	57 136,9 La Lanth.	58 138,5 Hf Hafn.	59 139,9 Ta Távol.	60 142,9 W Válasz.	61 144,1 Re Ródium	62 149,1 Os Osmium	63 151,1 Ir Iridium	64 152,1 Pt Pódium	65 159,0 Au Arany	66 180,6 Hg Hig.	67 194,5 Tl Tákn.	68 197,1 Pb Pátria	69 209,0 Bi Bismut	70 210,0 Po Polónia	71 210,0 At Astatin	72 222,0 Rn Rózsa

Gázok

Fémek

Félvezetők

Felfémek

Figures surrounding the elements

150 years

have passed since the discovery
of the first periodic table of the elements
by Dmitri Mendeleev.

118 elements
have been discovered in total.

84 elements
have been used
by NIMS scientists in
their research.

10 elements
constitute a superalloy.
See "Superalloys" on p. 10

15 countries*
have discovered
new chemical elements.

The most recent, in 2015, Japan
discovered a new element. The
United Kingdom, the United States
and Germany have discovered the
largest number of elements.

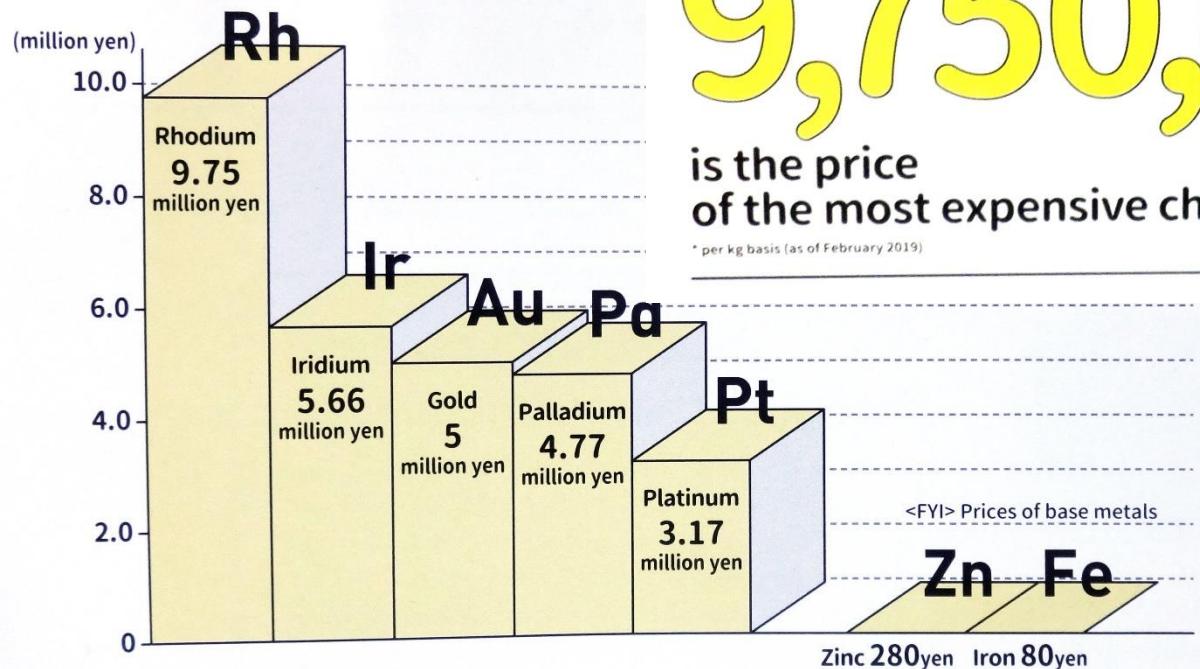
* Confirmed by NIMS. Other views exist, however.

9,750,000 yen*

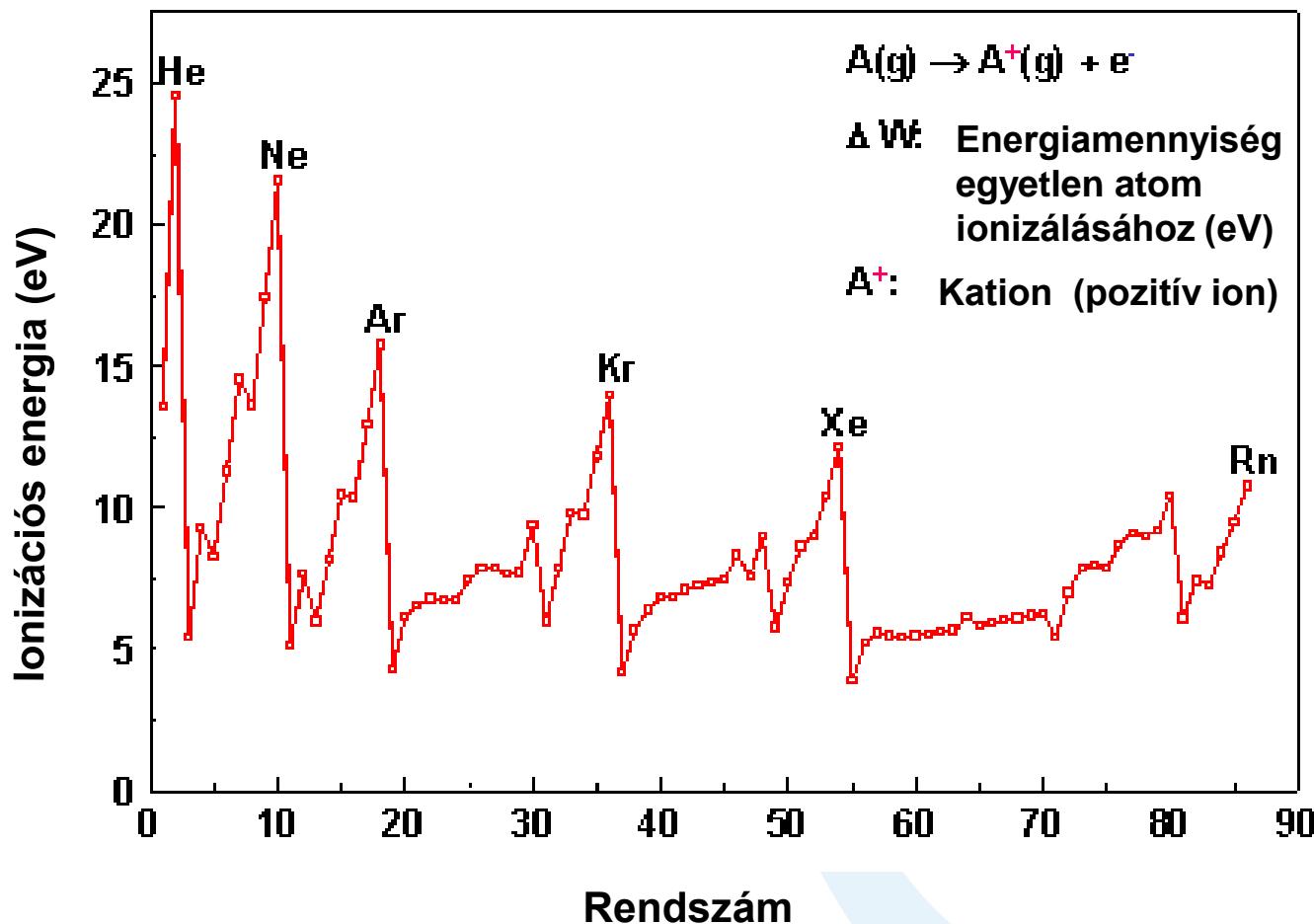
is the price
of the most expensive chemical element.

* per kg basis (as of February 2019)

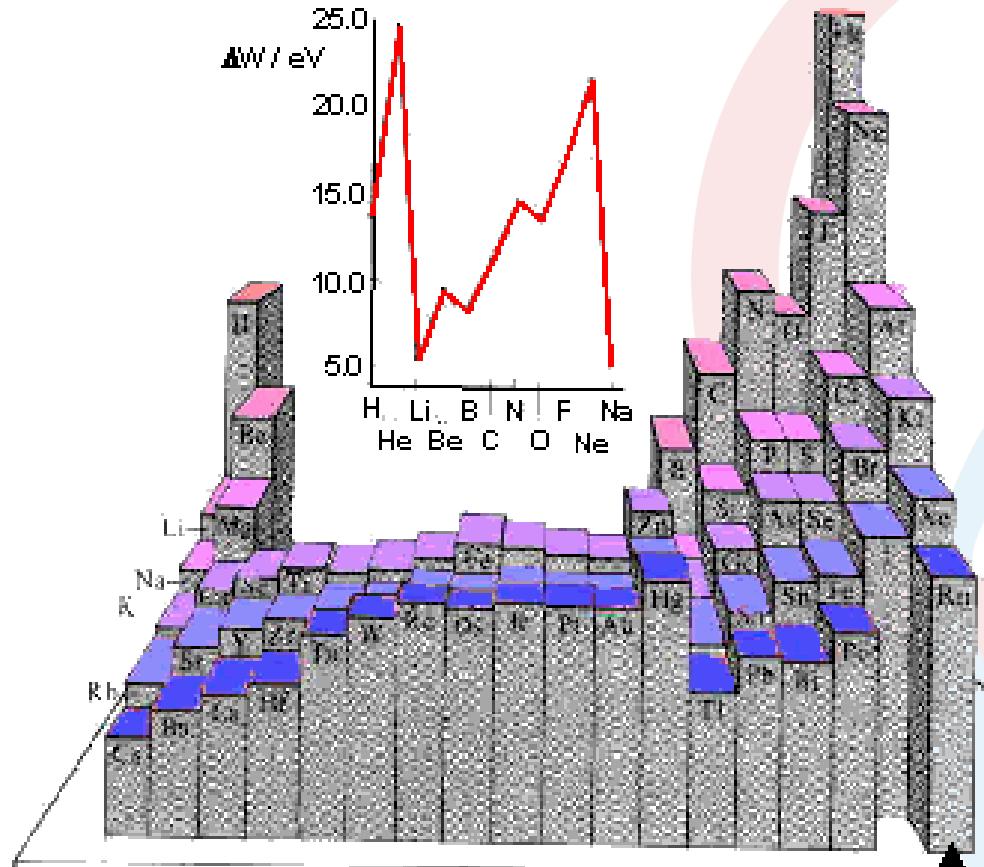
See "Prices of chemical elements" on p. 13



Ionizációs energia



Ionizációs energia

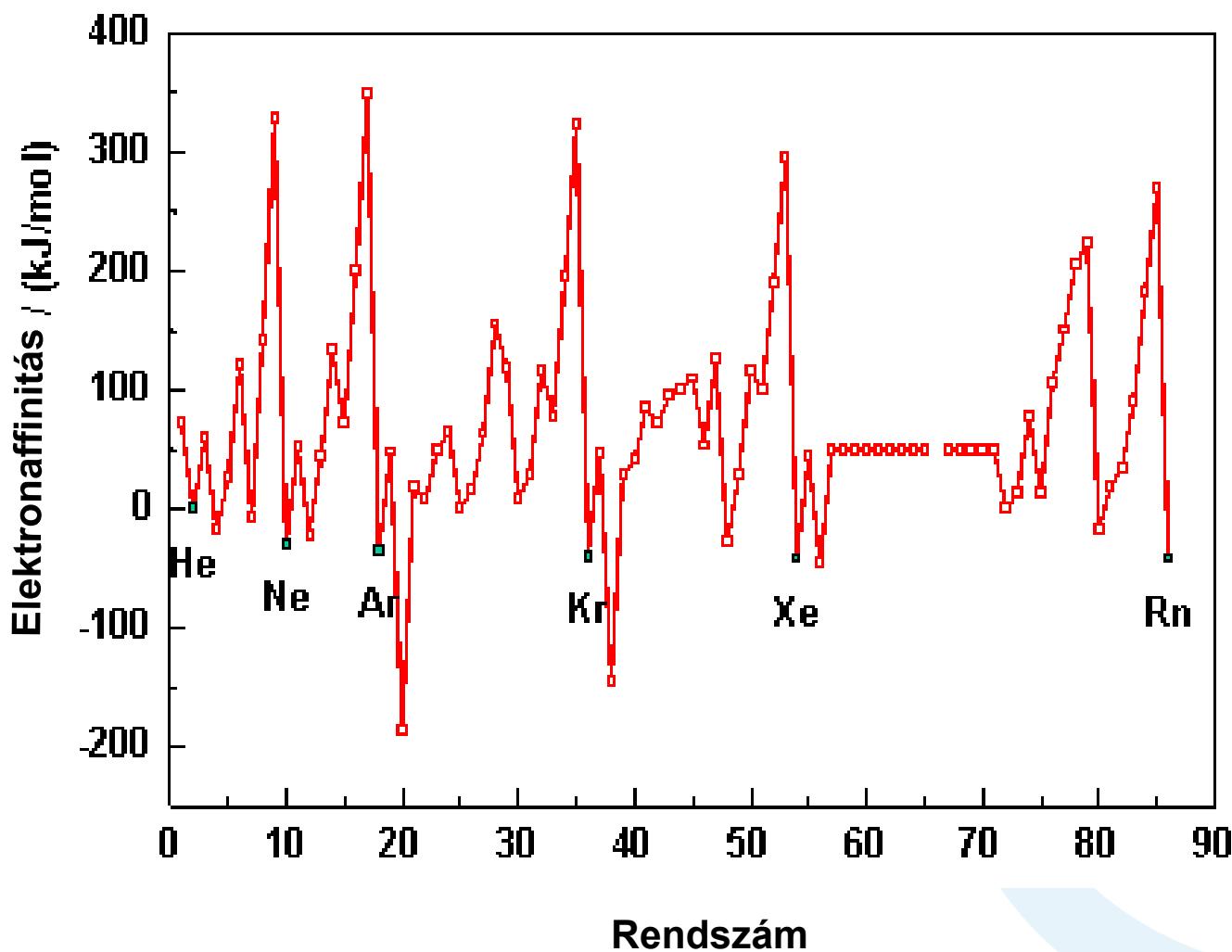


ΔW : Egyetlen atom ionizálásához szükséges energia (eV)

A^+ : Kation (pozitív ion)

Nemesgázok

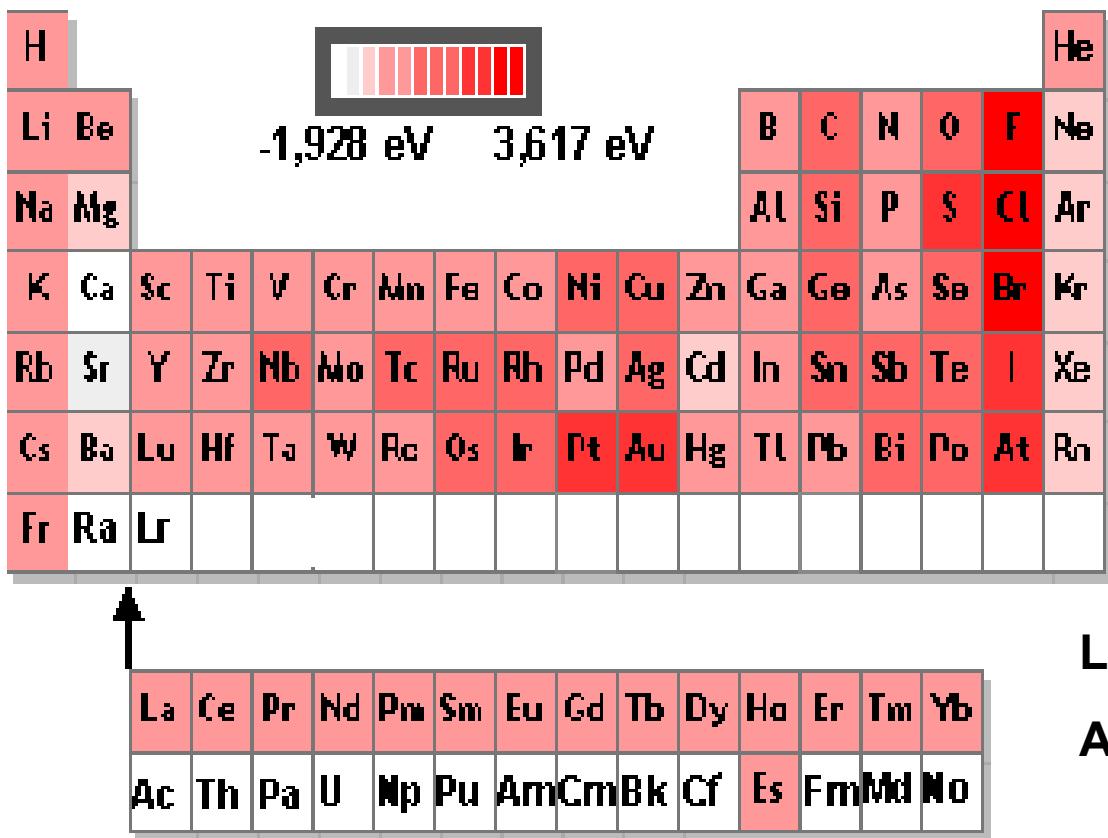
Elektronaffinitás



ΔW : Egyetlen elektron
beépüléséhez
szükséges energia

B: Anion (negatív ion)

Elektronaffinitás



ΔW : Egyetlen elektron beépüléséhez szükséges energia (eV)

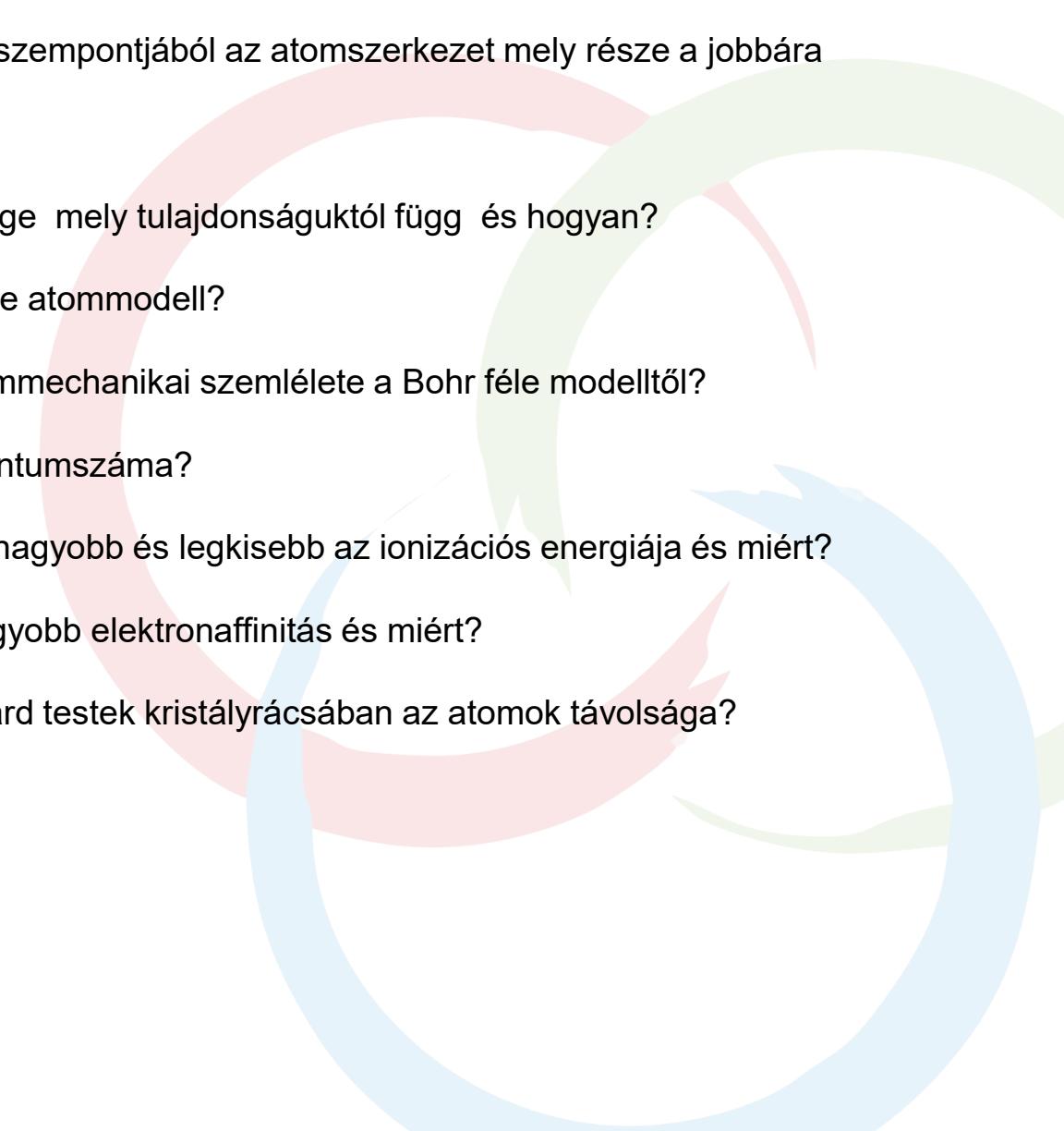
Anion (negatív ion)

B^-

Lantanidák

Aktinidák

Kérdések az 1. részhez

- 
1. Az anyagtulajdonságok zömének szempontjából az atomszerkezet mely része a jobbára meghatározó és miért?
 2. Az elemek kémiai reakcióképessége mely tulajdonságuktól függ és hogyan?
 3. Miben jelent újdonságot a Bohr féle atommodell?
 4. Miben különbözik az atom kvantummechanikai szemlélete a Bohr féle modelltől?
 5. Mit határoz meg az elektron 4 kvantumszáma?
 6. Általában milyen elemeknek a legnagyobb és legkisebb az ionizációs energiája és miért?
 7. Milyen elemekre jellemző a legnagyobb elektronaffinitás és miért?
 8. Milyen nagyságrendbe esik a szilárd testek kristályrácsában az atomok távolsága?

Szenzorteknika

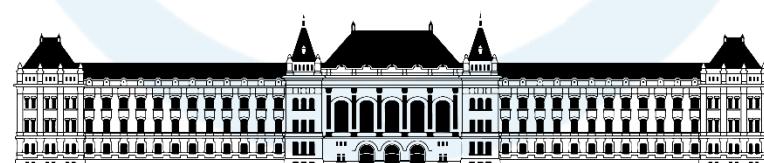


AZ ELŐADÁST ÖSSZEÁLLÍTotta:

DR. BÁRSZNY ISTVÁN
(KUTATÓPROFESSZOR) EMERITUS

MTA
MŰSZAKI FIZIKAI ÉS ANYAGTUDOMÁNYI INTÉZET

ELŐADÓ:
BOJTOS ATTILA
BME - MOGI TANSZÉK



M Ú E G Y E T E M 1 7 8 2



Tematika

Bevezetés a szenzorteknikába

- csoportosítás,
- méréstechnikai tulajdonságok,
- Jelfeldolgozás

Anyagszerkezet

- Atomszerkezet
- Kémiai kötések
- Sávszerkezet
- Félvezetők
- Fémek

Érzékelési elvek fizikai alapjai (szenzor)

- Termikus elvek, hőmérsékletmérés
- Ellenállásváltozás elvén működő érzékelés
- Kapacitás
- Mágneses mérési elvek
- Piezoelektromos mérési elvek
- Optikai-elvek
- Akusztikai elvek

Érzékelési módszerek, alkalmazások (jelátalakító)

- Hossz-, távolság-, elmozdulás-, elfordulásmérés szenzorai
- Sebesség-, térfogatáram-, gyorsulásmérés szenzorai
- Nyomás-, erő-, nyomatékmérés szenzorai
- (Kémiai érzékelés szenzorai)

Aktuátorok

- Motorok
- Piezoelektronos aktuátorok
- Magnetostrikciós aktuátorok

Integrált érzékelő és beavatkozó rendszerek (vendégelőadás)

- Technológiai alapok, MEMS, NEMS, OEMS
- Szenzorhálózatok, IoT



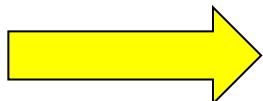
1. Anyagszerkezet

b. Kémiai kötések,
kristályszerkezet

Kémiai kötések

A kötések kialakulásának oka:

...az atomok között ható erőhatások valamennyi kötéstípus esetében



az elektrosztatikus vonzás és taszítás közötti egyensúly

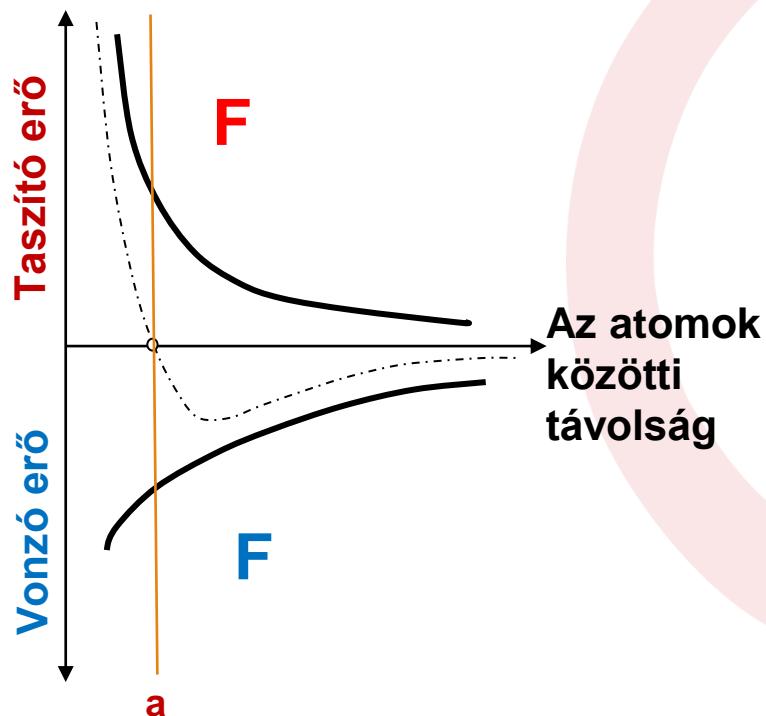
Vegyületképzés:

az atomok külső elektronpályáinak kölcsönhatása révén
(ionizálás, elektronfelvétel, elektronfelhők átlapolása)

Típusai: (határesetek)

- kovalens kötés
- ionos kötés**
- fémes kötés

Az atomok közötti erőhatások



- Coulomb erő pontszerű töltések között:

$$F = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

Taszító erő: a kölcsönhatásba lépő atomok azonos töltésű részecskéi, pl. elektronhéjai között

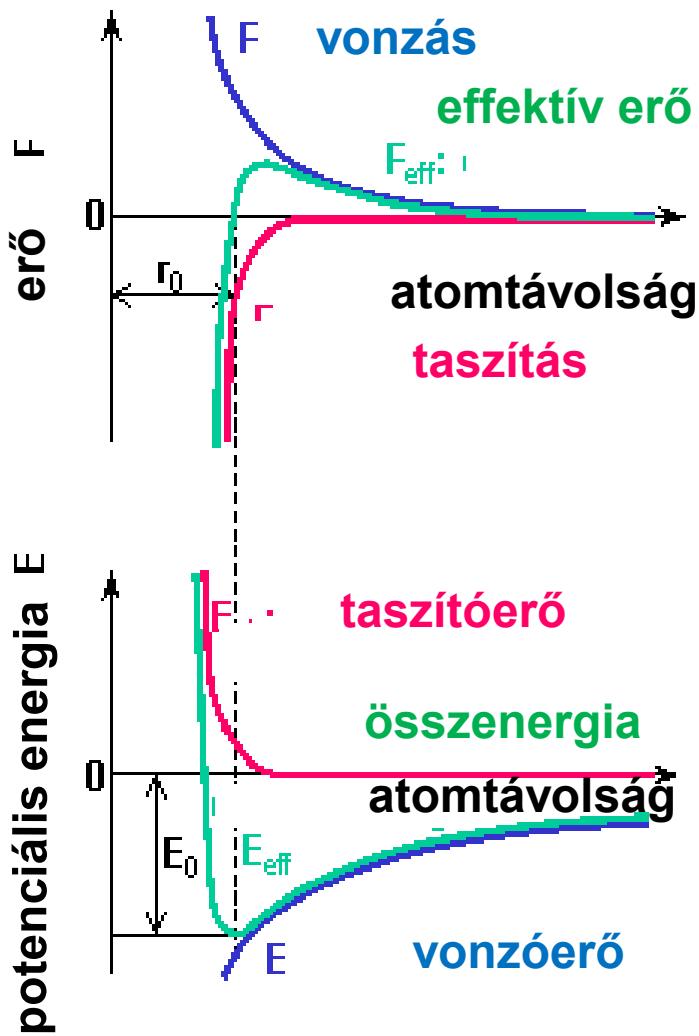
$$F_{\text{taszító}} \sim 1/r^{9..12}$$

Vonzó erő: egyik atom atommagja és a szomszédos atom elektronjai között

$$F_{\text{vonzó}} \sim 1/r^2$$

Az elektrosztatikus kölcsönhatás eredményeképp az az **egyensúlyi távolság (a)** alakul ki, ahol legkisebb az eredő potenciális energia

Az atomok közötti kölcsönhatás távolságuk függvényében



$$F_{\text{eff}} = F_{\text{an}} + F_{\text{ab}}$$

$$F_{\text{an}} \sim \frac{1}{r^1}$$

$$F_{\text{ab}} \sim \frac{1}{r^{9.12}}$$

Pl. pozitív és negatív ionok között

Pl. a teljesen betöltött belső elektronhájak között

Erőegyenlőség:

$$F_{\text{an}} + F_{\text{ab}} = 0$$

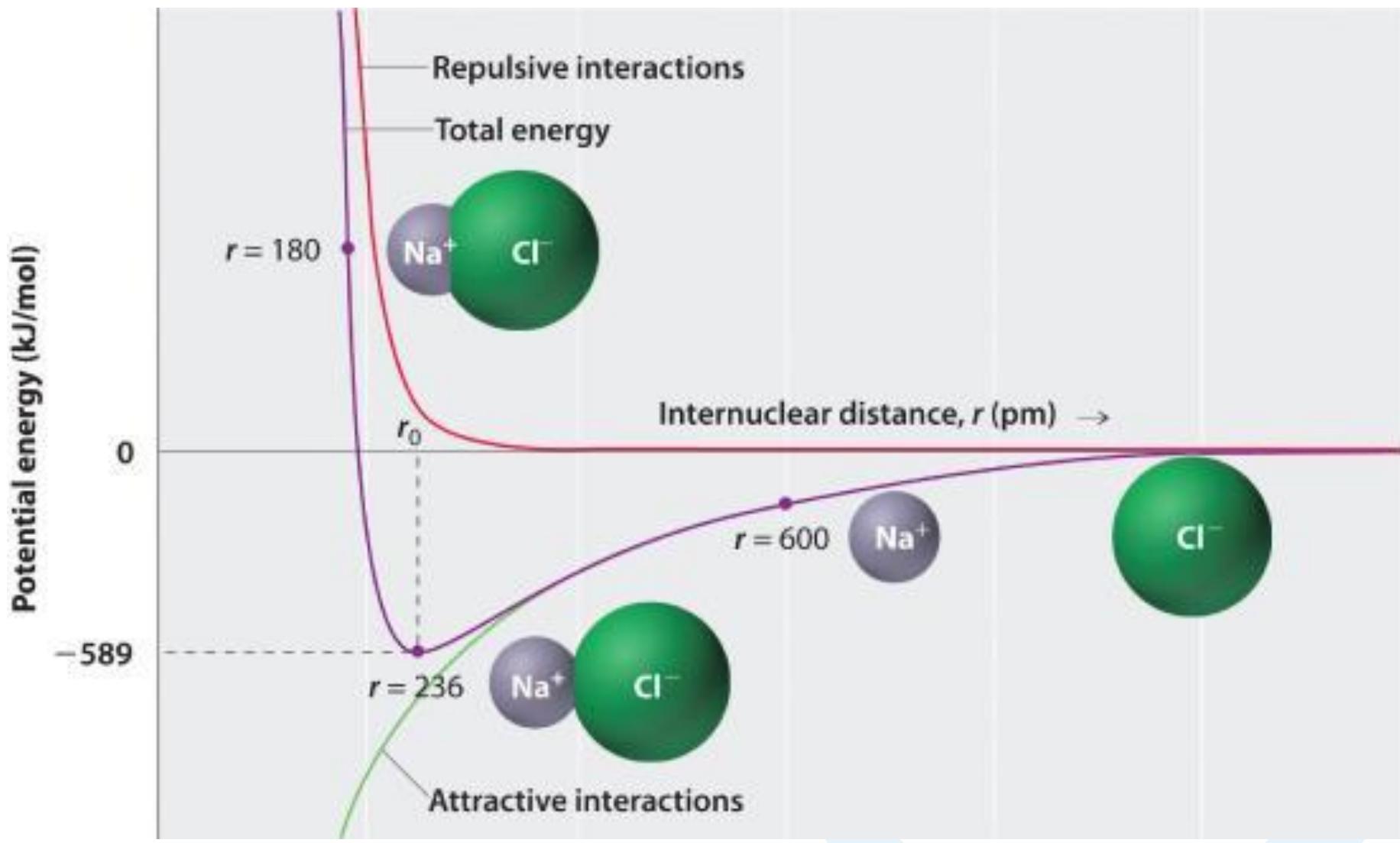
Egyensúlyi atomtávolság: r_0

$$E_{\text{eff}} = \int_E^r F_{\text{eff}} dr = E_{\text{an}} + E_{\text{ab}}$$

Eredő kötési energia:

$$E_0$$

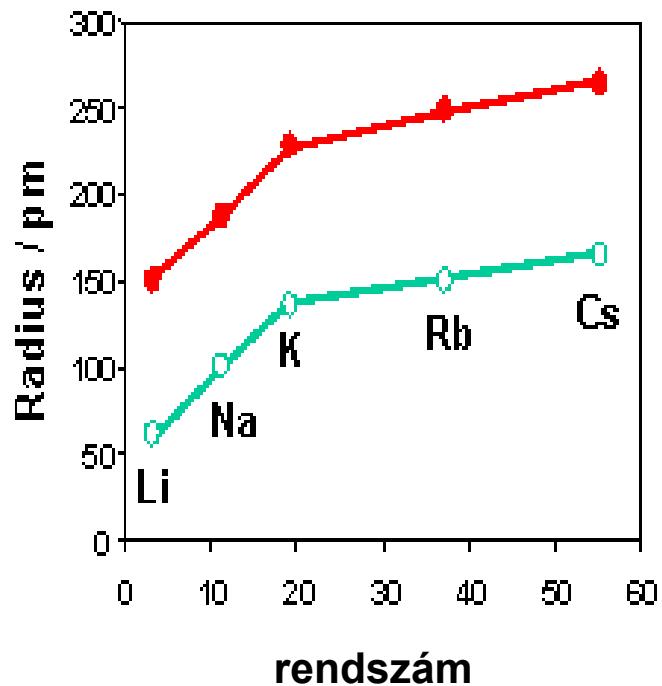
Ionos (heteropoláros) kötés: NaCl



Ionos kötések: atom- és ionsugarak

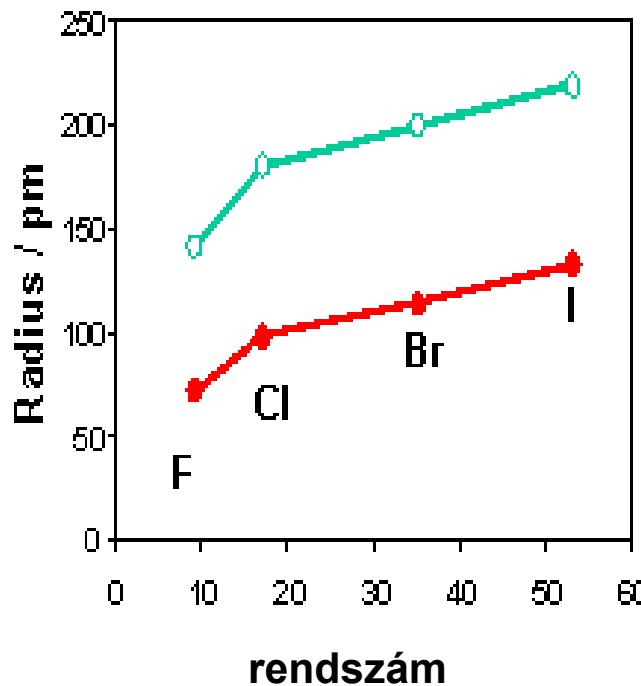
- * az I. oszlop elemei

Kationok



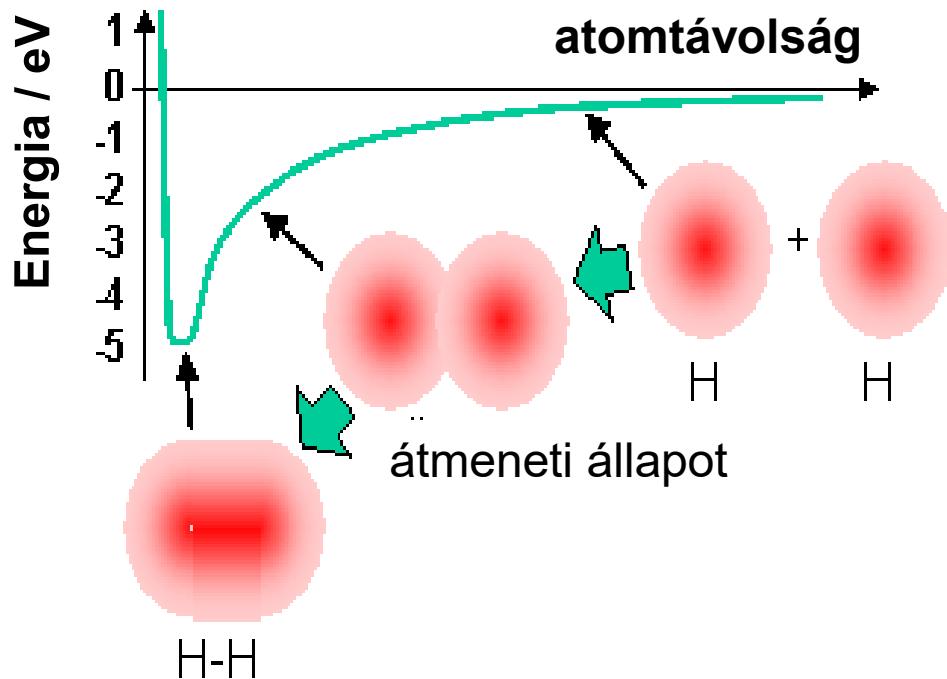
- * a VII. oszlop elemei

Anionok



Kovalens kötés: (homopoláros kötés)

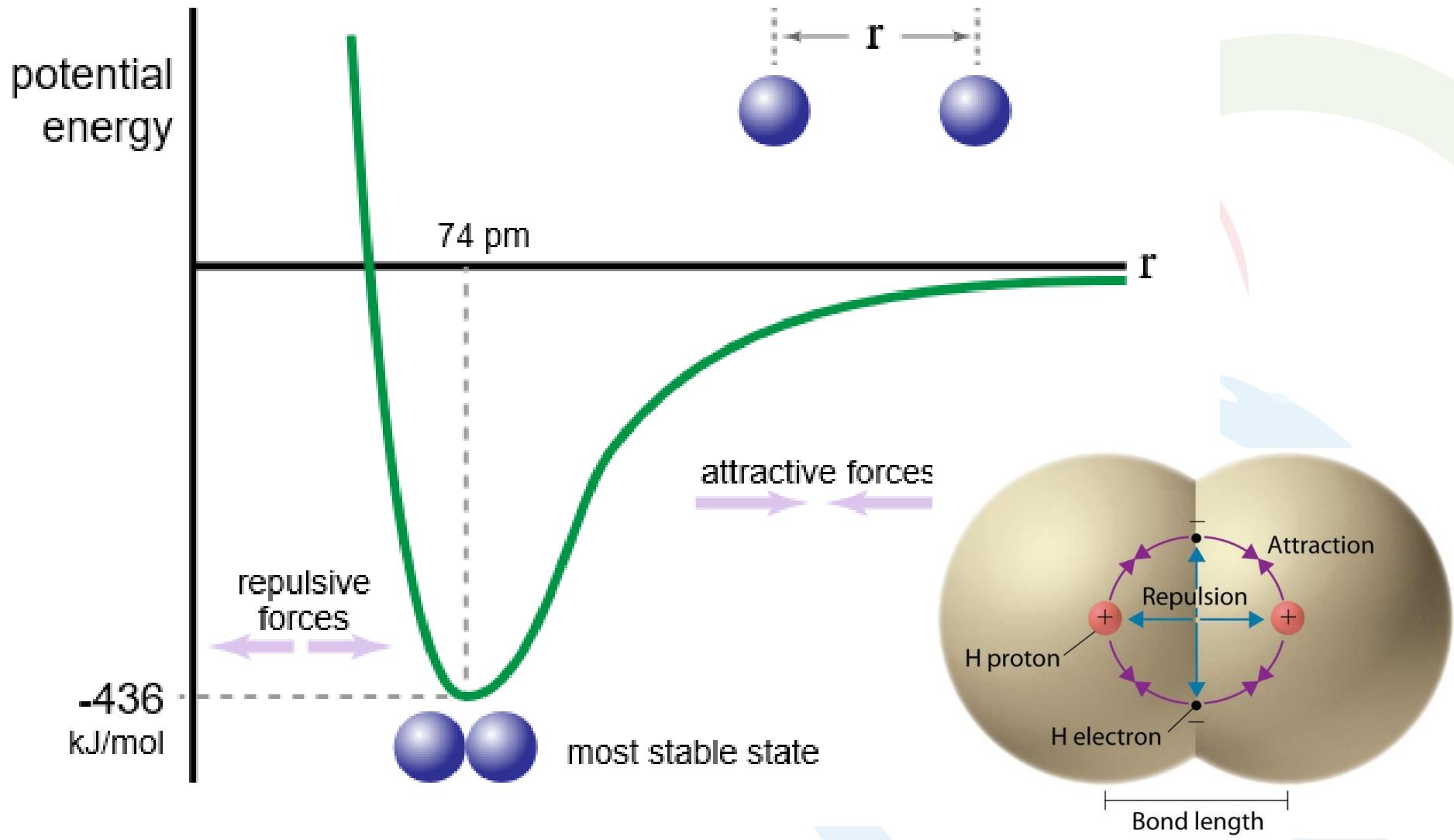
- Részben betöltött elektronhéjak ill. elektronpályák átfedése
- A szomszédos atom(ok) elektronjai segítenek a teljes héjbetöltöttség elérésében
- Növekszik az elektronsűrűség az atommagok között



Példa:
Hidrogén molekula

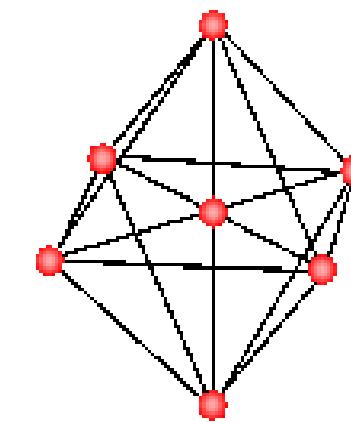
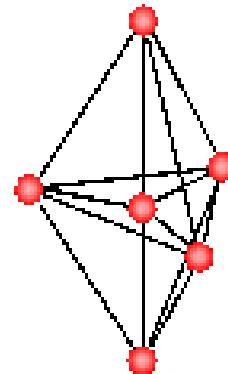
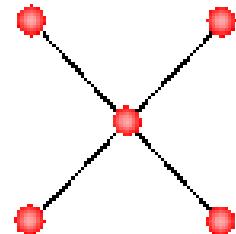
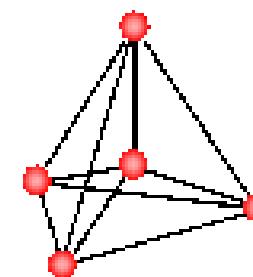
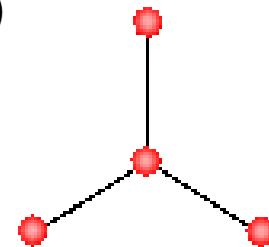
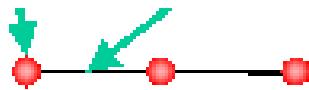
H_2 molekula
 $r_0 = 0,74 \cdot 10^{-10} m$
 $E = 4,33 \cdot 10^5 J/mol$

Hidrogénmolekula



Tipikus hibridizációs struktúrák

Atomtörzs Hibridpálya (kötés)



Az elemek elektronkonfigurációja

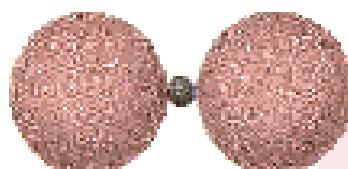
1	H	$1s^1$
2	He	$1s^2$
3	Li	$1s^2 2s^1$
4	Be	$1s^2 2s^2$
5	B	$1s^2 2s^2 2p^1$
6	C	$1s^2 2s^2 2p^2$
7	N	$1s^2 2s^2 2p^3$
8	O	$1s^2 2s^2 2p^4$
9	F	$1s^2 2s^2 2p^5$
10	Ne	$1s^2 2s^2 2p^6$
11	Na	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$
12	Mg	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$
13	Al	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$
14	Si	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$
15	P	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^3$
16	S	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^4$
17	Cl	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^5$
18	Ar	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$
19	K	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^1$

17	Cl	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^5$	
18	Ar	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	
19	K	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$4s^1$
20	Ca	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$4s^2$
21	Sc	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$3d^1 4s^2$
22	Ti	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$3d^2 4s^2$
23	V	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$3d^3 4s^2$
24	Cr	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$3d^5 4s^1$
25	Mn	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$3d^5 4s^2$
26	Fe	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$3d^6 4s^2$
27	Co	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$3d^7 4s^2$
28	Ni	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$3d^8 4s^2$
29	Cu	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$3d^{10} 4s^1$
30	Zn	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$3d^{10} 4s^2$
31	Ga	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$3d^{10} 4s^2 4p^1$
32	Ge	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$3d^{10} 4s^2 4p^2$
33	As	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$3d^{10} 4s^2 4p^3$
34	Se	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$3d^{10} 4s^2 4p^4$
35	Br	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$3d^{10} 4s^2 4p^5$
36	Kr	$1s^2$	$2s^2$	$2p^6$	$3s^2$	$3p^6$	$3d^{10} 4s^2 4p^6$

Koordináció, ionsugarak aránya és geometriák

Koordináció,
(Atomsugarak aránya
Kation-Anion r_K/r_A)

2, ($< 0,155$)



3, ($0,155 \dots 0,225$)



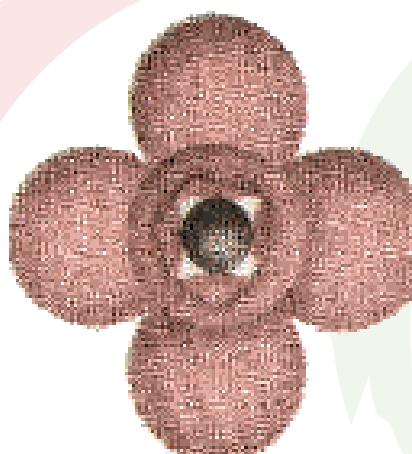
4, ($0,225 \dots 0,414$)



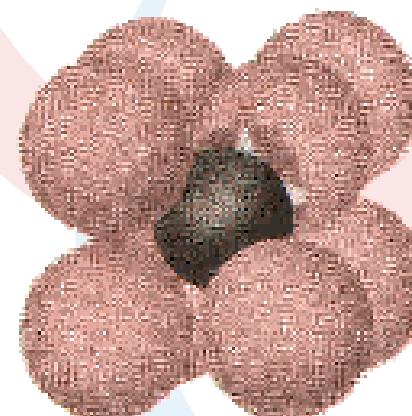
Geometria:

Koordináció,
(Atomsugarak aránya
Kation-Anion r_K/r_A)

6, ($0,414 \dots 0,732$)



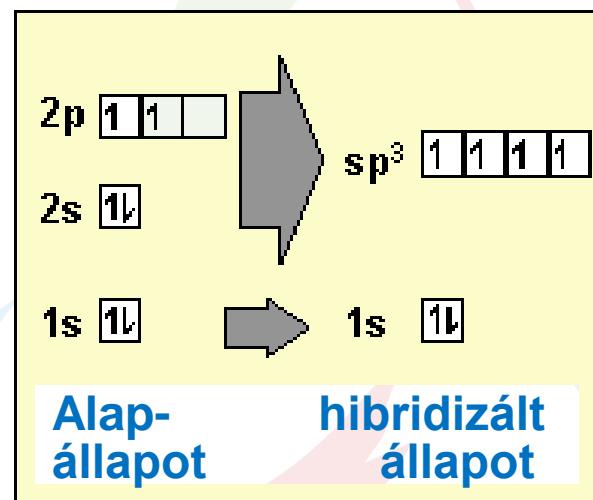
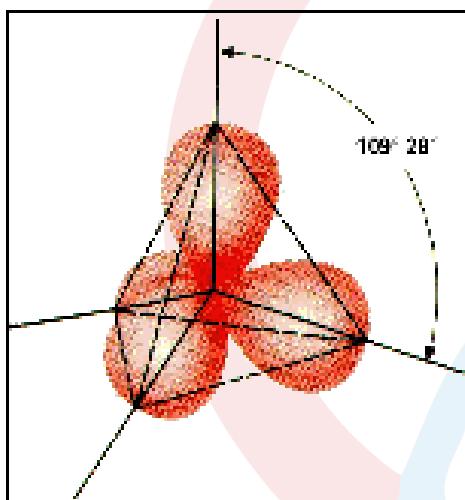
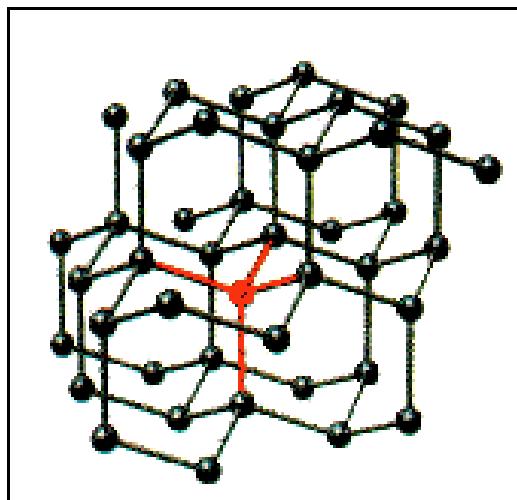
8, ($0,732 \dots 1,0$)



12, ($> 1,0$)

Kovalens kötés (homopoláros kötés)

Gyémántszerkezetű: C, Si, Ge (izomorf)



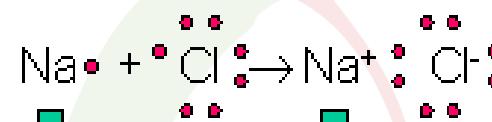
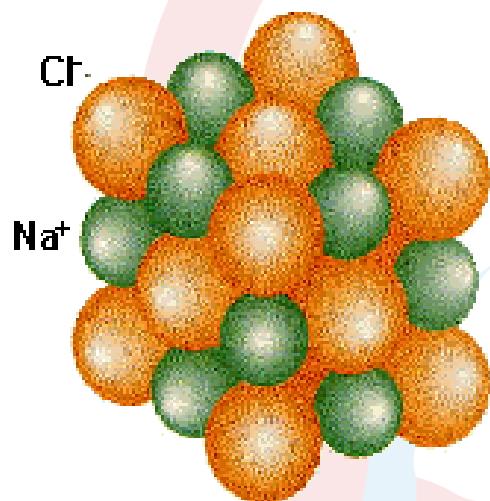
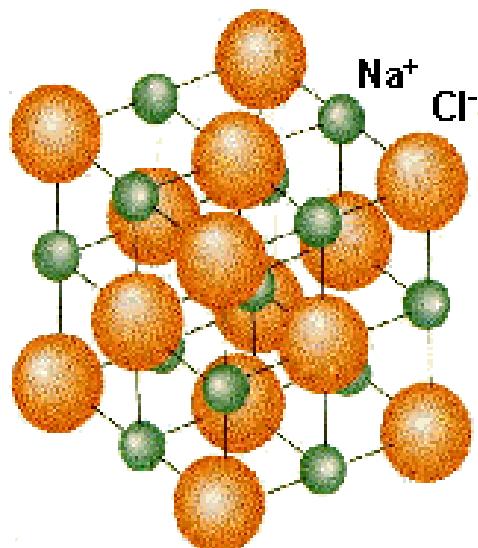
Koordináció: 4

sp³-hibridpálya

Az elektronok
energia-sémája
a C atomban

Az elektronok
energia-sémája
a gyémántban

Ionom kötés (heteropoláros kötés)

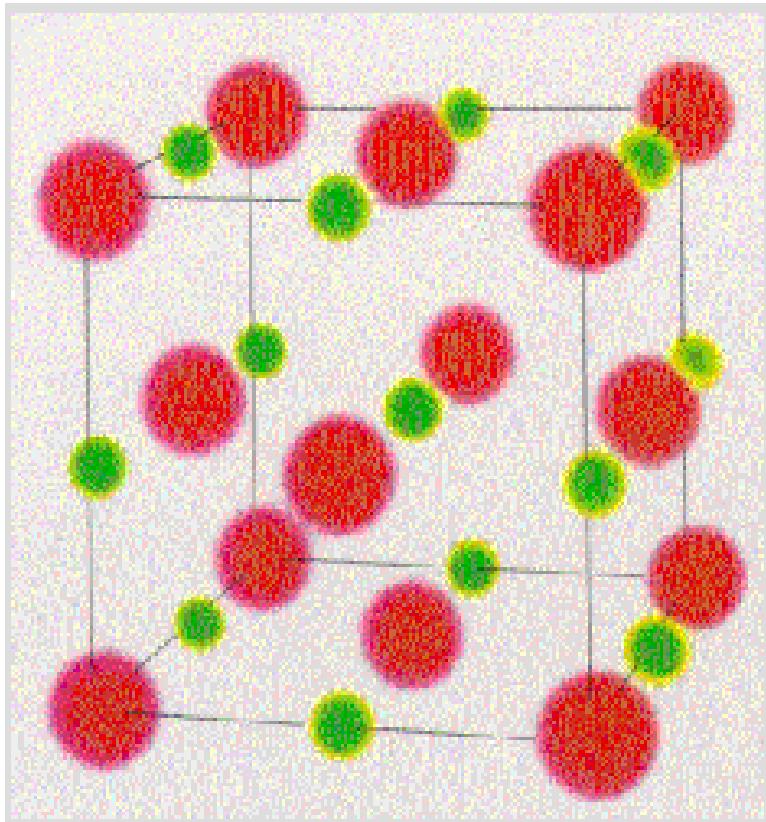


Nátrium: Kation
Kis ionizációs energia

Chlor: Anion
Nagy elektronaffinitás

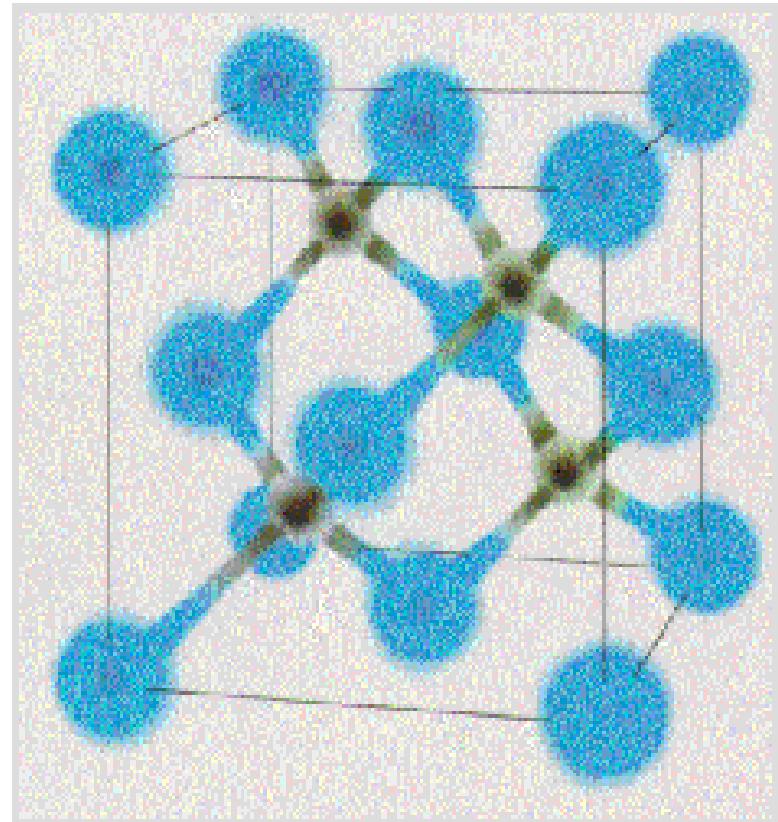
Kristályképződés

a kötéstípusok és koordináció (kötésszög) függvényében



Ionos kötés

pl: NaCl

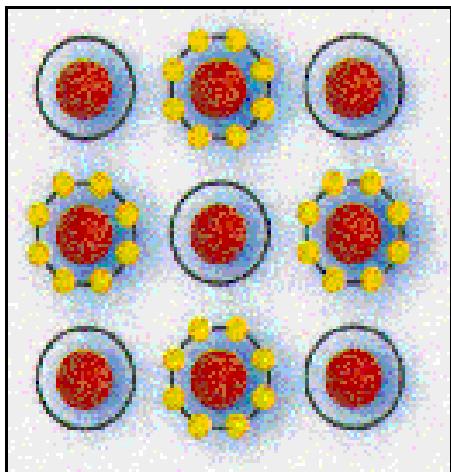


Kovalens kötés

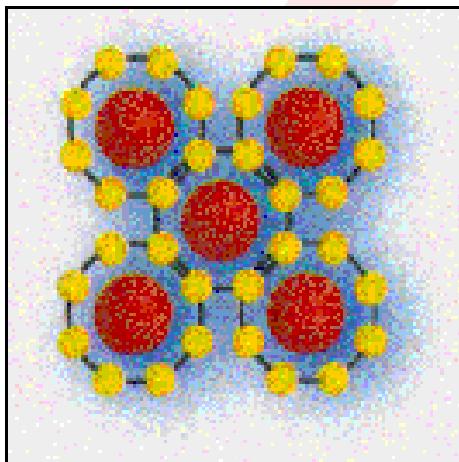
pl: GaAs

Kötéstípusok összehasonlítása

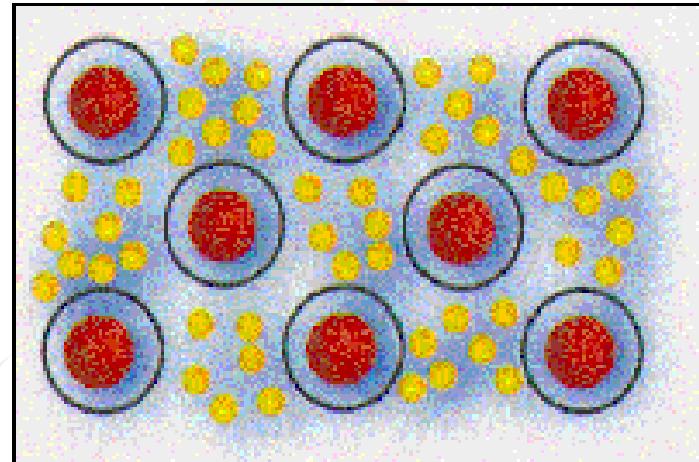
ionos



kovalens



fémes



I.+VII.: NaCl
II.+VI.: MgO
oszlopok
elemeinek
vegyületei

Félvezetők: Molekulák: Intermetallikusv.:

SiC, GaAs, CH_4

InP, InSb,

Elemi félvezetők:

GaN

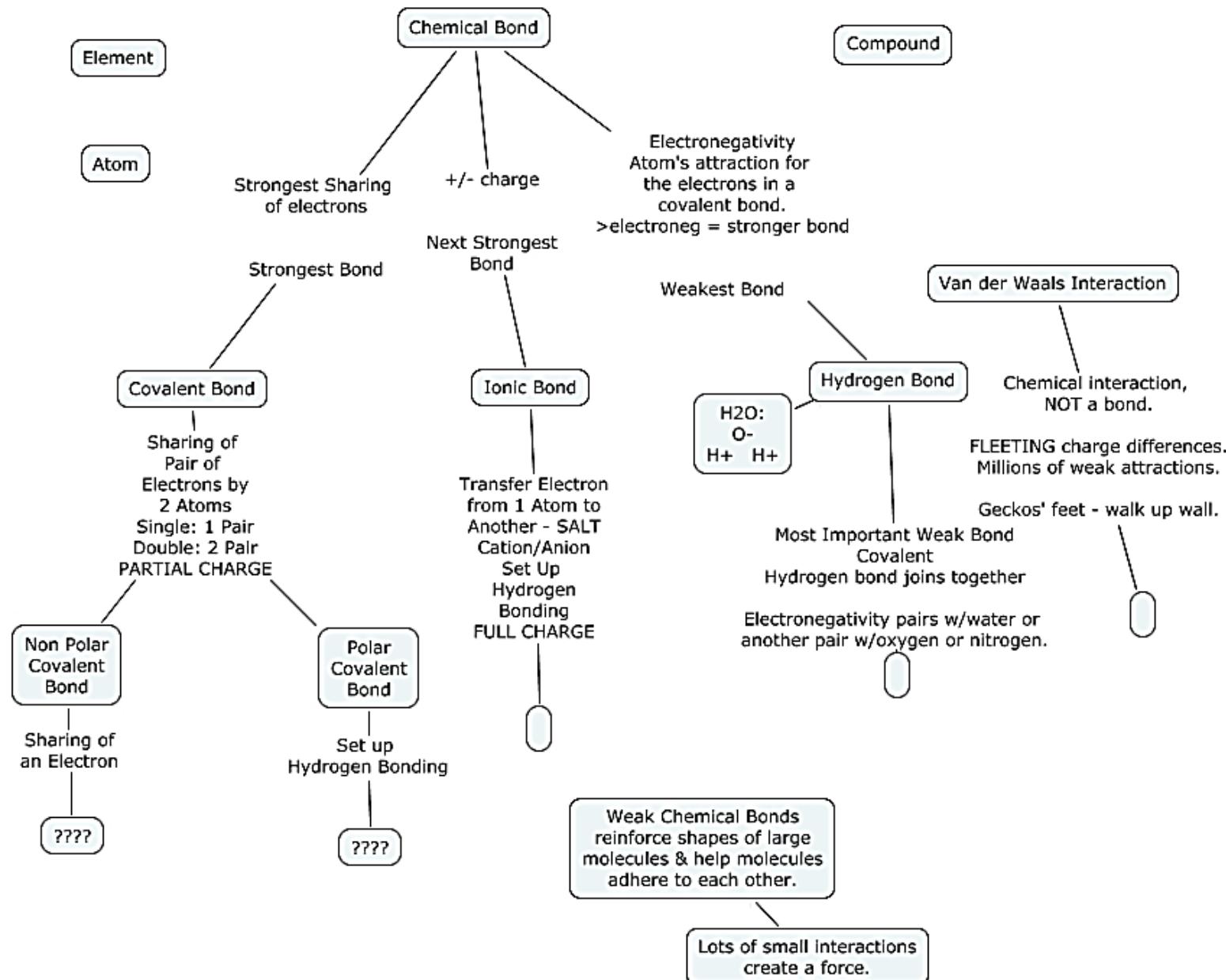
Si, Ge, C

Elemi fémek

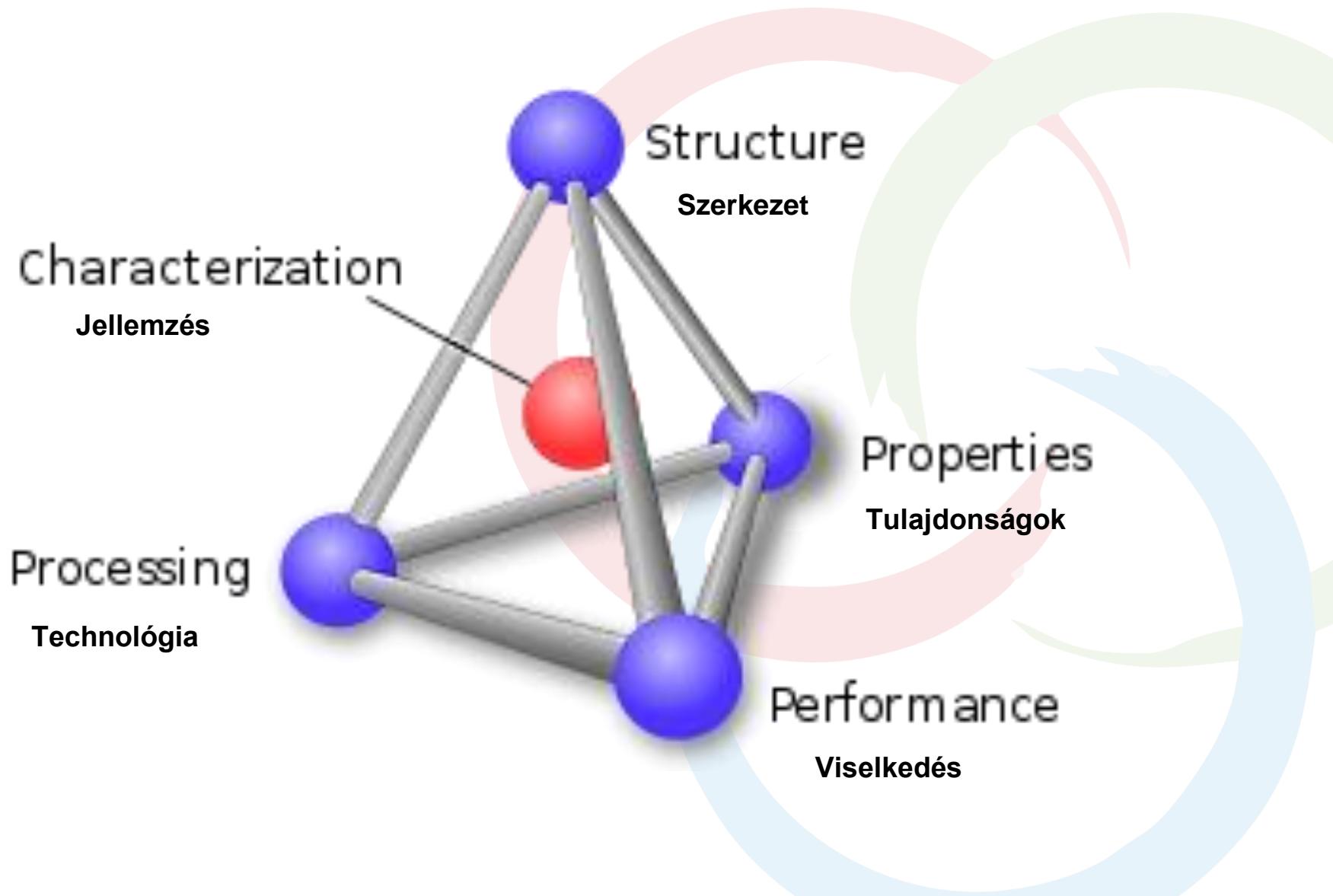
Concept Map

See diagrams
in text!

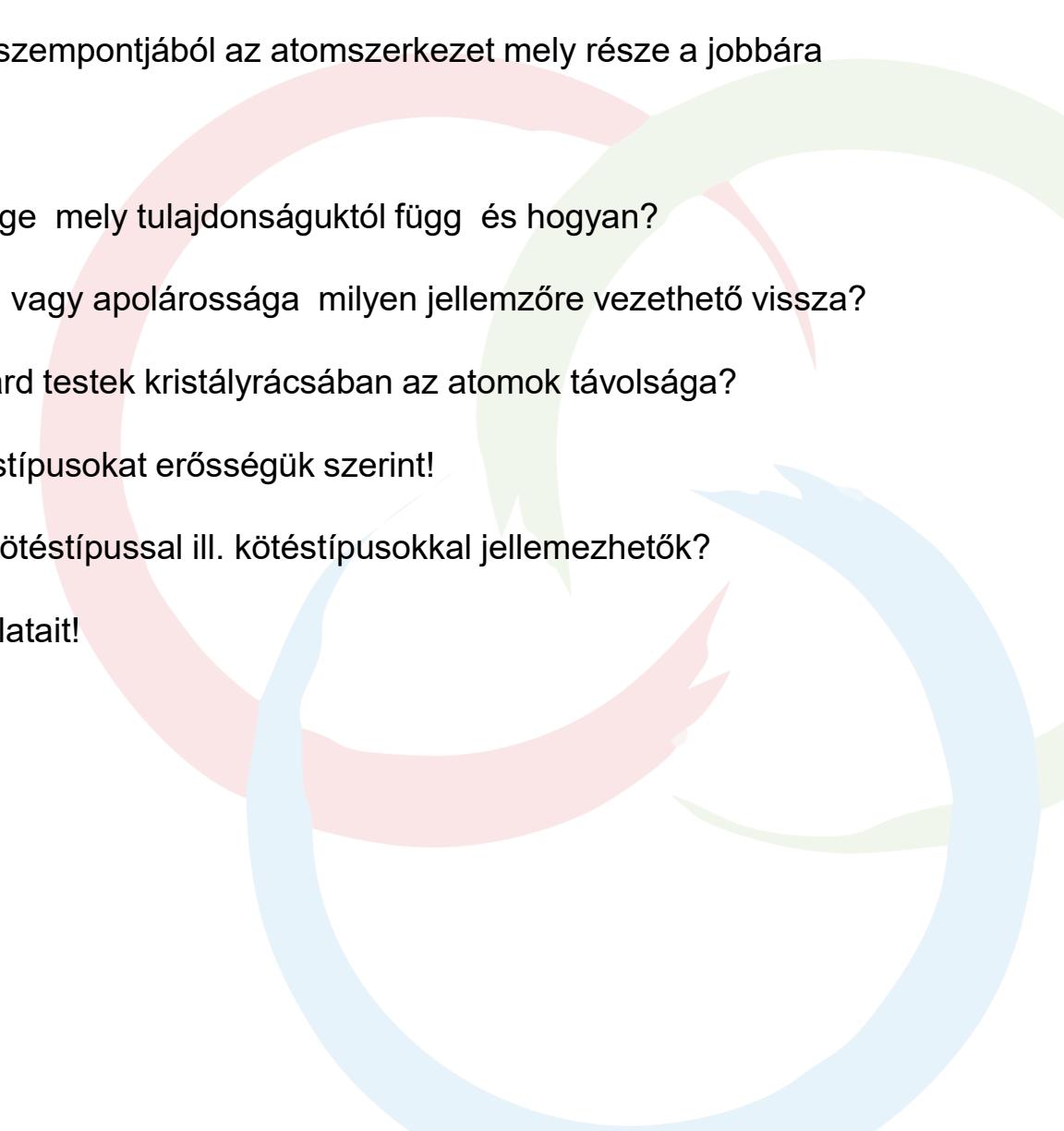
Molecule



Anyagtudományi tetraéder



Kérdések az 1. részhez

- 
1. Az anyagtulajdonságok zömének szempontjából az atomszerkezet mely része a jobbára meghatározó és miért?
 2. Az elemek kémiai reakcióképessége mely tulajdonságuktól függ és hogyan?
 3. A vegyületmolekulák polárossága vagy apolárossága milyen jellemzőre vezethető vissza?
 4. Milyen nagyságrendbe esik a szilárd testek kristályrácsában az atomok távolsága?
 5. Tegye növekvő sorrendbe a kötéstípusokat erősségük szerint!
 6. Mik az elemi félvezetők, és mely kötéstípussal ill. kötéstípusokkal jellemezhetők?
 7. Sorolja fel a szén allotróp módosulatait!

Tematika

1. Anyagismeret

- a) Atomszerkezet
- b) Kötések, kristályszerkezet
- c) Sávszerkezet, félvezetők
- d) Fémek

2. Érzékelési elvek, fizikai jelenségek

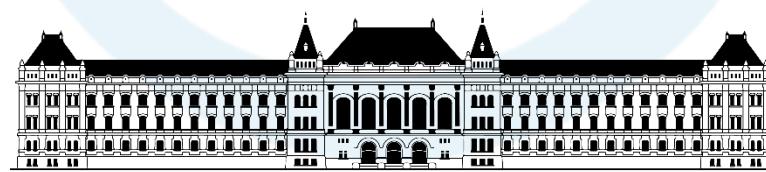
- a) Termikus elvek
- b) Ellenállás
- c) Kapacitás
- d) Mágneses indukció
- e) Piezo-elvek
- f) Optikai elvek

3. Érzékelési módszerek, alkalmazások

- a) Hossz, elmozdulás
- b) Sebesség, gyorsulás
- c) Nyomás, erő, nyomaték
- d) Kémiai érzékelés

4. Integrált érzékelő rendszerek

- a) Technológiai alapok, MEMS, NEMS, OEMS
- b) Szenzorhálózatok, IoT



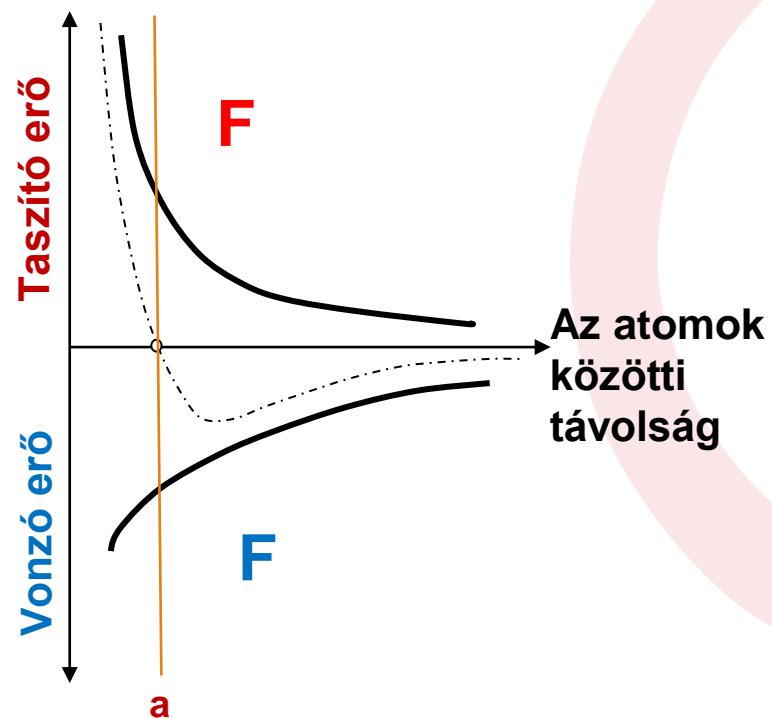
M Ú E G Y E T E M 1 7 8 2



1. Anyagismeret

c. Sávszerkezet, félvezetők

Az atomok közötti erőhatások



- Coulomb erő pontszerű töltések között:

$$F = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

Taszító erő: a kölcsönhatásba lépő atomok azonos töltésű részecskéi, pl. elektronhéjai között

$$F_{\text{taszító}} \sim 1/r^{9..12}$$

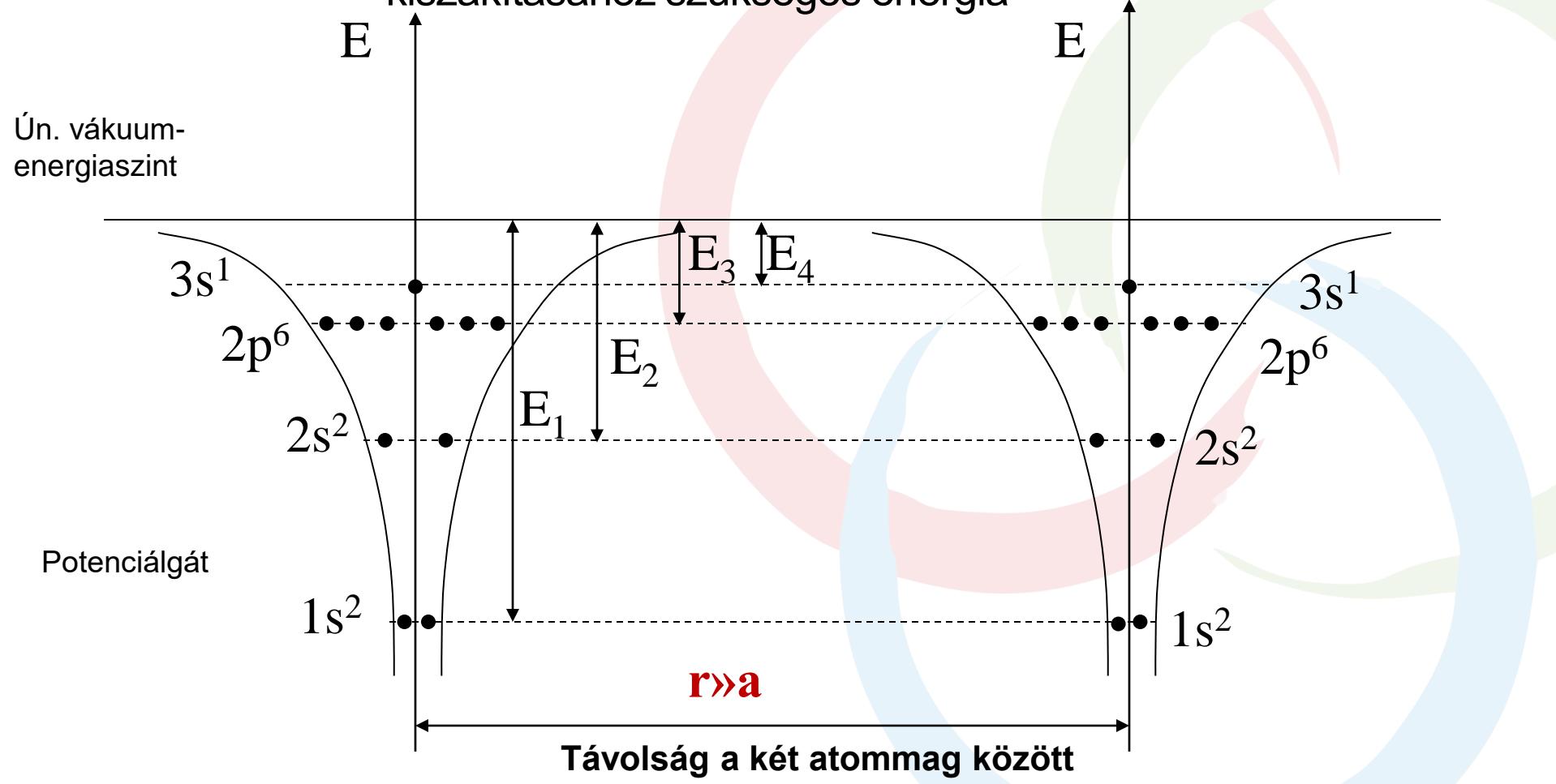
Vonzó erő: egyik atom atommagja és a szomszédos atom elektronjai között

$$F_{\text{vonzó}} \sim 1/r^2$$

Az elektrosztatikus kölcsönhatás eredményeképp az az **egyensúlyi távolság (a)** alakul ki, ahol legkisebb az eredő potenciális energia

Megengedett energiaállapotok az atomon belül a 11-es rendszámú Na két atomja egymástól távol

E_1, E_2, \dots : az adott energiaszint állapotaiban lévő elektronok kiszakításához szükséges energia



Nincs elektroncsere a két azonos felépítésű atom között, amik külön „rendszeret alkotnak”!

Energiaszintek felhasadása

A 11-es rendszámú Na két szomszédos atomja a kristályrácsban

A potenciálgát maximuma:
az atomtávolság csökkenésével
csökken

Ún. vákuum-
energiászint

Vezetési sáv
alsó éle (E_c)

Vegyértéksáv
felső éle (E_v)

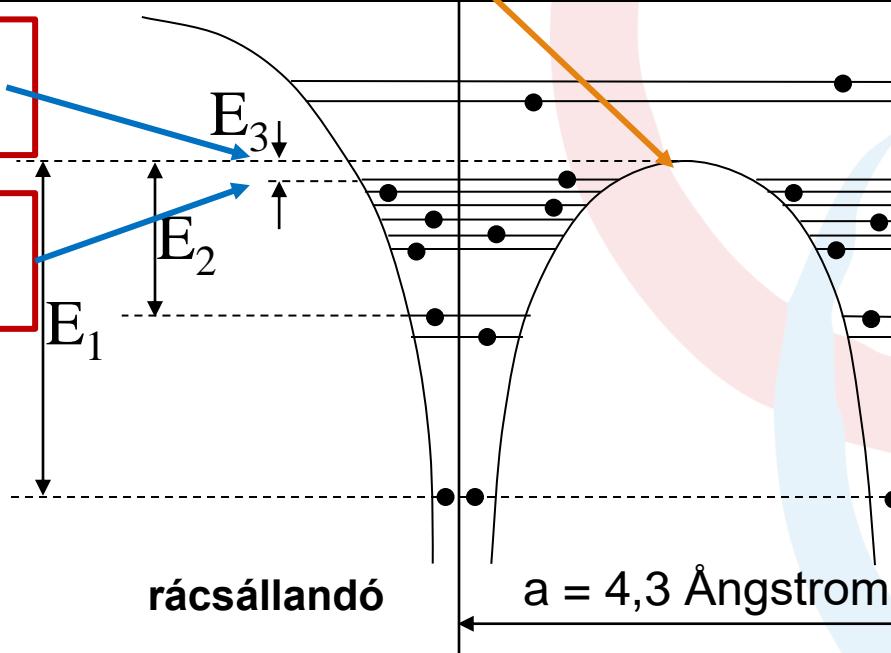
E

E

A vezetési sávban az elektronok
mozgó töltéshordozók, azaz
szabadon közlekednek a
„rendszerben”: !

Vezetési sáv
(szabad
elektronok)

Vegyértéksáv
(legkülső teljesen
betöltött
energiászintig:
benne az elektronok
kötöttek)



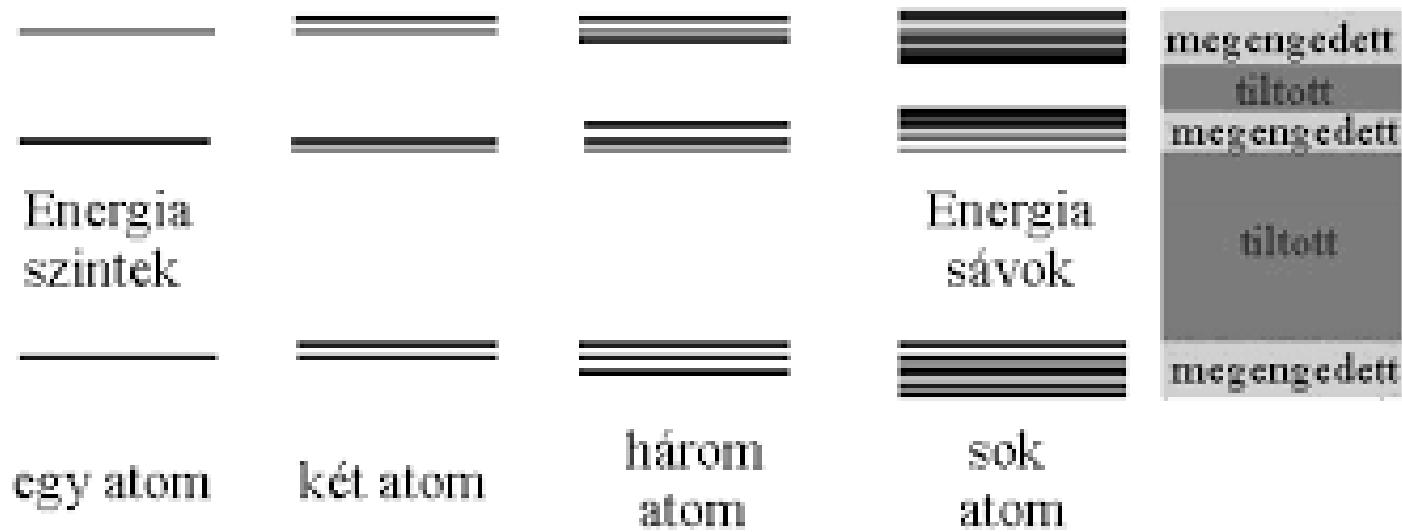
a = 4,3 Ångstrom

A sávmodell kialakulása

A két (ill. több) atom immár egy rendszert alkot:



erre kell teljesülnie a Pauli-elvnek, azaz



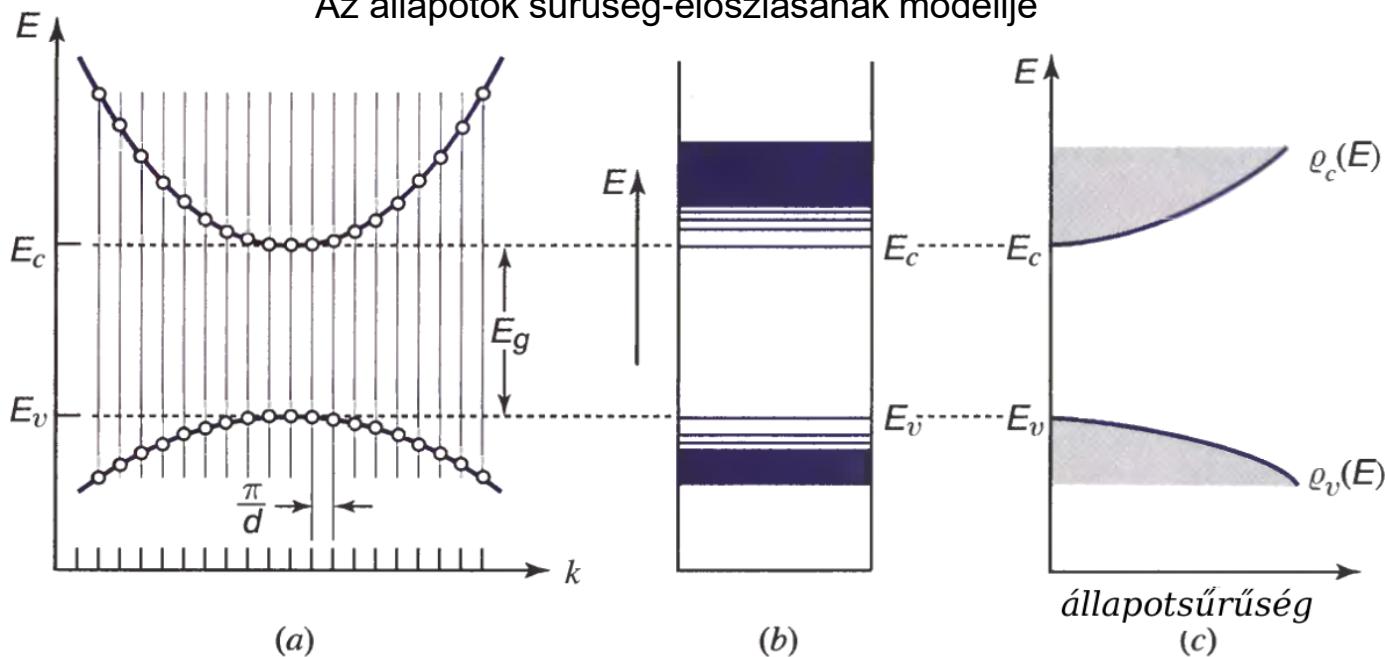
az „azonos energiaszintek” felhasadnak,



ezek sokasága „energiasávot” alkot!

Megengedett elektronállapotok a vezetési sávban

Az állapotok sűrűség-eloszlásának modellje



$$N(E) = 4\pi \left[\frac{2m_n}{h^2} \right]^{3/2} E^{1/2}$$

m_n - effektív elektrontömeg

$$m_n = \left[\frac{d^2 E}{d \bar{p}} \right]^{-1} E - \bar{p} \quad (\text{energia-kristály impulzus momentum})$$

↓
parabola a vezetési sáv alja

GaAs	-	szűk parabola	→	$m_n = 0,07m_o$	[100]
Si	-	szélesebb parabola	→	$m_n = 0,19m_o$	

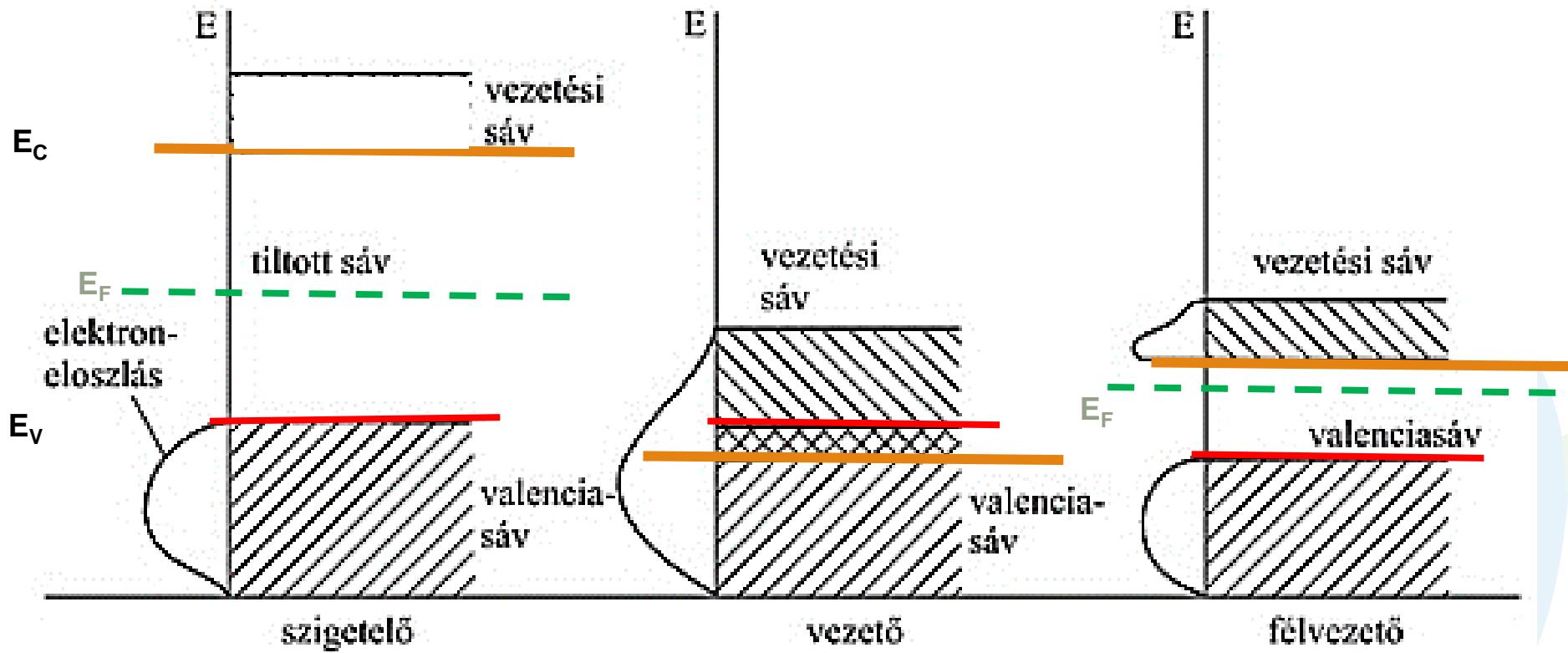
anizotróp = orientációfüggő!!

Az anyagok osztályozása a sávmodell alapján

- A sávok relatív helyzete és
- az egyes sávokban megengedett elektronállapotok betöltöttsége szerint

Fermi-energiaszint E_F

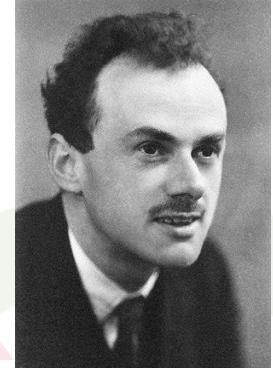
A Fermi-energiaértéknél alacsonyabb energiájú megengedett elektronállapotok nagy valószínűséggel fel vannak töltve elektronokkal.



elektromos viselkedésük alapján

Fermi-Dirac statisztika (F–D–statisztika)

Leírja a részecskék energiaállapotát egy rendszerben, amely azonos részecskékből áll a Pauli-elv alapján.



Enrico Fermi
1901-1954

Paul Dirac
1902-1984

Meghatározandó: (adott T -n)

Elektronok száma a vezetési sáv állapotaiban

$$n(E) \rightarrow N(E) \cdot F(E)$$

$$n = \int_0^{E_{\max}} n(E) dE = \int_0^{E_{\max}} N(E) \cdot F(E) dE$$

$F(E)$ Fermi-Dirac eloszlásfüggvény → betöltöttségi valószínűség

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

k – Boltzman állandó
 E_F – Fermi-szint

$$F(E_F) = \frac{1}{2} \quad \text{szimetrikus } E_F \text{ körül}$$

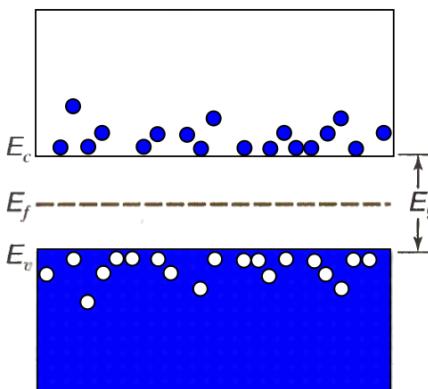
Közelíthető

$$3kT + E_F$$

$$-3kT + E_F$$

$$F(E) > 20$$

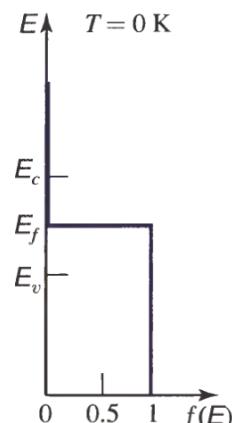
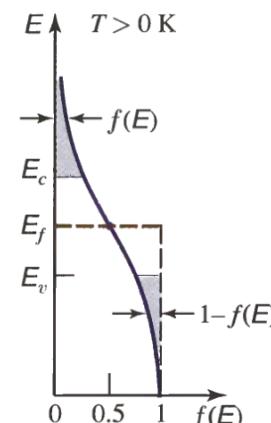
$$F(E) < 0,05$$



<https://www.muszeroldal.hu/measurenotes/felvezeto.pdf>

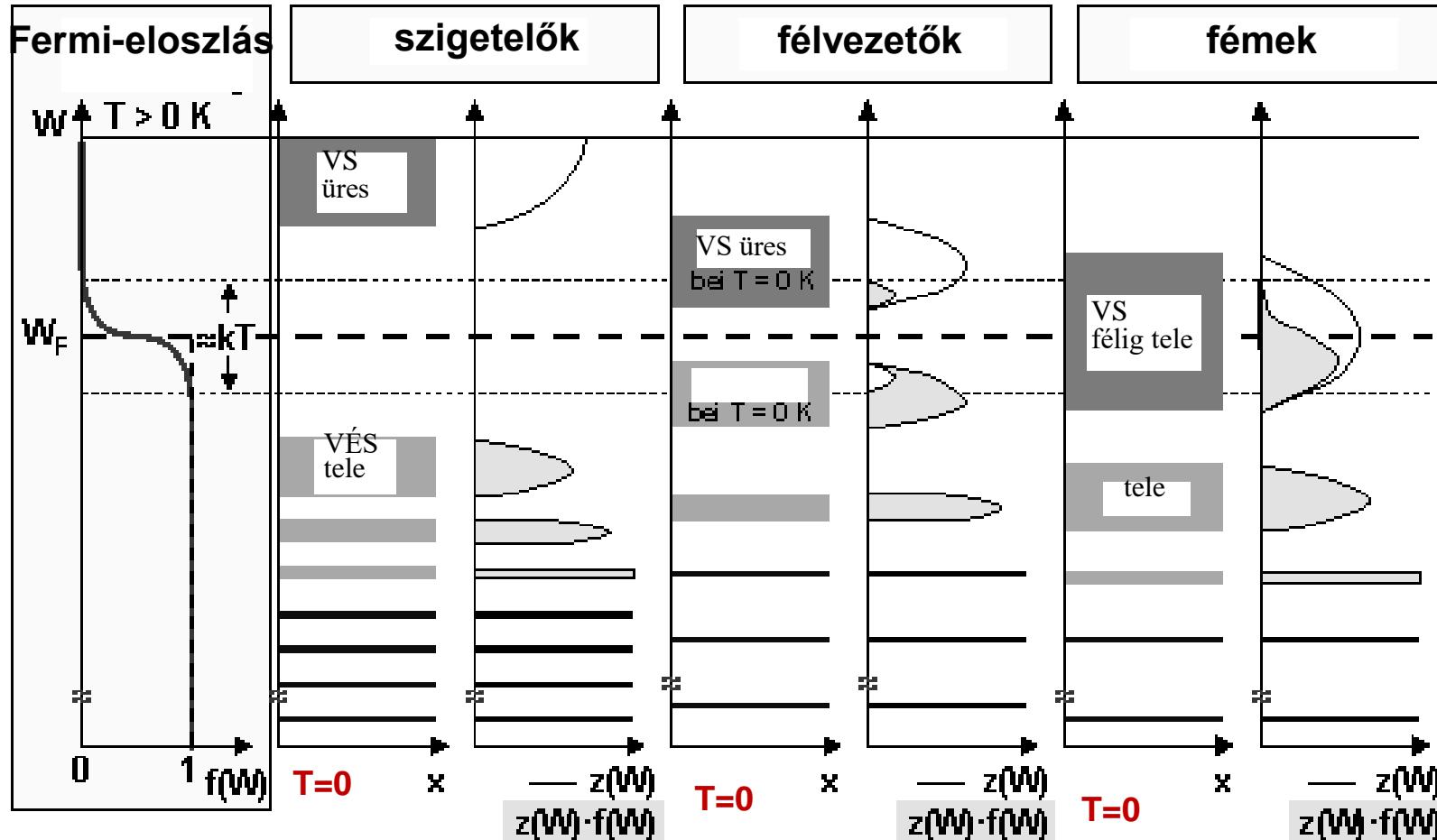
Félvezető fizikai összefoglaló

<https://slideplayer.hu/slide/2088145/>



Szilárd testek sávmodellje

Elektronok: Fermi-eloszlás, állapot-eloszlás, tényleges elektron-sűrűség



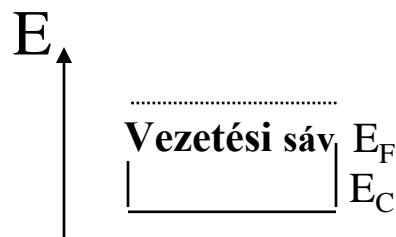
$z(E)$: Megengedett elektronállapot-eloszlás $f(E)z(E)$: tényleges elektron-sűrűség

$f(E)$: Fermi-eloszlás: adott E állapot betöltöttségi valószínűsége T hőmérsékleten

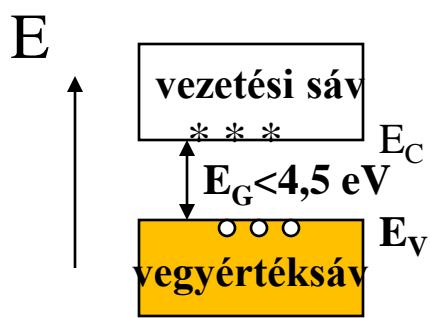
E_F : Fermi-szint: vezető elektronok maximális energiaszintje (0 K-en, külső erőtér nulla)

Szilárd testek osztályozása:

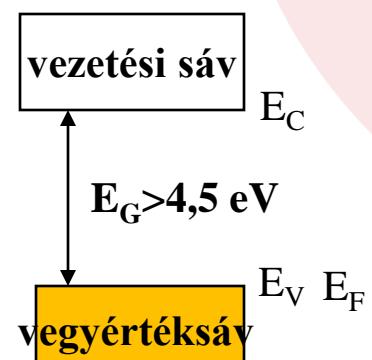
Vezetők:



Félvezetők:



Szigetelők:



Vegyértéksáv (valenciasáv)

a legfelső, (vegyérték)elektronokkal teljesen telített energiasáv ($T_0 = 0 \text{ K}$)

E_V : a vegyértéksáv felső élének energiaszintje

Vezetési sáv

a legalsó üres, vagy (vezetési) elektronokkal csak részben telített energiasáv ($T_0 = 0 \text{ K}$)

E_C : a vezetési sáv alsó élének energiaszintje

Tiltott sáv E_G

E_V és E_C közötti távolság, azon energiaértékek, amelyeket elektronok nem vehetnek fel

Félvezetők a periódusos rendszerben

Periódus	Oszlop							Tiltott sávszélesség W_G (eV)		
	II	III	IV	V	VI	VII		T = 0 K	T = 300 K	
2	Be	B	C	N	O	F	Si	1,17	1,11	
3	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ge	0,74	0,68	
4	Ca Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	GaAs	1,52	1,38	
5	Sr Cd	In	Sn	Sb	Te	J	InAs	0,36	0,35	
							InSb	0,23	0,18	
							CdS	2,58	2,42	
							CdTe	1,61	1,45	
							ZnO	3,44	3,20	

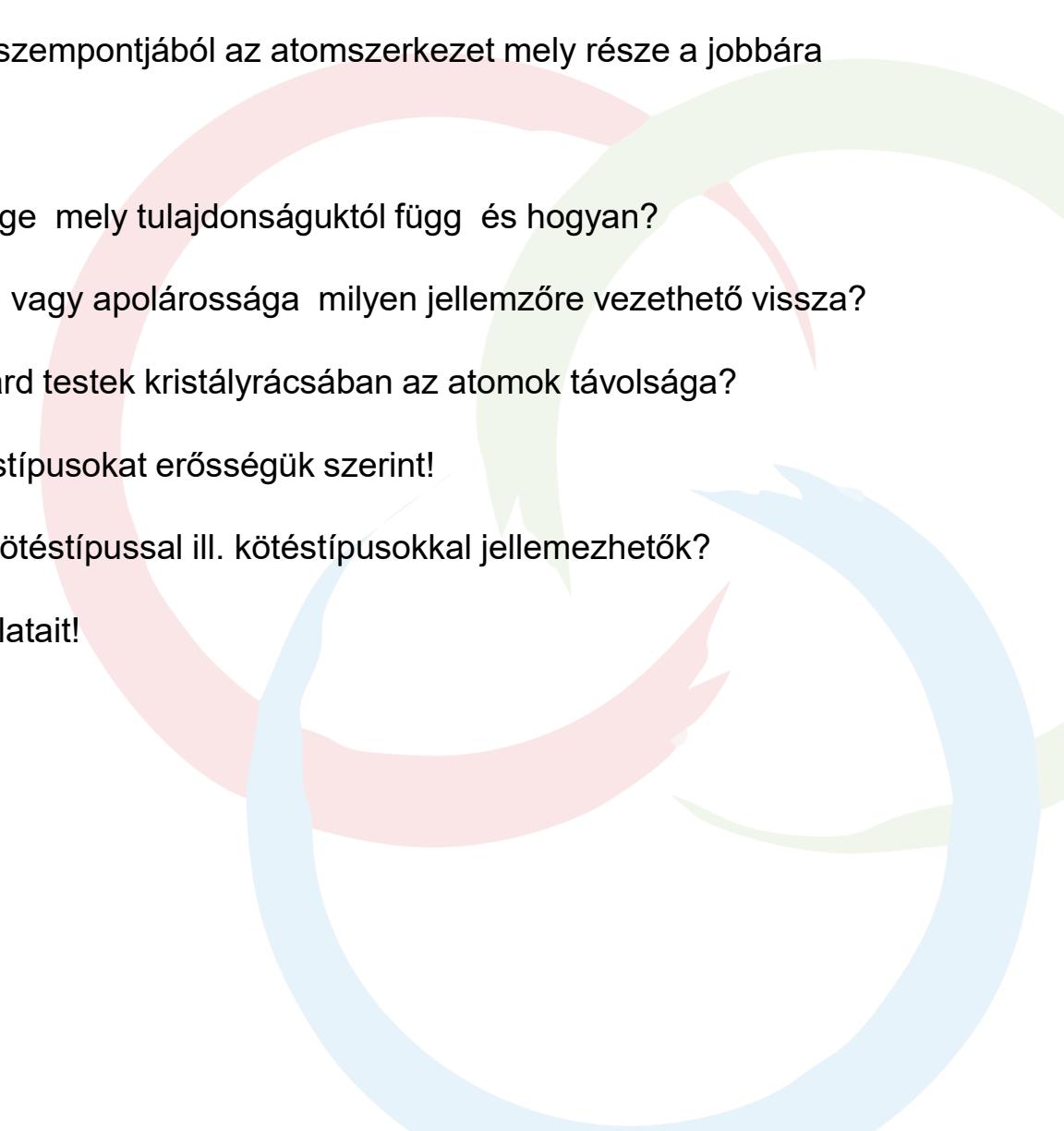
akceptor donor

Si-ban és Ge-ban

<https://www.muszeroldal.hu/measurenotes/felvezeto.pdf>

<https://slideplayer.hu/slide/2088145/>

Kérdések az 1. részhez

- 
1. Az anyagtulajdonságok zömének szempontjából az atomszerkezet mely része a jobbára meghatározó és miért?
 2. Az elemek kémiai reakcióképessége mely tulajdonságuktól függ és hogyan?
 3. A vegyületmolekulák polárossága vagy apolárossága milyen jellemzőre vezethető vissza?
 4. Milyen nagyságrendbe esik a szilárd testek kristályrácsában az atomok távolsága?
 5. Tegye növekvő sorrendbe a kötéstípusokat erősségük szerint!
 6. Mik az elemi félvezetők, és mely kötéstípussal ill. kötéstípusokkal jellemezhetők?
 7. Sorolja fel a szén allotróp módosulatait!

Tematika

1. Anyagismeret

- a) Atomszerkezet
- b) Kötések, kristályszerkezet
- c) Sávszerkezet, félvezetők
- d) Fémek

2. Érzékelési elvek, fizikai jelenségek

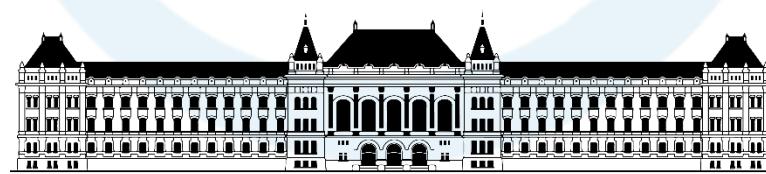
- a) Termikus elvek
- b) Ellenállás
- c) Kapacitás
- d) Mágneses indukció
- e) Piezo-elvek
- f) Optikai elvek

3. Érzékelési módszerek, alkalmazások

- a) Hossz, elmozdulás
- b) Sebesség, gyorsulás
- c) Nyomás, erő, nyomaték
- d) Kémiai érzékelés

4. Integrált érzékelő rendszerek

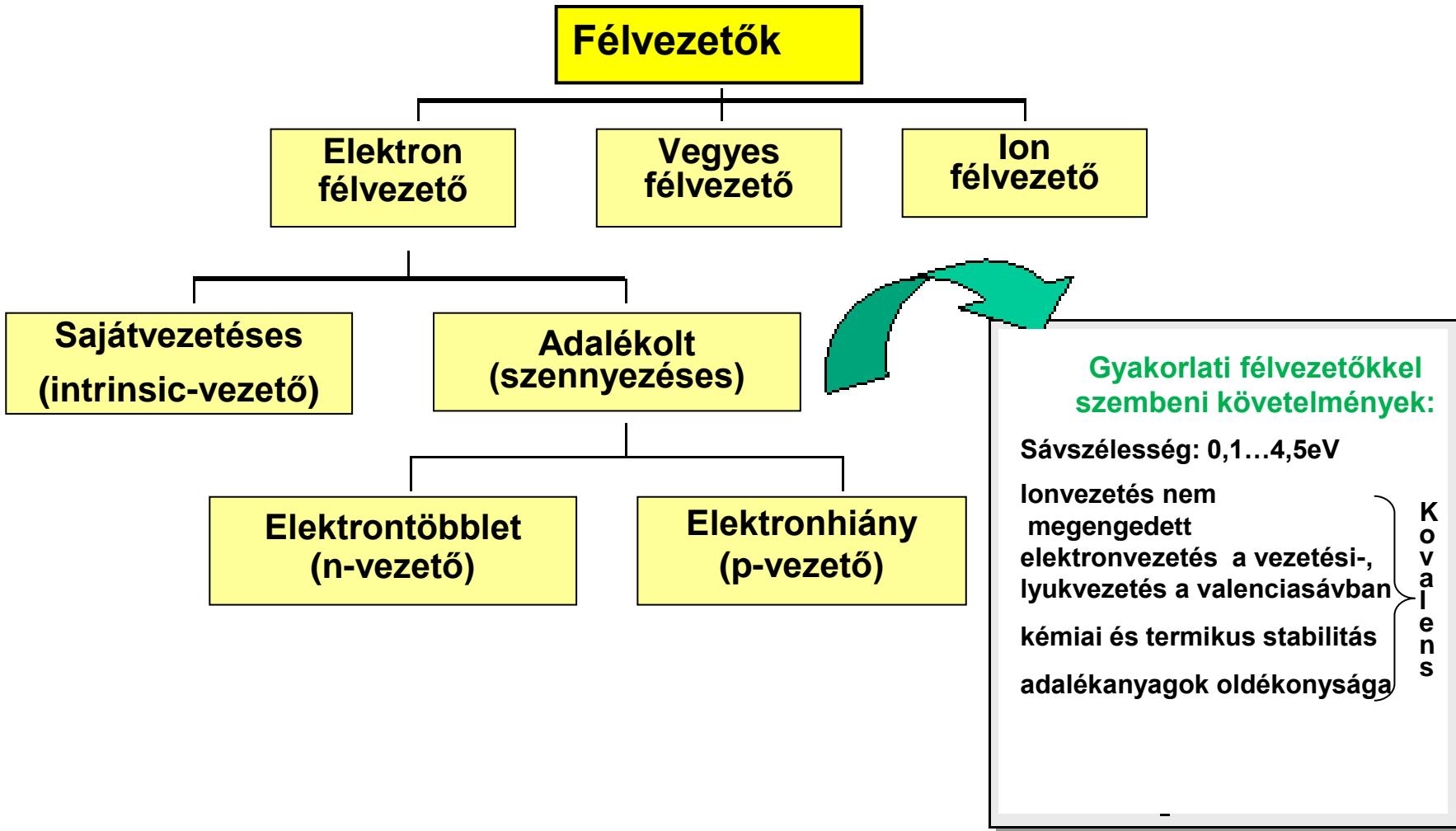
- a) Technológiai alapok, MEMS, NEMS, OEMS
- b) Szenzorhálózatok, IoT



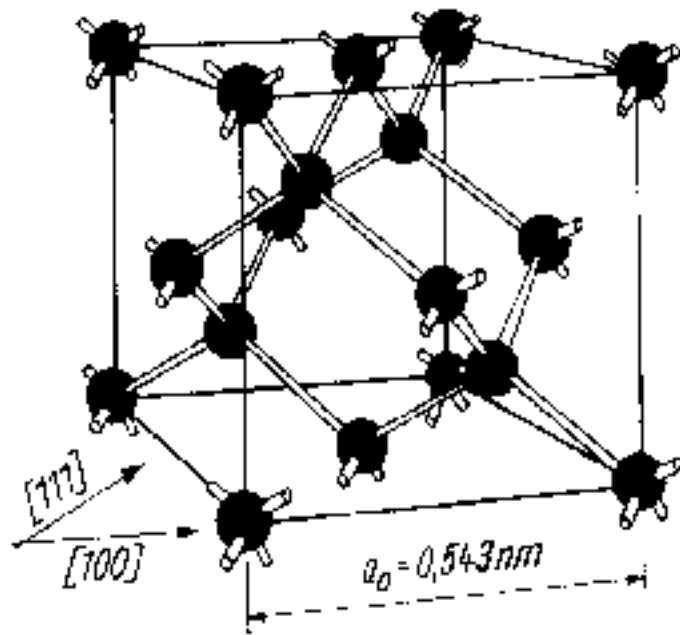
M Ú E G Y E T E M 1 7 8 2



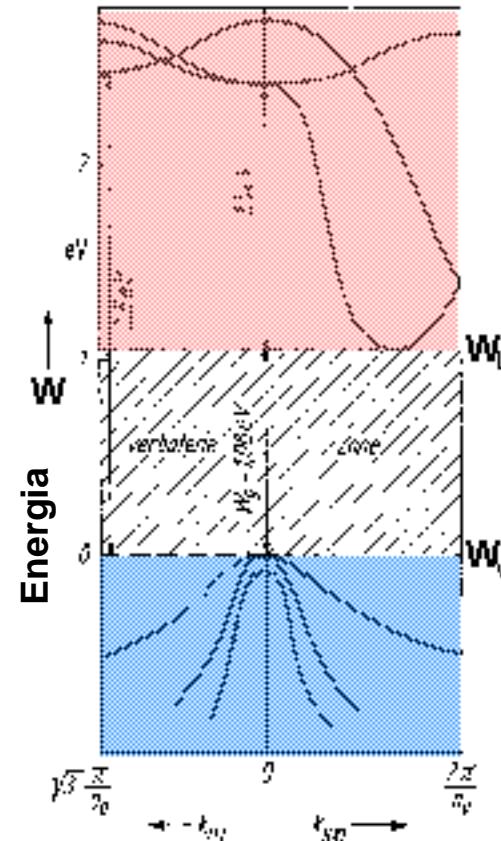
A félvezetők felosztása



A Si rács- és sávszerkezete



gyémánträcs



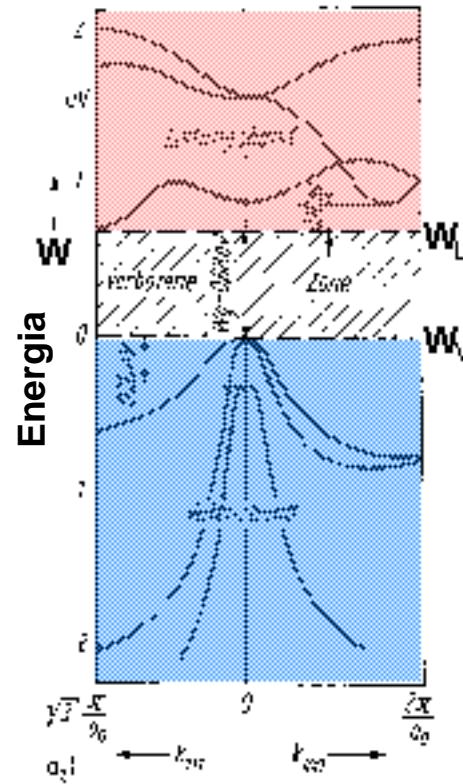
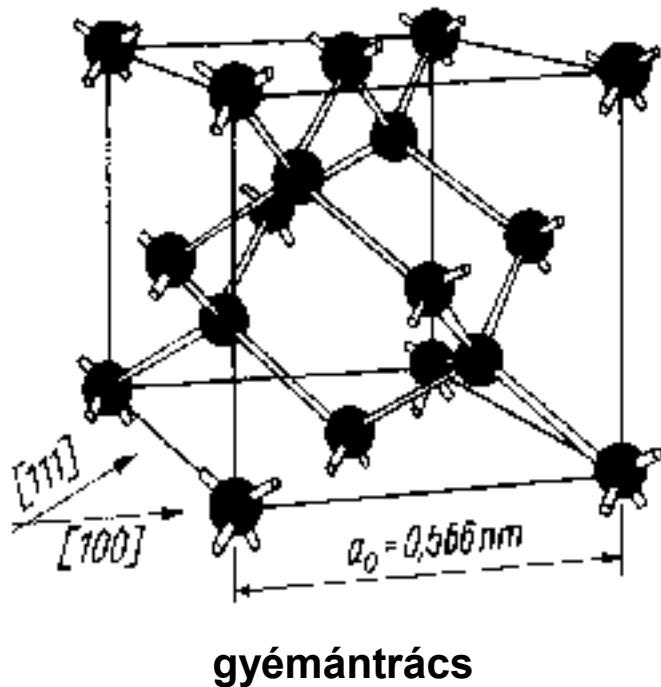
impulzus

Indirekt
átmenet

Indirekt sávú félvezetőkben a rekombináció impulzusváltoztatás nélkül nem lehetséges
Hatékony fénykibocsátásra nem alkalmas



A Ge rács- és sávszerkezete

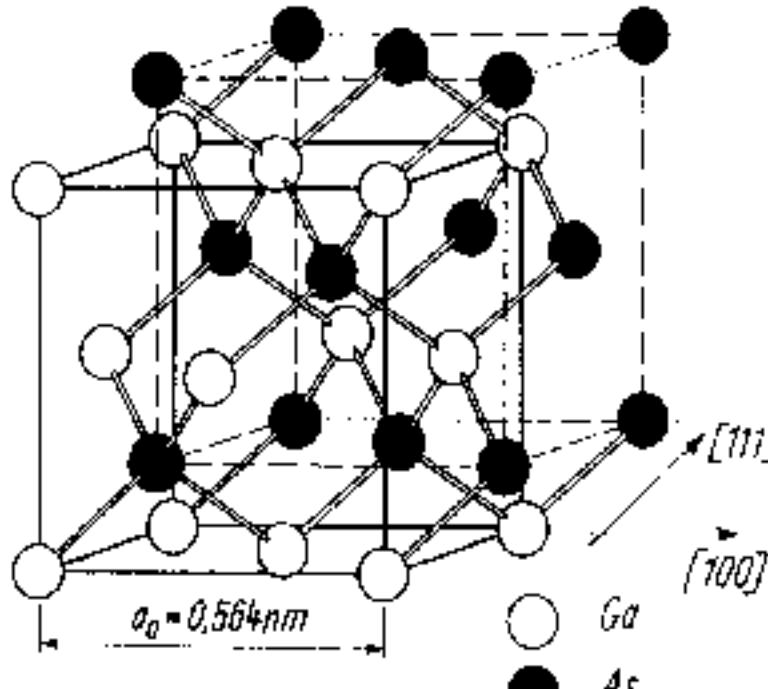


impulzus

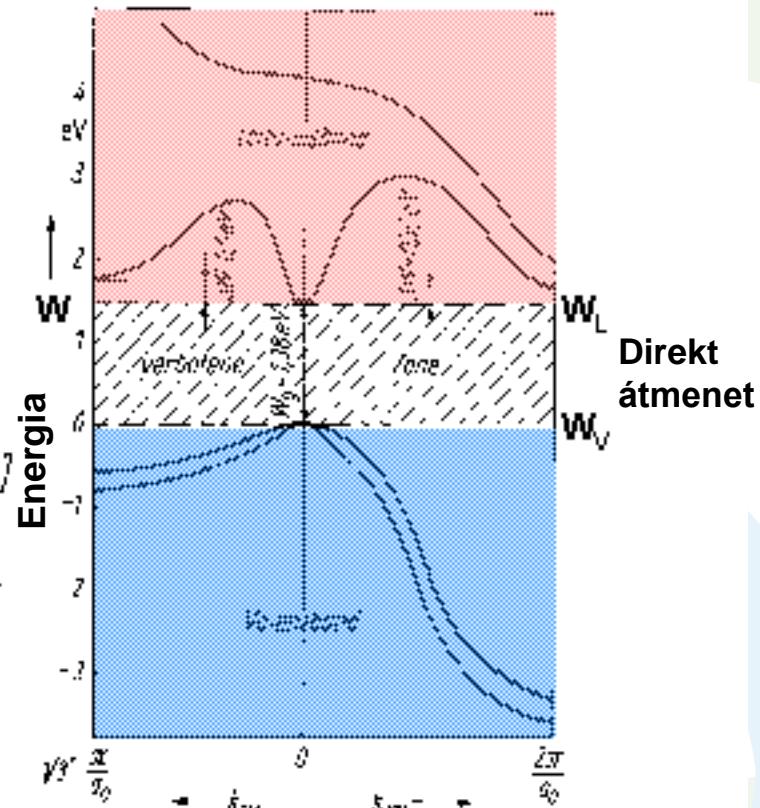
Indirekt sávú félvezetőkben a rekombináció impulzusváltoztatás nélkül nem lehetséges
Hatékony fénykibocsátásra nem alkalmas



A GaAs rács- és sávszerkezete



cinkblende (ZnS)

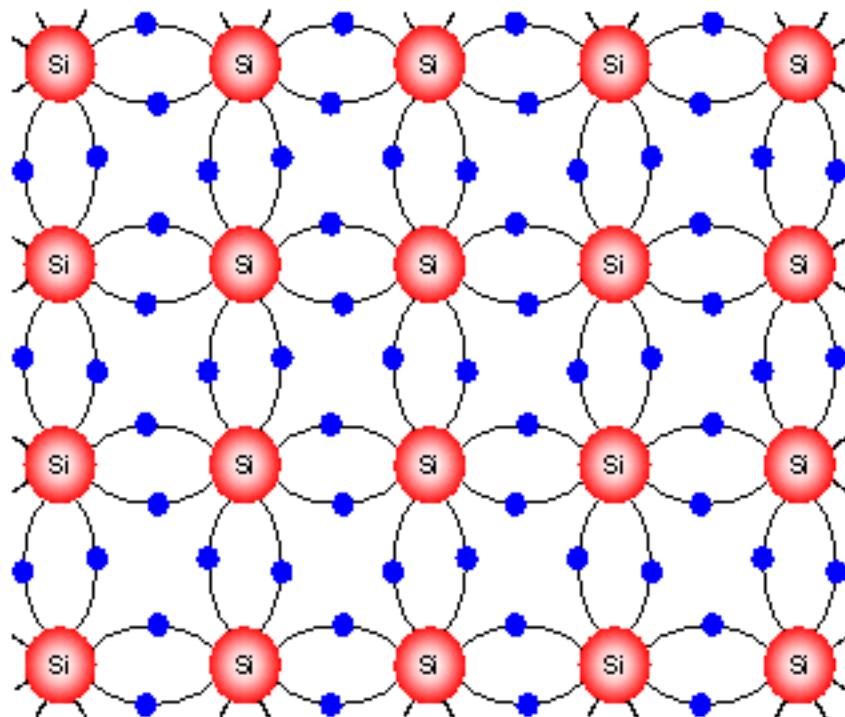


impulzus

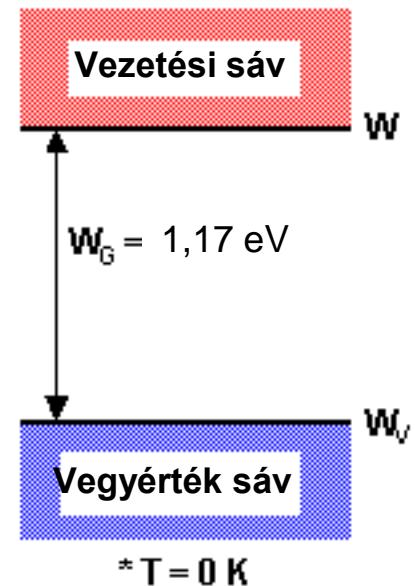
Direkt sávú félvezetőkben a rekombináció impulzusváltoztatás nélkül lehetséges
Hatékony fénykibocsátás valószínű



A Si rács kétdimenziós ábrázolása ($T=0K$)

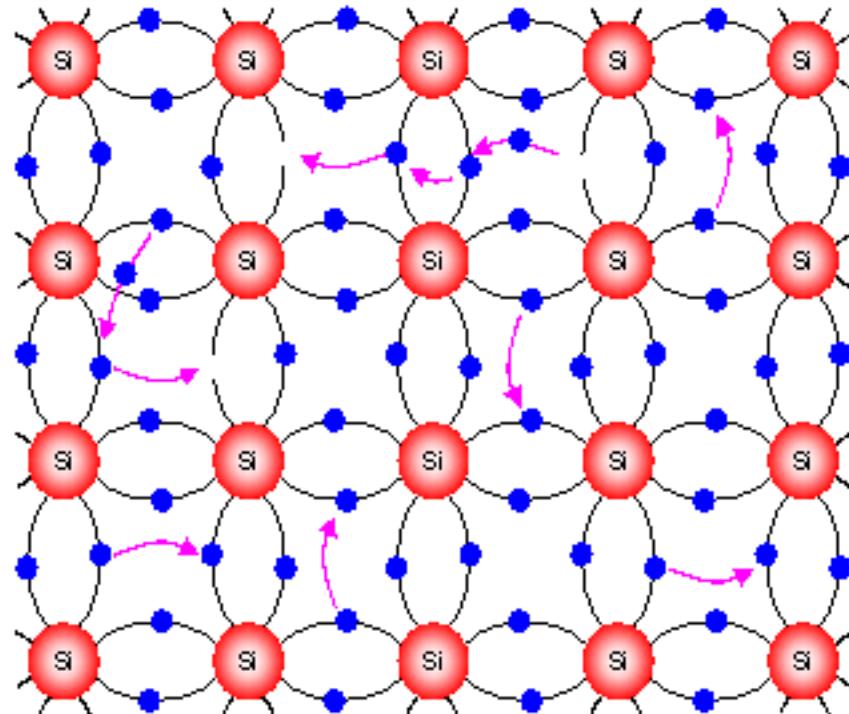


Egyszerű sávmodell



Si^{4+} (Ge^{4+}): 4 valencia elektron (sp^3 - hibridizáció) \Rightarrow nincs elektron a vezetési sávban

A Si kétdimenziós rácsszerkezete ($T > 0$ K)



Egyszerű sávszerkezet

Vezetési sáv

W_L

Vegyértéksáv

W_V

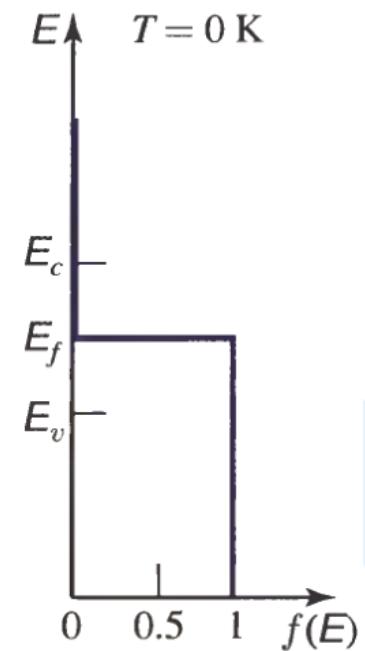
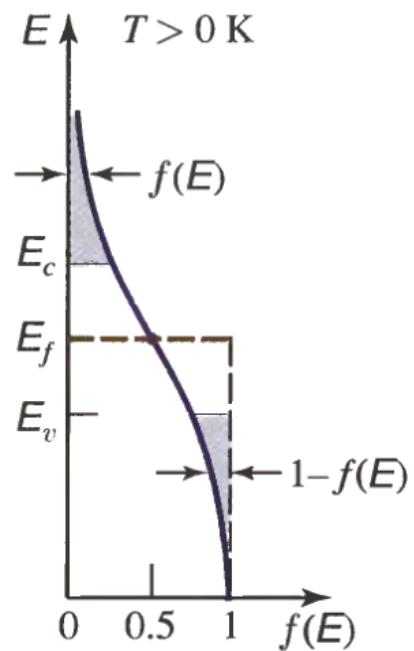
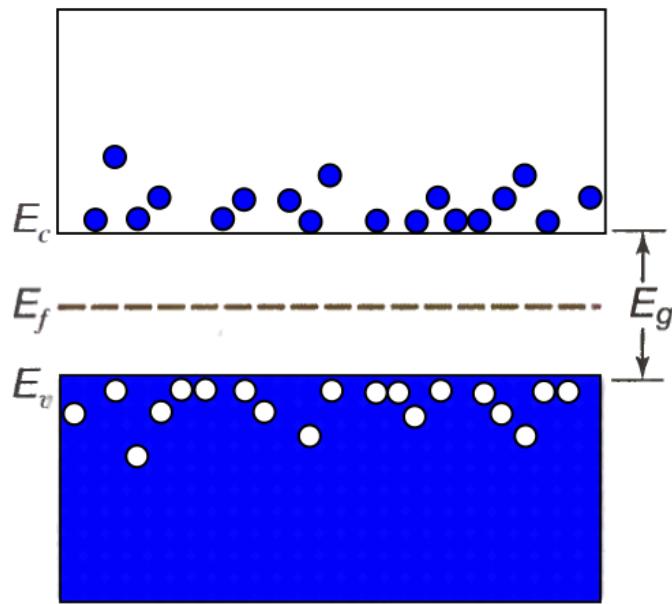
Energiaközlés ($T > 0$ K)



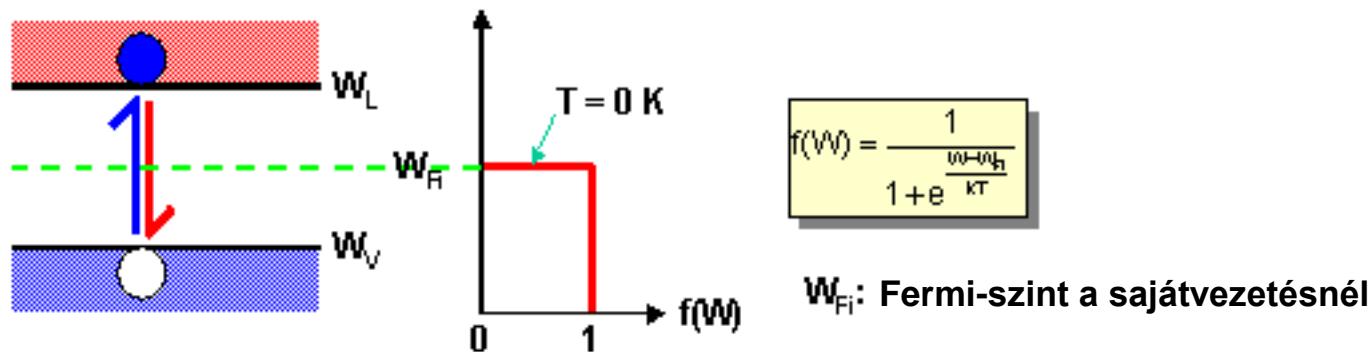
- szabad elektronok a vezetési sávban
- lyukak (elektronhiány) a vegyértéksávban

Az intrinsic félvezető sávmodellje

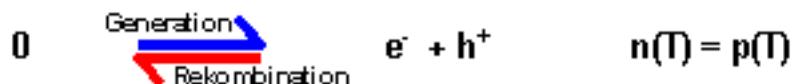
A Fermi szint helyzete



Sajátvezetés



- Termikus egyensúly a félvezetőben sajátvezetésnél



Töltéshordozó-koncentráció a
- sajátvezetésnél

$$n_i = n = p$$

n : vezetési (szabad) elektronok
 p : lyukak (elektronhiány)

- Intrinsic félvezető

$$W_L - W_F \gg kT$$

Sajátvezetés

**Sajátvezetés termikusan gerjesztett lyuk-elektron párok révén
Intrinsic vezetőképesség:**

$$q = n \cdot e_0 \cdot (\mu_n + \mu_p)$$

Az elektronok és lyukak mozgékonyisége:

$$\mu_n = \frac{e_0 \cdot \tau_n}{m_n}$$

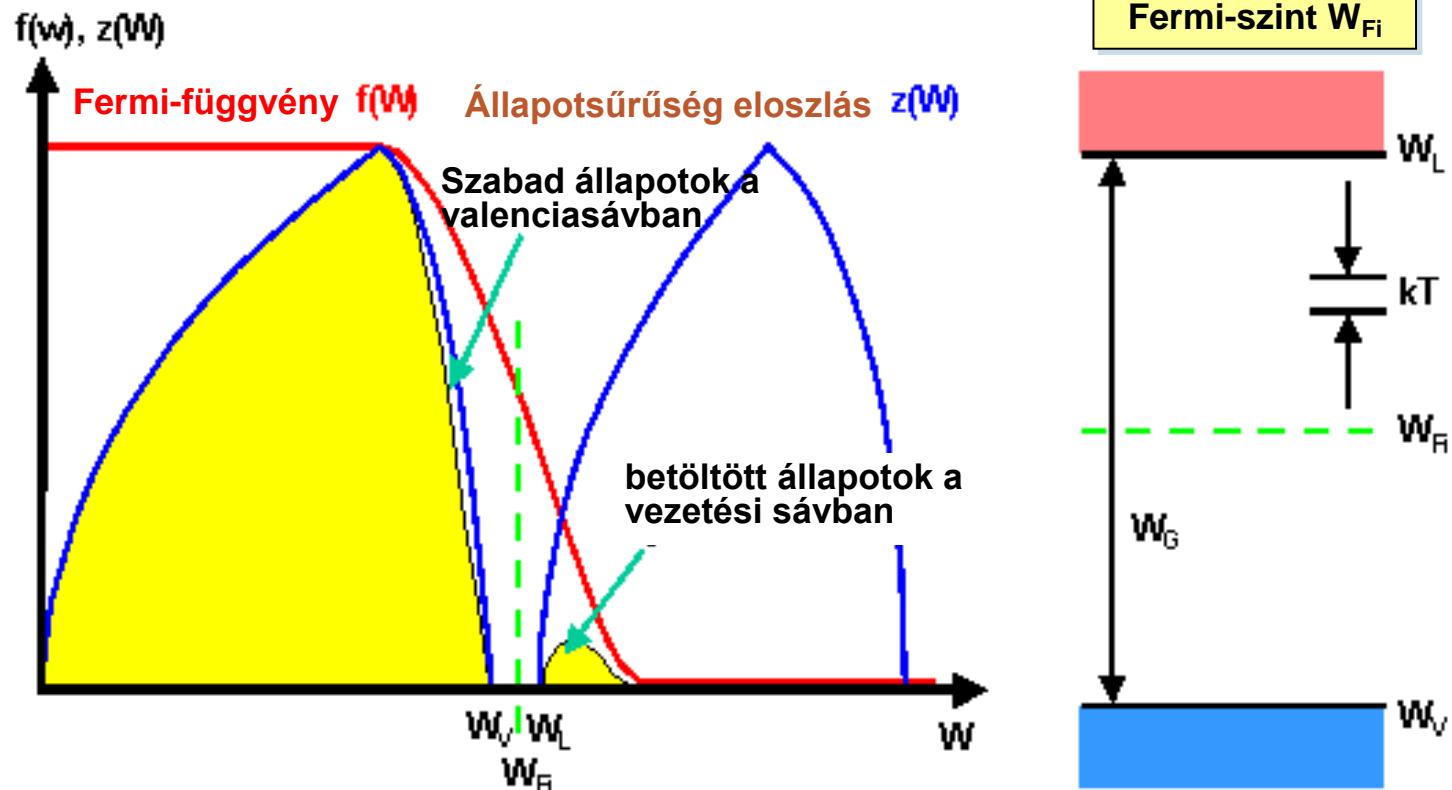
$$\mu_p = \frac{e_0 \cdot \tau_p}{m_p}$$

A mozgékonyiság hőmérséklet függése:

$$\mu_n \propto T^{-\beta_n}$$

$$\mu_p \propto T^{-\beta_p}$$

Fermi-függvény, Fermi-szint, állapotsűrűség-függvény, elektronsűrűség-eloszlás intrinsic félvezetőben



Betöltöttségi valószínűség (Fermi-) függvény, állapotsűrűség- és elektronsűrűség-eloszlás $T>0K$ esetén sajátvezetésnél

Az elemi és vegyület-félvezetők izoelektronikus vázlata

Elemi- és IV-IV	Vegyület-félvezetők		Egy atomra jutó elektronok átlagos száma
	III-V	II-VI	
C			6
SiC			10
Si	AlP		14
GeSi	AlAs, GaP	ZnS	23
Ge	AlSb, GaAs, InP	ZnSe, CdS	32
	GaSb, InAs	ZnTe, CdSe, HgS	41
Sn	InSb	CdTe, HgSe	50
		HgTe	66

Félvezető (alkotó-)elemek a periódusos rendszerben és tiltott sáv szélességük W_G (eV) értéke

Periodus	Oszlop				
	2 (12)	13	14	15	16
2	Be	B	C	N	O
3	Mg	Al	Si	P	S
4	Ca (Zn)	Ga	Ge	As	Se
5	Sr (Cd)	In	Sn	Sb	Te

	T = 0 K	T = 300 K
Si	1,17	1,11
Ge	0,74	0,68
GaAs	1,52	1,38
InAs	0,36	0,35
InSb	0,23	0,18
CdS	2,58	2,42
CdTe	1,61	1,45
ZnO	3,44	3,20

A legfontosabb félvezetők adatai (T=300K)

Félvezető	Ge	Si	GaAs
Tilos sáv W_G / eV	0,67	1,12	1,42
Dielektrikus állandó ϵ	16,0	11,9	13,1
eff. állapotstűrűség a vezetési sávban N_L / cm ⁻³	$1,04 \cdot 10^{19}$	$2,8 \cdot 10^{19}$	$4,7 \cdot 10^{19}$
eff. állapotstűrűség a valencia sávban N_V / cm ⁻³	$6,0 \cdot 10^{18}$	$1,04 \cdot 10^{19}$	$7,0 \cdot 10^{18}$
elektronmozgékonysság μ_n / (cm ² /Vs)	3900	1500	8500
lyukmozgékonysság μ_p / (cm ² /Vs)	1900	450	400
$b = \mu_n / \mu_p$	2,05	3,33	21,2
β_n	1,6	2,5	0,65
β_p	2,3	2,7	~2
elektron effektív/nyugalmi tömeg aránya $m_n : m_e$	0,88	1,18	0,067
lyuk effektív/nyugalmi tömeg aránya $m_p : m_e$	0,29	0,81	0,052
n / cm ⁻³	$2,4 \cdot 10^{13}$	$1,45 \cdot 10^{10}$	$\sim 10^8$
σ / (S/m)	2,23	$4,53 \cdot 10^{-4}$	$\sim 1,4 \cdot 10^{-5}$

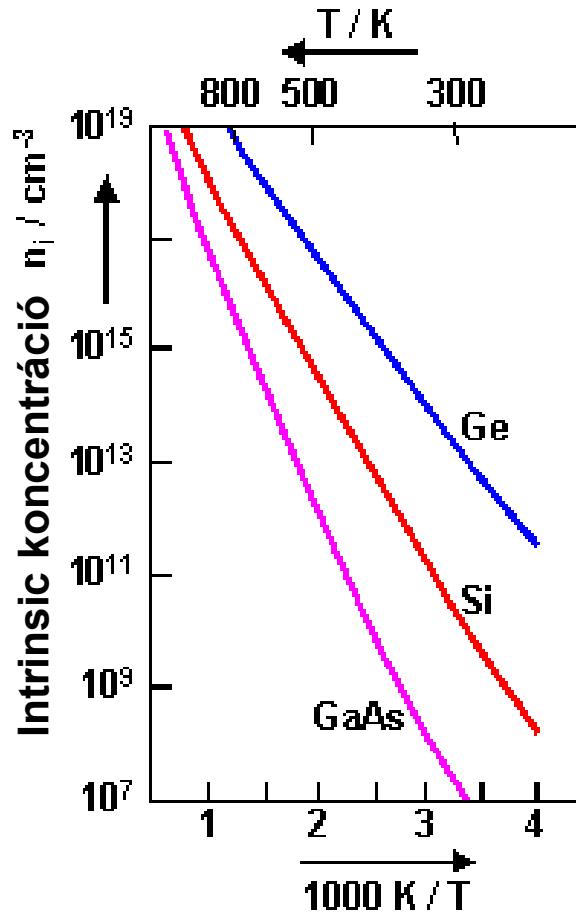
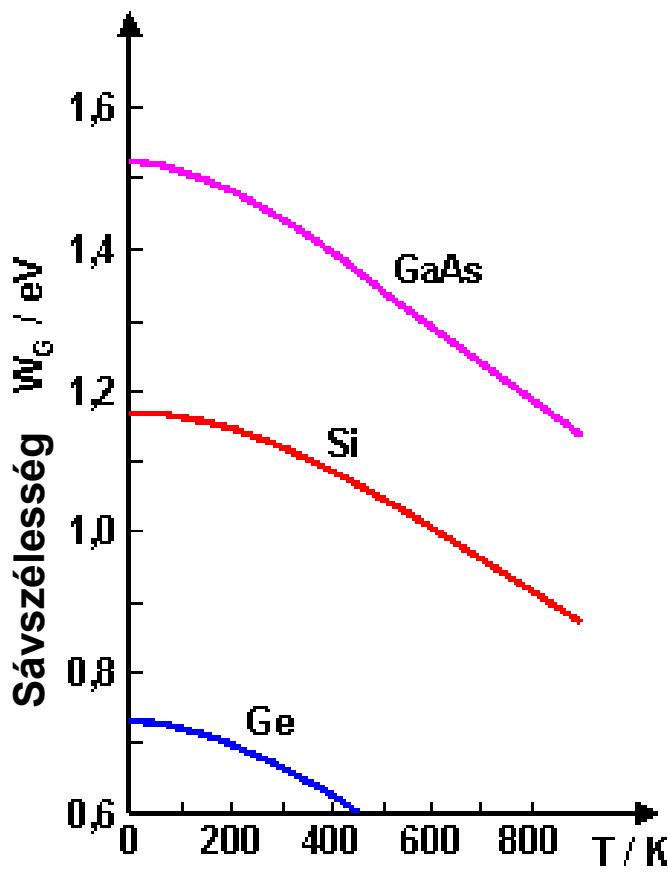
$$N_L = 2 \cdot \left(\frac{2\pi \cdot m_n \cdot kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

$$N_V = 2 \cdot \left(\frac{2\pi \cdot m_p \cdot kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

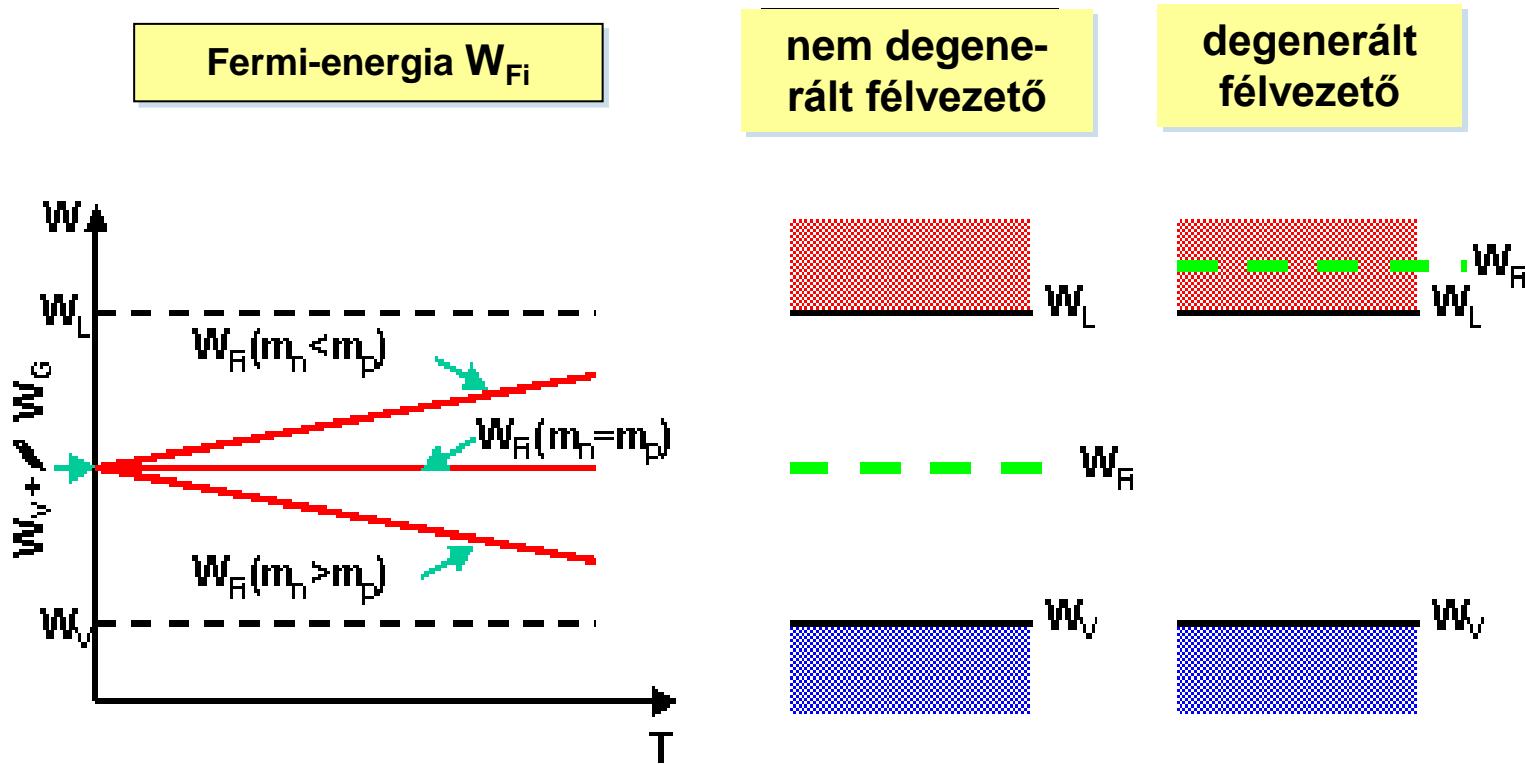
$$\mu_n \sim T^{-\frac{1}{2}}$$

$$\mu_p \sim T^{-\frac{1}{2}}$$

Tilos sávszélesség (W_G) és intrinsic koncentráció (n_i) a hőmérséklet (T) függvényében



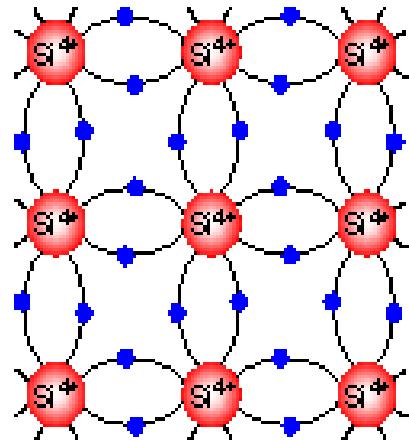
A Fermi-energia (W_{Fi}) hőmérsékletfüggése



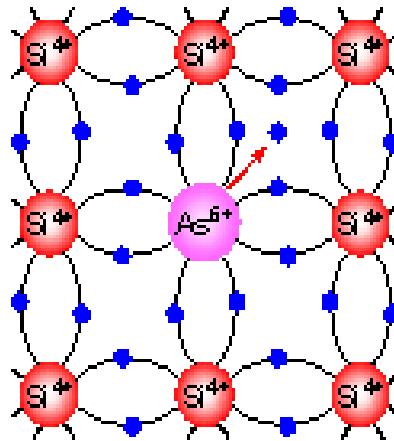
Si-ban, Ge-ban és GaAs-ben degeneráció
csak magas hőmérsékleten vagy extrém nagy adalékolás mellett lép fel!

Az i-, n- és p-vezetés összehasonlítása félvezetőkben

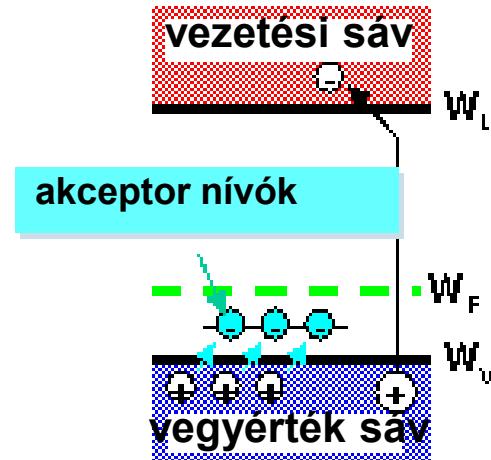
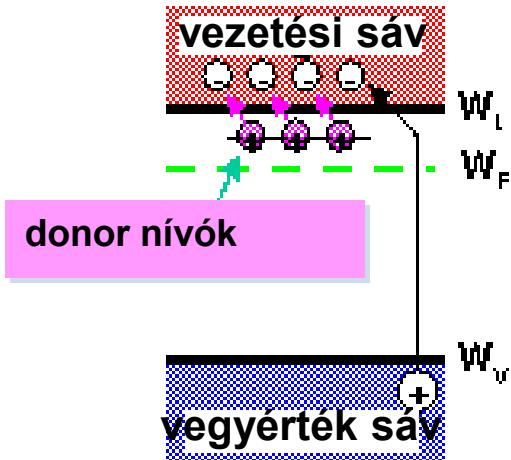
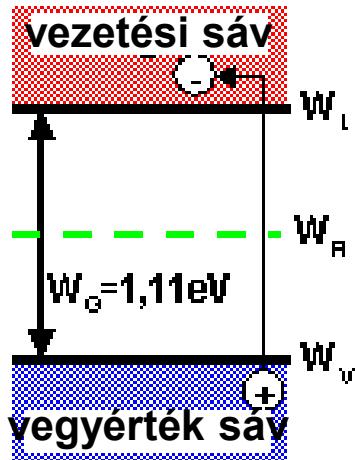
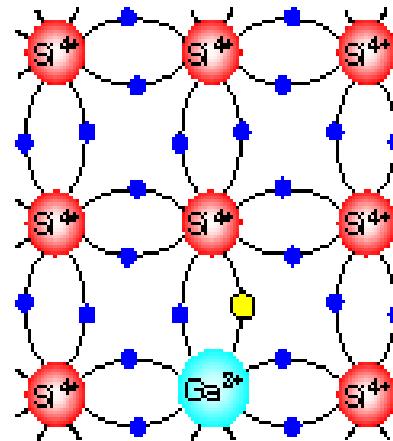
i-vezetés (sajátvezető)



n-vezetés (donoradalékkolt)

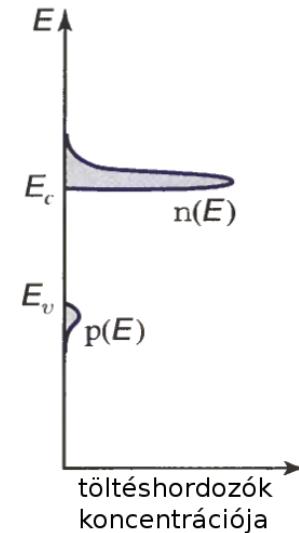
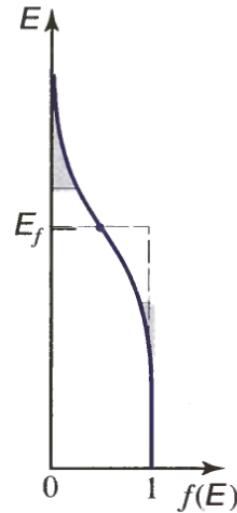
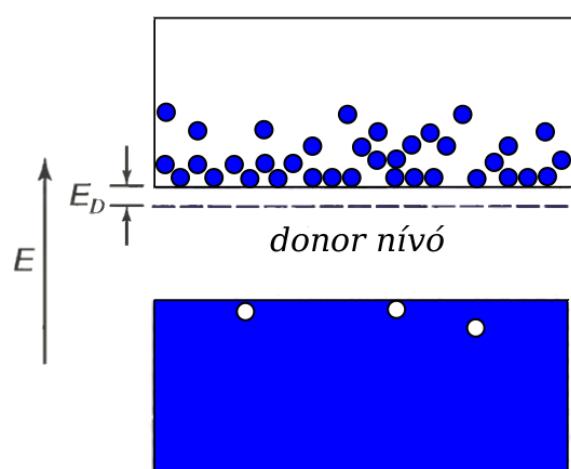


p-vezetés (akceptoradalékkolt)

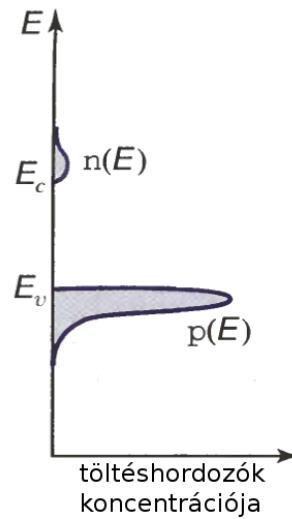
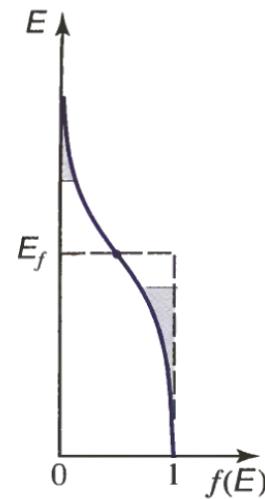
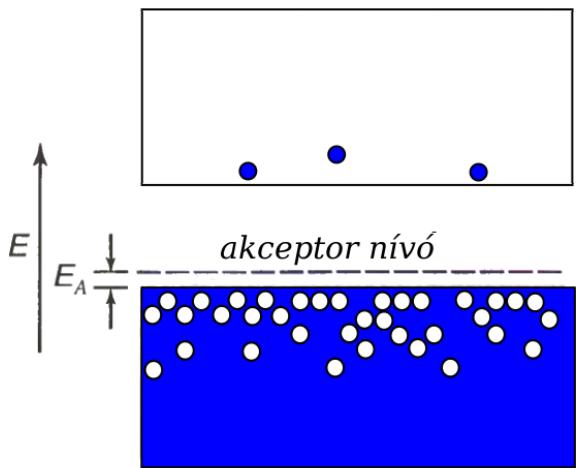


Adalékolt félvezetők:

állapotsűrűség ($z(E)$), elektron- ($n(E)$) és lyukkoncentráció ($p(E)$)

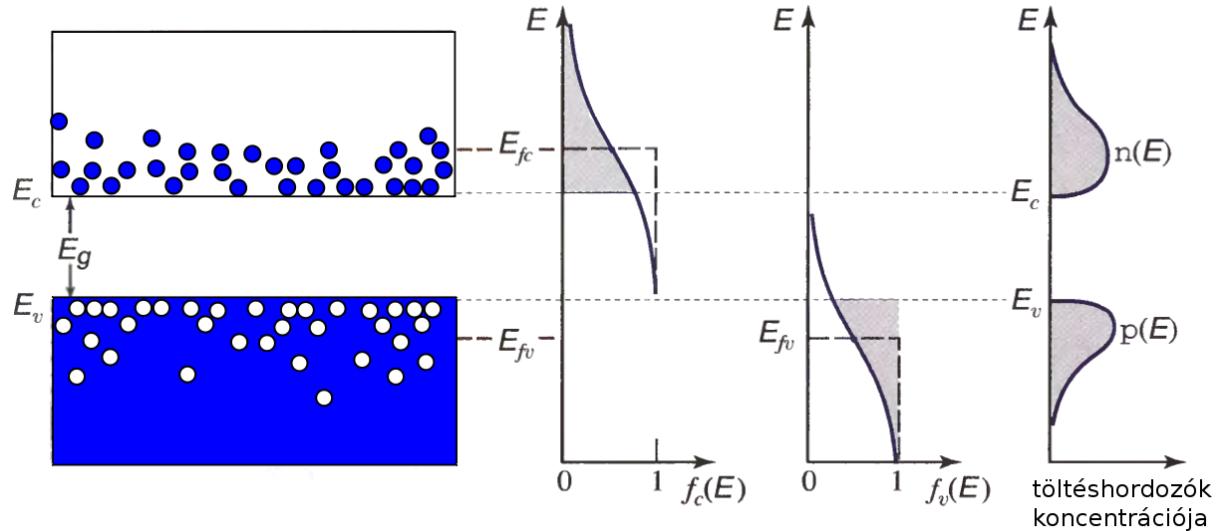


E_f = Fermi energiaszint

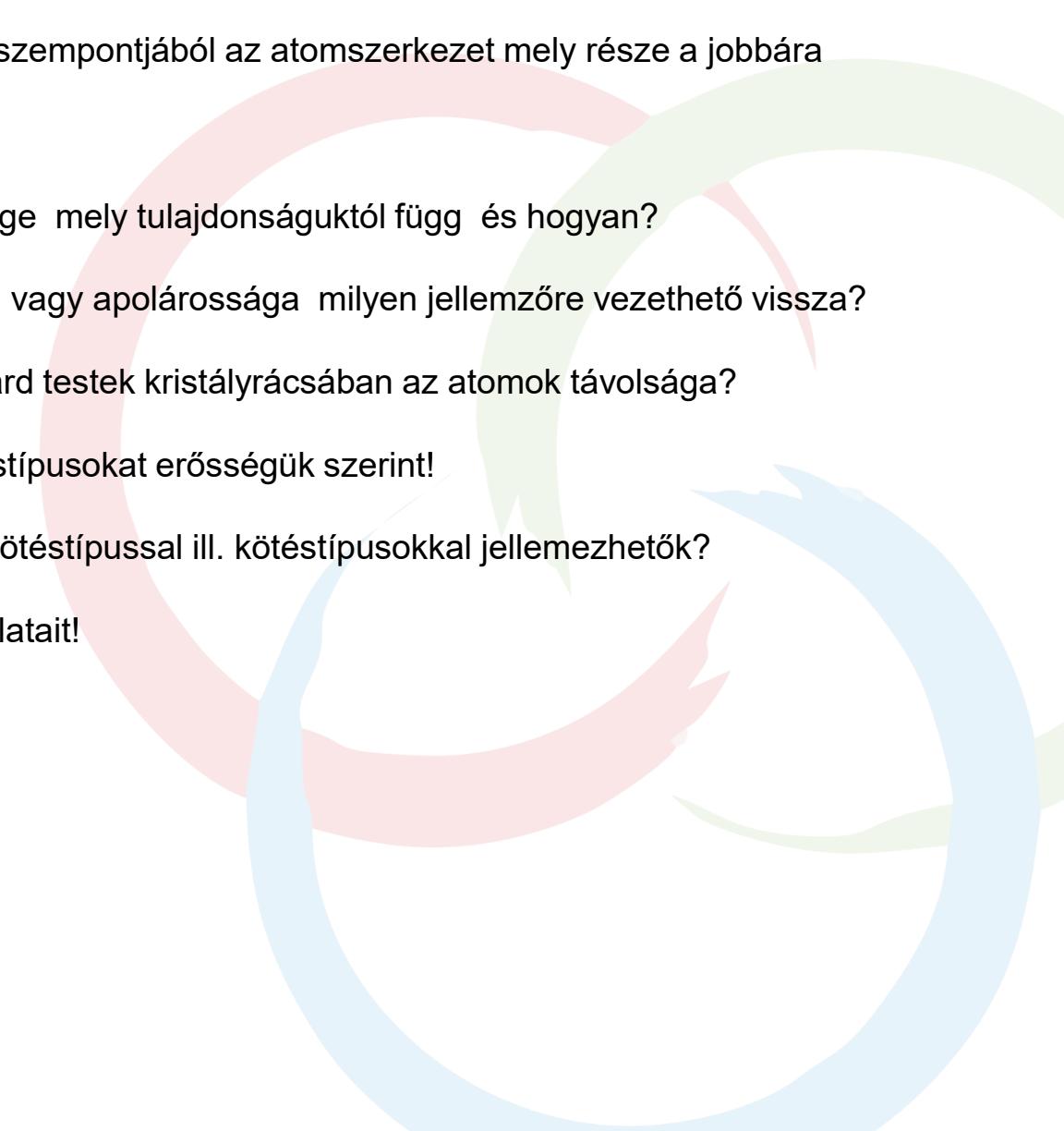


Fermi szint helyzete extra nagy koncentrációjú adalékolás esetén

Degenerált félvezetők



Kérdések az 1. részhez

- 
1. Az anyagtulajdonságok zömének szempontjából az atomszerkezet mely része a jobbára meghatározó és miért?
 2. Az elemek kémiai reakcióképessége mely tulajdonságuktól függ és hogyan?
 3. A vegyületmolekulák polárossága vagy apolárossága milyen jellemzőre vezethető vissza?
 4. Milyen nagyságrendbe esik a szilárd testek kristályrácsában az atomok távolsága?
 5. Tegye növekvő sorrendbe a kötéstípusokat erősségük szerint!
 6. Mik az elemi félvezetők, és mely kötéstípussal ill. kötéstípusokkal jellemezhetők?
 7. Sorolja fel a szén allotróp módosulatait!

Szenzorteknika



AZ ELŐADÁST ÖSSZEÁLLÍTotta:

DR. BÁRSZNY ISTVÁN
(KUTATÓPROFESSZOR) EMERITUS

MTA
MŰSZAKI FIZIKAI ÉS ANYAGTUDOMÁNYI INTÉZET

ELŐADÓ:
BOJTOS ATTILA
BME - MOGI TANSZÉK



M Ú E G Y E T E M 1 7 8 2



Tematika

Bevezetés a szenzorteknikába

- csoportosítás,
- méréstechnikai tulajdonságok,
- Jelfeldolgozás

Anyagszerkezet

- Atomszerkezet
- Kémiai kötések
- Sávszerkezet
- **Félvezetők**
- **Fémek**

Érzékelési elvek fizikai alapjai (szenzor)

- Termikus elvek, hőmérsékletmérés
- Ellenállásváltozás elvén működő érzékelés
- Kapacitás
- Mágneses mérési elvek
- Piezoelektromos mérési elvek
- Optikai-elvek
- Akusztikai elvek

Érzékelési módszerek, alkalmazások (jelátalakító)

- Hossz-, távolság-, elmozdulás-, elfordulásmérés szenzorai
- Sebesség-, térfogatáram-, gyorsulásmérés szenzorai
- Nyomás-, erő-, nyomatékmérés szenzorai
- (Kémiai érzékelés szenzorai)

Aktuátorok

- Motorok
- Piezoelektronos aktuátorok
- Magnetostrikciós aktuátorok

Integrált érzékelő és beavatkozó rendszerek (vendégelőadás)

- Technológiai alapok, MEMS, NEMS, OEMS
- Szenzorhálózatok, IoT



Adalékolt félvezetők, donor- és akceptor, sekély és mély nívók

Donor

Olyan ponthiba a kristályrácsban, amely szabad elektronat ad le a vezetési sávba és a félvezetőt *n*-vezetésre teszi alkalmassá.

Ionizációs energia*:

$$\Delta W_D = \frac{m_n \cdot e_0^4}{2 \cdot (4\pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \hbar)^2}$$

in Si: P $\Delta W_D = 45 \text{ meV}$

Sb $\Delta W_D = 39 \text{ meV}$

As $\Delta W_D = 54 \text{ meV}$

Akceptor

Olyan ponthiba a kristályrácsban, amely elektronat vesz fel a vegyérték sávból és a félvezetőt *p*-vezetésre teszi alkalmassá.

Ionizációs energia*:

$$\Delta W_A = \frac{m_p \cdot e_0^4}{2 \cdot (4\pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \hbar)^2}$$

in Si: B $\Delta W_A = 45 \text{ meV}$

Al $\Delta W_A = 67 \text{ meV}$

Ga $\Delta W_A = 72 \text{ meV}$



„Sekély” (adalék) és „mély” (csapda) állapotok (nívók)
kategorizálás a valós ionizációs energia szerint

*Az ionizációs energiát a H-modell alapján számíthatjuk ki:

$$H \rightarrow H^+ + e^- \Rightarrow \Delta W_{ion} = \frac{m_e \cdot e_0^4}{2 \cdot (4\pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \hbar)^2} = 13,6 \text{ eV}$$

Adalékolt félvezetők:

állapotsűrűség (z), elektron- (n) és lyukkoncentráció (p)

sajátvezetés

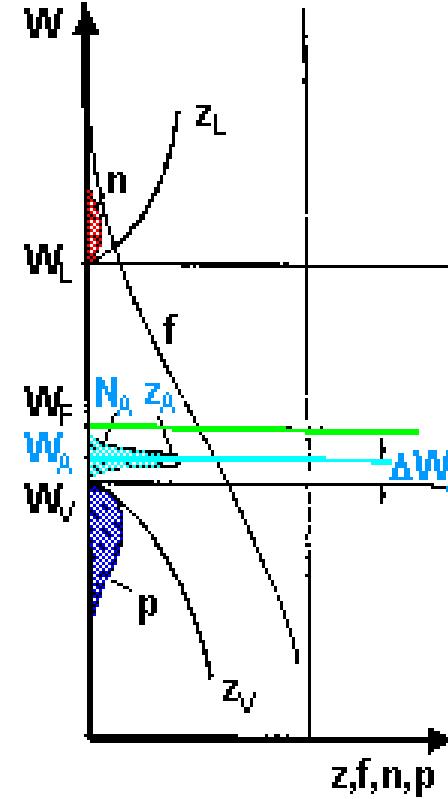
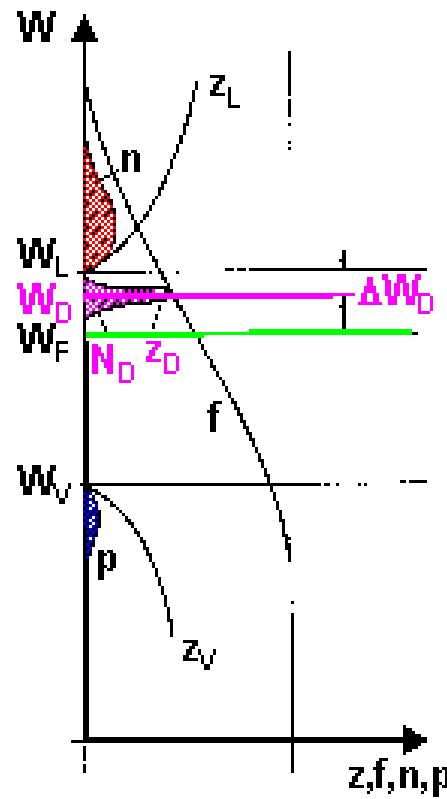
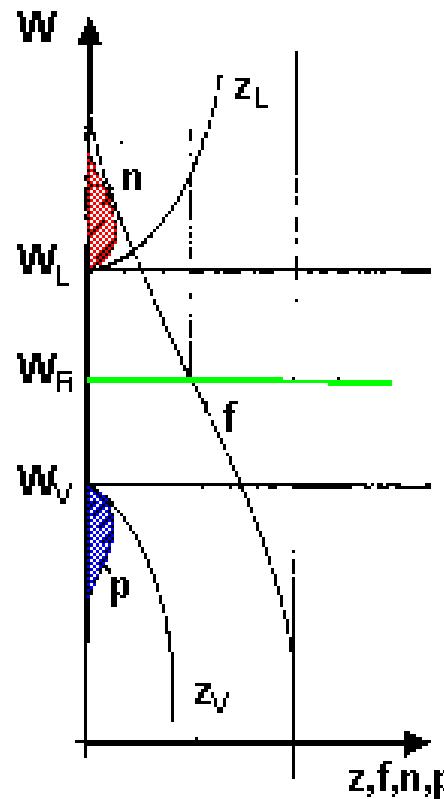
$$n = p$$

n-adalékolás

$$n \gg p$$

p-adalékolás

$$p \gg n$$



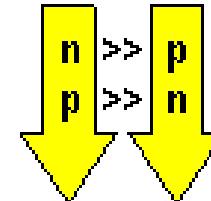
Adalékolt (extrinsic) félvezetők

Extrinsic azaz adalékolt félvezetők

n-típusú félvezető - donor adalékolással

p-típusú félvezető - akceptor adalékolással

Az adalékatomok sekély energiájú megengedett állapotokat generálnak a félvezető tiltott sávjában



Többségi / kisebbségi töltéshordozó

Állapotsűrűség $z(W_D) = N(W_D)$ ill. $z(W_A) = N(W_A)$

$$\rightarrow N_D = N_D^0 + N_D^+ \quad N_A = N_A^0 + N_A^-$$

Termodinamikus egyensúlyban a félvezető kristály semleges:

$$\rightarrow n + N_A^- = p + N_D^+$$

$$n^2 = n \cdot p$$

Az egyensúlyi lyuk- és elektronkoncentráció meghatározása:

Elektronkoncentráció
(n) a vezetési sávban

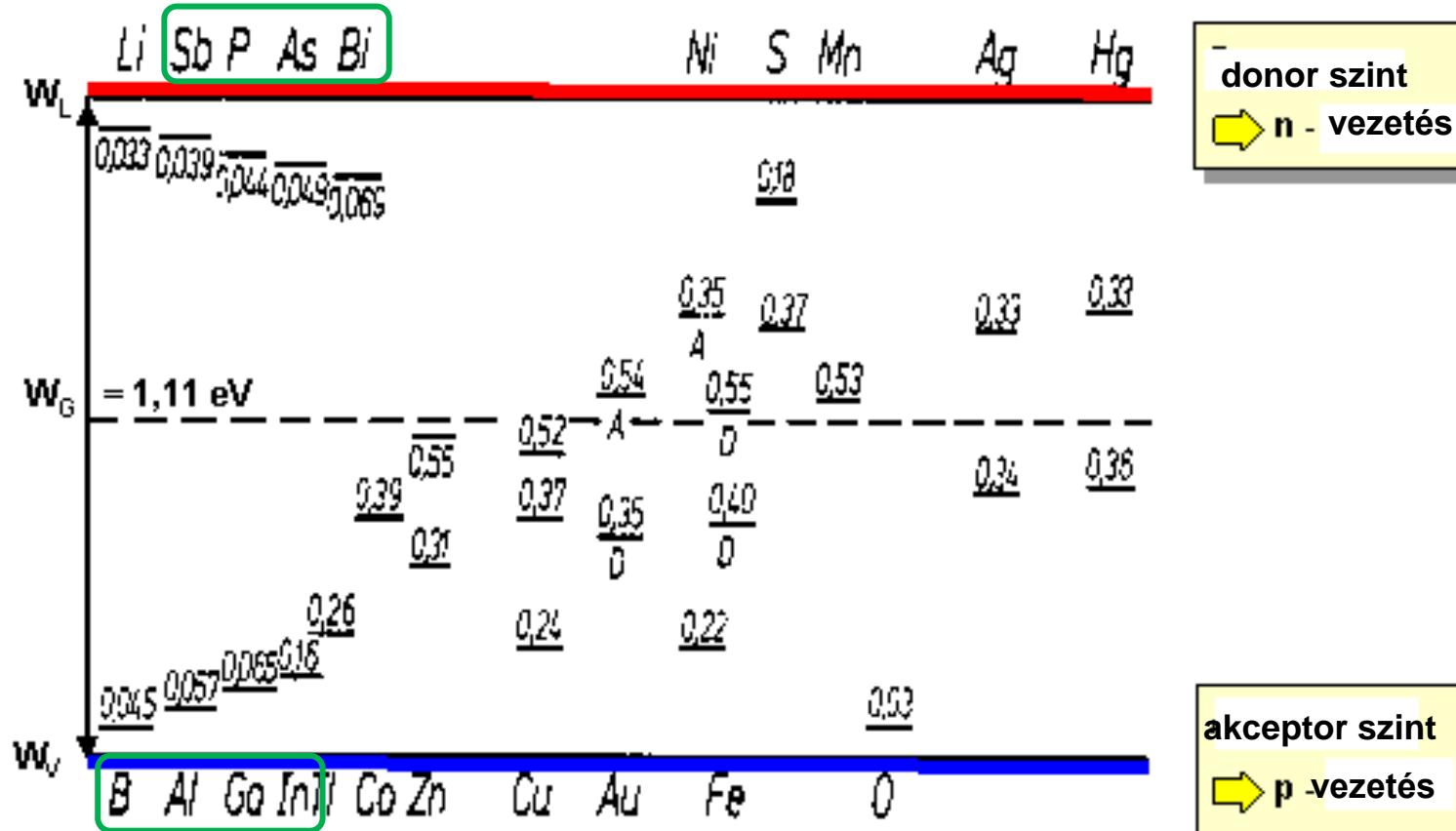
Lyukkoncentráció (p)
a valencia sávban

$$n = \sqrt{N_D \cdot N_L} \cdot e^{-\frac{\Delta W_L}{2kT}}$$

$$p = \sqrt{N_A \cdot N_V} \cdot e^{-\frac{\Delta W_V}{2kT}}$$

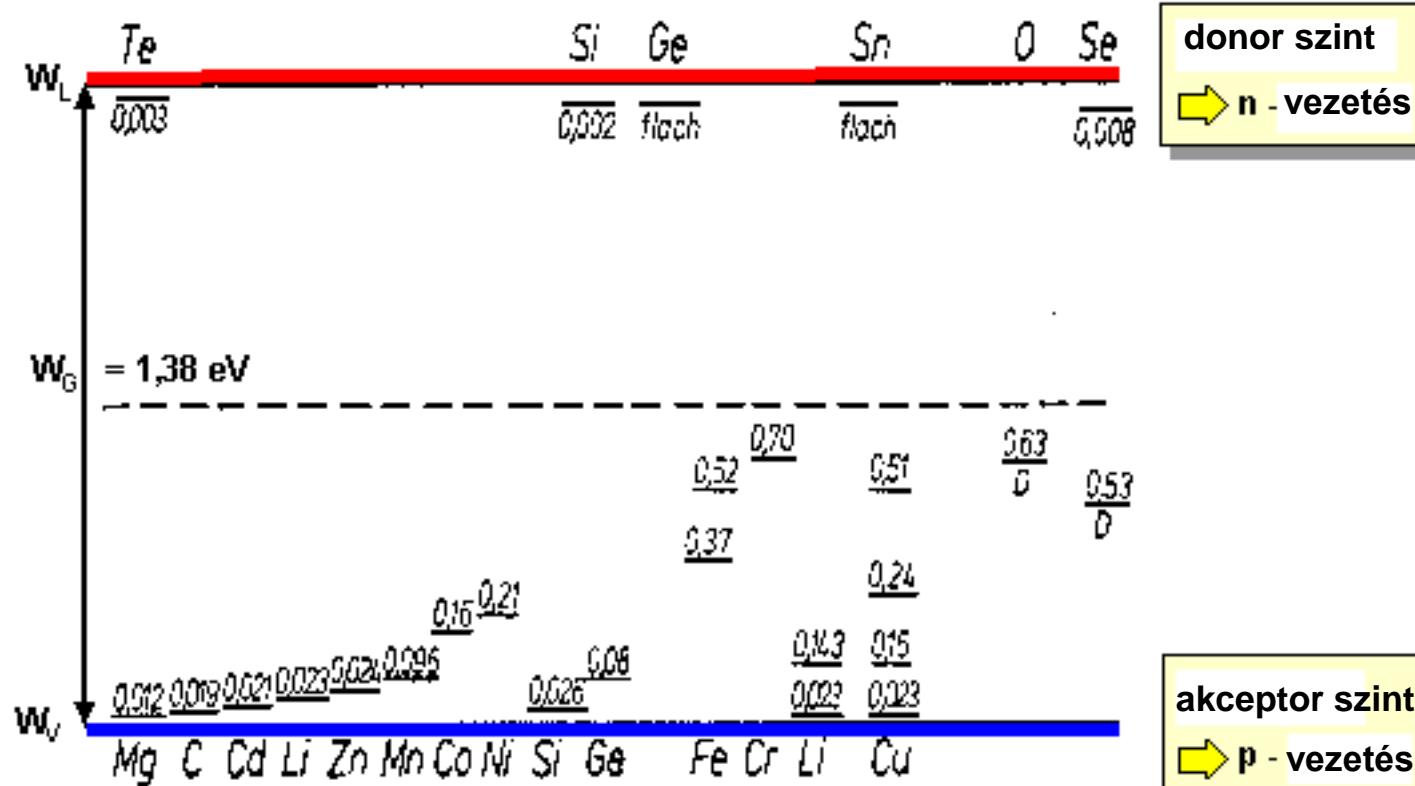
A szennyező-elemek energiaszintjei Si-ban

szobahőmérsékleten



A szennyező-elemek energiaszintjei GaAs-ben

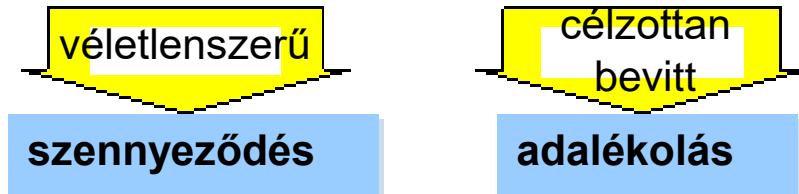
szobahőmérsékleten



Szennyezéses félvezetők

Reális kristályok mindig tartalmaznak kristályhibákat:

Ponthibák: hiányzó rácsatomok, atomok rácsközi helyeken, idegen atomok



Diszlokációk: rácsatomok távolságának periodicitása sérül; a keletkező mechanikai feszültség vonzza a beépülő idegen atomokat



getterezés

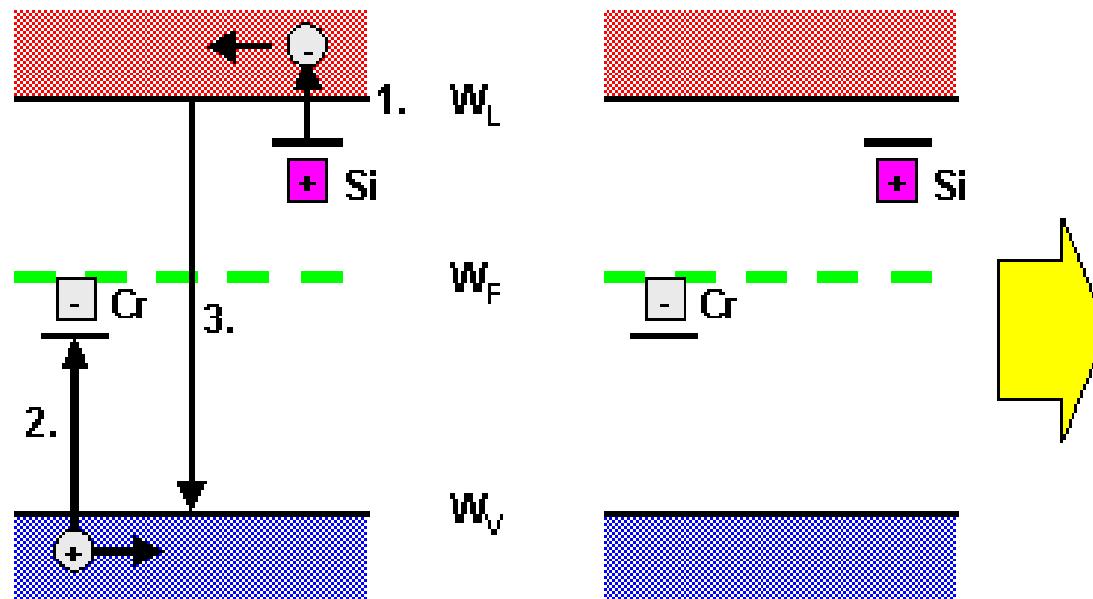
A félvezető egykristályok tisztasága:

$$\text{kristályhibásrűség} = 10^{10} \dots 10^{12} \text{cm}^{-3}$$

a diszlokációs rűség max. megengedett értéke
műszakilag gyártható „diszlokáció-mentes”
kristályban:

$$10^3 \dots 10^4 / \text{cm}^2$$

Mély nívók, elektron csapdaszintek GaAs-ben



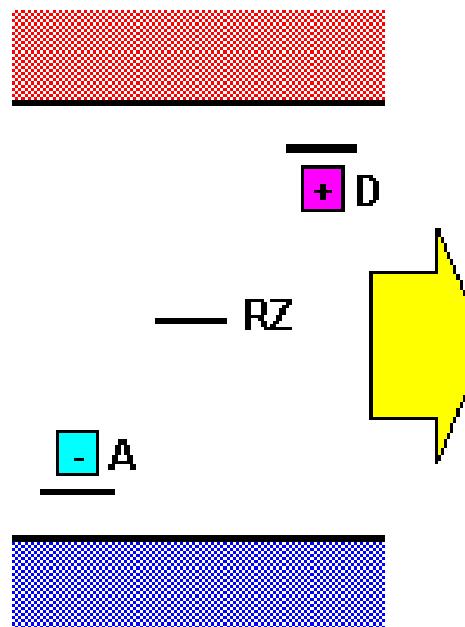
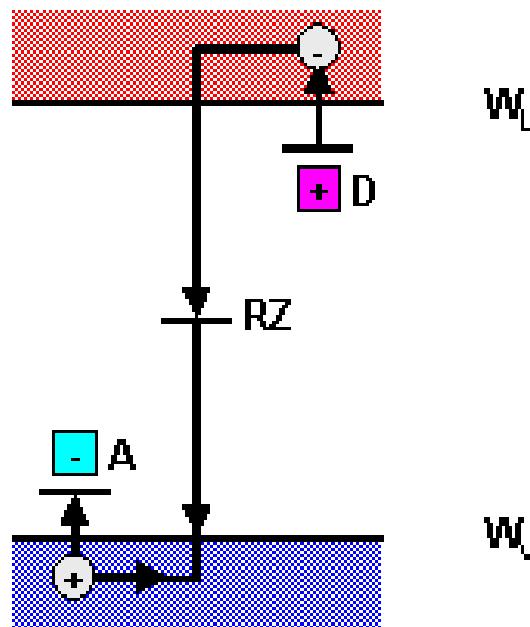
Generáció a sekély állapotban és elektron csapdázódás a mély nívón

A befogási folyamat eredményeképp csökkent a vezetési elektronok száma

Gyakorlati alkalmazás:

Kvázi-szigetelő tartományok kialakítása a félvezetőben (pl. FET)

Rekombinációs centrumok



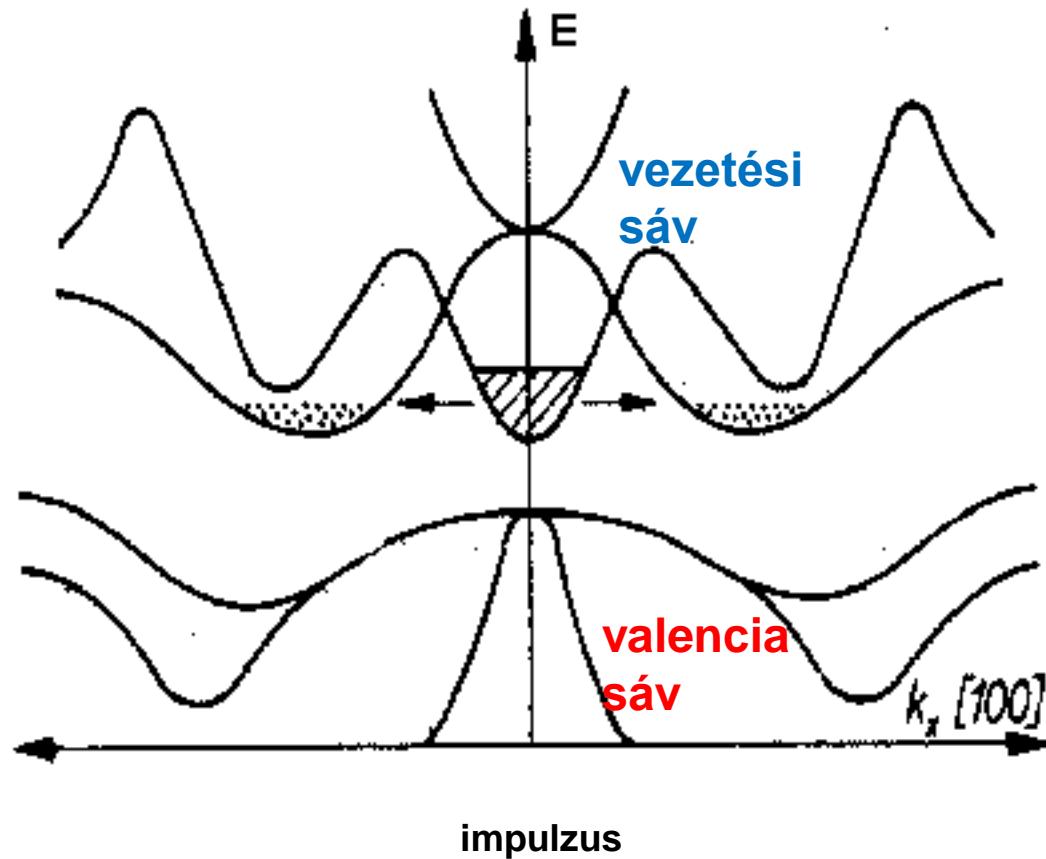
A rekombinációs centrumok technoló-giai hasznosítása:
pl. gyors kapcsoló-eszközökben (p-n-átmenet)

Generáció (elektron ill. lyuk) a sekély nívókon (D ill. A); **rekombináció** a mély nívón (RC)

A rekombinációs folyamatban Megsemmisül egy szabad töltéshordozó pár

Félvezetők több minimummal az E(k) diagramban

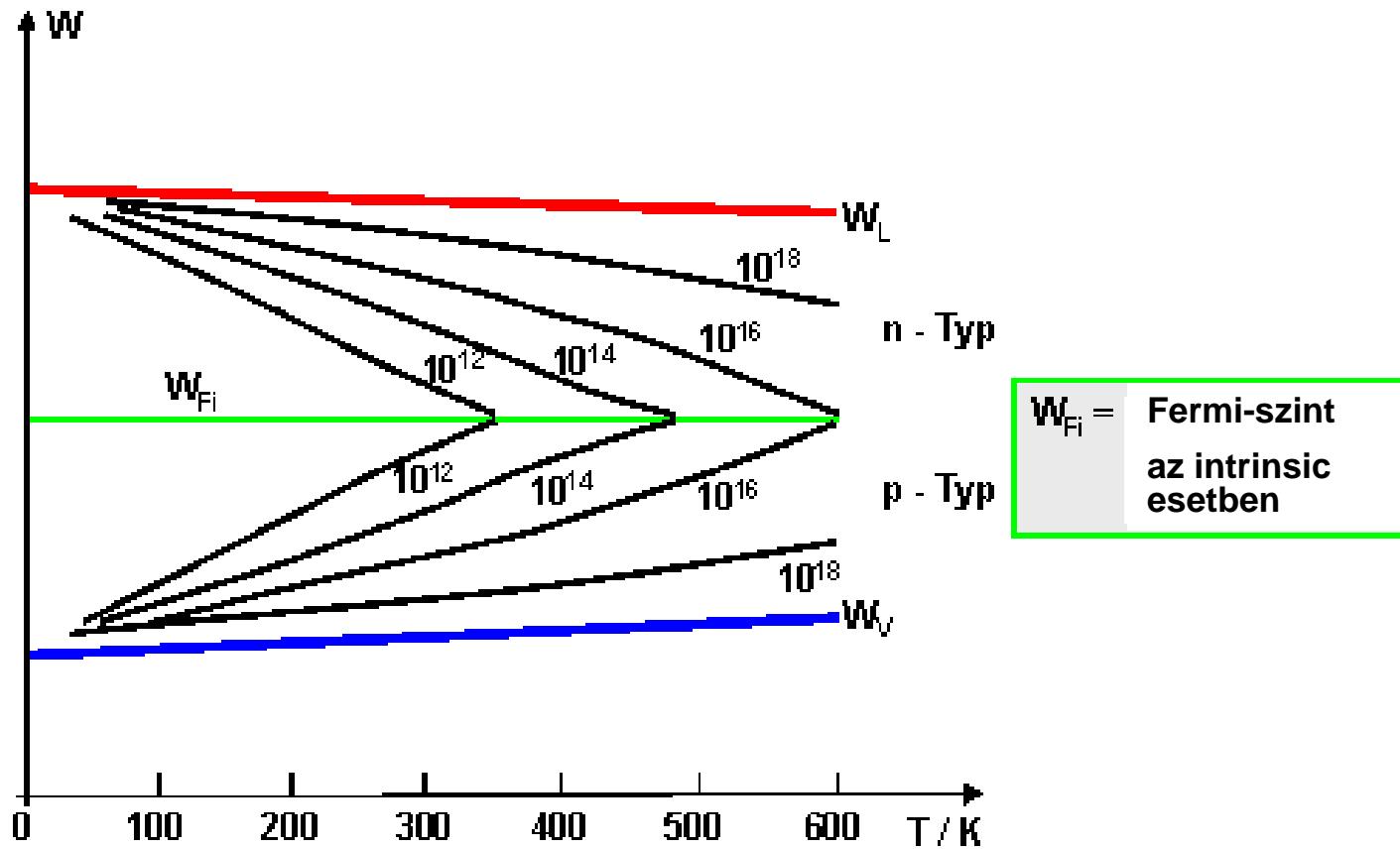
A Gunn-effektus



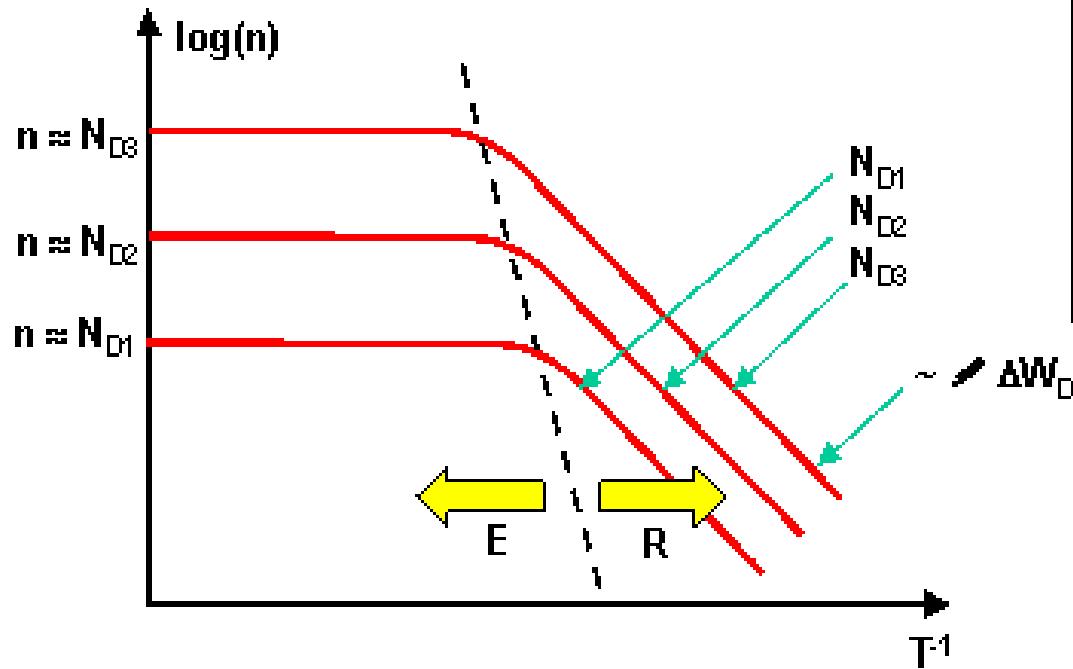
Gunn-hatás

A szabad elektronok az energetikailag magasabb mellék-minimumokba gerjesztődnek, ahol mozgékonyságuk drasztikusan csökken.

A Fermi-szint helyzete az extrinsic Si-ban



Az effektív adalékolás hőmérsékletfüggése



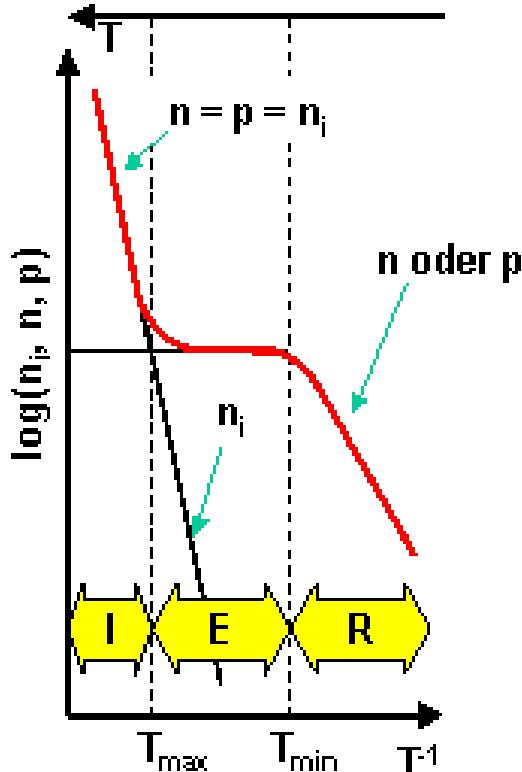
Hőmérsékletfüggő szabad elektron-koncentráció extrinsic félvezetőben eltérő donor adalékolás esetén
 $N_{D1} < N_{D2} < N_{D3}$

A hőmérséklet függvényében részleges $\Rightarrow n < N_D$ (R), vagy teljes $\Rightarrow n = N_D$ (E) ionizációval, azaz effektív adalékolással számolhatunk a W_D ionizációs energiának megfelelően.

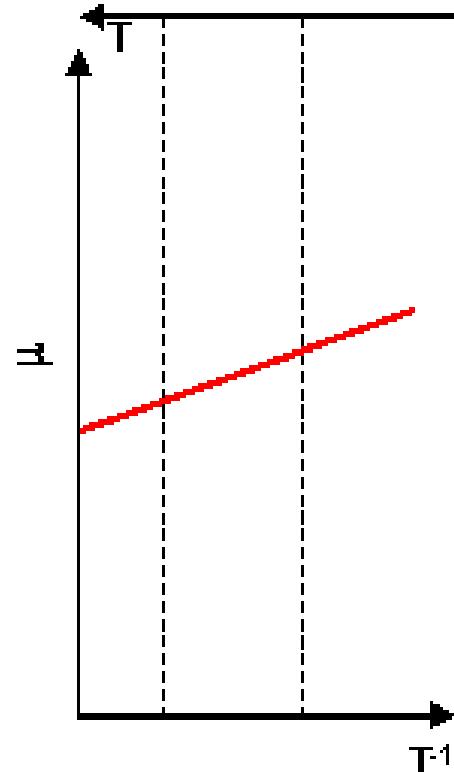
A vezetőképesség hőmérsékletfüggése

intrinsic és extrinsic félvezetőben

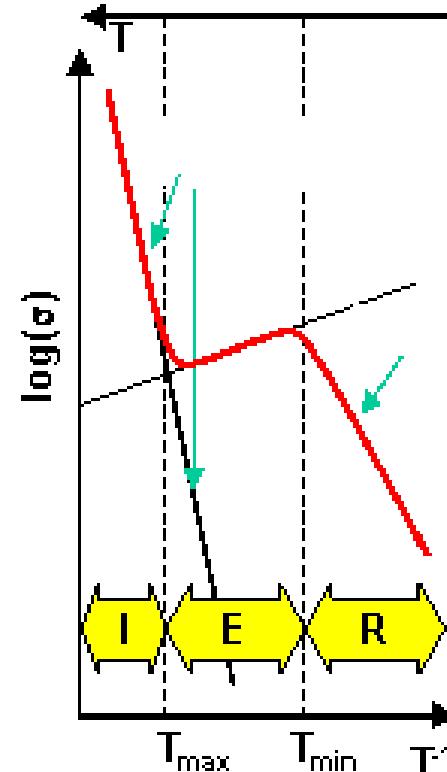
adalékkoncentráció



mozgáskoncentráció



vezetőképesség



I: intrinsic

E: teljes ionizáció

R: részleges ionizáció

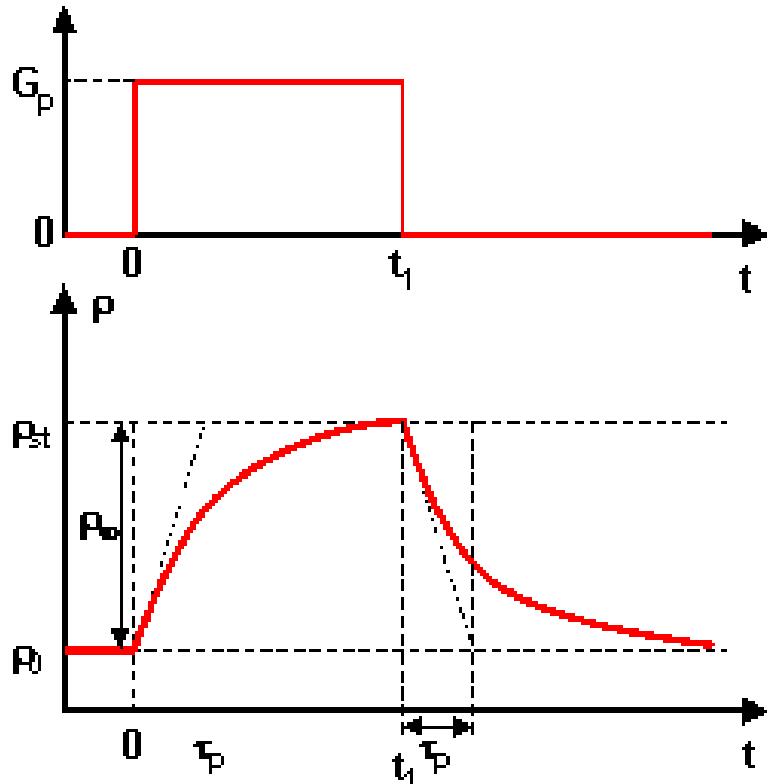
A félvezetők alkalmazhatóságának maximális hőmérséklete

T_{max} / °C	N_D, N_A / cm ⁻³		
félvezető	10^{15}	10^{17}	10^{19}
Ge	70	130	715
Si	250	510	1100
GaAs	450	810	-

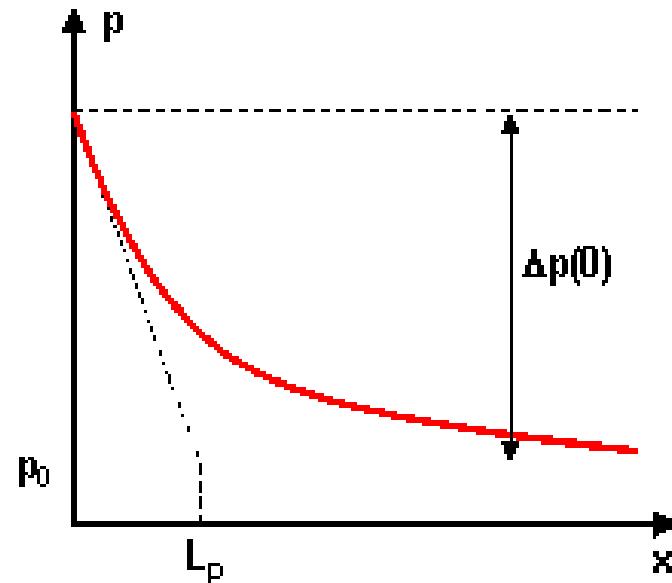
$$T \geq T_{max}$$

$$n_i \geq N_A \text{ ill. } N_D$$

Töltéskiegyenlítődési folyamatok időben és térben

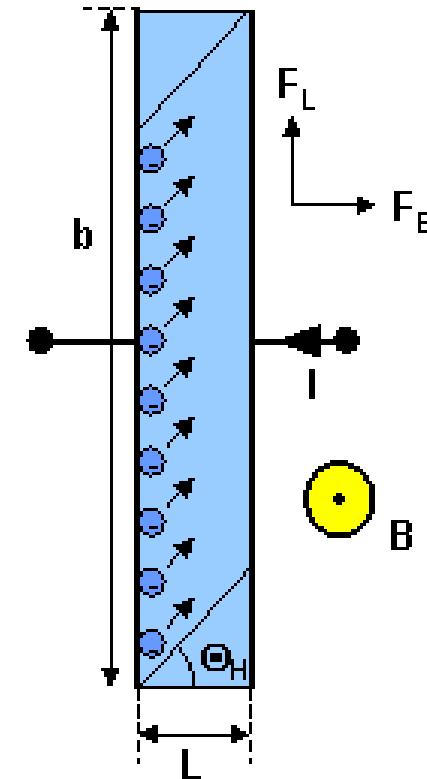
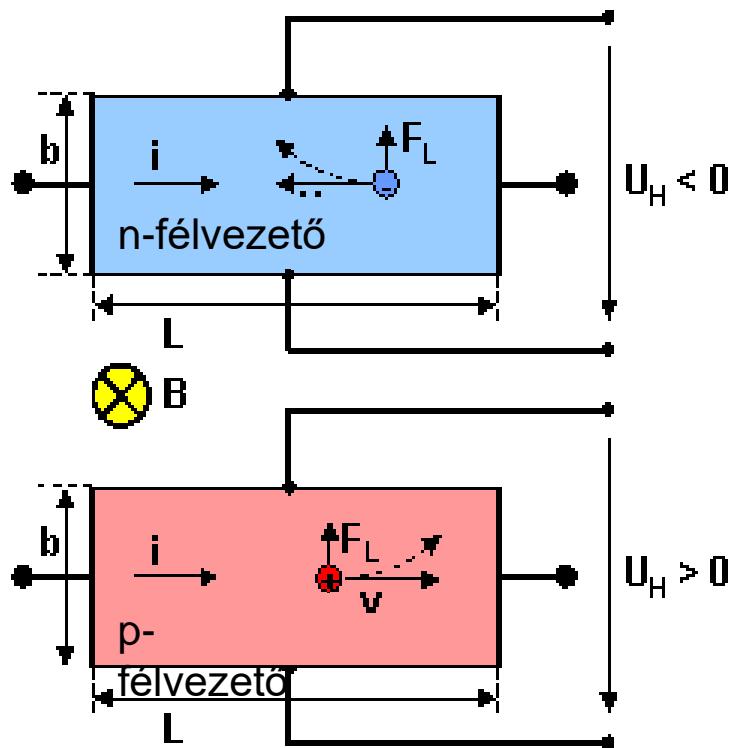


Többlet lyuk-koncentráció felépülése
és lecsengése állandó generációs
ráta mellett
 $0 < t < t_1$.



Lyuk-koncentráció többlet
térbeli lecsengése, ha a
kezdeti lyuk-többlet $\Delta p(0)$

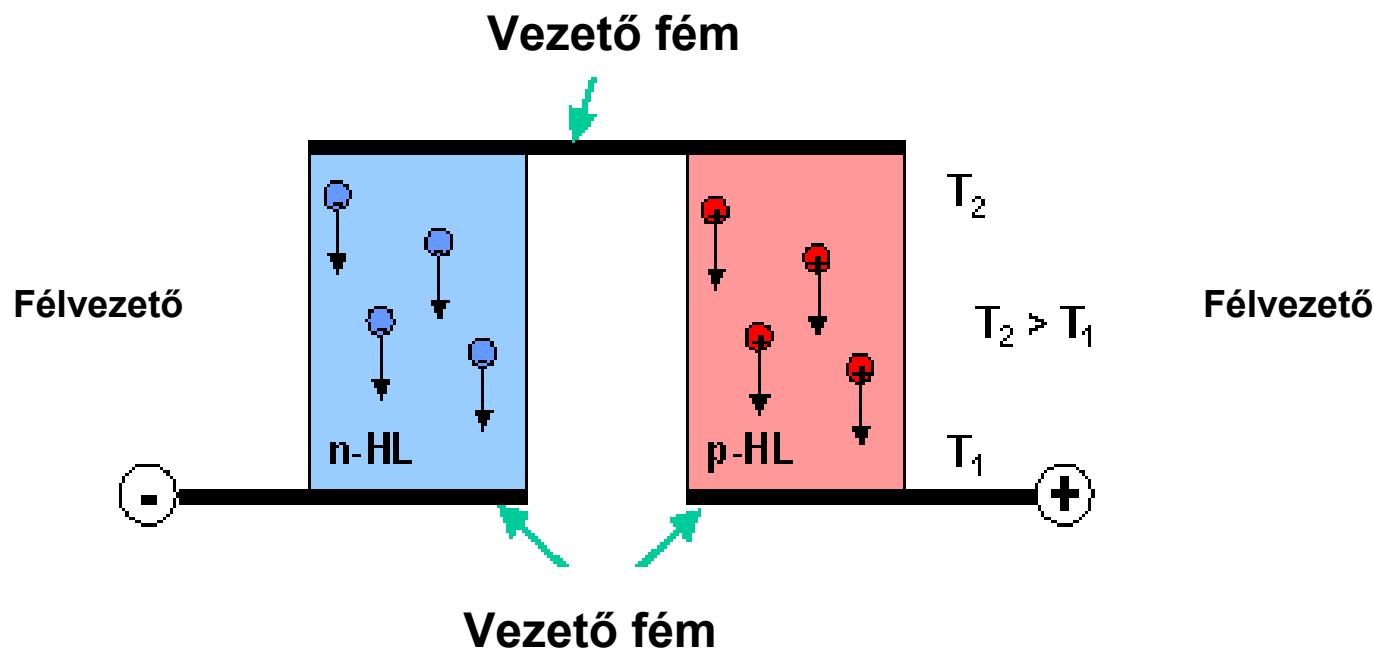
Galvanomágneses hatások a félvezetőkben



A töltéshordozók eltérítése a B mágneses térben:
Hall-effektus n- és p-típusú félvezetőben

Az elektromos ellenállás
megváltozása mágneses térben - B
mérés

A Seebeck-effektus



Kérdések az 1. részhez

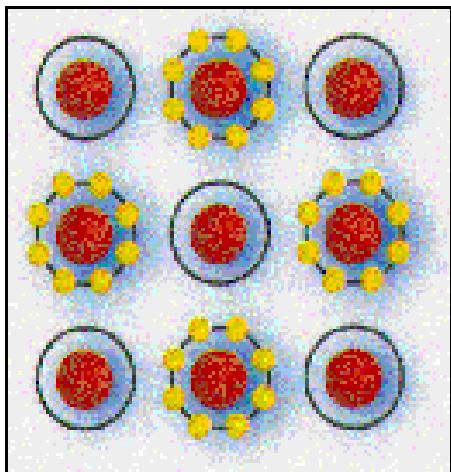
1. Mi a különbség a szennyezés és az adalékolás között?
2. Mik a sekély és mély nívók?
3. Hol helyezkednek el az energiszinteken a donor, ill. Akceptor nívók.
4. Hogyan függ a Fermi energiaszint a hőmérséklettől, intrinsic és extrinsic (adalékolt) esetben?
5. Hogyan függ a mozgóképes töltéshordozók koncentrációja és a vezetőképessége félvezetőkben a hőmérséklettől?

1. Anyagismeret

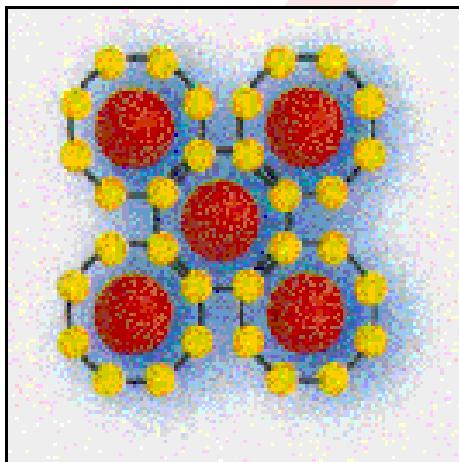
d. Vezetők (fémek)
elektromágneses viselkedése

Kötéstípusok összehasonlítása

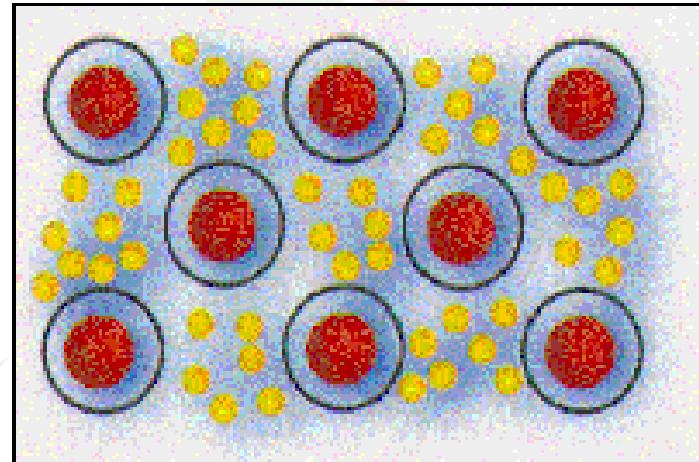
ionos



kovalens



fémes



I.+VII.: NaCl
II.+VI.: MgO
oszlopok
elemeinek
vegyületei

Félvezetők: Molekulák: Intermetallikusv.:

SiC, GaAs, CH_4

InP, InSb,

Elemi félvezetők:

GaN

Si, Ge, C

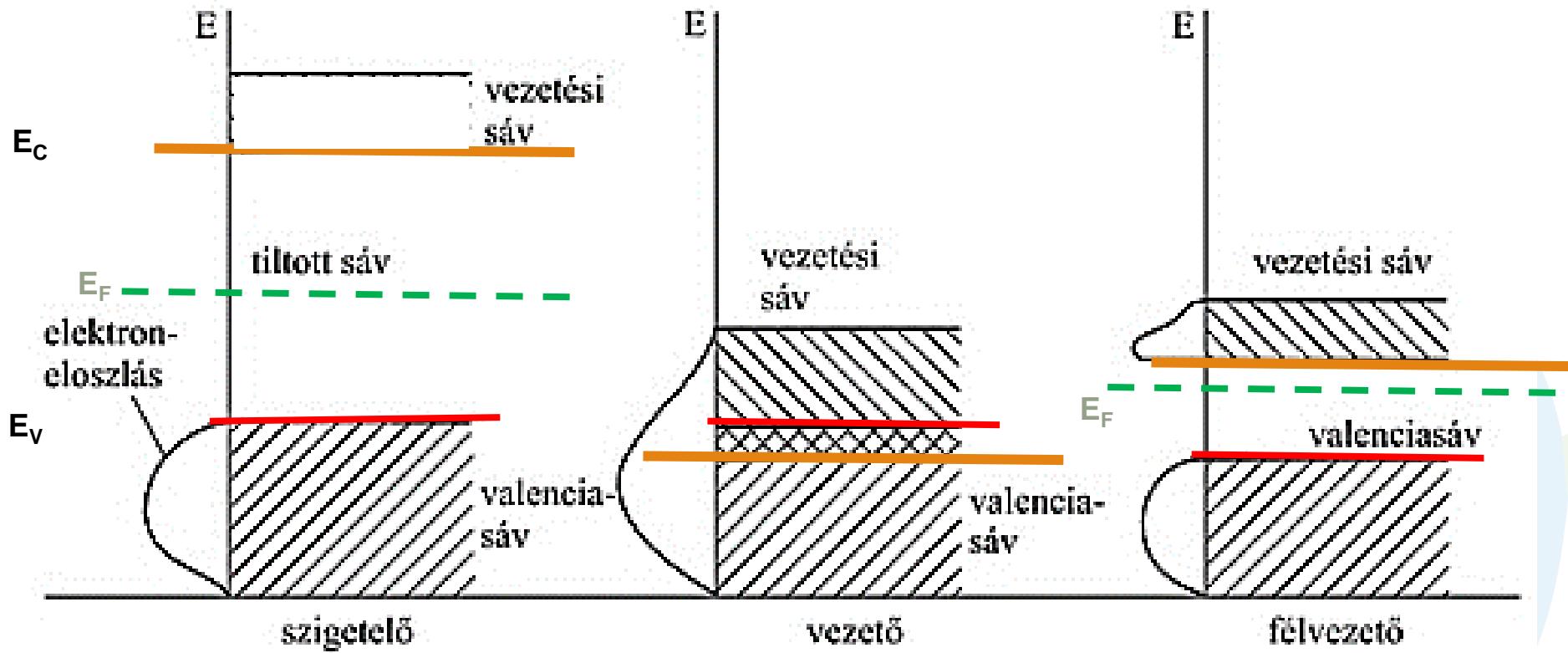
Elemi fémek

Az anyagok osztályozása a sávmodell alapján

- A sávok relatív helyzete és
- az egyes sávokban megengedett elektronállapotok betöltöttsége szerint

Fermi-energiaszint E_F

A Fermi-energiaértéknél alacsonyabb energiájú megengedett elektronállapotok nagy valószínűséggel fel vannak töltve elektronokkal.

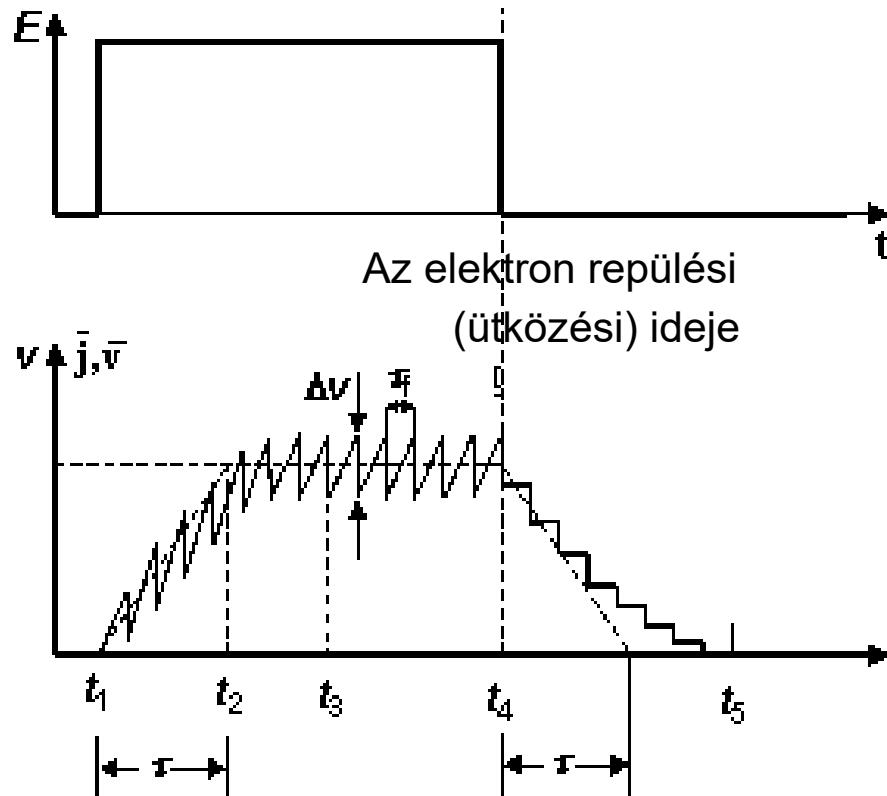


elektromos viselkedésük alapján

Fémek elektromos tulajdonságai

Az elektron gyorsulása az elektromos erőtérben, mozgékonyság

Az elektron sebességének időbeli alakulása $E > 0$ esetén ($t_1 - t_4$ között)



Az M_n effektív tömegű elektron gyorsuló mozgása

$$m_n \cdot \frac{dv}{dt} = -e_0 \cdot E$$
$$\Delta v = \frac{-e_0}{m_n} \cdot E \cdot \int_{t_1}^{t_f} dt = \frac{-e_0}{m_n} \cdot E \cdot \tau_f$$

Az elektron átlagsebessége

$$\bar{v} = \frac{\tau}{\tau_f} \cdot \Delta v = \tau \cdot \frac{e_0}{m_n} \cdot E$$

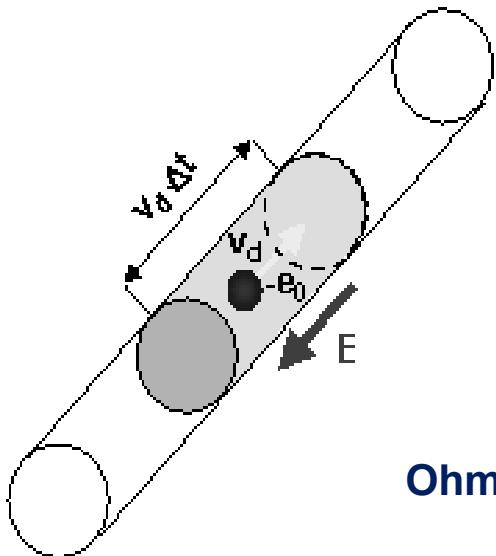
Az elektron mozgékonysága μ_n

$$\mu_n = -\frac{\bar{v}}{E} = \tau \cdot \frac{e_0}{m_n}$$

Áramsűrűség j

$$j = \sigma \cdot E = e_0 \cdot n \cdot \mu_n \cdot E = \frac{e_0}{m_n} \cdot \tau \cdot e_0 \cdot n \cdot E$$

Fémek elektromos tulajdonságai j áramsűrűség és σ elektromos vezetőképesség definíciója

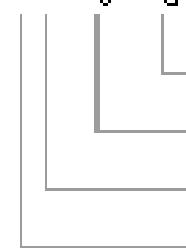


Áramsűrűség:

$$j = -n \cdot e_0 \cdot v_d$$

ahol

$$v_d = -\mu_n \cdot E$$



driftsebesség
elemi töltés
töltéshordozó-sűrűség
töltési szám $z_e = -1$



Elektromos térerősség
a töltéshordozók mozgékonyisége

Ohm törvénye:

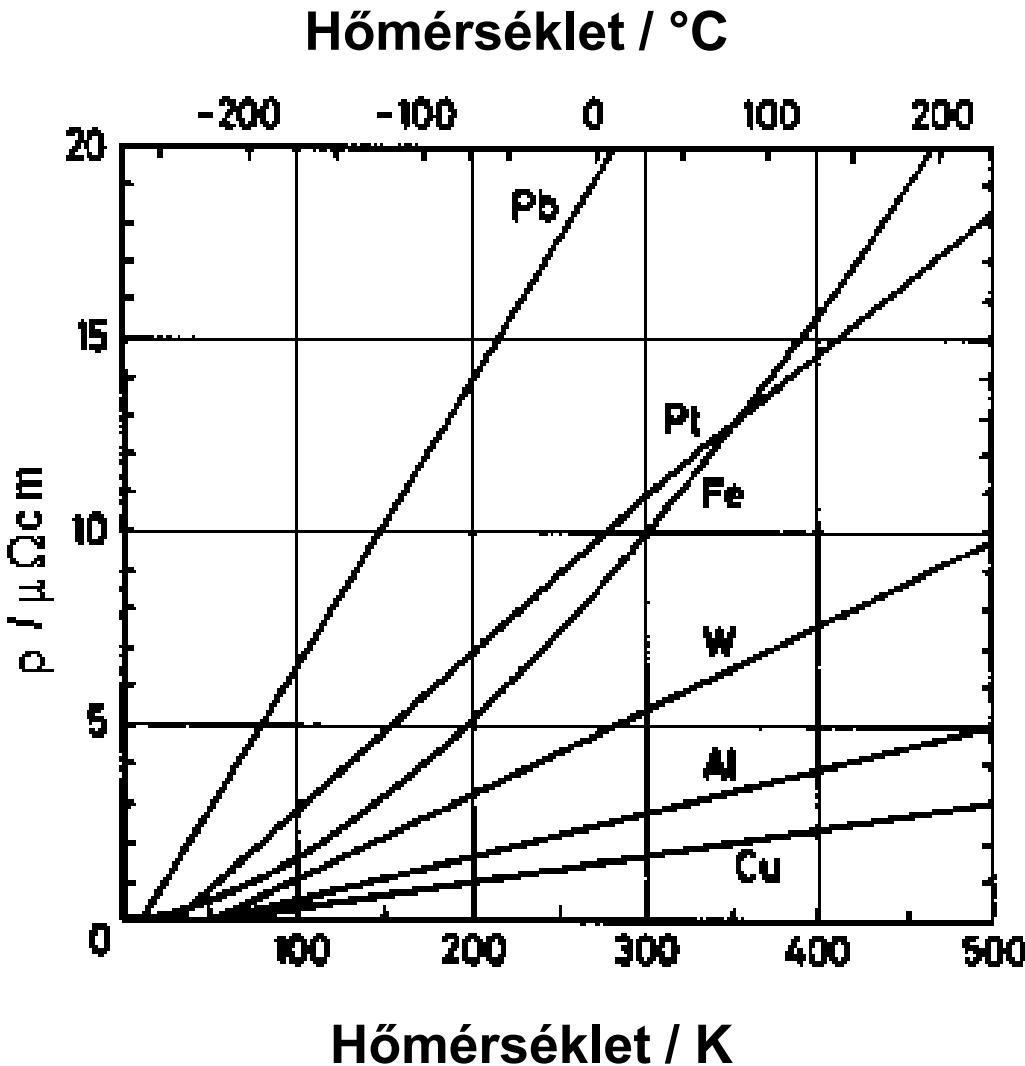
$$j = n \cdot e_0 \cdot \mu_n \cdot E = \sigma_e \cdot E$$

Lyukakkal (defektelektronokkal) kiegészítve: $\sigma = \sigma_e + \sigma_p = e_0 \cdot (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p)$

Ált. vezetőképesség: σ össz : $\sum_i \sigma_i = e_0 \cdot \sum_i |z_i| \cdot n_i \cdot \mu_i$

Fémek elektromos tulajdonságai

fémek ρ fajlagos ellenállása a hőmérséklet függvényében

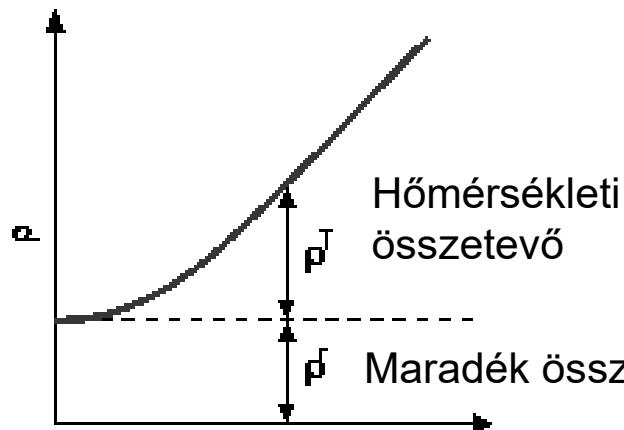


A ρ fajlagos ellenállás
hőmérsékletfüggése
$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha T)$$

T hőmérséklet °C-ban

Fémek elektromos tulajdonságai

Matthiessen-szabály $\rho=f(T)$ a valós fémekben

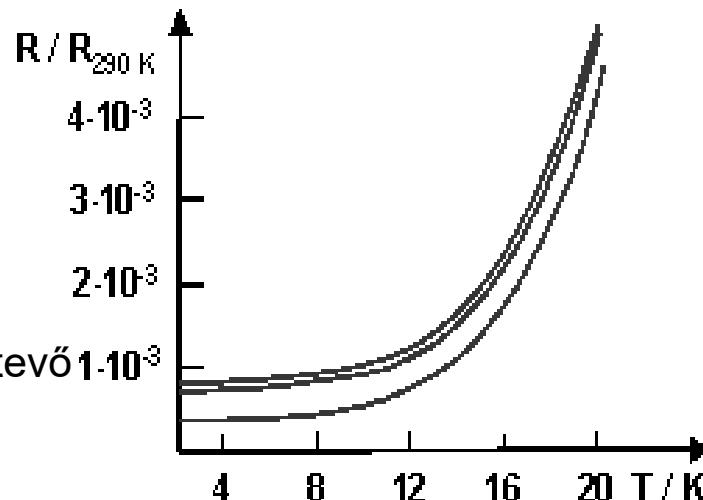


Matthiessen-szabály

$$\rho = \rho^T(T) + \rho^r \quad (\text{egyéb paraméterek})$$

Rácsionok
hőmozgása

Szenyeződések
stb.

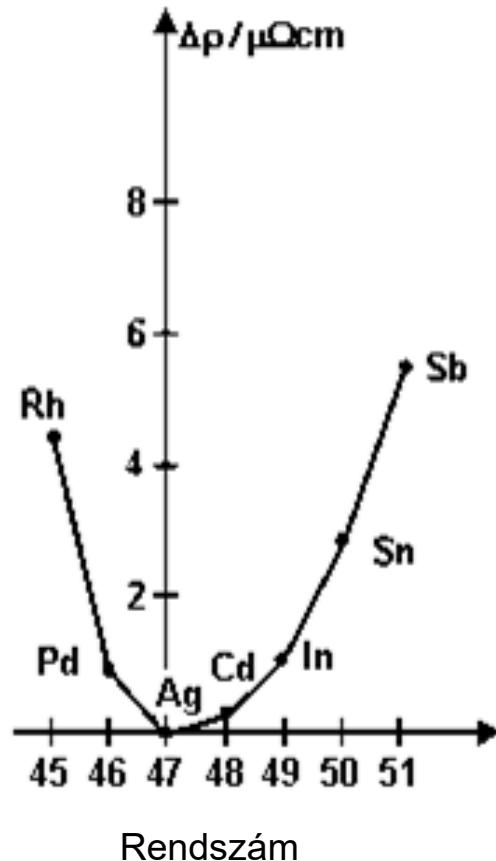
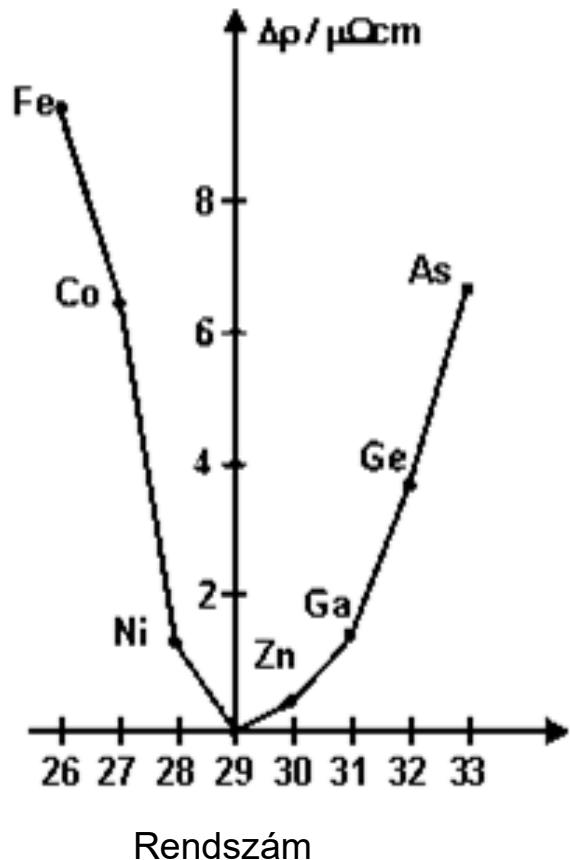


R/R_{290K} 3 féle különböző mértékben
szennyezett Na-mintára
„más” hőmérséklet-független paraméterek:

- idegen atomok
- diszlokációk
- más rácshibák (szemcsehatárok, szekunder halmozállapotok...)

Fémek elektromos tulajdonságai

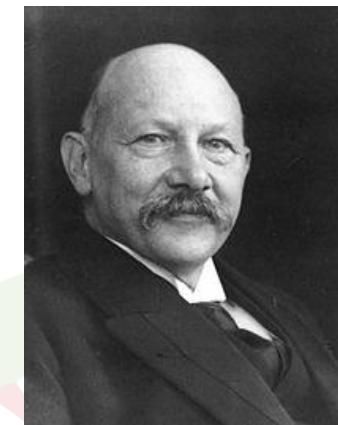
Az ellenállás megnövekedése a beépült idegen atomok miatt



Fémek elektromos tulajdonságai

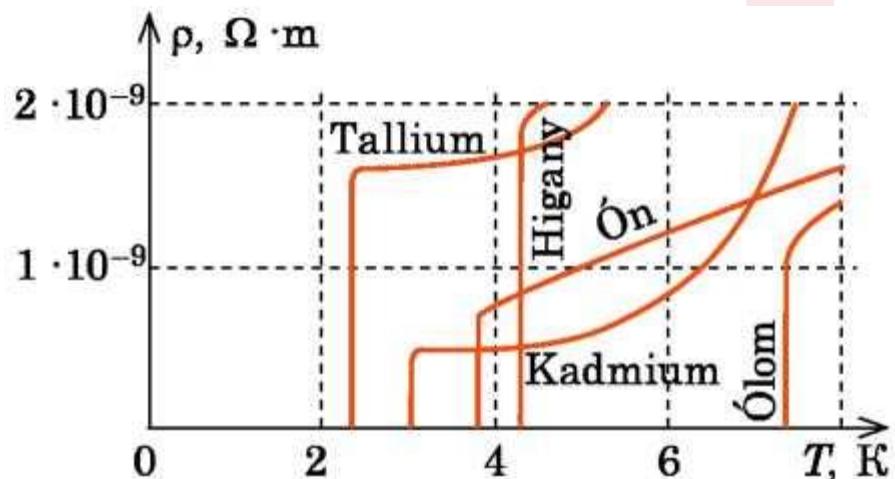
Szupravezetés alacsony hőmérsékleten

1911- Heike Kamerlingh Onnes: higany az abszolút nulla közeléi hőmérsékleteken (4,1 K) a fajlagos ellenállása ugrásszerűen nullára csökkent.



Heike Kamerlingh Onnes
(1853-1926)

1933- Walter Meissner és Robert Ochsenfeld: szupravezető állapotban történő átmenet során a mágneses tér teljes egészében kiszorul a vezetőből (Meissner-effektus). Ha a vezető fölé mágneset helyeznek, majd hűtéssel szupravezetővé alakítják, a mágnes levitálni (lebegni) fog a szupravezető fölött.



Walter Meissner
(1882-1974)

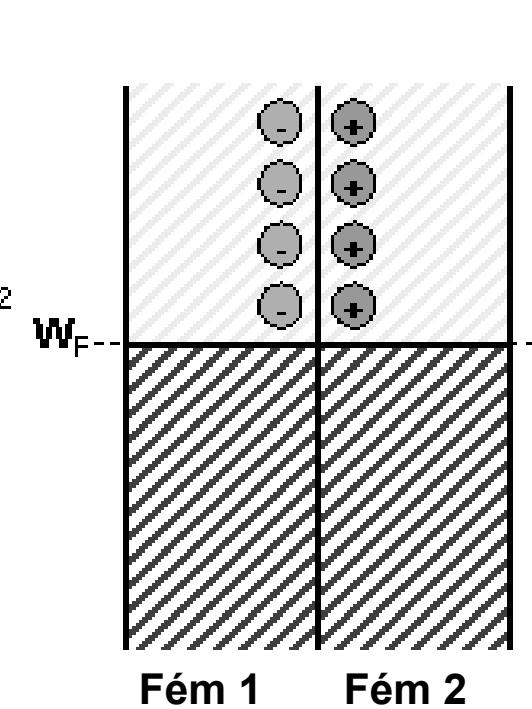
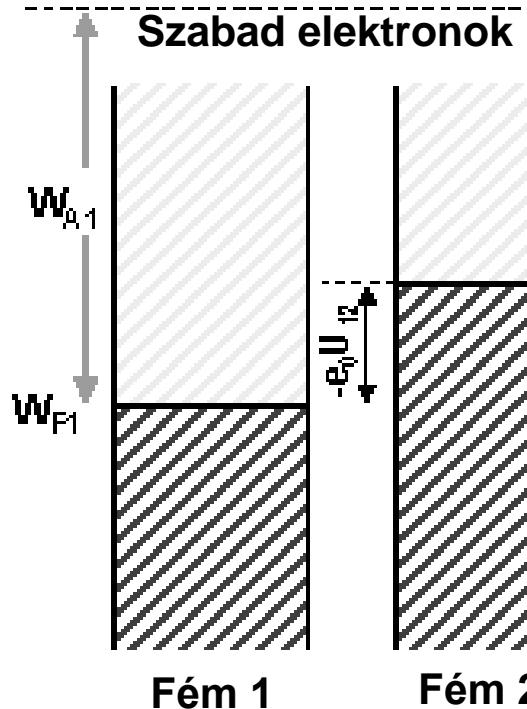


Robert Ochsenfeld
(1901-1993)

5.3. ábra. Egyes fémek fajlagos ellenállásának változása abszolút nullához közeléi értékeknél
[Forrás: <https://uabooks.top/1038-5-elektromos-ram-a-fmekben.html>]

Fémek elektromos tulajdonságai

Különböző Fermi-energiájú fémek kontaktusfeszültsége



Fém	U_{12} / V
Pt	-0,20
Ag	-0,08
Cu	0
Fe	+0,14
Sn	+0,44
Pb	+0,50
Zn	+0,89

$$W_{A1} - W_{A2} = -eU_{12}$$

Két különböző Fermi-energiájú (W_{F1} és W_{F2}) fém energiaállapota és a **kilépési energiák:** W_{A1} és W_{A2}

Érintkezés esetén (W_F közös Fermi-energia) a kiegyenlítő-töltés potenciálkülönbséget eredményez
→ **U_{12} kontaktus-feszültség**

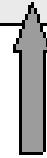
Fémek elektromos tulajdonságai

Termikus vezetőképesség fémekben

Nem fémes szilárdtestekben: a hővezetést rácsrezgések képezik
Fémekben: a szabad elektronok által képviselt plusz energiaáramlás jelentősebb

Hőáram-sűrűség (q_{vv}):

$$q_{vv} = -\lambda_{vv} \cdot \frac{dT}{dx}$$



λ_{vv} : Hővezetési képesség

$$\lambda_{vv} = \left(\frac{3}{2}\right)^2 \cdot \frac{n \cdot \tau}{m_h} \cdot k^2 T$$

Energia elektrononként

$$W_{electron} = \frac{3}{2} k T$$

Egy elektronra ható erő

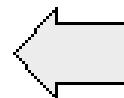
$$F = -\frac{\partial W}{\partial T} \cdot \frac{dT}{dx} = -\frac{3}{2} k \cdot \frac{dT}{dx}$$

Mozgásegyenlet:

$$m_h \cdot v_{th} + b \cdot v_h = -\frac{3}{2} k \cdot \frac{dT}{dx}$$

$$v_{th} = v_{th_0} \cdot (1 - e^{-\frac{T}{T_0}})$$

$$v_{th_0} = -\frac{3}{2} \cdot \frac{k \tau}{m_h} \cdot \frac{dT}{dx}$$



Hőáram-sűrűség

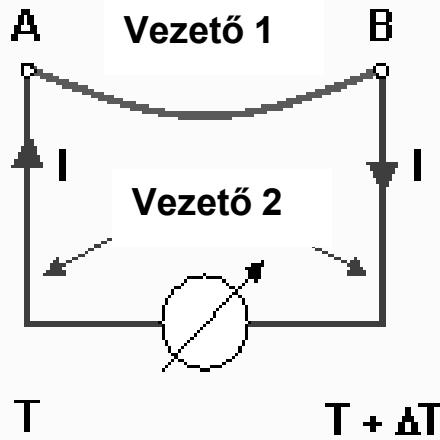
$$q = n \cdot \frac{3}{2} k T \cdot v_{th} = \\ = n \cdot \frac{3}{2} k T \cdot \left(-\frac{3}{2} \frac{k \tau}{m_h}\right) \cdot \frac{dT}{dx}$$

⇒ Hő- és töltésáramlás összekapcsolódása fémekben és félvezetőkben:
„termo-erő”

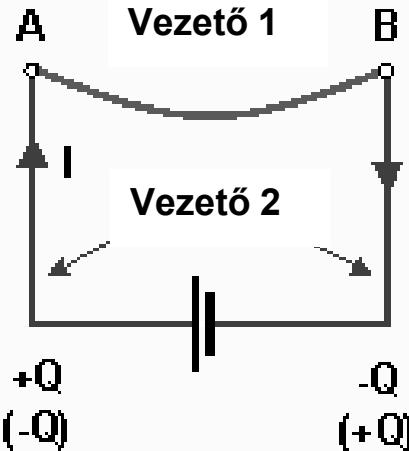
Fémek elektromos tulajdonságai

Termoelektronos hatások fémekben és félvezetőkben

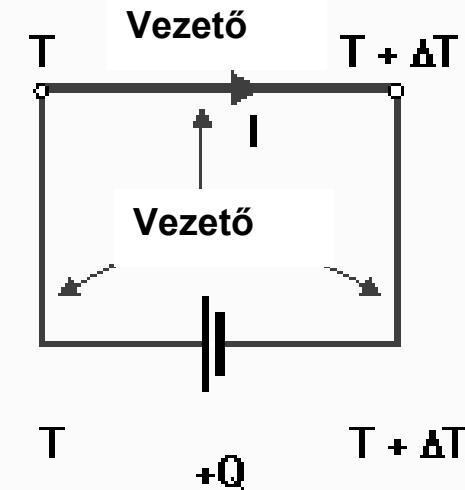
Seebeck - hatás



Peltier - hatás



Thomson - hatás



Az A és B közötti hőmérséklet-különbség miatt potenciál-különbség lép fel és elektromos áram folyik:

$$U_{th} = \eta_{AB} \cdot \Delta T$$

↑
Seebeck-tényező

Felmelegedés ill. lehűlés ($+Q, -Q$) A-ban és B-ben az áthajtott elektromos áram miatt

$$P_p = \chi_{AB} \cdot I$$

↑
Peltier-tényező

Felmelegedés vagy lehűlés homogén vezetőben, ha kívülről áramot és hőmérsékletváltozást is rákényszerítünk

$$dP_{th} = \chi_{th} \cdot I \cdot \text{grad}(T) dV$$

↑
Thomson-tényező

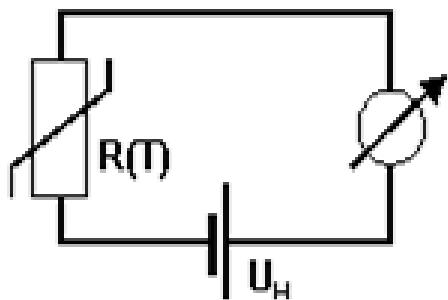
Fémek a méréstechnikában

Alkalmazási elvek

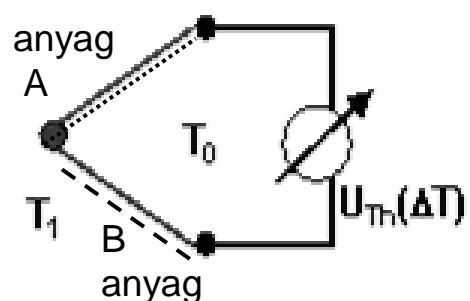
Fémek a méréstechnikában

Hőmérséklet T

U_H segédfeszültséggel



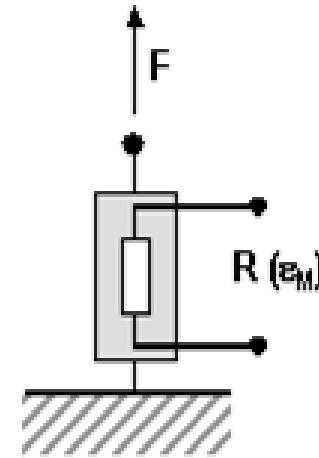
T_0 viszonyítási hőmérséklettel



Ellenállás-hőmérő

Termoelem

F erő, ε_M nyúlás



Nyúlásmérő bélyeg

Kérdések az 1. részhez

1. Hogyan alakul az elektronok mozgása vezetőkben elektromos tér hatására?
2. Mi határozza meg a fémek vezetőképességét, áramszűrűségét?
3. Milyen a fémek fajlagos ellenállása a hőmérséklet függvényében?
4. Milyen jelenség alakul ki két különböző fém összeérintésekor?
5. Mondjon példát a fémek közvetlen szenzorteknikai alkalmazására!



KÖSZÖNÖM A FIGYELMET!

BOJTOS Attila
BME - MOGI Tanszék
bojtos@mogi.bme.hu

Szenzorteknika

Termikus elvek, hőmérsékletmérés

BOJTOS ATTILA
BME - MOGI TANSZÉK



M Ú E G Y E T E M 1 7 8 2



Tematika

Bevezetés a szenzorteknikába

- csoportosítás,
- méréstechnikai tulajdonságok,
- Jelfeldolgozás

Anyagszerkezet

- Atomszerkezet
- Kémiai kötések
- Sávszerkezet
- Félvezetők
- Fémek

Érzékelési elvek fizikai alapjai (szenzor)

- **Termikus elvek, hőmérsékletmérés**
- Ellenállásváltozás elvén működő érzékelés
- Kapacitás
- Mágneses mérési elvek
- Piezoelektronos mérési elvek
- Optikai-elvek
- Akusztikai elvek

Érzékelési módszerek, alkalmazások (jelátalakító)

- Hossz-, távolság-, elmozdulás-, elfordulásmérés szenzorai
- Sebesség-, térfogatáram-, gyorsulásmérés szenzorai
- Nyomás-, erő-, nyomatékmérés szenzorai
- (Kémiai érzékelés szenzorai)

Aktuátorok

- Motorok
- Piezoelektronos aktuátorok
- Magnetostrikciós aktuátorok

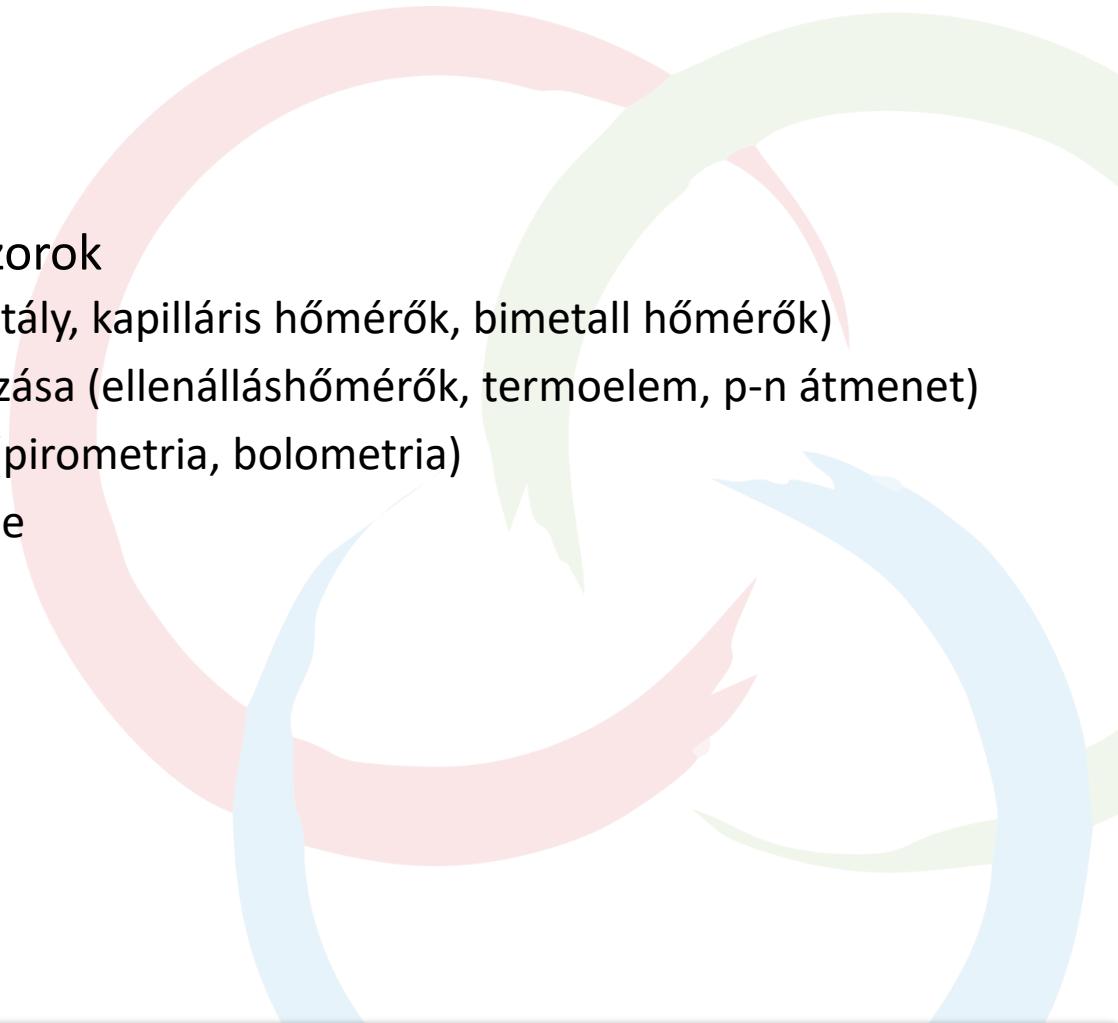
Integrált érzékelő és beavatkozó rendszerek (vendégelezés)

- Technológiai alapok, MEMS, NEMS, OEMS
- Szenzorhálózatok, IoT



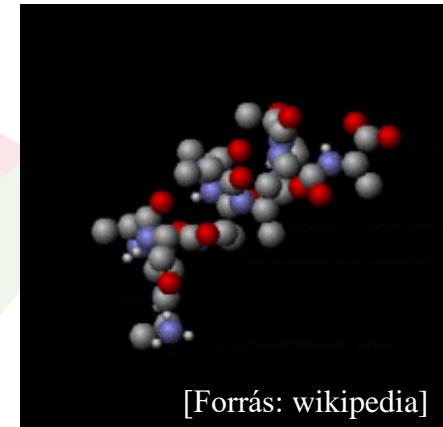
5. Előadás áttekintése

- Hőmérséklet,
- Hőmérsékleti skálák,
- Kalibrálás
- Hőmérséklet mérési elvek, szenzorok
 - Fizikai méretváltozás (töltött tartály, kapilláris hőmérők, bimetall hőmérők)
 - Elektromos tulajdonságok változása (ellenálláshőmérők, termoelem, p-n átmenet)
 - Az emittált hősugárzás mérése (pirometria, bolometria)
 - Kémiai fázisváltozások hőfüggése



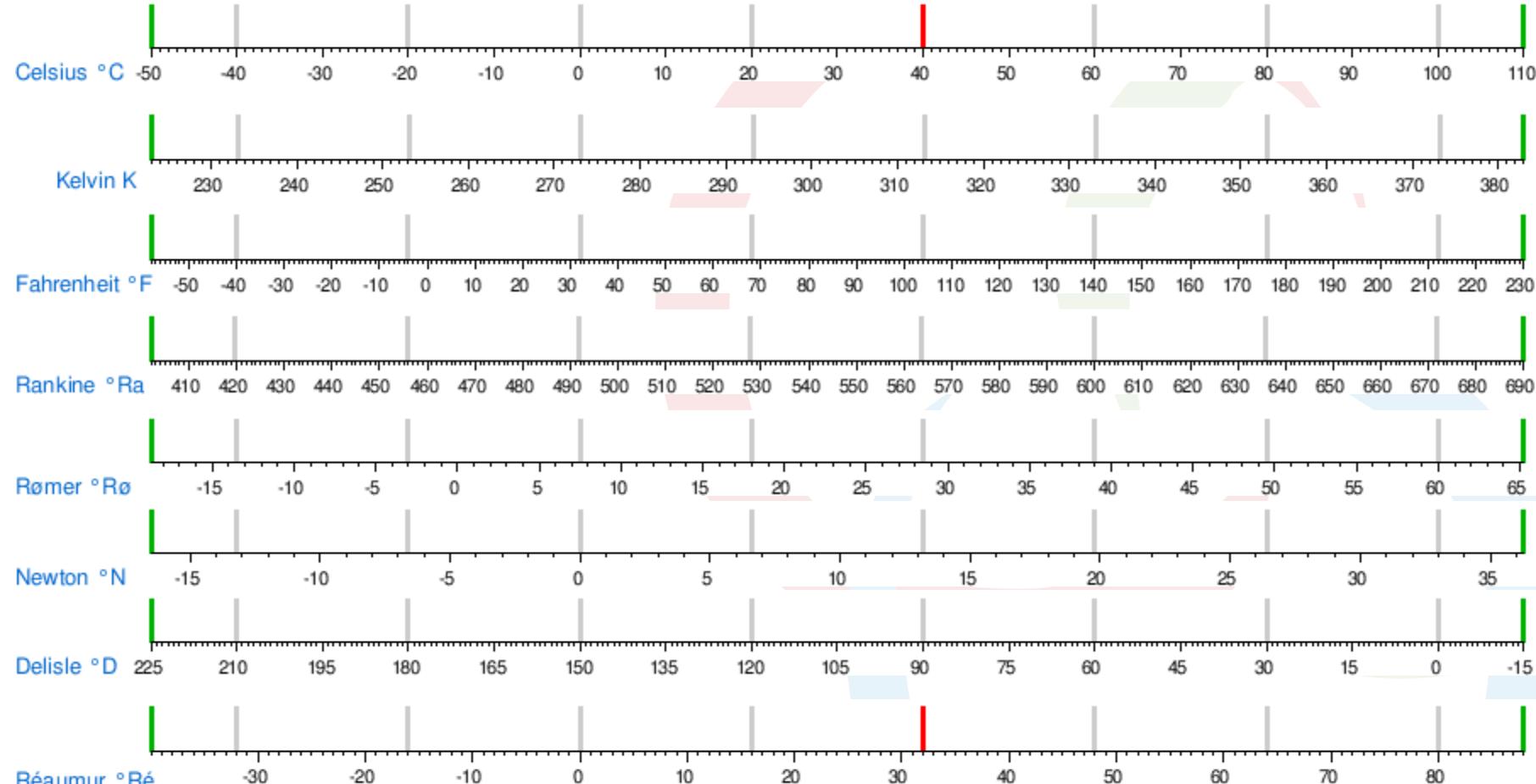
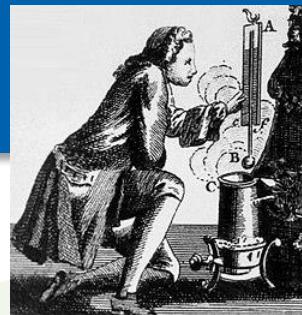
A Hőmérséklet

- Hőmérséklet: A testet alkotó részecskék átlagos mozgási energiájával arányos fizikai állapothatározó.
- $E_{kin} = kT$; ($k = 1,3806488 \cdot 10^{-23}$ J/K, a [Boltzmann-állandó](#))



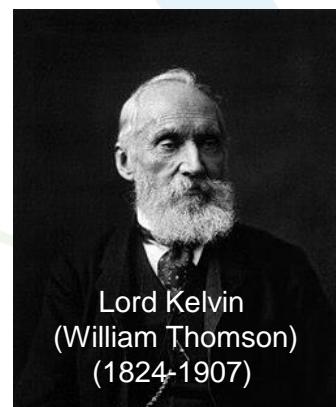
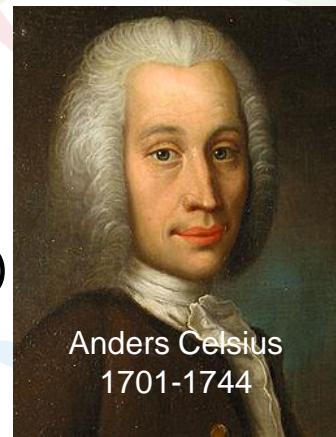
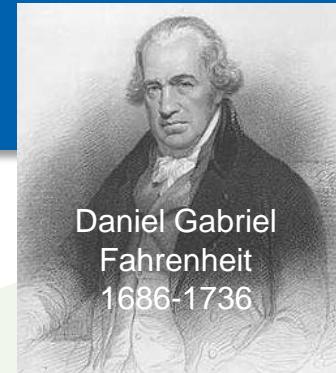
Alapmennyiség	Jelölés	Alapegység
Hosszúság	l	méter (m)
Tömeg	m	kilogramm (kg)
Idő	t	másodperc (s)
Áram	I	amper (A)
Termodinamikai hőmérséklet	T	kelvin (K)
Anyagmennyiség	n	mol (mol)
Fényerősség	I_V	kandela (cd)

Hőmérsékleti Skálák

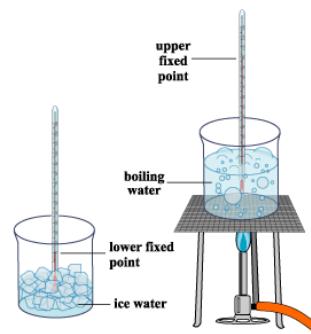


Hőmérsékleti Skálák

- Fahrenheit-skála: [$^{\circ}\text{F}$]; Bevezetője Daniel Gabriel Fahrenheit.
 - A skála nullpontja az általa kísérleti úton előállított legjobban lehűlő sós oldat fagyáspontja
 - A víz fagyáspontját 32-val jelölte,
 - a másik alappontja az emberi test hőmérséklete volt,
 - amely hőtartományt az oszthatóság kedvéért 96 egységre bontotta.
- Celsius-skála: [$^{\circ}\text{C}$], Bevezetője Anders Celsius. $T_C = \frac{5}{9}(T_F - 32)$
 - az olvadó jég: 0°C , ($273,15\text{K}$; 32°F),
 - a forrásban levő víz: 100°C , (légköri nyomás mellett)
- Kelvin-skála: [K], tiszteletére nevezték el. $T_C = T_K - 273,15$
 - a nulla kelvin az abszolút nulla fok (amikor a molekulák már nem végeznek hőmozgást),
 - másik sarokpont: a víz hármasponti hőmérséklete: $273,15\text{K}$



Hőmérséklet Szenzorok Kalibrálása



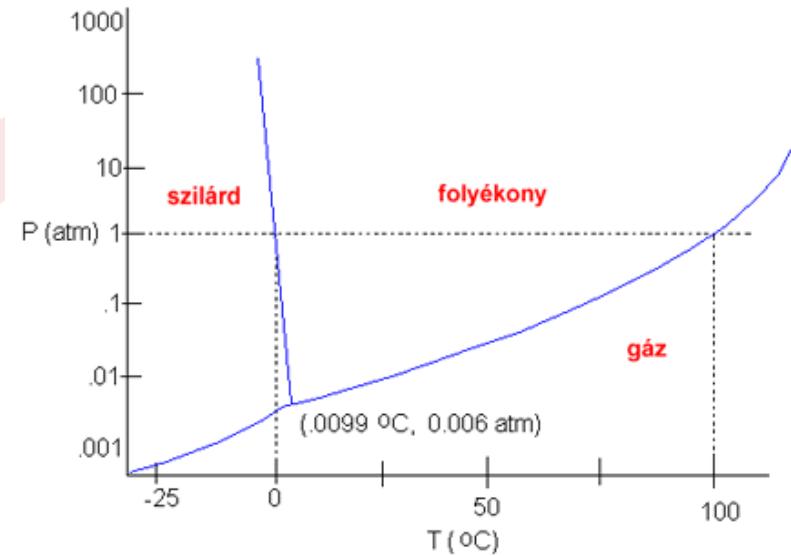
- Cél: R – T összefüggés felvétele,
- Nemzetközi Hőmérsékleti Skála (International Temperature Scale of 1990 - ITS-90)
 - Kiadta: [International Committee for Weights and Measures](#) (CIPM) / Consultative Committee for Thermometry (CCT)
 - Célja a nemzetközileg összehasonlítható **termodinamikai abszolút hőmérsékleti skála** megvalósítása.
 - **14 fix pont:** 0.65 K ... 1 357.77K (**-272.50°C ... 1 084.62°C**)
 - A teljes tartományt átfedéssel lefedő sztandard hőmérők:
 - hélium gőznyomás hőmérők (0,65 – 5,0 K),
 - hélium gáz hőmérők (3,0 – 24.5561 K),
 - **Standard platina ellenállás-hőmérő (SPRTs, PRTs, Platinum RTDs) (13.8033 – 1234.93 K),**
 - monokromatikus sugárzás hőmérők (pirométer) (1234.93 – ∞ K),
- Szokásos eljárások:
 - Fix pont (abszolút) kalibráció (Fixed point calibration),
 - Összehasonlító (Comparison calibrations).



Hőmérséklet Szenzorok Kalibrálása

(Fix pont (abszolút) kalibráció - Fixed point calibration)

- Legnagyobb pontosságú eljárás: $\pm 0,001 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Anyagok jellemző állapotváltozási pontjainál történik:
 - Olvadáspont,
 - Forráspont,
 - 3-as pont (nyomásmérés hibáját kiküszöböli),
 - Víz 3-as pontja (TPW)
 - Alkalmzott anyagok:
 - H_2O , FPs, Ar, Ga, Hg, Sn, Zn, Al, Ag,...
 - Leggyakoribb:
 - jégfürdő (olcsó), $\pm 0.005 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Standard Platinum Resistance Thermometer (SPRT), elsődleges szabvány,

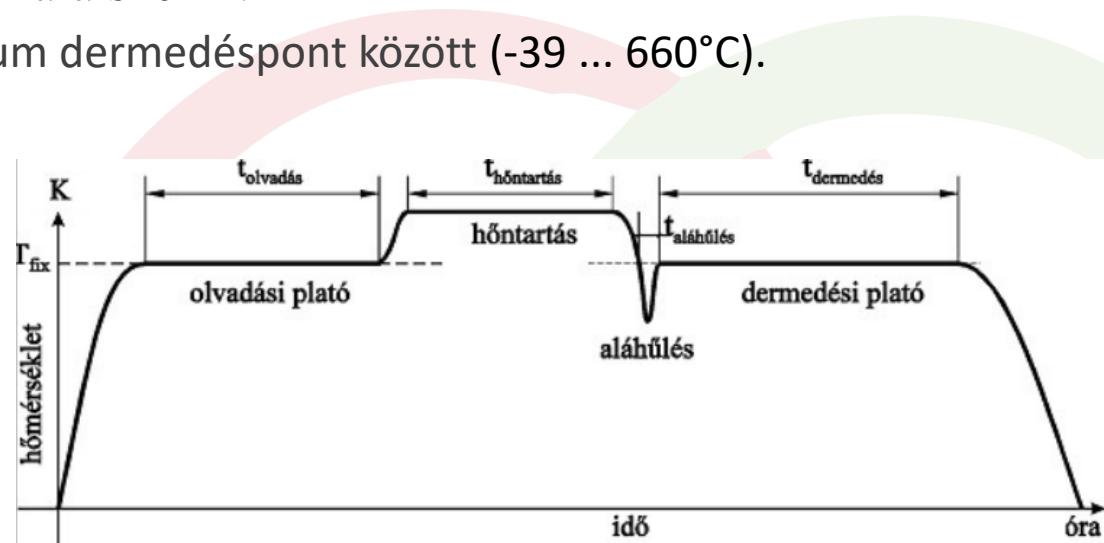


Abszolút kalibráció: $\pm 0.001 \text{ } ^\circ\text{C}$ (2 Sigma)
WTP: $0.0099 \text{ } ^\circ\text{C}$; Ga olv.: $29.7646 \text{ } ^\circ\text{C}$; Hg TP: $-38.8344 \text{ } ^\circ\text{C}$.
[Forrás: www.isotech.co.uk]

Hőmérséklet Szenzorok Kalibrálása

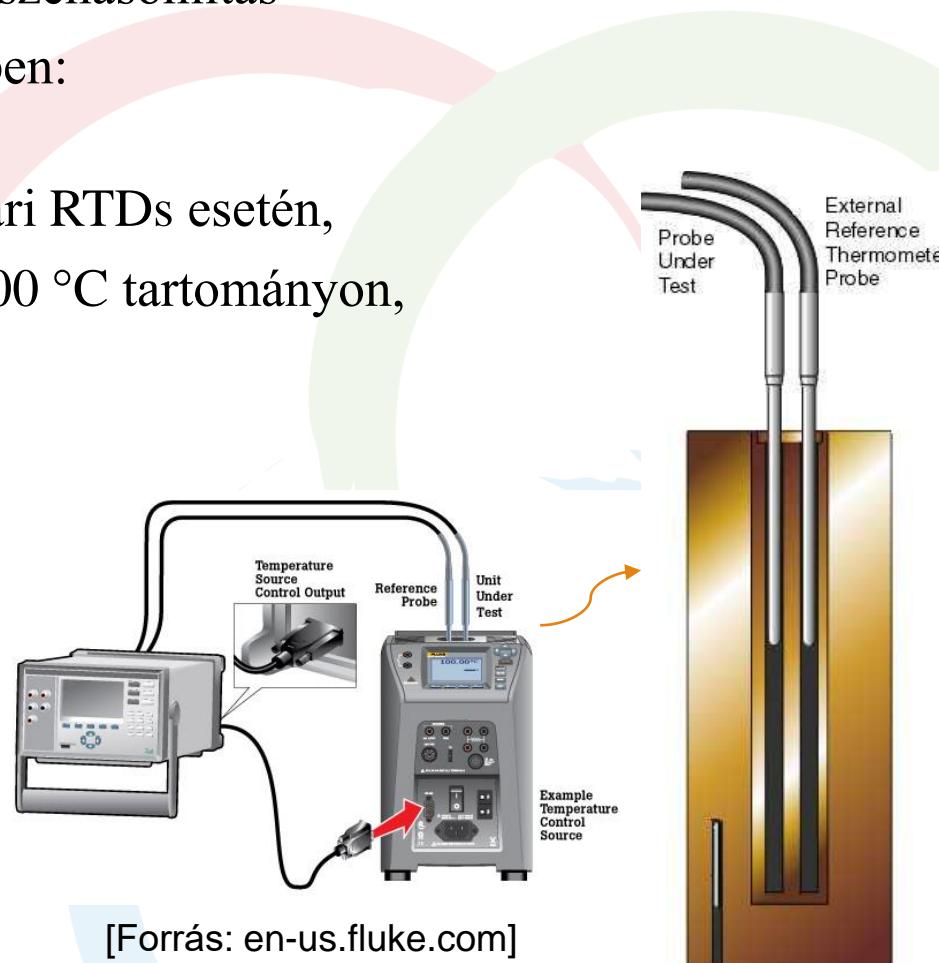
(A hőmérsékletmérések nemzeti etalonja)

- ITS-90 nemzetközi hőmérséklet skála szerint
 - A higany hármaspont és az alumínium dermedéspont között (-39 ... 660°C).
- Nemzeti etalon: Fixpont cellák:
 - higany hármaspont: -38,83°C
 - víz hármaspont: 0,01°C
 - gallium olvadáspon: 29,76°C
 - ón dermedéspont: 231,93°C
 - cink dermedéspont: 419,53°C
 - alumínium dermedéspont: 660,32°C
 - arany dermedéspont: 1064,18°C
- Nemzeti etalon: etalon ellenálláshőmérők,
 - fixpontok közötti tartományokban nagypontosságú összehasonlítás.



Hőmérséklet Szenzorok Kalibrálása (Összehasonlító Kalibráció (Comparison calibrations).)

- Kalibrált hőmérséklet szenzorral való összehasonlítás
- stabil és egyenletes hőmérsékletű fürdőben:
 - szilikon olaj, só-olvadék.
- Alkalmazás: Másodlagos SPRTs, és ipari RTDs esetén,
- Bármilyen hőmérsékleten $-100\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ tartományon,
- Olcsó eljárás,
 - párhuzamosan több szenzoron végezhető,
 - automatizálható.



[Forrás: en-us.fluke.com]

Hőmérséklet Mérés Módjai

- Mechanikus elven működő (Fizikai érintkezés útján)
 - Térfogatváltozás
 - Kapilláris (folyadék, gáz térfogatváltozása)
 - Fémrudas (lineáris tágulás)
 - Kettősfém (Bimetál – eltérő térfogatváltozás)
 - Curie-elvű hőmérsékletkapcsoló
- Villamos elven működő (Fizikai érintkezés útján)
 - Ellenállásváltozás (resistance temperature detectors (RTDs): PTC, NTC)
 - Fém (platina, Pt100)
 - Félvezető (pn átmenet típusú, IC-k, diódák, tranzisztorok, ...)
 - Termisztorok (PTC, NTC)
 - Polímer (vezető részecskékkal szennyezett polímer)
 - Seebeck effektus
 - Termoelem / termopár
- Sugárzás mérés útján
 - Pirométerek,
 - Bolométer.
- Kémiai fázisváltozások hőfüggése
 - Folyadékkristályos hőmérő



Mechanikai hőméréséket szenzorok (Üvegkapilláris Folyadékhőmérők)

- Működési elvük:

- Térfogatváltozás, a kapillárisban lévő mérőfolyadék és az üvegedény hosszváltozásának különbsége.
- Osztás: 0,01 ... 2 °C.

- Mérőfolyadékok:

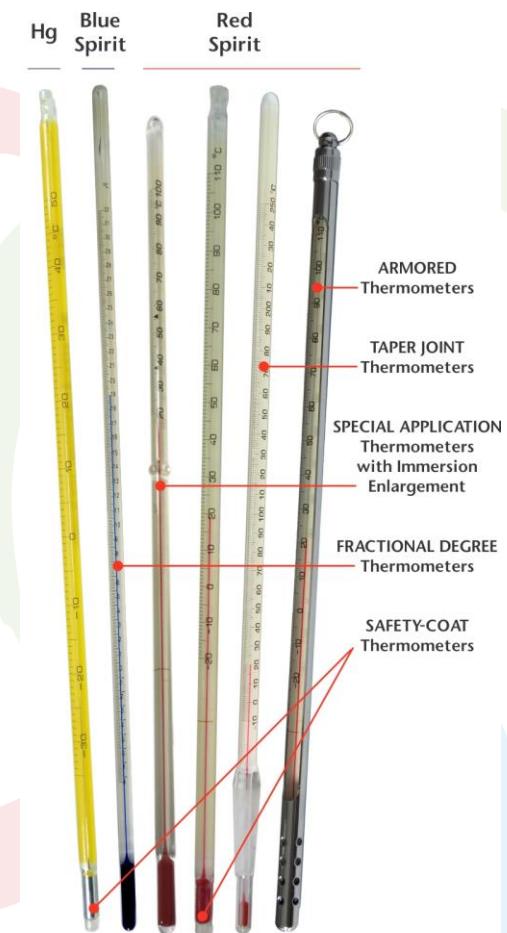
	Mérési tartomány [°C]	Hőtágulási tényező [$1/^\circ\text{C}$]
◦ Higany	-37 ... +320	$1,8 \times 10^{-4}$
◦ Alkoholok	-75 ... +120	$1,1 \times 10^{-3}$
◦ Toulol	-70 ... +100	$1,09 \times 10^{-3}$
◦ Pentán	-200 ... +20	$1,54 \times 10^{-3}$
◦ Gallium	+100 ... +2000	-

- Kivitelük szerin:

- Belső skálás hőmérő, Bothőmérők,
- Különleges kialakításuk:
 - Beckmann hőmérő – kis, változtatható mérési tartomány.
 - **Platina érintkezős hőkapcsoló.**

- Előnyük /Hátrányuk:

- + Egyszerű felépítés, olcsó
- Távmérésre nem alkalmasak.



Mechanikai hőmérséklet szenzorok (Üvegkapilláris Folyadékhőmérők)

Lenagyobb hőmérséklet érzékenységű rész a kapilláris végén tartály a.

- Itt van a mérőfolyadék legnagyobb térfogata, ezt helyezzük a mérőterbe.
- A tartály mérete és a kapilláris keresztmetszete határozza meg a
 - A hőmérő érzékenységét (még megvalósítható: $\sim 20 \text{ mm} / ^\circ\text{C} \rightarrow 0,01 ^\circ\text{C}$),
 - A tartály növelése növeli a hőtehetetlenséget, hőkapacitást (fajhő*tömeg), ($C_{th} = c \cdot m$),
 - A kapilláris keresztmetszet szűkítése növeli a folyadék felületi feszültségéből adódó hibát.

A (mérőterből) kiálló szál, a kapilláris környezeti hőmérséklettel kapcsolatban lévő része hibát okoz, amit nagy pontosságú mérés és nagy mért-környezeti hőmérséklet különbség esetén korrigálni kell.

- $T = T_1 + kT' (T_1 - T_2)$
 - T korrigált hőmérséklet,
 - T_1 – kijelzett hőmérséklet (reading),
 - T_2 – a kiálló szál középhőmérséklete, (környezeti hőmérséklet, ambient T),
 - T' – a kiálló szál hossza a hőmérő mértékegységében (pl.: °C-ban) megadva,
 - k – a mérőfolyadék és az üveg relatív hőtágulási tényező (Hg – Üveg: $1,6 \times 10^{-4} ^\circ\text{C}$)

További hibaforrások:

- Az üveg öregedése (lassú összehuzódás) nullpont-feltolódást okoz ($0,01 \dots 0,04 ^\circ\text{C}/\text{év}$),
- Nullapont-depresszió az üveg felmelegített (kitágult) majd lehűtött üveg lassú visszazsugorodása ($0,2 \dots 0,6 ^\circ\text{C}$, 100°C -ra való felmelegítés után).



Mechanikai hőmérséklet szenzorok (Folyadéknnyomás Hőmérők,)

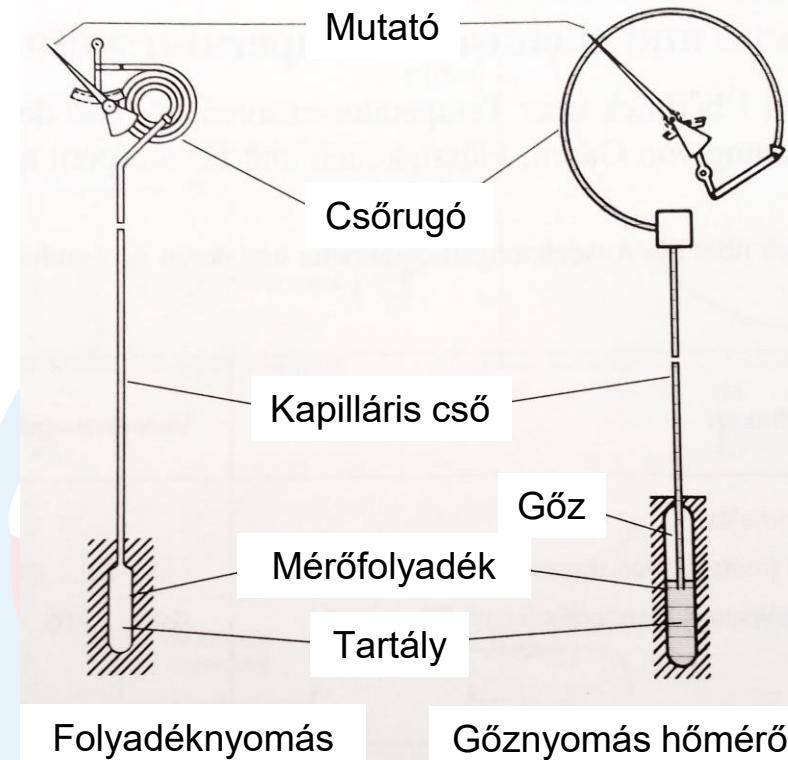
Egy folyadékkal töltött tartály (ezt helyezzük a mérődő térbé és egy nyomásmérő eszköz (csőrugó, Bourdon cső), egy hajlítható kapilláris csővel van összekötve (akár 50m).

- A mérési tartományon a mérőközeg folyadék halmazállapotban marad.
- A folyadék és az edény térfogatváltozása közötti különbségen alapul.
- A mért nyomás a hőmérséklet függvénye.
- A pontosság az alkalmazott folyadéktól függ.

Kompenzációs hőmérő: mérőtartály nélküli kapilláris cső + csőrugó kompenzálja a környezeti hatást.

Előnyei / hátrányai:

- + Olcsó , Stabil működés,
- + Távmérés lehetséges.
- Tranziens viselkedése (hőtehetetlenség), a tartály méretének és a kapilláris hosszának a függvénye.



Mechanikai hőmérséklet szenzorok (Gáznyomás Hőmérők,)



A felépítése hasonló a folyadéknyomásos hőmérőkhöz, de attól pontosabb.

- Működési elve a telített gőzök hőmérséklet-nyomás összefüggésen alapul.
- Az összefüggés nem lineáris ezért a skála osztása nagyobb hőmérsékletnél nagyobb.

Töltőközeg:

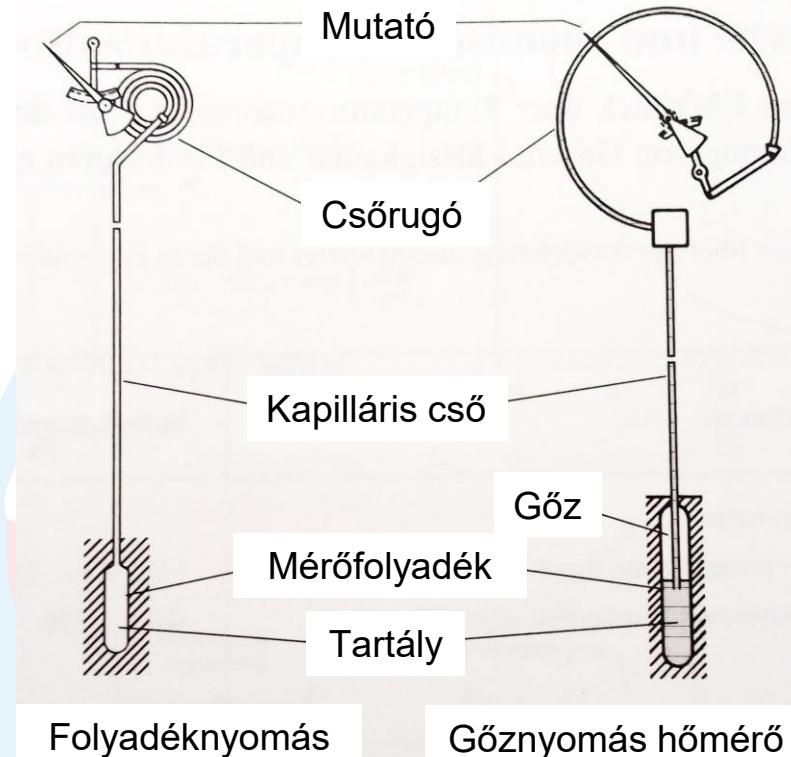
- Víz, éter, alkohol, ...
- A mérési tartományon belül saját telített gőzével tart egyensúlyt.
- Gyakran a mérőközeget egy rugalmas membrán választja el a közvetítő folyadéktól.

Előnyei / hátrányai:

- folyadéknyomásos hőmérőkhöz hasonló,

Alkalmazás:

- Távmérés, szabályozók hőmérője.



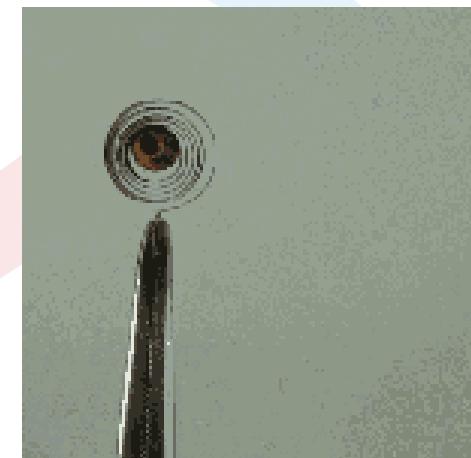
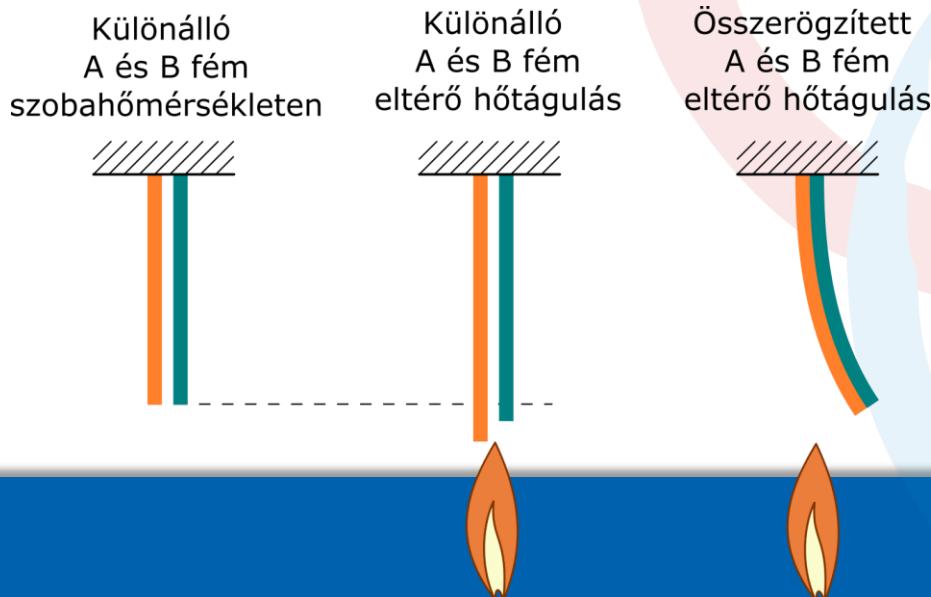
Mechanikai hőmérséklet szenzorok (Ikerfém - bimetall)



- A hőmérsékletmérés két egymáshoz rögzített, eltérő hőtágulási tényezőjű fém hőmérsékletváltozás okozta deformációján alapul.
- Ha az egyik vég rögzített, akkor hőmérséklet változás hatására a másik vég kitér, ekkor a rúd görbülete ($\kappa = 1/R$):

$$\kappa = \frac{6E_1 E_2 (h_1 + h_2) h_1 h_2 \epsilon}{E_1^2 h_1^4 + 4E_1 E_2 h_1^3 h_2 + 6E_1 E_2 h_1^2 h_2^2 + 4E_1 E_2 h_2^3 h_1 + E_2^2 h_2^4}$$

- E – az anyag rugalmassági modulusa,
 - h – vastagság,
 - α – hőtágulási együttható,
 - ΔT – az aktuális és a referencia hőmérséklet (amin a rúd egyenes) különbsége.
- $$\epsilon = (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T$$



[Forrás:
https://en.wikipedia.org/wiki/Bimetallic_strip



Mechanikai hőméréséket szenzorok (Ikerfém – bimetal hőmérő / hőkapcsoló,)



(b)

- Tulajdonságai:
 - Hőmérő (a) vagy hőkapcsoló (b) (előfeszítés, hiszterézis).
 - Hengeres, spirál vagy tárcsa formájában gyártják.
 - Üzemi tartomány: -65 ... 430 °C.
 - A pontosság változik a méréstartománnyal: +/- 0,5 ... 12 °C.
- Előnyei:
 - Olcsó,
 - stabil,
 - karbantartást nem igényel.

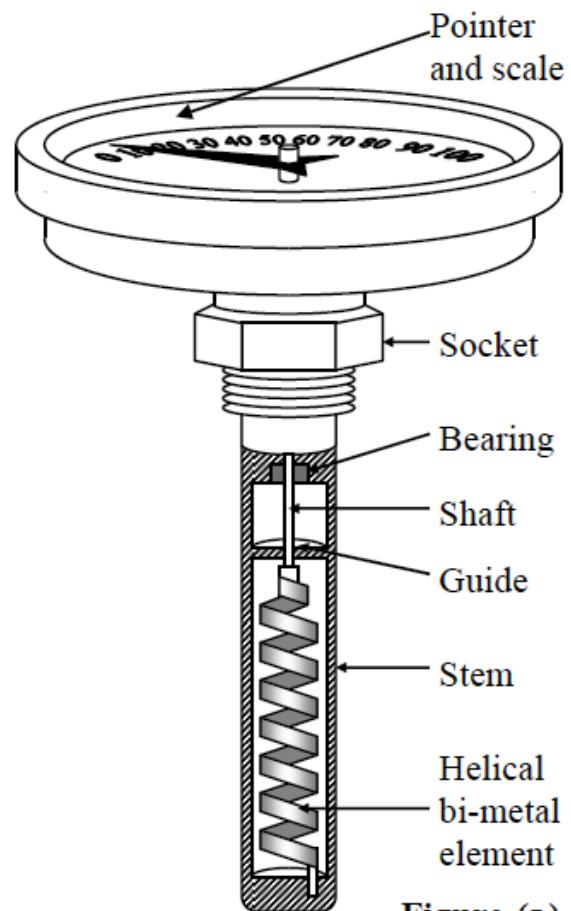


Figure (a)

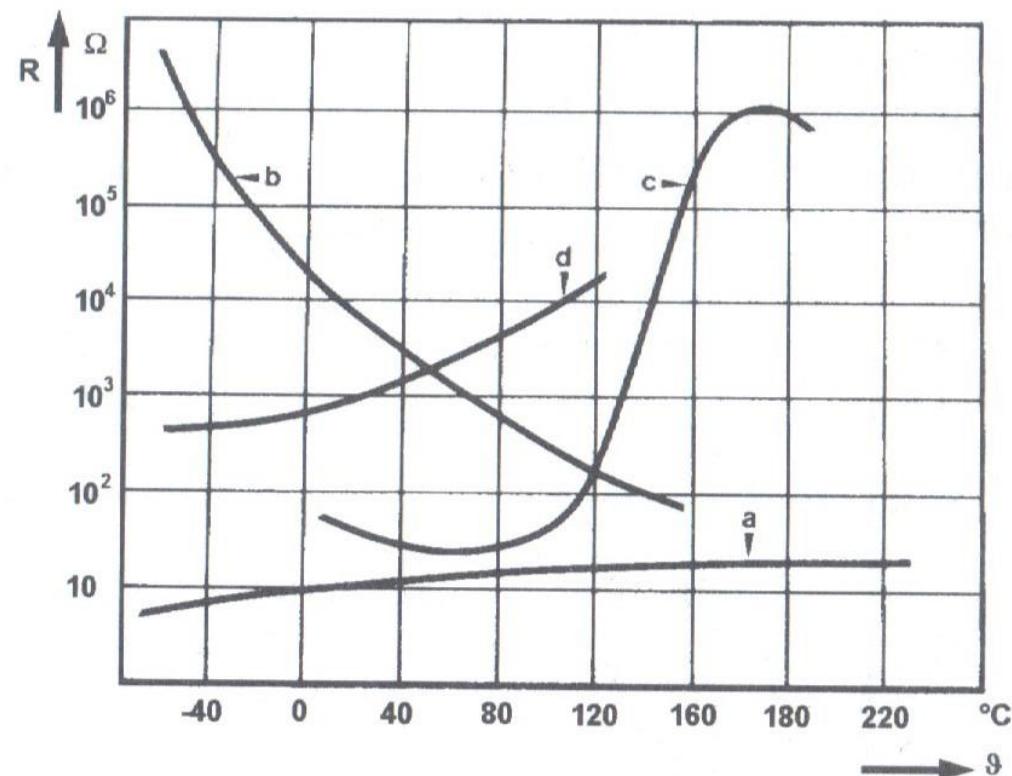
Mechanikai hőmérséklet szenzorok (Termosztátok / Hőkapcsolók)



[Forrás: <http://www.slideshare.net/sameerhere/designing-ux-sameer>, Intel]

Hőellenálások

- Anyaga szerint:
 - Fém – RTD
 - Platina (Pt100, Pt500, Pt1000), Nikkel,
 - Félvezető
 - Termisztor – NTC, PTC
 - pn átmenetes, (dióda, tranzisztor, ...)
 - Polimer (vezető részecskékkel szennyezett polimer)
- Karakterisztika szerint:
 - PTC – pozitív hőmérsékleti együtthatású ellenállás
 - NTC – negatív hőmérsékleti együtthatású ellenállás



1.3-278. ábra. Hőmérséklet-érzékelő ellenállások statikus karakterisztikái: a) platina ellenállás hőmérő; b) NTC termisztor; c) PTC termisztor; d) terjedési ellenállás alapú szilíciumérzékelő

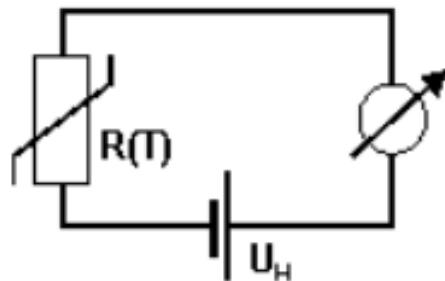


Fém Hőellenálások (Fémek a méréstechnikában)

Fémek a méréstechnikában

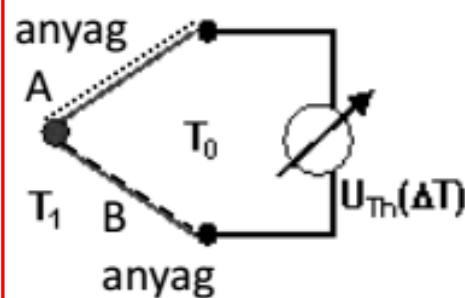
Hőmérséklet T

U_H segéd-feszültséggel



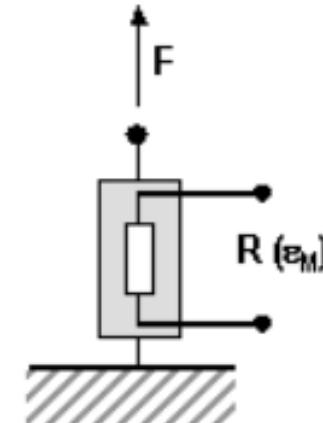
Ellenállás-hőmérő

T_0 viszonyítási hőmérséklettel



Termoelem

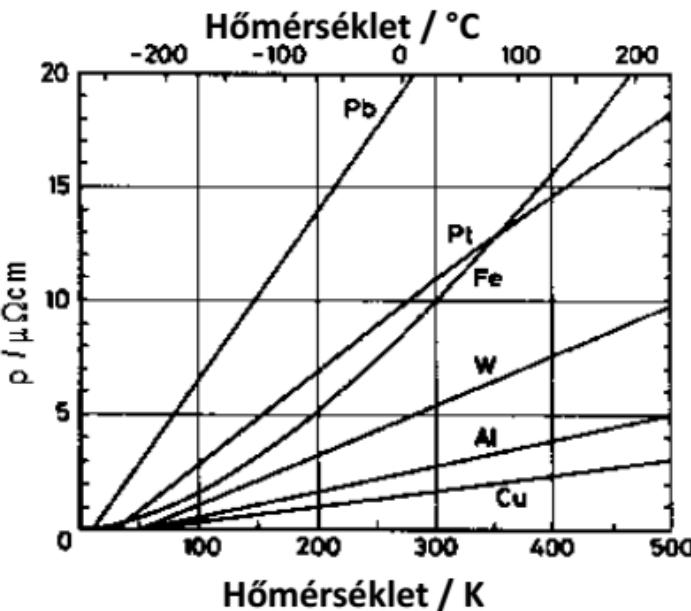
F erő, ε_M nyúlás



Nyúlásmérő bélyeg

Fém Hőellenálások (resistance temperature detectors, RTD)

- Fémes vezető, melynek fajlagos ellenállása pozitív hőmérsékleti együtthatóval rendelkezik, azaz ellenállása a hőmérséklettel nő.
- Fajlagos ellenállás hőmérsékletfüggése: $\rho = \rho_0 (1 + \alpha T)$
- $\alpha [1/\text{°C}]$ – lineáris (elsőfokú) hőmérsékleti tényező ($0,004 \dots 0,006 / \text{°C}$).
- β – négyzetes és magasabb fokú hőmérsékleti együtthatókat gyakran elhanyagolják.



$$R_t \approx R_r \cdot [1 + \alpha_r \cdot (t - t_r)]$$

$$R_t = R_0 \cdot [1 + \alpha_0 \cdot (t - 0)] = R_0 \cdot (1 + \alpha_0 \cdot t)$$

$$R_{20} = R_0 \cdot [1 + \alpha_0 \cdot (20 - 0)] = R_0 \cdot (1 + \alpha_0 \cdot 20)$$

$$R_t = R_{20} \cdot \frac{(1 + \alpha_0 \cdot t)}{(1 + \alpha_0 \cdot 20)}$$



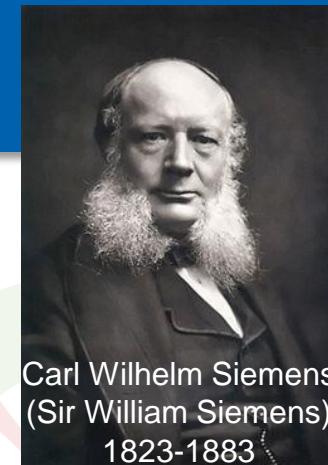
Fém Hőellenálások (Anyagai)

Anyag	Hőmérséklet tartomány:	Hőmérsékleti együttható, α $1/^\circ\text{C} = \Omega/(\Omega \cdot ^\circ\text{C})$	Érzékenység $\Omega/^\circ\text{C}$	Megjegyzés
Platina, Pt	-200 °C ... +860 °C (-260 °C ... +1000 °C)	0,00385	Pt-100: 0,385 Pt-1000: 3,85	nemesfém, nem korrodál. Legszélesebb hőfoktartomány. Legjobb stabilitás. Jó linearitás.
Nikkel, Ni	-100 °C ... +150 °C (... 260 °C)	0,00618 ... 0,006445	Ni-100: 0,618	Magasabb hőmérsékleten korrodál. Nem állítható elő nagy tisztaságban ezért egyedi kalibrálás szükséges. Olcsó, nagy érzékenység.
Cu	-100°C ... +260 °C	0,003500 ... 0,00427	Cu-10: 0,04	Legjobb linearitás.
Fe-Ni	-100 °C ... +204 °C	0,00522	Fe-Ni-600: 3,13 Fe-Ni-1000: 5,22 Fe-Ni-2000: 10,44	Olcsó, Legnagyobb érzékenység.
Au	0°C ... +700 °C	0,002840		
Pd-Au	0°C ... +700 °C	0,000027		



Platina Hőellenálások - PTC (Pt100, 500, 1000)

- Használatát javasolta:
 - [Sir William Siemens: Bakerian lecture](#), 1871
- Karakterisztikája:
 - Pozitív meredekségű
 - Ellenállása a hőmérséklet emelkedésével nő.
 - Közel lineáris,
 - Kis meredekségű (érzékenységű)
- Anyaga (adalékossal eltérő együtthatójú anyagok):
 - Tiszta platina: $\alpha = 0.003925 \Omega/(\Omega \cdot ^\circ C)$, 0-100 °C tartományban (labor).
 - IEC 60751 és ASTM E-1137 szabv. RTDs: **$\alpha = 0.00385 \Omega/(\Omega \cdot ^\circ C)$.**
 - Korábbi: $\alpha = 0.003916 \Omega/(\Omega \cdot ^\circ C)$ és $0.003902 \Omega/(\Omega \cdot ^\circ C)$.



Platina Hőellenálások - PTC (Pt1000)

Callendar–Van Dusen egyenletek:

$\vartheta_{alsó} = 0^\circ\text{C}$ tartományon:

$$R = R_0(1 + A \cdot \vartheta + B \cdot \vartheta^2 + C \cdot \vartheta^3 \cdot (\vartheta - 100^\circ\text{C}))$$

$0^\circ\text{C} - \vartheta_{felső}$ tartományon:

$$R = R_0(1 + A \cdot \vartheta + B \cdot \vartheta^2)$$

$0 - 100^\circ\text{C}$ tartományon linearizált:

$$R = R_0(1 + \alpha \cdot \vartheta)$$

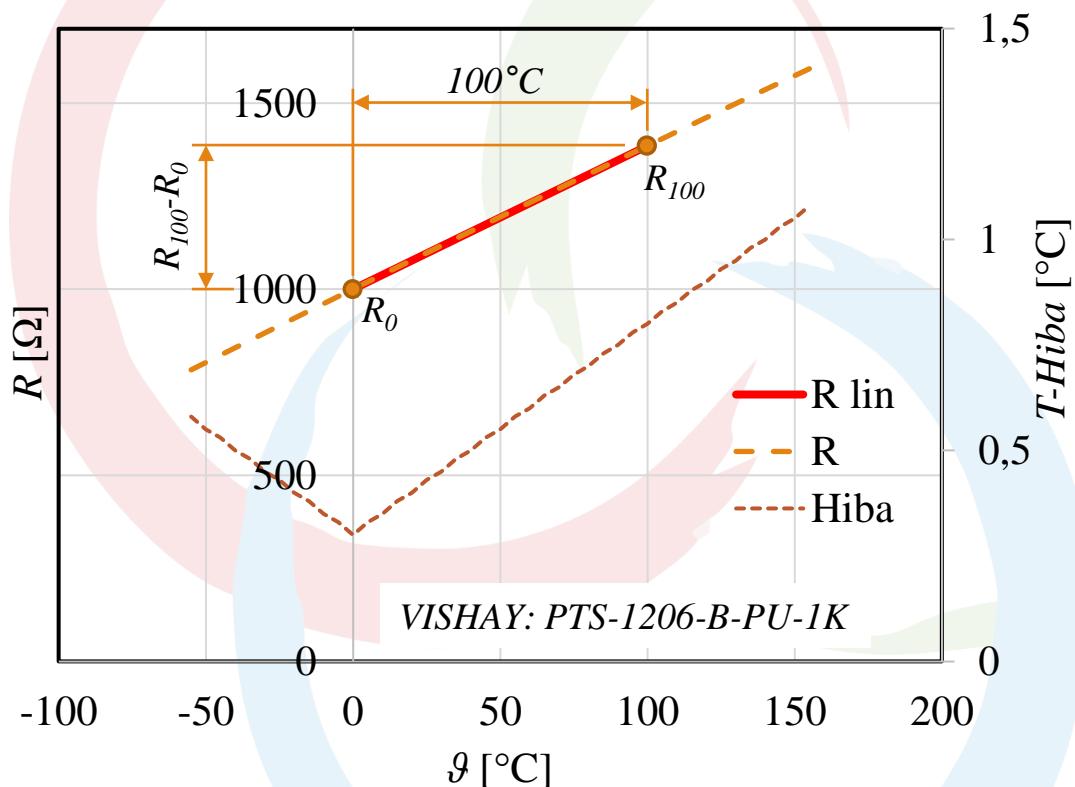
$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100^\circ\text{C} \cdot R_0}$$

VISHAY: PTS-1206-B-PU-1K

$$A = 3.9083 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$B = -5.775 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$$

$$C = -4.183 \times 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$$



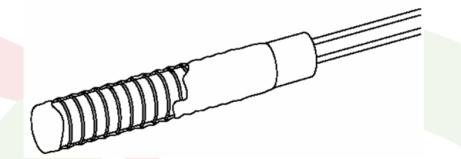
Platina Hőellenálások - PTC (Pt100, 500, 1000)

- Előnyei:
 - Jó linearitás,
 - Jó reprodukálhatóság, jó stabilitás (kis drift): $\pm 0,04\% / 1000\text{h}$ (155°C)
 - Nagy méréstartomány: **-259,35 °C ... +961,78 °C**
 - Alsó tratományban: -270°C környékén kevés töltéshordozó miatt nagy bizonytalanság
 - Ipari ritkán haladja meg a $+ 660^\circ\text{C}$ -ot => Kémiai ellenálló képesség romlik.
- Hátrányai:
 - Kis meredekségű karakterisztika:
 $(\alpha = 0.00385 \Omega/(\Omega \cdot ^\circ\text{C}) \rightarrow \text{Pt100: } 0,385 \Omega/^\circ\text{C})$
- Alkalmazása:
 - Etalon hőmérők, Nemzetközi hőmérséklet szabvány ([ITS-90](#)),
 - Laborhőmérők,
 - Egyéb nagy pontosságú hőmérséklet szenzorok.

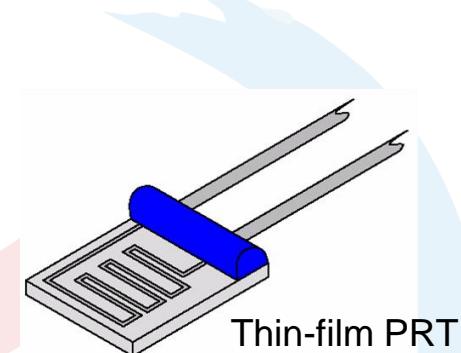


Fém Hőellenálások (Kialakítása)

- Tekercselt (Wire-wound)
 - Szigetelő magra bifilárisan csévélt huzal
 - Nagy pontosság, (**Etalon, labor hőmérők**)
 - Széles mérési tartomány, PRT: 660 °C.
 - Mechanikai stabilitás vs. alakváltozás mentes kialakítás
 - Alakváltozás mentes (Strain-free) – (mechanikai feszültség mentes)
 - Inert gázzal töltött tartályba lazán csévélt huzal – a hőtágulást szabadon engedi.
 - Érzékeny az ütésre és rázkódásra.
 - Standard platina ellenállás-hőmérő (SPRT): 961.78 °C-ig.
- Vékonyréteg (Thin-film)
 - Kerámia hordozóra felvitt 1 to 10 nm vastagságú fém (Pt) réteg.
 - Lézerrel trimmelik a megfelelő névleges ellenállásra.
 - Kisebb méret, kisebb hőkapacitás, gyorsabb működés.
 - Olcsóbb gyártás,
 - A hőtágulás ellen nem védett
 - Kevésbé megbízható mint a csévélt verzió.
 - Limitált méréshatár: 300 °C (működőképes: 600 °C, 900 °C)



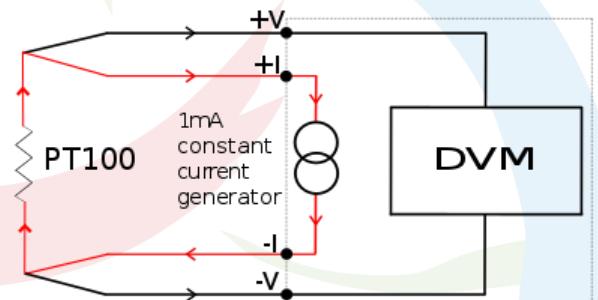
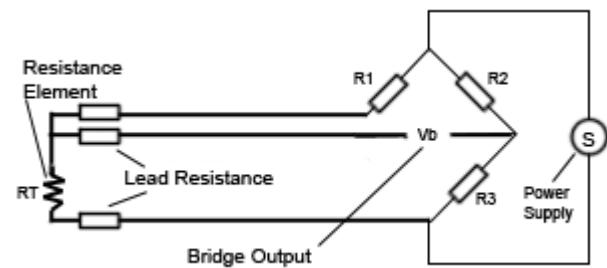
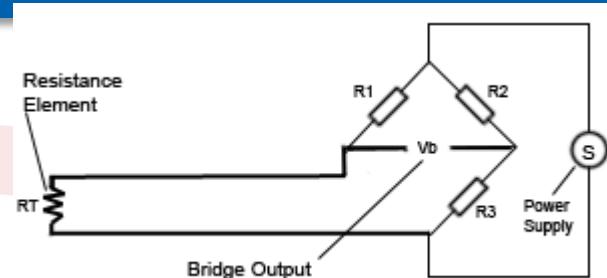
Wire-wound PRT



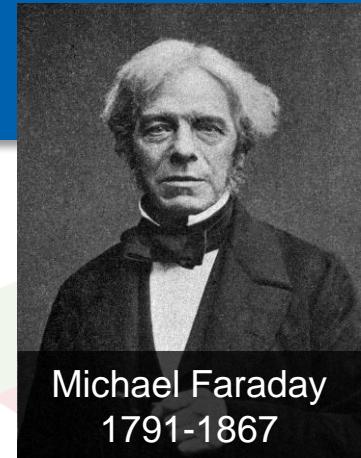
Thin-film PRT

Hőellenálások (Áramkörí bekötése)

- Wheatston-hidas ($\frac{1}{4}$) elrendezés
 - Hídegyensúly a méréstartomány közepére.
 - $R_2 = R_3$; $R_1 = R_T(T_{közép})$
- 2-vezetékes elrendezés (Two-wire configuration)
 - A legegyszerűbb elrendezés,
 - Limitált pontosság,
 - 200m-ig.
- 3-vezetékes elrendezés (Three-wire configuration)
 - A vezeték ellenállás kompenzálsára,
 - Hosszabb vezetékek esetén, 600m-ig.
- 4-vezetékes elrendezés (Four-wire configuration)
 - Áramgenerátoros táplálás,
 - Nincs feszültségesés a mérővezetéken,
 - Nagyobb pontosság érhető el,
 - Váltakozó áramú táplálás kiküszöböli a termoelektromos eredetű hibákat.



Félvezető Hőellenálások (Termisztorok)

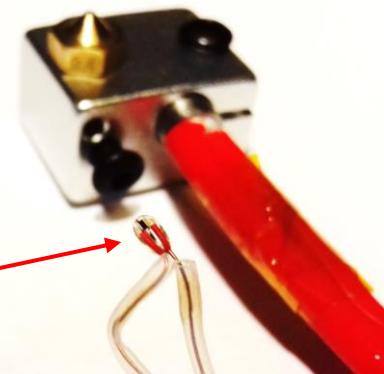


Michael Faraday
1791-1867

- 1833-ban fedezte fel Michael Faraday,
 - amikor ezüst-szulfid ellenállását vizsgálta a hőmérséklet függvényében.
- 1930-ban szabadalmaztatta Samuel Ruben,
 - mivel a termisztorok gyártása akkoriban számos nehézségbe ütközött.
- Anyaguk:
 - Félvezető



Félvezető Hőellenálások (Termisztorok)



- 1.) Negatív Termikus Karakterisztikájú NTK (NTC - Negative Temperature Coefficient)
 - Ellenállása a hőmérséklet emelkedésével csökken.
 - Érzékenységük milliószorosa mint a fémeknél.
 - Anyaguk: Szintereléssel előállított fém oxid (kerámia).
 - Polikristályos szerkezet – öregszenek. Mesterséges öregedéssel kondicionálják.
 - Hőmérséklet ellenállás karakterisztikája:

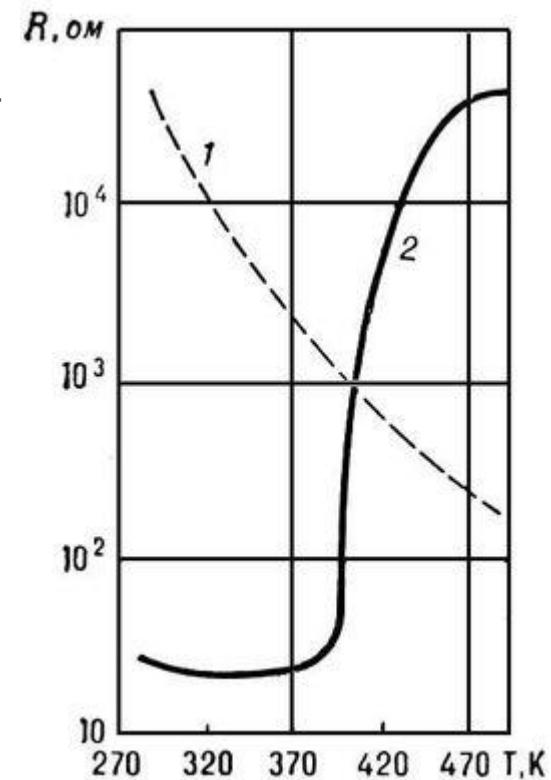
$$R = R_{\infty} e^{\frac{B}{T}} \quad R_{\infty} = R_1 e^{-\frac{B}{T_1}}$$

- B – hőmérséklet érzékenységi index:

$$B = \frac{T_2 T_1}{T_2 - T_1} \ln \frac{R_1}{R_2}$$

- Gyakorlatban: $R_1=R_{20}$, és $R_2=R_{100}$,

$$R_{20} = R_{100} e^{0,04B}$$

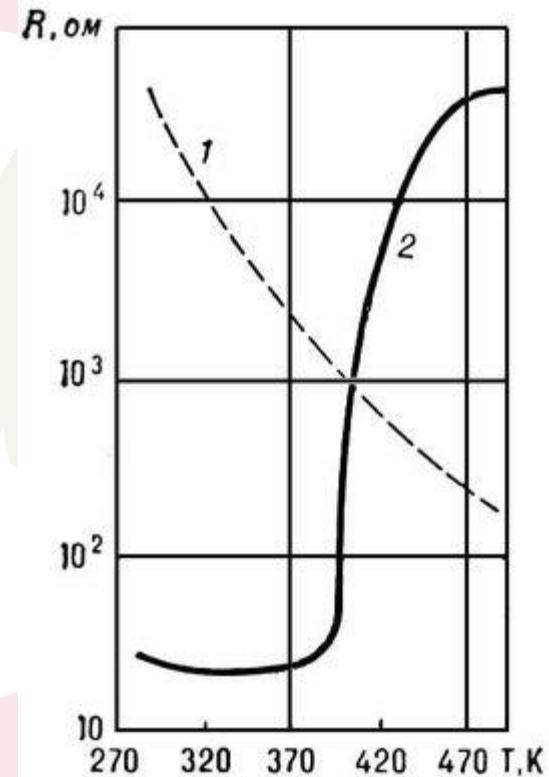


Félvezető Hőellenálások (Termisztorok)

- 2.) Pozitív Termikus Karakterisztikájú PTK
(PTC - Positive Temperature Coefficient)

- Ellenállása a hőmérséklet emelkedésével meredeken nő.
- Karakterisztikája erősen nemlineáris.
- Anyaga: Polikristályos BaTi, kis mennyiségű fém oxiddal.
- Működése ferroelettromos hatáson alapul.
- Alkalmazás: Túlterhelés védelem
- A hőmérsékleti együttható közelítő számítása:

$$\alpha = \frac{\lg R_2 - \lg R_1}{T_2 - T_1} 100\%$$

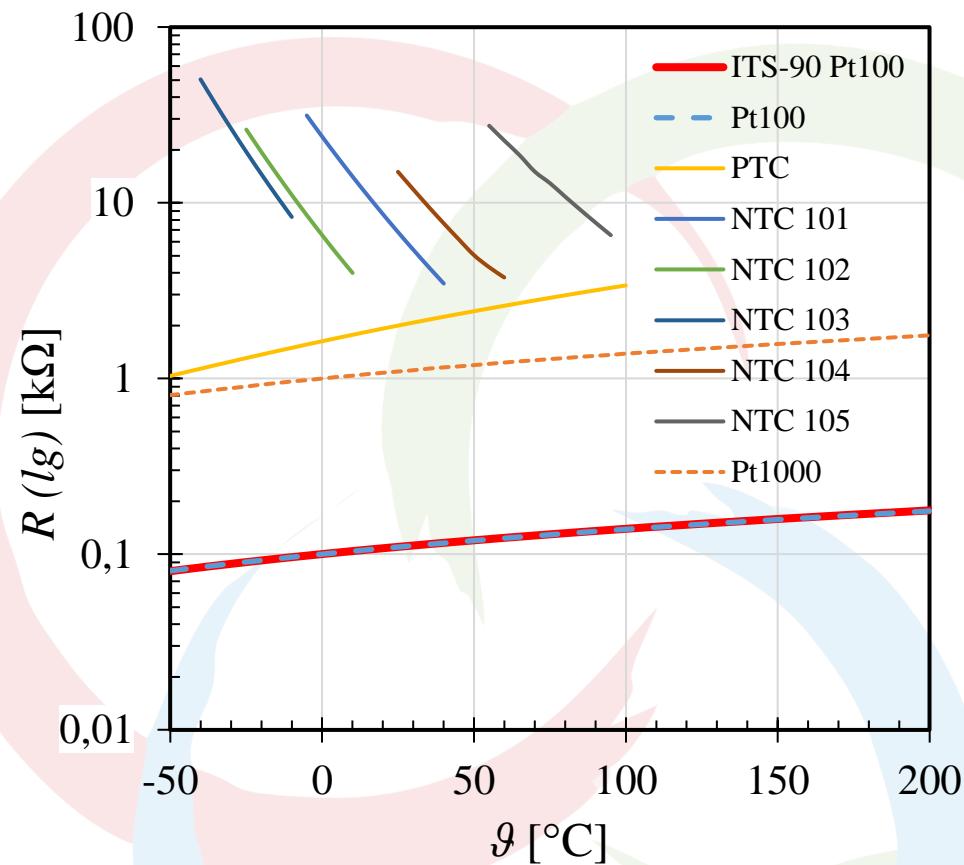
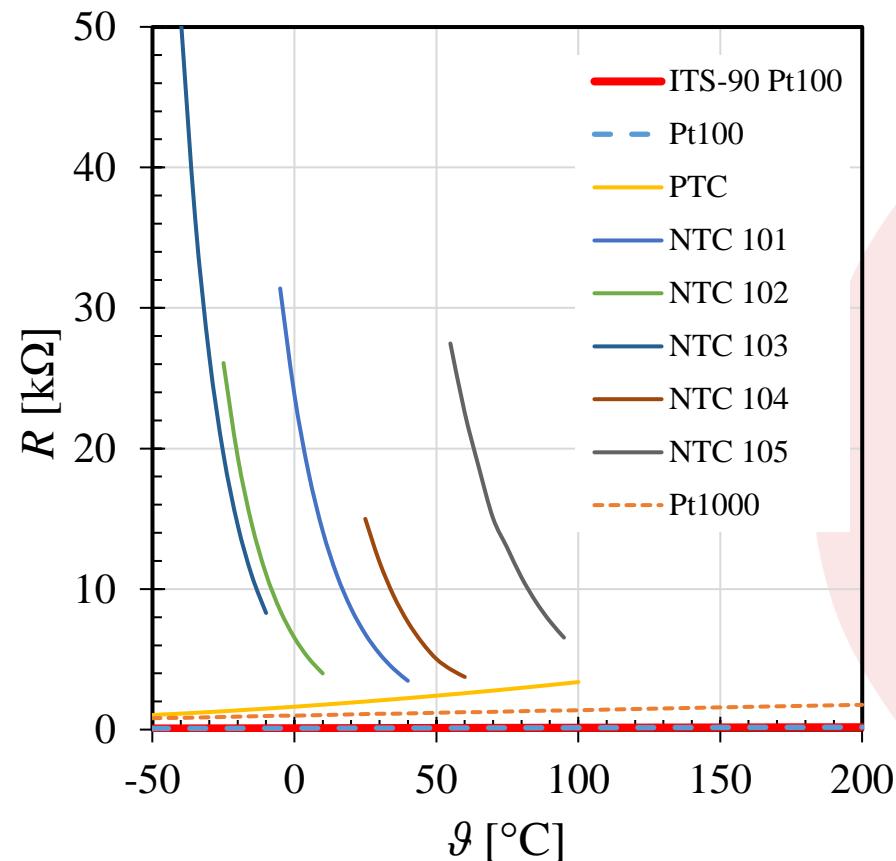


Félvezető Hőellenálások (Termisztorok)

- Kivitele:
 - Tárcsa, gyöngy, felületszerelt (SMD), rúd termisztorok.
- Előnyei: Kis méret és nagy érzékenység
 - kis testek, kis helyek hőmérséklet mérése.
 - Kis hőkapacitás → kis időállandó.
- Hátrányai:
 - Nagy szórással gyártható,
 - Instabilitás, öregedés,
 - Korlátosztott mérési tartomány: -50 °C ... +110°C.
- Alkalmazása:
 - kompenzációs kapcsolásokban,
 - hőmérséklet-érzékelő,



Hőellenálások (resistance temperature detectors, RTDs)



Félvezető Hőellenálások (Terjedési ellenállás alapú szilícium érzékelő)

- Anyaga: adalékolt szilícium.
- Olcsó, planáris technológiával készül.
- Működési tartomány: -70 ... 130°C
- Kevésbé lineáris mint a fém ellenálláshőmérők,
- Pozitív meredekségű karakterisztika PTC
- Érzékenysége nagyobb ($\sim 15 \Omega / ^\circ\text{C}$) .
- A hőmérsékleti karakterisztikája:
 - Ha $D \ll d$,
 - D – árambevezető kontaktus,
 - d – a kristály vastagsága,
 - ρ – az adalékolt Si fajlagos ellenállása
- Tapasztalati képlet:
 - $\alpha = 7,8 \cdot 10^{-3} [1/K]$
 - $\beta = 18,4 \cdot 10^{-6} [1/K]$
- Tokozása többnyire tranzisztor tokozású

$$R = \frac{\rho(\vartheta)}{2D}$$

$$R = R_{25} [1 + \alpha(\vartheta - 25) + \beta(\vartheta - 25)^2]$$



Félvezető Hőellenálások (p-n átmenet hőmérsékletfüggése)

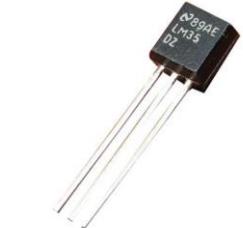
- A félvezető eszközök p-n átmenet nyitó és záróirányú karakterisztikája is hőmérsékletfüggő.
- Lehet egyszerű dióda, vagy tranzisztor.
- Dióda típusú hőmérsékletérzékelő karakterisztikája
 - Nyitó irányú áram:
 - U_N – nyitó irányú feszültség,
 - $U_\vartheta = k \cdot T / e_0$ – Termikus feszültség [V],
 - I_0 – a p-n átmenet záróárama.
 - Záró irányú áram:
 - U_{ti} – A félvezetőre jellemző tiltott sáv V-ban (Si: 1,21 V),
 - K és m - konstansok

$$I = I_0 \left(e^{\frac{U_N}{U_\vartheta}} - 1 \right)$$

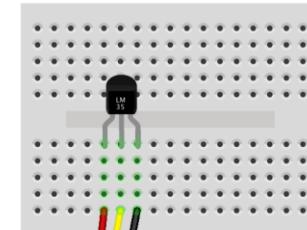
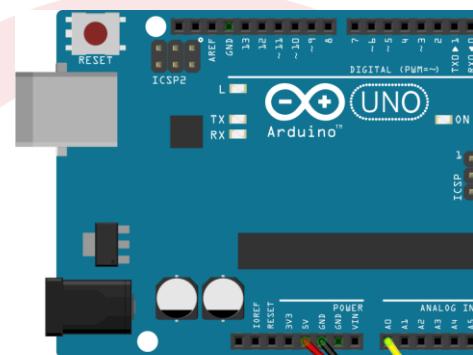
$$I_0 = K \cdot \vartheta^m \cdot e^{\frac{-U_{ti}}{U_\vartheta}}$$



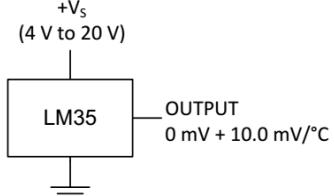
Félvezető Hőellenálások (Integrált szilícium hőmérséklet érzékelő)



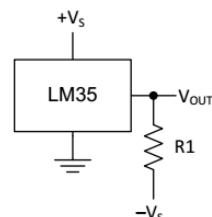
- Egyszerű alkalmazás.
- Hőmérséklettel arányos feszültség kimenet.
- Erősítést legtöbbször nem igényel.



Basic Centigrade Temperature Sensor
(2°C to 150°C)



Full-Range Centigrade Temperature Sensor



Choose $R_1 = -V_S / 50 \mu\text{A}$
 $V_{OUT} = 1500 \text{ mV at } 150^\circ\text{C}$
 $V_{OUT} = 250 \text{ mV at } 25^\circ\text{C}$
 $V_{OUT} = -550 \text{ mV at } -55^\circ\text{C}$

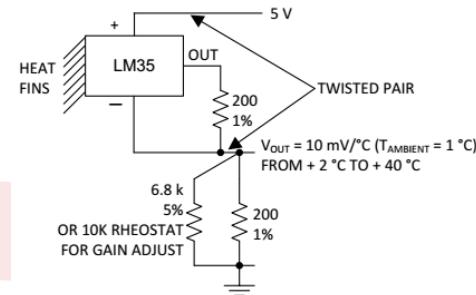
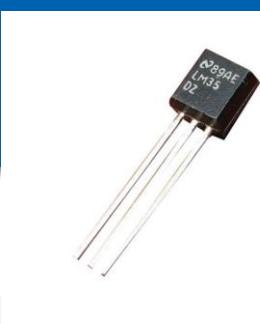


Figure 17. Two-Wire Remote Temperature Sensor
(Output Referred to Ground)



Félvezető Hőellenálások (Integrált szilícium hőmérséklet érzékelő)



- Az áramköri alkatrészeknél megszokott tokozások.
- Dinamikai tulajdonságai függnek a tokozástól.

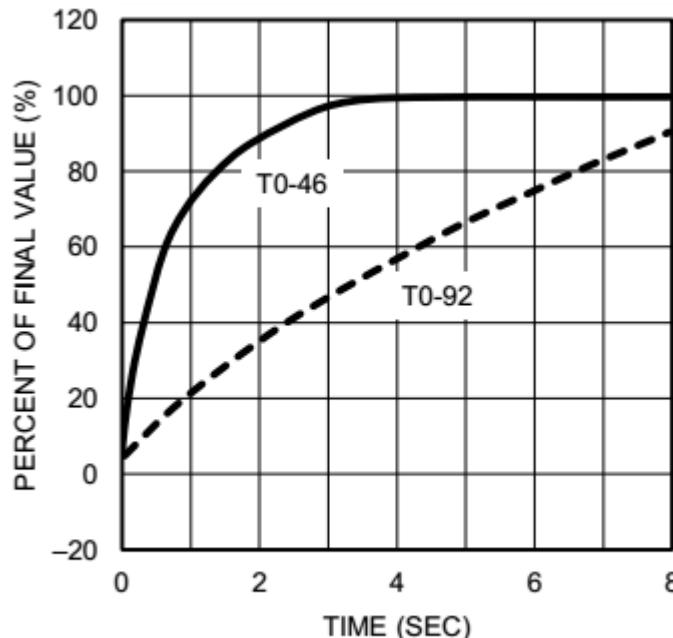
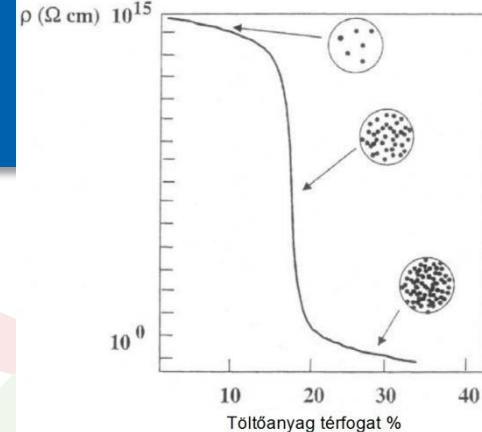


Figure 4. Thermal Response In Stirred Oil Bath

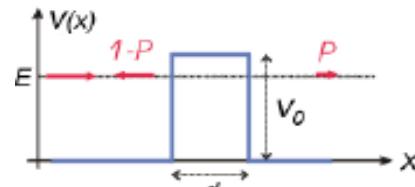


ELEKTROMOSAN VEZETŐ POLIMEREK

- A vezető szemcsékkal töltött polimer vezetőképessége függ:
 - A mátrix dielektrikus állandójától,
 - A töltőanyag vezetőképességétől,
 - Koncentrációjától,
 - Térbeli eloszlásától,
 - A részecskék alakjától.
- A vezetőképességet befolyásoló külső tényezők:
 - Hőmérséklet,
 - Alkalmazott frekvencia,
 - Deformációs állapot,

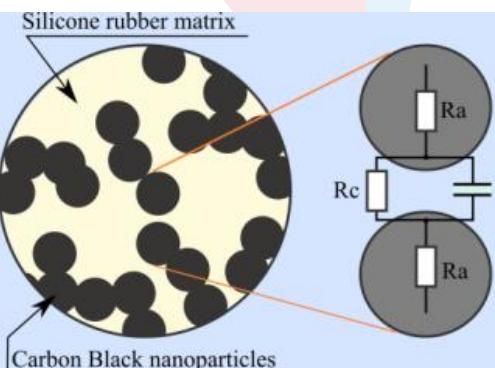
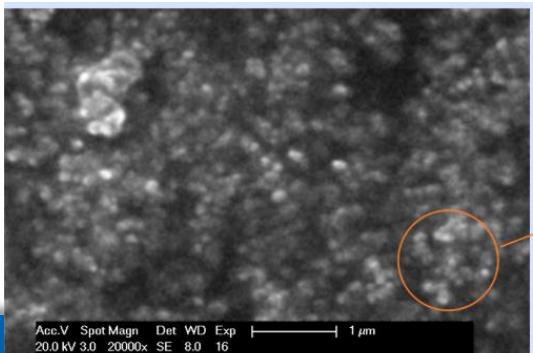


Perkolációs küsszöb
[Enid Keil Sichel]

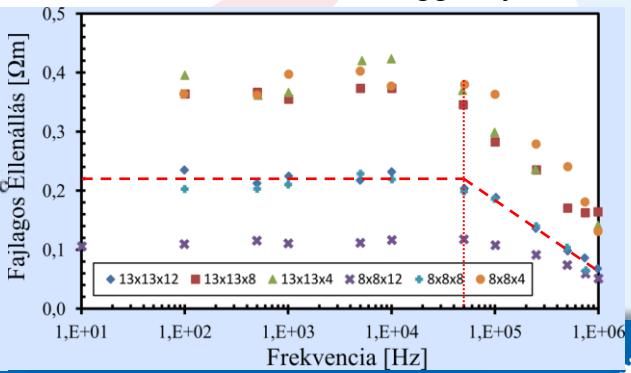


Alagútvezetés
[J.G. Simmons]

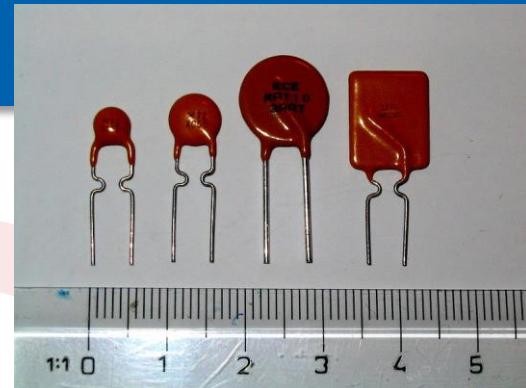
Két szénkorom részecske kapcsolatának helyettesítő modellje
[Enid Keil Sichel]



R-2631 szilikongumi fajlagos ellenállás-változása a frekvencia függvényében.



Polimer Hőellenálások

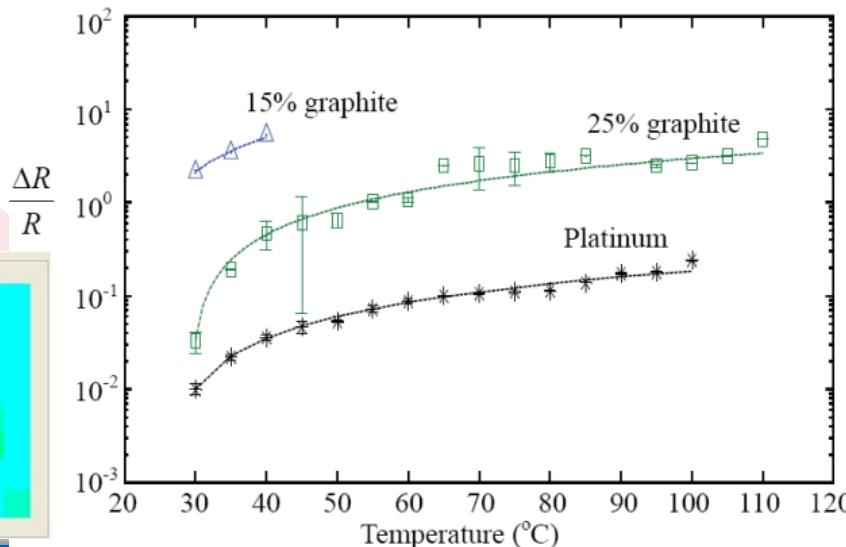
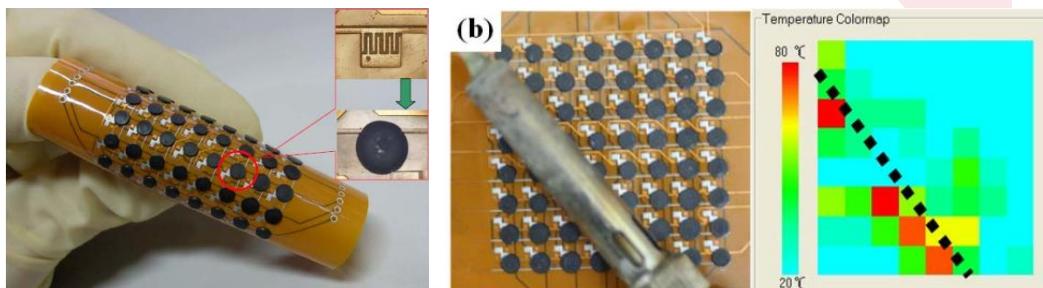


- Polimer biztosíték

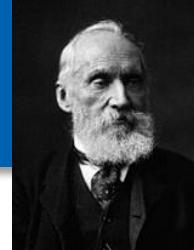
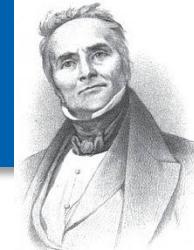
- Polimer pozitív hőmérsékleti együtthatójú polimer (polymeric positive temperature coefficient device (PPTC, resettable fuse, polyfuse or polyswitch))
- Gerald Pearson (Bell Labs, 1939), szabadalom: US patent #2,258,958.
- Passzív elektronikai eszköz.
- Alkalmazás: elektronikai áramkörök **hő / áram** védelme.

- Rugalmas hőmérséklet szenzor mátrix

- Graphite-Polydimethylsiloxane Composite



Hőelemek (Thermocouple) (Termoelektrikus jelenségek)



Seebeck
1770 – 1831
Német fizikus

Peltier
1785 – 1845
Francia fizikus

Lord Kelvin
1824 – 1907
Ír-skót Fizikus,
matematikus

○ **Seebeck-hatás:** hőmérsékletkülönbség → villamos energiává.

- 1821, [Thomas Johann Seebeck](#) felfedezte, hogy ha két különböző fém csatlakozási (melegpont) helye és szabad végei (hidegpont) között hőmérsékletkülönbség van, akkor az érintkezési helyen elektromotoros erő lép fel.
 - Hőmérséklet különbség hatására feszültség mérhető.
 - Felhasználása: hőmérsékletmérés (hőelem), Elektromos energia előállítása (radioizotópos termoelektrikus generátor).

○ **Peltier-hatás:** Villamos energia → hőmérsékletkülönbséggé.

- 1834, Jean Charles Athanase Peltier megfigyelte, hogy ha kétféle anyagból álló hőelektromos elemen át áramot vezetünk át, az áram irányától függően az érintkezési helyek fölmelegszenek v. lehűlnek.
 - Villamos áram hatására hőáramlás jön létre.
 - Felhasználása: elektronikai eszközök intenzív hűtése.

○ **Thomson-hatás:** A Peltier-Seebeck effektus kiterjesztése

- 1851, William Thomson, (Lord Kelvin) által leírt jelenség szerint, változó hőmérsékletű vezetőben a rajta átfolyó áram hatására az anyagtól és az áramiránytól függően hőelvonás vagy hőfejlődés jelentkezik. A Seebeck-Peltier hatásoktól kisebb.

○ **Benedicks-hatás:** A Thomson hatás megfordítása

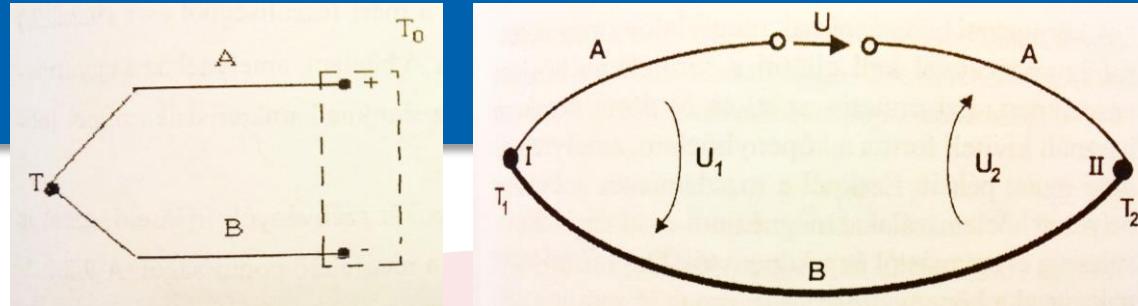
- Zárt vezetőben hőmérsékletgradiens hatására áram folyik.



Peltier elem



Hőelemek (Thermocouple)



- A hőelemek működése a Seebeck-hatáson alapszik,
- vagyis, a kontaktfeszültségek hőmérsékletfüggésén.
 - A **melegpont** (két különböző összehegeszt vagy összeforrasztott fém) és a **hidegpont** (szabad végek) hőmérsékletkülönbségének hatására a melegpontban elektromotoros erő ébred, ami feszültséget hoz létre a szabad végek között.
- Az elektromotoros erő nagysága függ a:
 - a melegpont és hidegpont közötti **hőmérséklet-különbségtől**.
 - a két fém anyagától,
 - annál nagyobb, minél messzebb vannak egymástól a fémek hőelektromos feszültségi sorában, [Bi](#), [Ni](#), [Hg](#), [Pt](#), [Au](#), [Cu](#), [Sn](#), [Pb](#), [Ag](#), [Fe](#), [Sb](#).
 - A melegpont melegítésekor az az ág lesz pozitív a másikhoz képest, amelyik a sorban hátrabb helyezkedik el. III. megállapodás szerint + vagy -, amely a Pt-tól, ugyanazon a hőmérsékleten nagyobb ill. kisebb feszültséget ad.
 - Az anyagkiválasztás szempontja: nagy érzékenység, stabil mérés, széles hőmérséklettartomány, korrozióállóság.
 - Nyitott kapcsoknál lesz valós értékű → nagy belső ellenállású műszerrel kell mérni.



Hőelemek (Thermocouple)

(Fémek és néhány ötvözet termopotenciális sora)

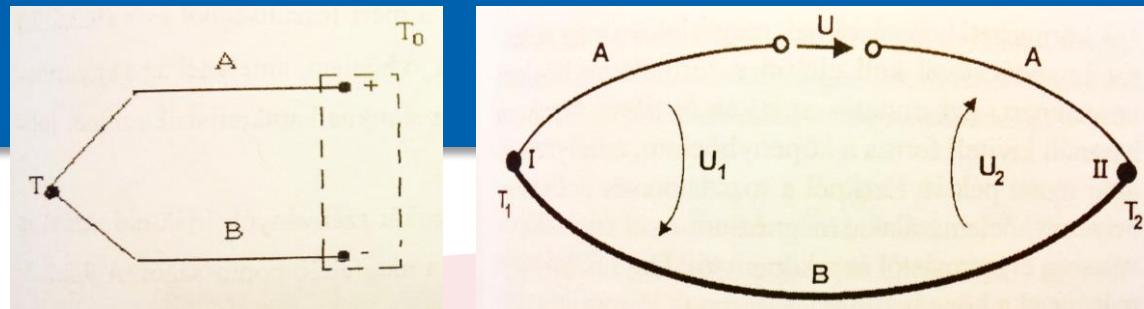
Termopotenciális sor

Megnevezés	Jel. ill. összetétel	Termoelektro-mos feszültség [mV]	Alkalmazási hőmérsékletek [°C]		Olvadás-pont [°C]
			tartós	rövid	
Alumínium	Al	+0,40			658
Alumel	95% Ni+5%(Al, Si, Mg)	-1,02...-1,38	1000	1250	1450
Iridium	Ir	+0,65	1200	1800	2350
Kadmium	Cd	+0,90			321
Kobalt	Co	-1,68...-1,76			1490
Konstantán	60%Cu+40%Ni	-3,5	600	800	1250
Kopel	56%Cu+44%Ni	-4,0	600	800	1250
Kromel	90%Ni+10%Cr	-2,71...-3,13	1000	1250	1450
Manganin	84%Cu+13%Mn+2%Ni+1%Fe	+0,8			910
Nikkel	Ni	-1,50...-1,54	800	1100	1452
Nikróm	80%Ni+20%Cr	+1,5...+2,5	1000	1100	1500
Platina	Pt	0,000	1300	1600	1770
Platinairidium	90%Pt+10%Ir	+1,3	1000	1200	
Platinaródium	90%Pt+10%Rh	+0,64	1300	1600	
Réz (tiszta)	Cu	+0,76	350	500	1083
Réz	Cu	+0,75	350	500	
Ródium	Rh	+0,64			1967
Szén (grafit)	C	+0,25	2000	2500	3570
Szilícium	Si	+44,8			1420
Tellur	Te	+50,0			350
Vas (tiszta)	Fe	+1,80	600	800	1530
Vas	Fe	+1,87	600	800	1400
Wolfram	W	+0,79	2000	2500	3400

[Forrás: BME EGR Tanszék: TERMOELEM-HÍMÉRÍK (Elméleti összefoglaló),]



Hőelemek (Thermocouple)



- A valós mérőkörben különböző anyagú vezetékek több forrasztási pontja található.
 - A mért feszültség a csatlakozási pontokon keletkezett termofeszültségek algebrai összege.
 - A termofeszültség nem függ
 - a közbeiktatott vezetékek anyagától, ha azok csatlakozási pontja azonos hőmérsékleten van (termikus rövidzár).
 - A vezeték mentén kialakuló hőmérsékleteloszlástól. Ha a hideg és melegpont távol van egymástól, akkor kompenzáló vezetéket alkalmaznak (olyan vezetékpár melynek termoelektrikus tulajdonságai megegyeznek a termoelemmel 0-200°C tartományon.)
 - $U_t = k_{AB} * T + k_{AC} * T_0 + k_{CB} * T_0 = k_{AB}$

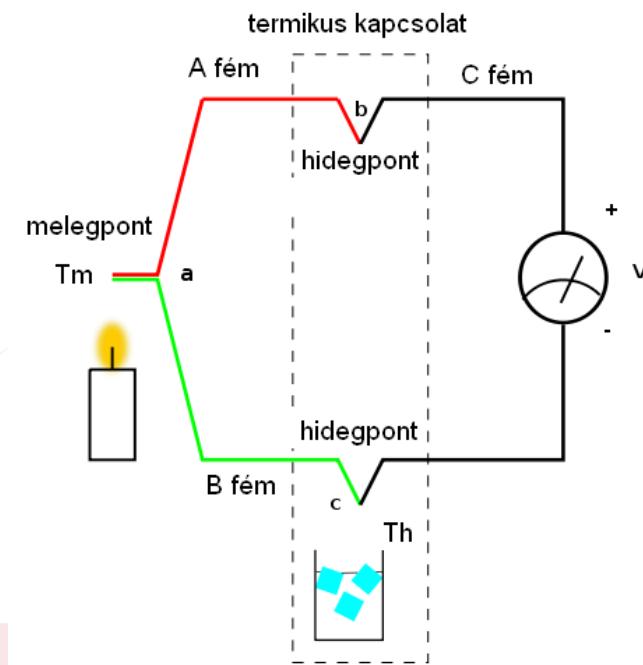


Hőelemek (Thermocouple)

- A hidegponthoz, mint referencia hőmérsékletének ismeretében tudjuk meghatározni a melegpont hőmérsékletét.
 - Referencia: jeges víz (0°C),
 - Hidegpont hőmérsékletének mérése, kompenzálása,
 - (Felfűtés szabályozott hőmérsékletre),
- A szabad végek között mérhető termofeszültség:

$$U_T = k \cdot (\vartheta - \vartheta_0)$$

- Ahol:
 - U_T – a hőelem által létrehozott feszültség,
 - ϑ – mérendő hőmérséklet,
 - ϑ_0 – referencia hőmérséklet,
 - k – hőelem konstans (Seebeck együtható)

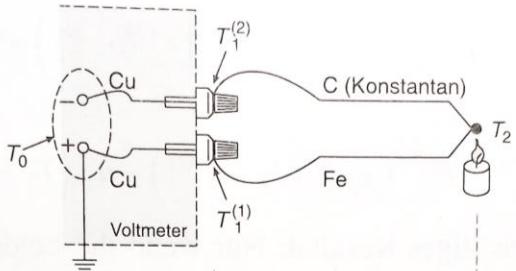


Hőelemek (Thermocouple) (Hidegponti referenciahőméréséklet)



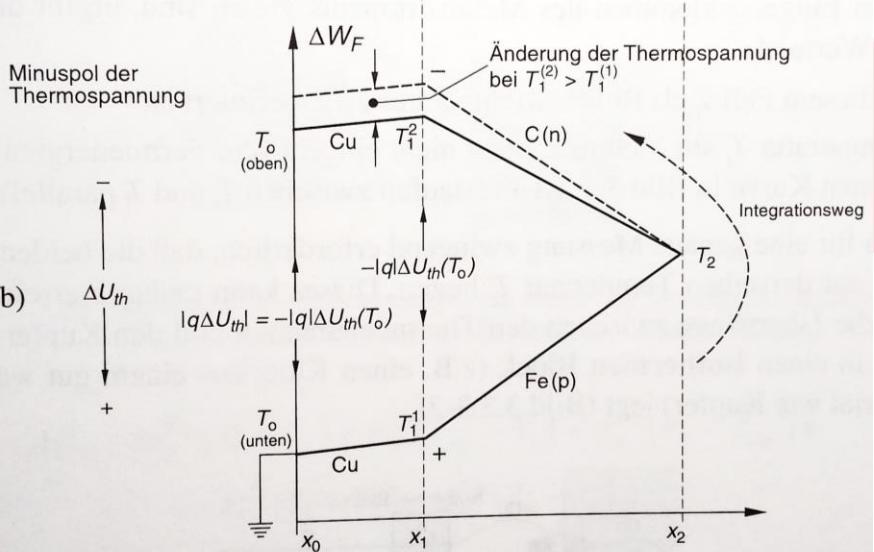
Hidegponti csatlakozók eltérő hőmérséklete parazita termofeszültséget okoz.

a)

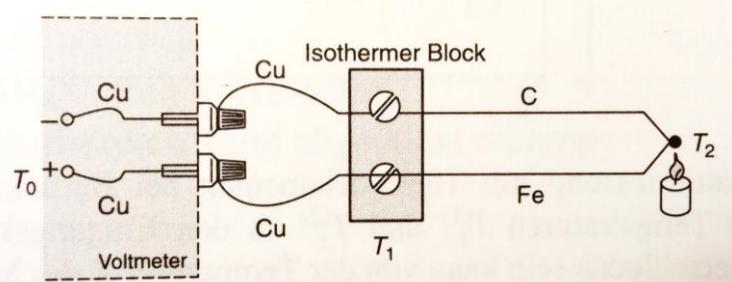


Minuspole der Thermospannung

b)

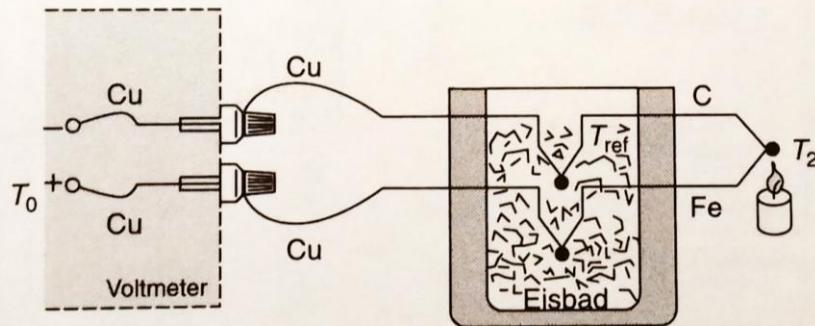
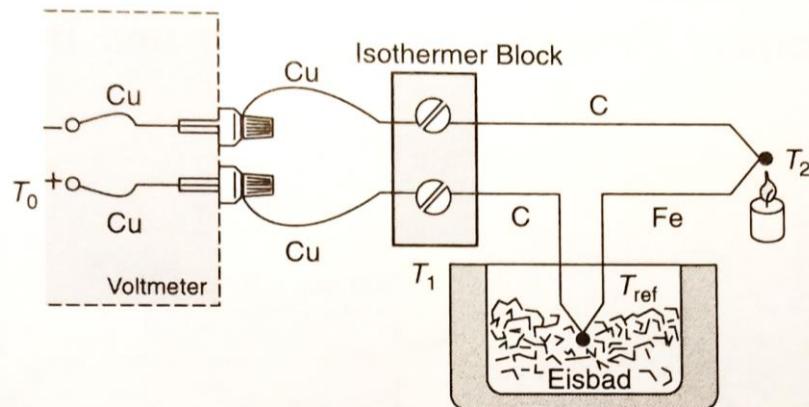


Termikus rövidzárral elkerülhető a parazita feszültség, de nem ismert a referencia hőmérséklet.

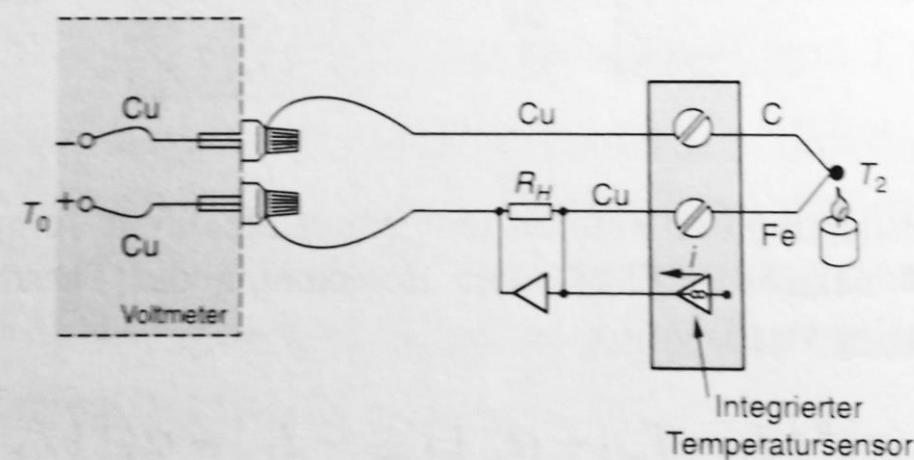
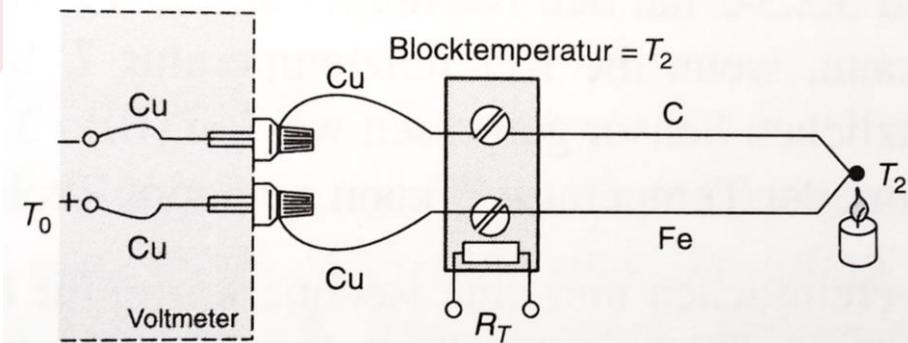


Hőelemek (Thermocouple) (Hidegponti referenciahőméréséklet)

Hidegpont referencia hőmérésékleten tartása (jégfürdő, termosztátos felfűtés).



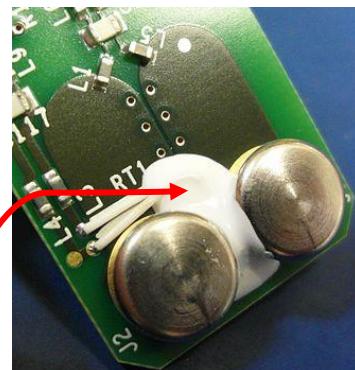
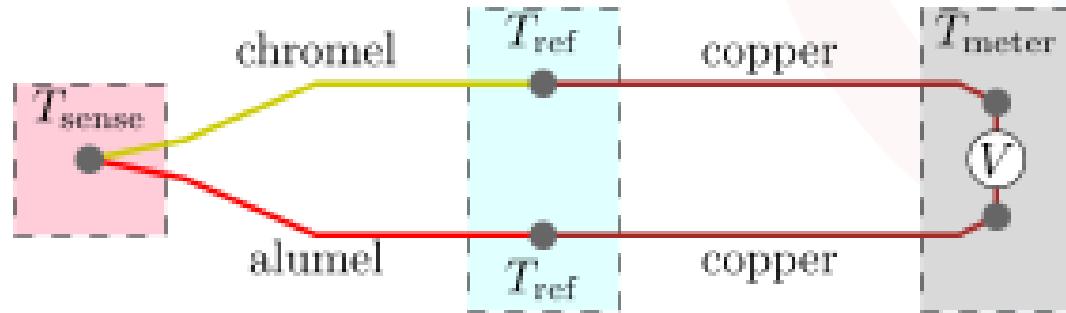
Hidegponti hőméréséklet mérése / kompenzálása.



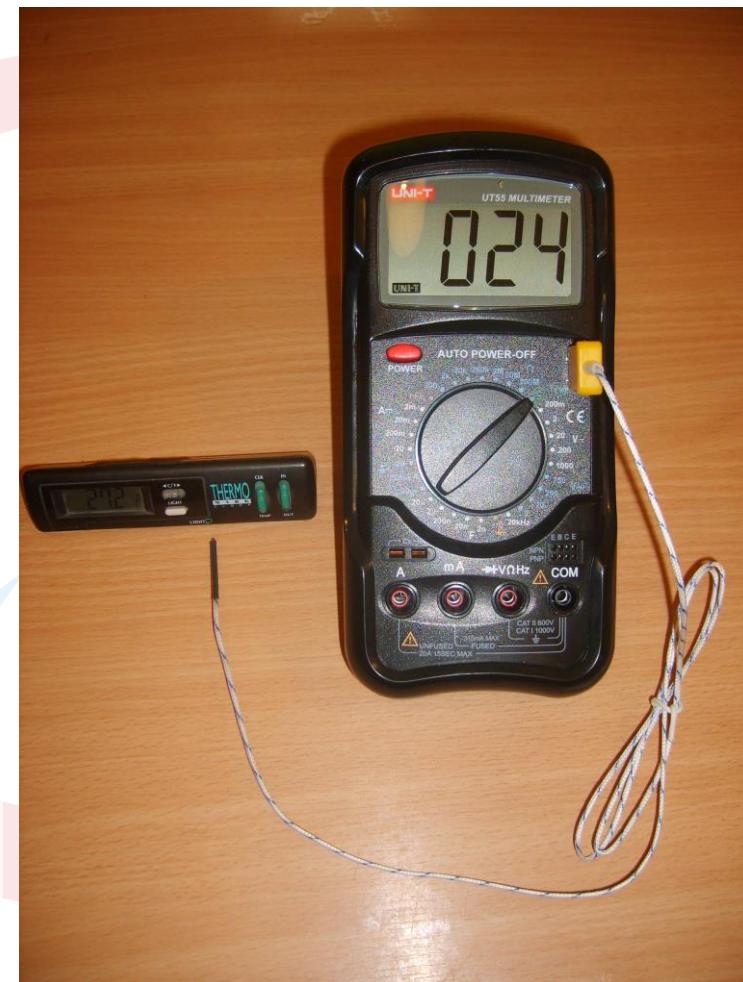
Hőelemek (Thermocouple) (Multiméterben alkalmazott hidegponti kompenzáció)

K – típusú termoelem.
-200 °C ... +1350 °C
41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$

T , Melegpont



T_0 , Referencia csomópont
(hidegpont) hőmérsékletét
egy termisztor méri.
Fluke CNX T3000.



Hőelemek (Thermocouple)

- A fenti elméleti összefüggések lineáris összefüggésre utalnak, de ez csak kis hőmérsékletkülönbségre igaz.
- A tényleges karakterisztika anyagpáronként ettől többé kevésbé eltér.
- Ezt táblázatosan vagy az alábbi polinomokkal lehet megadni:
 - A termofeszültség és az érzékenység hőmérséklet függése, (0°C hoz viszonyítva):

$$U_{AB}(t,0) = \alpha t + \frac{\beta}{2} \cdot t^2 + \frac{\gamma}{3} \cdot t^3$$

$$\dot{E} = \alpha + \beta \cdot t + \gamma \cdot t^2$$

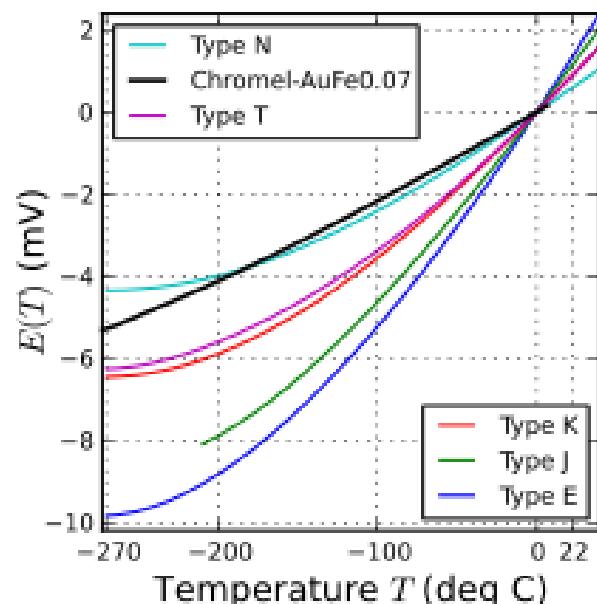
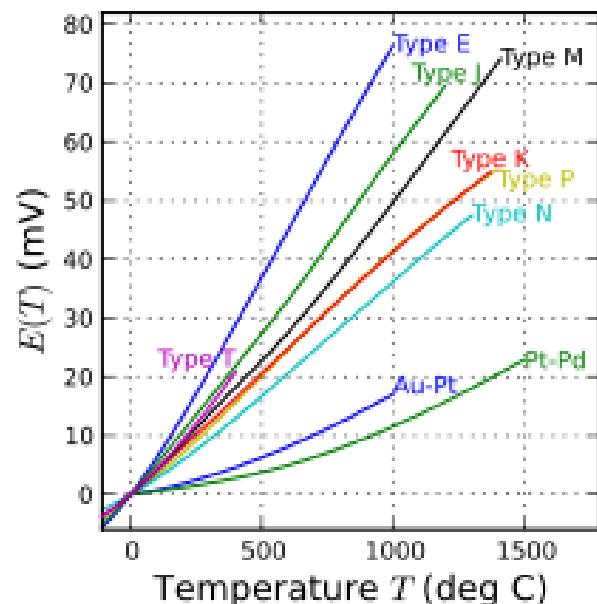
- A karakterisztikát 3 mérési pont felvételével lehet megállapítani.



Hőelemek (Thermocouple)

Tip.	Anyag	Hőmérséklet tartomány:	Érzékenység
E	<u>Chromel</u> (NiCr) – <u>constantan</u> (CuNi)	-50 °C ... +740 (1000) °C	68 µV/°C
J	<u>Iron</u> (Fe) – <u>constantan</u> (CuNi)	-40 °C ... +750 (1200) °C	50 µV/°C
K	<u>Chromel</u> (NiCr) – <u>alumel</u> (NiAl)	-200 °C ... +1350 °C	40 µV/°C
N	<u>Nicrosil</u> (NiCrSi) – <u>Nisil</u> (NiSi)	-270 °C ... +1300 °C	39 µV/°C
B, R, S	<u>Platinum</u> (Pt) / <u>rhodium</u> (Rh)	50 °C ... +1800 °C	10 µV/°C
C, D, G	Tungsten/rhenium	0 ... 2315 °C (3000 °C)	
P, ...	Chromel (NiCr) –gold/iron	1.2 ... 300 K (600 K)	15 µV/K
...			

- Elérhető pontosság: ($\pm 0,5$), $\pm 1 \dots \pm 2,5$ °C
- Ipari körülmények között nehéz pontosan mérni, mert az érzékenységgel [6...70 µV/°C] azonos nagyságrendű a zavaró feszültség.



Hőmérséklet szenzorok összehasonlítása

Szenzor:	1th SPRT 2nd SPRT Ipari PRT	Termisztor	Hőelem
Hőmérséklet tartomány:	(+++) -270 ... 1000 °C -200 ... 500 °C -60... 200 °C	(-) Kicsi -55 ... 200 °C	(+++) -180 ... 2320 °C
Időállandó:	(-) Nagy Néhány s	(+) Kicsi 1-10s (3-100ms)	(+) Kicsi ~ 1s
Pontosság, Stabilitás:	(+++) ± 0.001 °C ± 0.03 °C ± 1 °C	(-) Kicsi $\pm 0,1$ °C $\pm 0,5$... 5 %	(- - -) ± 1 °C ... $\pm 2,5$ °C (± 5 °C)
Érzékenység	(- - -) $0.00385 \Omega / (\Omega \cdot ^\circ C)$	(+++) Nagy $\sim 1k\Omega / (\Omega \cdot ^\circ C)$	(- - -) $15...68 \mu V / ^\circ C$



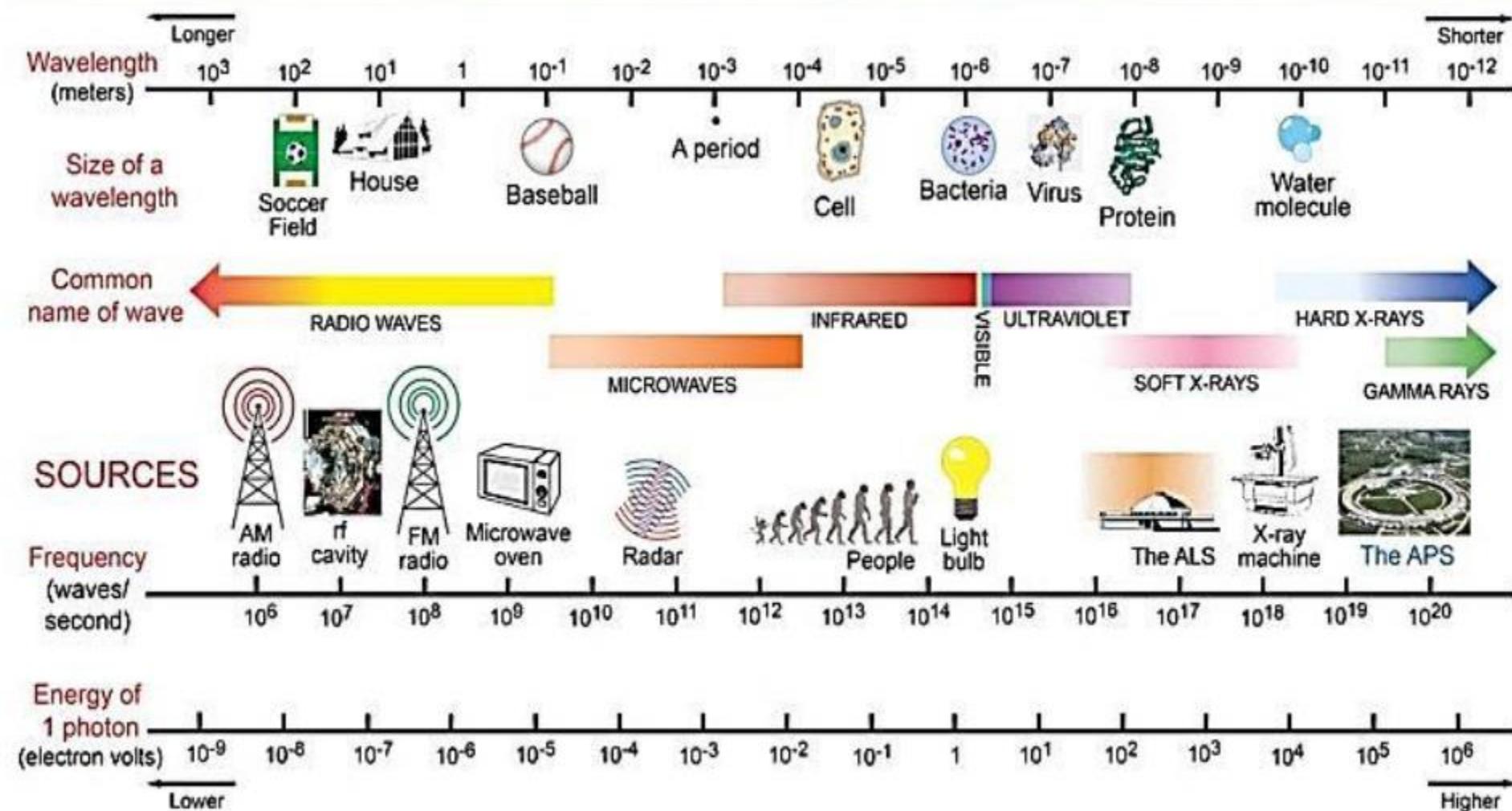
Kombinált szenzorok (Infravörös hőmérő termoelemmel)



- A termoelem és az IR detektor funkcionális kombinációja.
- mV kimenőjel, a kívánt termoelem karakterisztikához skálázva.
- Működési elve mint más IR hőmérőknek.



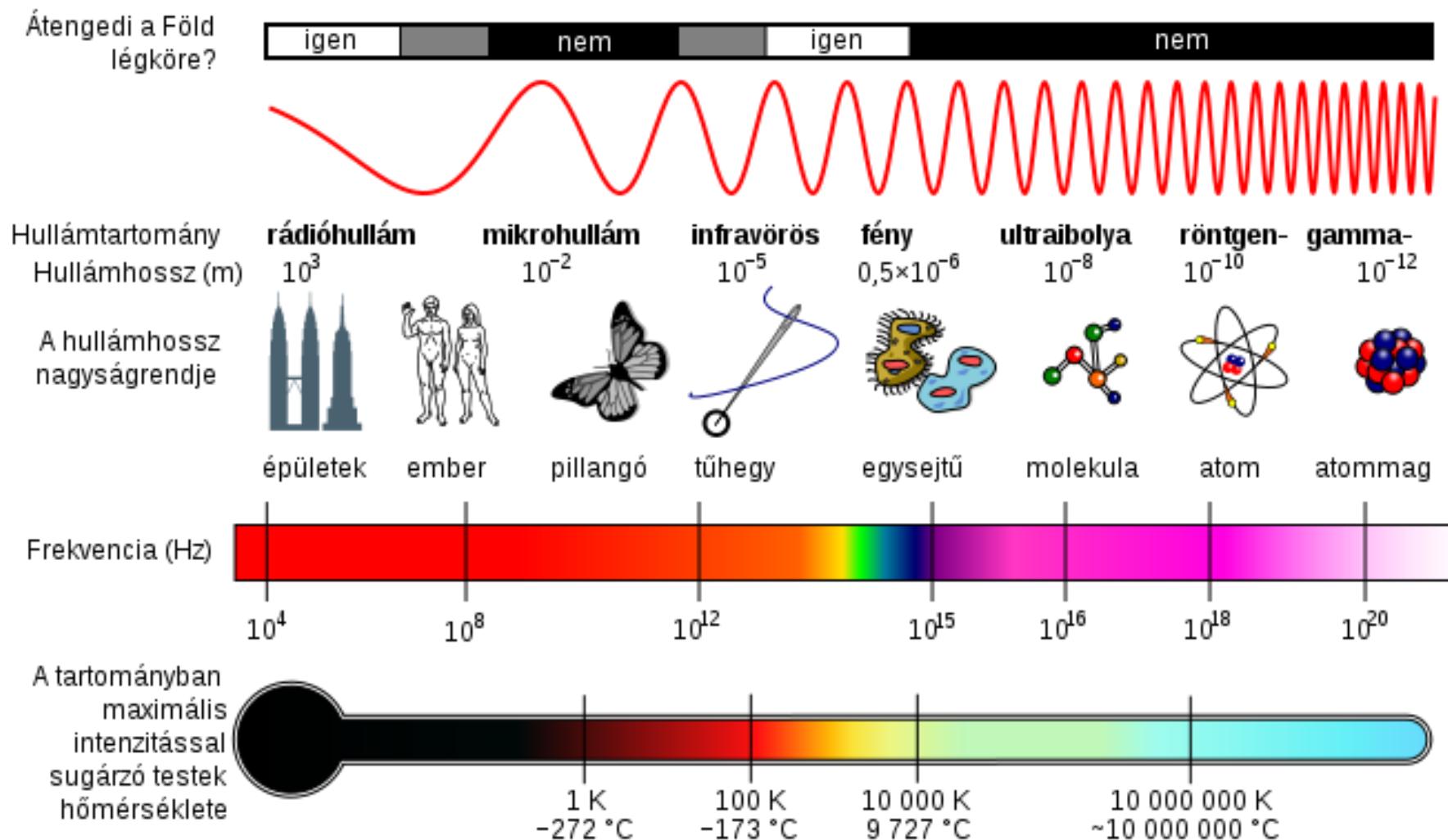
Hőméréklet Mérés Sugárzás Útján (Elektromágneses spektrum)



[Forrás: https://hu.wikipedia.org/wiki/Infrav%C3%A1rf%C3%BDs_sug%C3%A1rz%C3%A1s]



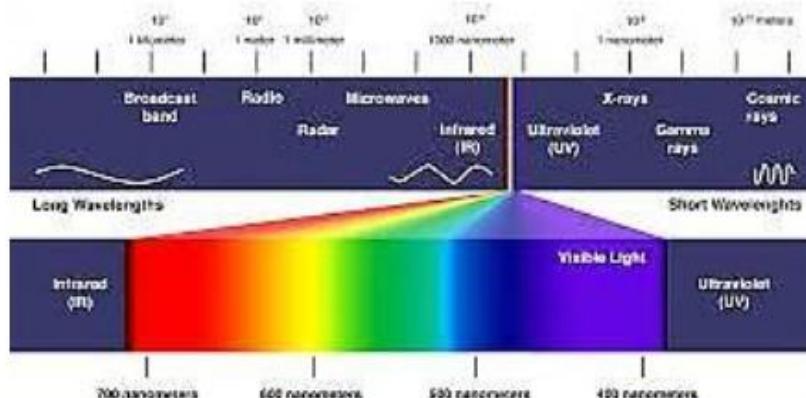
Hőmérséklet Mérés Sugárzás Útján (Elektromágneses spektrum)



[Forrás: https://hu.wikipedia.org/wiki/Infrav%C3%A1rf%C3%B3s_sug%C3%A1rz%C3%A1s]

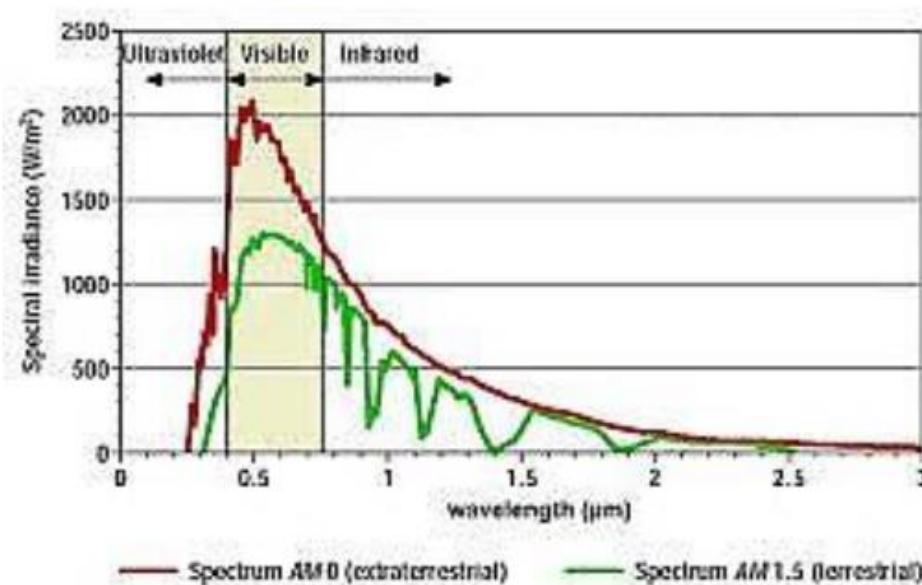


Hőméréséklet Mérés Sugárzás Útján (Elektromágneses spektrum)



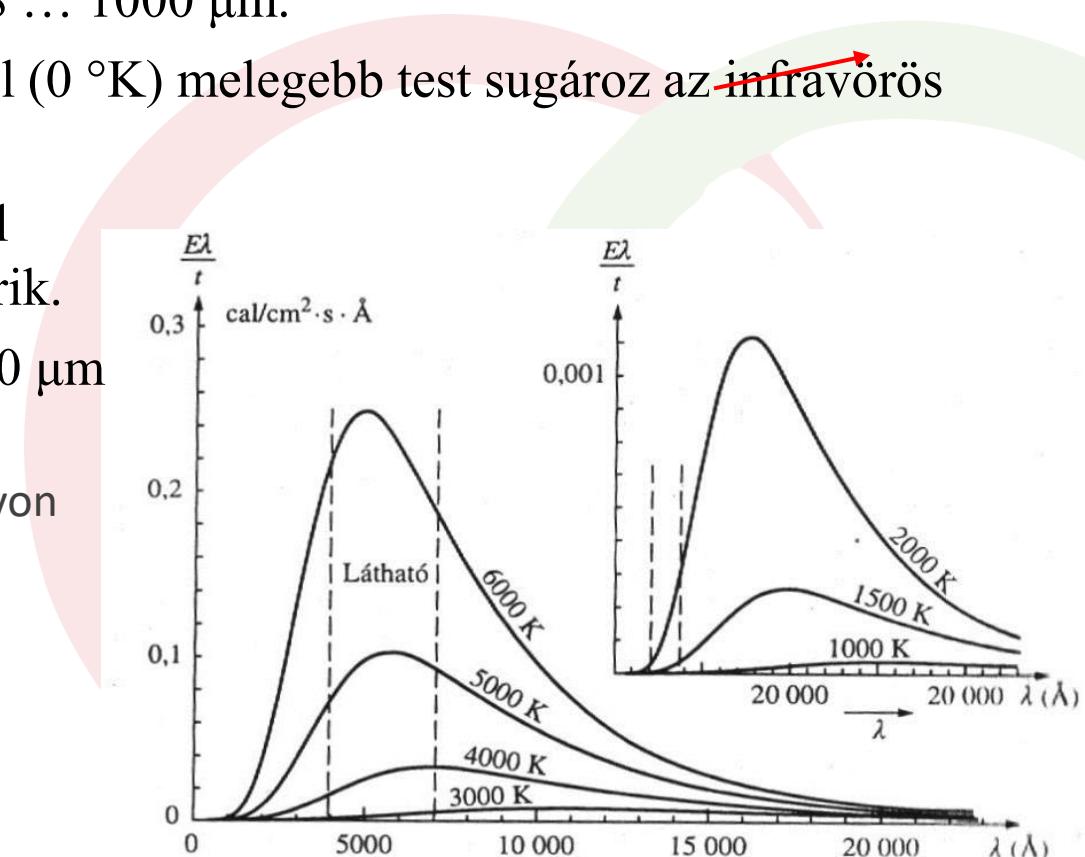
A látható
hullámhossztartomány
az elektromágneses
spektrumból

A Föld légkörének
hatása a Nap
sugárzási
spektrumából
érzékelhető
intenzitásokra



Infravörös hőmérők (érintésmentes hőmérséklet érzékelők)

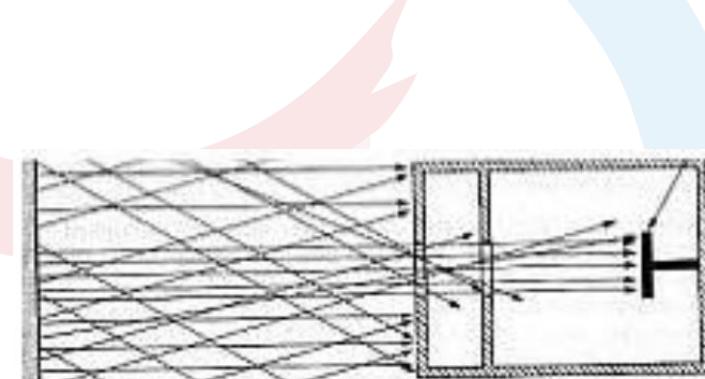
- IR hullámhossz tartomány: 0,78 ... 1000 μm .
- minden, az abszolút nulla foktól (0°K) melegebb test sugároz az ~~infravörös~~ tartományban.
- IR hőmérők a mérendő test által leadott infravörös sugárzást mérik.
- A legtöbb műszer csak 0,7 ... 20 μm tartományon mér.
 - Nem elég érzékenyek a tartományon kívüli kis energiák méréséhez.



Különböző hőmérsékletű fekete test sugárzásának intenzitása a hullámhossz függvényében. Planck-görbe
Forrás: Ábrahám György: Műszaki Optika, 2014

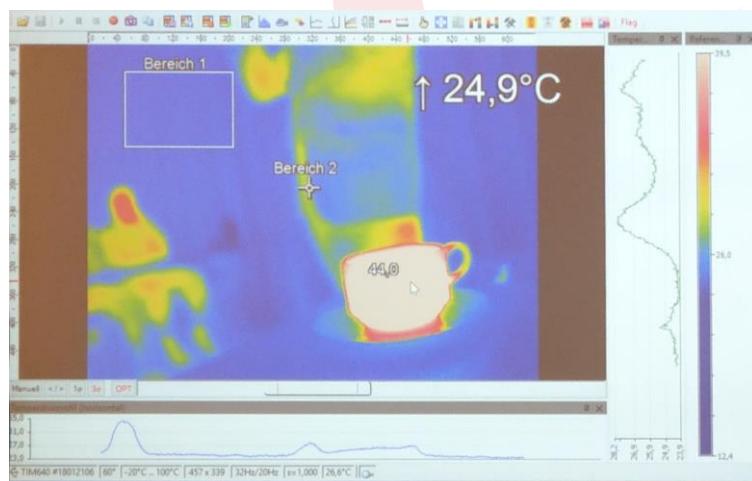
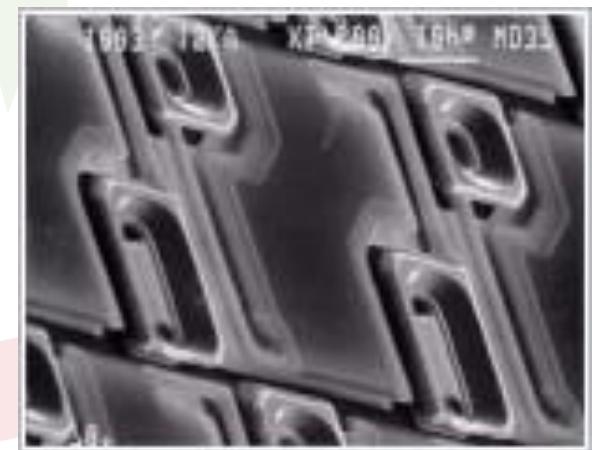
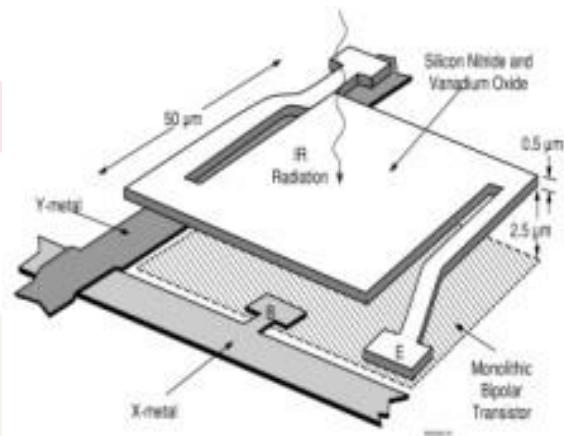
Infravörös hőmérők (érintésmentes hőmérséklet érzékelők)

- A lencse a detektorra fókuszálja a méréndő test által kisugárzott energiát. A detektor elektromos jellé alakítja.
- Jelkondicionálás (szűrés, erősítés) beállítása a különböző anyagi és felületi minőségből származó sugárzási feltételekhez.
 - Az anyag sugárzó képességét sok bizonytalanság terheli, mivel függ a színtől, felületi érdességtől, oxidációtól, ...
- Belső hőmérséklet ismerete vagy előzetes kalibráció szükséges.
 - Környezeti hőmérséklet kompenzálás.
 - Ismeretlen hőmérséklet esetén meghatározása a detektor hőmérséklete alapján.



Hőméréklet mérés sugárzás útján (Pirométerek/Bolométerek)

- Hősugárzás elnyelésére szolgáló felület + hőellenállás,
- Elektromos ellenállás változását használják a hő érzékelésére
- Érzékelő elemek VOx (vanádium oxid réteg)
- Kétdimenziós elrendezésben >80.000 szenzorelementet tudnak elhelyezni, (leggyakorib: 320x240),

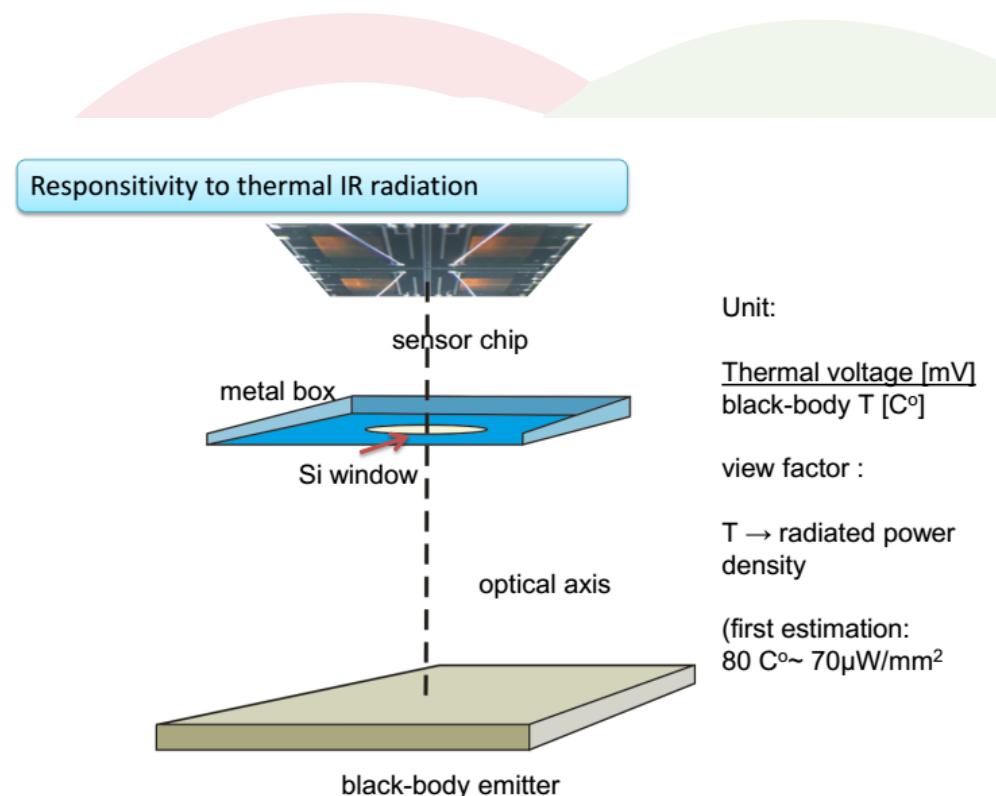


[Forrás: <http://www.xn--termogrfa-termokamera-72b.hu/hu/termografia>]



Infravörös hőmérők (érintésmentes hőmérséklet érzékelők)

- Az IR hőmérőkkal lehet mozgó, forgó vagy rezgő tárgyak hőmérsékletét is mérni.
- Méréshatár $> 1500^{\circ}\text{C}$
- Nem roncsolja, vagy szennyezi a vizsgált felületet.
- ms nagyságrendű válaszidő.



ThermoPile TATEYAMA TPT v3 wafer no. : 54

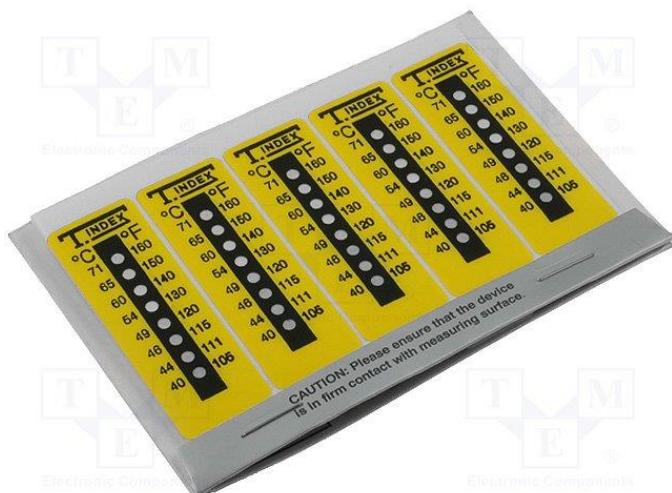
35

Infravörös hőmérők (egypontos IR hőmérők)



kémiai fázisváltozás hőmérsékletfüggése (Folyadékkristályos hőmérők)

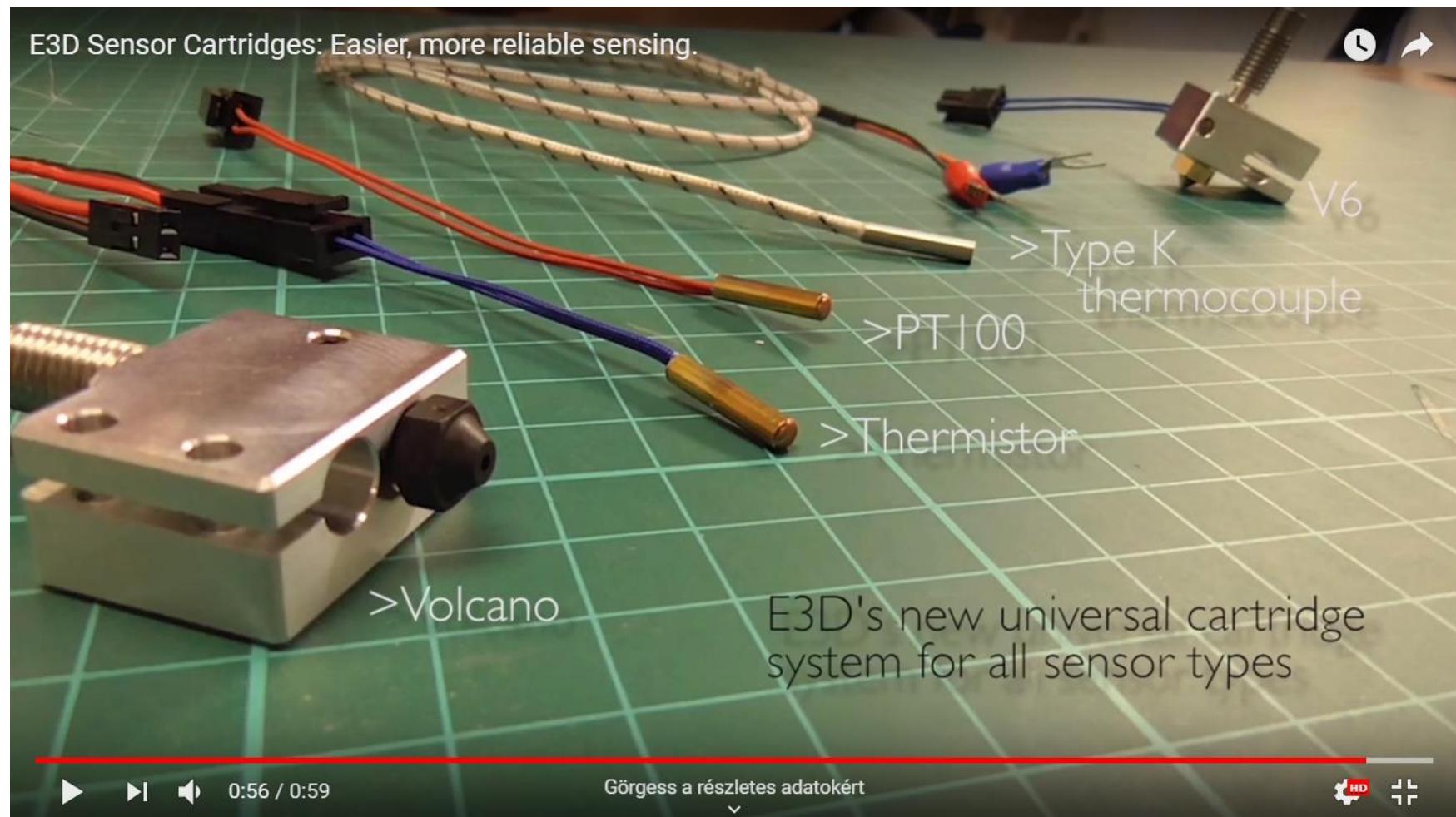
- A folyadékkristályok rendelkeznek a folyadékok mechanikai és az egykristályok optikai tulajdonságaival.
 - A hőmérséklet változása elszínezi a folyadékkristályt.
- A folyadékkristályos hőmérők méréstartománya és felbontása változatos.
 - Méréstartomány: 0 ... néhány száz °C
 - Felbontásuk: (0,1) 0,5 ... 1 °C
- Alkalmazásuk: eldobható hőmérők otthoni és klinikai használatra.



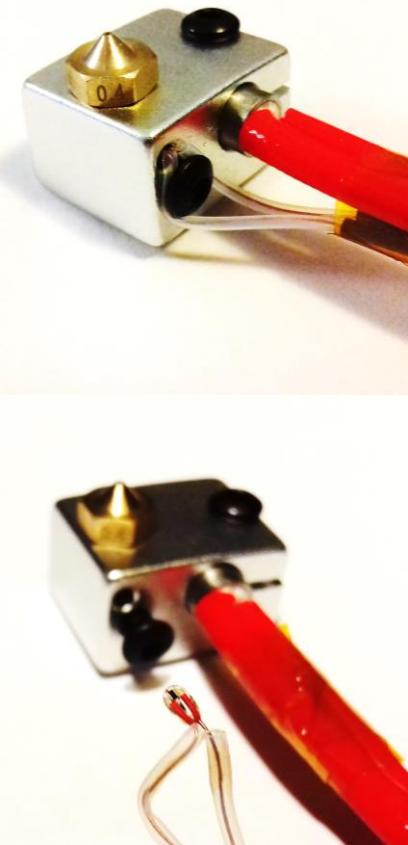
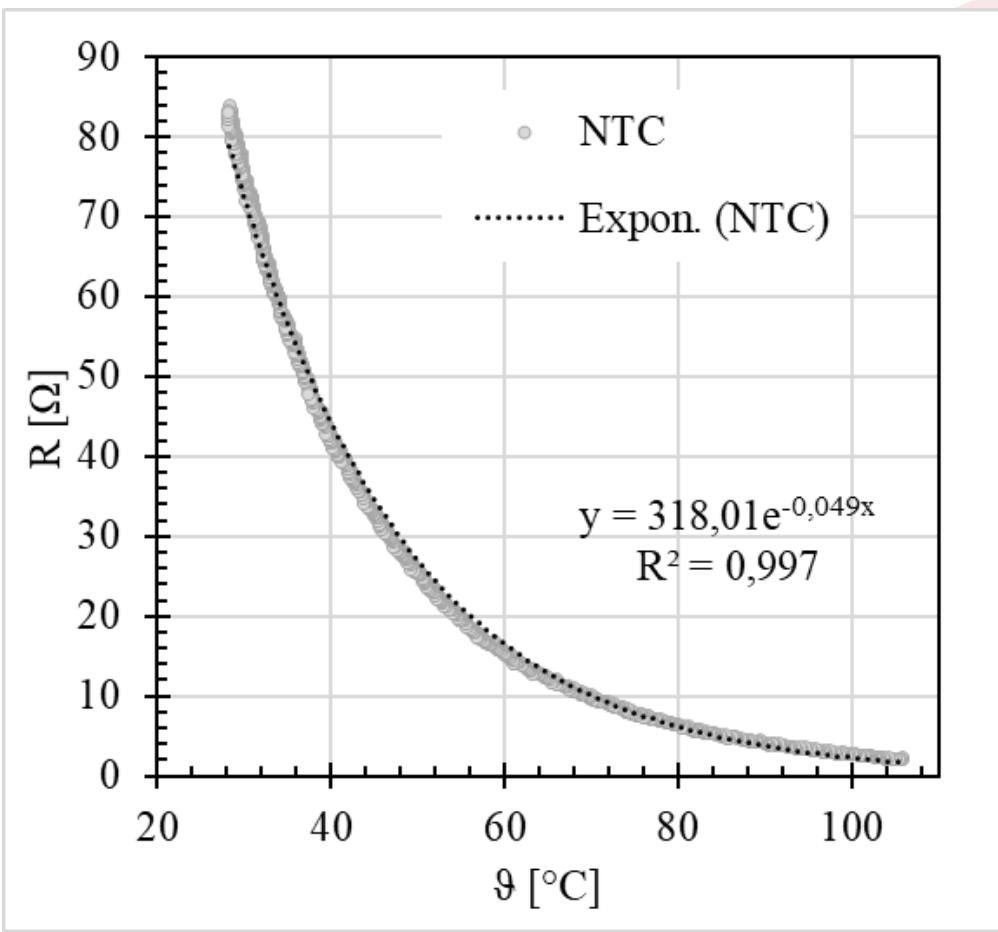
[Forrás: <https://www.otthoni-kezeles.hu/teszt-lazmero>]



Hőmérséklet Mérő Szenzor (Alkalmazási Példa)



Hőmérséklet Mérő Szenzor - NTC Termisztor (Alkalmazási Példa)



Hőmérséklet Mérő Szenzor (Felkészülést segítő kérdések)

1. Milyen módon lehet a hőmérséklet érzékelőket kalibrálni?
2. a.) Milyen fizikai elv alapján működnek az üvegkapilláris hőmérők?
b.) Milyen érzékelőkben alkalmazzuk még ezt a fizikai elvet? (legalább 1 megnevezése és ábra az elvi felépítéséről.)
3. Csoportosítsa anyaguk szerint az ellenállás hőmérséklet érzékelőket (hőellenállások), és írja le címszavakban jellemzőiket. Ábrázolja jellemző karakterisztikájukat egy diagramon.
4. Milyen fizikai elven működik és mit mér a hőelem (thermocouple)?
Ábrával illusztrálja!
5. Milyen inverz jelenség igaz a hőelemre?
Milyen módon hasznosítjuk a jelenséget?
6. Mitől függ a hőelemen mérhető termofeszültség nagysága?



KÖSZÖNÖM A FIGYELMET!

BOJTOS Attila
BME - MOGI Tanszék
bojtos@mogi.bme.hu

Szenzorteknika Optikai érzékelők

BOJTOS ATTILA
BME - MOGI TANSZÉK



M Ú E G Y E T E M 1 7 8 2



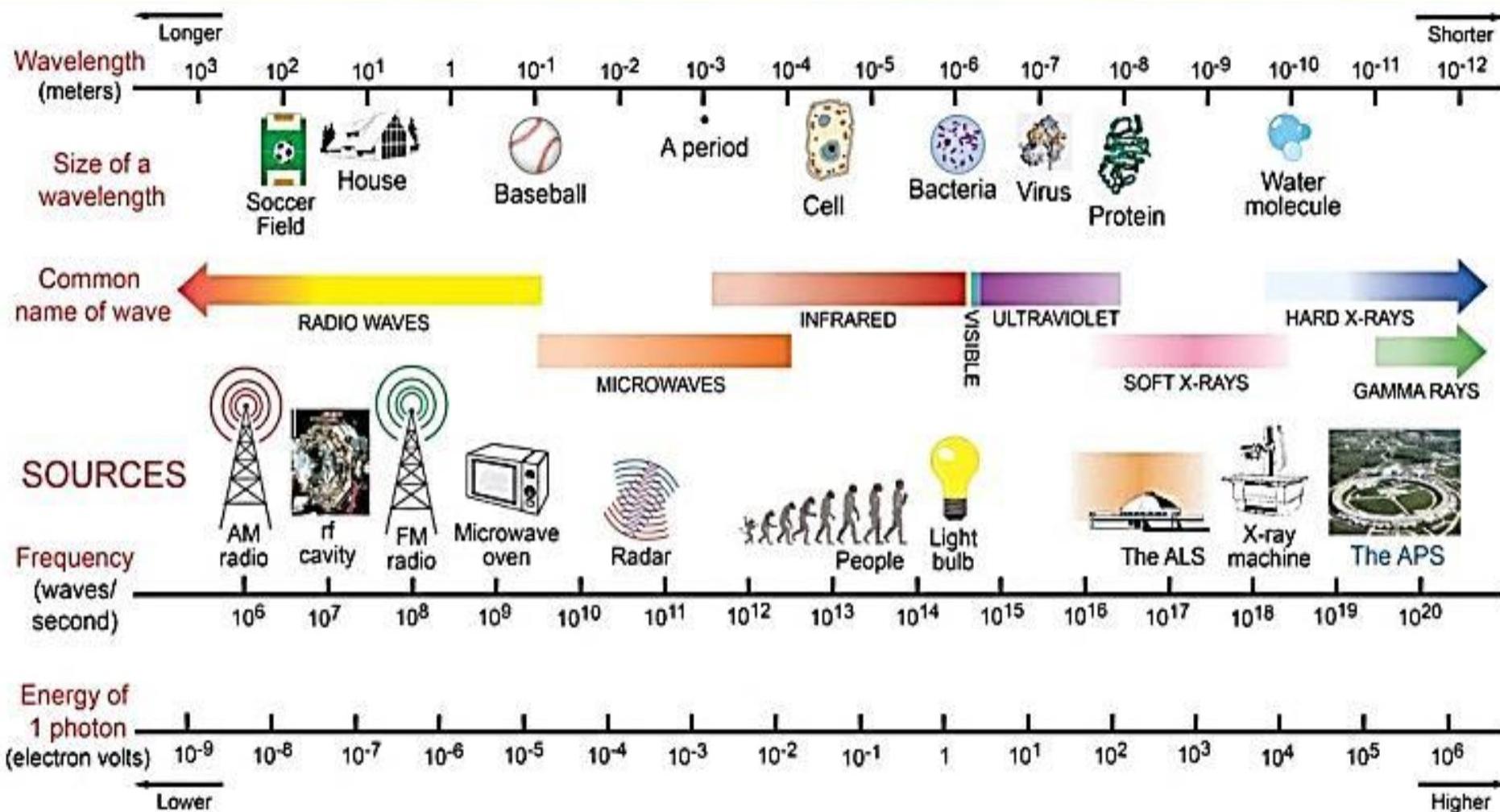
Optikai hőmérsékletmérés



- Érintésmentes
- Passzív
- Lokalizált
- Mobilis

Emisszivitás ismerete, vagy
referencia szükséges a
pirometriához

Az elektromágneses spektrum



Infravörös hőmérők (érintésmentes hőmérsékletérzékelők)

Infravörös tartomány: 0,7 – 1000 µm.

Minden test, ami melegebb az abszolút 0 K hőmérsékletnél, energiát sugároz infravörös tartományban.

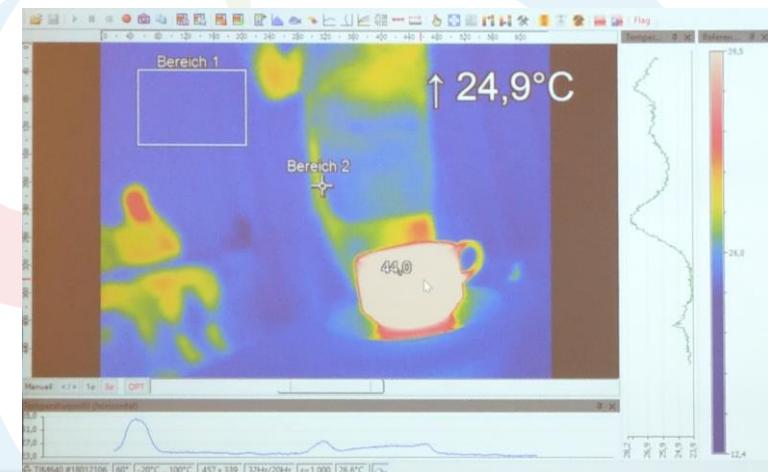
Az infravörös hőmérők érzékelik a testek által sugárzott infravörös hullámokat.

A legtöbb műszer 0,7 – 20 µm tartományban érzékel. Azon kívül nem elég érzékeny.

- IR fényképezet: 700 nm – 1 µm,
- Hőképalkotás: 8 – 20 µm,



Infravörös fényképezet (720nm)
[Forrás: <https://hu.wikipedia.org/>]

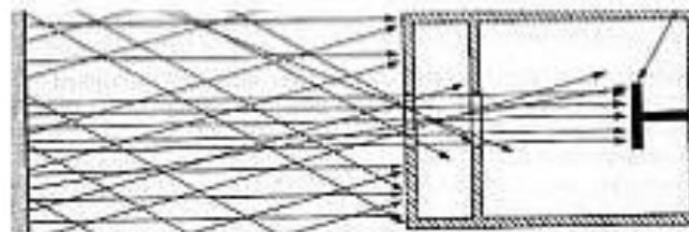


Hőkamera képe.
[Forrás: KVALIX szenzor szeminárium 2019]



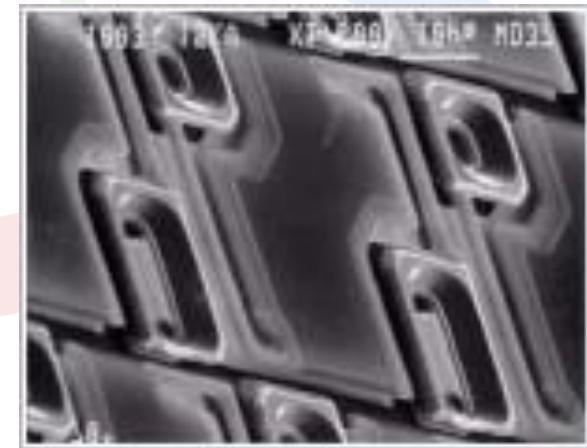
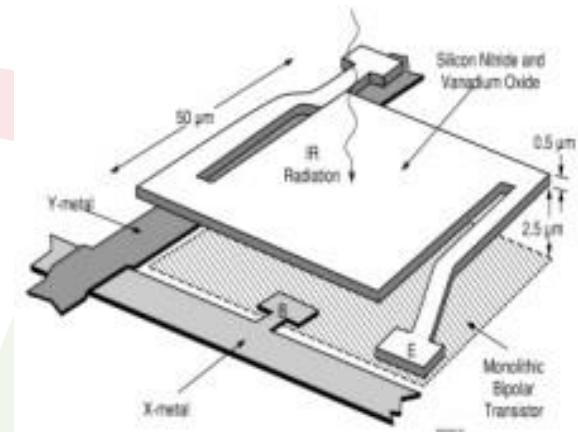
Az infravörös hőmérsékletmérés alapjai

- A lencse a detektorra fókuszálja mért objektum által sugárzott energiát, amit a detektor villamos jellé alakít.
- A jelfeldolgozás (szűrés és erősítés) és az Emisszivitás megfelelően beállítható a különböző anyag- és felületminőség korrekciójához.
- Az érzékelő belső hőmérsékletét ismerni kell, vagy meg kell határozni egy előzetes kalibrációval, (környezeti hőmérséklet kompenzáció).
- Az ismeretlen hőmérséklet a detektor hőmérsékletéből határozható meg.
- Az anyagok emisszivitását sok bizonytalanság terheli. Függ a felület minőségétől, színétől, oxidációtól, öregedéstől, stb.



Hőmérséklet mérés sugárzás útján (Pirométerek/Bolométerek)

- Hősugárzás elnyelésére szolgáló felület + hőellenállás,
- Elektromos ellenállás változását használják a hő érzékelésére
- Érzékelő elemek VOx (vanádium oxid réteg)
- Kétdimenziós elrendezésben >80.000 szenzorelementet tudnak elhelyezni, (leggyakrabban: 320x240),



Az infravörös hőmérők előnyei

- Mozgó tárgyak hőmérsékletének mérése érintés nélkül.
- 1500°C fölött is képes mérni.
- Nem károsítja vagy szennyezi a mért felületet.
- Gyors működés (ms nagyságrendű).



Tematika

Bevezetés a szenzorteknikába

- csoportosítás,
- méréstechnikai tulajdonságok,
- Jelfeldolgozás

Anyagszerkezet

- Atomszerkezet
- Kémiai kötések
- Sávszerkezet
- Félvezetők
- Fémek

Érzékelési elvek fizikai alapjai (szenzor)

- Termikus elvek, hőmérsékletmérés
- **Optikai-elvek**
- Ellenállásváltozás elvén működő érzékelés
- Kapacitás
- Mágneses mérési elvek
- Piezoelektronos mérési elvek
- Akusztikai elvek

Érzékelési módszerek, alkalmazások (jelátalakító)

- Hossz-, távolság-, elmozdulás-, elfordulásmérés szenzorai
- Sebesség-, térfogatáram-, gyorsulásmérés szenzorai
- Nyomás-, erő-, nyomatékmérés szenzorai
- (Kémiai érzékelés szenzorai)

Aktuátorok

- Motorok
- Piezoelektronos aktuátorok
- Magnetostrikciós aktuátorok

Integrált érzékelő és beavatkozó rendszerek (vendégelezés)

- Technológiai alapok, MEMS, NEMS, OEMS
- Szenzorhálózatok, IoT



5. Előadás áttekintése

- Fontosabb törvényszerűségek
- Passzív optikai elemek
 - Optikai szál, Fresnel lencsék, ...
- Aktív optikai elemek
 - Fényérzékelők
 - Vákuumcsövek
 - Szilárdtest eszközök.
 - Fénykibocsátó eszközök
 - LED
 - LASER

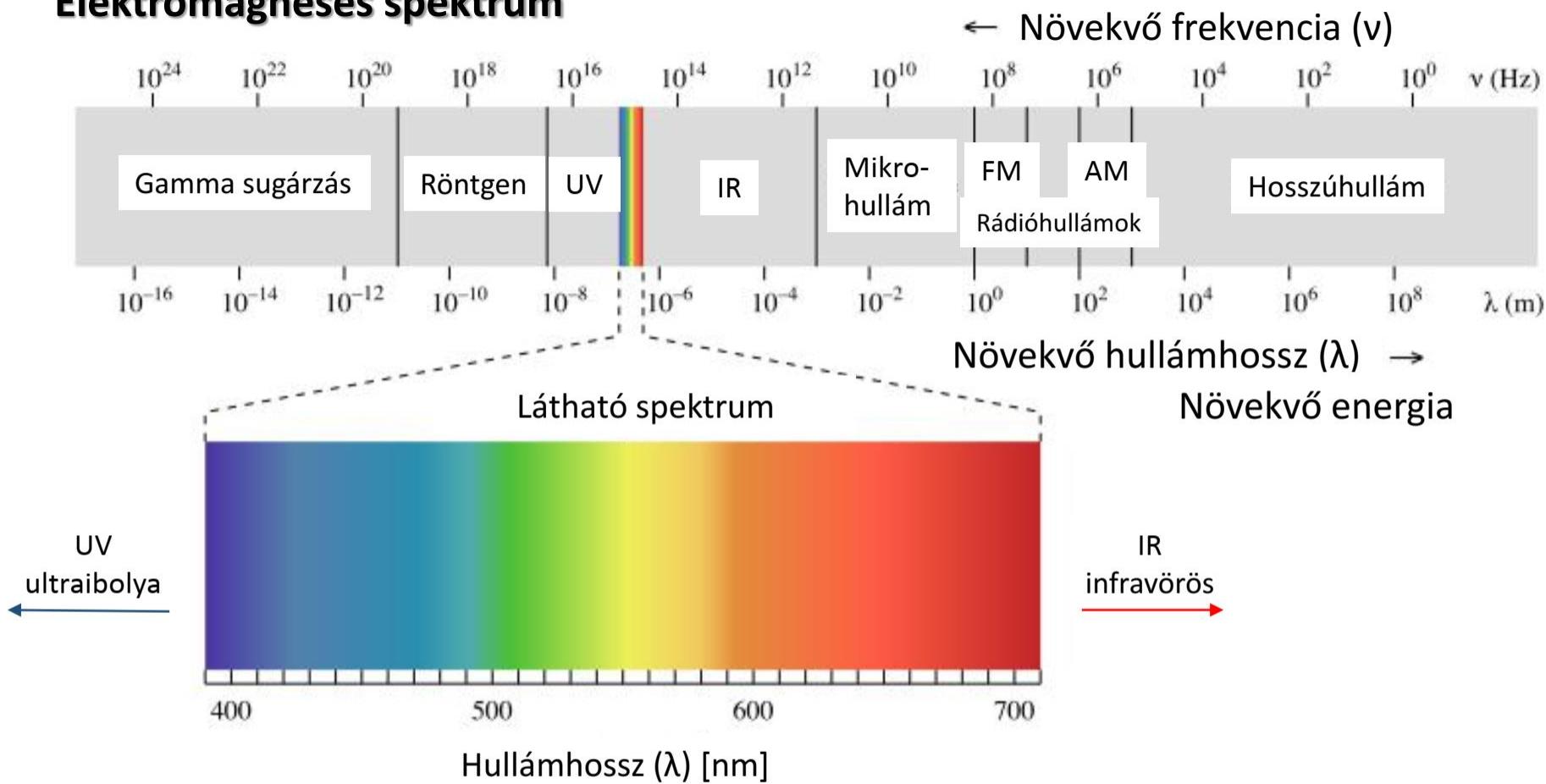


A fény kettős természete

- Hullámtermészet
 - Interferencia
 - Diffrakció
 - Polarizáció
- Részecske természet
 - Abszorpció / emisszió
 - Fotoeffektus / fényelektromos jelenség
 - Compton - effektus

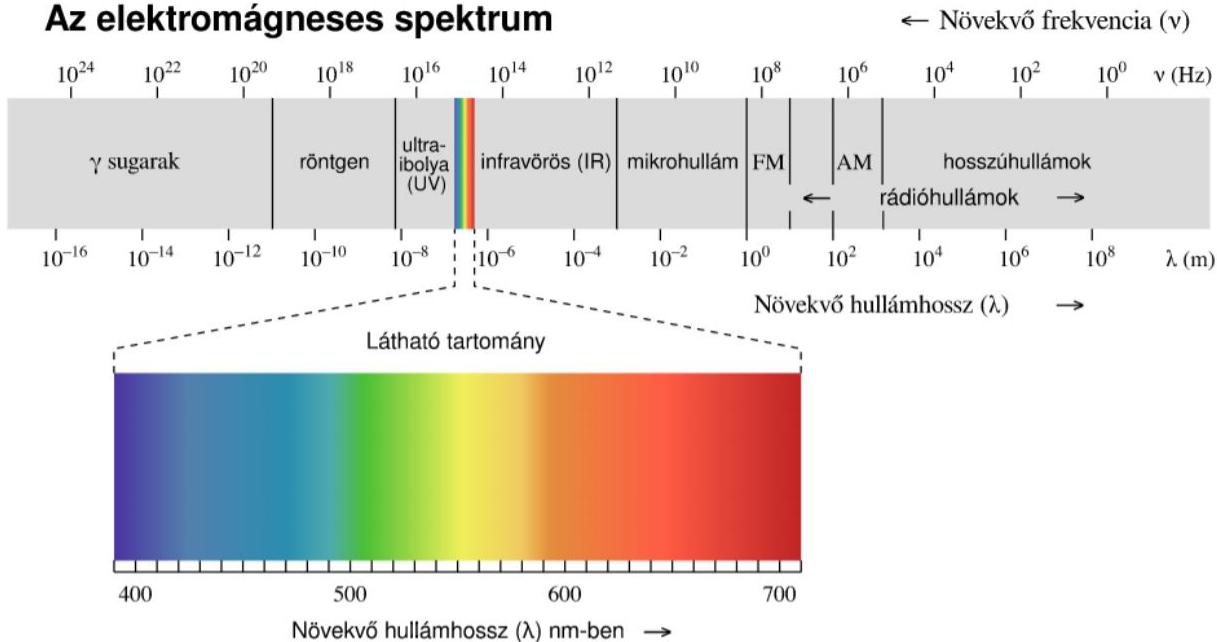


Elektromágneses spektrum



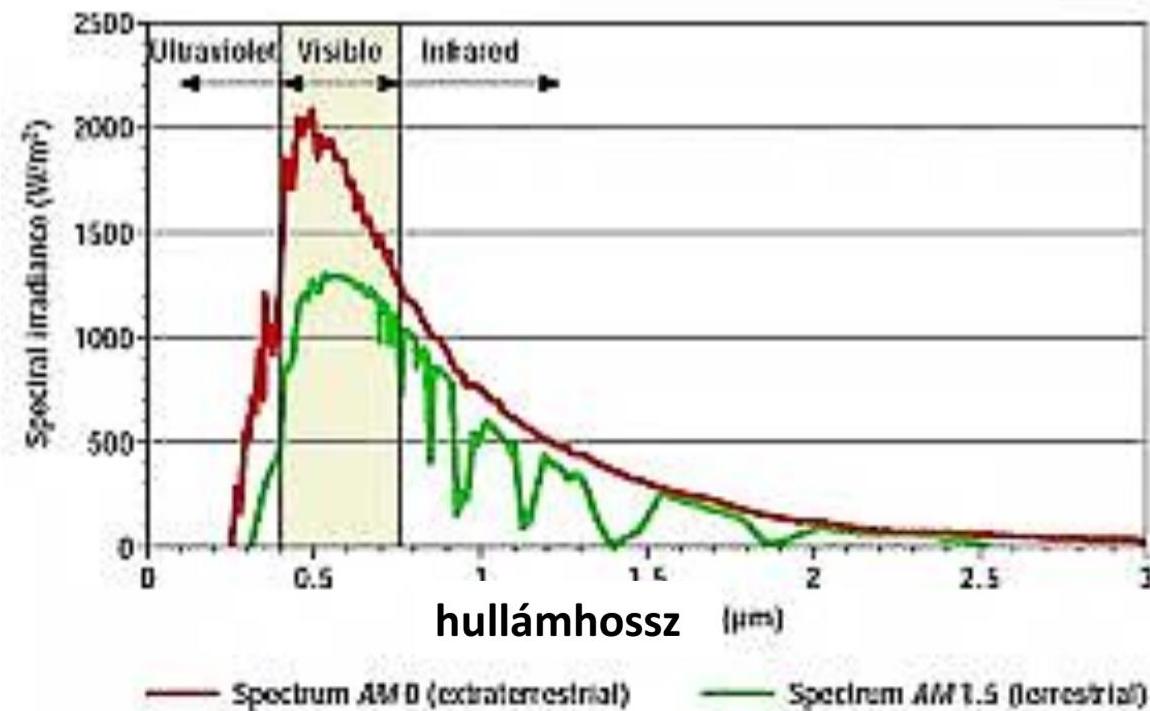
Fénysebesség: alapvető fizikai állandó, az elektromágneses hullámok **terjedési sebessége**. Pontos értéke **299 792 458 m/s** minden vonatkoztatási rendszerben. Jelenlegi ismereteink szerint **semmilyen hatás nem terjedhet gyorsabban a vákuumbeli fénysebességnél**.

Az elektromágneses spektrum



A Föld légkörének hatása
a Nap sugárzási
spektrumából érzékelhető
intenzitásokra

**A látható
hullámhossztartomány
az elektromágneses
spektrumból**



Feketetest-sugárzó

(Blackbody radiator; Schwarzer Strahler)

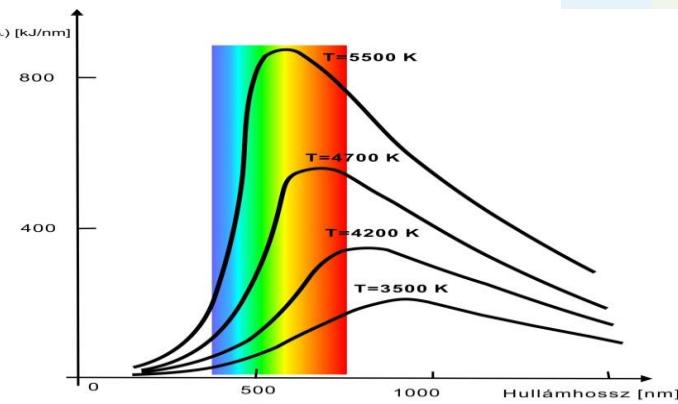
Olyan ideális test (**abszolút fekete test**), amely minden ráeső sugárzást elnyel, ezért minden hullámhosszúságú sugárzás szempontjából fekete.

Az abszolút fekete test emisszivitása egységnnyi.

A fekete sugárzó által kibocsátott \Rightarrow hőmérsékleti sugárzás spektrális eloszlása az ún. Planck függvénynek felel meg és érvényesek rá az ún.

\Rightarrow **sugárzási törvények** (Wien-féle eltolódási törvény, Stefan-Boltzmann törvény).

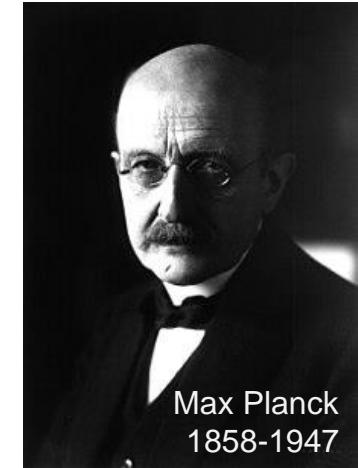
A különböző hőmérsékletű fekete sugárzók színpontjai a színdiagramban az ún. **Planck-görbén** helyezkednek el (\Rightarrow színdiagram).



Egy tökéletes sugárforrás - ún. **feketetest - elektromágneses emisszióját** a **Planck törvény** írja le:

$$M_{e,\lambda}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left(e^{\frac{hc}{\lambda KT}} - 1 \right)$$

ahol



Max Planck
1858-1947

$M_{e,\lambda}(\lambda, T) [\text{Wm}^{-3}]$ a felületegységre eső spektrális sugárzási teljesítmény,

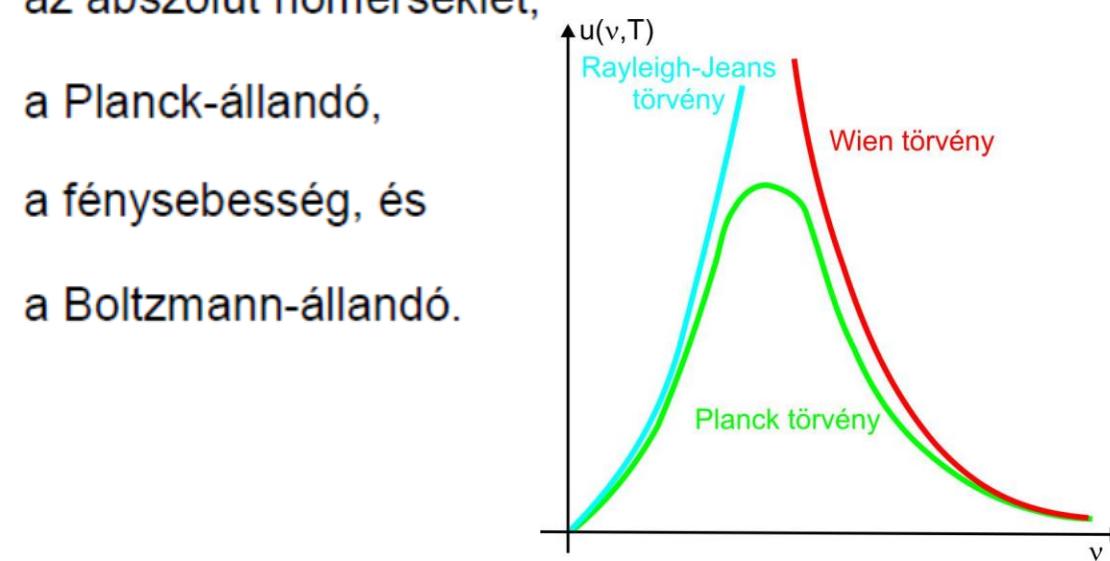
$\lambda [\text{m}]$ az emittált hullámhossz,

$T [\text{K}]$ az abszolút hőmérséklet,

$h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ Ws}^2$ a Planck-állandó,

$c [\text{m/s}]$ a fénysebesség, és

$k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ WsK}^{-1}$ a Boltzmann-állandó.



A teljes hullámhossz tartományon kisugárzott teljesítményt a Stefan-Boltzmann törvény adja:

$$M_e(T) = \int_0^{\infty} M_{e,\lambda}(\lambda, T) d\lambda = \sigma_e T^4$$

ahol

$$\sigma_e = \frac{2\pi^5 k^4}{15 h^3 c^2} = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

A kisugárzott teljesítmény helyett a λ hullámhosszú foton (hc/λ) energiájának figyelembevételével megkaphatjuk az egységnyi felület teljes kisugárzott fotoáramát.

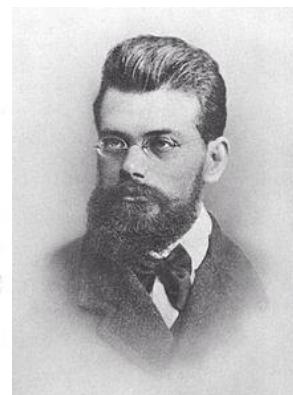
$$M_p(T) = \int_0^{\infty} M_{e,\lambda}(\lambda, T) \frac{\lambda}{hc} d\lambda = \sigma_p T^3$$

ahol

$$\sigma_e = 1.52 \cdot 10^{15} \text{ fotons}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-3}$$



*Josef Stefan
1835 – 1893*



*Ludwig Eduard
Boltzmann
1844–1906*

A Wien-féle eltolódási törvény kapcsolatot teremt a hőmérséklet és a kisugárzott teljesítmény hullámhossz-szerinti maximuma között:

$$\lambda T \Big|_{\frac{\partial M_{e,\lambda}}{\partial \lambda} = 0} = 2898 \mu m K$$

Egy valós anyag spektrális emisszióképességét az anyag által adott Ω térszögbe kisugárzott teljesítmény és a tökéletes fekete test által kisugárzott teljesítmény hányadosa adja:

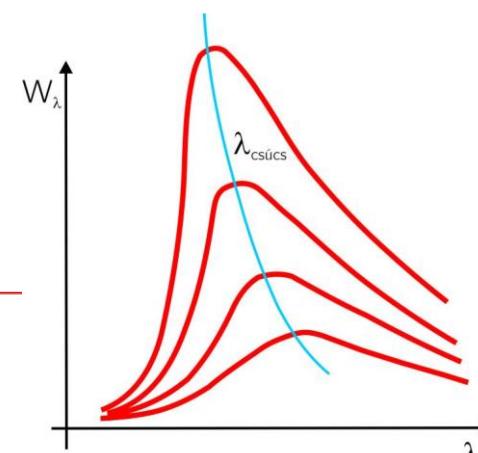
$$\varepsilon(\Omega, \lambda, T) = \frac{L_{e,\lambda}(\lambda, T)_{\text{anyag}}}{L_{e,\lambda}(\lambda, T)_{\text{fekete test}}} = \varepsilon_e(\lambda)$$

ahol $L_{e,\lambda} = M_{e,\lambda} / \Omega$

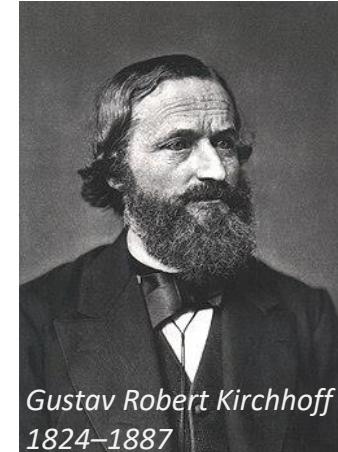
Megjegyzendő, hogy míg a spektrális fotonkibocsátás és az emisszióképesség minden esetben megegyezik,

$$\varepsilon_e(\lambda) = \varepsilon_p(\lambda)$$

az egész spektrumon integrált teljes emisszió általában nem azonos:



$$\varepsilon_e = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon_e(\lambda) L_{e,\lambda}(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^{\infty} L_{e,\lambda}(\lambda, T) d\lambda} \neq \varepsilon_p$$



Az elektromágneses sugárzás Kirchoff-törvénye szerint termikus egyensúlyban az emittált és abszorbeált energia megegyezik:

$$\alpha(\lambda) = \varepsilon(\lambda)$$

Egy tetszőleges felületre beeső optikai nyaláb viselkedését három tényező írja le a következő módon:

$$\alpha + r + t = 1$$

ahol r és t a reflexió, illetve a transzmisszió. Tökéletes fekete test esetén:

$$\varepsilon(\lambda) = 1, \text{ vagyis } \alpha = 1, \text{ így } r + t = 0.$$



Doppler-hatás

Egy sugárzás hullámhosszában megjelenő változás, ha a hullámforrás és a megfigyelő egymáshoz képest mozog.

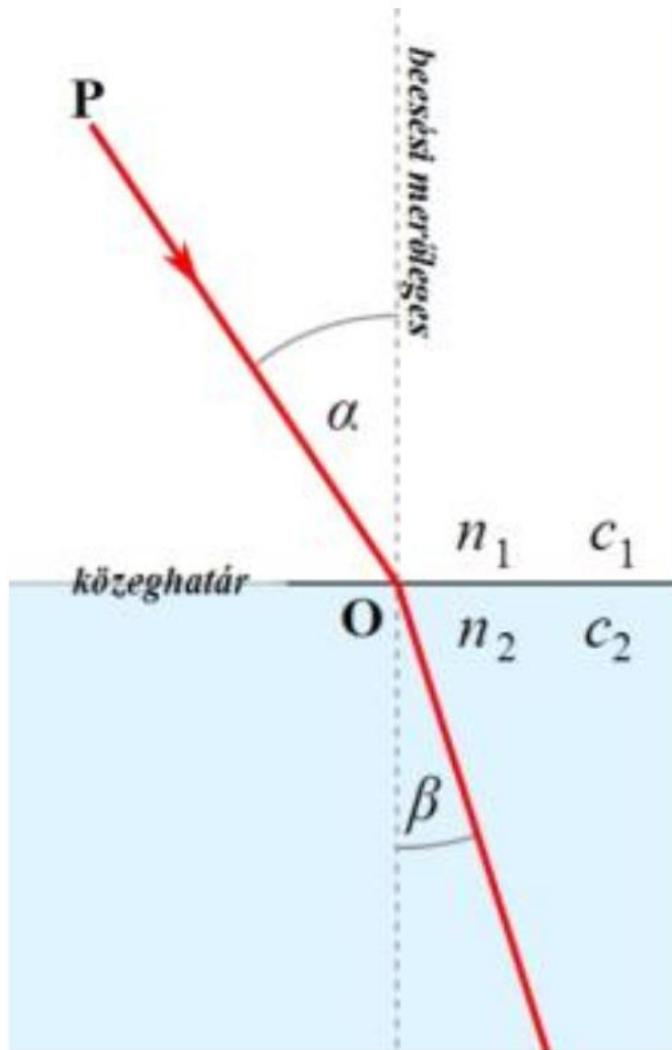
$$f = f_0 \frac{c}{c - v}$$

Ha a mozgó forrás f_0 frekvenciájú hullámot bocsát ki, akkor a közeghez képest álló megfigyelő az alábbi módon meghatározható f frekvenciát észlel:

c : a hullám sebessége a közegben

v : a hullámforrás sebessége a közeghez képest
(pozitív = közeledő, negatív = távolodó)

A refraktív optikai elemek



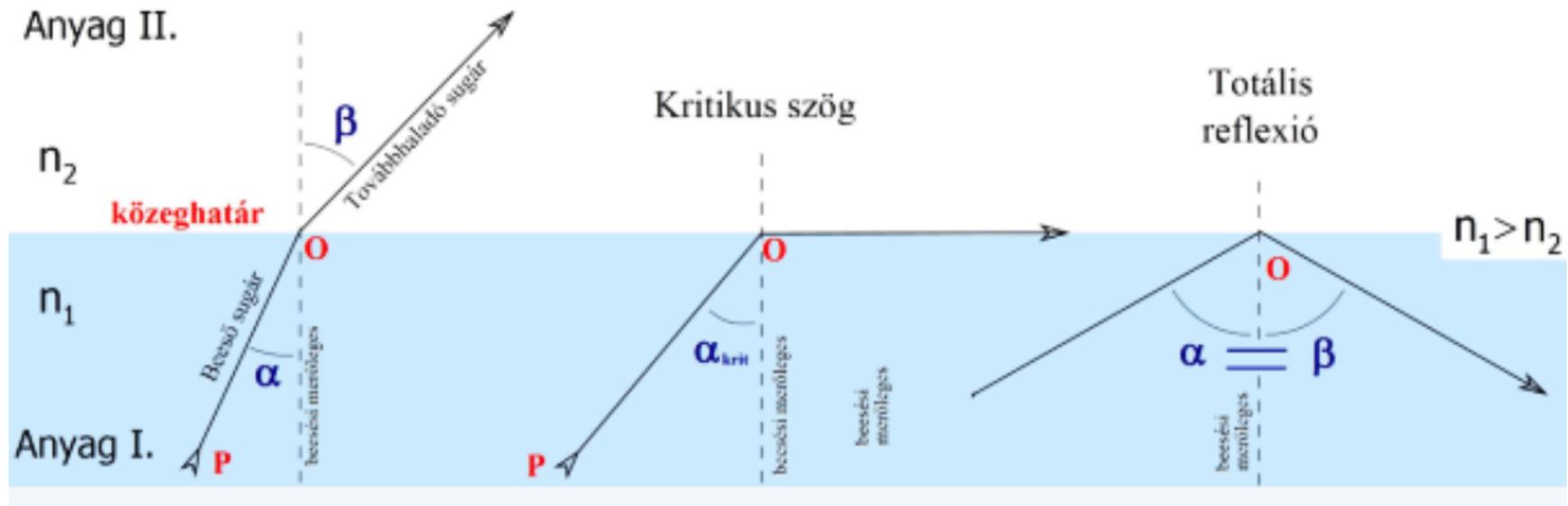
Snellius-Descartes-törvény

$$\sin(\alpha)/\sin(\beta) = n_2/n_1$$

A tükrözés alaptörvénye:

a beeső fénysugár és a felületi normális által bezárt szög megegyezik a kiléző fénysugár és a felületi normális által bezárt szöggel.

Anyag II.



Létezik egy kritikus határszög, amelynél nagyobb beesési szögeknél fellép a **totális reflexió**, azaz a teljes visszaverődés:

$$\alpha_{krit} = \arcsin(n_2/n_1)$$

Interferometria

- A fényforrások jelentős részénél a **fénykibocsátás atomi folyamat**, amely során az egyes atomok véletlenszerűen bocsátanak ki véges hosszúságú hullámvonulatokat, így azok **nem koherensek**.
- A hullámok egymásrahatásának legismertebb megjelenési formája csak koherens interferáló hullámok esetén lép fel.

Az interferáló hullámok találkozásakor megfigyelhetjük az **interferencia jelenségét**.

- a hullámok teljesen kiolthatják vagy erősíthetik egymást.
- akkor lesz folytonosan megfigyelhető, ha nem változik meg az interferáló hullámok fáziskülönbsége.

$$y = a_1 \sin(\omega t + \alpha_1) + a_2 \sin(\omega t + \alpha_2)$$

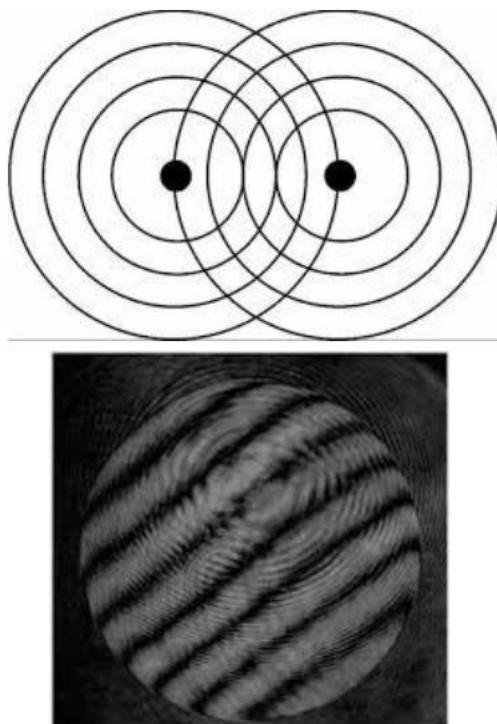
$$A^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)$$

Az eredő amplitúdó, az a_1 és a_2 amplitúdóktól és $\delta = \alpha_1 - \alpha_2$ fáziskülönbségtől függ. Két fénysugár találkozásakor a fény intenzitása bármely pontban arányos az eredő amplitúdó négyzetével.

$$I \approx A^2 = 2a^2(1 + \cos \delta) = 4a^2 \cos^2 \frac{\delta}{2}$$

Ha a fáziskülönbség $\delta=0, 2\pi, 4\pi \dots$ akkor $4a^2$ -et kapunk, azaz bármelyik fénysugár intenzitásának 4-szeresét. Ha $\delta=\pi, 3\pi, 5\pi \dots$ az intenzitás nulla.

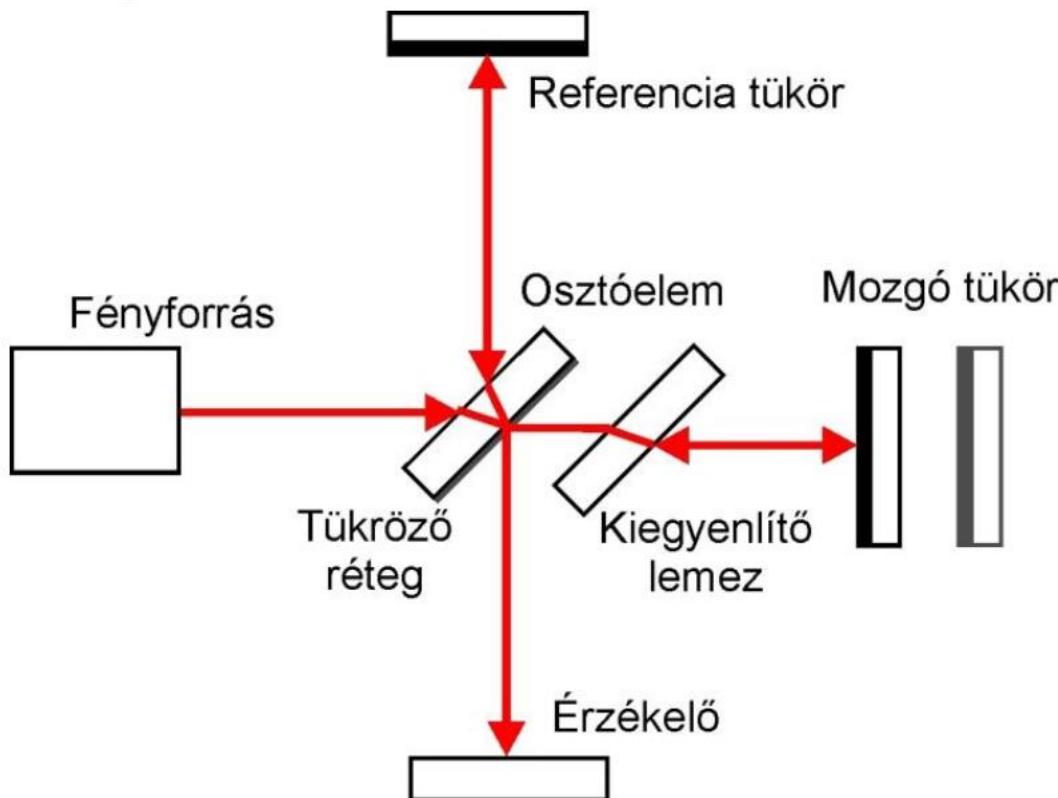
Az interferencia feltételeinek meglétékor, fényhullámok találkozásakor interferencia jelenséget figyelhetünk meg. Alkalmasan megválasztott körülmények között a hullámok teljesen kiolthatják, és maximálisan erősíthetik egymást. Az interferencia jelensége akkor lesz huzamosan megfigyelhető, ha e megfigyelés teljes időtartama alatt nem változik meg az interferáló hullámok fázisa, fáziskülönbsége. Az interferencia jelenségének méréstechnika alkalmazásához elengedhetetlen a nagy koherenciahosszú forrás alkalmazása - lézerek.



A Michelson-interferométer

Tartalmaz egy monokromatikus fényforrást. Az innen kilépő – és esetleg kitágított – hullámfront eléri az osztóelemet, melyet elhagyva a keletkező hullámok egyrészt referencia, másrészt a mozgatható tükör irányába haladnak tovább.

Ezkről reflektálódva az osztóelem túloldalán találkozva hozzák létre az interferencia jelenségét. Az egyik sugárútban található lemez az üveganyagban megtett sugárutak azonosságát hivatott biztosítani.



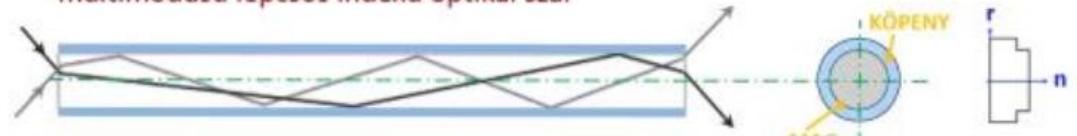
A hullámhossz tört részével történő elmozdulás (azaz kicsiny fázis-változás) is nagy pontossággal mérhető.

Passzív optikai elemek

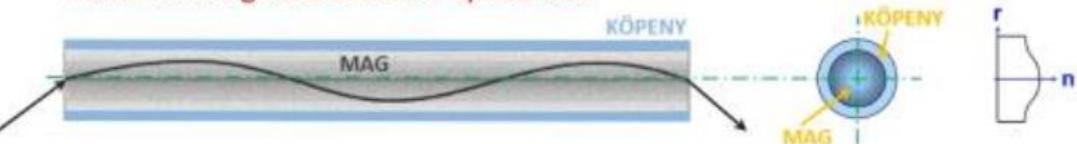
Fényvezető – száloptika - „Üvegszál”

OPTIKAI SZÁL TÍPUS

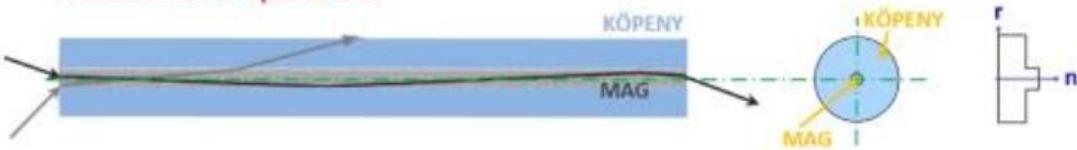
multimódusú lépcsős indexű optikai szál



multimódusú gradiens indexű optikai szál



monomódusú optikai szál



FELÉPÍTÉS TÖRÉSMUTATÓ ELOSZLÁS

Az optikai
kommunikációban

alkalmazott fény
hullámhossza $\approx 1.5 \mu\text{m}$.

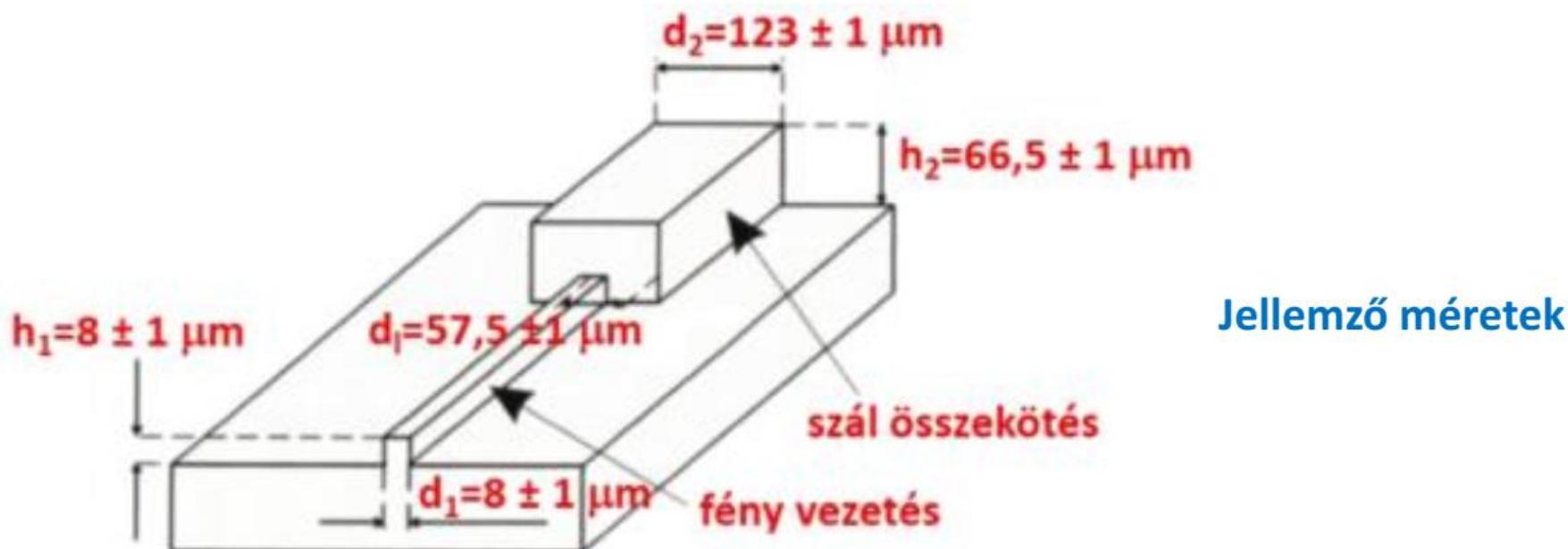
Az üvegnek itt a legkisebb
a elnyelése.

A multimódusú és a monomódusú fényvezetők

- **Multimódusú szálakban** a fény több módusban terjedhet, a fotonok a totál reflexión alapuló terjedés során **különböző úthosszakat** járnak be.
- **Monomódusú szálakban** a *kis magátmérő* (jellemző szabványos magátmérő 4,5 ill. 9 μm) miatt a fénynek gyakorlatilag **nincs lehetősége különböző úthosszakat** bejárni.

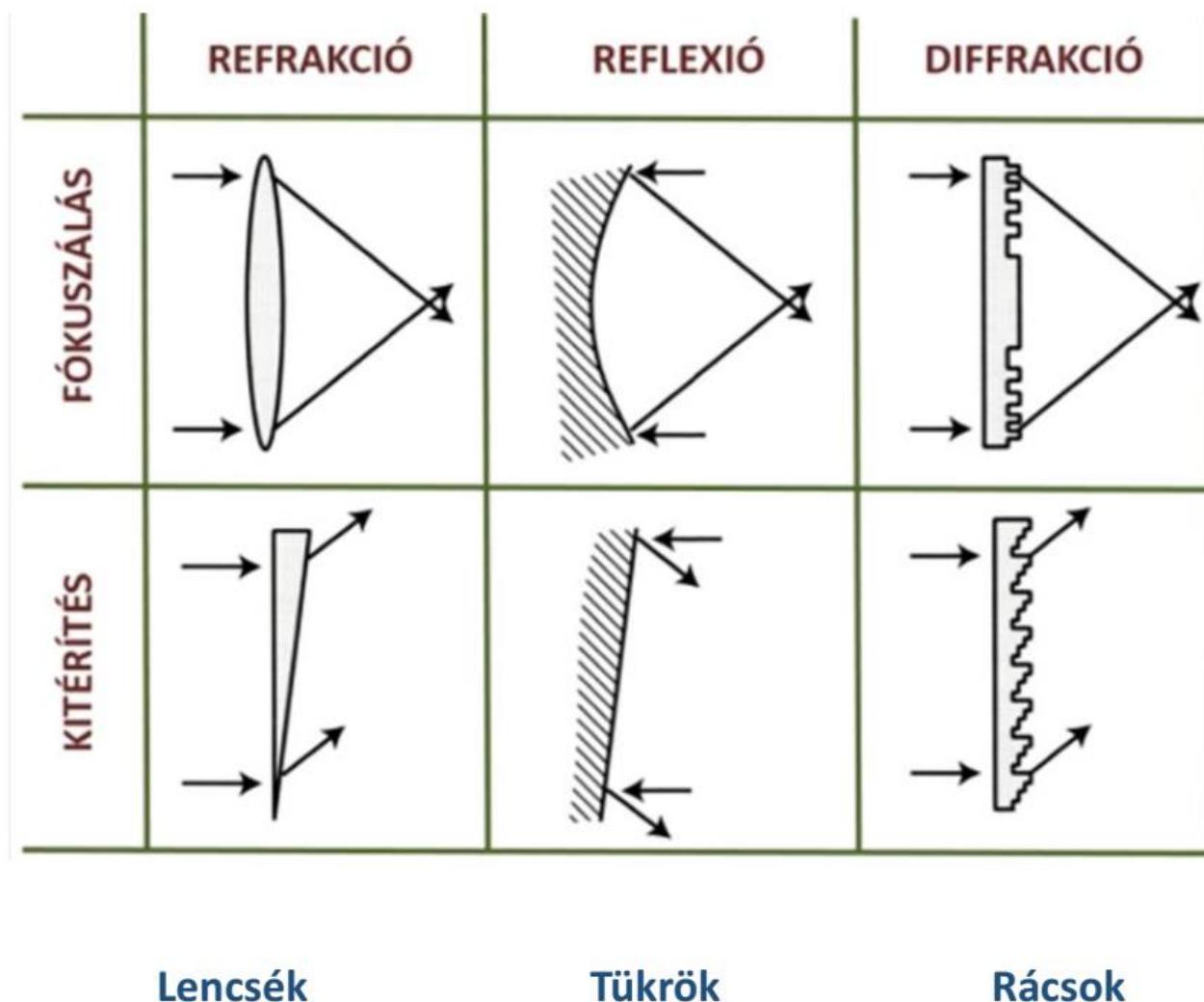
Integrált mikrooptikai fényvezetők

Az integrált mikrooptikai rendszerekben a fényvezető (és a többi járulékos elem is) technológiai okokból általában téglalap keresztmetszetű.



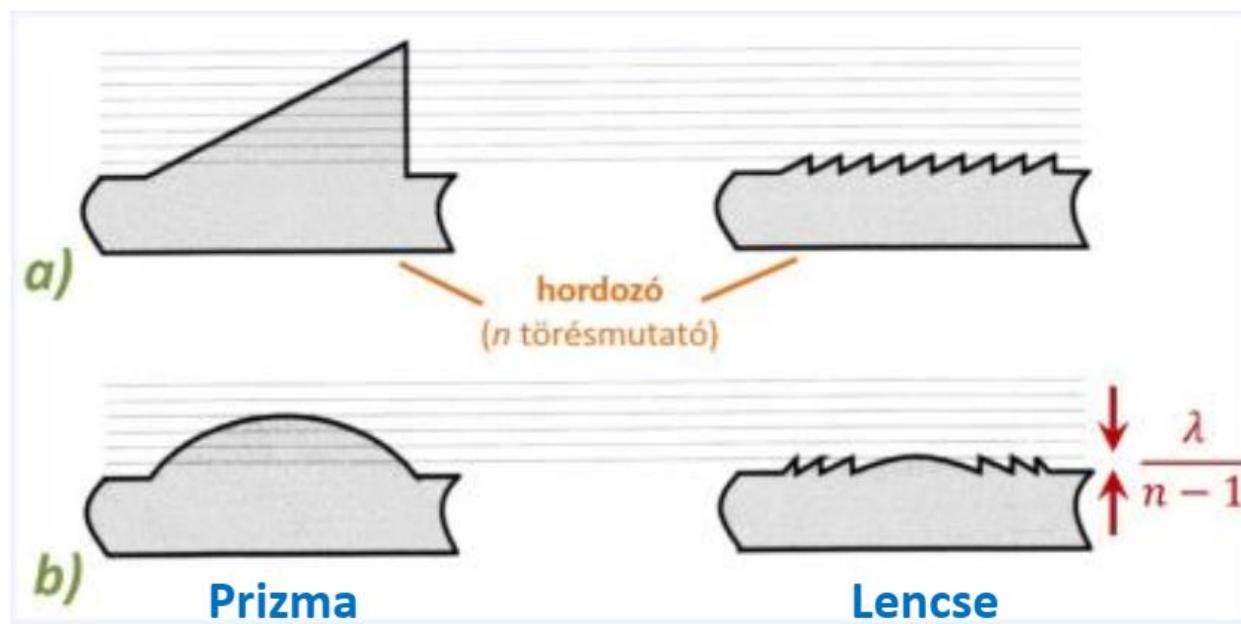
Az egyes rétegek alkotó anyagok törésmutatóit a fényvezetés követelményei határozzák meg.

A fény „kezelésére” alkalmas passzív eszközök



Fényelhajlászon alapuló (diffrakciós) mikrooptikai eszközök

- A mikrooptikában az optikai elemek méretei összemérhetők a fény hullámhosszával.
- Ha az optikai úthosszból egy teljes hullámhossznyit veszünk el, vagy adunk hozzá, a fázisszög $\phi = 2\pi$, azaz fázishiba nem lép fel.
- A hullámhosszal kvantálva alakíthatók ki a felület barázdái - diffraktív optikai elemek.
- A klasszikus optikai elemek vastagság-csökkentése a fény hullámhosszának figyelembevételével: pl. a Fresnel-lencse.



Aktív optoelektronikai eszközök

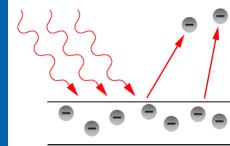
Fényérzékelő elemek

- Fotoellenállás, Fotodióda, Fototranzisztor
- Napelem
- Képfelvező – CCD, CMOS

Fényforrások – *Intenzitás, spektrális eloszlás, színhőméréséklet, nyalábeloszlás*

- Izzólámpa – lassan kimegy a divatból – a felhasznált energia 95%-a hővé alakul
- LED
- Laser

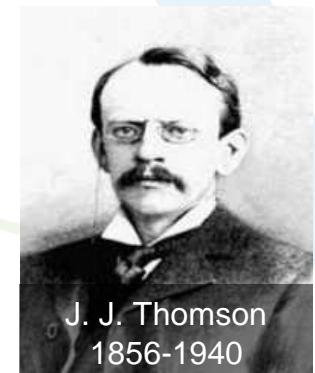
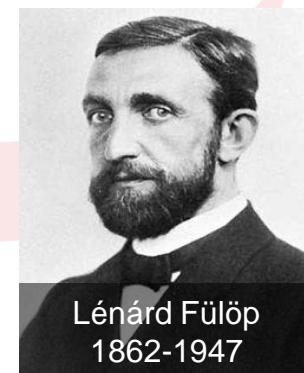
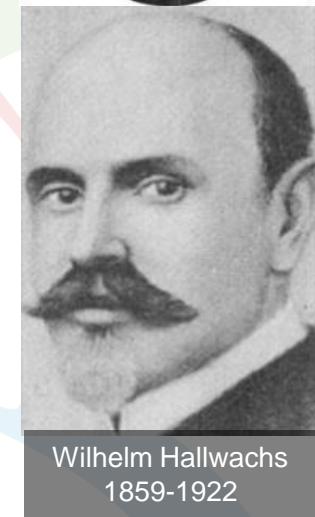
Külső fényelktromos hatás



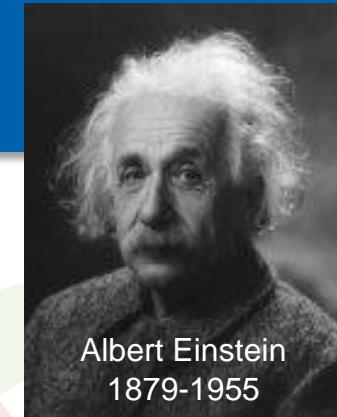
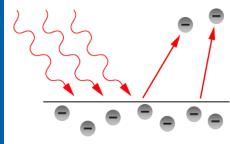
Heinrich Hertz megfigyelte, hogy elektródok között szikra keletkezését elősegíti, ha ultraibolya fénnyel világítják meg az elektródokat.

Wilhelm Hallwachs alkálfémek kvarclámpával (higanygőzlámpa) történő megvilágítása során a fémből kilépő negatív töltésű részecskéket detektált. Innen ered a fotoeffektus másik neve, a **Hallwachs-hatás**.

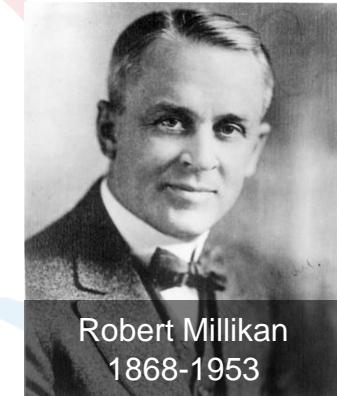
Később **J. J. Thomson** és **Lénárd Fülöp** bebizonyította, hogy ezek a részecskék elektronok. A fotoeffektus mennyiségi törvényeit - a kilépő elektronok számát és sebességét a frekvencia függvényében - Lénárd Fülöp határozta meg.



Külső fényelktromos hatás



Albert Einstein
1879-1955



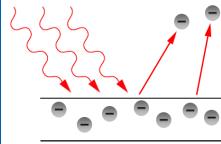
Robert Millikan
1868-1953

Albert Einstein a fotoelektromos hatás egyenletének leírásáért Nobel-díjat kapott.

A fotoeffektus energiaegyenletének bizonyítása a **Robert Millikan** amerikai fizikus által elvégzett pontos mérés, mellyel nagy pontossággal határozta meg a Planck-állandó értékét. A kapott összefüggés Einstein egyenletét adta.



Külső fényelktromos hatás



A fénysugár fotonjai a fény frekvenciájától függő nagyságú energiával rendelkeznek, $E=hf$.

A fotonkibocsátás folyamatában, ha egy elektron elnyeli egy foton energiáját és több energiája lesz, mint a kilépési munka, akkor kilökődik az anyagból.

A maradék energia lesz az immár szabad elektron mozgási energiája.

A fénysugárzás intenzitása nem a fénysugarat alkotó fotonok energiáját, csak a számát határozza meg, így a kibocsátott elektronok energiája nem függ a beérkező sugár intenzitásától.

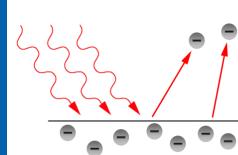
$$hf = W_{ki} + E_m = hf_0 + \frac{1}{2}mv^2$$

- Ahol: $h = 6,62607000 \cdot 10^{-34}$ Js, a Planck-állandó, f a fény frekvenciája, a W_{ki} – kilépési munka a fémre jellemző állandó.

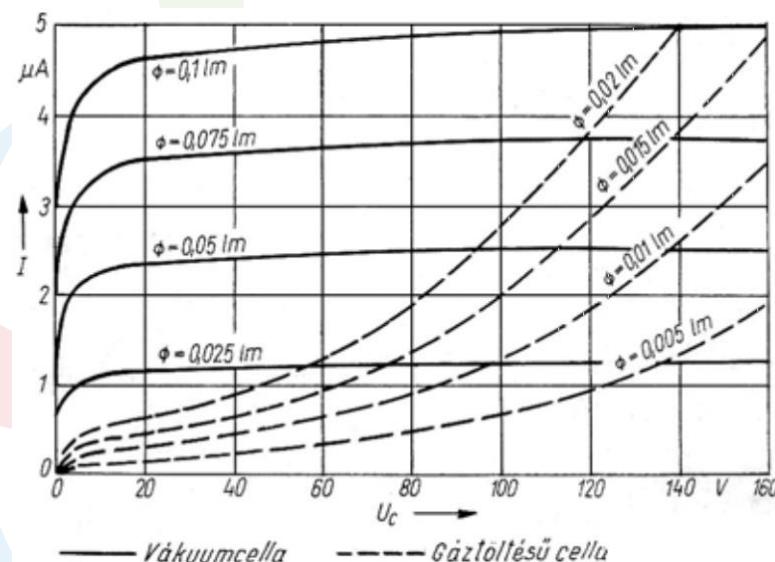
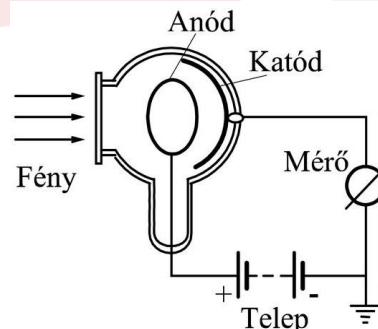
Ha a foton hf energiája kisebb, mint a W_{ki} kilépési munka, akkor nem lép ki elektron és az elnyelt energiát visszasugározza.

A kilépő elektronok száma egyenesen arányos a megvilágító fény intenzitásával (változatlan frekvencia mellett).

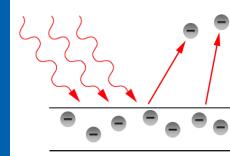
Külső fényelktromos hatáson alapuló érzékelők (Fotocella)



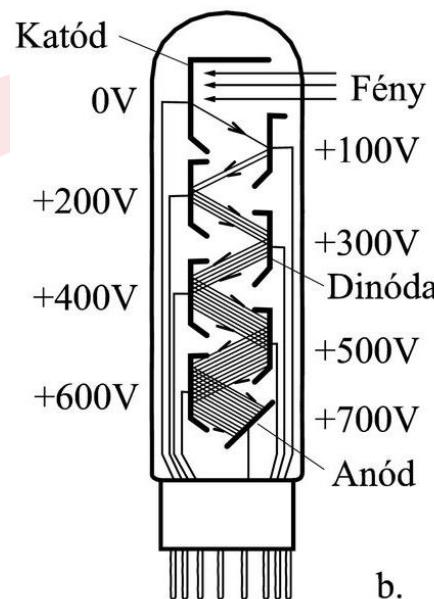
- Vákuum vagy gáztöltésű (Ar) cső
- Anódból és alkálifém tartalmú Fotokatódból áll.
- Cella-előfeszültség beállítása szükséges.
- Kilépő elektron gyorsítja az anód felé.
- Ezáltal áram jön létre, amely arányos a cella megvilágítottságával.
- Mértéke kicsi, erősíteni kell.
- Sötétáram (megvilágítatlan cella) $0,1 \mu\text{A}$.
- Spektrális érzékenység a katód anyagától függ.



Külső fényelktromos hatáson alapuló érzékelők (Fotoelektron-sokszorozó)



- Zworykin Amerikában rádióerősítésre kifejlesztett elektronosokszorozóját alapul véve,
- Bay Zoltán és Dallos György a nagyenergiájú fotonok jelzésére fejlesztették tovább.
- Vákuum photocella, amelyben szekunder elektronok kiváltása 10^6 -szoros belső erősítést hoz létre.
- A másodlagos kibocsájtáshoz $\sim 100V$ kell, így a működéshez 1-2 kV stabil előfeszítés kell.
- Kvantumhatásfok 10^6 nagyságrendű.



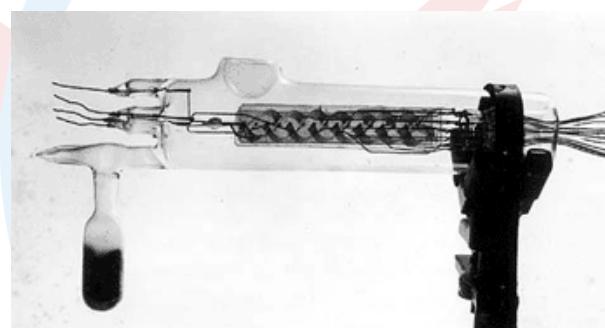
b.



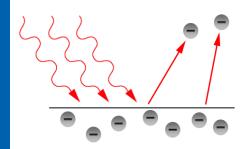
W.K. Zworykin
1888-1982



Bay Zoltán
1900-1992



Külső fényelktromos hatáson alapuló érzékelők (Fotoelektronokszorozó)



- Alkalmazása nagy érzékenységű fényérzékelőként,
- Változatos méret, hullámhossz tartomány,
- Különféle kialakítás.

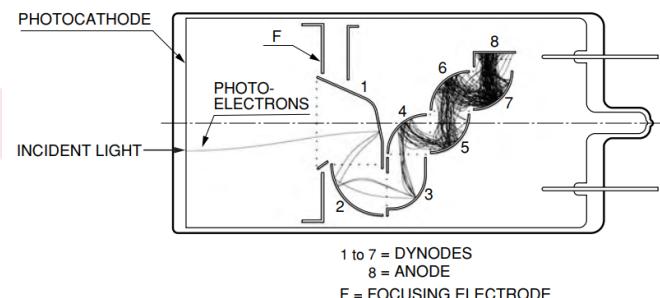


Figure 2-4: Box-and-grid type

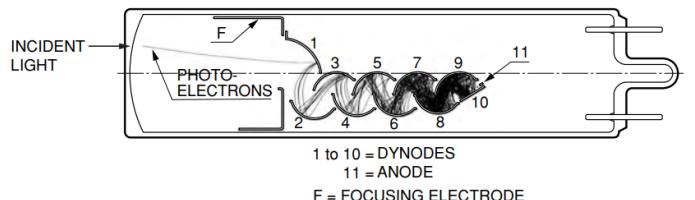


Figure 2-5: Linear-focused type

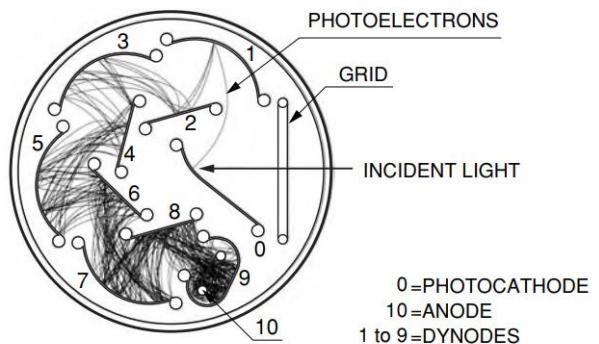


Figure 2-3: Circular-cage type

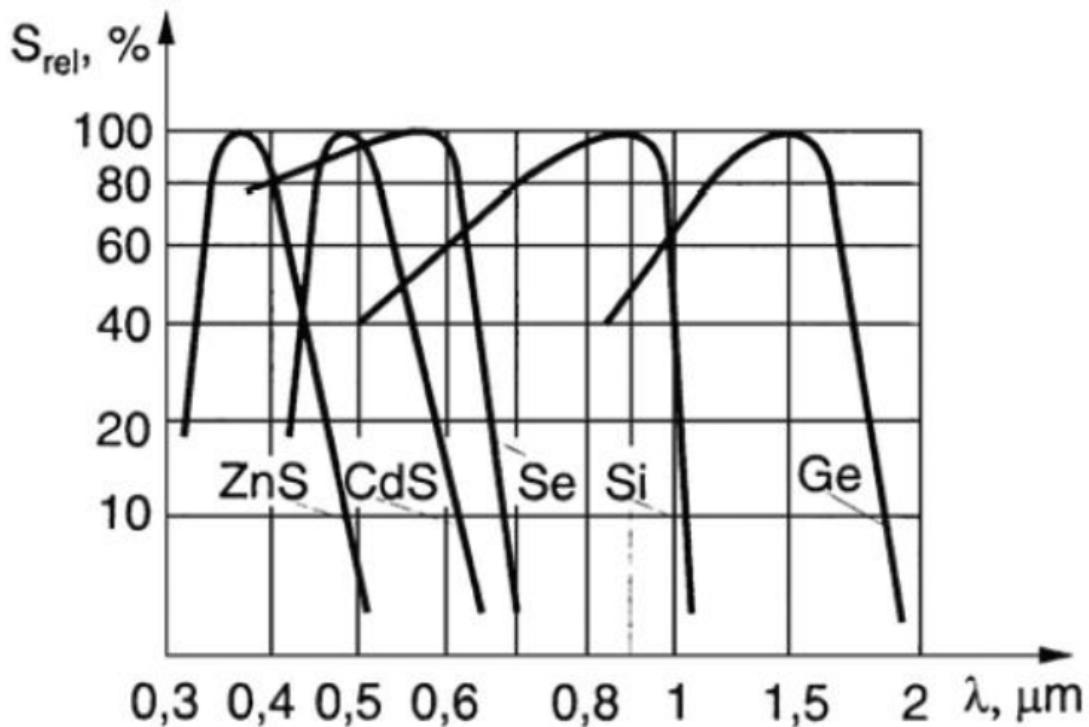
2. Érzékelési elvek, fizikai jelenségek

f. Optikai elvek – szilárdtest
detektorok

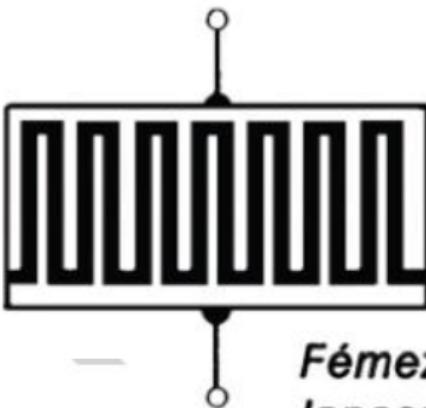
A fotoellenállás (fotokonduktív detektor)

Záróréteg nélküli félvezető anyagból álló passzív félvezető elem, amelyben sugárzás hatására nő a vezetőképesség, (ellenállása csökken):

$$\Delta \sigma = \Delta n q_e \mu_n$$



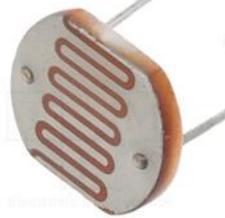
Félvezető anyag



Kapcsolási rajzjele

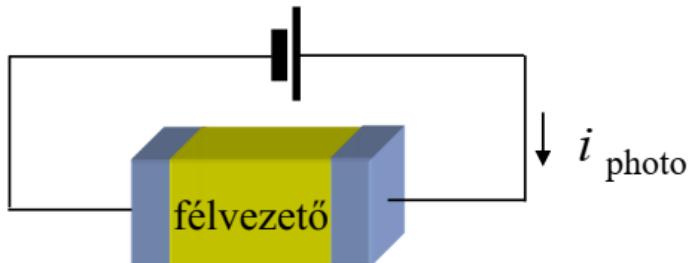
Különböző félvezető anyagok spektrális érzékenysége

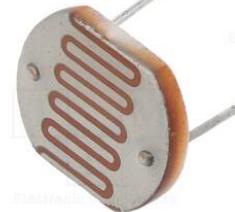
Különösen nagy a fotoelektromos jelenség hatása a kadmium-szulfid CdS, ólomszulfid PbS, ólomszelenid PbSe, szelén Se, stb. félvezetőkben.



Fotoellenállás

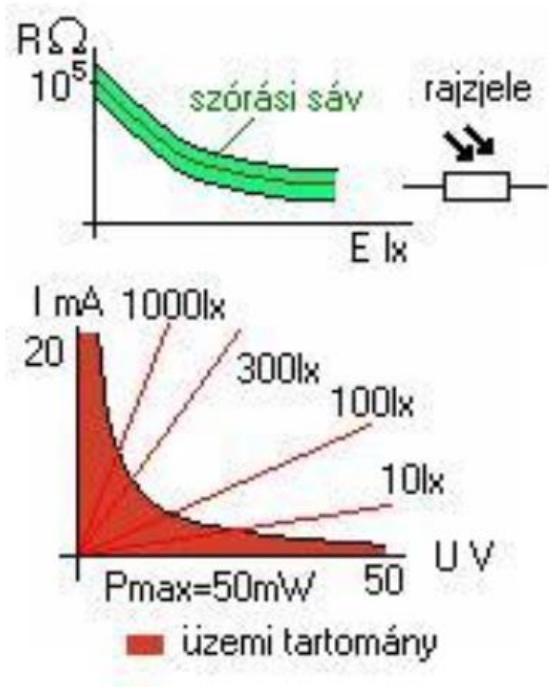
- **Kvantumhatásfok:**
 - Az egy fotonra jutó elektron-lyuk pár
 - Egynél kisebb!
- **Reflexió:**
 - $R=(n_1-n_2)^2 / (n_1+n_2)^2$
- **Behatolási mélység:**
 - A z elektronok száma e-ed részére csökken
 - 1064nm: 0.3mm
 - 900nm: 0.03mm
 - 700nm: 0.005mm
- **A fotodetektor lehet:**
 - Homogén félvezető
 - P-N átmenetes
- Homogén félvezető detektorok a vezetőképesség változását használják ki
- **Fotoellenállások**
 - Lassú működés
 - Hőmérséklet függés
 - Öregedési jelenségek





Fotoellenállás

Fénytől függő ellenállások:



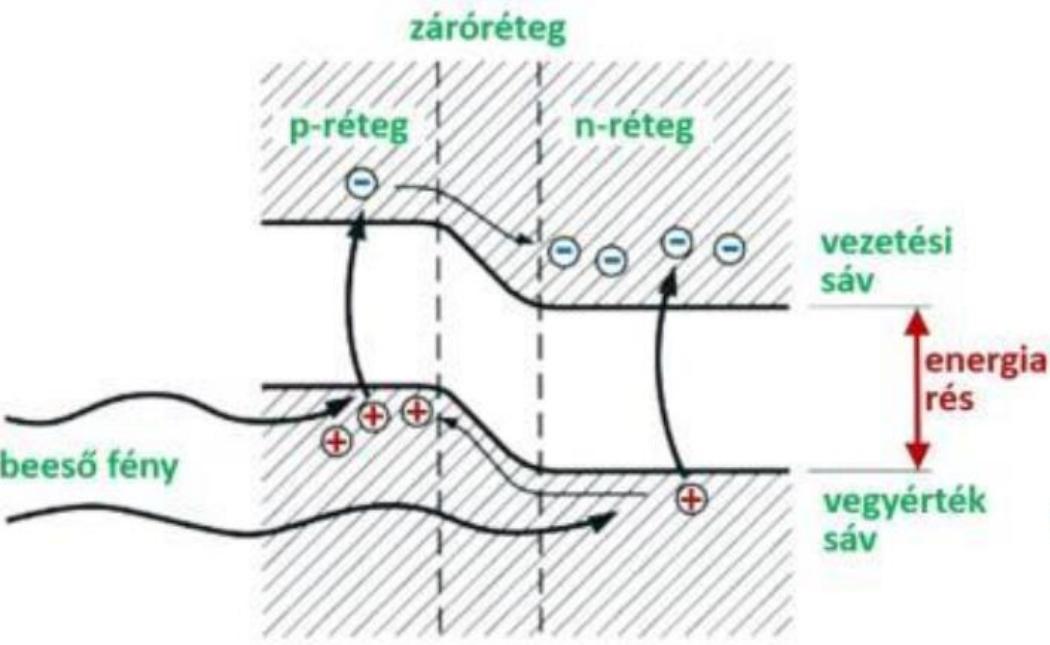
megvilágítás hatására csökken az ellenállásuk
kadmium-szulfid CdS, ólom-szulfid PbS stb.
polikristályos félvezetők

Az adott fényerősséghoz tartozó ellenállás
értéke meghatározott tartományban szór, ez az
ún. **szórási sáv**.

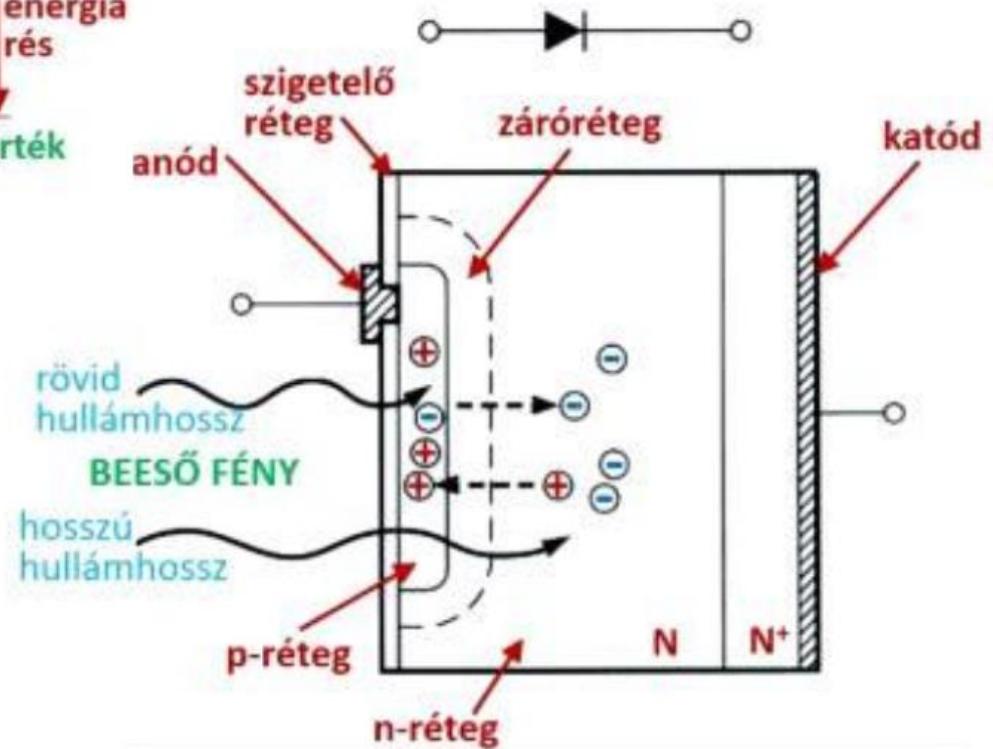
A fotoellenállás meghatározott
fényhullámhossznál éri el a legnagyobb
érzékenységet, ezt **spektrális érzékenységnek**
nevezzük.

Vannak olyan fotoellenállások, amelyek
kimondottan **speciális hullámhosszra**, azaz
színekre optimalizáltak.

Belső fotoelektromos effektus



Záro irányban előfeszített
pn átmenet.



- Kiürített réteg széles, nincsenek benne mozgóképes töltéshordozók.
- Beérkező foton mozgóképes lyuk-elektron párt generál a kiürített rétegenben.
- A kiürített rétegen fellépő potenciálkülönbség „kihúzza” (szeparálja) a mozgó töltésekét.

Fotodióda

A **fotodióda** fényérzékeny dióda. Fény hatására a zárórétegben mozgó töltéshordozó párok gerjesztődnek, a fotodióda vezetővé válik. A fotodiódák mindenkorban előfeszítve működnek.

A spektrális érzékenység – anyagfüggő

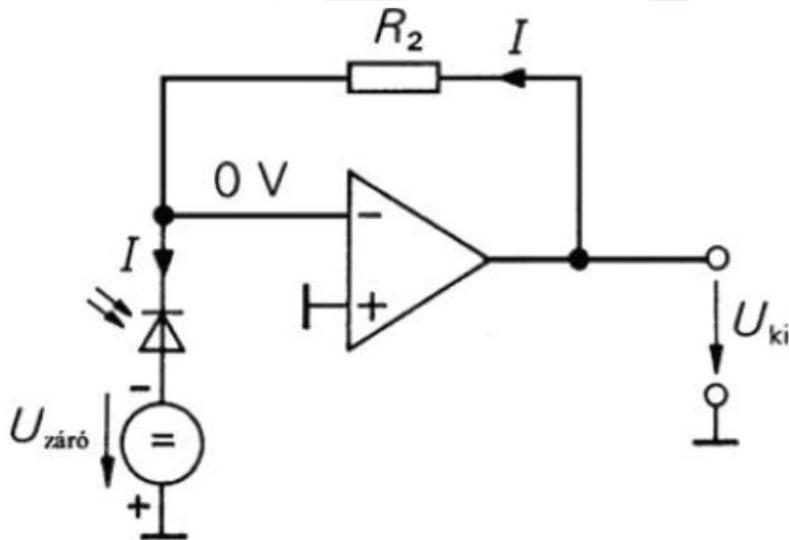
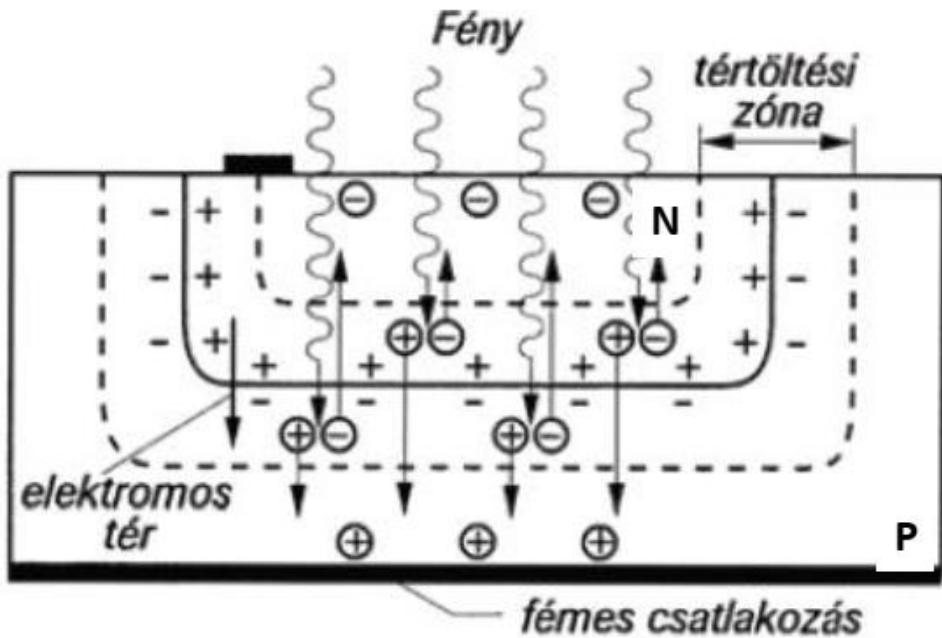
- CdS – 300 ÷ 850 nm
- Si – 190 ÷ 1100 nm
- Ge – 400 ÷ 1700 nm
- InGaAs – 800 ÷ 2600 nm
- PbS – <1000 ÷ 3500 nm
- InSb – 1000 ÷ 8000 nm

A beérkező foton lyuk-elektron párt hoz létre.

p-n-átmenet - Fotodióda

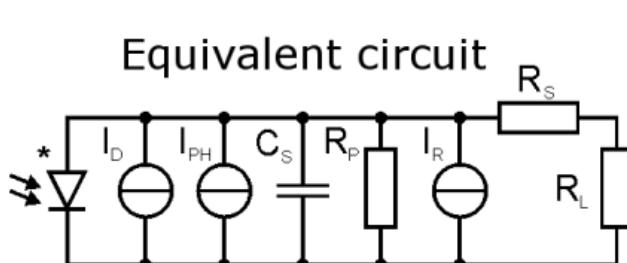
$$S = \frac{\Delta I R}{E} \left[\frac{\mu A}{lx} \right]$$

A dióda fényérzékenyége a zároáram megnövekedésének és a megvilágítás erősségenek hányadosa, jellemző értéke $0,1 \mu A/lx$



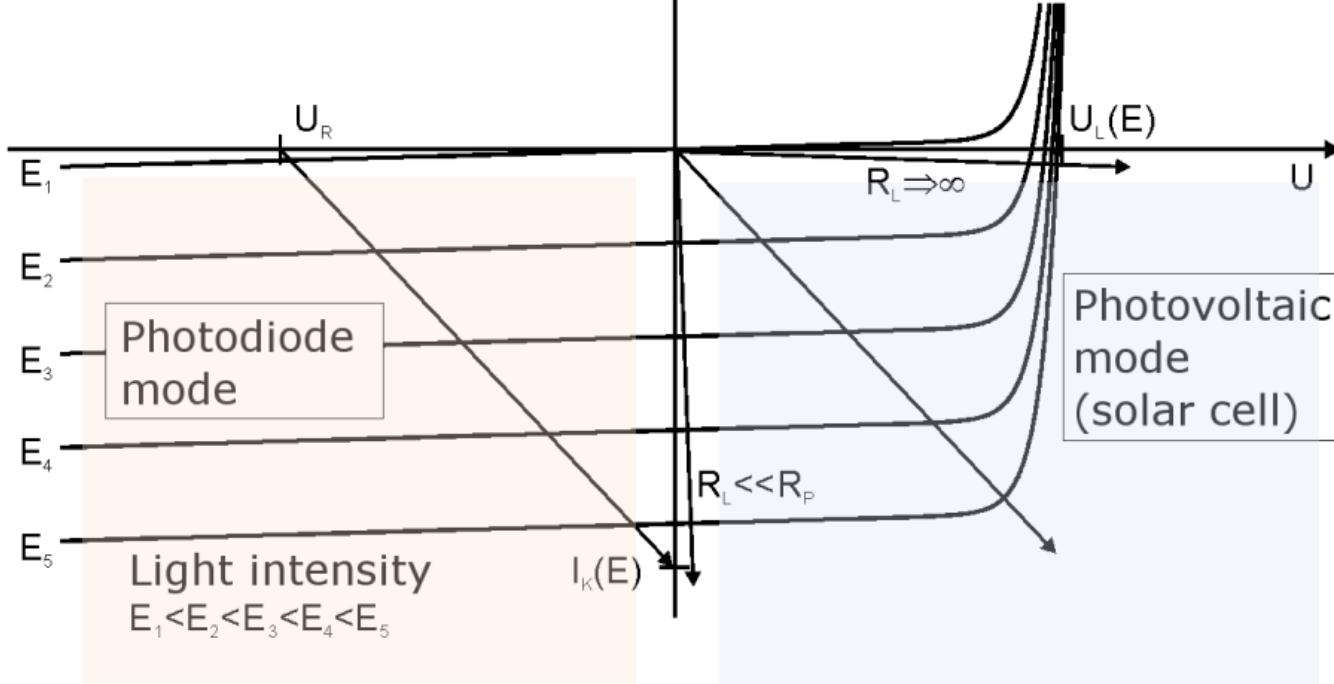
A fotodióda áramának növelése nagy sávszélességű áram-feszültség konverterrel

Fotodióda karakterisztika



*Ideal Diode

- I_D = Dark current
- I_{PH} = Photocurrent
- C_S = Diode capacitance
- R_P = Parallel resistance
- I_R = Noise current
- R_S = Series resistance
- R_L = Load resistance



Érzékelő üzemmód

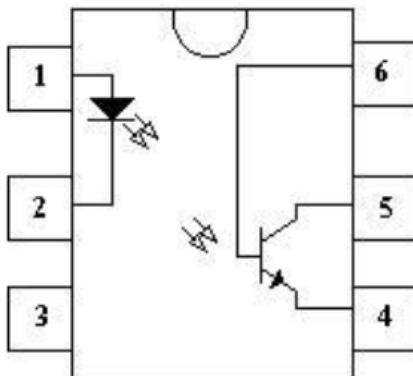
Napelem üzemmód

A fototranzisztorok

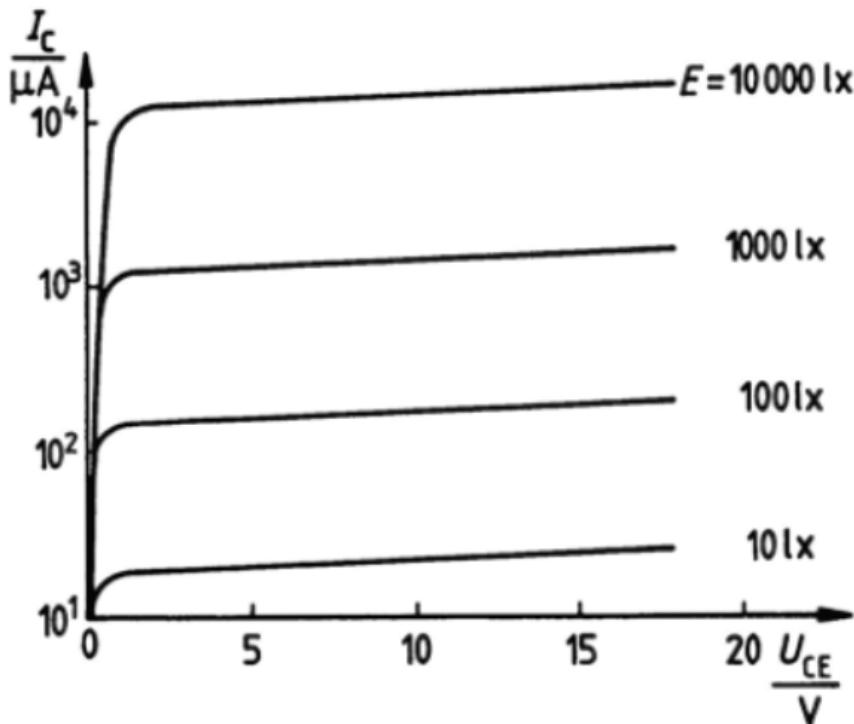
- A fény érzékelésére alkalmas tranzisztorok, pnp vagy npn szerkezetek,
- A belső fotoelektromos hatás a fotodiódáknál megismert elven alapul.
- A fénysugár a fotodiódaként működő emitter-bázis átmenetet éri, amelyen keresztül ennek hatására fotoáram indul.
- Ezt a fotoáramot mint bázisáramot erősíti fel a tranzisztor, a kollektoráramot tehát felerősített fotoáram képezi.

A fototranzisztor

A fotogerjesztett bázisáram modulálja a kollektoráramot



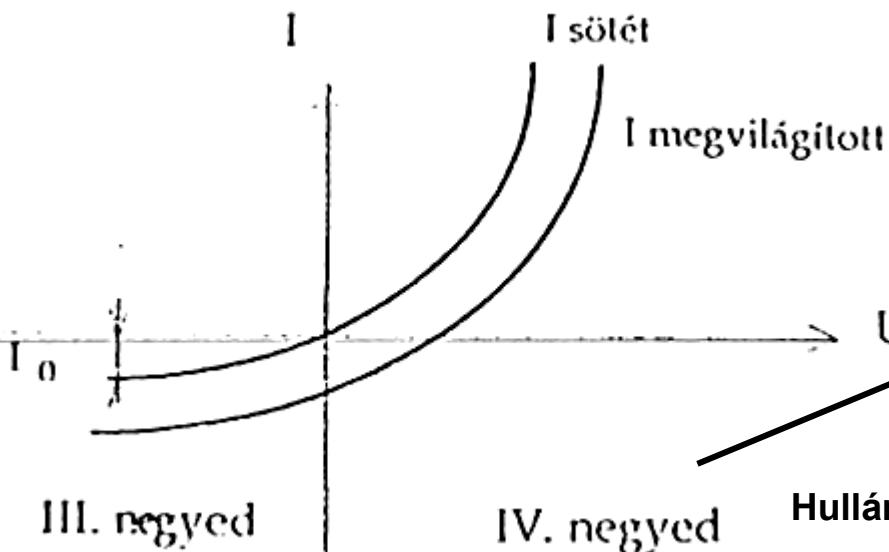
4N25, CNY17, stb.



A bázis-kivezetés tesztelésre ill. munkapont-beállításra használható

Optocsatolókban erősítőelemként
Használják.

Fotovoltaikus detektorok



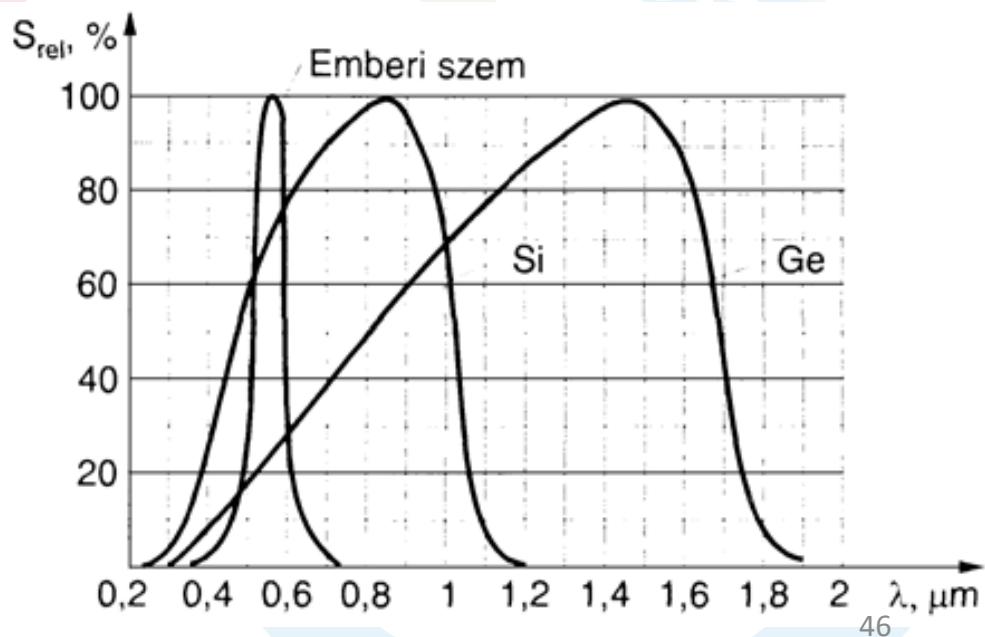
Rövidzárban (IV. síknegyed):

Fényelem (napelem)

Hullámhossz függő, spektrális érzékenység

Záróirányban előfeszítve (III. síknegyed):

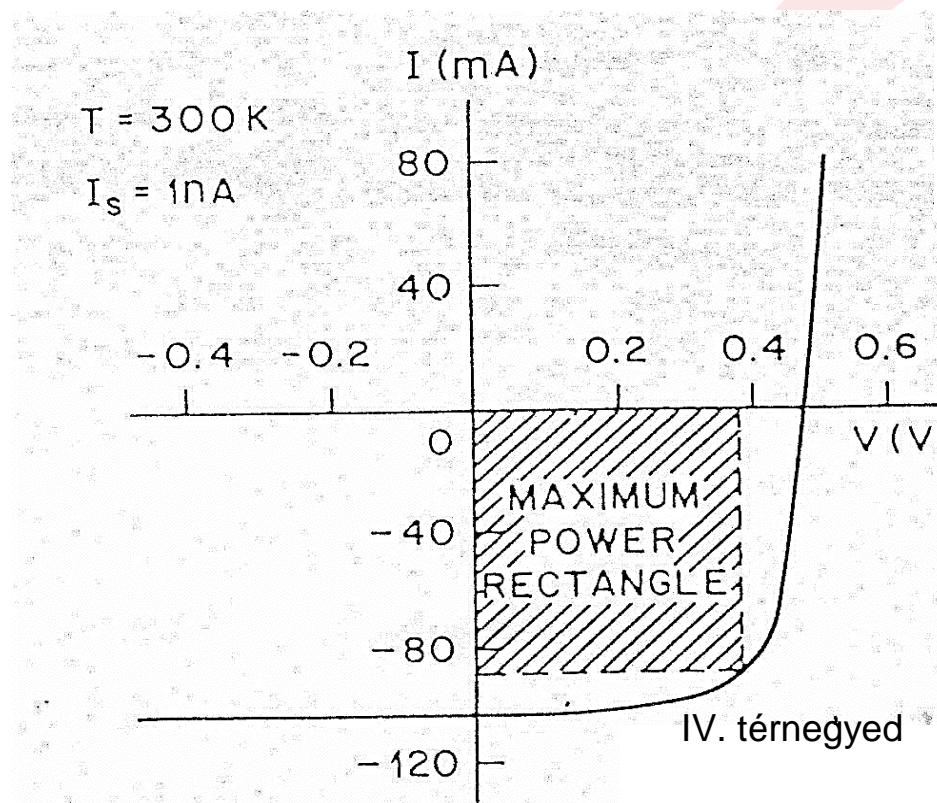
Fotodióda



IV. térnegyed: teljesítmény kinyerési lehetőség

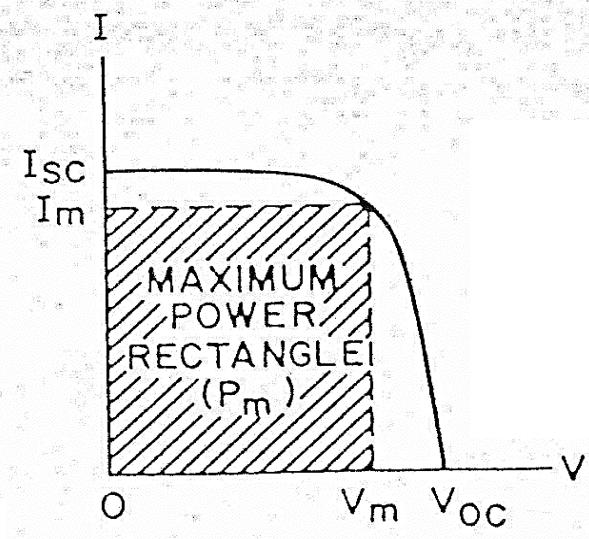
V_{OC} = üresjárási feszültség

I_{SC} = rövidzárási áram

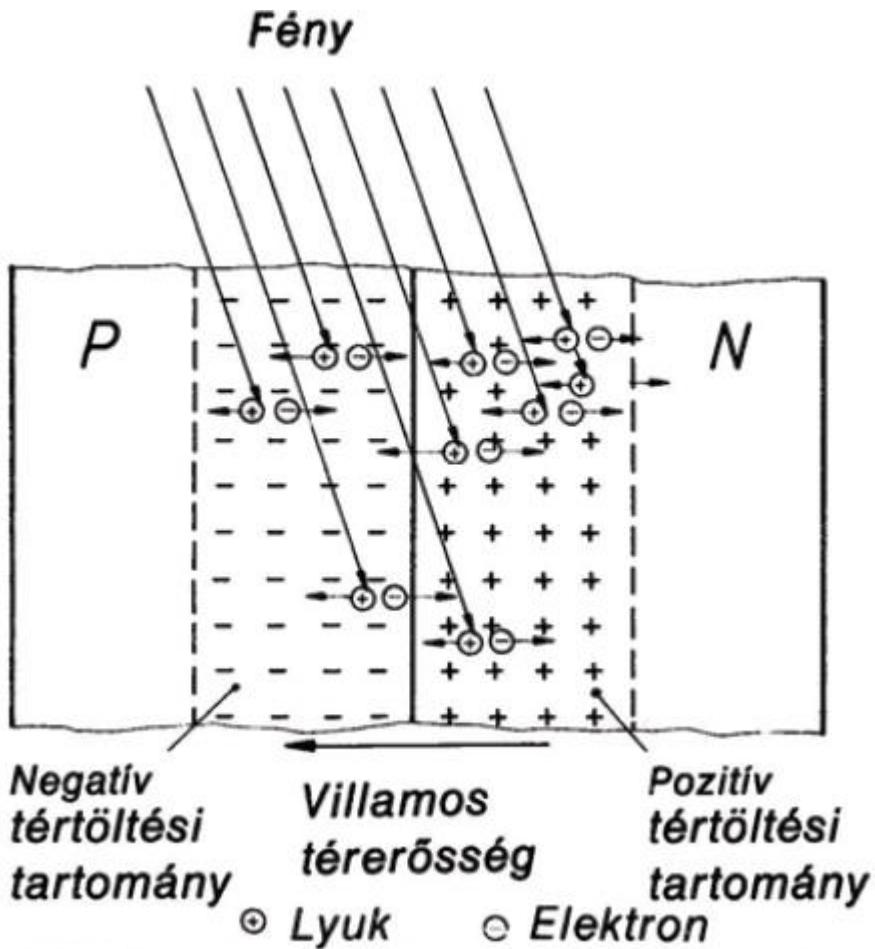


Maximális kinyerhető teljesítmény:

$$P_m = I_m \cdot V_m$$

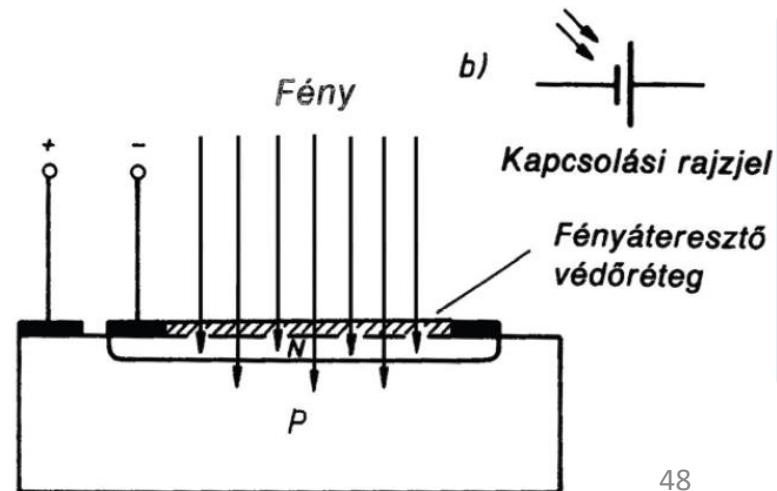


Fényelem



Leggyakrabban **planáris technológiával Si-ból, és GaAs-ból** készült fényelemeket használnak.

- Ha két sarkát kis ellenálláson ($R \rightarrow 0$) át összekötjük, a besugárzással (megvilágítással) arányos áram folyik.
- Fényelemeket alkalmaznak fényképezési megvilágítás-mérőkben, fénysűrűségmérőkben, mozaikérzékelők elemeiként (multichannel element).



Napelemek

- félvezető p-n átmenet, a fotodiódához hasonló
- fotovoltaikus kifejezésből PV elemnek is nevezzük,
- szilárdtest eszköz, amely az elektromágneses sugárzást (fotonbefogással) közvetlenül villamos energiává alakítja.



Kristályos napelemek:

Egykristályos Si : drága, de jó hatásfokúak, ipari - 18% körül, kísérleti - 31% (az elméleti határ 33,7%). Legnagyobb teljesítményét merőlegesen beeső napfénynél képes leadni.

Polikristályos Si: kicsit olcsóbbak, de hatásfokuk 15% körüli, a gyengébb (reggeli, esti, szórt) fényt is viszonylag jó hatásfokkal képes hasznosítani.

Gallium-arzenid: eddig főleg műholdakon használták, és egyetlen rétegben alkalmazva nem gazdaságosak, de akár 8 db réteget (p-n átmenetet) is építhetnek egymásra. Így a hatásfok eléri a 46%-ot is **koncentrált napfényben (koncentrátorral)**.

Amorf Si : olcsóbb, de hatásfoka 5-8%, az aktív réteg csak 1 µm vastag.

Mikrokristályos Si : mikroszerkezet, több pn átmenet egymás alatt – *a fotonok behatolási mélysége hullámhossz függő!!!*

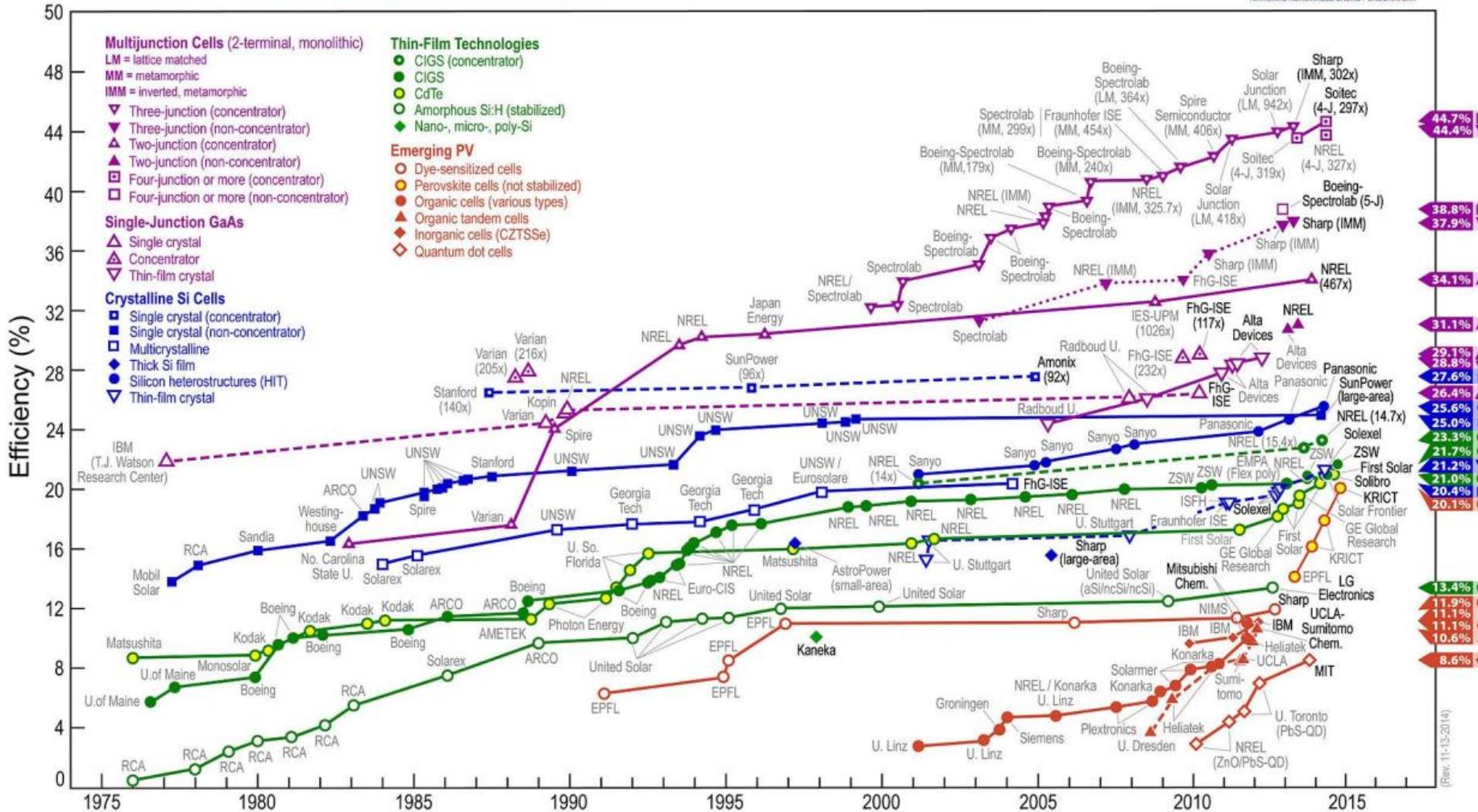
Vegyület-félvezető napelemek: A hatásfokuk jelenleg kb. 15% - kadmium-tellurid (CdTe), réz-indium-gallium-szelenid (CIGS), az aktív réteg csak 1-2 µm vastag.

Szerves festék alapú napelemek: Elektrokémia elven működnek, a fényelnyelő anyag egy szerves festék. A hatásfoka csak 2-4%, azonban a gyártása rendkívül olcsóvá válhat a jövőben. Flexibilis, ruházati alkalmazásokhoz is.

Szerves anyagokból (**polimerekből**) készült napelemek: olcsók, de hatásfokuk csak 2-5%

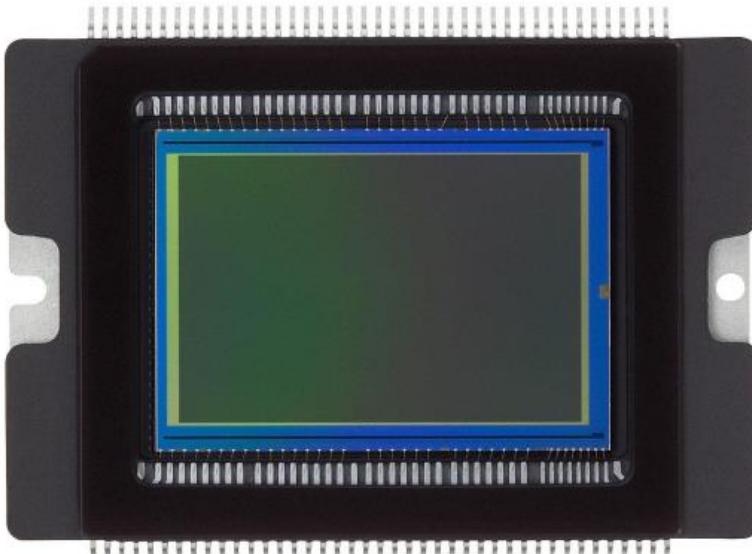
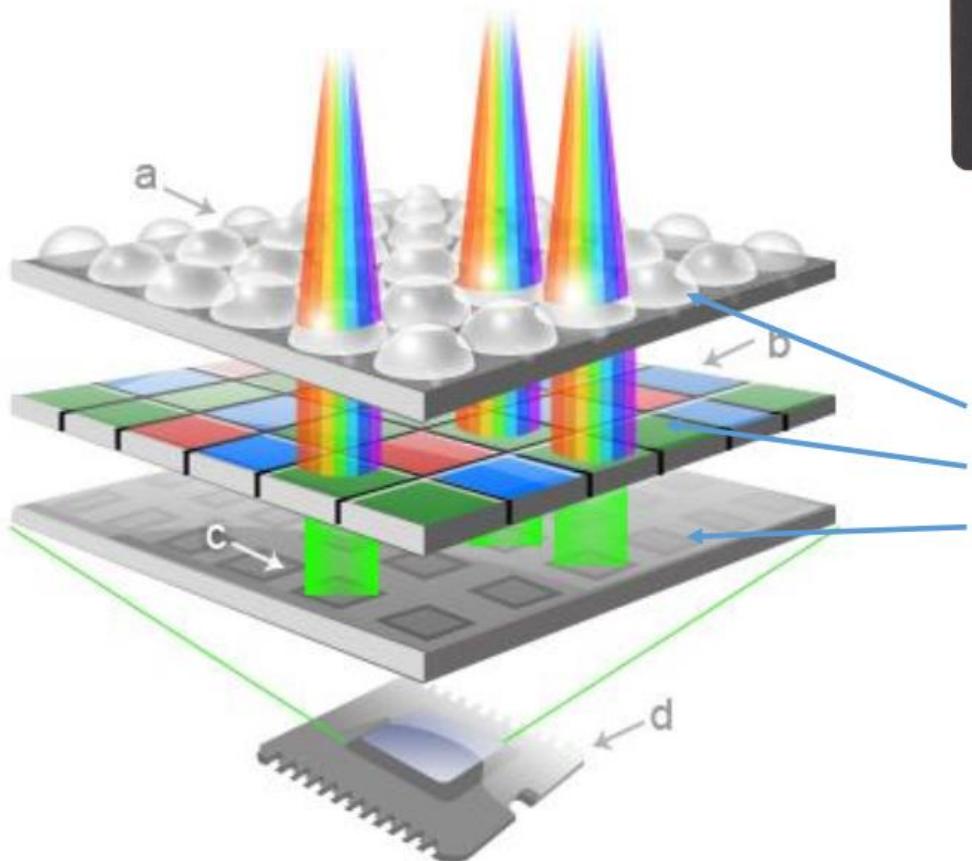
Szerves-szervetlen perovszkit alapú napelemek kísérleti teljesítménye elért 20%-ot, nagyon gyors fejlődéssel, alacsony gyártási költséget ígérve.

Best Research-Cell Efficiencies



Képfelvező eszközök

Sok pixel mátrix elrendezésben, minden egyik például egy különálló fotodióda.



Képfelvező chip közelről

- Lencse minden pixelhez
- Színszűrő
- Egyedi fényérzékelő elem (MOS, CCD)

CCD detektor - Charge Coupled Device

Töltés csatolt eszköz

Nagy érzékenység

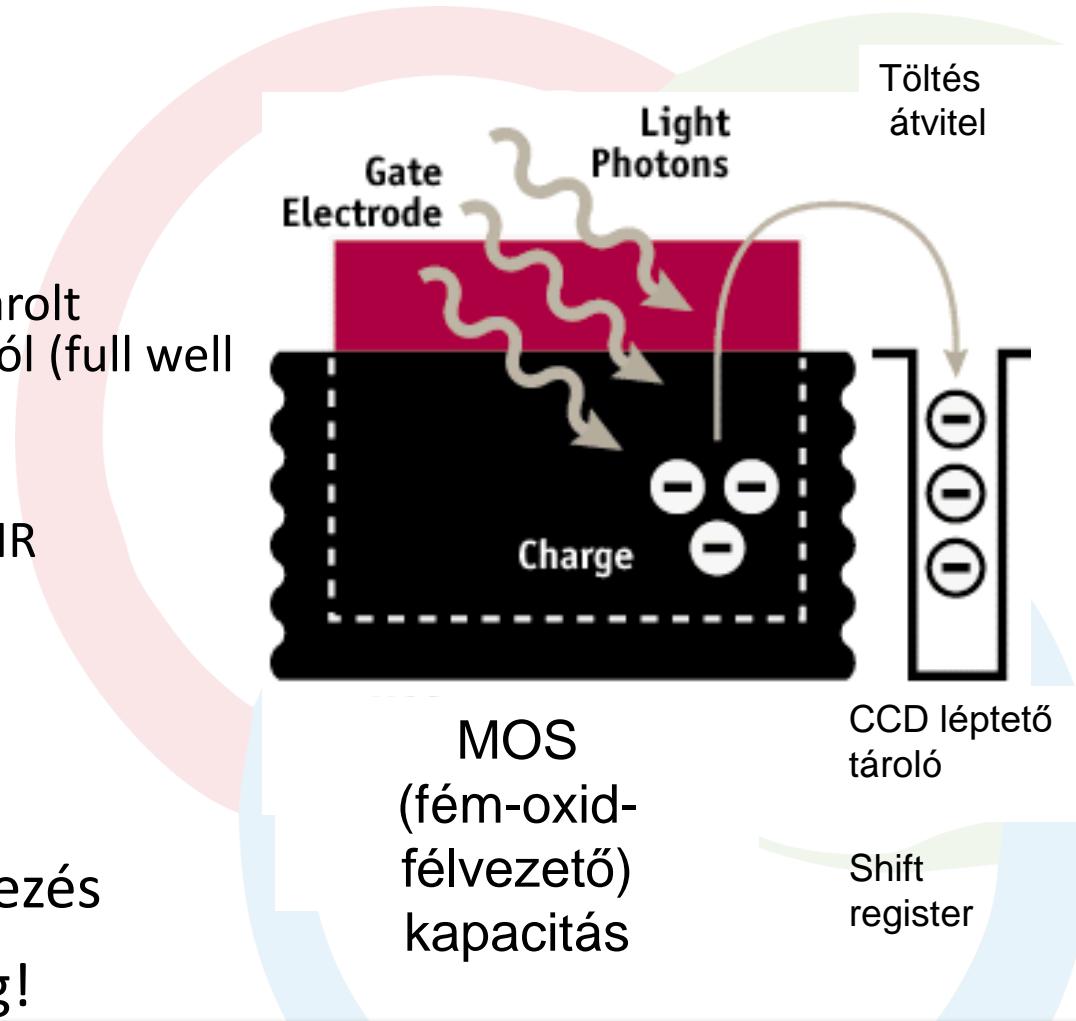
- A dinamika-tartomány a tárolt töltések maximális számától (full well capacity) függ
- Időben integrálható
- Max. érzékenység a közeli IR tartományban

Nagy stabilitás, linearitás

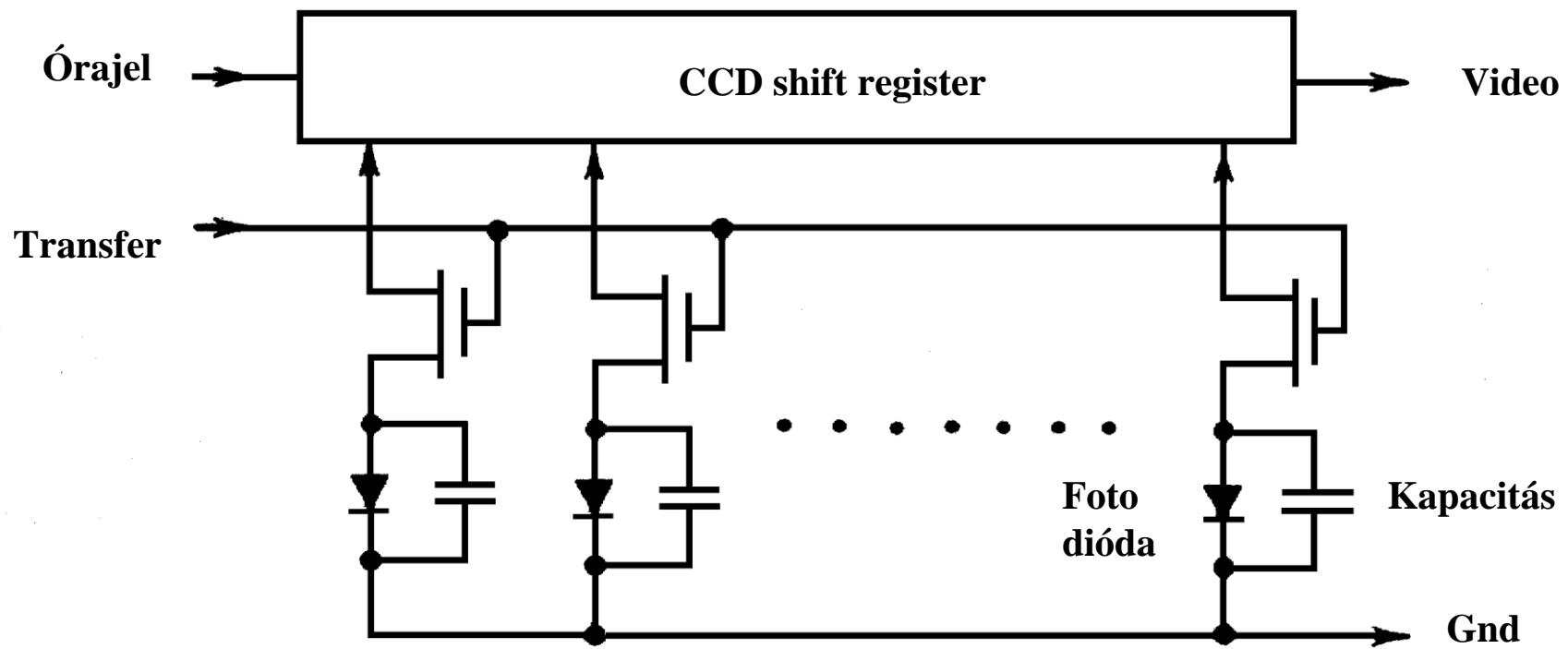
Széles méretválaszték

Vonal vagy mátrix elrendezés

Hőmérséklet érzékenység!



CCD vonaldetektor felépítése



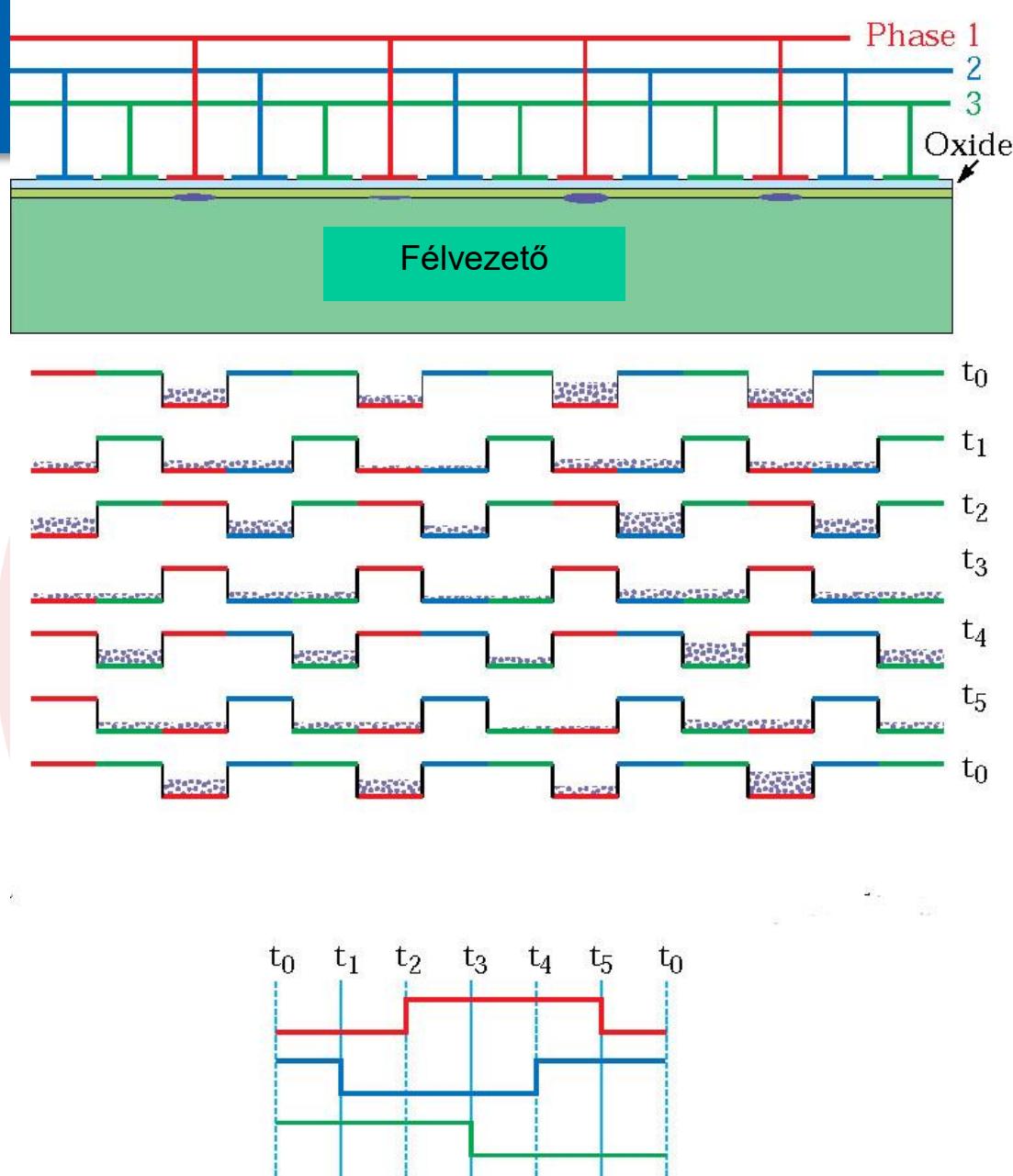
Töltésmozgatás

Az integrálási idő alatt kelet-
kező elektronok összegyűlnek
a „potenciálgödörben”

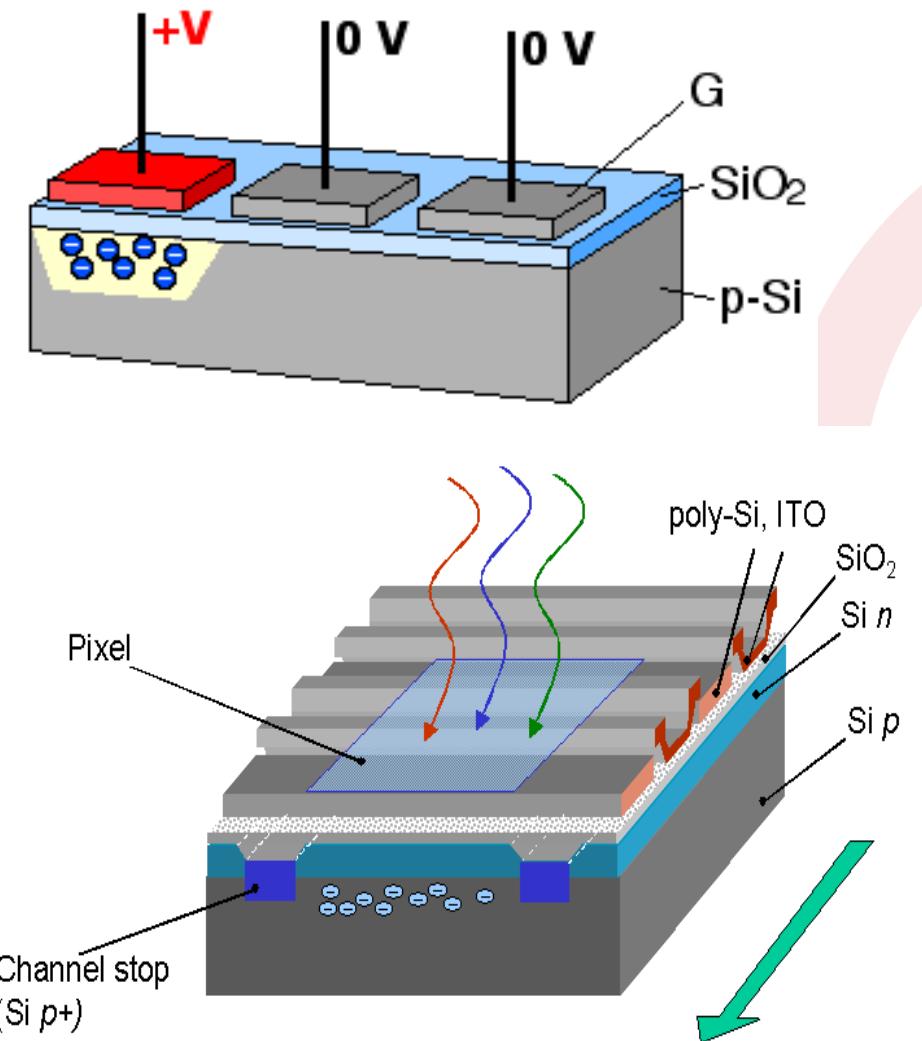
A kiolvasás alatt az elektródák
„mozgatják” a potenciálgödröt

A kiolvasási hatásfok 99.999%!

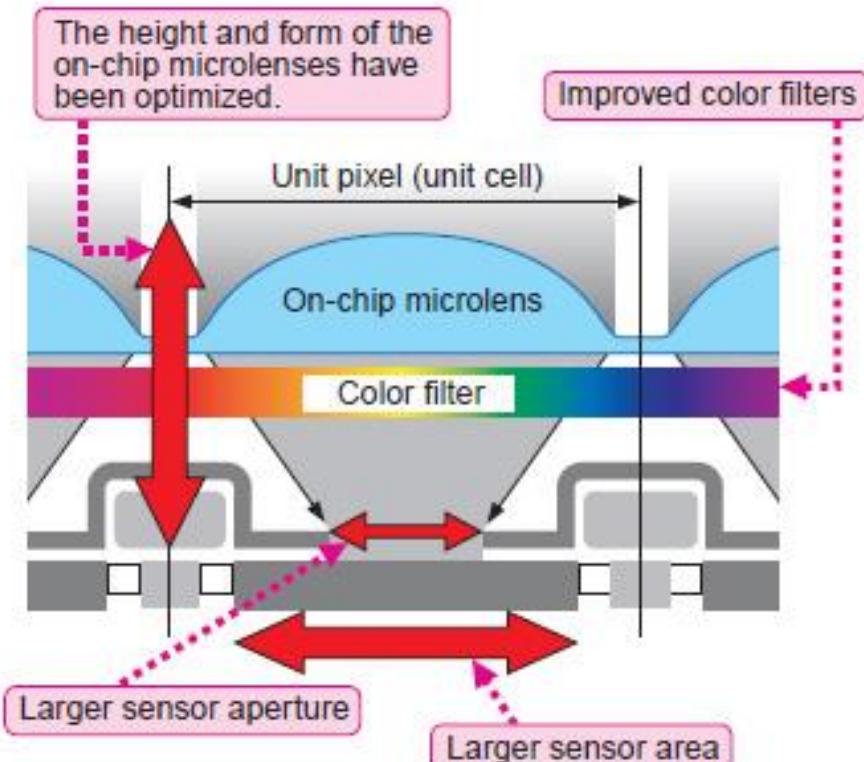
Összetett órajel-időzítés



Töltéscsatolt eszköz (CCD - charge-coupled device)



**MOS kondenzátorok, feszültséggel
léptethető a töltések áttöltése**



Super HAD CCD II



CCD kamerák jellemzői

Vonal vagy mátrix elrendezés

Detektor geometria

- Pixelszám (512*512, 640*480, 4k*4k)
- Pixelméret (7.4*7.4 μ m, 12*14 μ m, 24*24 μ m)
- Kitöltési tényező

Detektor érzékenység

- Kvantum hatásfok
- Full-well capacity (túlcordulás)
- Dinamika tartomány
- Sötétáram
- Spektrális érzékenység

Kiolvasási mód

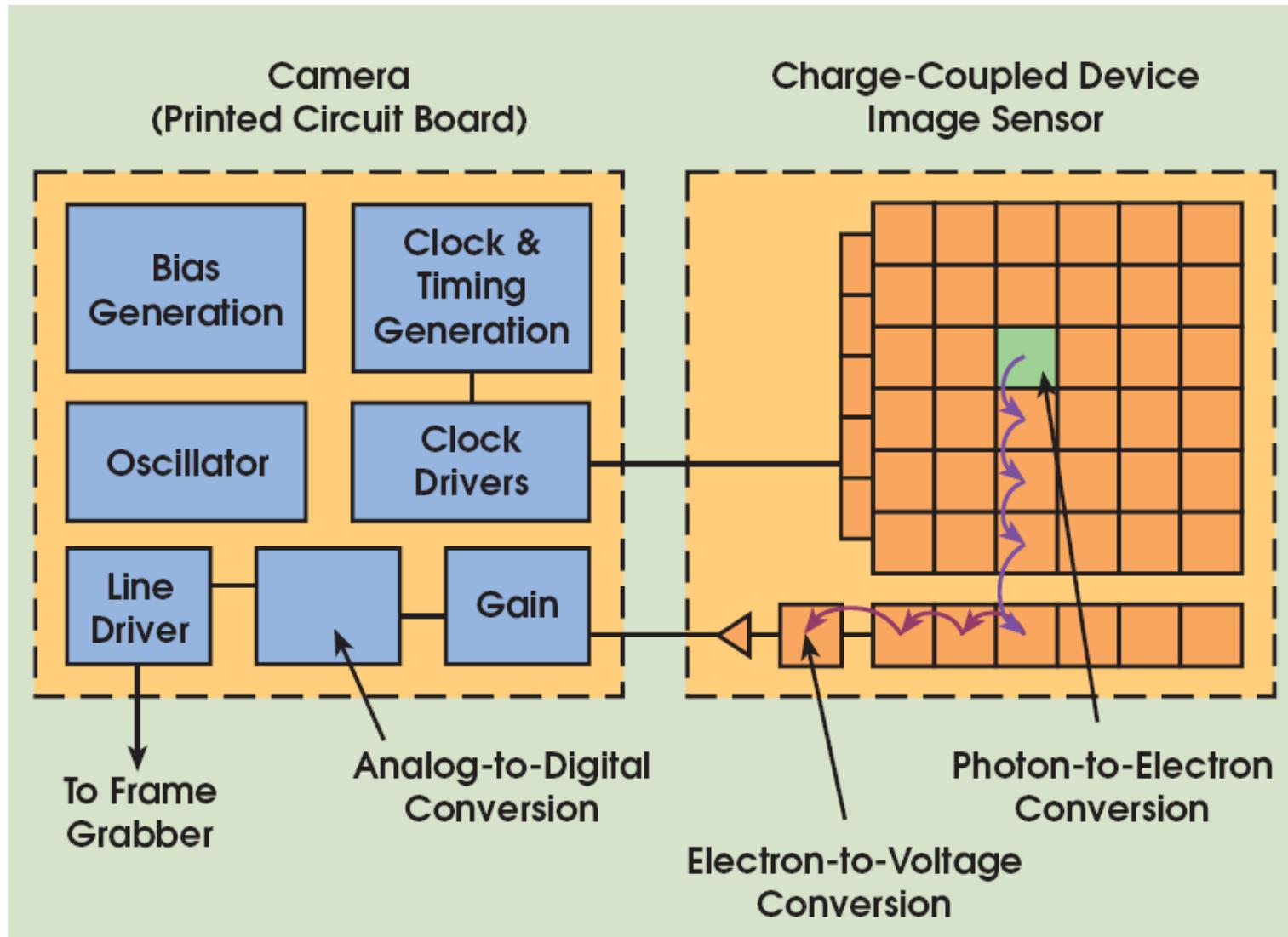
- A töltések soronkénti átvitele a kiolvasó sorba, majd egyenként
- Fényzárás a kiolvasás alatt
- Full frame transfer CCD (mechanikai fényzárás)
- Frame transfer CCD, kettős CCD chip
- Interline transfer (interlaceed vagy progressive scanned)

Kamera interface

- Analóg
- Digitális
- AD konverzió (8,10,12,16 bit)



CCD kamera struktúra (full frame transfer)



CMOS (komplementer MOS) kamerák

Integrált struktúra

Egyszerűbb meghajtó áramkörök a kamerában

Egyedileg címezhető pixelek

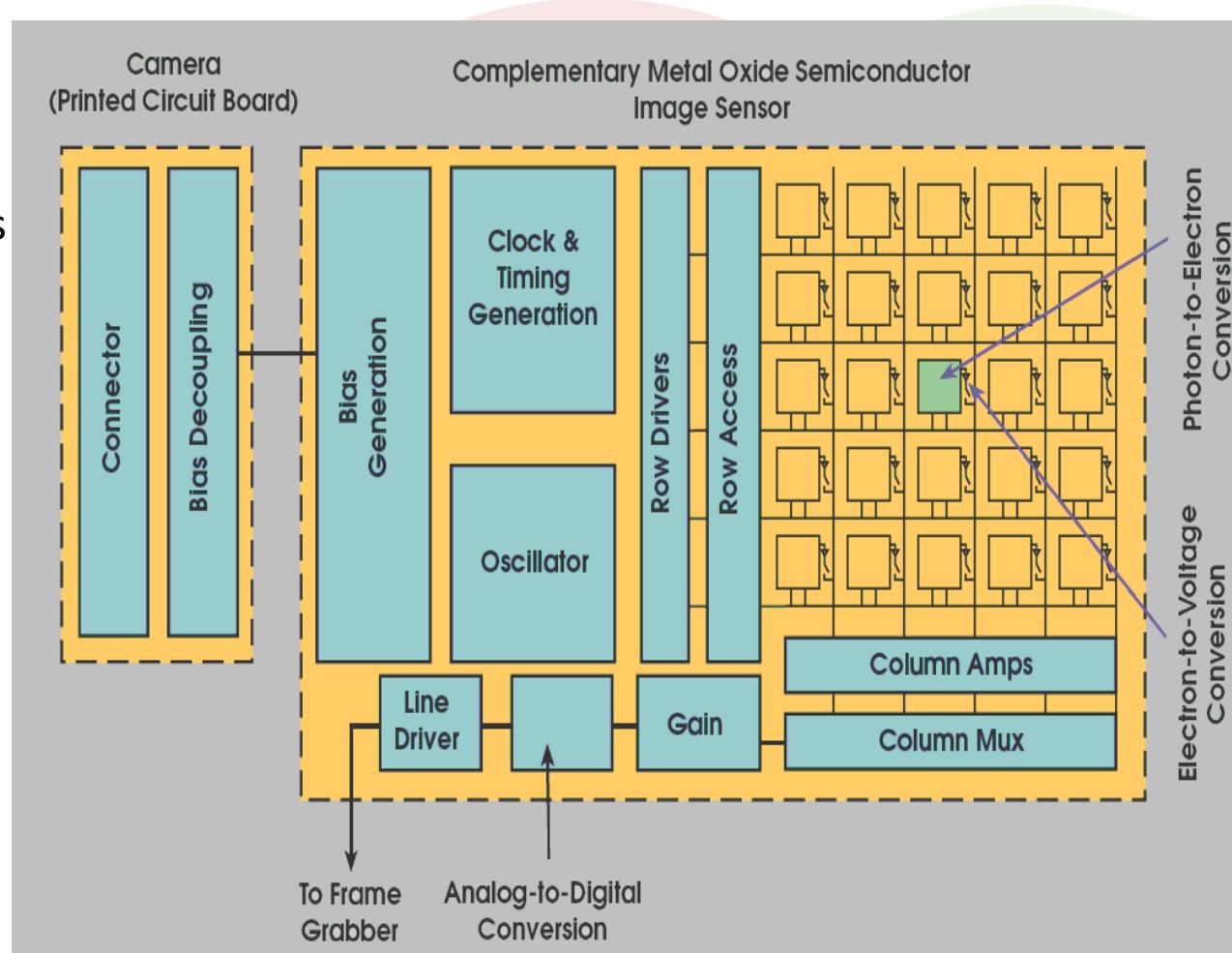
Elektron-feszültség átalakítás a pixeleknél

Előnyök

- Egyszerűbb kamera felépítés
- Hibatűrőbb szerkezet
- **Címezhető pixelek**

Hátrányok

- Nagyobb zaj
- Kisebb dinamika tartomány
- Rosszabb kitöltési tényező



Színes CCD kamera

Három chipes kamerák

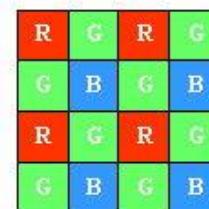
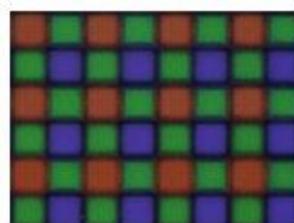
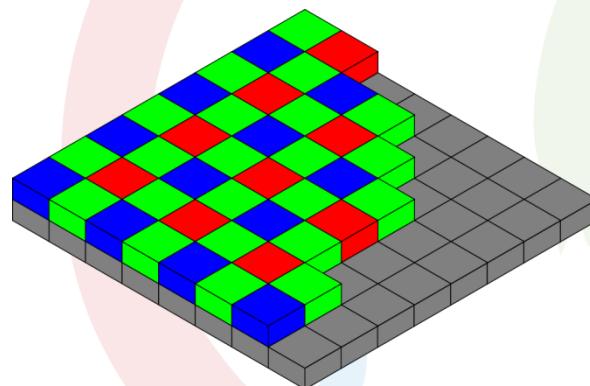
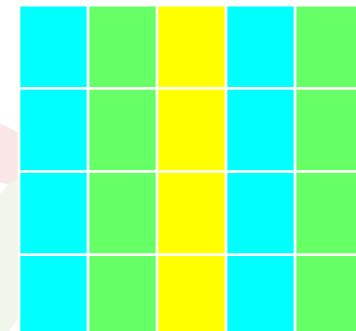
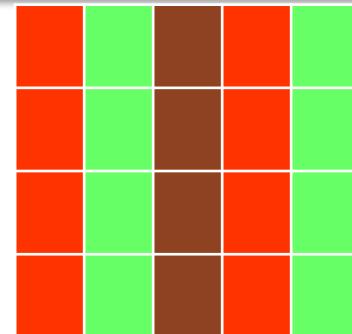
Egy chipes detektorok

- Diffúziós mélység (a hosszabb hullámok mélyebbre hatolnak)
- Színszűrők

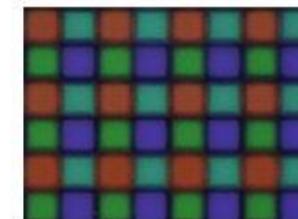
Szűrőcsíkok

- RGB szűrők
- C G Y szűrők

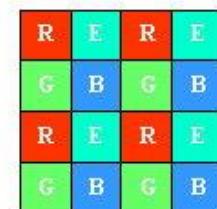
Mozaik szűrők



3 színszűrős



4 színszűrős



A különböző képátalakító elemek összehasonlítása

	PMT Fotoelektron-sokszorozó	Film	CCD Töltéscsatolt eszköz	CMOS Komplementer fém-szigetelő-félvezető eszköz
Dynamic Range	>1000	<100	>10,000	>5,000
Detection Speed	fastest	slow	slow	fast
Quantum Efficiency	5-20%	5-20%	25-95%	15-35%
Multi-channel	no	yes	yes	yes
Real-time	yes	no	yes	yes
Spectral Sensitivity	300-900nm	200-1300nm	300-1100	400-1100
Dark Signal	good	poor	best	best
Read Noise	good	good	best	best

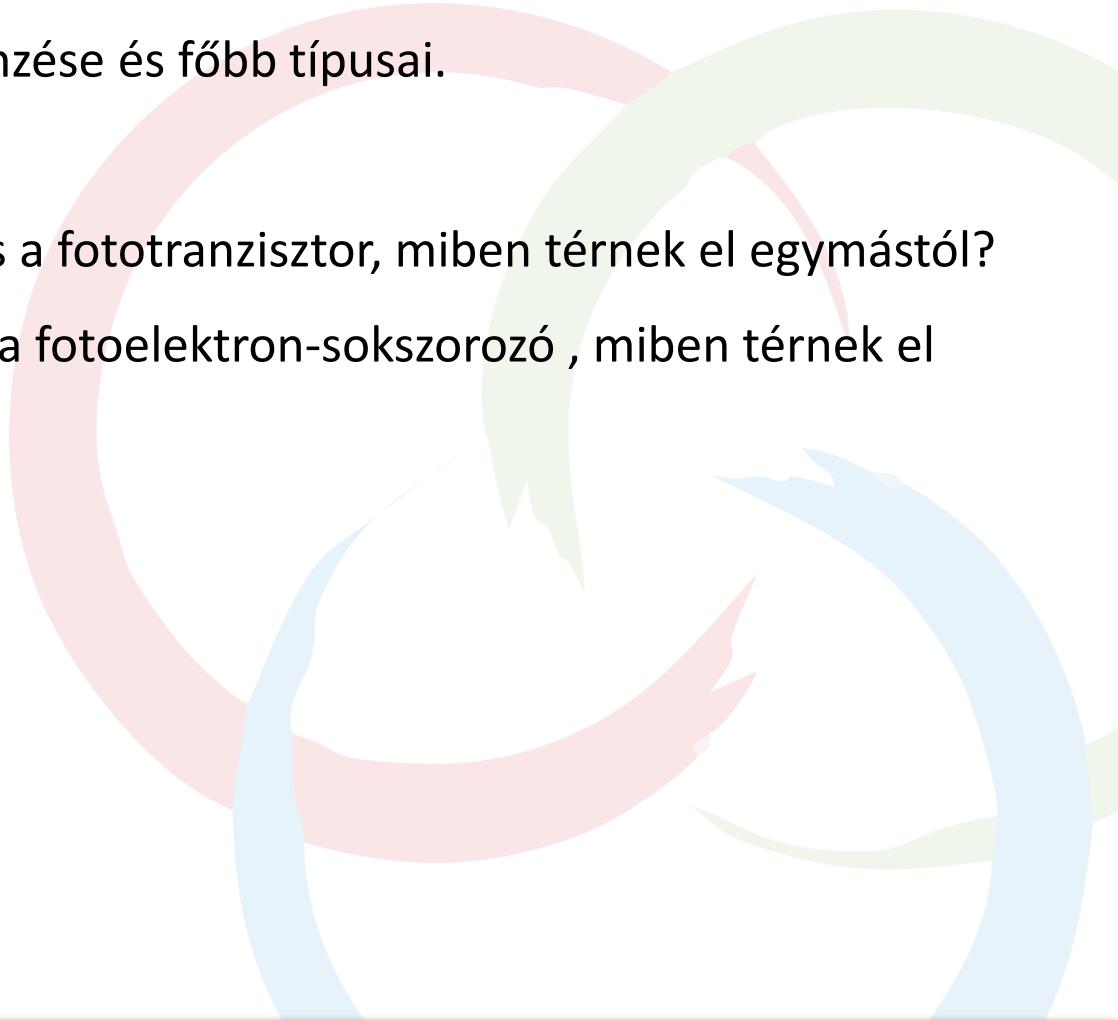
További olvasnivalók:

<http://www.mogi.bme.hu/TAMOP/mikromechanika/math-index.html>

http://www.mogi.bme.hu/TAMOP/muszaki_optika/index.html

Ellenőrző kérdések

1. Milyen optikai alapjelenségek működnek a lencsék, tükrök és rácsok esetén?
2. Az optikai szál felépítése, jellemzése és főbb típusai.
3. Jellemesse a fotoellenállást!
4. Hogyan működik a fotodióda és a fototranzisztor, miben térnek el egymástól?
5. Hogyan működik a photocella és a photoelektron-sokszorozó , miben térnek el egymástól?



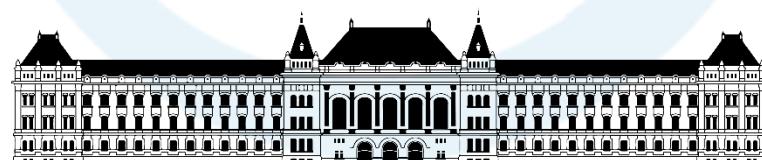
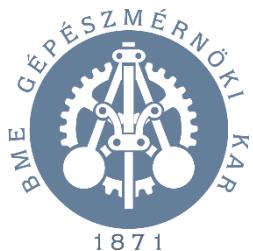


KÖSZÖNÖM A FIGYELMET!

BOJTOS Attila
BME - MOGI Tanszék
bojtos@mogi.bme.hu

Szenzorteknika Optikai érzékelők

BOJTOS ATTILA
BME - MOGI TANSZÉK



M Ú E G Y E T E M 1 7 8 2



Tematika

Bevezetés a szenzorteknikába

- csoportosítás,
- méréstechnikai tulajdonságok,
- Jelfeldolgozás

Anyagszerkezet

- Atomszerkezet
- Kémiai kötések
- Sávszerkezet
- Félvezetők
- Fémek

Érzékelési elvek fizikai alapjai (szenzor)

- Termikus elvek, hőmérsékletmérés
- **Optikai-elvek**
- Ellenállásváltozás elvén működő érzékelés
- Kapacitás
- Mágneses mérési elvek
- Piezoelektronos mérési elvek
- Akusztikai elvek

Érzékelési módszerek, alkalmazások (jelátalakító)

- Hossz-, távolság-, elmozdulás-, elfordulásmérés szenzorai
- Sebesség-, térfogatáram-, gyorsulásmérés szenzorai
- Nyomás-, erő-, nyomatékmérés szenzorai
- (Kémiai érzékelés szenzorai)

Aktuátorok

- Motorok
- Piezoelektronos aktuátorok
- Magnetostrikciós aktuátorok

Integrált érzékelő és beavatkozó rendszerek (vendégelezés)

- Technológiai alapok, MEMS, NEMS, OEMS
- Szenzorhálózatok, IoT



5. Előadás áttekintése

- Fontosabb törvényszerűségek
- Passzív optikai elemek
 - Optikai szál, Fresnel lencsék, ...
- Aktív optikai elemek
 - Fényérzékelők
 - Vákuumcsövek
 - Szilárdtest eszközök.
 - Fénykibocsátó eszközök
 - LED
 - LASER



Fénykibocsátó eszközök

115 éve
napi 24 órán át
világít az első
gyárilag készített
szénszálas izzó.



What makes a Shelby light bulb special

The Shelby bulb:
The filament is the key to the bulb's longevity, compared with traditional incandescent bulbs. Although the exact composition of the filament in the Livermore bulb is unclear, it is likely carbon-based.

Carbon-based filament

Close-up view

was baked to harden it as hard as a diamond.

Flatter shape of the handblown glass the filament's design focus the direction

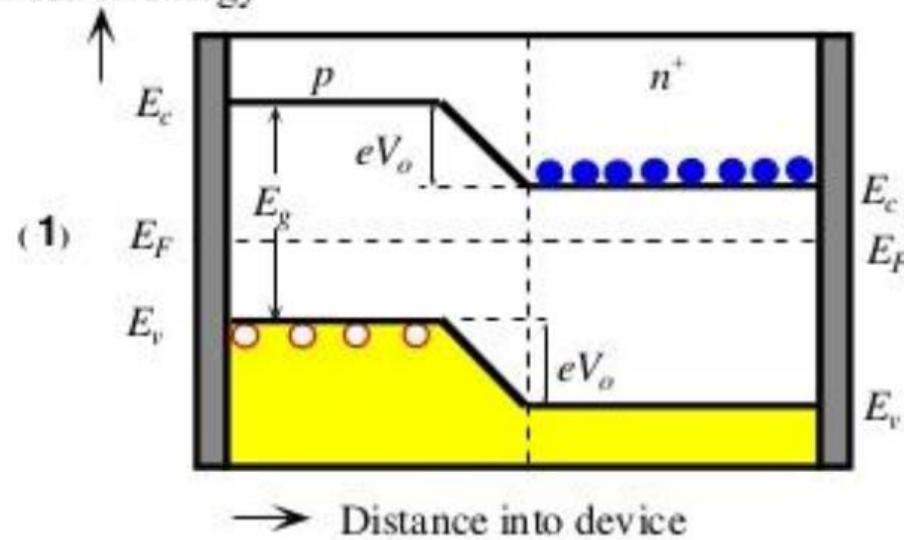
Tungsten filament

LIVERMORE PLAZA FIRE STATION 6

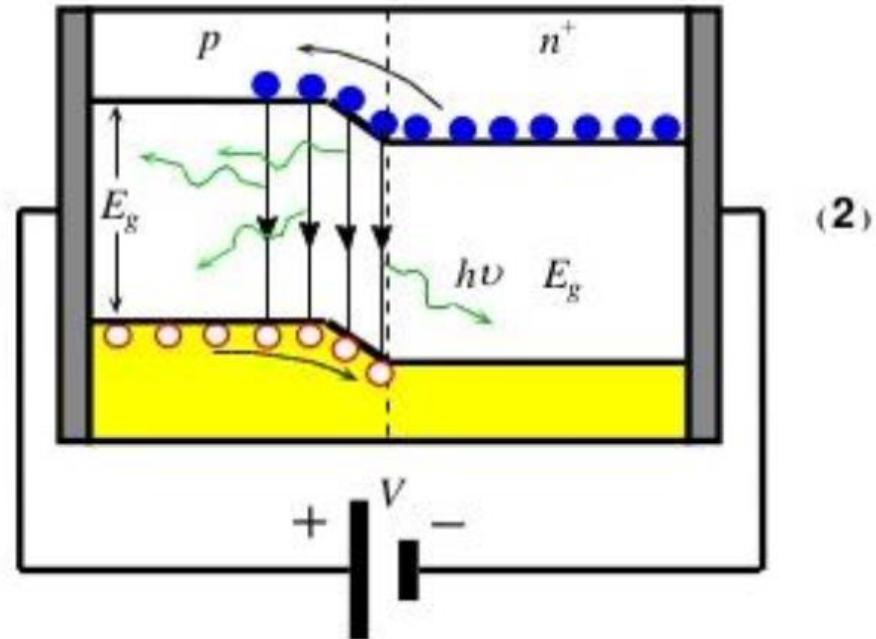
Fénykibocsátó eszközök

LED – Light Emitting Diode – Fénykibocsátó dióda

Electron energy



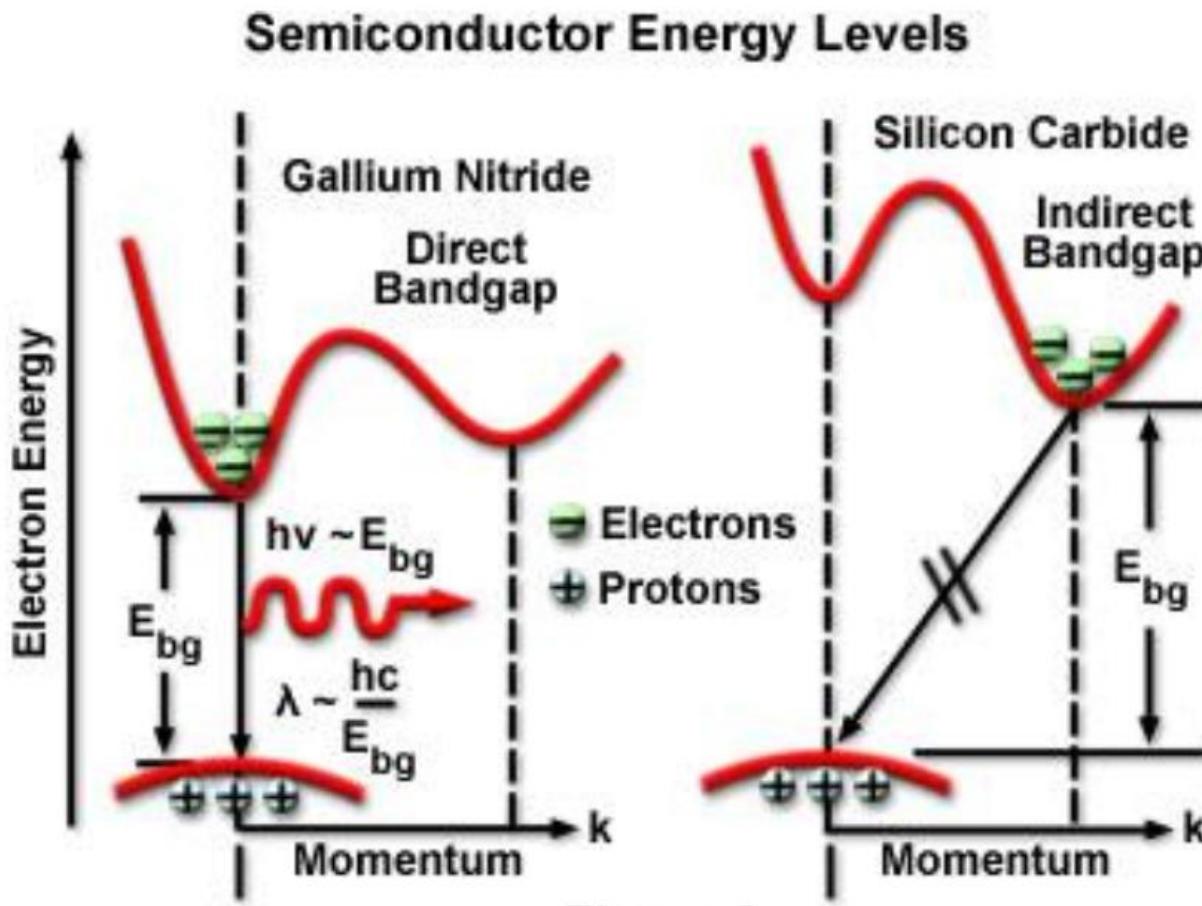
- Electron in CB
- Hole in VB



Fotodióda nyitó-irányú előfeszítéssel

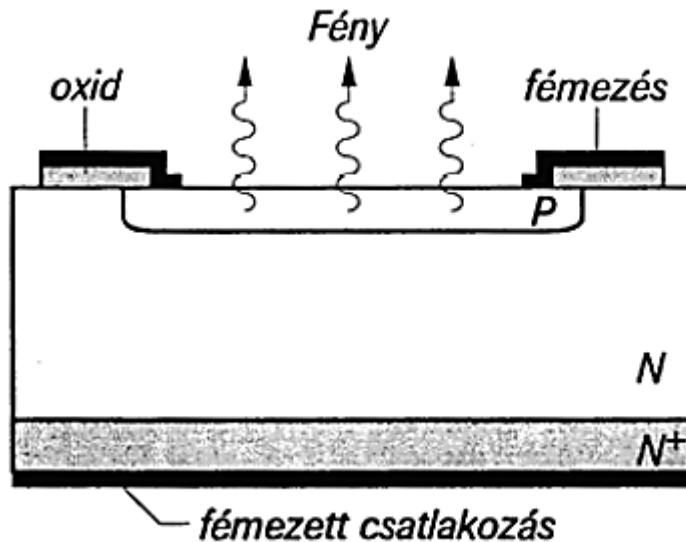
Hatékony fénykibocsátás csak a **direkt sávú félvezetőkben**, a vezetési sávból direkt átmenet van a valencia sávba impulzusváltozás nélkül.

A **tiltott sáv szélessége** határozza meg a kibocsátott fény hullámhosszát.



Nyitóirányú előfeszítés.

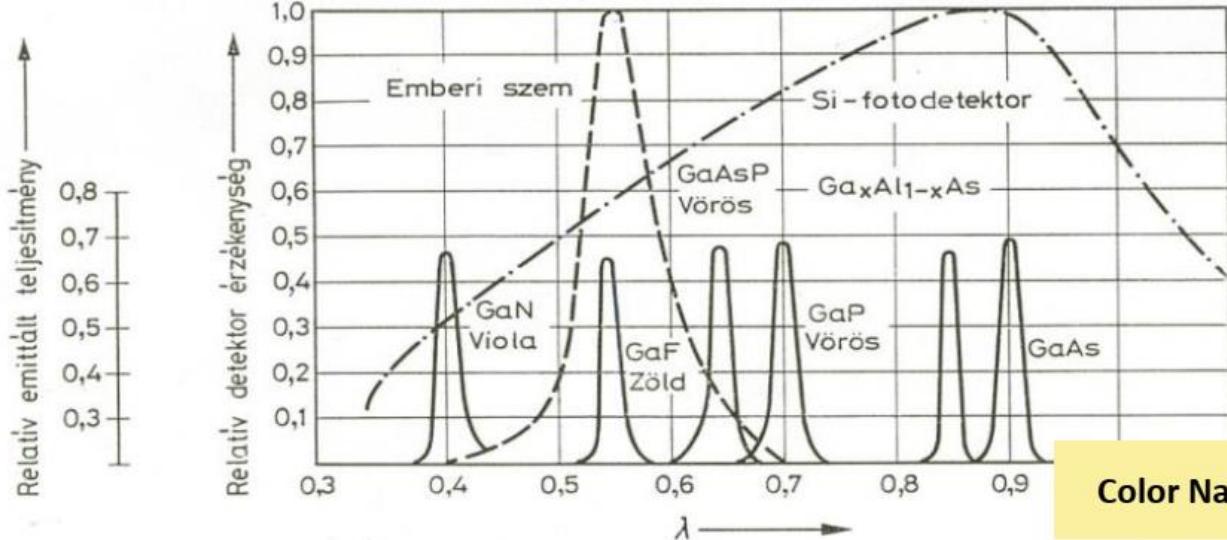
Szilárdtest fényemisszió - LED dióda



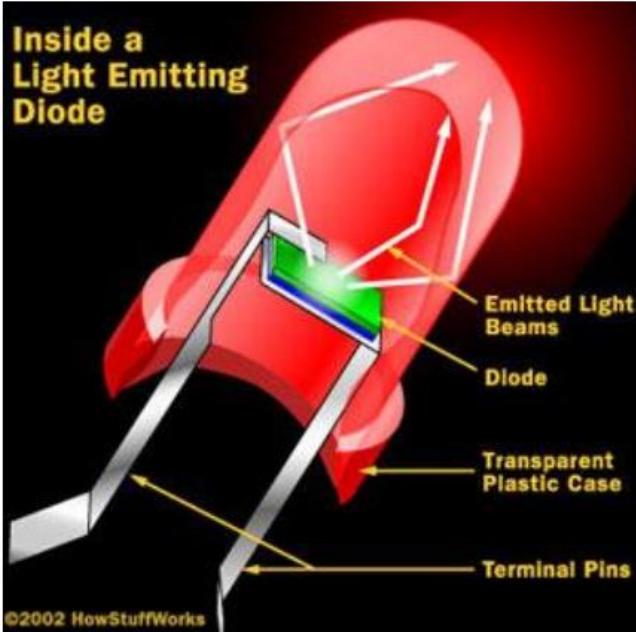
Fényemisszió:

nyitó irányban
előfeszített
diódában jön létre.

Szín	Hullámhossz nm	Alapanyag	Nyitó feszültség V	Fényerősség m cd	Fényteljesítmény µW
Infravörös	900	GaAs	1,3...1,5	0,4...1,0	100-500
Vörös	655	GaAsP	1,6-1,8	0,4...1,0	1...2
Világos piros	635	GaAsP	2,0-2,2	2,0...4,0	5...10
Sárga	583	GaAsP	2,0...2,2	1,0...3,0	3...8
Zöld	565	GaP	2,2...2,4	0,5...3,0	1,5...8
kék	490	GaP	3,0...5,0	0,5...2,0	7 1,5...6



LED alapanyagok

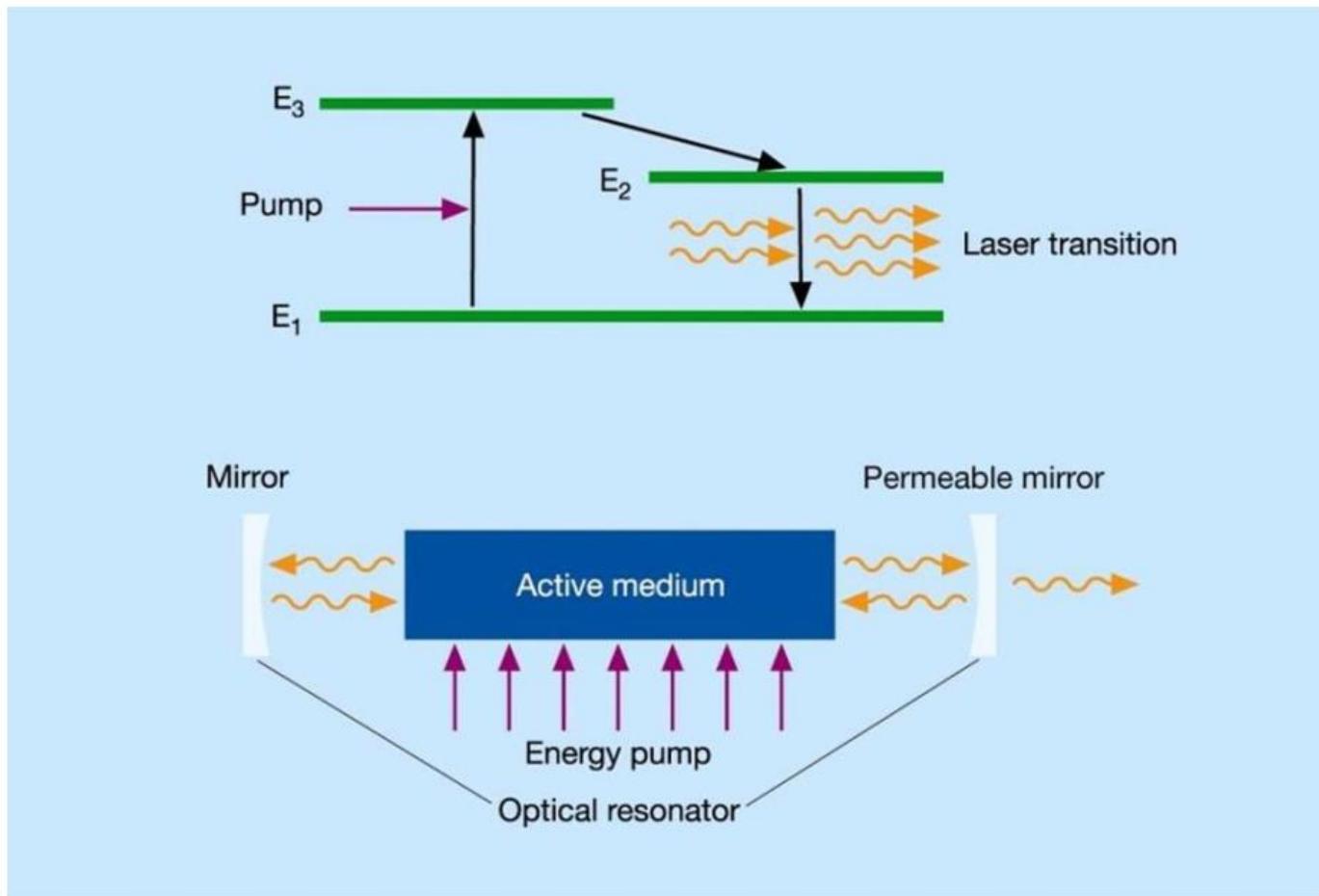


Fehér fény a LED világítástechnikában:
keverék szín:
RGB
vagy fénypor szükséges

Color Name	Wavelength (Nanometers)	Semiconductor Composition
Infrared	880	GaAlAs/GaAs
Ultra Red	660	GaAlAs/GaAlAs
Super Red	633	AlGaInP
Super Orange	612	AlGaInP
Orange	605	GaAsP/GaP
Yellow	585	GaAsP/GaP
Incandescent White	4500K (CT)	InGaN/SiC
Pale White	6500K (CT)	InGaN/SiC
Cool White	8000K (CT)	InGaN/SiC
Pure Green	555	GaP/GaP
Super Blue	470	GaN/SiC
Blue Violet	430	GaN/SiC
Ultraviolet	395	InGaN/SiC

Lézer – LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

- Populáció inverzió: E_1 szintről E_3 -ra gerjesztjük a pumpálás során a töltéseket,
- Stimulált emisszió: egy triggerelő impulzussal töltünk át az E_2 szintre, ahonnan spontán rekombinálódnak koherens fotonkibocsátás mellett.



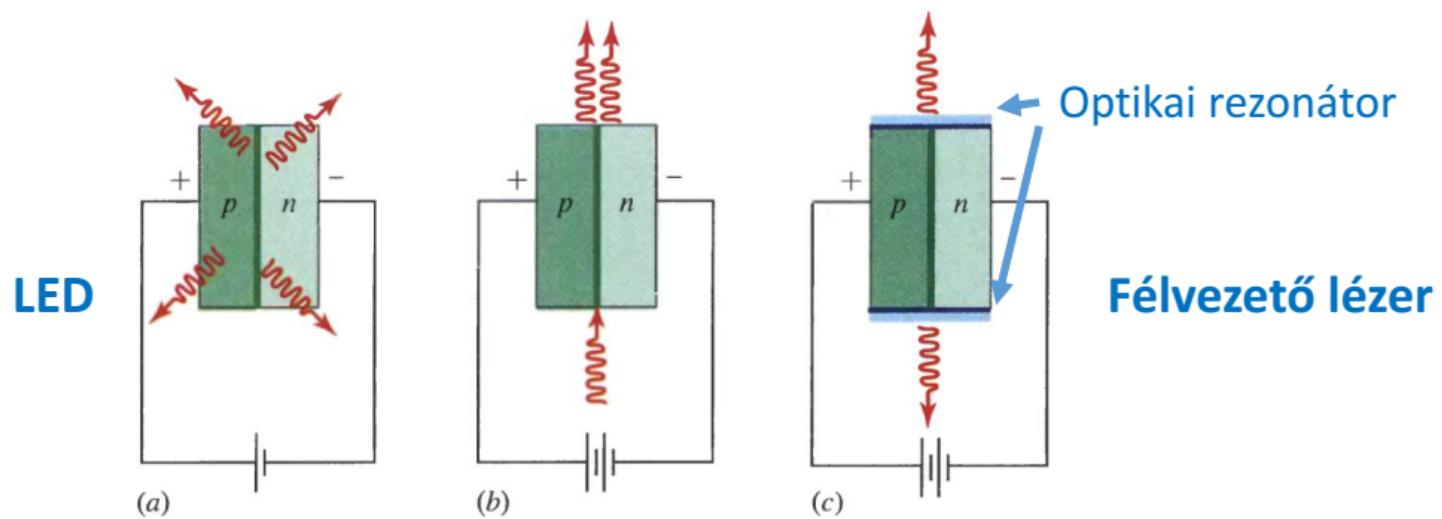
Gázlézer – alacsony nyomású gáz, plazma, optikai rezonátor

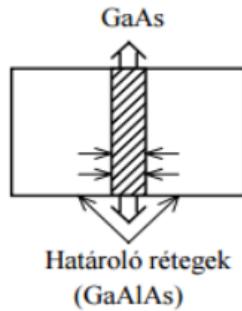
Szilárdtest lézer – optikai kristály, villanólámpás gerjesztés, optikai rezonátor

Lézer – LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

Tulajdonságai:

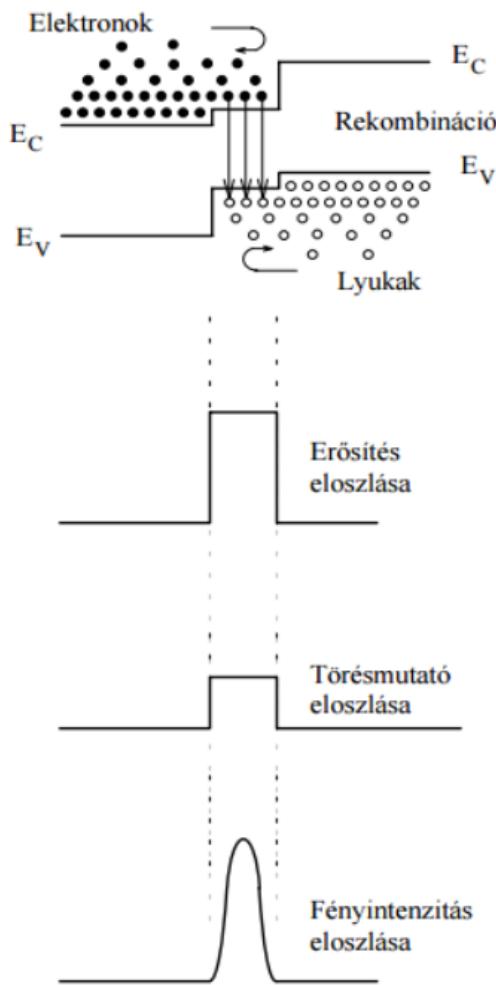
- A lézerek fénye **egyszínű**. A lézersugár egy olyan elektromágneses hullám, amely egyetlen hullámhosszúságú összetevőből áll.
 - A létrejött fény **időben és térben koherens**, a lézer által kibocsátott hullámok fázisa a sugár minden keresztmetszeténél azonos.
 - A lézernyaláb keskeny és nagyon **kis széttartású nyaláb**. A lézerfény nagyrészt **párhuzamos fénysugarakból** áll, nagyon kis szóródási szöggel. Ezzel nagy energiasűrűség érhető el szűk sugárban, nagy távolságokban is.
 - A lézerek energiája kis térrészben koncentrálódik, a **lézerfény teljesítménysűrűsége nagy**, a megszokott fényforrásokénak sokszorosa lehet.





Lézerdióda: heteroátmenetes félvezető eszköz

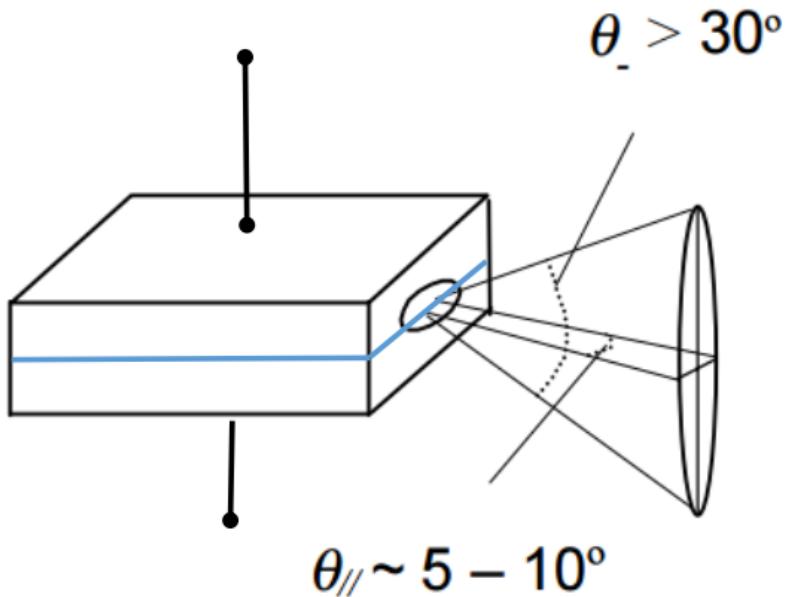
A **heteroátmenetben** félvezető anyagok érintkeznek atomi közelségben, amelyeknél a **tiltott sáv nagysága különbözik**.



- A nagyon vékony GaAs aktív réteget minden oldalról GaAlAs határoló réteg veszi körül. A két réteg típusa rendre n és p.
- Ha minden rétegre nyitóirányú feszültséget kapcsolunk, akkor minden réteg töltéshordozókat injektál a GaAs-be.
- Mivel minden az n-, minden a p-típusú GaAlAs-ben nagyobb a tiltott sáv szélessége, mint az aktív réteget alkotó GaAs-é, az elektronok összegyűlnek az aktív rétegen.
- Létrejön az inverz betöltöttség.
- Csak sugárzásos rekombináció jön létre a nagy törésmutatójú rétegen.

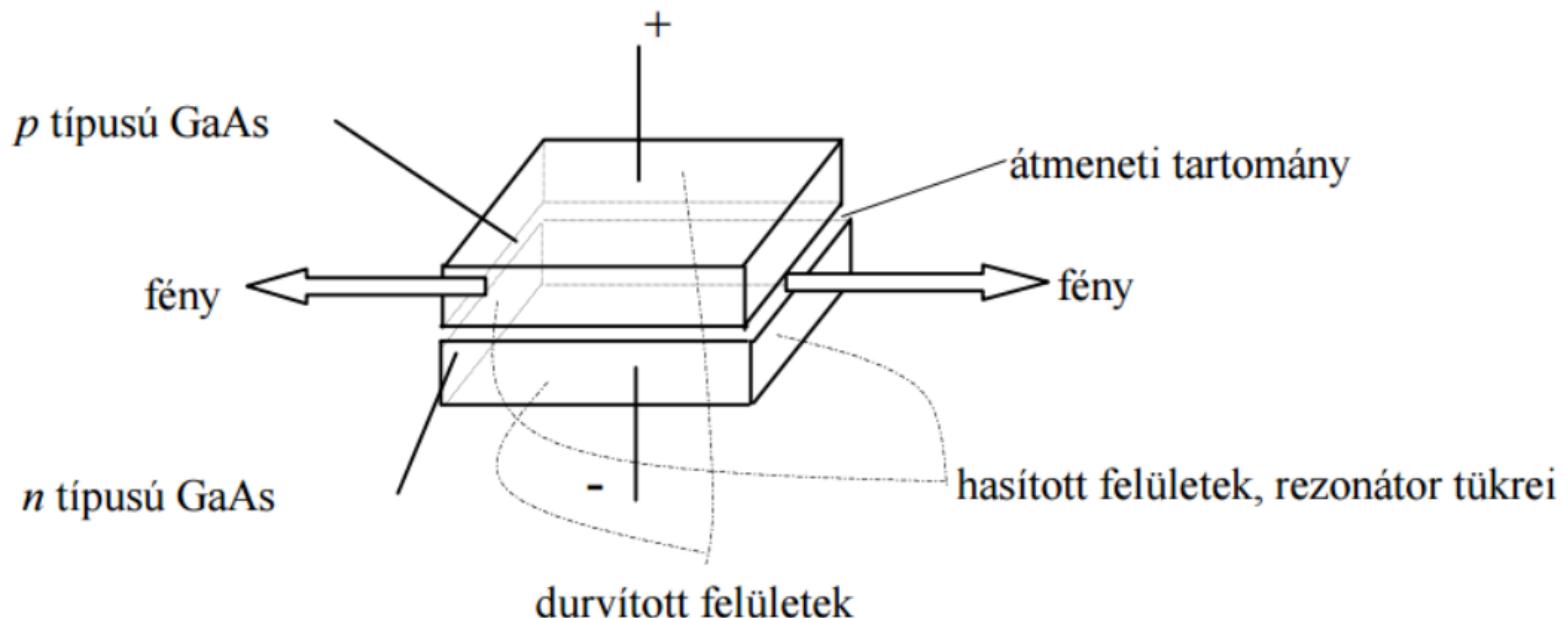
A félvezető lézerfény

- közel monokromatikus, koherens,
- nagyobb divergenciájú és koherencia-hossza kisebb, mint pl. a gázelzereknél.



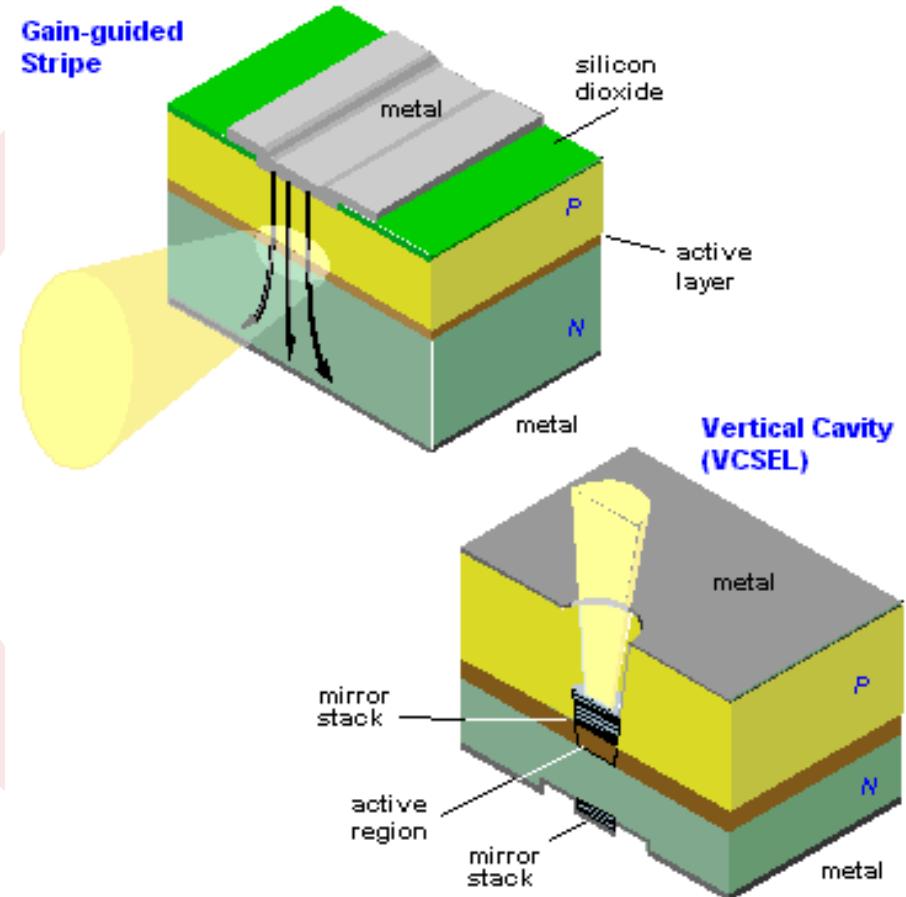
Félvezető lézer felépítése

- A félvezető anyag kollektív elektronállapotai (sáv – sáv) közötti átmeneteket alkalmazza, hasonlóan a LED-hez.
- Optikai rezonátor kialakítás.
- Nagy áramsűrűség az inverzió fenntartására.



Félvezető lézerek kialakítása

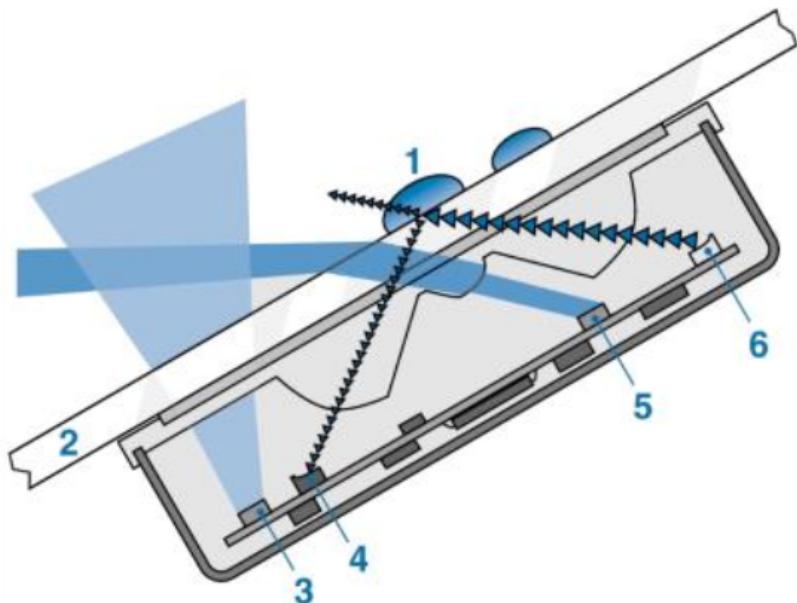
- Lézer dióda
- Élen történő fénykibocsátás
- VCSEL (vertical-cavity surface-emitting laser)
 - Lézerdióda speciális kialakítása
 - Felületi fénykibocsátás
 - ellenőrzési lehetőség gyártás közben.
 - Egy szilícium ostyán több tízezer gyártható egyszerre a merőleges fénykibocsátó struktúra következtében
 - Tipikusan: GaAs, 650 nm ... 1300 nm.



3. Érzékelési módszerek, alkalmazások

e) Optikai érzékelés

Esőérzékelő - járművekben



- (1) Esőcseppek
- (2) Szélvédő
- (6) A LED meghatározott szög alatt infravörös fényt bocsát a szélvédőre, a fény jelentős része visszaverődik az üveg-levegő határrétegről (teljes reflexió)

Ha esőcsepp éri a szélvédőt, a

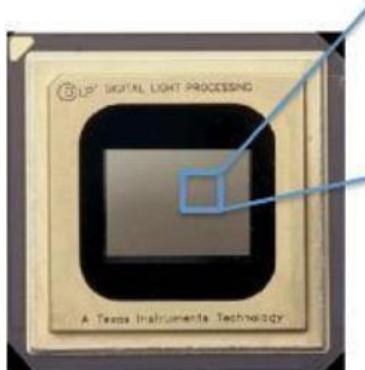
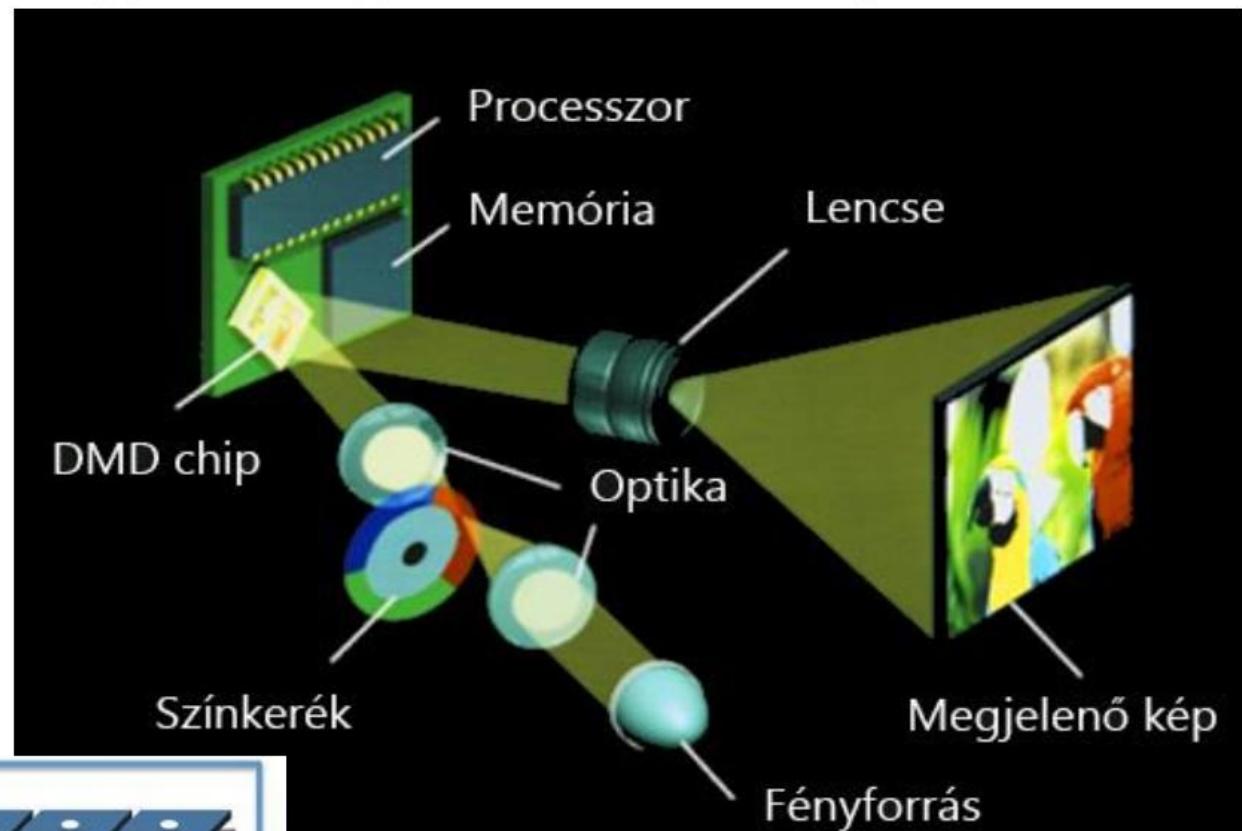
- (6) LED által kibocsátott fény egy része szétszóródik, és az esőcseppek számától függően gyengébb vevőjel érkezik a

(4) fotodiódára.

A fotodióda vett jelének változása képezi az állapot felismerésének alapját, és így az ablaktörlők működtetésének vezérlőjelét is.

Projektor – Beamer

Vetített kép megjelenítése, gyorsan, nagy felbontással, színhelyesen

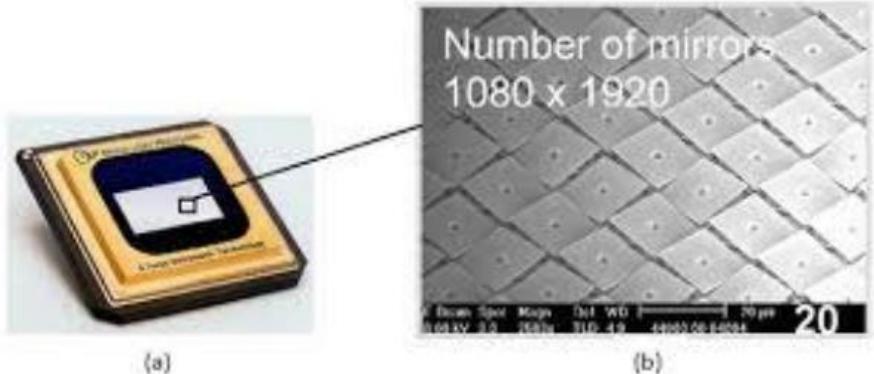


DMD Chip

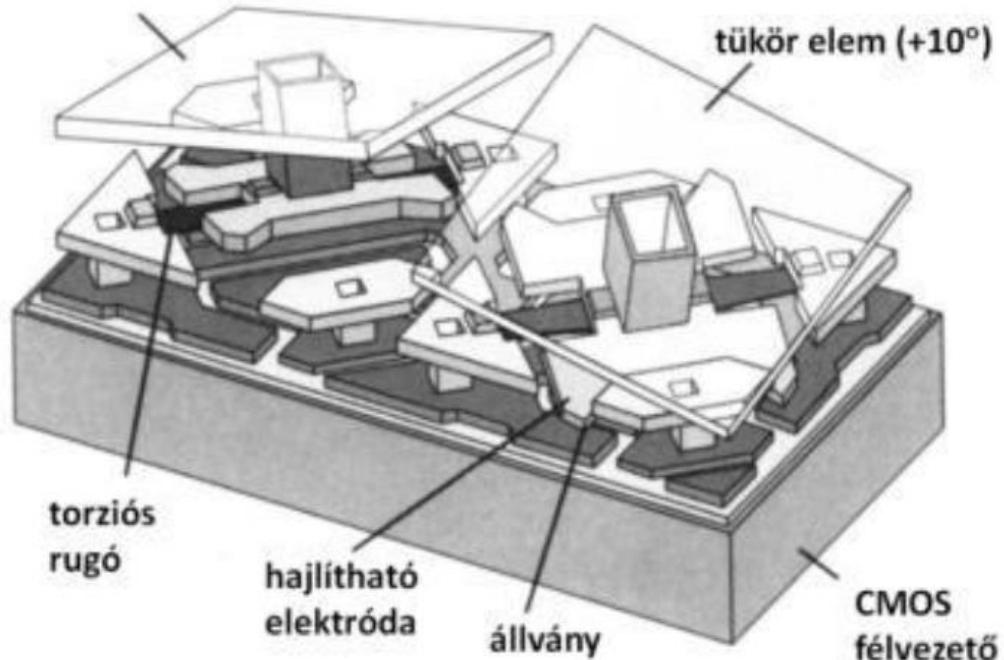
Array of Micromirrors

DMD – Digital Micromirror Device

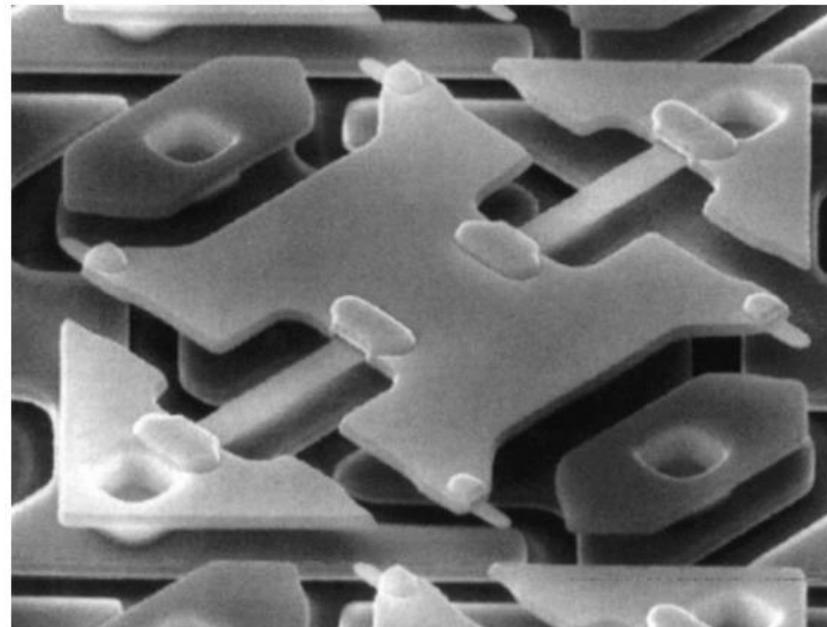
Projektor – egy pixel



tükör elem (-10°)



MEMS megvalósítás



Optikai Távolságmérés Alapja

Radiometria (Fényerősségmérés)

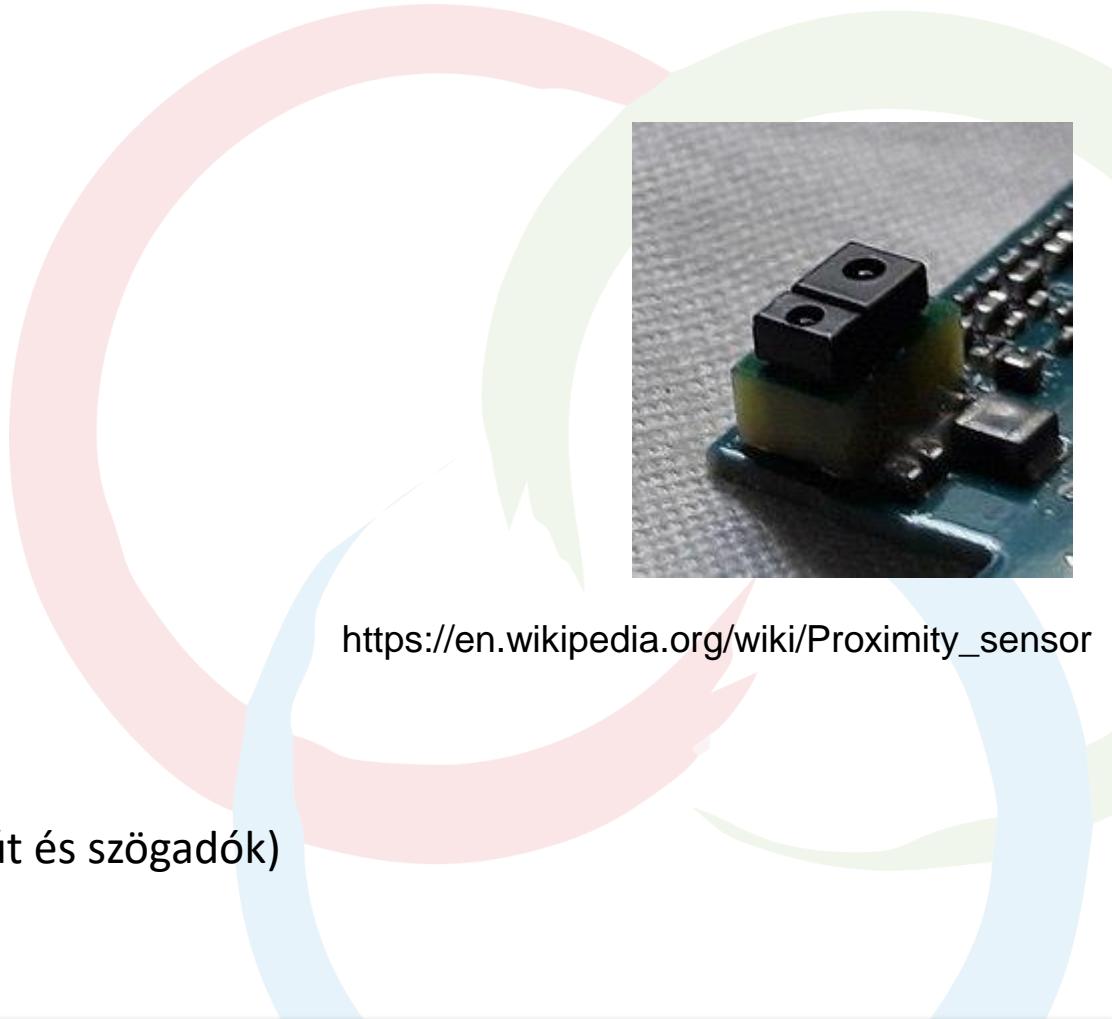
- Optokapu
- Optikai közelítéskapcsolók

Fényfolt pozíció / alak mérés

- Duál, quadráns detektor
- Háromszögelés (PSD, CCD)
- Képfeldolgozás (optikai egér)

Fázis, idő, hullámhossz mérés

- Interferometria
- Visszaverődés ideje (ToF)
- Impulzus számlálás (inkrementális út és szögadók)



https://en.wikipedia.org/wiki/Proximity_sensor

ToF – Time of Flight Távolságérzékelők

Mérési elve a fény futásidéjének mérésén alapul

$$R = c t / 2 n$$

R – a méréndő távolság,

c – a fény sebessége vákuumban,

t – az impulzus futás ideje,

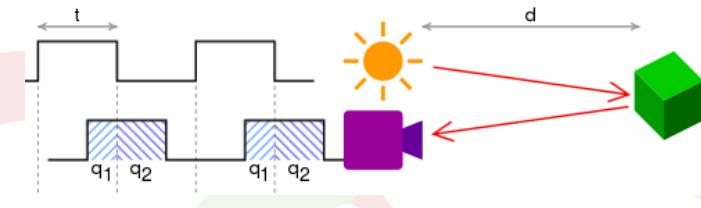
n – a közeg törésmutatója.

• Formái

- Kézi távolságmérő
- 3D szkenner / LIDAR
- ToF Kamera (1 mérés: teljes képmező felvétele)

Tulajdonságai

- Nagy mérési tartomány: cm – km
- 10 ... 100 kS/s
- Rossz felbontás: mm, (időmérés pontossága határozza meg, 1mm:=3,3ps)
- Osztott sugár (belőgő él) fals eredményt ad.



Optikai Távolságérzékelők (IC méretű ToF szenzorok)

Főbb paraméterei

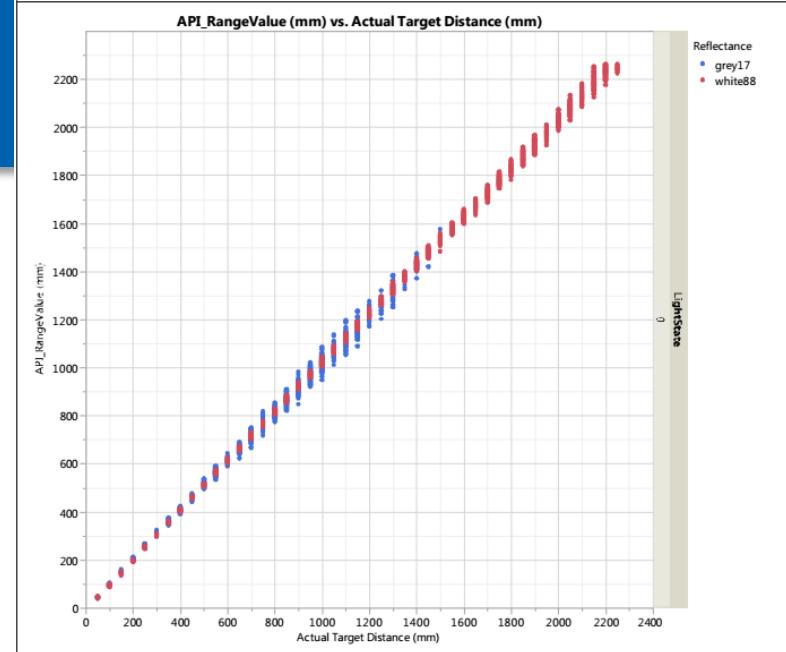
- Méret: 4.4 mm x 2.4 mm x 1.0 mm
- Kommunikáció: I²C
- Mérési idő: 30 ms
- Mérési tartomány néhány mm-től ... 2m-ig.
- Mérési bizonytalanság: 3-12%, Reflektáló felület fényvisszaverő képességétől, környezeti fényviszonyuktól és a választott mérés időtől függően.

Fényforrás:

- Felületsugárzó lézer (VCSEL / Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser)
- 940-nm (előző generációs: 850-nm).
 - A nagyobb hullámhossz hatására kevésbé érzékeny a felületi érdességre, és a környezeti fényre.

Fotodetektor:

- Lavina fotodióda (SPAD / Single Photon Avalanche Diode)
- Infravörös sávszűrő (IR notch filter)



www.pololu.com

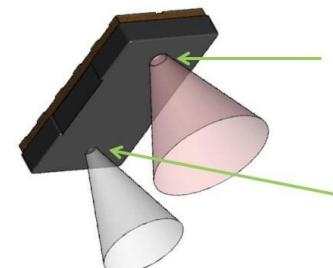


World's smallest ToF ranging sensor



ST

4.4 mm x 2.4 mm x 1.0 mm



VCSEL - Emitter:
Vertical Cavity, Surface Emitting Laser

SPAD - Receiver:
Single Photon Avalanche Diode
IR notch filter

Optikai Háromszögelés

A mérés a háromszögelés elve alapján történik.

- Ha a megvilágítás iránya merőleges: $h = x \cdot \operatorname{tg}(\alpha)$,

Megvilágítás lézer sugárral

A tárgyról visszaverődő fényt az optika egy CCD vagy PSD detektorra képezi le.

A képfolt helye a detektoron a tárgy távolságától függ.

Elérhető legkisebb vagy legnagyobb értékek:

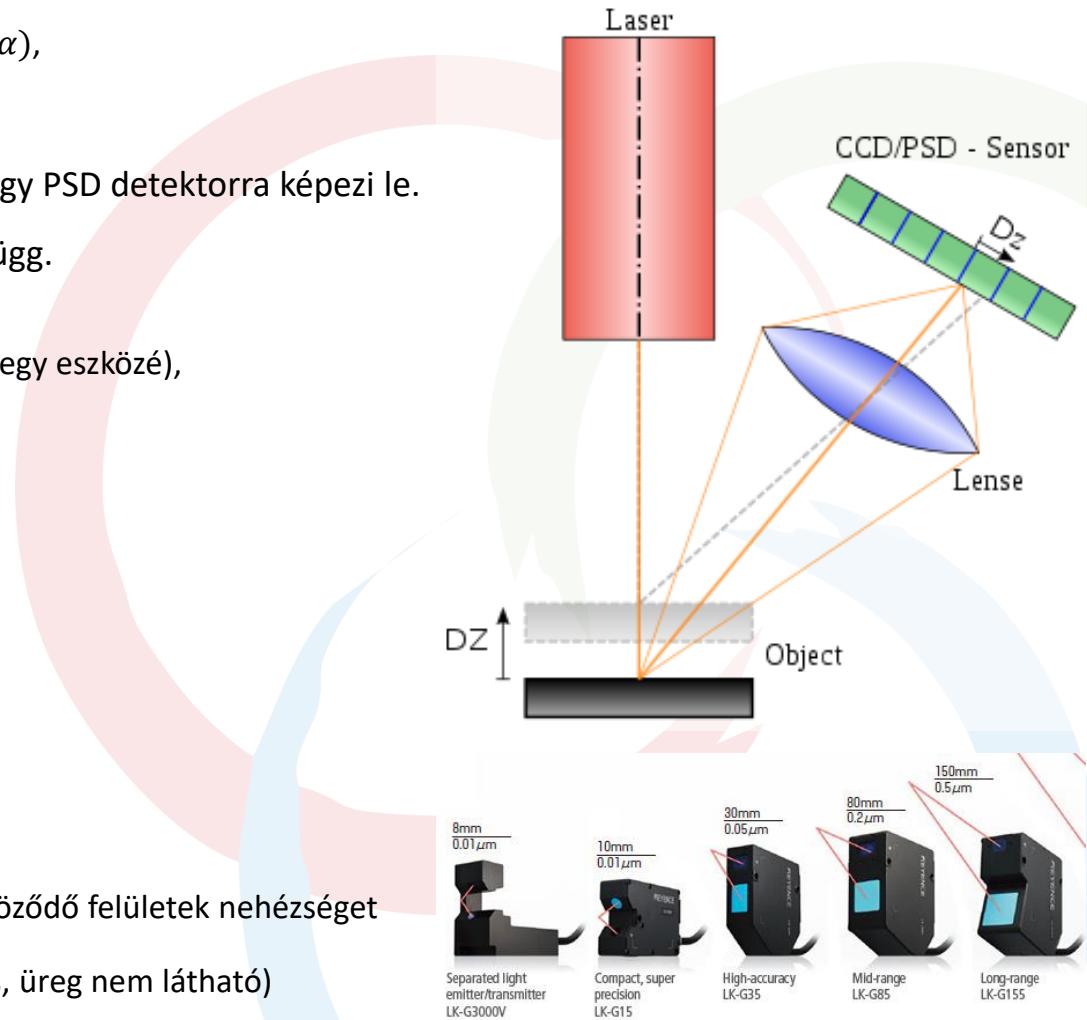
- Mérési tartomány: 2 ... 1000 mm (elérhető, nem egy eszközé),
- Linearitás: $\pm 0,02\%$ (FSO) ($0,4 \mu\text{m}$),
- Felbontás: $0,0015\%$ (FSO) (30 nm),

Előnyök

- Nagy felbontás és kiváló linearitás
- Magas mérési frekvencia
- Kis mérőfelület
- Közel független a céltárgy anyagától

Hátrányok

- Némi felületfüggőség (Szín: expozíciós idő, Tükörződő felületek nehézségeket okozhatnak.)
- Jó láthatósági körülményeket igényel (alametszés, üreg nem látható)



Optikai Távolságérzékelők (Háromszögelés)



Infravörös távolságérzékelő,

Fényforrás: keskeny infravörös fény ($850\text{nm} \pm 70\text{nm}$),

Mérési tartomány: 10 ... 80 cm

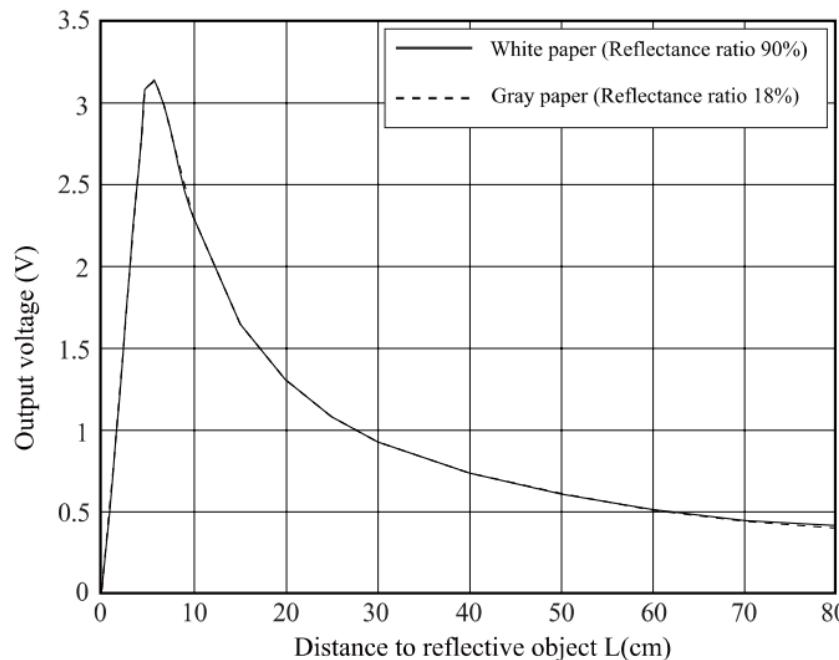
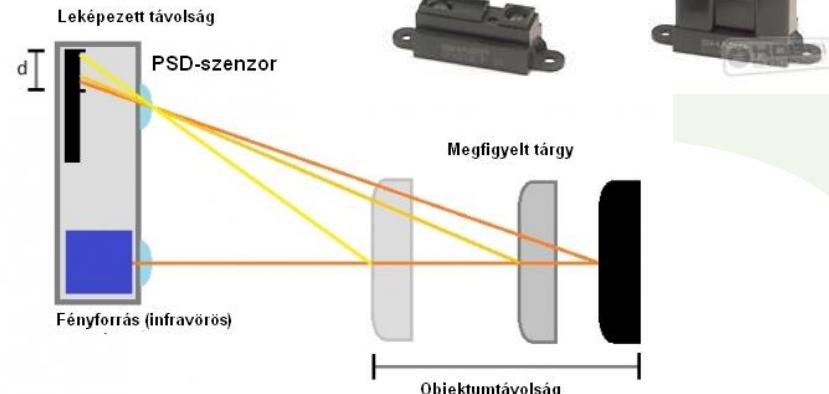
Analóg kimenet.

Előnye

- Kis költség,
- Kis méret,
- Nem érzékeny a tárgy reflexiós tulajdonságaira.

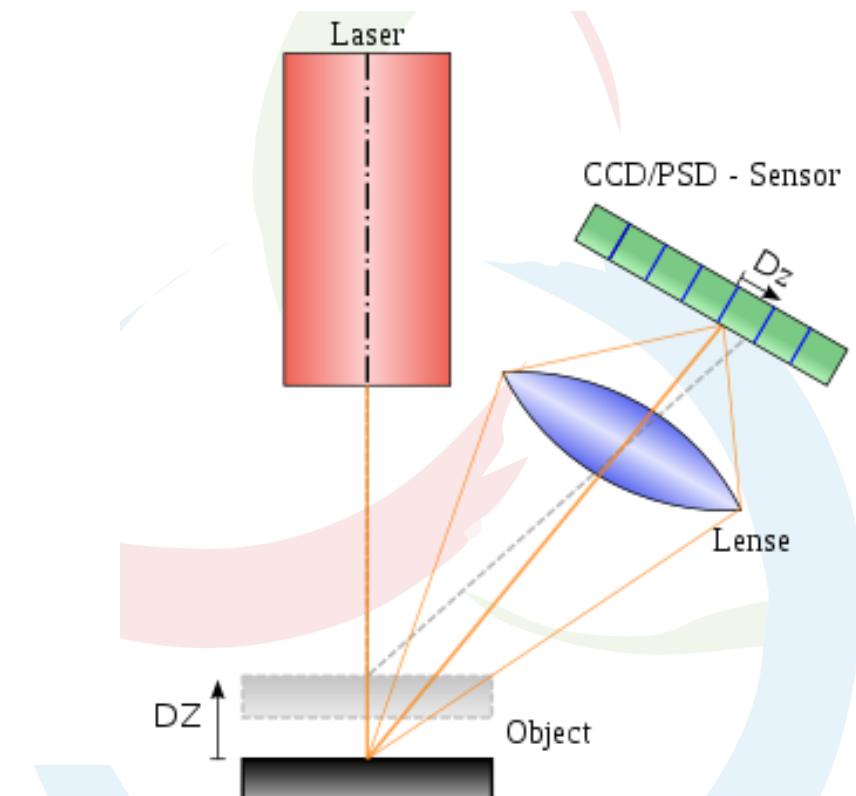
Hátránya:

- Mérési pontossága korlátozott (az adatlapon nincs megadva).
- Tükröző felületekkel, közvetlen napsütésben nem működik megfelelően



Optikai Távolságérzékelők (Háromszögelés)

- Lézeres precíziós távolságérzékelő,
- Elérhető legkisebb vagy legnagyobb értékek:
 - Mérési tartomány: 2 ... 1000 mm (elérhető, nem egy eszközé),
 - Linearitás: $\pm 0,02\%$ (FSO) ($0,4 \mu\text{m}$),
 - Felbontás: $0,0015\%$ (FSO) (30 nm),
- Előnyök
 - Széles méréstartomány
 - Nagy érzékelési távolság
 - Nagy felbontás és kiváló linearitás
 - Magas mérési frekvencia
 - Kis mérőfelület
 - Közel független a céltárgy anyagától
- Hátrányok
 - Némi felületfüggőség
 - Jó láthatósági körülményeket igényel
 - Viszonylag nagy méretű érzékelő
 - Tüköröződő felületek nehézséget okozhatnak



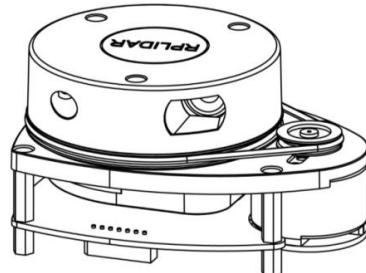
Optikai Távolságérzékelők (LIDAR – Light Detection And Ranging)

Elnevezés eredetileg a Light + Radar kifejezésekből.

Működési elvük egy pásztázó lézeres **ToF** vagy **háromszögeléses** távolságmérő érzékelőn alapul.

Alkalmazása 3D szkennelés különféle módjai:

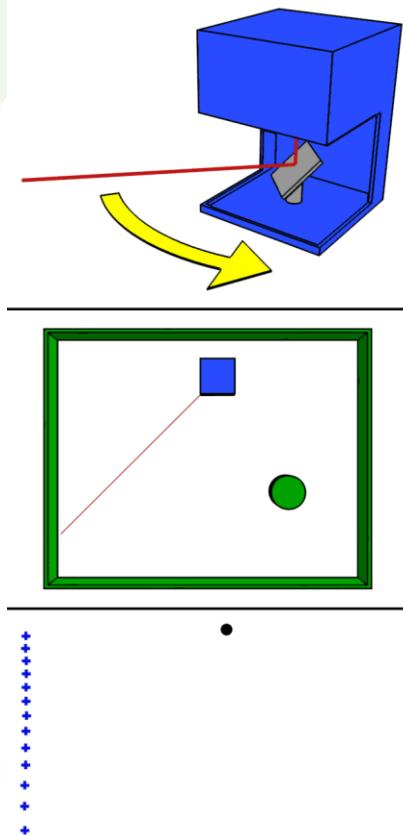
- Nagy felbontású térképészeti (domborzat),
- Belső terek, épületek digitalizálása,
- Autonóm robotok, autók térrézékelése.
- ...



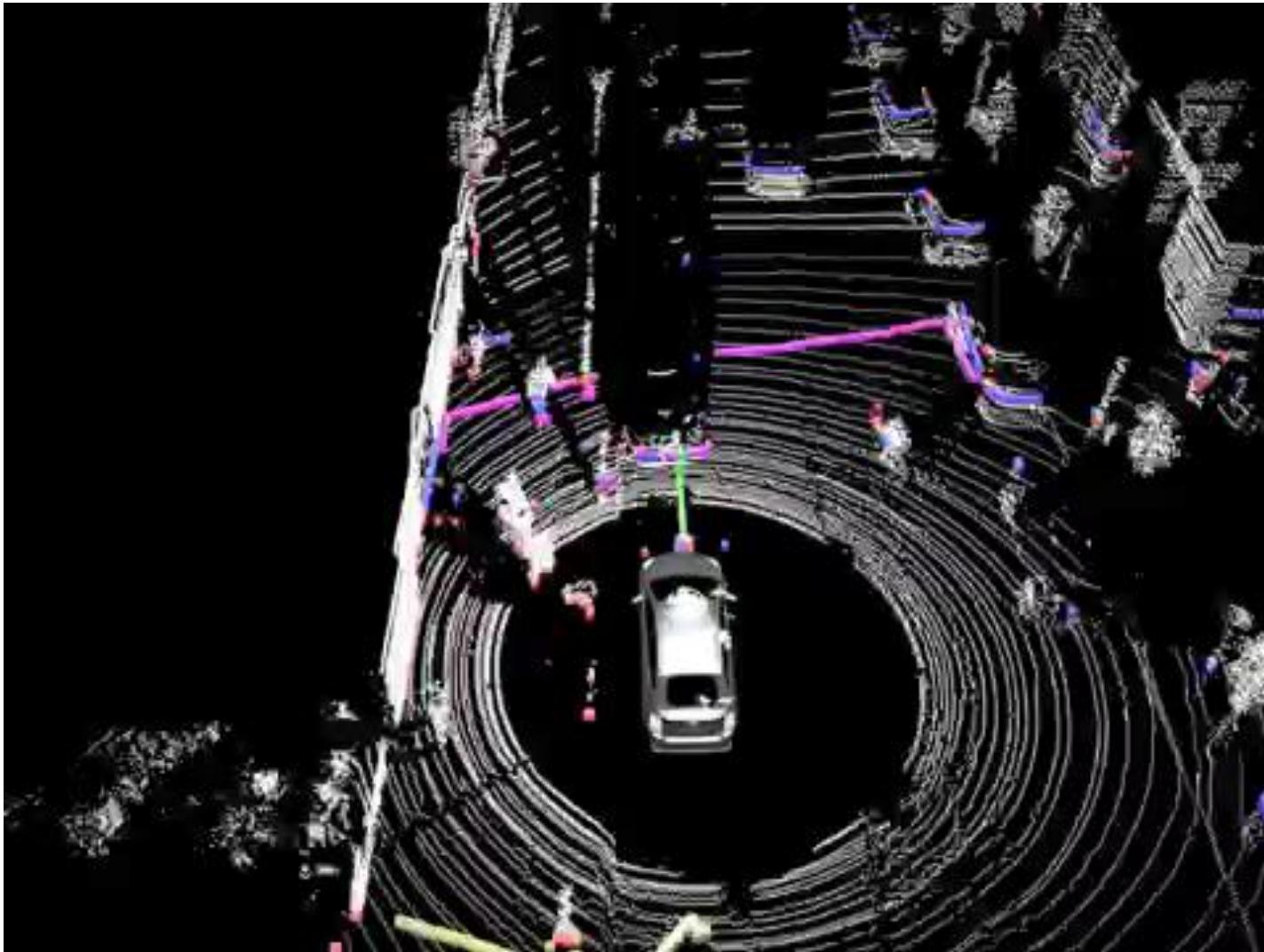
SLAMTEC RPLIDAR A 1 (Háromszögelés)



Velodyne (ToF)



Optikai Távolságérzékelők (LIDAR adatok vizualizációja)



Optikai Távolságérzékelők (LIDAR – Solid-state LIDAR)

LEDDAR™ - (LED + Radar).

Működése hasonló a LIDAR-hoz, de a pásztázás mikroelektronikai tükrő mozgatása vagy szilárdtest eszközök segítségével valósítja meg.

Higher sensitivity and range, for unmatched performance

Leddar's cleaner, digitalized signal enables lower detection thresholds for significantly increased range using low cost, existing technology/components



Less signal degradation, providing high robustness in inclement weather and changing light conditions

Multipulse measurement method statistically increases quality of measurements



Enabling enhanced object detection, classification and tracking with less data

Detection segments provide complete sensing of the environment and better long-range object detection, classification and tracking and with less data compared to point-based methods



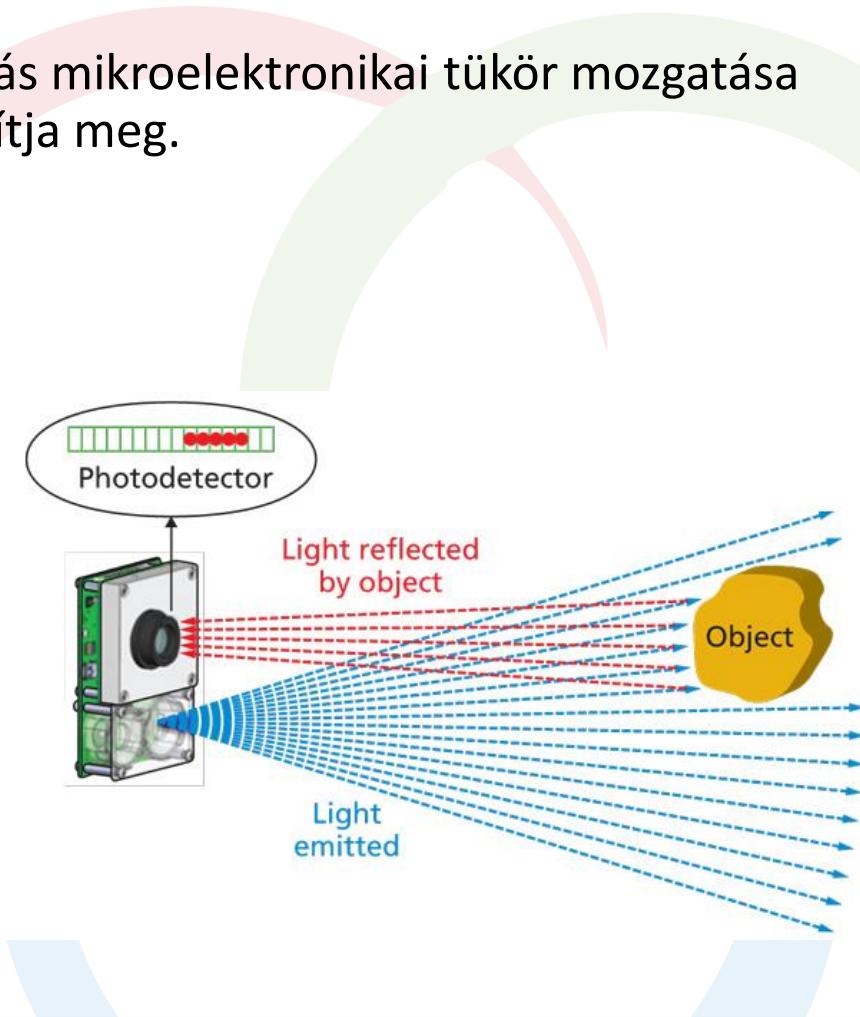
No interference from sensors' overlapping fields of view or from other light sources

Multipulse measurement method combined with low duty cycle and spectrum spreading minimizes mutual sensor interference



Affordable solid-state LiDAR suited to large-scale deployment

Leveraging affordable components and designed with no moving parts, Leddar-based sensors are perfect for large-scale automotive grade production and deployment



Optikai Távolságérzékelők (LIDAR – Solid-state LIDAR)

LeddarTech®

[Forrás: LeddarOne
<https://www.youtube.com/watch?v=h7nHfaY6He0>
<https://www.youtube.com/watch?v=Qbo9mGAFkqc>]



Optikai Távolságérzékelők (LIDAR – Solid-state LIDAR)

LeddarTech®

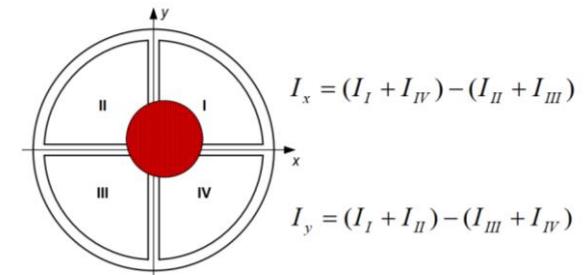
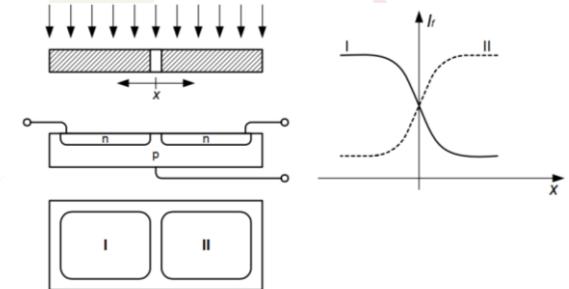
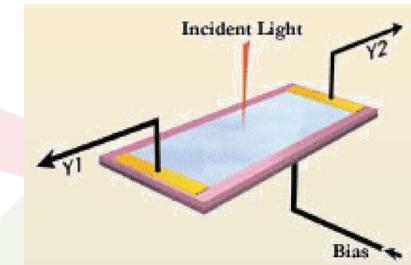
[Forrás: LeddarOne

<https://www.youtube.com/watch?v=h7nHfaY6He0>

[https://www.youtube.com/watch?v=Qbo9mGAFkqc\]](https://www.youtube.com/watch?v=Qbo9mGAFkqc)

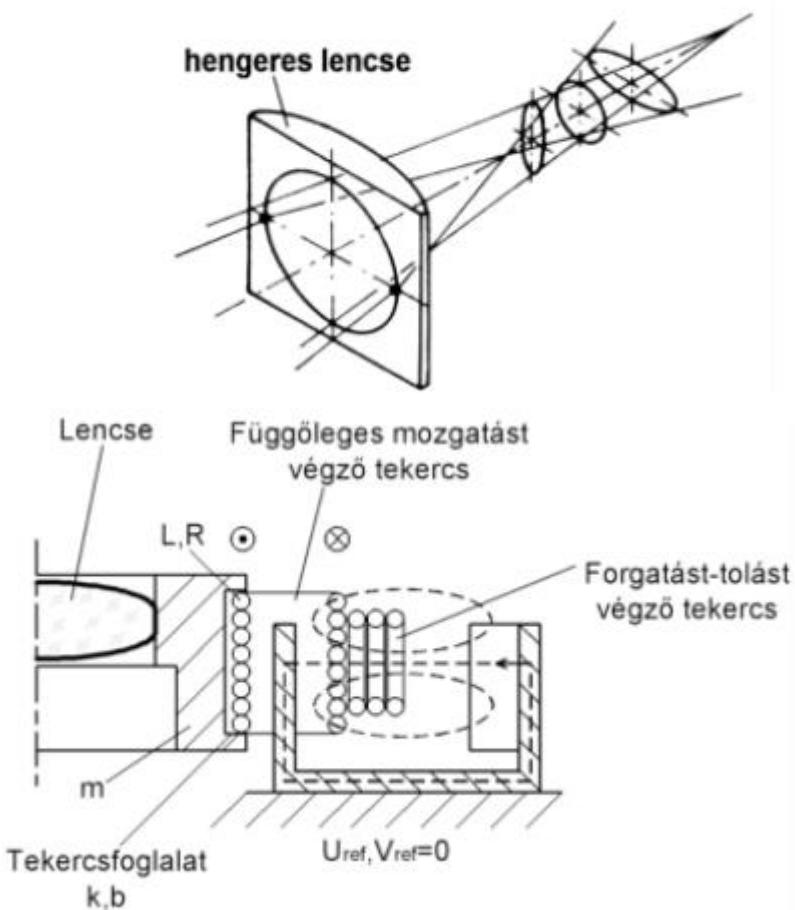
Pozícióérzékeny detektorok

- PSD (Position Sensing Detector)
 - Fényfolt pozícióját folytonos jellé alakítja,
 - Gyors működésű és jó linearitású.
- Iker fotodióda
 - Egy anyagból készül, ezért jó a termikus együttfutásuk.
 - Pozícióérzékelésre alkalmas.
- Kvadráns fotodióda
 - Leggyakoribb alkalmazás a CD fej szabályozása.

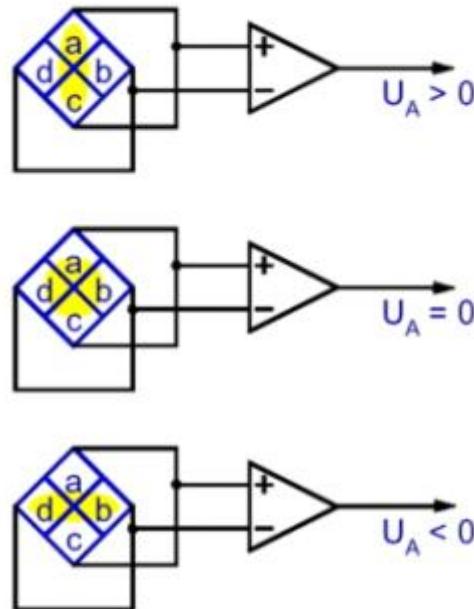


CD FEJ SZABÁLYOZÁSA (KVADRÁNS FOTODIÓDA)

Autofókusz működése

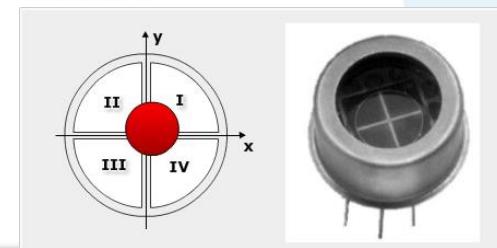


Kvadráns dióda



A lencsét mozgató elektromechanikus szerkezet feladata:

- Fókuszálás
- Sávon tartás

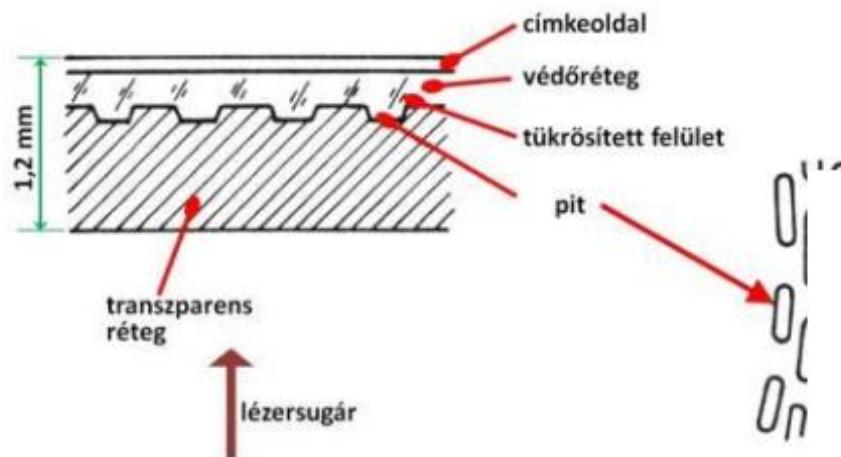


[Forrás: Dr. Halmai Attila Szenzor- és aktuátorteknika (2012),
https://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0017_07_szenzor_es_aktuatorektechnika/ch02s06.html]



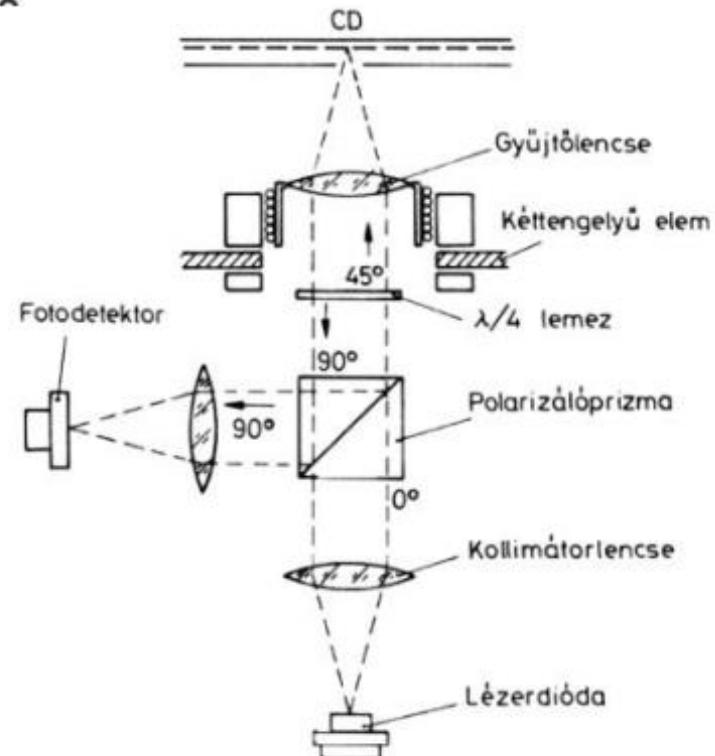
CD FEJ SZABÁLYOZÁSA (KVADRÁNS FOTODIÓDA)

CD-DVD olvasófej



Információtárolás a lemezen

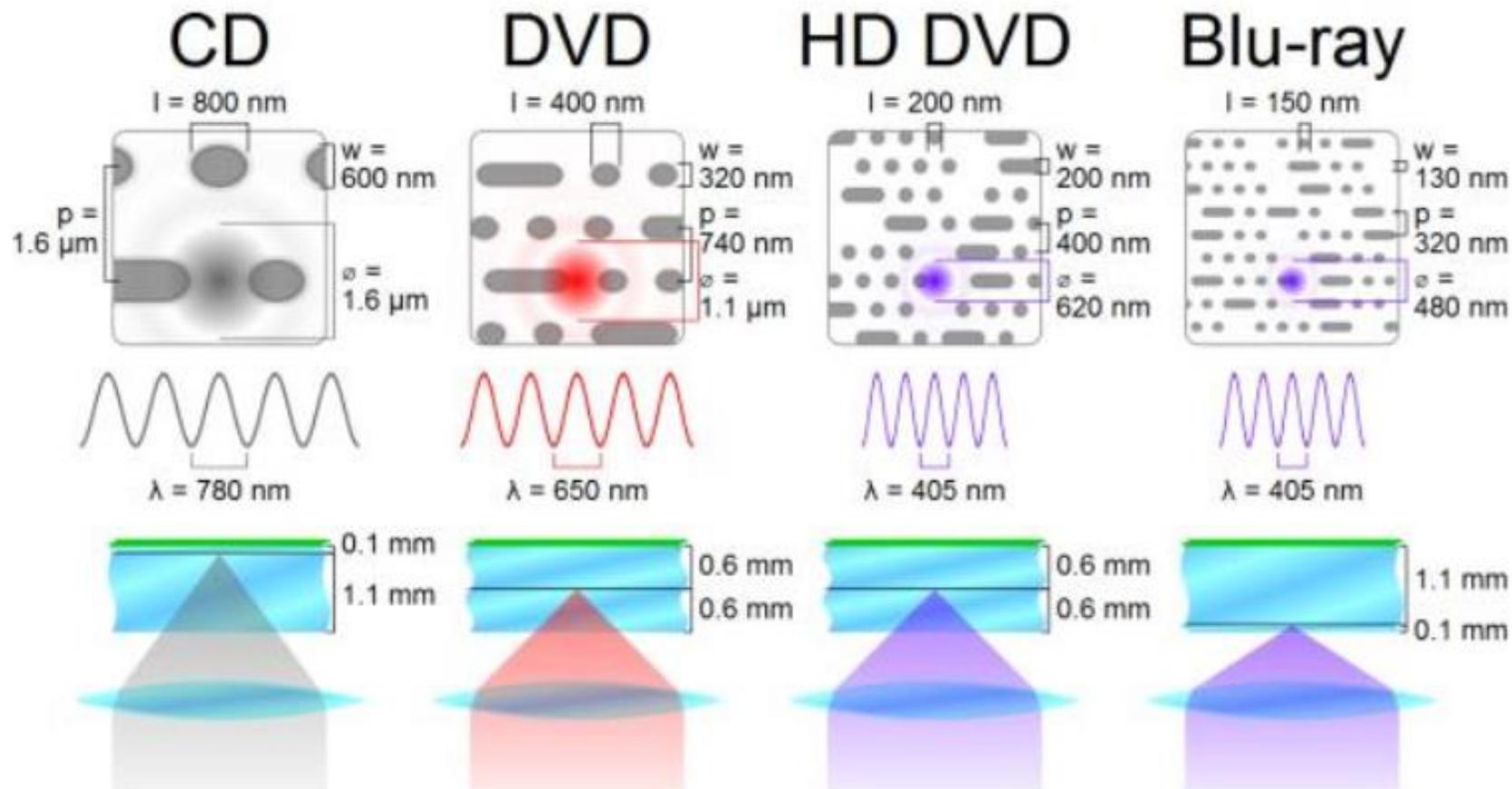
Kiolvasás



- **Fényforrás** - 780 nm lézerdióda
- **Fókuszálás** - olvasás síkjában a lézernyaláb átmérője 1,7 μm
- **Autofókusz** megfelelően kialakított optikai-finommechanikai-elektromechanikai rendszerrel (optomechatronika)
- $\lambda/4$ lemez – interferencia a *land* és a *pit* között

CD FEJ SZABÁLYOZÁSA (KVADRÁNS FOTODIÓDA)

Az optikai adattárolók összehasonlítása

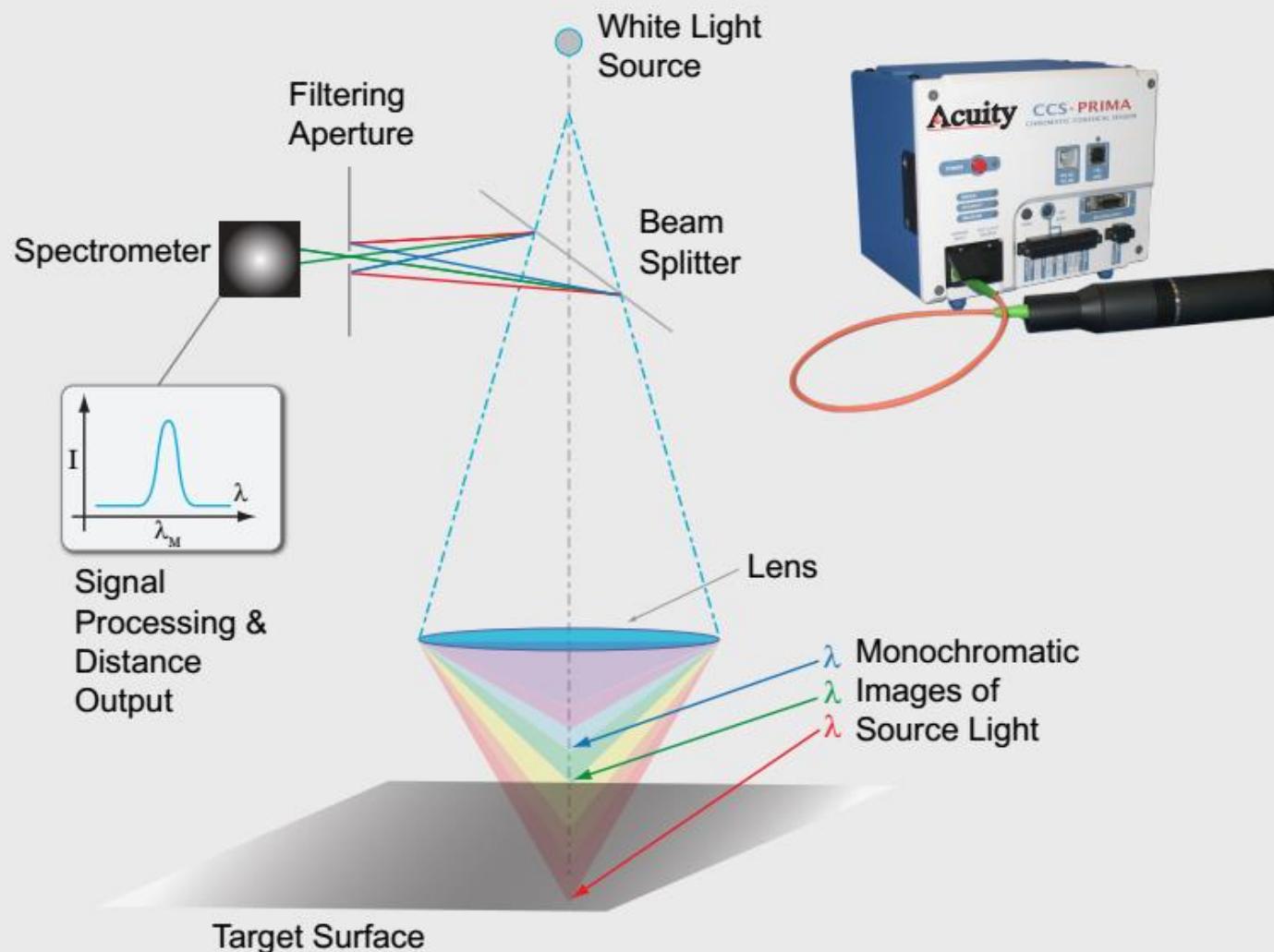


Optikai Távolságérzékelők (Konfokális Távolságérzékelő)

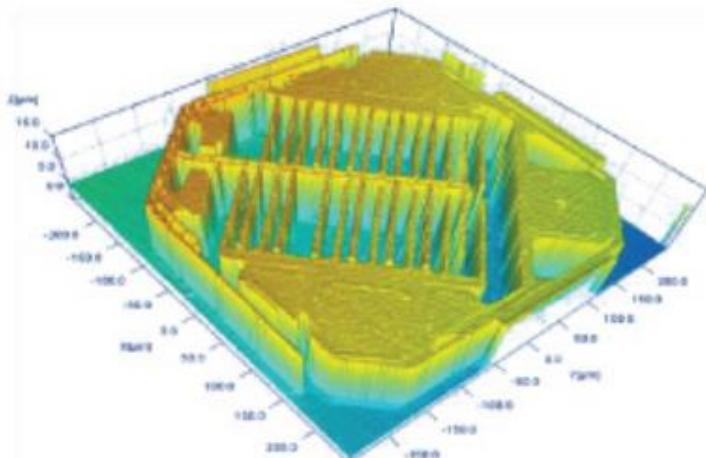
- Működési elve a fénytörés (fókuszpont helyének) hullámhossz függésén alapul.
 - Fényforrás: fehér fény, melynek különböző hullámhosszúságú összetevőit a lencserendszer eltérő távolságban fókuszálja.
 - A céltárgyról visszavert fény egy lyukszűrőn csak a céltárgyra eső fókusztávolságú fény halad át,
 - melynek hullámhosszát spektrofotométer méri.
- Előnyök
 - Nanométeres nagyságrendű felbontás
 - Közel anyagfüggetlen
 - Kisméretű mérőpont
 - Átlátszó anyagok vastagságmérése egy oldalról
 - Átlátszó, rétegelt anyagok rétegvastagságainak a mérése
 - Tükörfényes felületek mérése
- Kötöttségek
 - Korlátozott érzékelési távolság (0,3 ... 30 mm)
 - A fénynyalábon alapuló mérés tiszta környezetet feltételez



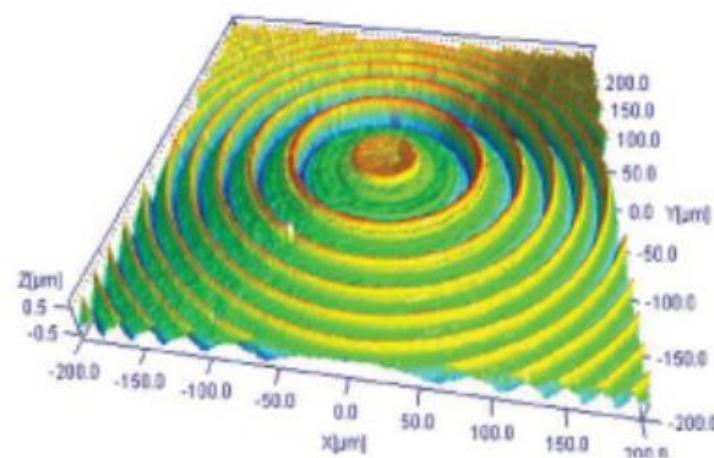
Optikai Távolságérzékelők (Konfokális Távolságérzékelő)



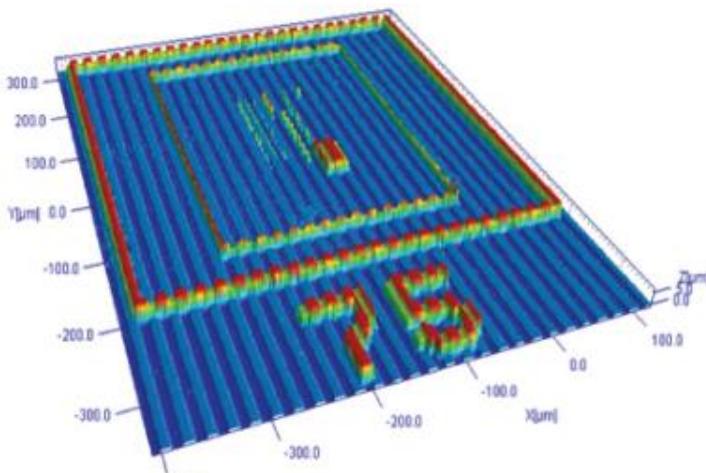
Optikai Távolságérzékelők (Konfokális Távolságérzékelő)



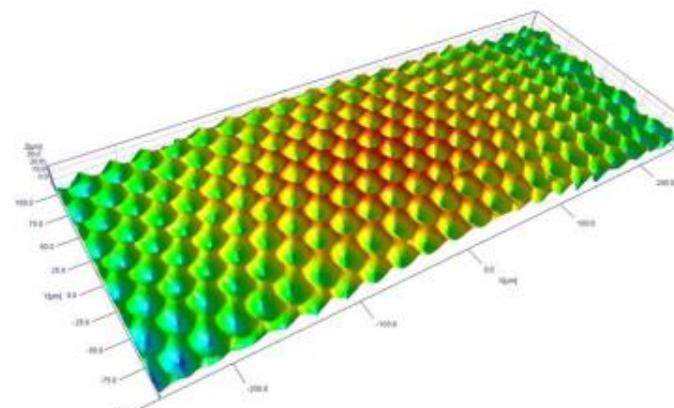
MEMS Profiling (1.5 μm X 1.5 μm sampling)



Specialty Lens Profile (1 μm X 1μm sampling)



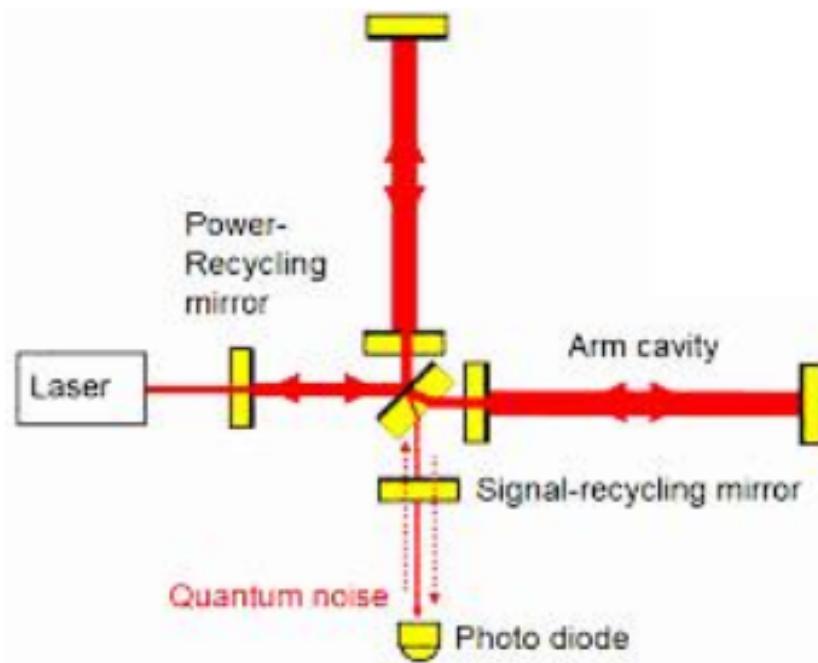
Chrome-Glass Mask Microtopography (1 μm X 1μm sampling)



Wasp Eye Surface Topography (5 μm X 5μm sampling)



Interferometria



Optikai úthossz változás

érzékenyen detektálható

(Id. Gravitációs hullám

interferometriás mérése 10^{-14} m

felbontással)

Előnyök:

Nincs elektromos vagy mágneses zavarás, nagy érzékenység/felbontás ($\lambda/2, \lambda/4, \lambda/8, \lambda/16\dots$)

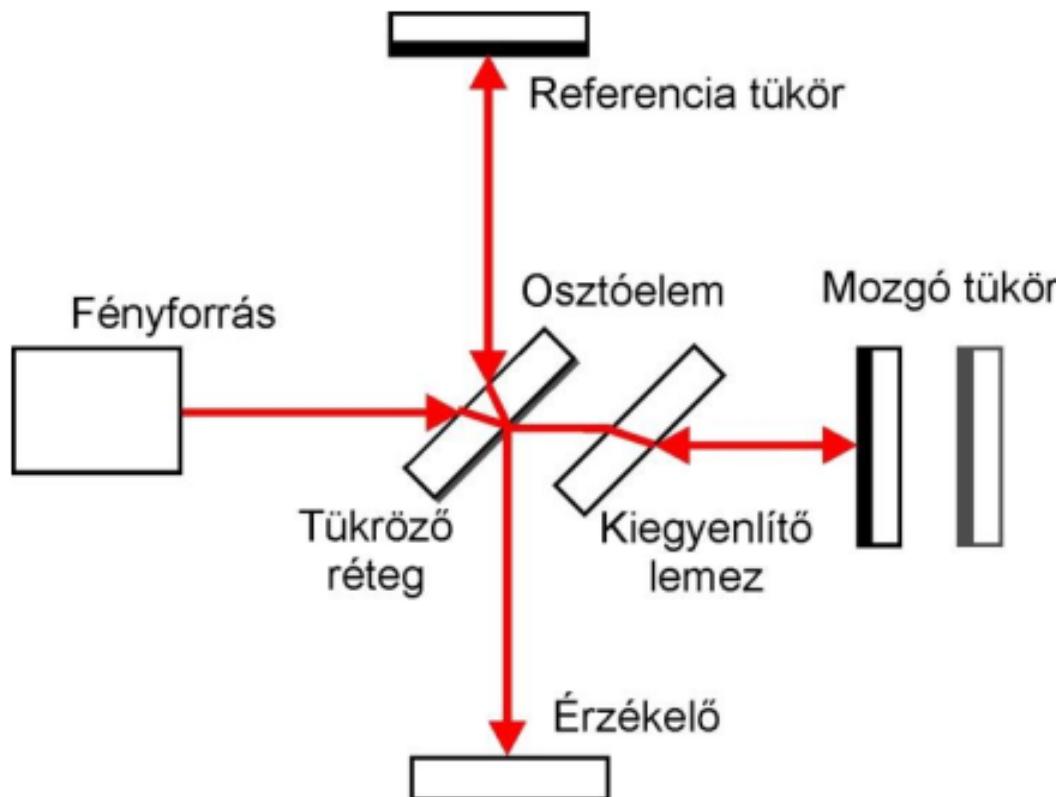
Hátrányok:

Bonyolultabb kiértékelés, hőmérsékletváltozásra érzékeny lehet

A Michelson-interferométer

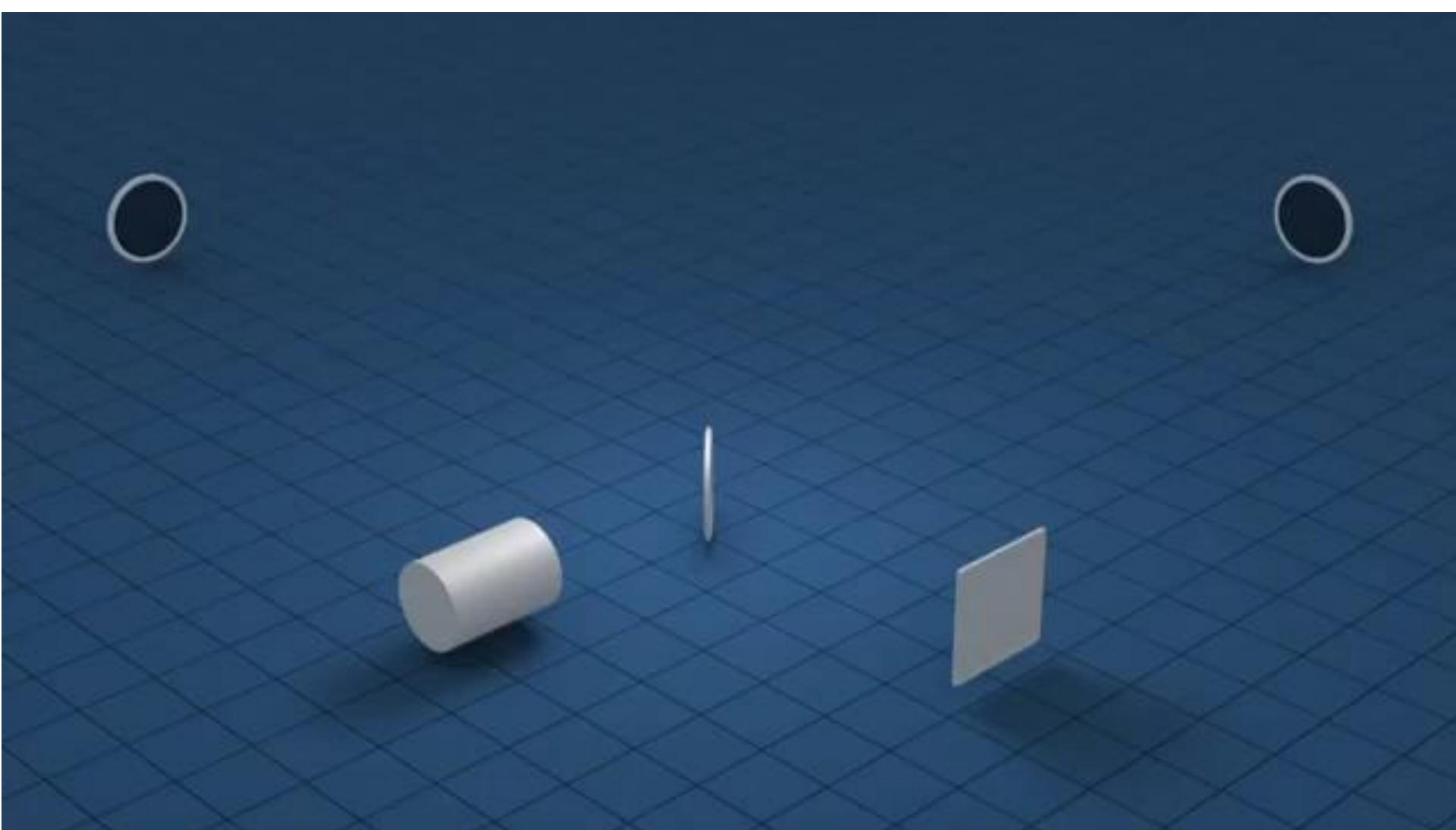
Tartalmaz egy monokromatikus fényforrást. Az innen kilépő – és esetleg kitágított – hullámfront eléri az osztóelemet, melyet elhagyva a keletkező hullámok egyrészt referencia, másrészt a mozgatható tükör irányába haladnak tovább.

Ezkről reflektálódva az osztóelem túloldalán találkozva hozzák létre az interferencia jelenségét. Az egyik sugárútban található lemez az üveganyagban megtett sugárutak azonosságát hivatott biztosítani.



A hullámhossz tört részével történő elmozdulás (azaz kicsiny fázis-változás) is nagy pontossággal mérhető.

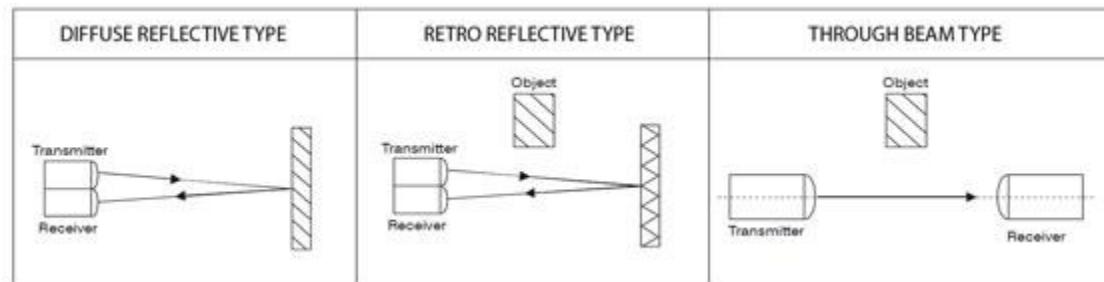
Interferometria



Optikai Távolságérzékelők (Optikai közelítés érzékelők)

A mérés módja szerint lehet:

- Reflexiós
 - Tárgy (Diffúz)
 - Tükör, prizma (Retro-reflektív),
- Transzmissziós



Felhasználás szerint

- Analóg
 - Távolság érzékelés, akadályok elkerülése, egyszerűbb mérési feladatok, stb.
- Kapcsoló
 - Fénysorompók, gyártósori jelenlét érzékelők, végállás-, referencia pozíció-, közelítés kapcs., stb.
- Számláló
 - Inkrementális elmozdulás vagy szöghelyzet érzékelők,
 - Impulzusok számolása révén mér.

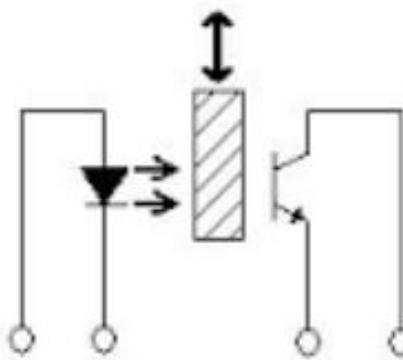


Optikai Távolságérzékelők (Optokapuk)

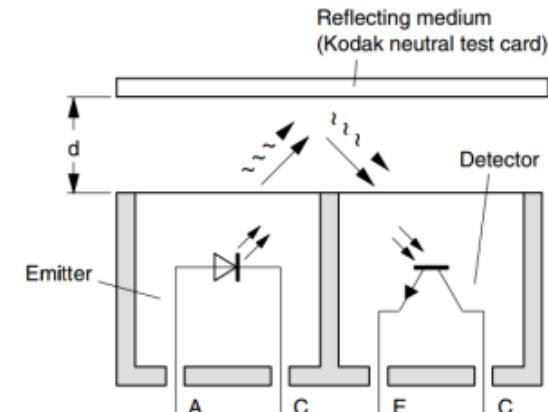
Optikai kapcsoló: a fényút szabad, vagy valami eltakarja – végálláskapcsoló, pozíciójel



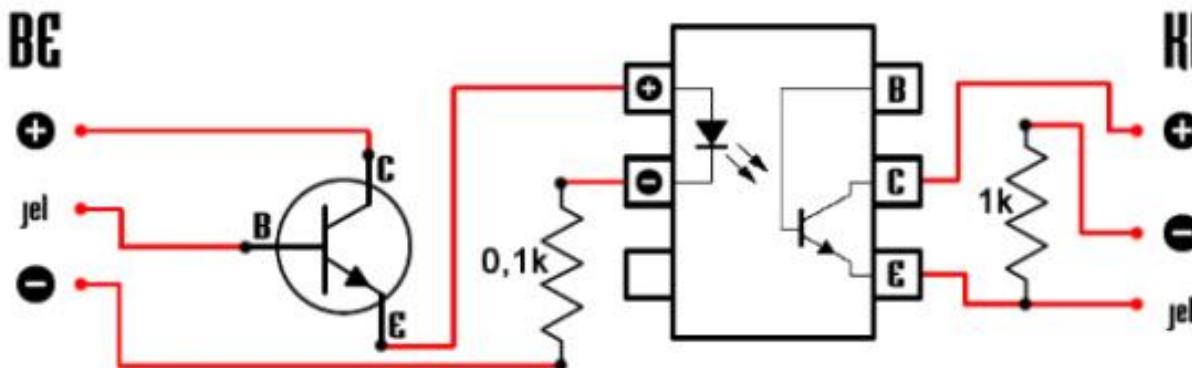
Optocsatoló: galvanikus leválasztás



Transzmissziós optokapu



Reflexiós optokapu



Optikai Távolságérzékelők (Optokapuk)

Az optokapu egy sugáradóból (infravörös LED) és egy sugárvevőből (fotoranzisztor) áll.

- Az adó által kibocsátott sugárzás külső behatásra megszüntethető vagy legyengíthető.
- A fototranzisztoron átfolyó (I_{CE}) áram a megvilágítás függvénye.
- Munkapont beállítás az előtétellenállások megfelelő

Alkalmazás:

- analóg távolságérzékelés, Kapcsolás, Számlálás

Kialakítás szerint:

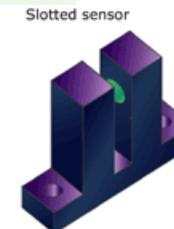
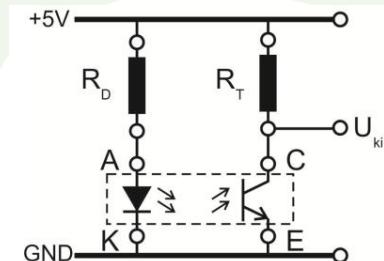
- Transzmissziós optokapuk, (M5A mérés)
- Reflexiós optokapuk, (M5B, M4, M10 mérés)

Előnyei:

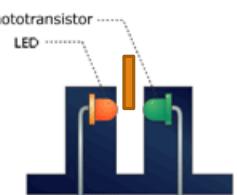
- egyszerű használat és felépítés, költséghatékony.

Hátrányai:

- Szennyeződésre, környezeti fényre, reflektáló felületre érzé

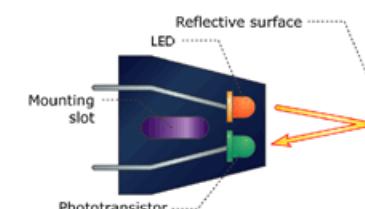


Slotted sensor



Phototransistor

LED



Mounting slot

Reflective surface

LED

Phototransistor



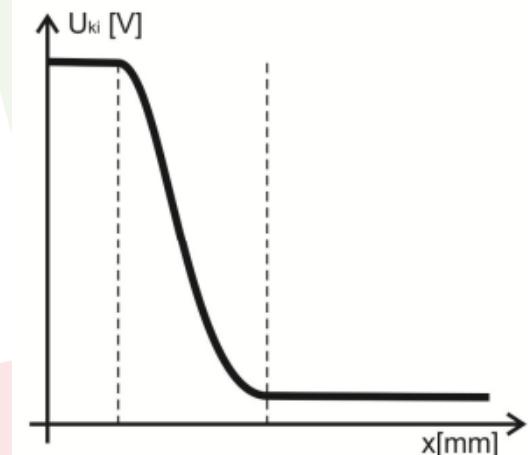
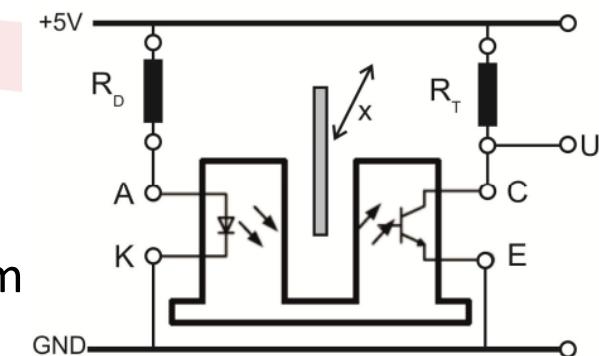
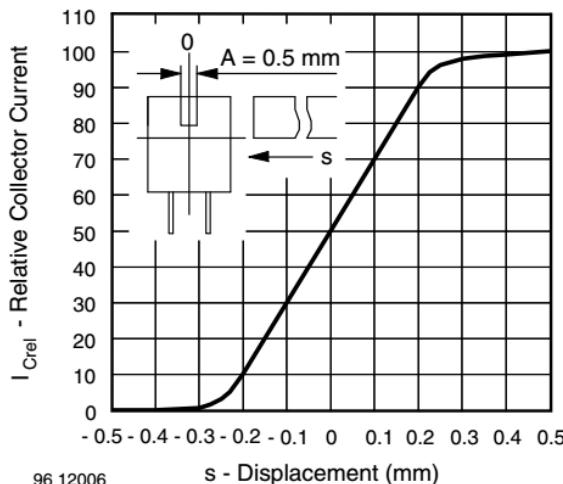
Optikai Távolságérzékelők (Transzmissziós Optokapu, mint Analóg távolságérzékelő)

az adó és a vevő egymással szemben helyezkedik el.

a tárgyat a sugárzás útjába helyezzük.

A kapcsolási (mérési) tartomány jellemzően $<1\text{mm}$.

A kapcsolási karakterisztika meredeksége a tokozás résm



Transzmissziós optokapu karakterisztikája
a fenti kapcsolás szerint.

Optikai Távolságérzékelők (Reflexiós Optokapu, mint Analóg távolságérzékelő)



Test Condition and Arrangement for Collector Current

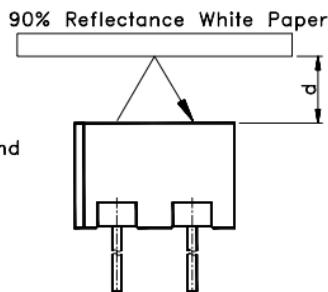
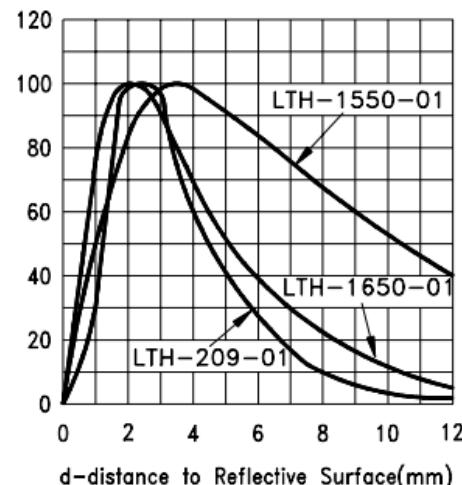


Fig.8 Relative Collector Current vs. Object Distance

Relative Collector Current (%)



2.5 mm

0.8 mm

2 mm

az adó és a vevő optikai tengelyei nem esnek egybe, szöget zárnak be egymással, közel párhuzamosak.

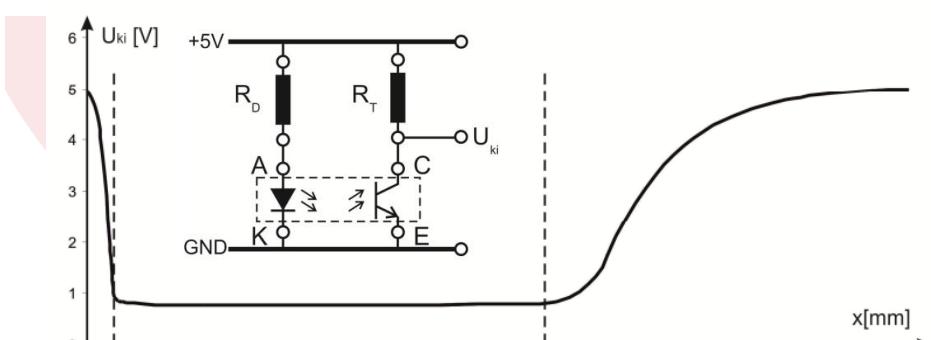
Az érzékelési tartomány néhány mm ... cm-es nagyságrendű.

Érzékeny a tárgy fényvisszaverő képességére.

- Különböző anyagú testek távolságmérése más kimenetet ad.
- Egyszerű fekete-fehér kódtárcsa alkalmazható inkrementális jeladóhoz.

Érzékeny a környezeti fényre.

- A nyitott kialakítás miatt.
- A fényforrás modulációjával kiküszöbölhető a hatása.
- A detektorra eső fényintenzitás 10-ed, 100-ad része is lehet mint a transzmissziós nál.



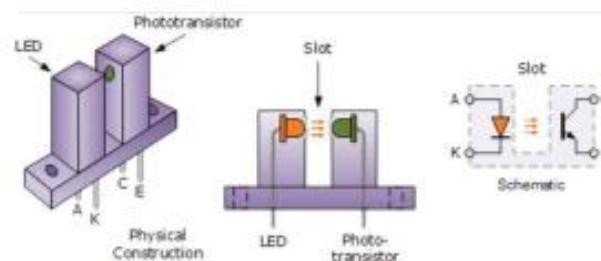
(Tárgy-) Reflexiós optokapu karakterisztikája a fenti kapcsolás szerint.



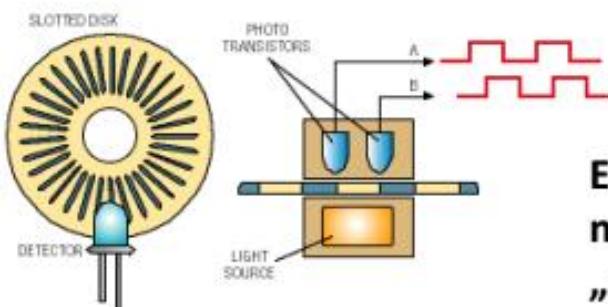
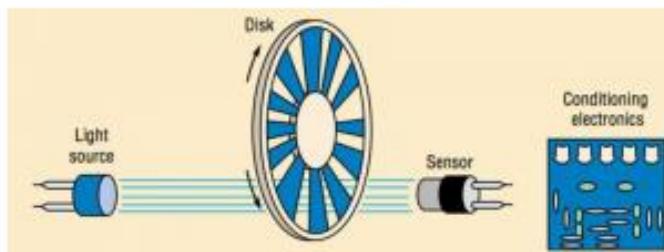
Inkrementális elfordulás érzékelés optokapuval

Optikai érzékelés

Egyszerű módszer forgó vagy egyenes vonalú elmozdulás érzékelésére – **optokapu + kódtárcsa**



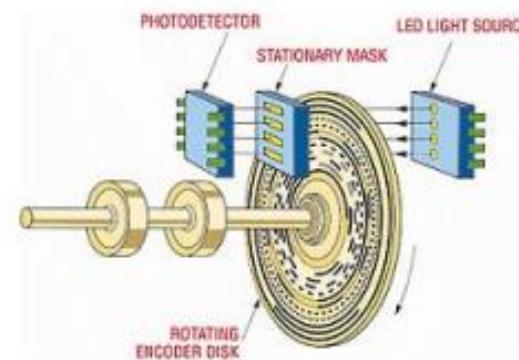
Inkrementális jeladó

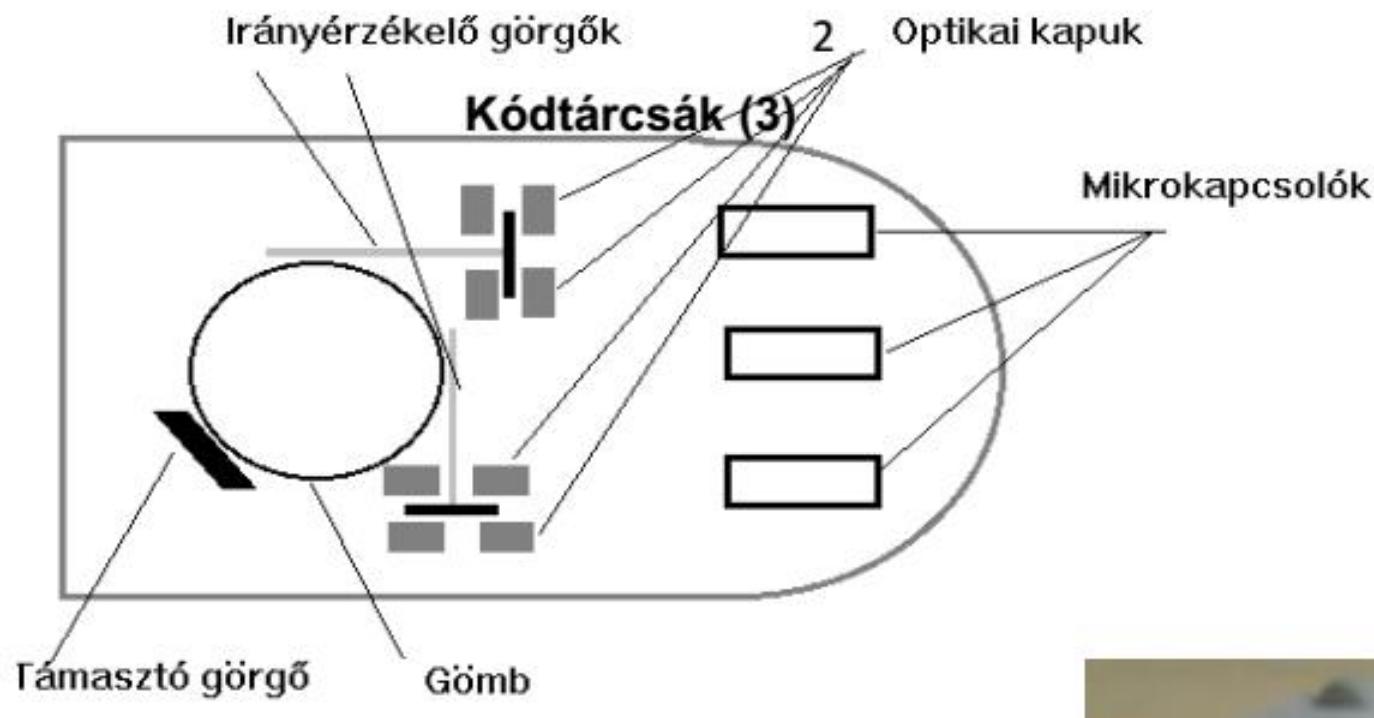


Abszolút pozíció érzékelés



Erre példa a görgővel mozgatott kódtárcsás „mechanikai egér”.



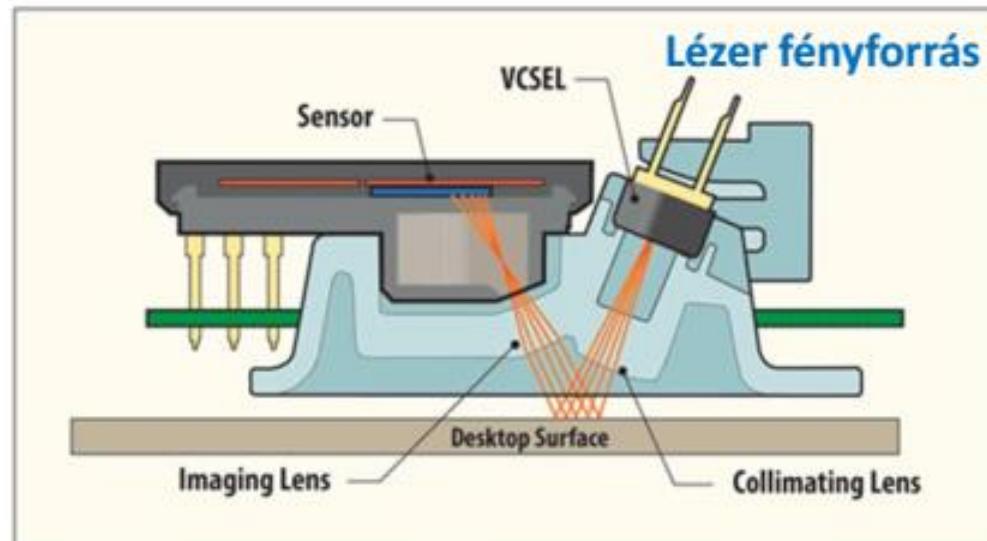
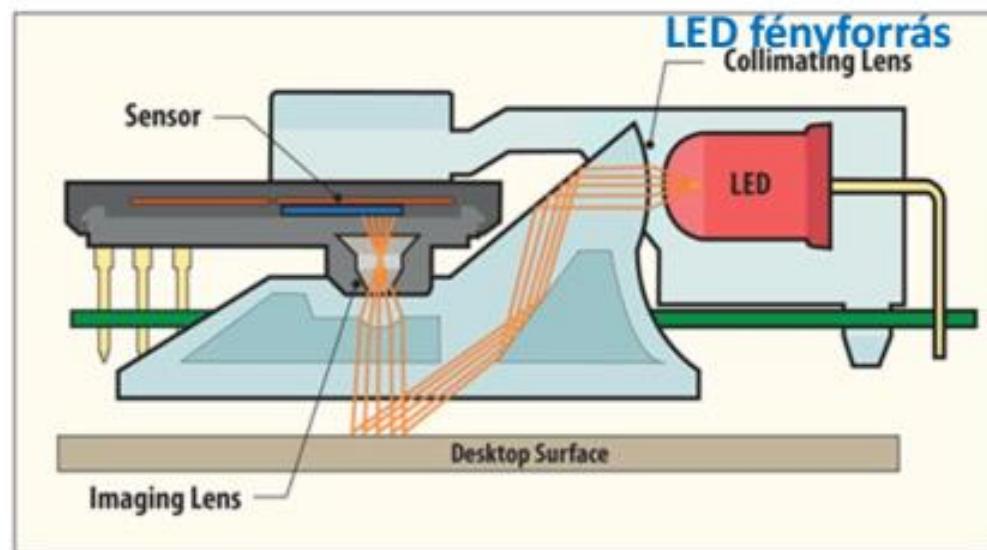


Optomechanikus egér működési elve (beli szerkezet)

**Optomechanikus jelátvitel
megvalósítása az opto-
mechanikus egérben**



Optikai egér



Szenzor – kis pixelszáámú kamera.

Gyors képfelvétel (1000 kép/sec).

Gyors képkírtékelés – az egymás utáni képek összehasonlításából az **elmozdulás iránya és nagysága** kiszámítható.

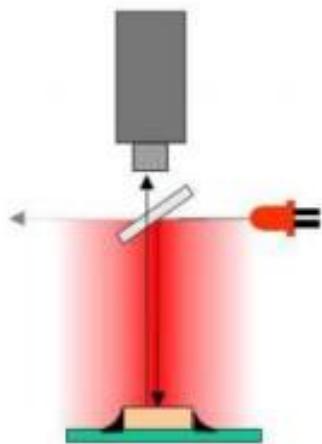
- Nincs mozgó alkatrész
- Bármilyen felületen alkalmazható
- Finom felbontású, ugrásmentes működés
- Szennyeződésekre nem érzékeny

Képkiértékelés, képfelismerés

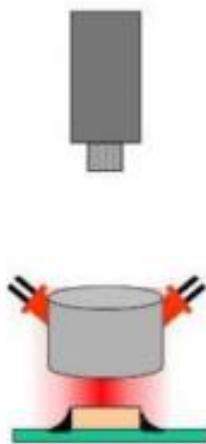
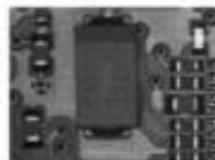
A vizsgálandó probléma kiemelése kamerával, kamerákkal felvett képeken
Automatikus kiértékelés.

Mintaprobléma: beültetett alkatrészek NYÁKba forrasztásának minősítése

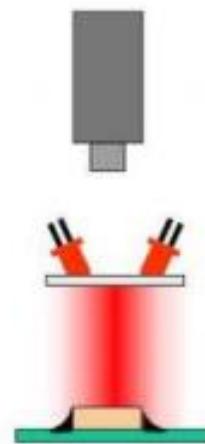
A megvilágítás helyes megvállasztása



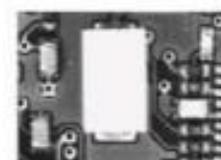
Közvetlen
megvilágítás



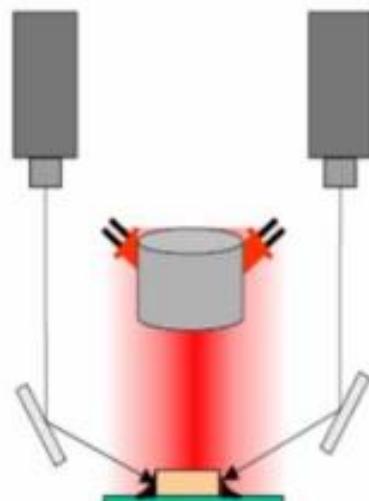
Indirekt diffüz
megvilágítás



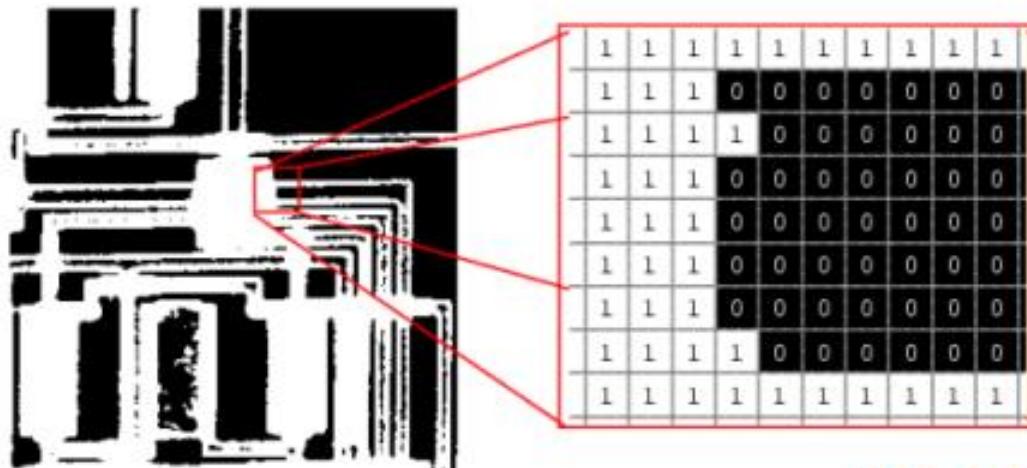
Szög alatti diffüz
megvilágítás



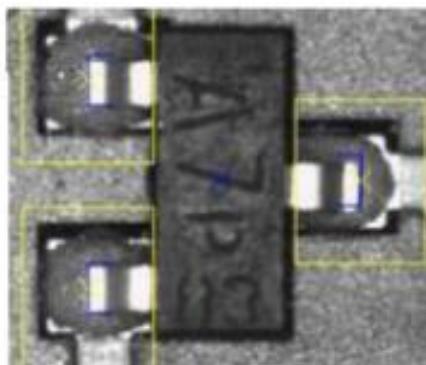
A képalkotás helyes
megvállasztása



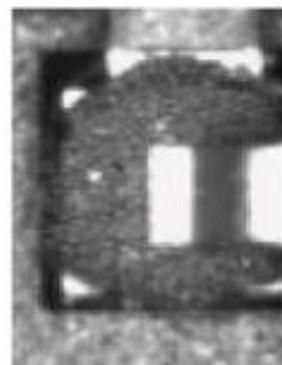
Képfeldolgozás – kontrasztkiemelés, élek kiemelése



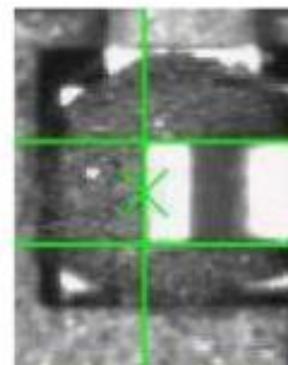
Különböző alakzatok azonosítása



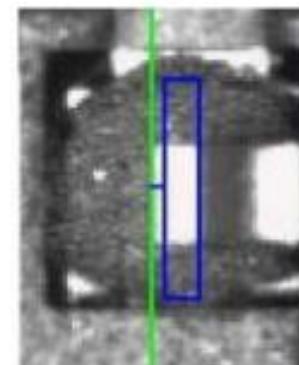
a)



b)



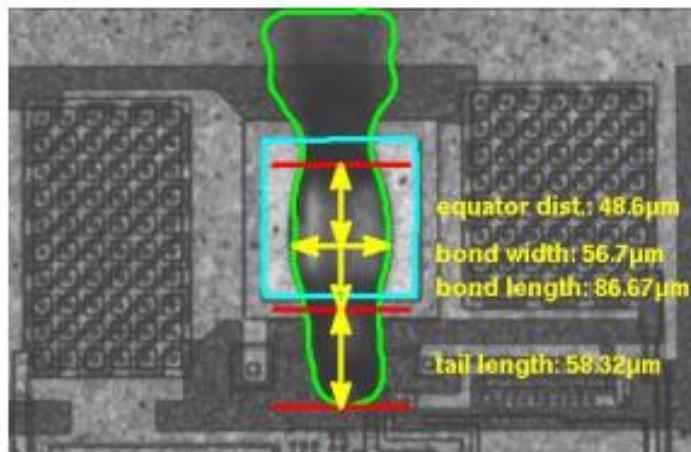
c)



d)

Képfeldolgozási feladatoknál hasznos az objektumok határvonalának kijelölése (**edge detection**).

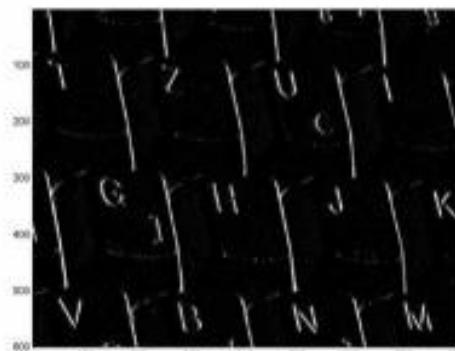
- Akkor tudjuk az objektumot a háttéről elválasztani, ha világossága (színe, textúrája) eltérő.
- Ott keresünk éleket, ahol világos és sötét területek érintkeznek. Az élek keresése élkiemelést és az élkijelölést jelenti.



Eredeti kép



bipoláris



unipoláris él megjelenítés

Mintapélda: sávdetektálás (támogatott vagy autonóm vezetésnél)



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

- a) bemeneti kép
- b) szűrés
- c) éldetektálás
- d) AOI / ROI
- e) Hough transzformáció
- f) Sávdetektálás (kimenet)

(University of Aucland)

További olvasnivalók:

<http://www.mogi.bme.hu/TAMOP/mikromechanika/math-index.html>

http://www.mogi.bme.hu/TAMOP/muszaki_optika/index.html

Ellenőrző kérdések

1. Jellemezze a LED és lézerdióda fényforrásokat! Mi a működésük alapja?
2. Milyen optikai elven működő elmozdulás, vagy távolságérzékelési eljárásokat ismer? Ismertesse működésük alapjait!
3. Milyen pozícióérzékeny (fényfolt pozíciója) detektorokat ismer? Mondjon példát az alkalmazásukra!
4. Milyen optikai érzékelési elvek találhatóak meg egy számítógépes egérben?
5. Milyen típusait és felhasználási módjait ismeri a LEDet és fototranziszort tartalmazó optoelektronikai átalakítóknak? Szemléltesse a felépítésüket és mondjon példát az alkalmazásukra!



KÖSZÖNÖM A FIGYELMET!

BOJTOS Attila
BME - MOGI Tanszék
bojtos@mogi.bme.hu

Szenzorteknika Ellenállásváltozás elven működő érzékelés

BOJTOS ATTILA
BME - MOGI TANSZÉK



M Ú E G Y E T E M 1 7 8 2



Tematika

Bevezetés a szenzorteknikába

- csoportosítás,
- méréstechnikai tulajdonságok,
- Jelfeldolgozás

Anyagszerkezet

- Atomszerkezet
- Kémiai kötések
- Sávszerkezet
- Félvezetők
- Fémek

Érzékelési elvek fizikai alapjai (szenzor)

- Termikus elvek, hőmérsékletmérés
- Optikai-elvek
- **Ellenállásváltozás elvén működő érzékelés**
- Kapacitás
- Mágneses mérési elvek
- Piezoelektronos mérési elvek
- Akusztikai elvek

Érzékelési módszerek, alkalmazások (jelátalakító)

- Hossz-, távolság-, elmozdulás-, elfordulásmérés szenzorai
- Sebesség-, térfogatáram-, gyorsulásmérés szenzorai
- Nyomás-, erő-, nyomatékmérés szenzorai
- (Kémiai érzékelés szenzorai)

Aktuátorok

- Motorok
- Piezoelektronos aktuátorok
- Magnetostrikciós aktuátorok

Integrált érzékelő és beavatkozó rendszerek (vendégelezés)

- Technológiai alapok, MEMS, NEMS, OEMS
- Szenzorhálózatok, IoT



5. Előadás áttekintése

- Fontosabb törvényszerűségek
 - Feszültségosztó
 - Wheatstone híd
- FSR
- Potenciometrikus jelátalakítók
- Nyúlásmérő ellenállás



Mit? Hogyan?

Érzékelő: a mérendő fizikai, kémiai, biológiai, stb. mennyiséget alakítja át mérhető, elektromos mennyiséggé.

Mit akarunk mérni?

- Elmozdulás
- Gyorsulás
- Forgás
- Erő
- Nyomaték
- Mechanikai feszültség
- Nyomás
- Áramlási sebesség
- Tömeg (súly)
- Sűrűség
- Viszkozitás
- ...

Hogyan tudjuk mérni?

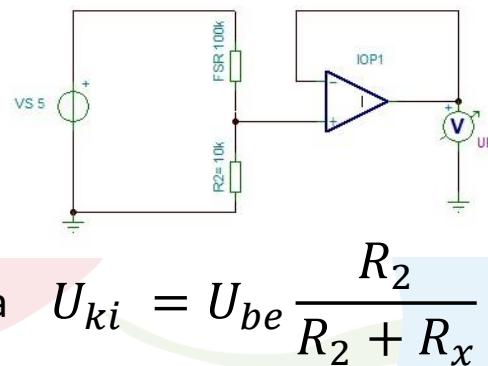
- Hőmérsékletváltozás (súrlódás)
- **Ellenállás, ellenállás-változás**
- **Piezorezisztivitás**
- Kapacitásváltozás
- Piezoelektromosság
- Mágneses indukció
- Optikai módszerek
- Sugárzás (Doppler effektus)
- Áramlási sebesség
- ...



Ellenállás változás



- Számos passzív érzékelő mutat ellenállás változást a mért mennyiség megváltozásának hatására.
- Néhány példa:
 - Erő / nyomásmérés: **FSR (Force Sensitive Resistance)**
 - Nyúlás mérő béllyeg,
 - Fotorezisztor,
 - Magnetorezisztor,
 - Termisztorok, (NTC, PTC),
 - Fém ellenálláshőmérő, ...
- Előnyük az egyszerű kivitel és jelfeldolgozás.
 - A névleges értékhez viszonyított relatív **nagy ellenállás változás** eszközöket egyszerű feszültségesosztóba kötve is használhatjuk.
 - A *kis megváltozás* méréséhez Whetstone hidat kell alkalmazni.
 - A kimenet impedanciaillesztése általában szükséges, mert a kis bemenő ellenállású műszer leterheli a mérőkört és meghamisítja a mérési eredményt.
- Figyelembe kell venni a tápfeszültség áramának fűtő hatását.



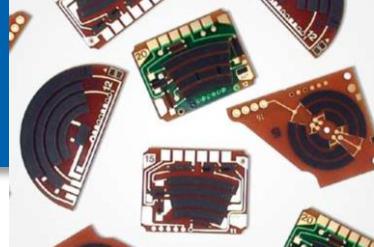
$$U_{ki} = U_{be} \frac{R_2}{R_2 + R_x}$$

FSR (Force Sensitive Resistance)

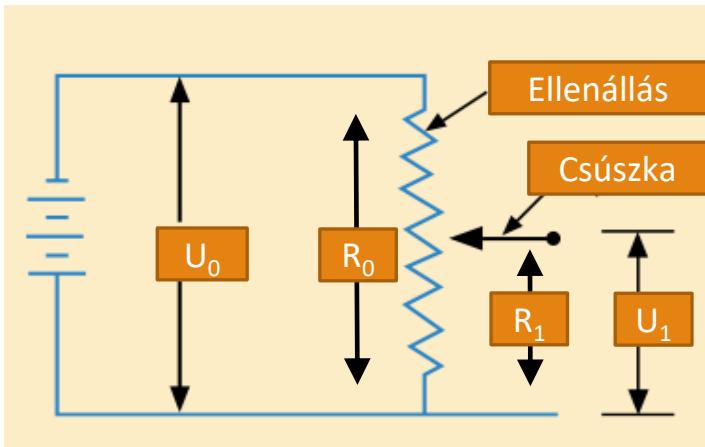
- Ellenállás változás elvén működő taktilis erő-, vagy nyomásérzékelő.
- A felületére (merőleges) kifejtett terhelés hatására változó ellenállást egy villamosan vezető polimer réteg deformációja idézi elő.
- Fő jellemzője a kis vastagság és a hajlékony kivitel.
 - PET hordozók közötti rezisztív réteg ellenállása változik.
 - A hordozó fóliákra felgőzölt fém réteg a szenzor kivezetése.
- Kialakítása lehet
 - Egypontos, vagy
 - Matrix elrendezésű (tetszőleges alakú).
- Jellemző paraméterek:
 - Vastagság: ~0,5 mm (szélessége változatos)
 - Névleges ellenállás: > 1 MΩ
 - Tipikus működési tartomány: 1 MΩ ... 1 kΩ / 0,5 ... 100 N/cm²
 - Erősen nemlineáris,
 - Élettartam: 10^6 (1 kg/cm²; 1 Hz)
 - Tipikus válaszidő: 2-3 ms
 - Mérési hőmérséklet: -40..+185 °C



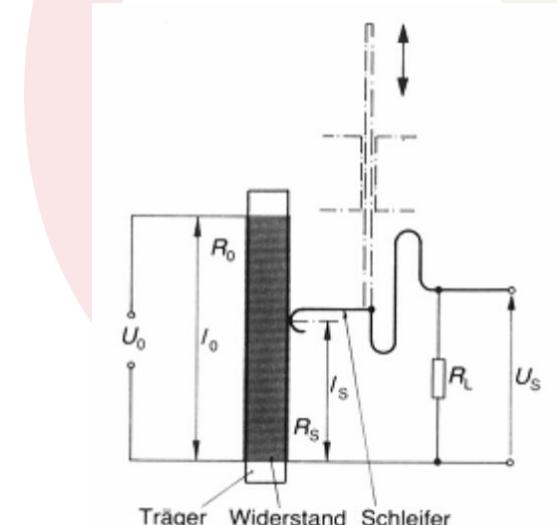
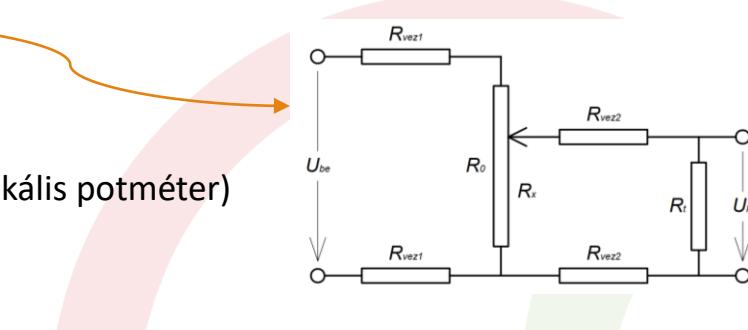
Ellenállásváltozás - Potenciométer



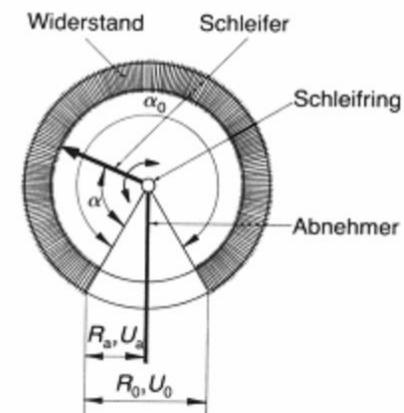
- Elmozdulással / elfordulással arányos ellenállás/feszültség változás
 - Csak terheletenél lineáris
- Kialakításuk:
 - Rétegbevonatos ellenállás,
 - Felcsévélt ellenálláshuzal (helipot, helikális potméter)
 - Nagyobb megbízhatóság, stabilabb kivitel,
 - Lépcsőzetes karakterisztika.
- Hibaforrások: Súrlódás, kopás.



$$U_1 = U_0 \frac{R_1}{R_0}$$



$$U_S = U_0 \frac{l_s}{l_0}$$



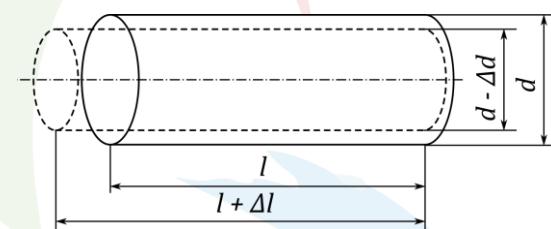
$$U_\alpha = U_0 \frac{\alpha}{\alpha_0}$$

Ellenállásváltozás mechanikai feszültség / alakváltozás hatására

- A hossza mentén állandó keresztmetszetű rúd ellenállása:
- Ha a rúdra húzóerő hat,
 - a hossza megnövekszik,
 - a keresztmetszete lecsökken,
 - de a fajlagos ellenállása is változhat.
- A mechanikai feszültség által keltett
 - Rugalmas alakváltozás: **tenzometrikus hatás**
 - fajlagos ellenállás változás: **piezorezisztív hatás**
- Rugalmas deformációt mérő ellenállás → nyúlászmérő bélyeg
 - A huzal deformációja a rugalmassági határán belül maradjon.

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

ρ : fajlagos ellenállás
 l : hossz
 A : keresztmetszet



Nyúlásmérő bélyeg

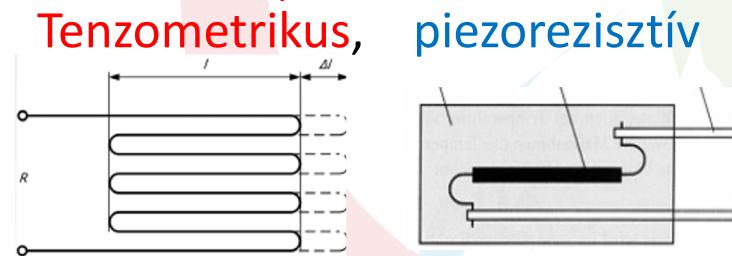
- A bélyegállandó a legfontosabb szenzorjellemző:
 - megadja a kapcsolatot a mechanikai és az elektromos jellemzők között
 - mekkora ellenállás-változás tartozik – adott nyúláshoz

- Alapegyenlete:

$$k = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} = (1 + 2v) + \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\frac{\Delta l}{l}} \rightarrow k\varepsilon = \frac{\Delta R}{R}$$

k : gauge faktor –
bélyegállandó
 v : Poisson-tényező
 $dl/l = \varepsilon$: fajlagos nyúlás

- Komponensek:



- Nyúlásmérésre való alkalmazás, érzékenység növelése, jel/zaj viszony javítása:
 - Hossz növelése az alakváltozás irányában → meander forma,
 - Keresztirányú hatás csökkentése → vastagítás a fordulóknál,
 - Nagy piezoresisztív hatást mutató anyagok → félvezetők

Nyúlásmérő bélyeg

Fémekben:

A **tenzometrikus hatás** a domináns a fajlagos ellenállásuk közel állandó.

Névleges ell.: 120, (300), 350, (600), 1000 Ω

Tipikus gauge-factor: **1.8 – 2.2**

Linearitás, 4000 $\mu\epsilon$ alatt ~0,1%

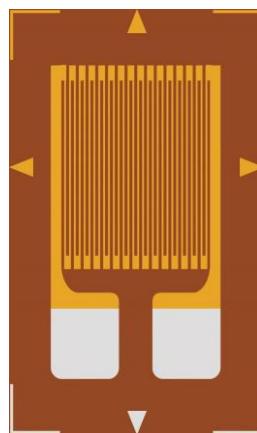
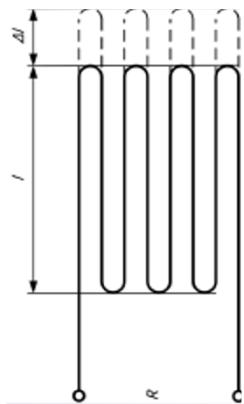
Legkisebb mérhető ny. ~0,1 $\mu\epsilon$

Élettartam: 10^6 - 10^7 (1000 $\mu\epsilon$)

Mérési hőmérséklet: -10..+100..150 °C

Kivitelük: huzal (elavult), fólia (maratással)

Anyaguk: Konstantán (58% Cu, 42% Ni),
Políimid hordozón.



A mért alakváltozás irányára

Félvezetőkben:

A **piezorezisztív hatás** a domináns a fajlagos ellenállás változása jelentős.

Névleges ell.: 120 Ω

Tipikus gauge faktor: **100 –120...1000 (C1, C2)**

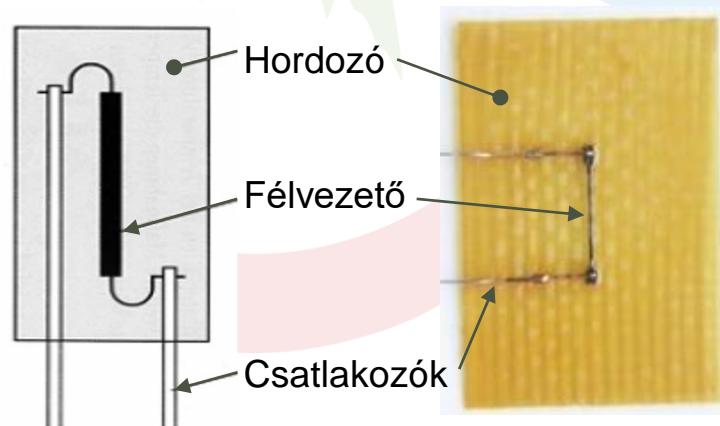
Linearitás, 1000 $\mu\epsilon$ alatt <1%

Legkisebb mérhető ny. ~0,001 $\mu\epsilon$

Élettartam: 10^6 (1000 $\mu\epsilon$)

Mérési hőmérséklet: -55..+150 °C

Kivitelük: Önálló, Érzékelőbe integrált (MEMS)

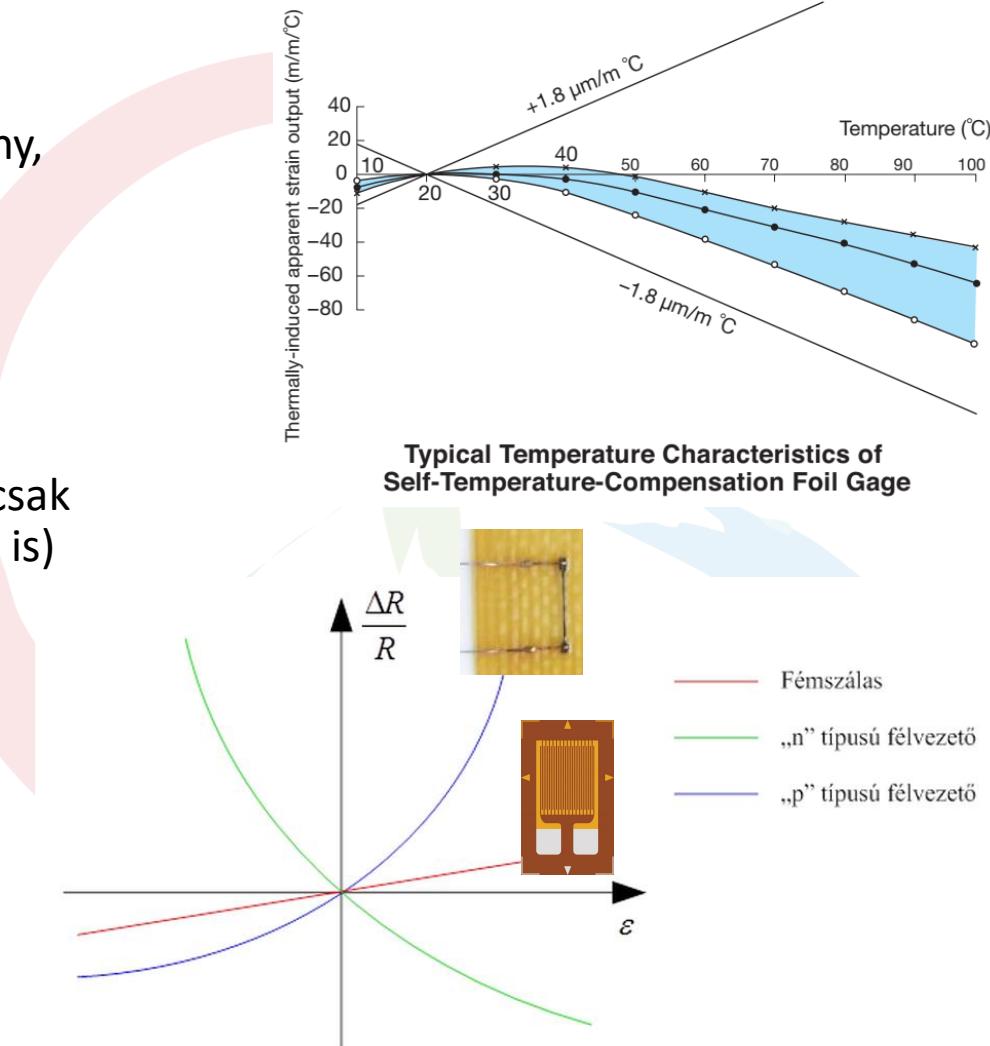


Nyúlásmérő bélyegek jellemző karakterisztikái

- Előnyök:
 - Egyszerűen használható,
 - elektromos zavarokra kevésbé érzékeny,
 - változatos kialakítás a különböző alkalmazásokra,
- Hátrányok:
 - Hőmérsékletváltozásra érzékeny
 - Általában kis elmozdulások mérhetők csak (vannak spec. bélyegek nagy nyúlásra is)

Jellegzetes hibák:

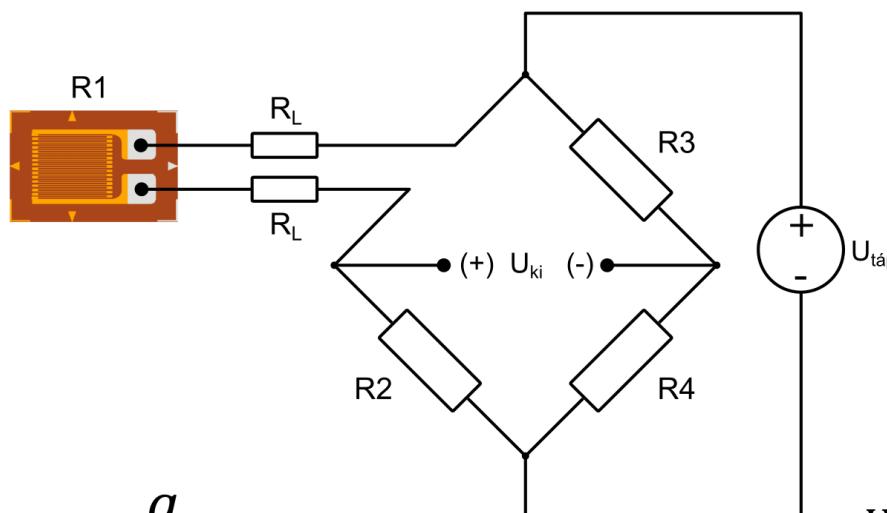
- Kúszás (együttfutás a mérőtesttel),
- Ismétlési, irányváltási hiba,
- Linearitási hiba,
- Nullhelyzet hőmérsékletfüggése.



Nyúlásmérő bélyegek jelének feldolgozása

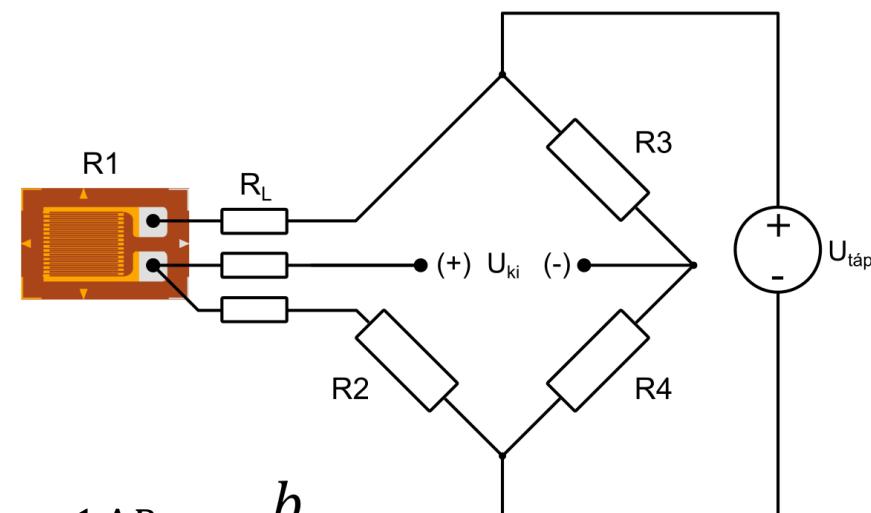
Nyúlásmérő bélyeg $\frac{1}{4}$ hidás bekötése 2 és 3 vezetékes módon.

- a) 2 vezetékes bekötés esetén a vezeték ellenállása hozzáadódik a nyúlásmérő bélyeg ellenállásához, ami a híd kiegyensúlyozatlanságát és hőérzékenységét fokozza. Csak rövid vezeték esetén javasolt..
- b) 3 vezetékes bekötés esetén 1-1 vezeték ellenállása adódik hozzá a nyúlásmérő bélyeghez és az R2 ellenálláshoz, ezáltal a hídág szimmetrikus marad és a vezetéken jelentkező hőmérsékletváltozások kiegyenlítődnek.



a.

$$\frac{U_{ki}}{U_{táp}} \cong \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R}$$



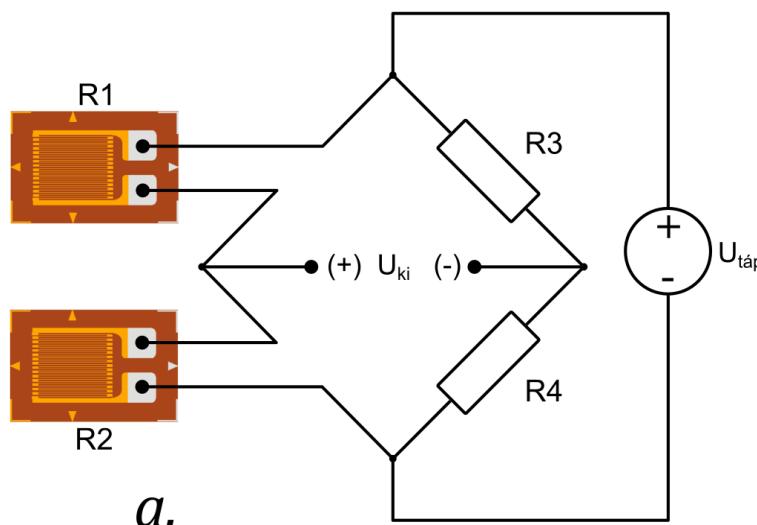
b.



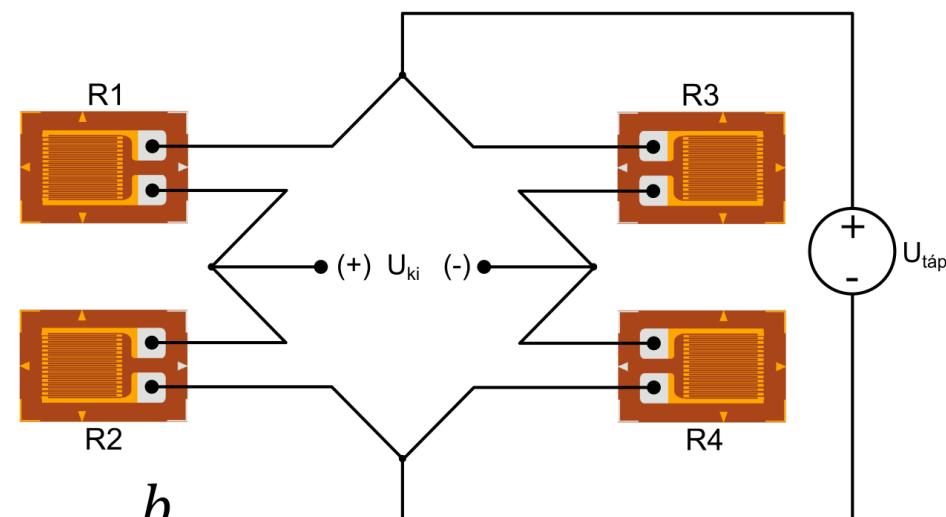
Nyúlásmérő bélgegek jelének feldolgozása

Fél- és teljes hidás elrendezés

- A hőmérsékletváltozás hatása automatikusan kompenzálsra kerül.
- Nagyobb érzékenység.



a.



b.

$$\frac{U_{ki}}{U_{táp}} = \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{R}$$

$$\frac{U_{ki}}{U_{táp}} = \frac{\Delta R}{R}$$



Nyúlásmérő bélyegek alkalmazása (erőmérő)

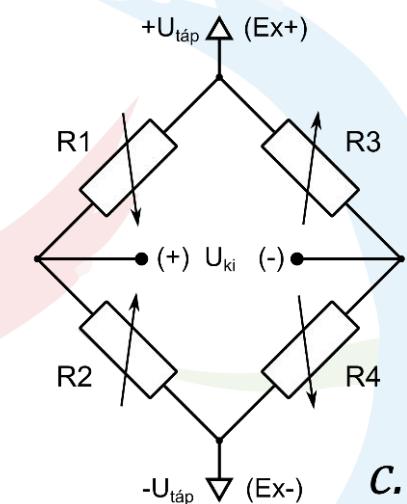
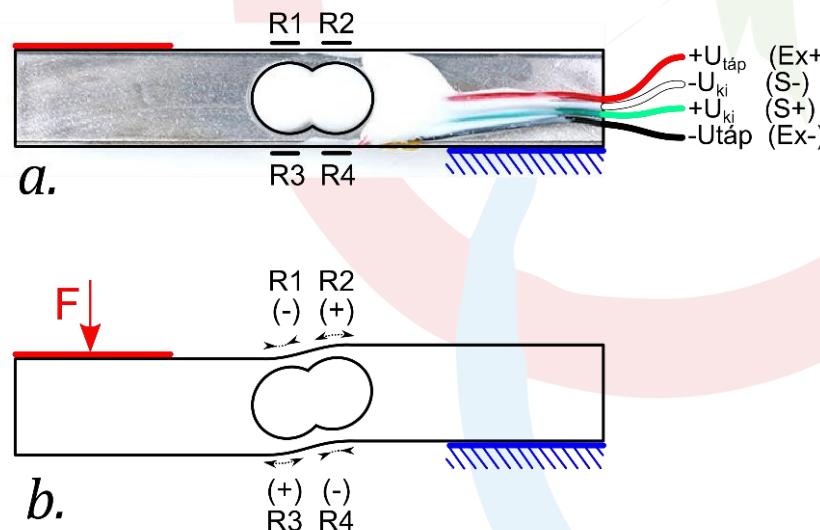
Nyúlásmérő bélyeges erőmérő cella elvi felépítése.

- a) Terheletlen állapot, nyúlásmérő bélyegek elhelyezkedése.
- b) Alakváltozás terhelt állapotban. A fajlagos nyúlás és az ellenállás változás előjele.
- c) A nyúlásmérő bélyegek elhelyezkedése a Wheatstone hídban. Jó minőségű cellák esetén a nullpontot, a hőmérsékleti kompenzárást és az érzékenységet a hídban lévő további ellenállásokkal állítják be.

A cella (vagyis a Wheatstone-híd) kimenő feszültsége az erőmérő érzékenysége vagy más néven cellatényezője (lásd adatlap: output sensitivity) alapján számolható.

$$U_{ki} = U_{táp} \cdot C \cdot \frac{F}{F_n}$$

U_{ki} – kimenő feszültség [mV],
 $U_{táp}$ – az erőmérő tápfeszültsége [V],
 C – Cellatényező [mV/V], megadása névleges terhelés esetén ($F=F_n$)
 F – Aktuális terhelés [N],
 F_n – Névleges terhelés [N].



Nyúlásmérő béllyegek alkalmazása (jelfeldolgozás)

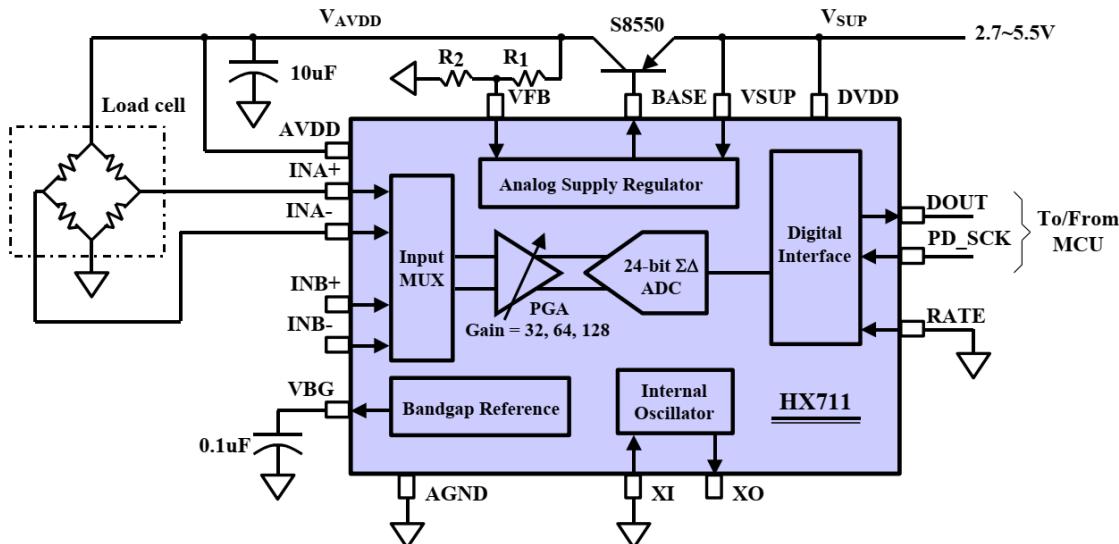


Fig. 1 Typical weigh scale application block diagram

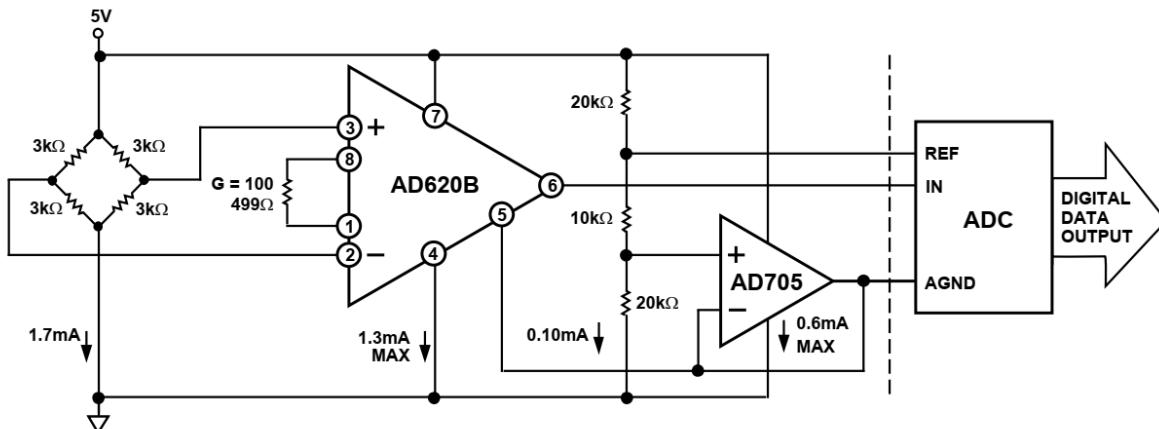


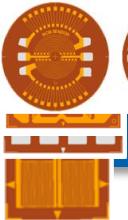
Figure 38. A Pressure Monitor Circuit that Operates on a 5 V Single Supply



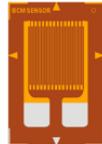
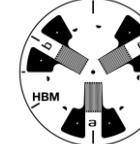
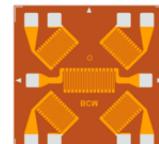
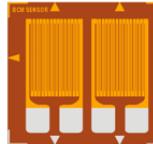
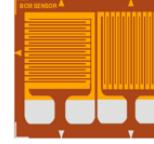
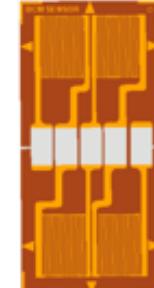
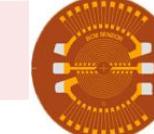
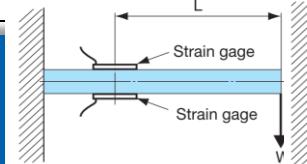
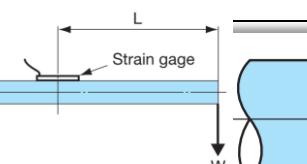
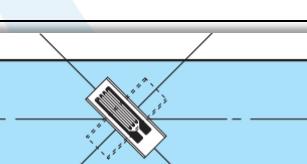
Nyúlásmérő béllyeges nyomásmérő analóg erősítése;
Forrás: AD620 erősítő adatlap.

Nyúlásmérő béllyeges erőmérő közvetlen AD átalakítása;
Forrás: Hx711 ADC adatlap.



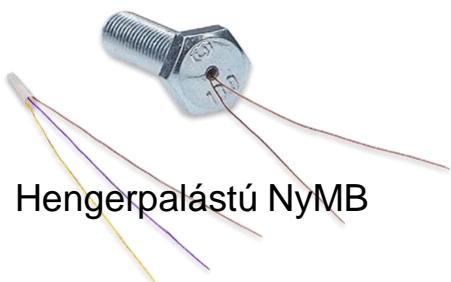


Yúlásmérő bélyegek főbb típusai (főirányok szerint)

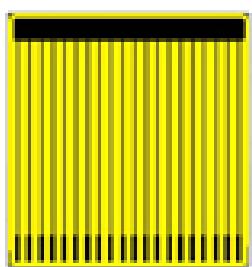
	a. Lineáris	b. 90°-os	c. Nyíró	d. Membrán és rozetta	
1. Negyed híd (1/4)					
2. Fél híd (1/2)					
3. Teljes híd (1/1)					
					



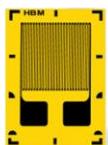
Speciális nyúlásmérő bélyegek főbb típusai (felhasználás szerint)



Hengerpalástú NyMB



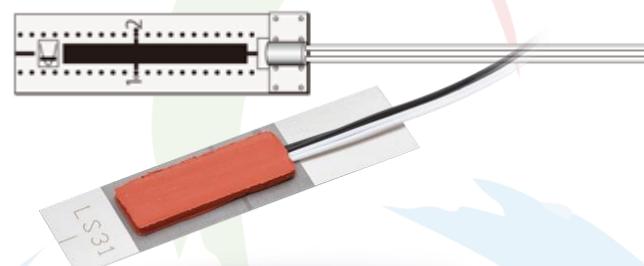
Repedésterjedés vizsgálathoz



Hőmérő bélyeg / Bélyeg hőmérséklet érzékelővel



Nagy nyúlásokhoz (+/-10%)



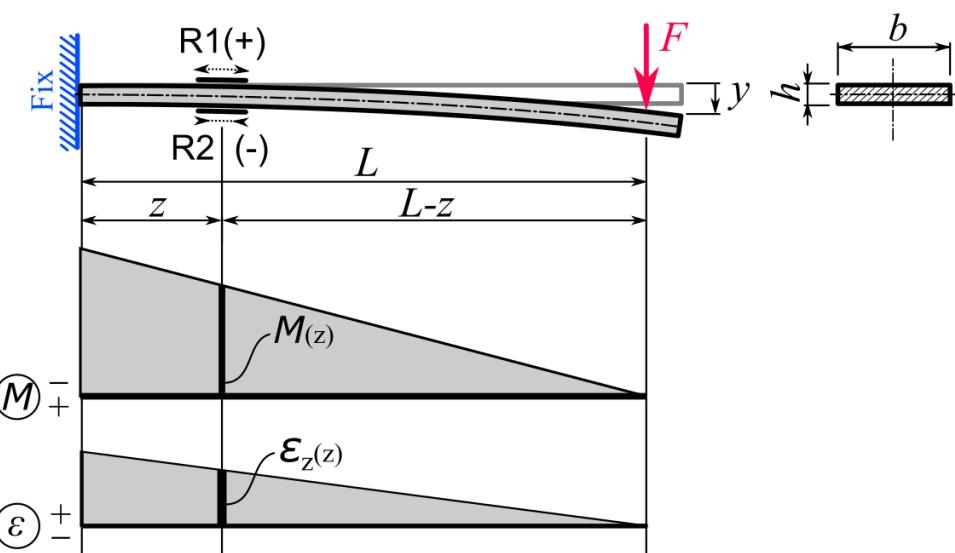
Nagy hőmérséklethez
(-50 ... +250...350) °C
hegeszthető



Betonba önthalható NyMB

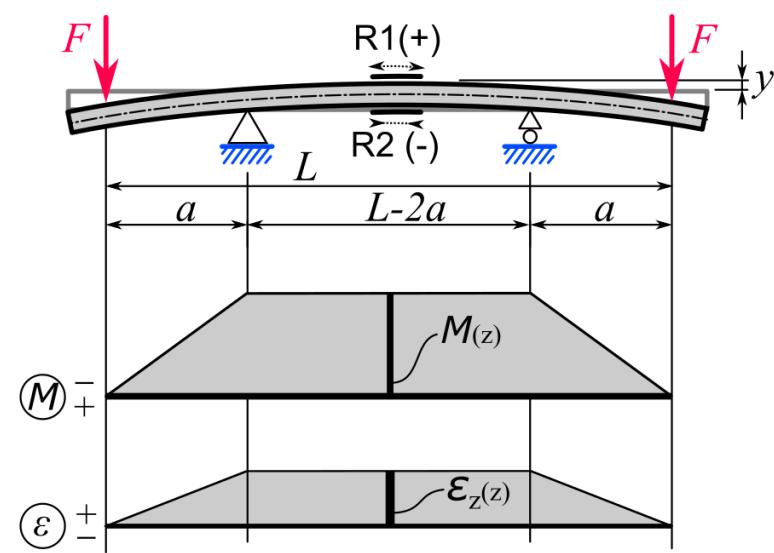
Nyúlásmérő bélyegek kalibrálása (bélyegállandó meghatározása)

- Tiszta, egytengelyű feszültségi / alakváltozási állapot előállítása.
 - Konzolosan terhelt (az alakváltozás mértéke változik a rúd hossza mentén), vagy
 - 4 pontos (M8) hajlításnak kitett rúd.



$$a. \quad \sigma_z(z) = \frac{M(z)}{K} = \frac{6F(L-z)}{bh^2}$$

$$\epsilon_z(z) = \pm \frac{\sigma(z)}{E} = \pm \frac{6F(L-z)}{Ebh^2}$$

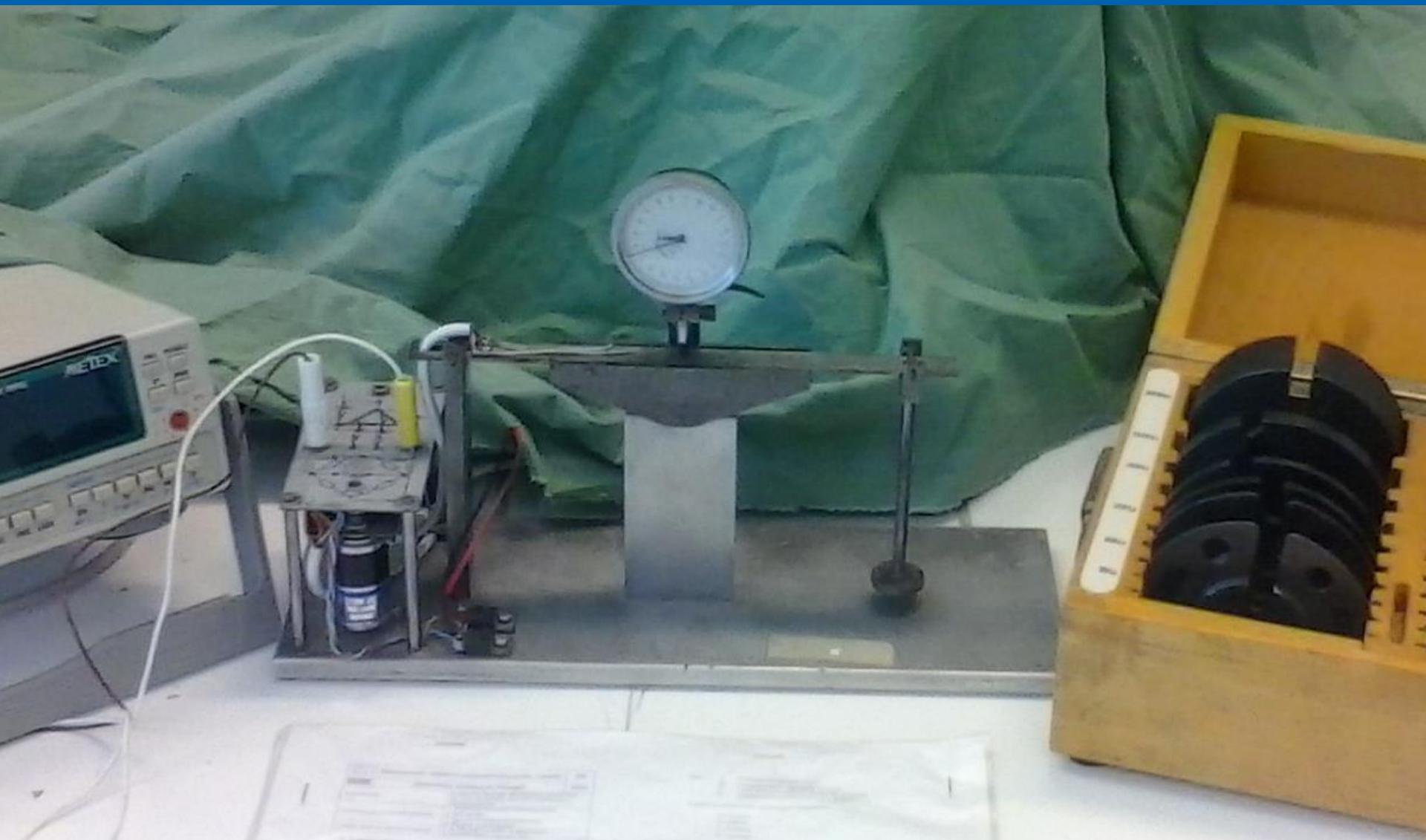


$$b. \quad \pm \sigma_{max} = \frac{M_{max}}{K} = \frac{6Fa}{bh^2}$$

$$\epsilon_{max} = \pm \frac{\sigma_{max}}{E} = \pm \frac{6Fa}{Ebh^2}$$



M8 –as mérés, nyúlásmérő bélyeg kalibrálás



Piezorezisztív hatás

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \Pi T$$

T : mechanikai feszültség (másodrendű tensor)

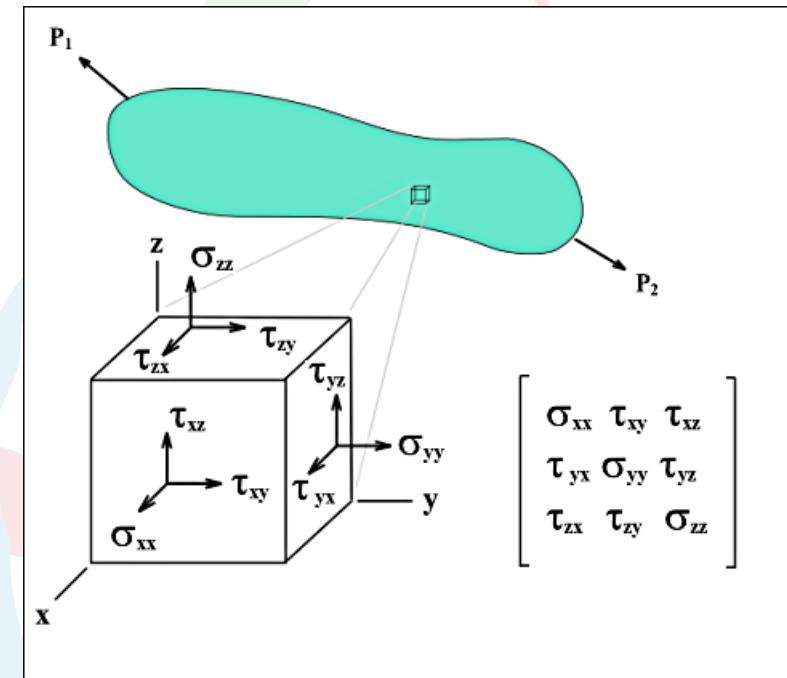
Π : piezorezisztív együttható (negyedrendű tensor)

ρ : fajlagos ellenállás

Előnye a statikus mérés lehetősége.

A piezorezisztív együttható anyagfüggő!!!

Legtöbbet alkalmazott félvezető anyag a szilícium.



Egykristályos félvezetők piezorezisztivitása

Matematikai modell:

Három dimenziós anizotróp kristályra az elektromos tér vektora (**E**) és az áram vektor (**i**) közötti kapcsolat:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_1 & \rho_6 & \rho_5 \\ \rho_6 & \rho_2 & \rho_4 \\ \rho_5 & \rho_4 & \rho_3 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix}$$

3x3 elemű fajlagos ellenállás tenzor,
kísérleti eredmények alapján a 9 elem 6-ra
redukálható

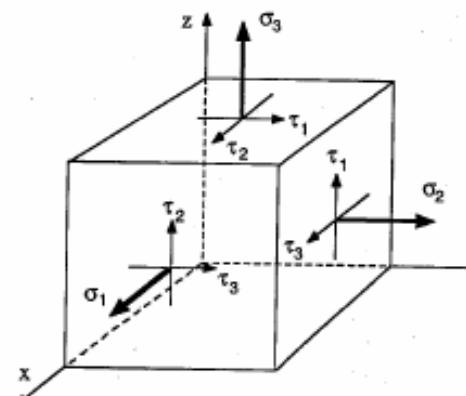
Piezoellenállás a kristálytani irányokhoz illesztett koordinátarendszerben

Si: köbös kristály szerkezet, a derékszögű koordináta rendszert a kristály <100> irányához illesztjük.

ρ_1 , ρ_2 és ρ_3 az egyirányú, ρ_4 , ρ_5 , és ρ_6 a kereszt irányú ellenállások.

Mechanikai feszültség mentes Si-ra $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = \rho$, és ρ_4, ρ_5 , és ρ_6 egyenlő 0-val

$$\begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \rho_3 \\ \rho_4 \\ \rho_5 \\ \rho_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho \\ \rho \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\rho_1 \\ \Delta\rho_2 \\ \Delta\rho_3 \\ \Delta\rho_4 \\ \Delta\rho_5 \\ \Delta\rho_6 \end{bmatrix}$$



A dx, dy, dz méretű
elemi kockára ható
feszültség komponensek



Egykristályos félvezetők piezorezisztivitása

A piezorezisztivitás a fenti 6 komponensnek a $\Delta\rho_i/\rho$ változásával írható le, a változás a 6 feszültség komponens ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \tau_1, \tau_2, \tau_3$) hatására történik:

$$\frac{1}{\rho} \begin{bmatrix} \Delta\rho_1 \\ \Delta\rho_2 \\ \Delta\rho_3 \\ \Delta\rho_4 \\ \Delta\rho_5 \\ \Delta\rho_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix}$$

6x6-os mátrix, elemei a π_{ij} piezorezisztív együtthatók, mértékegységük Pa^{-1}

A Si köbös kristályszerkezete miatt 3 különböző együttható marad: π_{11} , π_{12} és π_{44}

feszültséges, köbös szerkezetű kristályrácsban az elektromos térerő komponensei:

$$E_1 = \rho i_1 + \rho \pi_{11} \sigma_1 i_1 + \rho \pi_{12} (\sigma_2 + \sigma_3) i_1 + \rho \pi_{44} (i_2 \tau_3 + i_3 \tau_2)$$

$$E_2 = \rho i_2 + \rho \pi_{11} \sigma_2 i_2 + \rho \pi_{12} (\sigma_1 + \sigma_3) i_2 + \rho \pi_{44} (i_1 \tau_3 + i_3 \tau_1)$$

$$E_3 = \rho i_3 + \rho \pi_{11} \sigma_3 i_3 + \rho \pi_{12} (\sigma_1 + \sigma_2) i_3 + \rho \pi_{44} (i_1 \tau_2 + i_2 \tau_1)$$

tisztán egyirányú hatás az $<100>$ irányban

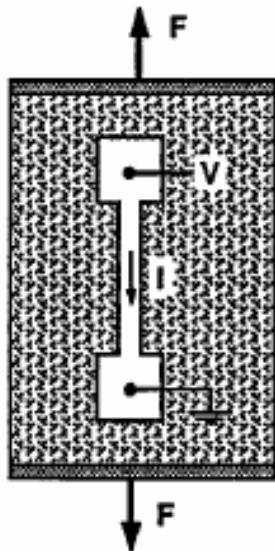
mechanikai feszültség mentes állapot

keresztirányú hatások



Piezorezisztív együttható

Longitudinális



Longitudinális és tranzverzális piezorezsztív együttható.

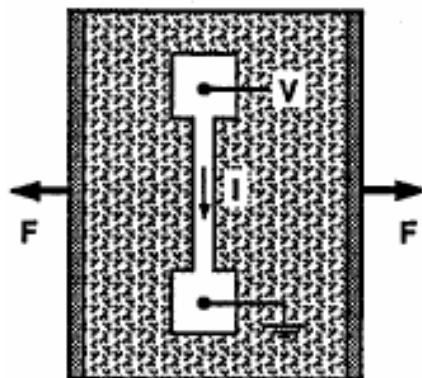
az E^* elektromos erőtér,

az i^* áram és

a σ^* feszültség egy tengelyük

Az érzékelőkben leggyakrabban előforduló esetek

Tranzverzális



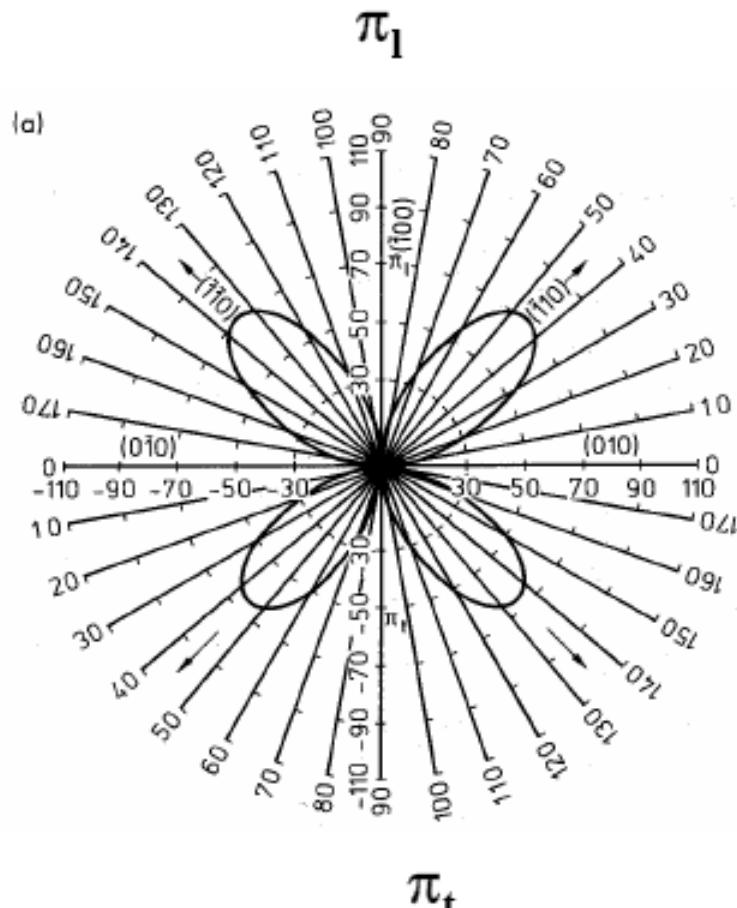
az E^* elektromos erőtér és az i^* áram egytengelyűek,

a σ^* feszültség merőleges minden kettőre

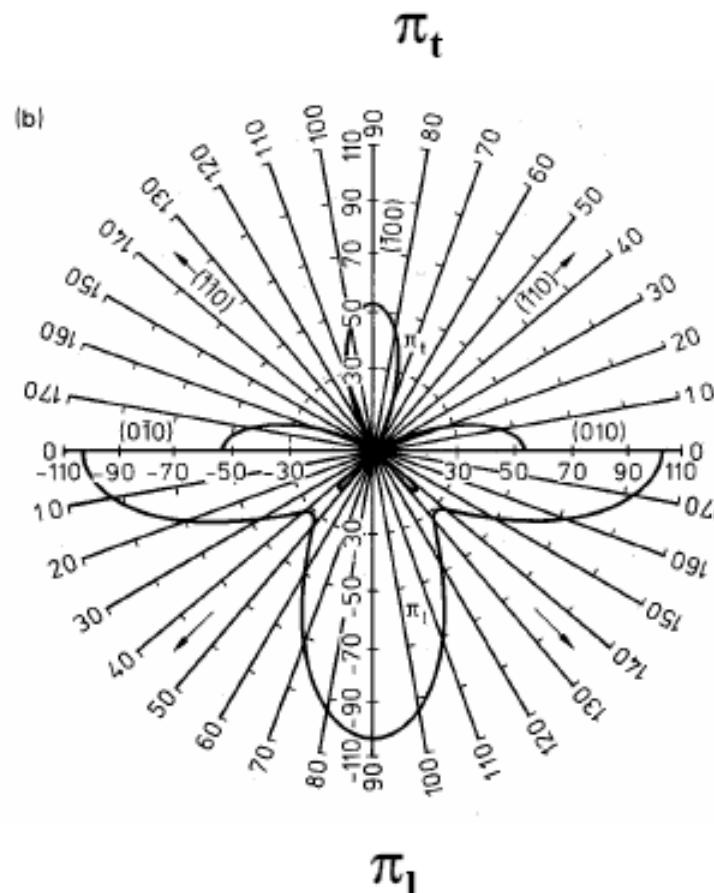
*A * a tetszőleges koordinátarendszerre utal*

Piezorezisztív együttható (Si)

A longitudinális és tranzverzálg piezorezisztív együttható az $<100>$ síkon



p típusú Si



n típusú Si

Piezorezisztív együttható (Si)

A mechanikai feszültségből eredő ellenállás változás longitudinális és tranzverzális összetevőből áll:

$$\Delta R/R = \sigma_l \pi_l + \sigma_t \pi_t$$

A membrán és híd szerkezetek kialakításnál jellemző kristálytani irányok:

a Si szelet felülete általában <100> síkkal határolt, és a kimart struktúra széleit <100> és <111> síkok határolják, az élek pedig (110) irányúak, ezért a piezorezisztorok orientációja szintén (110) lesz.

Ebben a kristálytani irányban:

$$\pi_l = (\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44})/2 \quad \pi_t = (\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})/2$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{(\pi_{44})}{2} (\sigma_l - \sigma_t) \quad p \text{ típusú ellenállásra az (110) irányban}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{(\pi_{11} + \pi_{12})}{2} (\sigma_l + \sigma_t) \quad n \text{ típusú ellenállásra az (110) irányban}$$

2–3-szor nagyobb nyomásérzékenység érhető el a p típusú ellenállással, mint az n típusúval!

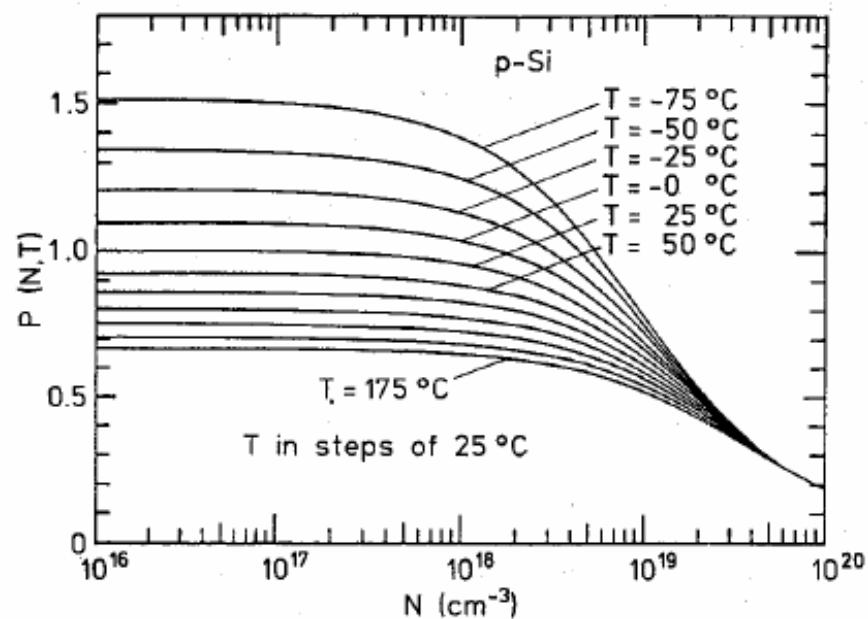


Piezorezisztív együttható (Si)

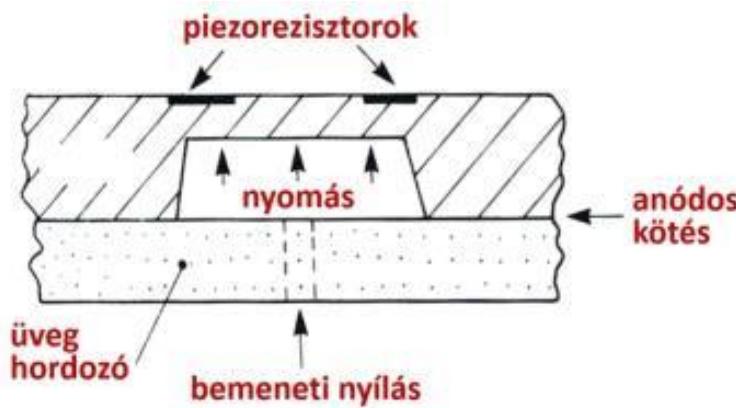
A piezoreszisztív együttható koncentráció- és hőmérsékletfüggése szilíciumban

A piezoreszisztív együttható növekvő koncentrációval és hőmérséklettel csökken.

A gyakorlatban a kis TK érdekében nagy adalék-koncentrációt használnak még az érzékenység romlása árán is.

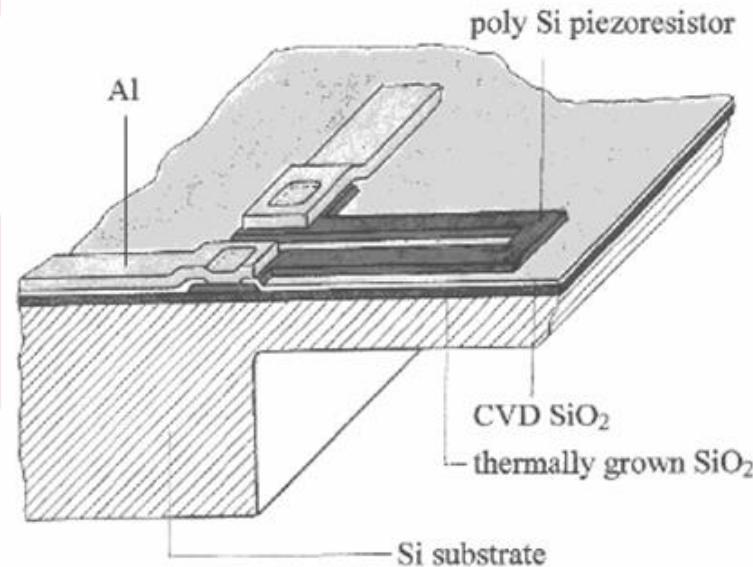


Piezorezisztív elven működő Si MEMS nyomásmérő



A külső nyomás hatására deformálódik a vékony Si egykristály.

A megfelelő kristálytani irányokban kialakított ellenállásokkal mérhető a membránban kialakuló mechanikai feszültség.



Ellenőrző kérdések

1. Jellemezze a LED és lézerdióda fényforrásokat! Mi a működésük alapja?
2. Milyen optikai elven működő elmozdulás, vagy távolságérzékelési eljárásokat ismer? Ismertesse működésük alapjait!
3. Milyen pozícióérzékeny (fényfolt pozíciója) detektorokat ismer? Mondjon példát az alkalmazásukra!
4. Milyen optikai érzékelési elvek találhatóak meg egy számítógépes egérben?
5. Milyen típusait és felhasználási módjait ismeri a LEDet és fototranziszort tartalmazó optoelektronikai átalakítóknak? Szemléltesse a felépítésüket és mondjon példát az alkalmazásukra!

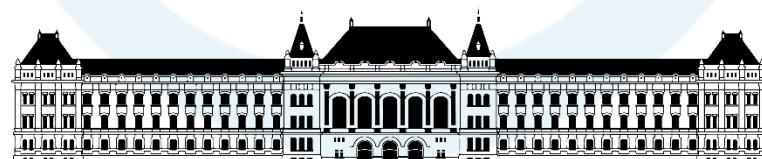


KÖSZÖNÖM A FIGYELMET!

BOJTOS Attila
BME - MOGI Tanszék
bojtos@mogi.bme.hu

Szenzorteknika Piezoelektrikus, Kapacitív, Induktív és mágneses érzékelők

BOJTOS ATTILA
BME - MOGI TANSZÉK



M Ú E G Y E T E M 1 7 8 2



Tematika

Bevezetés a szenzorteknikába

- csoportosítás,
- méréstechnikai tulajdonságok,
- Jelfeldolgozás

Anyagszerkezet

- Atomszerkezet
- Kémiai kötések
- Sávszerkezet
- Félvezetők
- Fémek

Érzékelési elvek fizikai alapjai (szenzor)

- Termikus elvek, hőmérsékletmérés
- Optikai-elvek
- Ellenállásváltozás elvén működő érzékelés
- **Piezoelektronos mérési elvek**
- **Kapacitás**
- **Mágneses mérési elvek**
- Akusztikai elvek

Érzékelési módszerek, alkalmazások (jelátalakító)

- Hossz-, távolság-, elmozdulás-, elfordulásmérés szenzorai
- Sebesség-, térfogatáram-, gyorsulásmérés szenzorai
- Nyomás-, erő-, nyomatékmérés szenzorai
- (Kémiai érzékelés szenzorai)

Aktuátorok

- Motorok
- Piezoelektronos aktuátorok
- Magnetostrikciós aktuátorok

Integrált érzékelő és beavatkozó rendszerek (vendégelezés)

- Technológiai alapok, MEMS, NEMS, OEMS
- Szenzorhálózatok, IoT



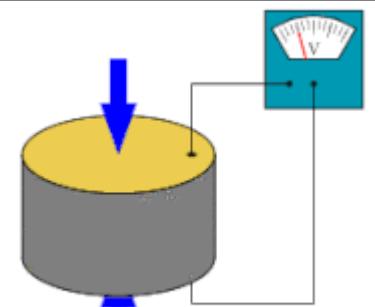
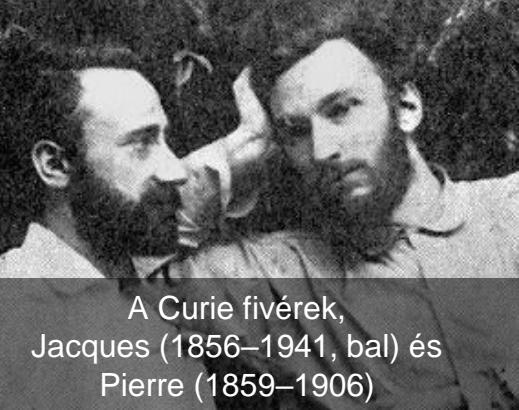
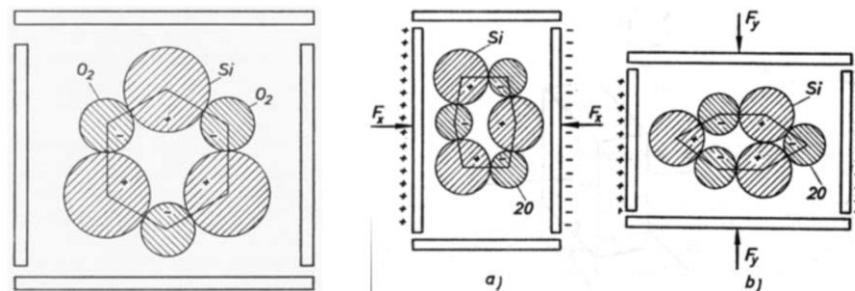
5. Előadás áttekintése

- Piezoelektronos érzékelők
- Kapacitív érzékelők
- Induktív érzékelők
- Mágneses érzékelők

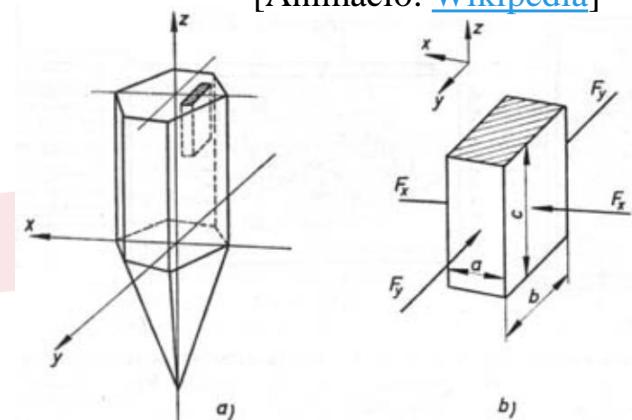


Piezoelektrikumosság

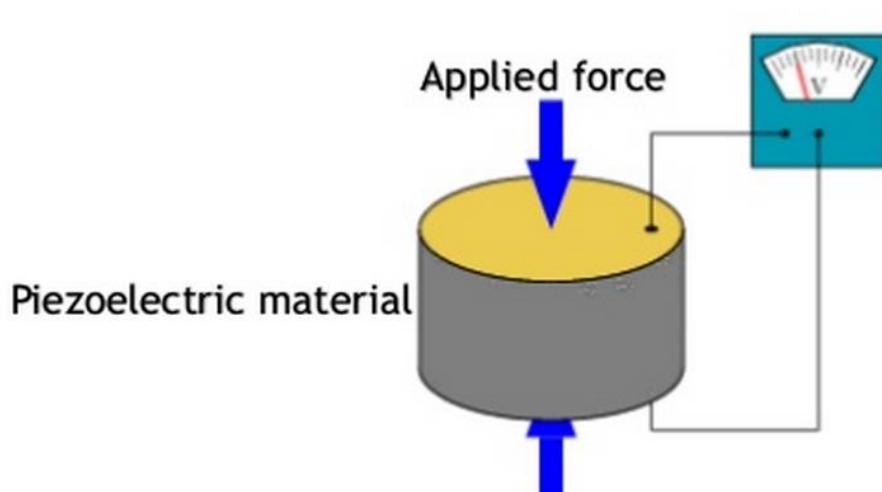
- Felfedezője – a Curie fivérek 1880,
 - Megfigyelték, hogy egyes ásványok (kvárc, turmalin, báriumtitánát, stb.) felületén töltések jelentek meg mechanikai feszültség hatására.
 - A szenzorteknikában leggyakrabban kvárcot (SiO_2) használnak.
 - Hexagonális kristályrács
 - x – villamos, y – semleges, mechanikai, z – optikai tengely.
 - Az optikai tengelyre merőleges terhelés vált ki piezoelektronos hatást,
 - Melyet a hexagonális rácstervezet torzulása okoz.
 - a.) F_x – longitudinális, b.) F_y – transzverzális.
 - Az x tengelyre merőleges (yz) síkon jelenik meg a töltés.
 - Fordított hatás az **elektrostríkció** (Villamos feszültség hatására bekövetkező méretváltozás).



Piezoelektronos szenzor,
[Animáció: [Wikipedia](#)]



Piezoelektrikumosság



Piezoelectric material

A keletkezett töltések az anyagban ébredő mechanikai feszültséggel arányosak, ahol

k egy anyagra jellemző állandó,

A a piezoelektrikus anyag (kristály) felülete.

Leggyakrabban kvárc, ZnO, LiNbO₃, LiTaO₃, PZT ...

Piezo- és inverz piezoelektronos effektus:

A **piezoelektronos effektus** lényege, hogy mechanikai feszültség hatására elektromos polarizáció (töltésszétválasztás) lép fel bizonyos anyagokban.

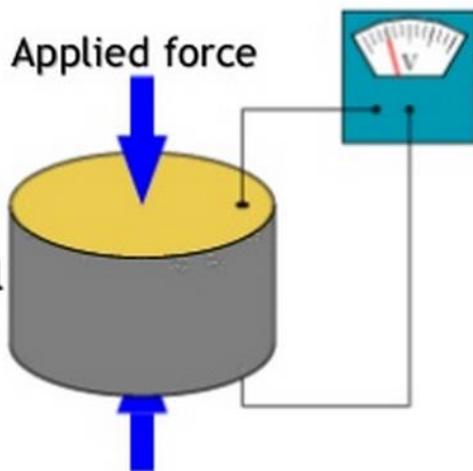
A **fordított (inverz) effektus** során villamos feszültség (elektromos tér) hatására az anyagban (atomi méretű) alakváltozás jön létre. Ezt használjuk pozícionálásra.

$$q = k \frac{F}{A}$$



Piezoelektrikum

Piezoelectric material



A keletkezett töltések az anyagban ébredő mechanikai feszültséggel arányosak, ahol

k egy anyagra jellemző állandó,

A a piezoelektrikus anyag (kristály) felülete.

Leggyakrabban kvarc, ZnO, LiNbO₃, LiTaO₃, PZT ...

Piezo- és inverz piezoelektronos effektus:

A piezoelektronos effektus lényege, hogy mechanikai feszültség hatására elektromos polarizáció (töltésszétválasztás) lép fel bizonyos anyagokban.

A fordított (inverz) effektus az elektrostríkciós során villamos feszültség (elektromos tér) hatására az anyagban (atom méretű) alakváltozás jön létre. Ezt használjuk pozícionálásra.

$$q = k \frac{F}{A}$$



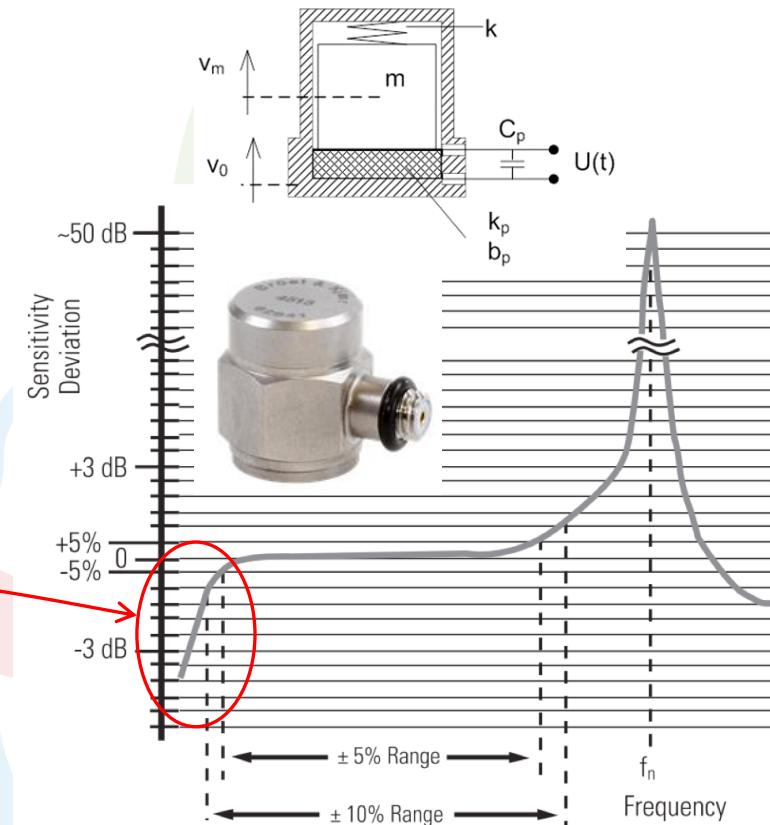
Piezoelektrikumok

Előnyök:

- nem kell tápfeszültség,(aktív szenzor),
- kis és nagy erők is jól mérhetőek,
- hőmérsékletváltozásra érzéketlen,
- sokféle geometria,
- elektromos zavarok alig befolyásolják

Hátrányok:

- csak jól megválasztott anyagok alkalmazhatók,
- csak *a mechanikai feszültség változása mérhető*, azaz statikus mérésre nem alkalmas!
- kristálytani irányfüggő.



Kapacitív érzékelés elve

A mérődő jel

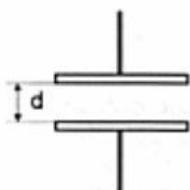


kapacitásváltozás

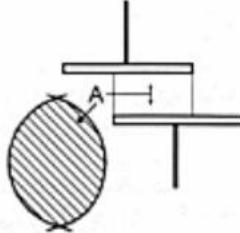
Párhuzamos elektródájú elrendezés

$$C_0 = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$$

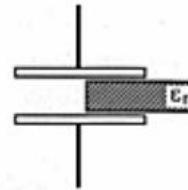
C [F] - a kondenzátor kapacitása,
 $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ As/Vm - a vákuum dielektrikus állandója,
 ϵ_r [1]: relatív dielektrikus állandó
 A [m^2] - elektróda felszíne
 d [m] - elektródák távolsága



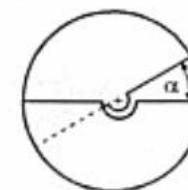
$$C \sim 1/d$$



$$C \sim A$$



$$C \sim \epsilon_m$$



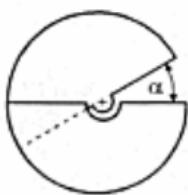
$$C = C_0 + \alpha$$

Lehetséges mérési elvek:

- Kondenzátor fegyverzetei távolságának változása, $C \sim 1/d$,
- Kondenzátor fegyverzeteinek közös felületének megváltozása
 - oldalirányú eltolódás, $C \sim A$,
 - Elfordulás, $C \sim C_0 + \alpha$,
- Dielektrikum változás, $C \sim \epsilon_r$,

Kapacitív érzékelők

(Fegyverzetek közös felületének megváltozása, $C \sim A$)



Fegyverzetek relatív elfordulása

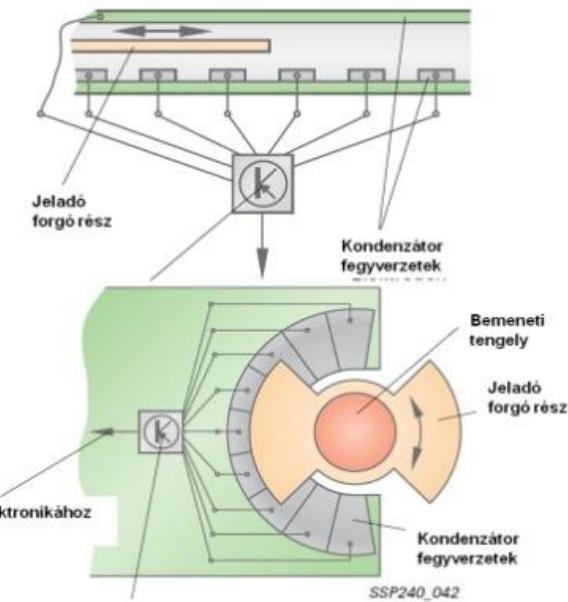
- Egybefüggő körcikk fegyverzetekből álló forgókondenzátor. A kapacitás fokozatmentesen változik a fegyverzetek relatív elfordulásával (lásd régi detektoros rádió).



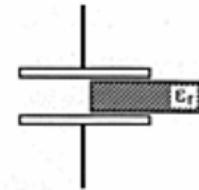
- Több szegmensből álló fegyverzetek kapacitásainak szelektív érzékelése útján diszkrét ugrásokkal állapítható meg a szögállás (pl. szervókormány szöghelyzet jeladó).

Fegyverzetek relatív elmozdulása (lineáris útadó)

- Szegmentált fegyverzet,
- Inkrementális útmérés.



Kapacitív érzékelők (relatív dielektromos állandó megváltozása, $C \sim \epsilon_r$)



- Folyadékszint (üzemanyag, motorolaj, stb) – a kapacitás a fegyverzetek közötti tér folyadékkal való kitöltésével, vagyis a dielektromos állandó térbeli változásával arányos.

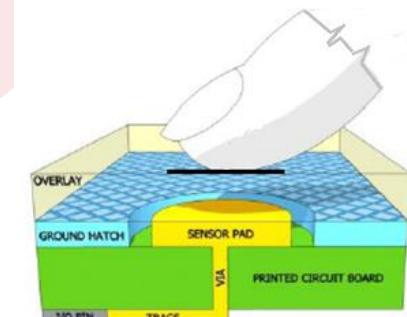
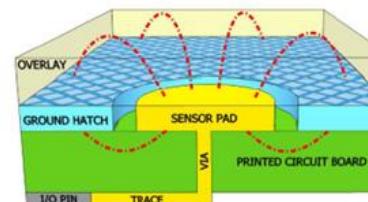


- Közelítés érzékelő - Egy adott anyaggal elérhető érzékelési távolság az ϵ_r dielektromos állandó függvénye, és az un. jellemző redukciós tényezővel megbecsülük:

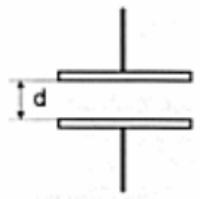
Anyag:	FE 360	St 37	Víz	Búza	Fa	Üveg	Olaj	PVC	PE	Kerámia
Red. tény.	1	1	1	0,8	0,7	0,6	0,4	0,4	0,37	0,3



- Érintésérzékelés – a dielektromos állandó megváltozását az ujjak, vagy egyéb rajzeszköz jelenléte okozza.



Kapacitív érzékelők (Fegyverzetek távolságának változása, $C \sim d$)



Hagyományos fém fegyverzeses

- Közelítés érzékelő
 - Az érzékelési távolság az ϵ_r dielektrikus állandó függvénye,
 - Általában rezonancia módban működik, amit az érzékelt anyag jelenléte elhangol,
 - Általában tartalmazza a jelfeldolgozó elektronikát és a kimenete digitalis 1 / 0 jel (kapcsoló).
- Távolságmérő
 - Mérés váltakozó feszültségű táplálással,
 - Kimeneti feszültség a távolsággal arányos,
 - A céltárgy földelt elektródaként viselkedik.



Tisztán kapacitív, vagy pn átmenetes félvezetők

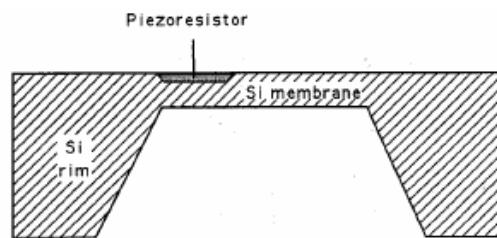
- Nyomás, gyorsulás, stb. közvetett mérése MEMS érzékelővel.



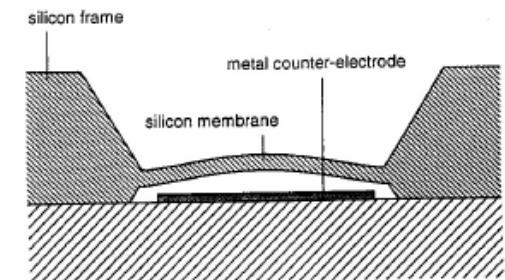
MEMS nyomás / gyorsulásérzékelők elve

Piezorezisztív érzékelők

Membrán típusú szenzor:



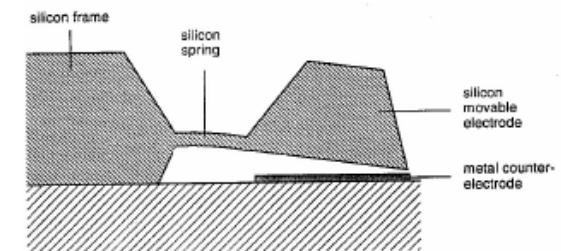
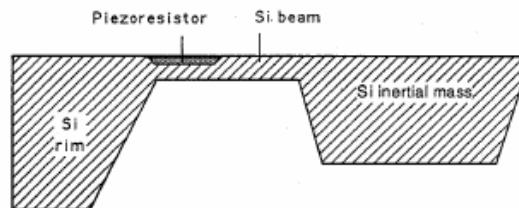
Kapacitív érzékelők



Kis elmozdulásokra
(marad a síkkondenzátor közelítés)

$$\frac{\Delta C}{\Delta d} = -\epsilon \frac{A}{d^2}$$

Befogott tartó típusú szenzor:

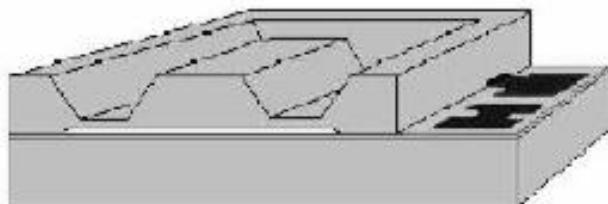


Előnyök: csak a geometriai paramétereiktől és a rugalmassági állandótól függő nagy érzékenység, hőmérsékletfüggés csak a hőtágulásból adódik

Hátrányok: nem-lineáris karakterisztika, nem egyenletes deformációból adódó kapacitásváltozás, nem elhanyagolható szort kapacitások



MEMS kapacitív nyomásmérő chip



Si (100)

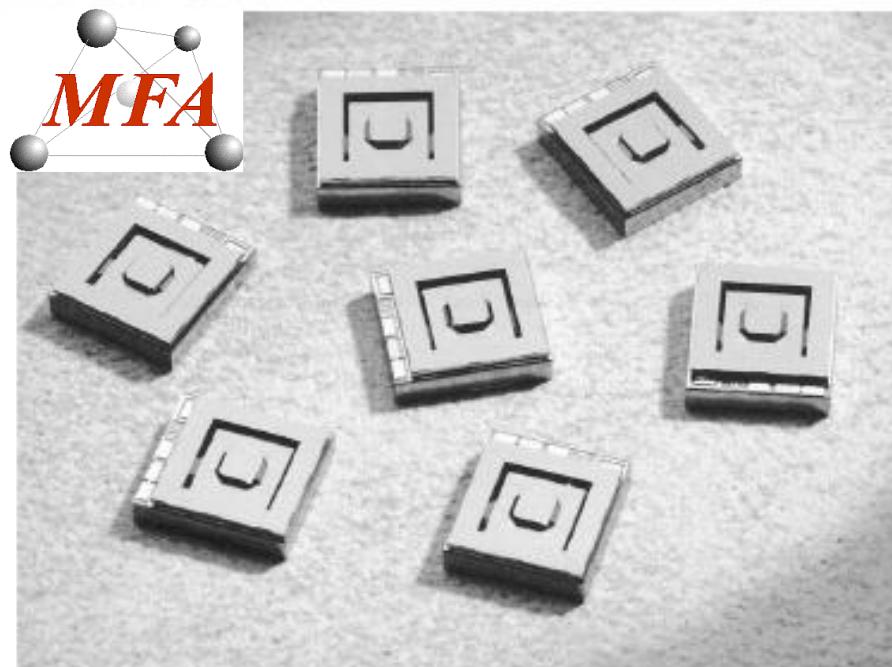


Fém kivezetés



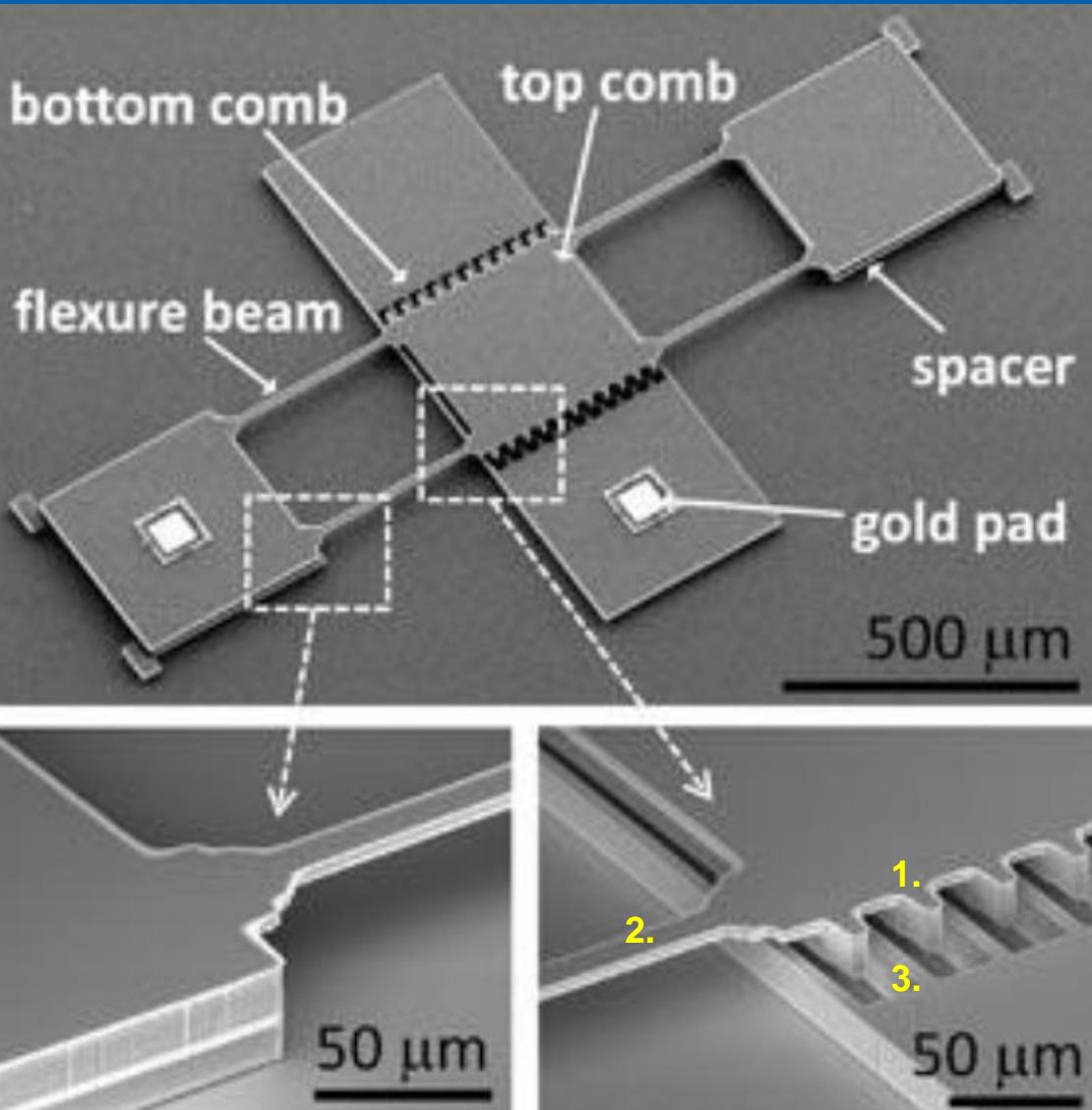
Si-oxid

Felső elektróda: anizotrópan mart Si
Alsó elektróda: Si vagy Pyrex üveg
Kivezetés: Al vagy adalékkolt poli Si



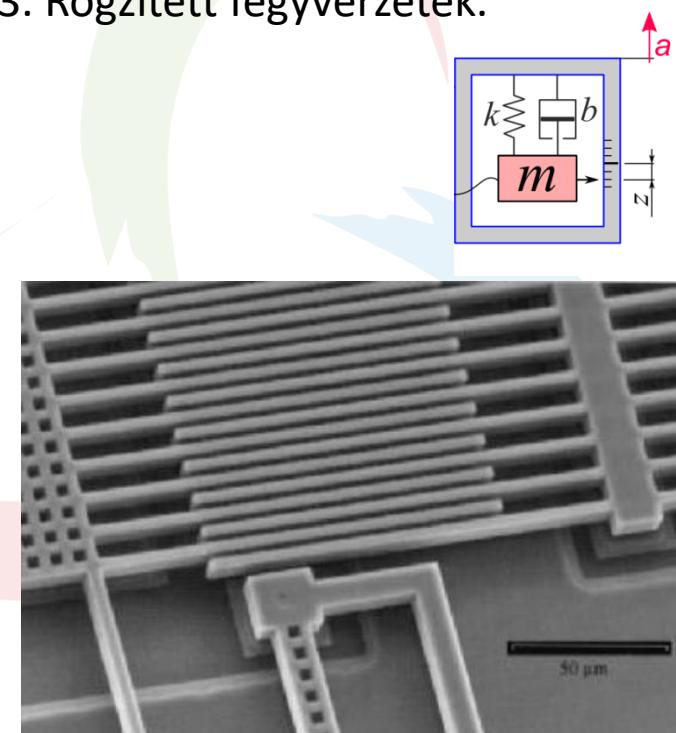
működési tartomány: 0.05...1.3 bar
hőmérséklet tartomány: -55+80°C
érzékenység: 20fF/mbar
hiszterézis: ± 2 mbar
ismétlési hiba: ± 2 mbar
TCO: -80ppM/°C

MEMS kapacitív gyorsulásérzékelő



Főbb részegységek:

1. Rugóztattottan felfüggesztett szeizmikus tömeg a mozgó fegyverzetekkel
2. Rugó
3. Rögzített fegyverzetek.



Forrás: Battistig Gábor: Szenzorok, előadásjegyzet.

Mágneses elven történő érzékelés

Közvetlen

Érzékelhet egy mágneses teret (direkt alkalmazás), pl. egy magnetométerben a Föld mágneses terét, vagy egy adattároló készülékben az adathordozó (mágneses lemez, szalag, kártya, stb.) lokális mágnesezettségét.

Közvetett

A mágneses tér mint közvetítő eszköz szolgál nem-mágneses jelek érzékelésre (indirekt alkalmazás), mint pl. lineáris- vagy szöghelyzet, elmozdulás és sebesség érzékelés permanens mágnesekkel kontaktusmenetes módon, vagy áramérzékelés a mágneses tere révén, stb.



Történelmi áttekintés

Az 1800-as évek elején egyre több fizikus sejtette, már hogy az elektromosság és a mágnesesség között kell lenni valami összefüggésnek, de igazolni nem tudták.

- **Hans Christian Oesterd** dán fizikus 1820 február 15.-ei kísérletével mutatott rá az árammal átjárt vezető és a mágneses tér kapcsolatára.
- **Johann S. C. Schweigger** holland kémikus Oesterd beszámolója alpján 1820 júliusában feltalálta a galvanométert.
- **André-Marie Ampére** francia matematikus 1821-ben felállította az árammal átjárt vezetők kölcsönhatására vonatkozó törvényét, ezzel megalapozta az elektrodinamika tudományát.
- **Joseph Henry** 1826-ban tökéletesítette William Sturgeon elektromágnesét, úgy hogy az addig használt egy sor fémhuzal helyett több rétegnyi menetet csévél a vasrúdra.
- **Jedlik Ányos István** 1828-ban szerkeszti meg a világ első forgó elektromágneses motorját.
- **Michael Faraday** angol fizikus 1831 szeptemberében felfedezte az elektromágneses indukciót.
- **James Clerk Maxwell** skót fizikus munkásságának legkiemelkedőbb eredménye az elektromágneses tér elméletének megfogalmazása volt.

Alapfogalmak dióhéjban

Mágneses térerősség:

Mágneses indukció (fluxussűrűség):

Mágneses permeabilitás:

Vákuumban

Anyag jelenlétében

Térfogategységre eső mágneses dipólusmomentum azaz mágnesezettség

azaz

H [A/m]

B [Vs/m² = Tesla]

μ [Vs/Am]

$$B = \mu_0 H$$

$$B = \mu_0 (H + M)$$

M [Am²/m³ = A/m]

$$M = \chi_m H$$

χ_m : mágneses szuszceptibilitás

$$B = \mu_0 (1 + \chi_m) H = \mu_0 \mu_r H$$

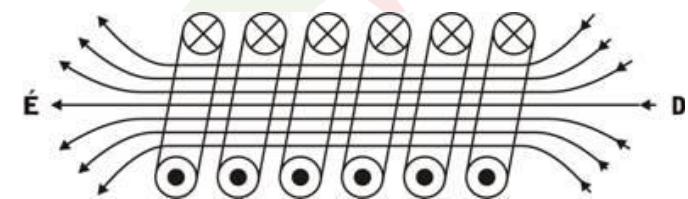
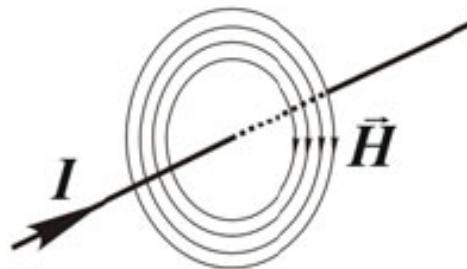
$$\mu_r = 1 + \chi_m$$



Alapfogalmak

Az áram mágneses tere

Az időben állandó sebességgel mozgó töltések keltette / áram a vezető körül mágneses teret hoz létre.



A mágneses dipólus

Egy $d\vec{a}$ felületet körbezáró I nagyságú elemi köráram egy elemi mágneses dipólust képvisel, amely mágneses dipólus nyomatékkal, mágneses momentummal rendelkezik.

$$\vec{m} = I \cdot d\vec{a}$$

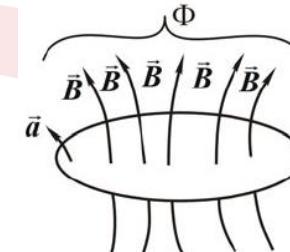


Alapfogalmak

Mágneses fluxus

A mágneses tér intenzitására, nagyságára vonatkozó tájékoztatást a felületen áthaladó indukcióvonalak száma, a felület fluxusa ad

$$\Phi = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{a} = \int_A \vec{B}_n \cdot d\vec{a}, \quad [Vs]$$

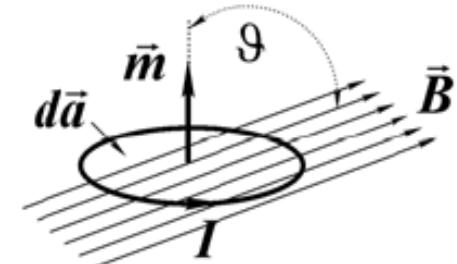


Mágneses indukció (fluxus-sűrűség)

Adott felületen áthaladó mágneses fluxus.

Ha a mágneses dipólussal rendelkező elemi köráramú vezetőt egy B indukciójú mágneses térbe helyezzük (4.2. ábra), akkor a köráramra forgatónyomaték hat, amely hatására a köráram úgy helyezkedik el, hogy felülete merőleges legyen a mágneses indukcióra

$$\vec{T} = \vec{m} \times \vec{B}, \quad |\vec{T}| = m B \sin \vartheta = I da B \sin \vartheta,$$



Mágneses térerősség

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu}, \quad [\vec{H}] = 1A/m$$



Alapfogalmak

Mágnesezettség

Az M mágnesezettség az anyag egységnyi térfogatára jutó mágneses momentum.

Mágneses szuszceptibilitás

Az M mágnesezettség és a H mágneses térerősség hányadosa.

$$\kappa = \frac{M}{H} \quad H = \frac{B}{\mu_0} - \kappa \cdot H \Rightarrow H = \frac{B}{\mu_0(1 + \kappa)}$$

Permeabilitás

A mágneses erővonalak vezetőképességének mértéke a permeabilitás, melyet mágneses vezetőképességnak is nevezünk

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{Vs}{Am} \right]$$

$$\mu_r = 1 + \kappa$$

μ tényező az anyag permeabilitása,

μ_r a relatív permeabilitás azt mutatja meg, hogy az anyag mágneses vezetőképessége hányszorosa a vákuuménak. (Vákuumra $\mu_r=1$).

μ_0 a vákuumpermeabilitás.

Alapfogalmak

Vezető hurok önindukció együtthatója

Valamely magában álló zárt vezetőben folyó áram az áramvezető által kifeszített hurokban az áramerősséggel arányos fluxust hoz létre, ahol az arányossági tényezőt a vezető hurok önindukció együtthatójának nevezzük. Az L önindukció együttható függ az áramhurok alakjától és a permeabilitástól, de nem függ sem az áramtól sem a fluxustól.

$$L = \frac{\Phi}{I}, \quad [L] = 1 \frac{Vs}{A} = 1 \text{ H} = 1 \text{ henry}$$

Vezetők kölcsönös indukció együtthatója

Két áramvezető hurokban (5. ábra), ahol az egyik áramvezetőben I_1 áram folyik, a másik áramvezető árama azonban nulla

$$I_2 = 0$$

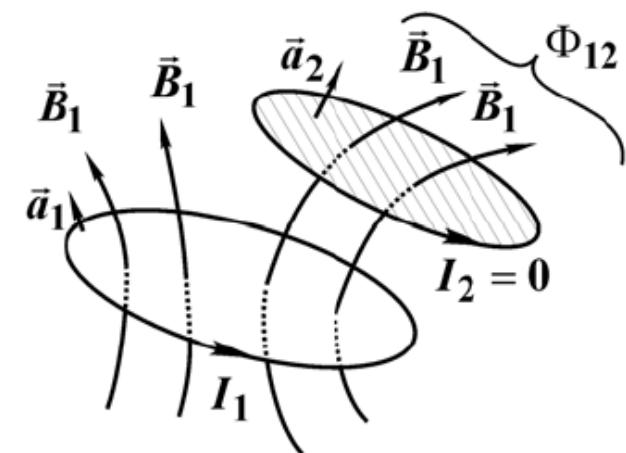
Ekkor az I_1 áram által létrehozott mágneses tér erővonalaiból valamennyi átmegy az áramú vezető keresztmetszetén, ahol

$$\Phi_{12} = \int \vec{B}_1 \cdot d\vec{a}_2$$

a_2

fluxust hoz létre. Ez a fluxus arányos lesz az I_1 árammal, és az arányossági tényező a kölcsönös indukció együttható

$$L_{12} = \frac{\Phi_{12}}{I_1} \Big|_{I_2=0}$$



Anyag és mágnesség

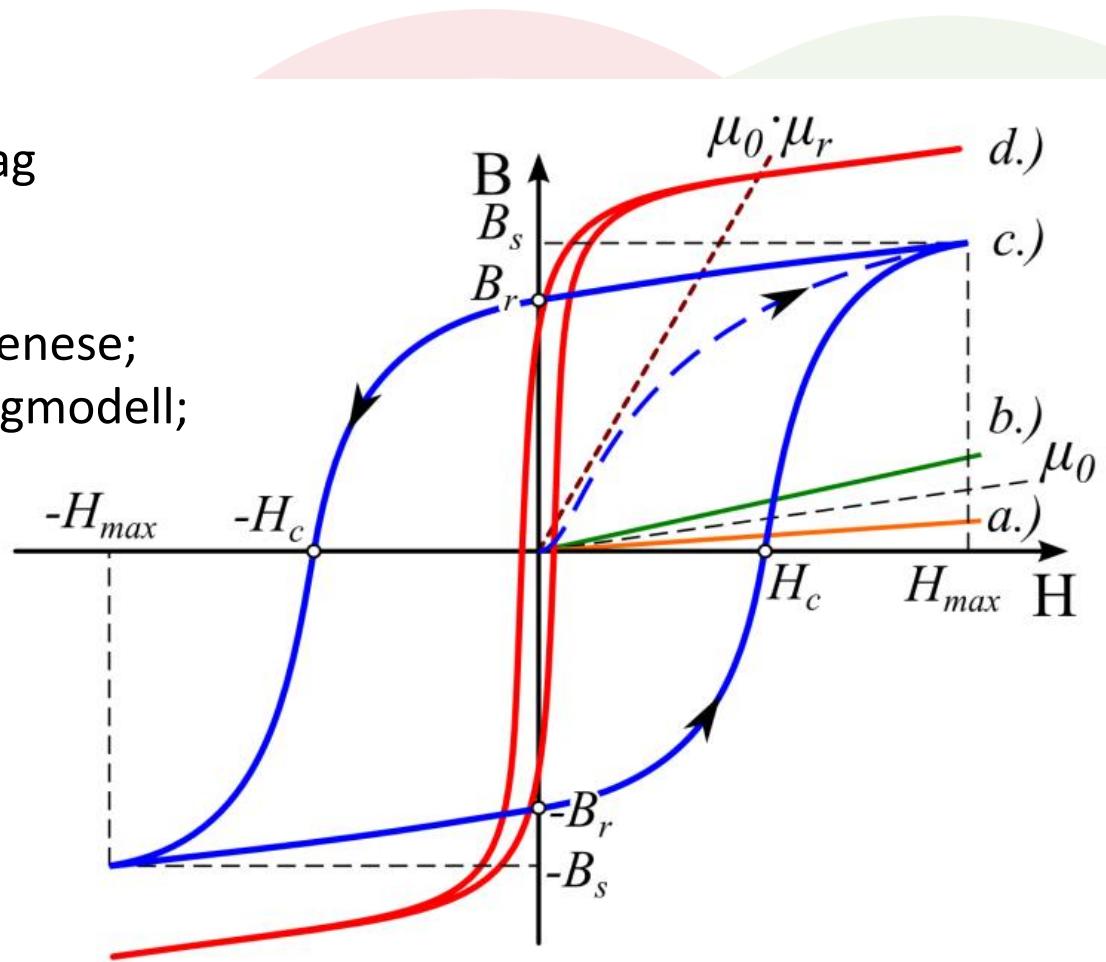
Csoport	Anyag	Szuszceptibilitás	Permeabilitás
diamágneses	Cu, Ag, Au, Bi szupravezetők	kicsi és negatív -10^{-5} -1	kb. 1 0
paramágneses	Al, Pt	kicsi és pozitív $10^{-3} - 10^{-5}$	kb. 1
ferromágneses	Fe, Co, Ni, ritka földfémek, pl. Sm, Dy	nagy és pozitív $50 - 10^4$	$50 - 10^4$
ferrimágneses	Fe_3O_4	nagy és pozitív	nagy és pozitív



Mágneses anyagok típusai

ábra - Mágneses anyagok jellemző B-H görbéje

- a.) Diamágneses anyag;
 - b.) Paramágneses anyag;
 - c.) "Kemény" ferromágneses anyag
(állandómágnes);
 - d.) "Lágy" ferromágneses anyag;
- μ_0 – a vákuumpermeabilitás egyenese;
 $\mu_0 \cdot \mu_r$ – lineáris mágneses anyagmodell;



Mágneses tér hatásai: érzékelés

A legfontosabb, az érzékelőkben kihasznált effektusok:

- Mozgó töltéshordozók (áram) eltérítése (**Lorentz erő**)
- **Hall-effektus** (Lorentz erő)
- **Mágneses ellenállásváltozás** (többféle mechanizmus)

Mágneses érzékelés

Előnyei: változatos alak és kivitelezés, nagy felbontású mérés lehetséges, többféle mérhető mennyiség (amplitúdó, fázis), egyszerű elektromos jellé konvertálni.

Hátrányai: külső mágneses tér zavarhat, anyagfüggő működési hőmérséklettartomány,



Lorentz erő

Mágneses térben mozgó töltésre Ható erő

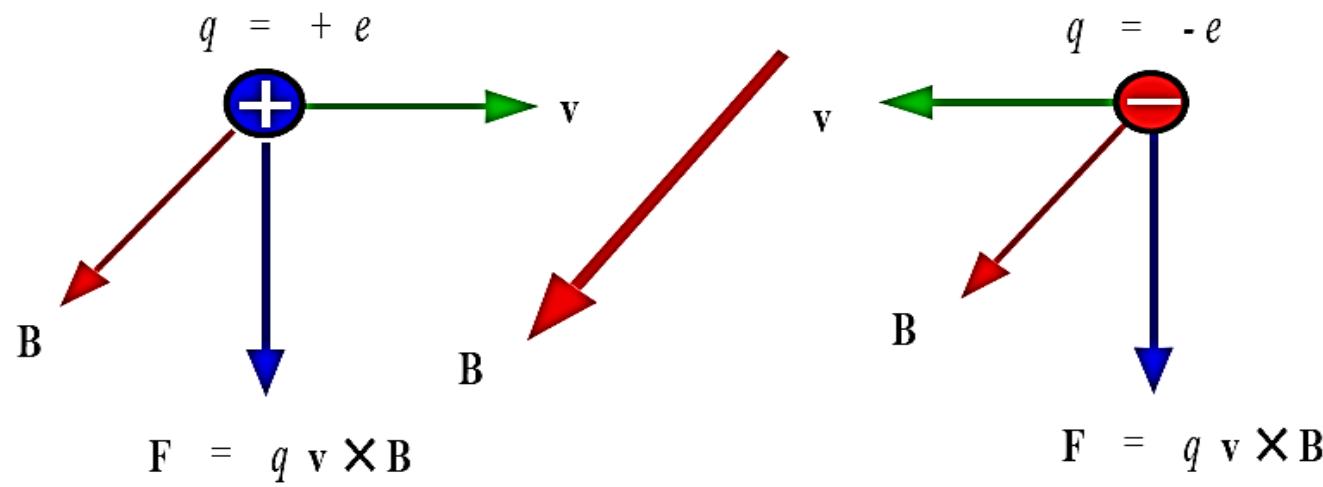
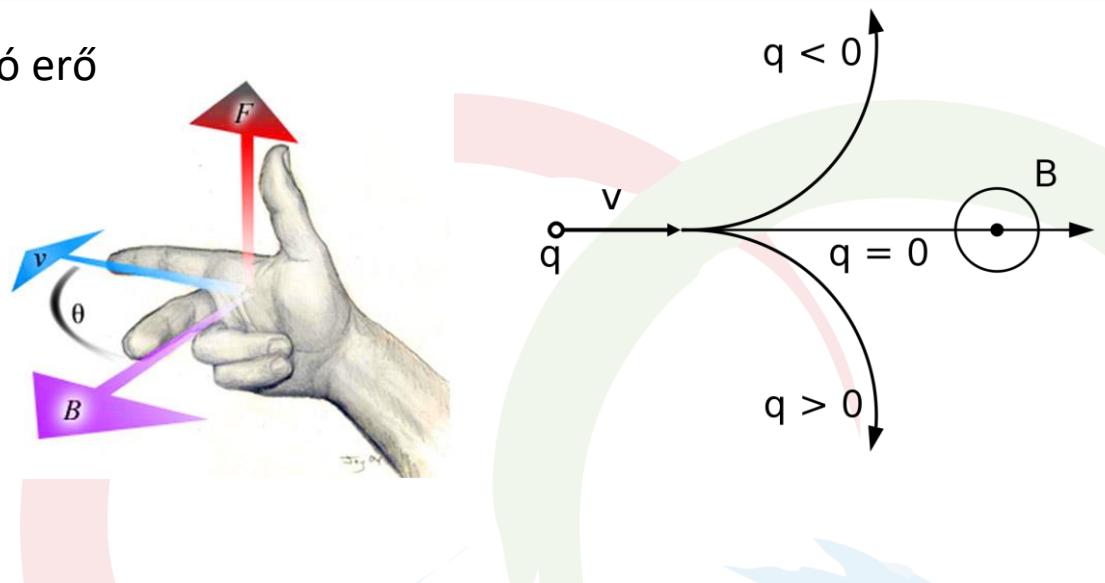
$$F = q \bar{v} \times \bar{B}$$

F a töltésre ható erő

q a részecske töltése

B a mágneses indukció (vektor)

v a részecske sebessége (vektor)



Hall effektus

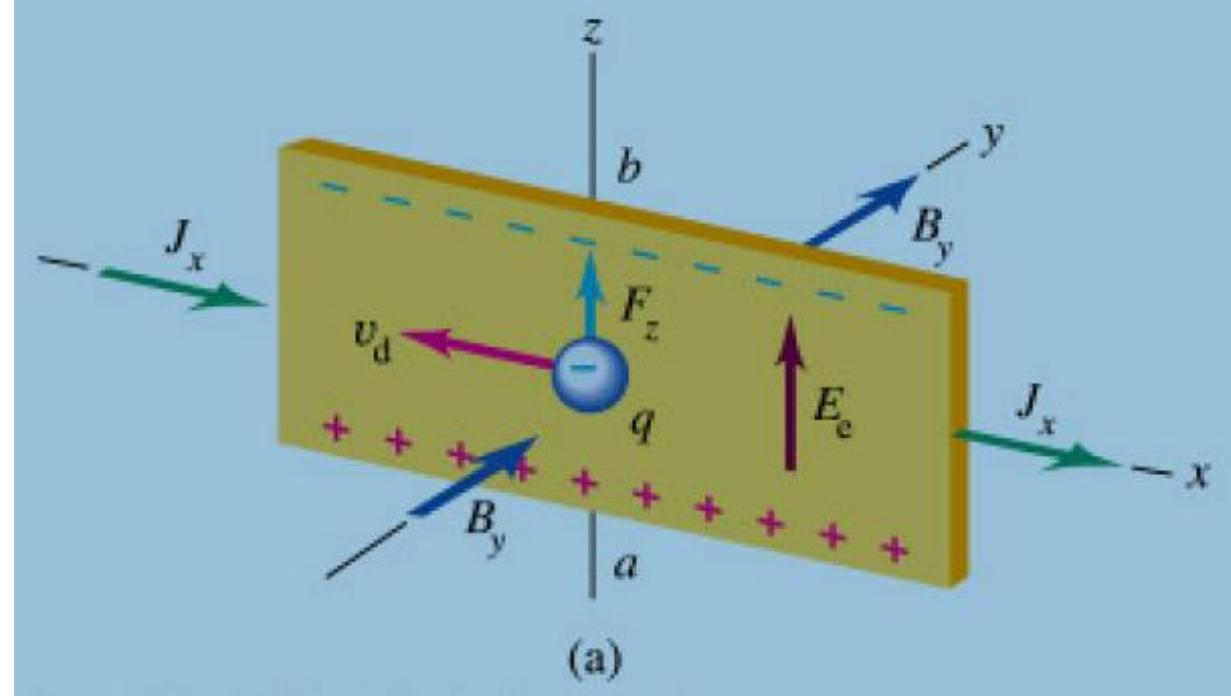
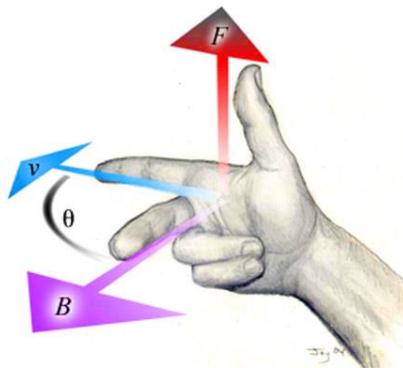
Ha egy áramjárta vezetőt, vagy félvezetőt mágneses térbe helyezünk, akkor a vezetőben mozgó elektronokra ható Lorentz-erő miatt a vezető két oldalán potenciálkülönbség lép fel, **ez a Hall-feszültség**.

A jelenség keskeny mintában erős, ahol a töltéshordozók a hossziránytal párhuzamosan mozognak az ez irányban kapcsolt feszültség hatására. A vékony minta síkjára merőleges mágneses térben keresztirányú elektromos erőtér is kialakul, ami kompenzálgja a mágneses mezőben haladó töltéshordozókra ható Lorentz-erőt.

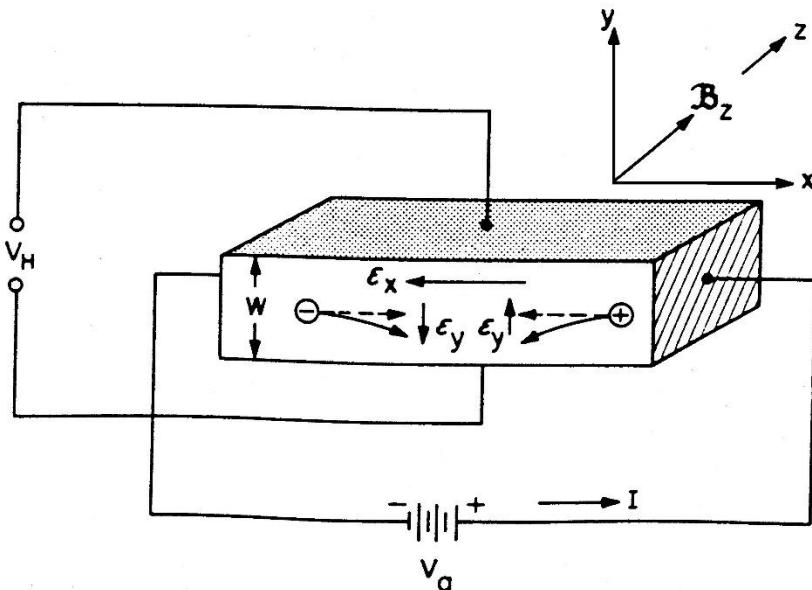
A Hall feszültség:

$$U_H = \frac{R_H I B}{t}$$

t : a minta vastagsága,
 R_H : a Hall-állandó.



A Hall elektromos tér



p-típusú mintában a lyukak sebessége $-x$ irányú,
a lyukakra ható $F = q v \times B$ Lorentz erő iránya $-y$,
tehát lefelé tárít el a lyukakat.

A lyukak az alsó lapon felhalmozódva egy $+y$ irányú elektromos teret hoznak létre. Mivel az y irányban nem folyik áram, az y irányú tér (a Hall tér) egyensúlyt tart a Lorentz erő terével,

$$E_y = v \times B_z$$

Ekkor

$$E_y = V_y / w = V_H / w = R_H j_x B_z$$

és a Hall állandó

$$R_H = 1 / qp$$

p : lyuk-koncentráció



Hall-állandó különböző anyagokban

Material	R_H in cm^3/As	μ_e in cm^2/Vs	E_g in eV
Metals	10^{-4}	10	-
Ge	10^{+3}	3900	0.75
Si	10^{+6}	1500	1.16
InSb	380	77000	0.23
GaAs	10^{+4}	8000	1.52

Félvezetők vezetőképessége, illetve fajlagos ellenállása:

q : elemi töltés, n : többségi töltéshordozó koncentráció, μ : mozgékonysság

Hall állandó:

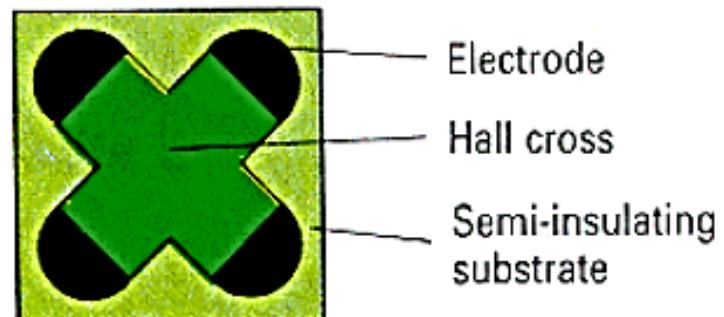
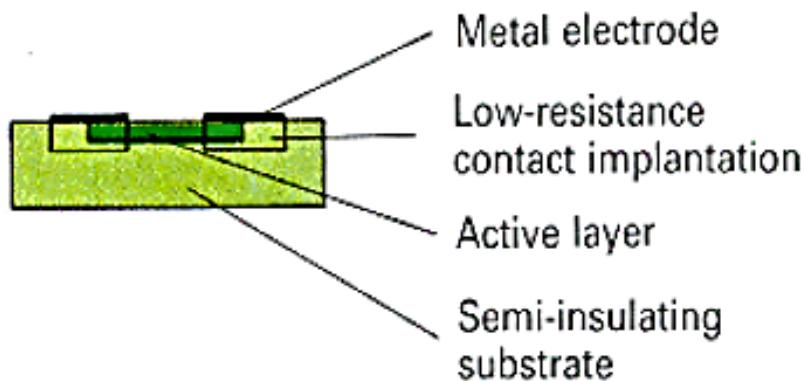
$$\sigma = \frac{1}{\rho} = q n \mu$$

$$R_H = \frac{1}{q n}$$



Félvezető Hall szenzor

KSY14 – the Ultra-flat, Versatile Hall Sensor



Működési hőmérséklettartomány: -40 °C ... + 175 °C !!!

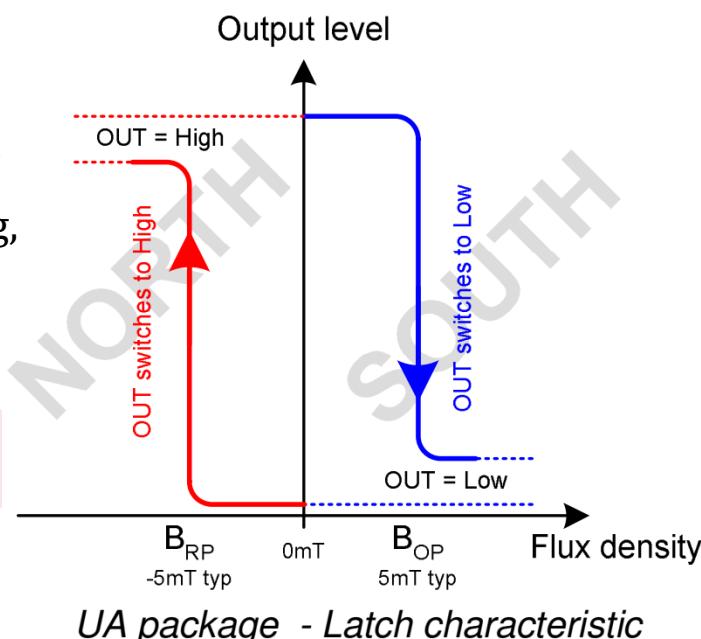
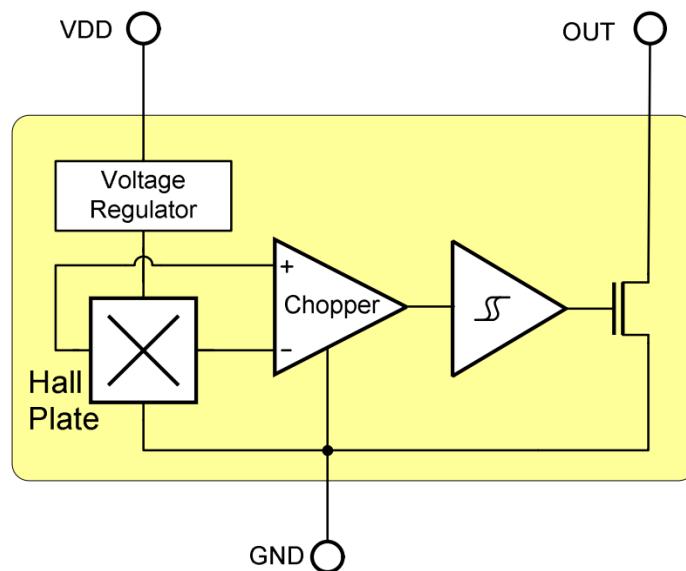
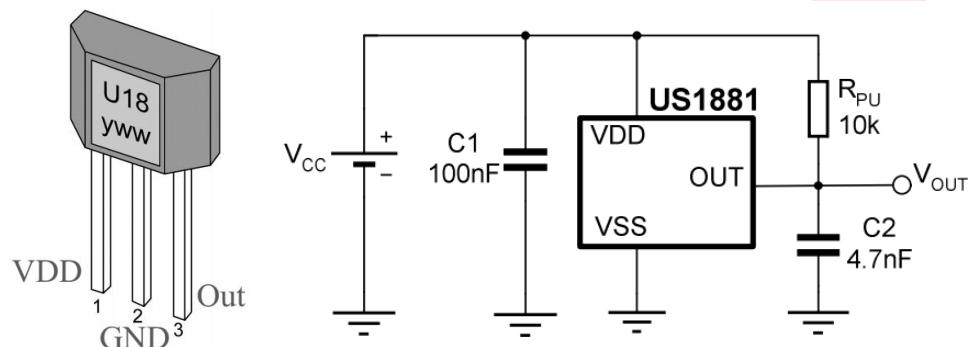
Komplex Hall szenzor

Integrált jelfeldolgozás:

- feszültségszabályozót,
- Hall szenzort,
- komparátort,
- Schmitt triggeret és
- open drain-es kimeneti vezérlőt tartalmaz.

A kimeneten egy digitális jelet kapunk,

- ami egy küszöbértéknek megfelelő mágneses indukció elérésekor vált szintet.
- a jelváltáshoz nem elég a mágneses tér megszűnése, hanem ellentétes polaritású mágneses térre van szükség,

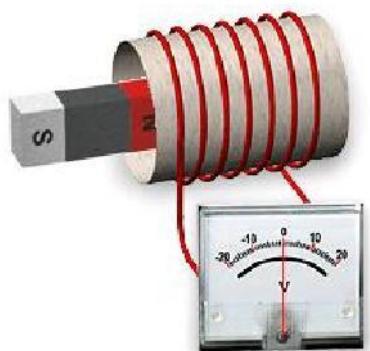


A mágneses tekercs

Biot–Savart-törvény: a tekercs két kivezetése közé időben állandó áramforrást kapcsolva a meginduló elektromos áram mágneses mezőt hoz létre.

Amper törvény: az elektromos áram és az általa gerjesztett mágneses mező kapcsolatát írja le. A mágneses térerősség tetszőleges zárt görbe menti integrálja egyenlő a görbe által határolt felületen átfolyó áramok előjeles összegével.

Faraday törvény: ha egy mágneses erőtérben elektromosan vezető anyag relatív elmozdulása történik, és az elmozdulásnak van a mágneses erővonalak irányára merőleges összetevője, akkor a vezetőben elektromos feszültség indukálódik.



Electromagnetic Induction

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r A}{l} N^2$$

A : a tekercs keresztmetszete

l : a tekercs (mágneses erővonalak) hossza

N : a tekercs menetszáma

μ_0 : a vákuum permeabilitása

μ_r : a tekercsbe helyezett mágneses anyagra jellemző szorzószám

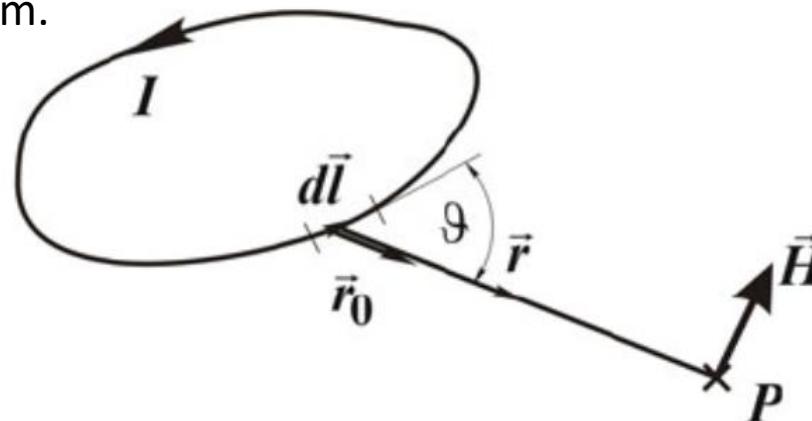


Biot-Savart törvény

Biot és Savart: matematikai összefüggést ami megadja az egy vezetőben folyó áram által keltett mágneses tér erősségét a tér adott pontjában.

$$\vec{H}(P) = \frac{I}{4\pi l} \oint \frac{d\vec{l} \times \vec{r}_0}{r^2} = \frac{I}{4\pi l} \oint \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$

- H - a mágneses térerősség a tér egy pontjában,
- dl – áramjárta vezető elemi szakasza,
- I – a vezetőben folyó áram.



Jean-Baptiste Biot
1774 – 1862



Félix Savart
1791 – 1841



Faraday és a Lenz törvény

A Faraday törvényben szereplő negatív előjel az indukált elektromágneses mező polaritását mutatja meg, melyet Lenz állapított meg:

Ha mágneses térben egy vezető elmozdul, és a vezető elmozdulásának van az indukcióvonalakra merőleges összetevője, akkor a vezetőben feszültség indukálódik.

Ha a vezető zárt áramkört képez, az indukált feszültség hatására a körben áram folyik.

Lenz törvénye szerint ennek az indukált áramnak az iránya minden olyan, hogy mágneses hatásával gátolni igyekszik az őt létrehozó indukáló folyamatot. Jelen esetben a relatív elmozdulást.

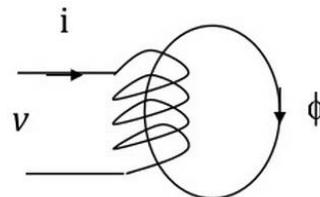
$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Heinrich Friedrich
Emil Lenz
1804 – 1865

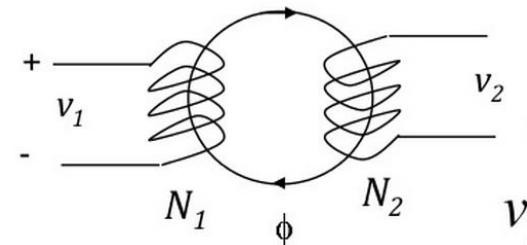


Induktív elven működő érzékelők

Nyugalmi indukció

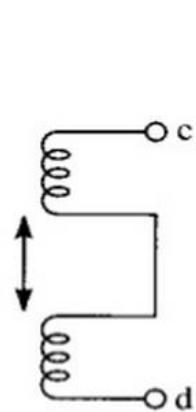


$$v = N \frac{d\Phi}{dt}$$

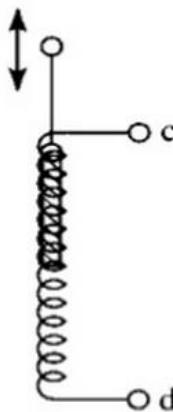


$$v_1 = \frac{N_1}{N_2} v_2$$

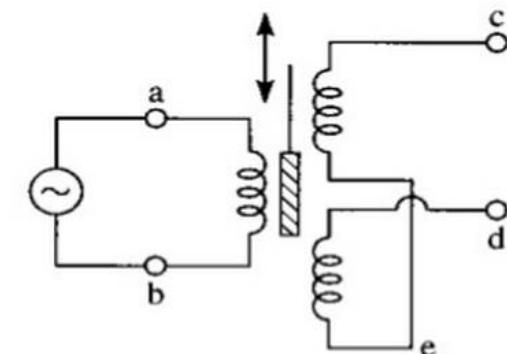
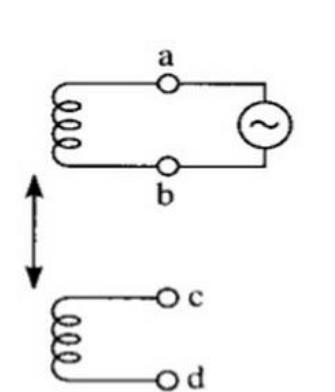
Mozgási indukció



(a)



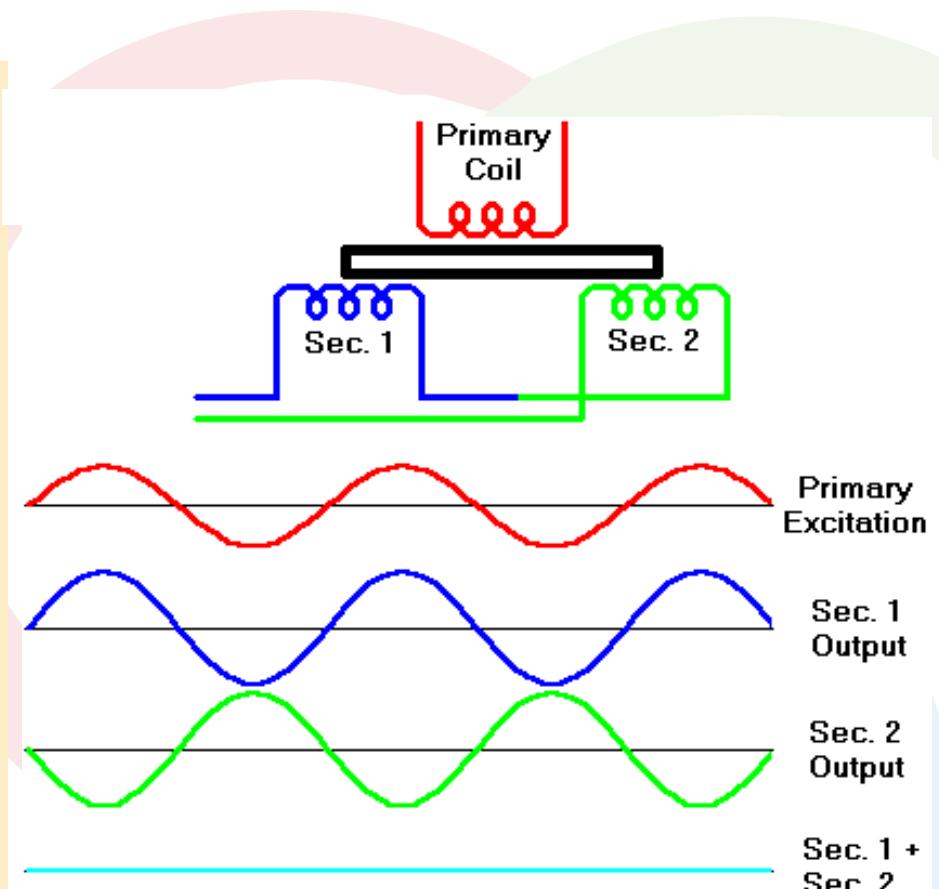
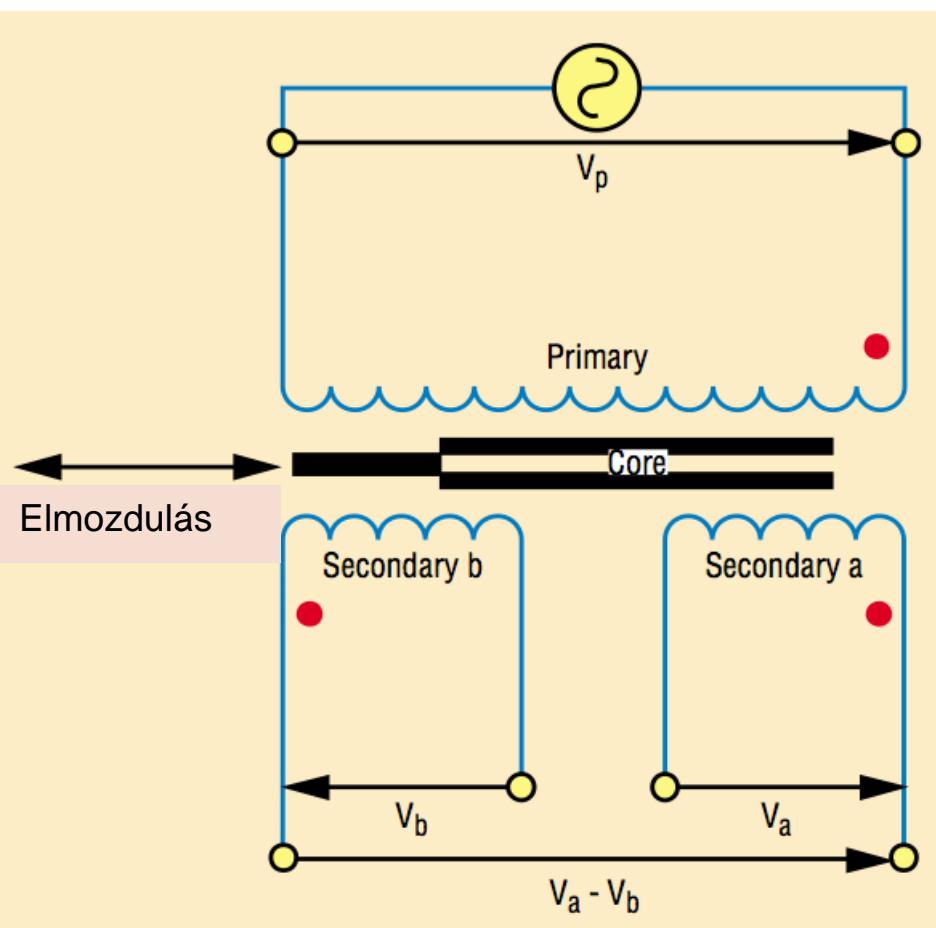
(b)



(c)



LVDT – lineáris differenciál-transzformátor

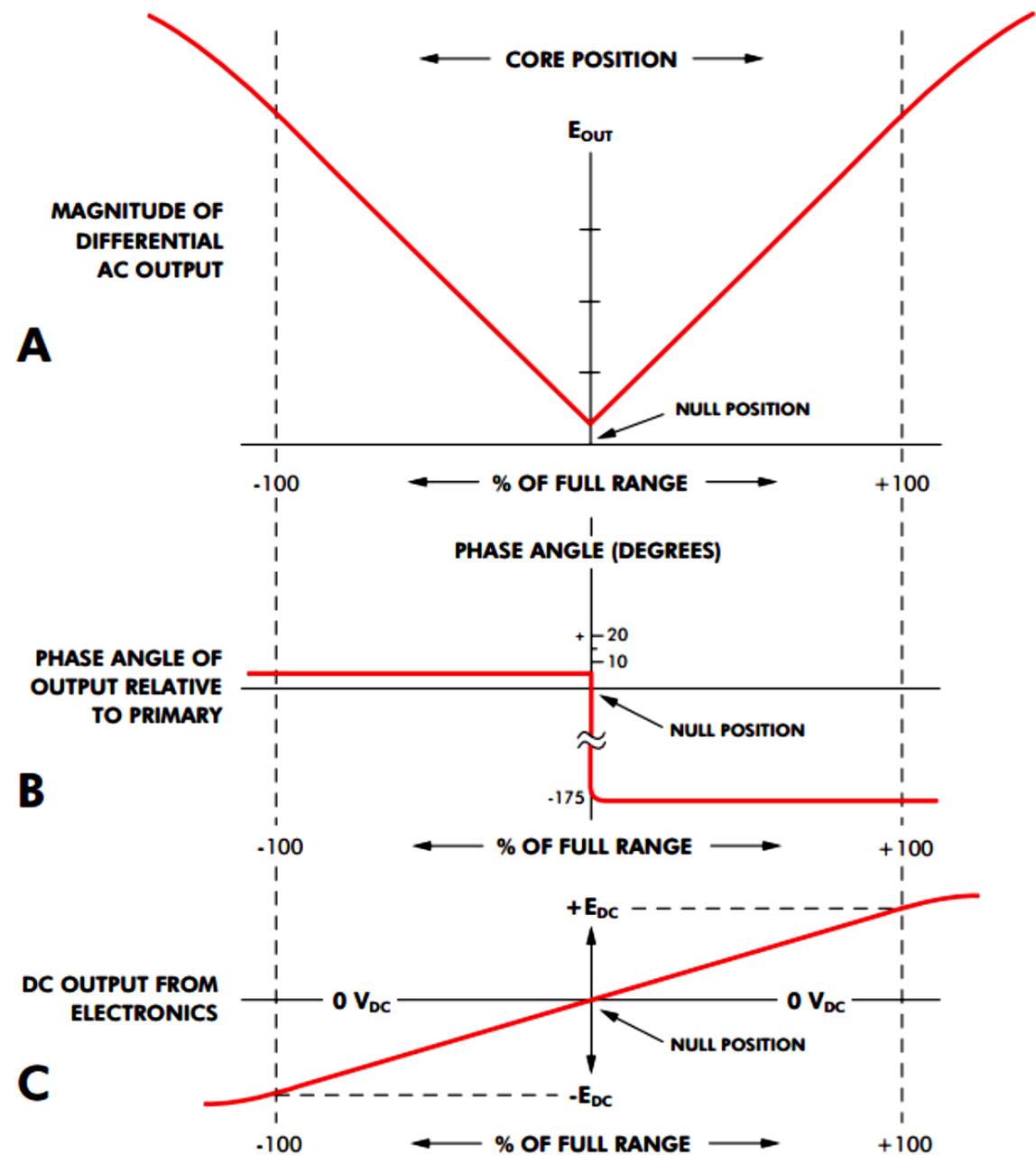


LVDT kimeneti jelalak

A: differenciális AC kimenőjel

B: kimenőjel fázisszöge a primer jelhez képest

C: Egyenirányított DC kimenet (elektronika)

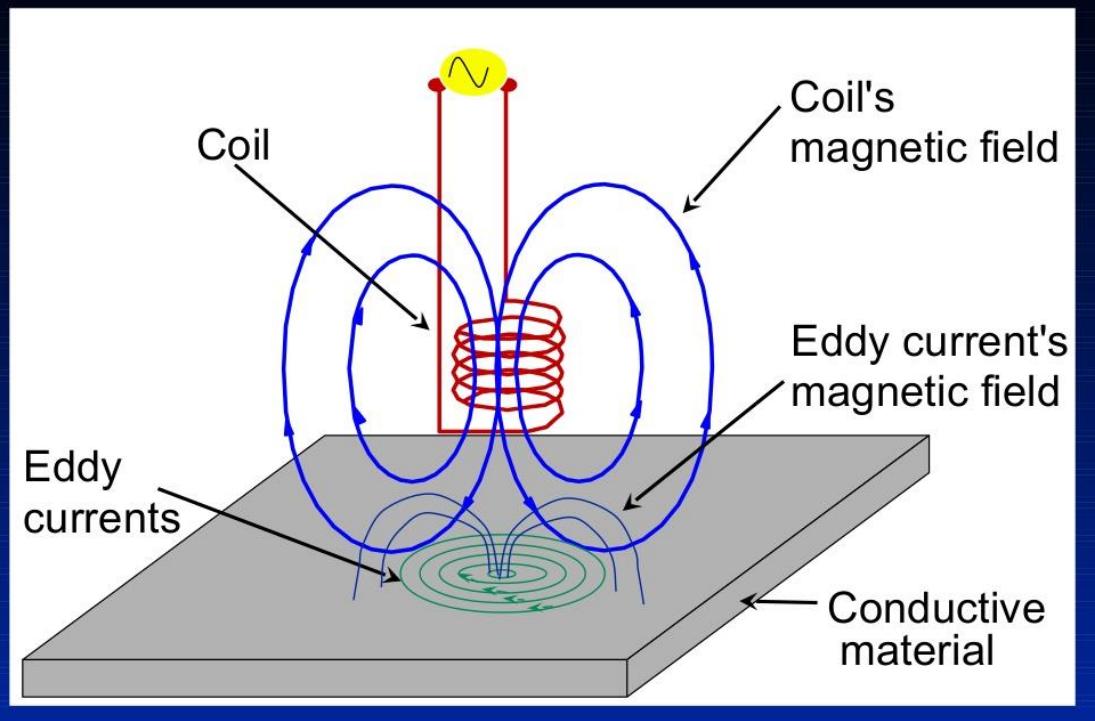


Örvényáram érzékelés

Elve:

Váltakozó mágneses tér örvényáramot indukál a fémes mintadarabban.
Az örvényáramok mágneses tere detektálható.

Eddy Current Testing



Ajánlott és felhasznált irodalmak

<http://www.mogi.bme.hu/TAMOP/mikromechanika/math-index.html>

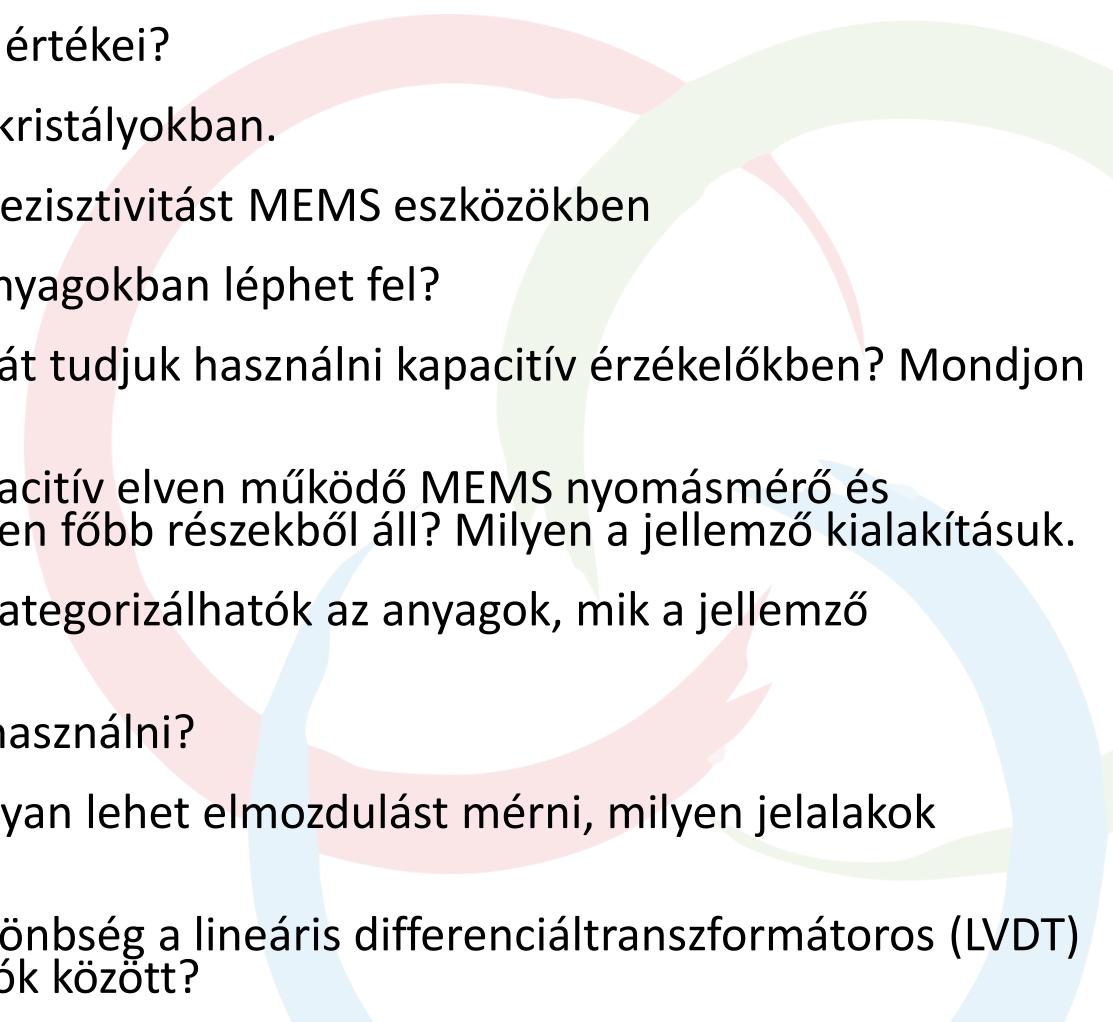
http://www.slideshare.net/smilingshekhar/mechanical-sensors-2-24677162?qid=ec08a37f-5a25-4908-a699-72058c30c4a4&v=qf1&b=&from_search=2

<http://www.slideshare.net/bapikumar144/mechanical-sensor?related=1>

<http://www.slideshare.net/kumarsri526/mechanical-sensors?related=2>



Ellenőrző kérdések

- 
1. Mi az a nyúlásmérő bélyeg, mi működésének fizikai alapja?
 2. Mi a gauge-faktor, mik a jellemző értékei?
 3. Piezorezisztív hatás félvezető egykristályokban.
 4. Hogyan lehet kihasználni a piezorezisztivitást MEMS eszközökben
 5. Mi a piezoelektromosság, mely anyagokban léphet fel?
 6. Milyen paraméterek megváltázását tudjuk használni kapacitív érzékelőkben? Mondjon példát ezekre?
 7. Mutasson példát (vázlattal) a kapacitív elven működő MEMS nyomásmérő és gyorsulásmérő szenzorokra. Milyen főbb részekből áll? Milyen a jellemző kialakításuk.
 8. Mágneses szempontból hogyan kategorizálhatók az anyagok, mik a jellemző paramétereik?
 9. Mi az a Hall-effektus, mire lehet használni?
 10. Differenciáltranszformátorral hogyan lehet elmozdulást mérni, milyen jelalakok mérhetőek?
 11. Mi a működés és felépítésbeli különbség a lineáris differenciáltranszformátoros (LVDT) és a kettőstekercsű induktív útadók között?



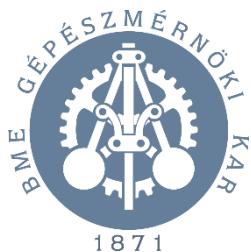
KÖSZÖNÖM A FIGYELMET!

BOJTOS Attila
BME - MOGI Tanszék
bojtos@mogi.bme.hu

Szenzorteknika

Az elmozdulás- és elfordulásmérés szenzorai

BOJTOS ATTILA
BME - MOGI TANSZÉK



M Ú E G Y E T E M 1 7 8 2



Tematika

Bevezetés a szenzorteknikába

- csoportosítás,
- méréstechnikai tulajdonságok,
- Jelfeldolgozás

Anyagszerkezet

- Atomszerkezet
- Kémiai kötések
- Sávszerkezet
- Félvezetők
- Fémek

Érzékelési elvek fizikai alapjai (szenzor)

- Termikus elvek, hőmérsékletmérés
- Optikai-elvek
- Ellenállásváltozás elvén működő érzékelés
- Piezoelektronos mérési elvek
- Kapacitás
- Mágneses mérési elvek
- Akusztikai elvek

Érzékelési módszerek, alkalmazások (jelátalakító)

- **Hossz-, távolság-, elmozdulás-, elfordulásmérés szenzorai**
- Sebesség-, térfogatáram-, gyorsulásmérés szenzorai
- Nyomás-, erő-, nyomatékmérés szenzorai
- (Kémiai érzékelés szenzorai)

Aktuátorok

- Motorok
- Piezoelektronos aktuátorok
- Magnetostrikciós aktuátorok

Integrált érzékelő és beavatkozó rendszerek (vendégelezés)

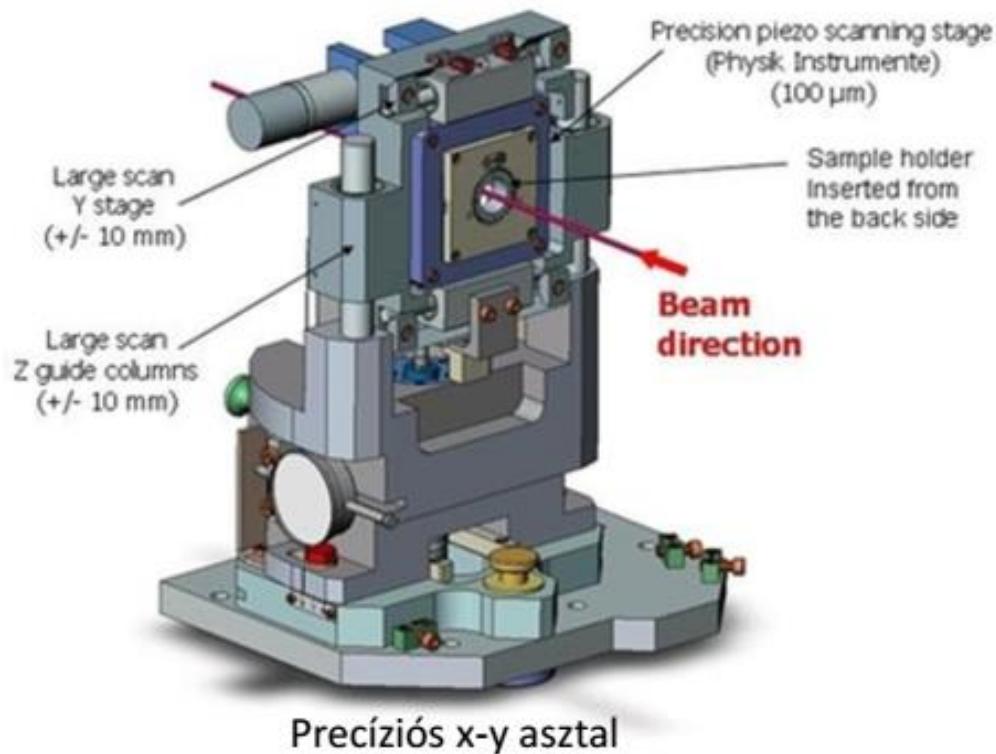
- Technológiai alapok, MEMS, NEMS, OEMS
- Szenzorhálózatok, IoT



Pozíció, elmozdulás mérése

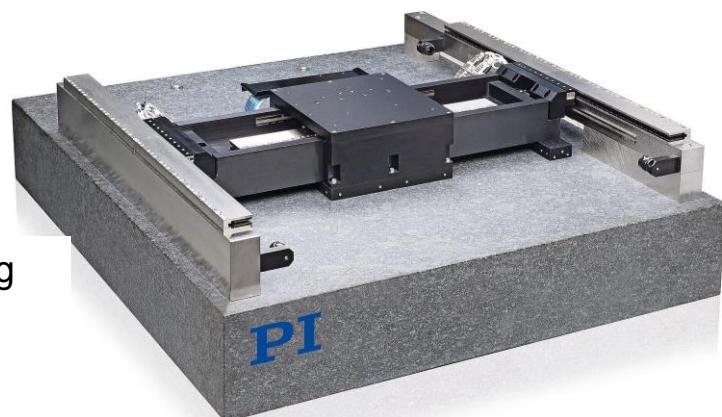
Abszolút pozíció: ??? Mihez képest? GPS ...

Relatív pozíció: végálláskapcsoló, optokapú, indukciós közelítéskapcsoló, elmozdulás-, gyorsulás-, elfordulásmérés



A-322 Plglide HS Planar Scanner with Air Bearing
XY Positioning System with 1 nm Resolution
Travel ranges to 500 mm × 1000 mm
Resolution to 1 nm, Velocity to 2 m/s

De: egy munkadarab mozgatásánál (robotkar, mintaasztal) a kiindulási pont meghatározása után az elmozdulásból az adott rendszerben a pozíció meghatározható.



Analóg Helyzetérzékelők (Induktív útadók)

Működési elve a vasmag elmozdulásával megváltozik a tekercsek induktivitása ezáltal impedanciája.

Váltakozó feszültséggel mérhető, 50 Hz ... 100 kHz.

Kialakításuk lehet:

- passzív induktivitás (a. és b. ábra), Wheatstone hídban mérhető.

$$U_{ki} = U_T \frac{(L_1 - L_2)}{4L_0} = U_T \frac{k \cdot \xi}{2}.$$

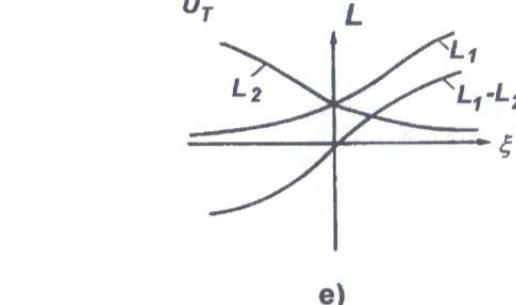
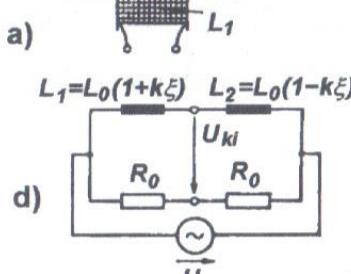
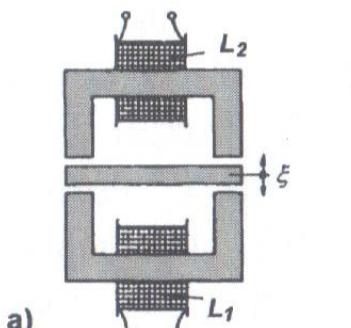
- Differenciál transzformátoros, LVDT (d. ábra).

Itt a primer tekercs táplálja a rendszert, a két szekunder tekercsen az elmozdulással arányos különbségi jel mérhető.

Kis elmozdulások,
 $\mu\text{m} \dots \text{mm}$ nagyságrendű.
Lásd M14B mérést.

Nagy elmozdulások,
 mm nagyságr. akár 500 mm.
Lásd M14A mérést.

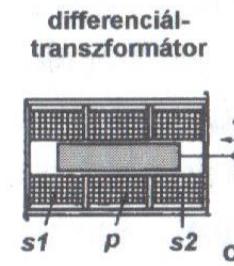
Zárt mágneses körű
induktív mérőátlakító



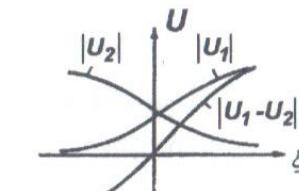
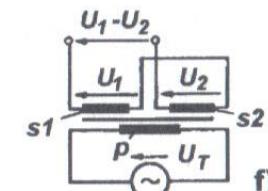
Nyitott mágneses körű
induktív mérőátlakító



hídkapcsolású
tekercsek



differenciál-
transzformátor

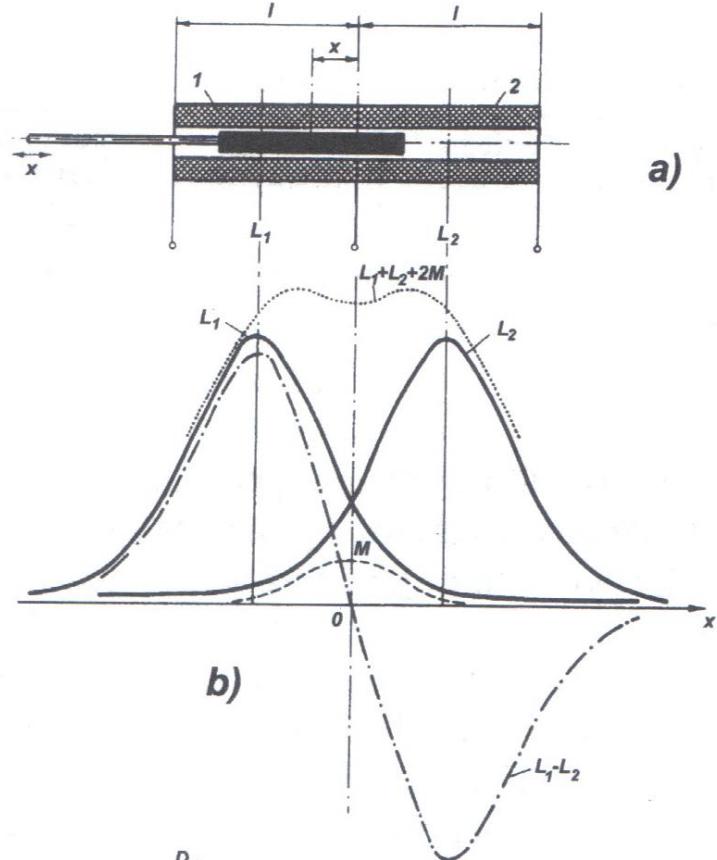


g)

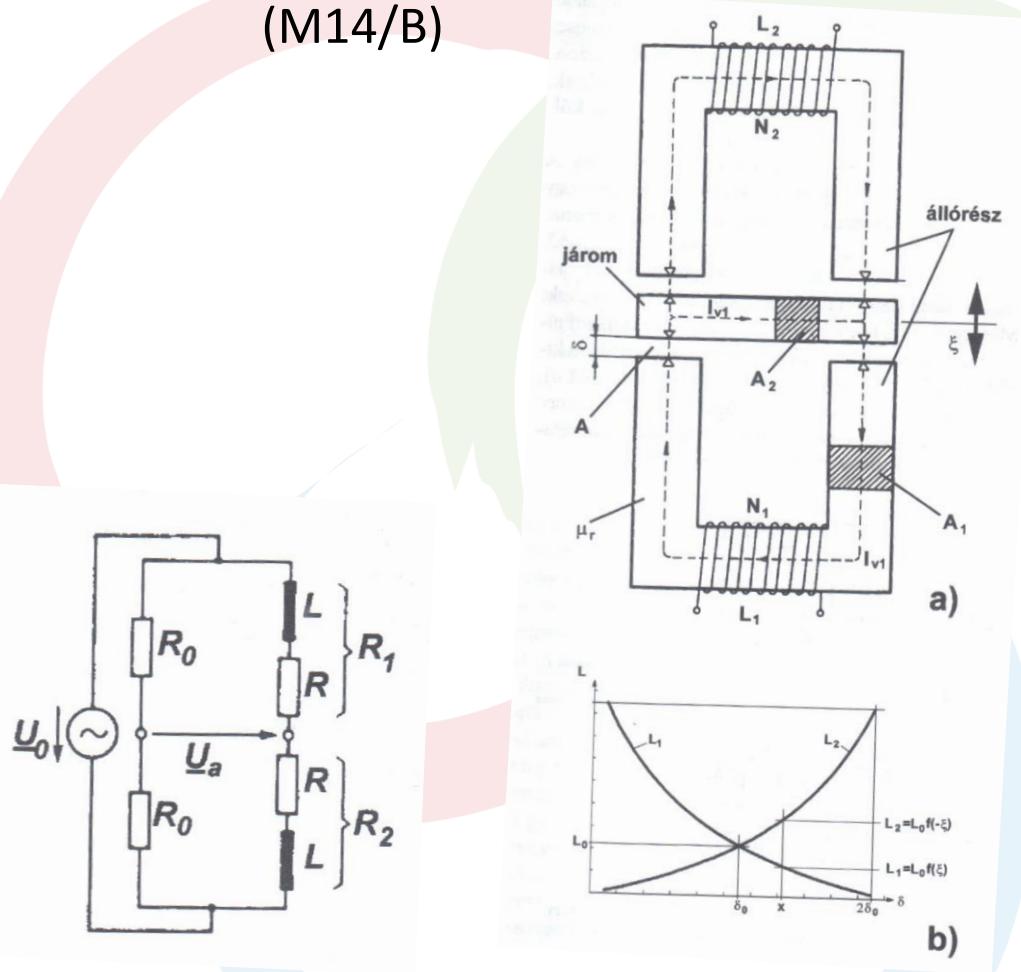


Analóg Helyzetérzékelők (Differenciál kialakítású Induktív útadók)

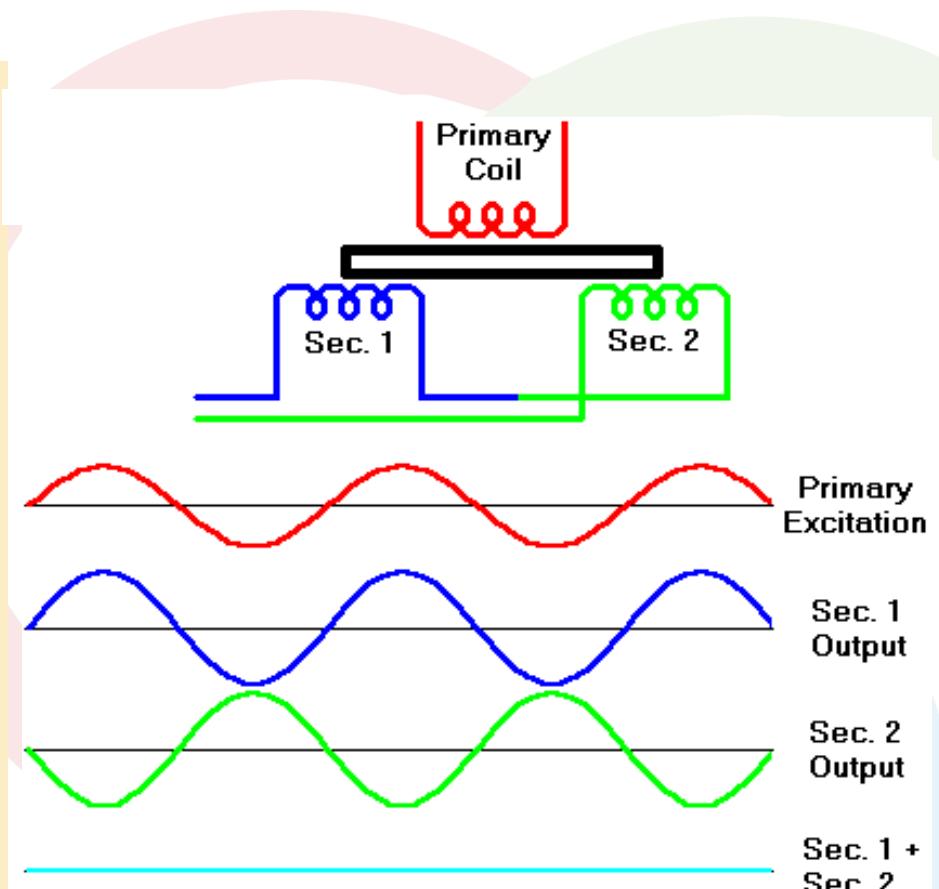
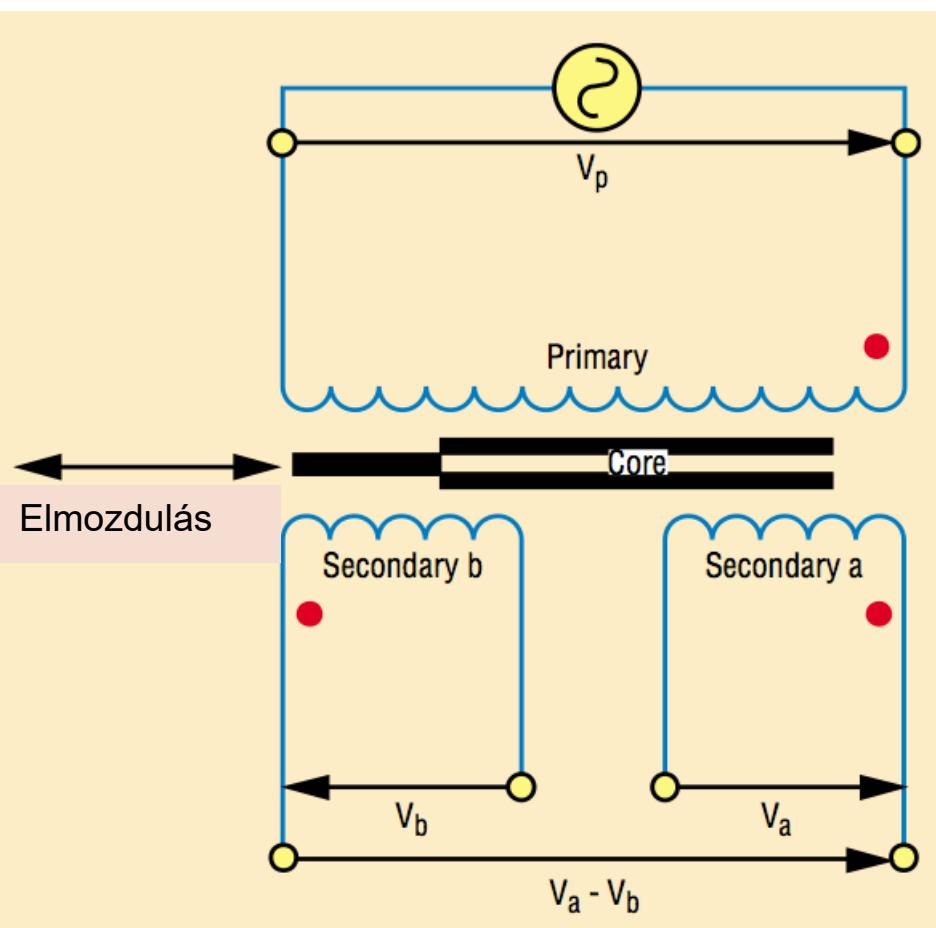
Nyitott mágneskörű differenciál
kialakítású induktív helyzetérzékelő
(M14/A)



Zárt mágneskörű differenciál
kialakítású induktív helyzetérzékelő
(M14/B)



LVDT – lineáris differenciál-transzformátor

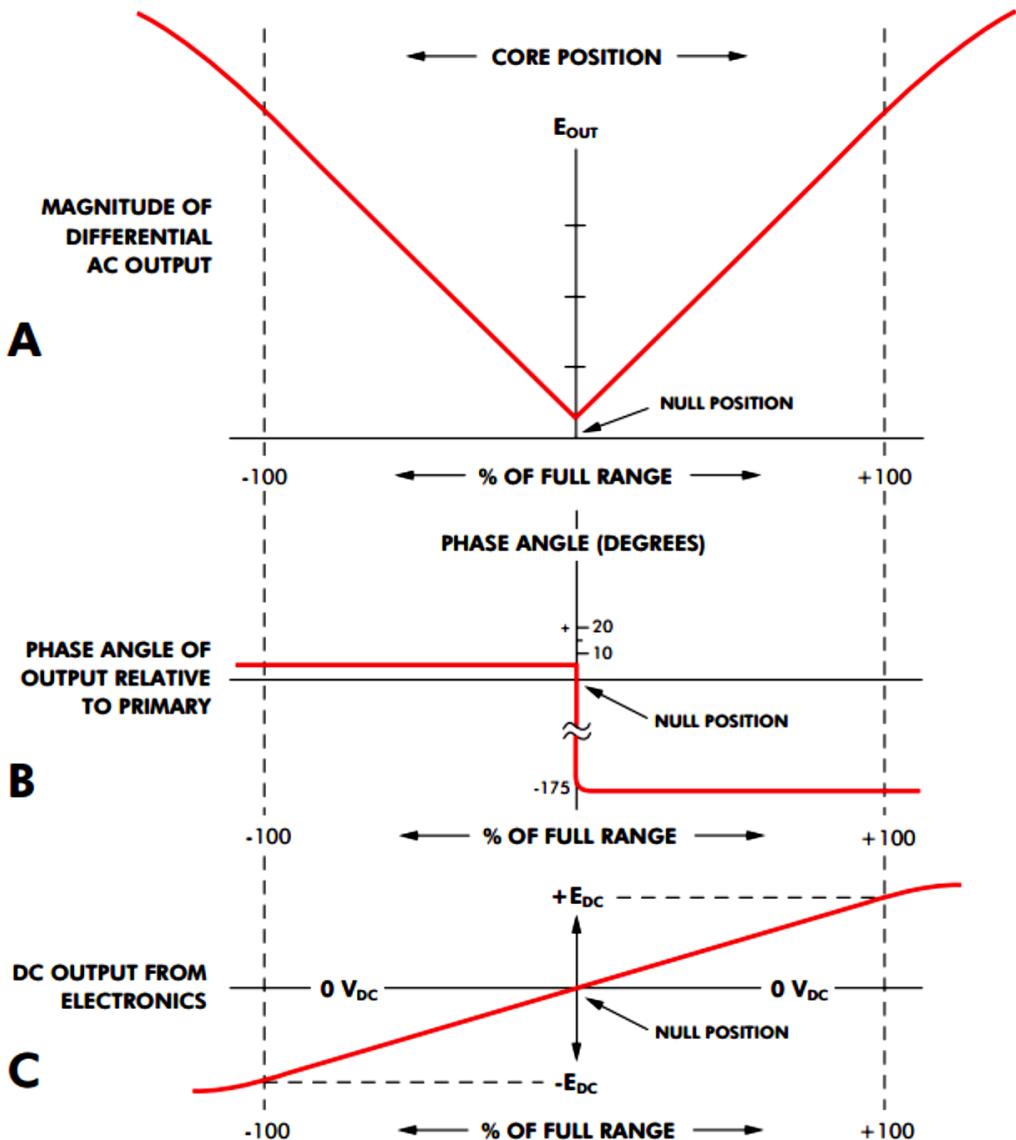


LVDT karakterisztika

A: differenciális AC kimenőjel

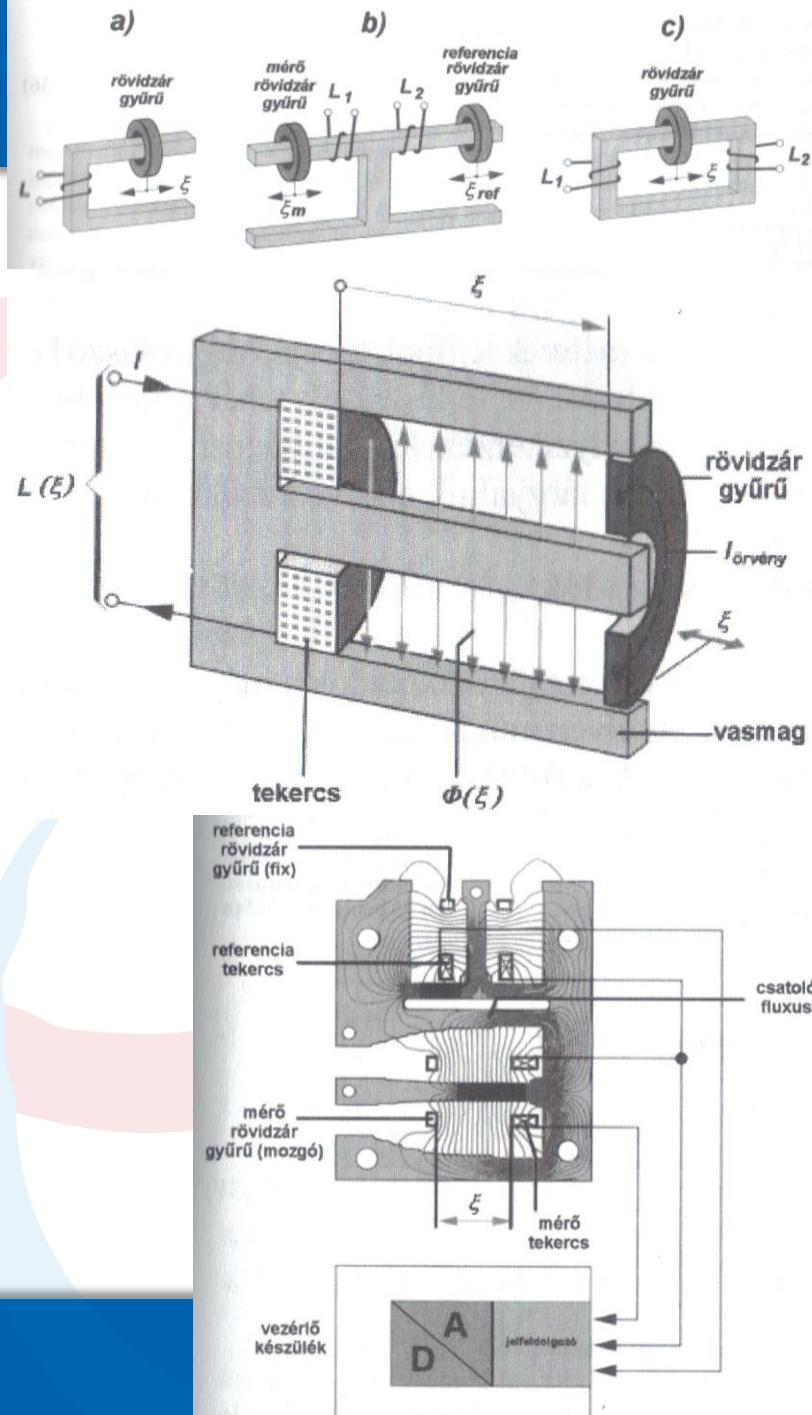
B: kimenőjel fázisszöge a primer jelhez képest

C: Egyenirányított DC kimenet (elektronika)
(Fázisérzékeny demoduláció)



Analóg Helyzetérzékelők (Rövidzár gyűrűs induktív útadók)

- Működési elve: a zárógyűrűben keletkező örvényáram torzítja a tekercs mágneses terét.
- A zárógyűrű helyzete modulálja a nagyfrekvenciás (5 Hz ... 50 kHz.) árammal táplált tekercs feszültségét,
- Demodulálva a helyzettel arányos feszültséget kapunk.
- A gerjesztő áramot gyakran saját rezonátor állítja elő.
- Jó linearitású.
- Hosszú, akár 1m-es útadó is kialakítható.



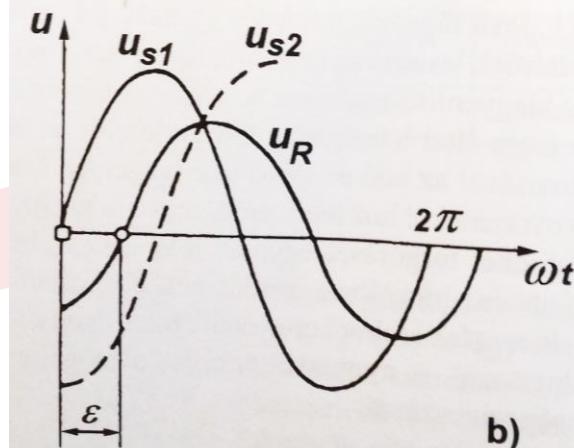
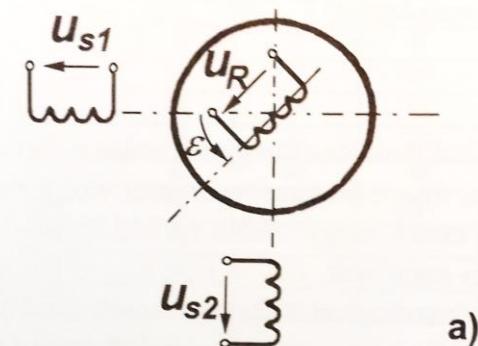
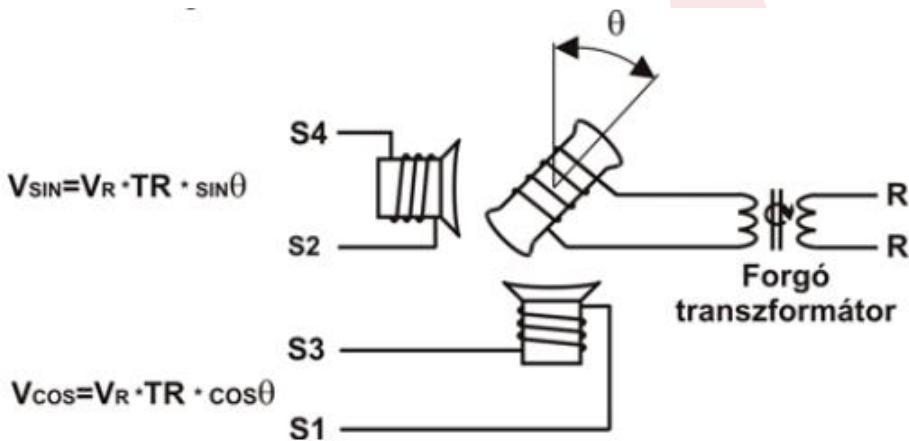
[Forrás: Lambert Miklós: Szenzorok. Bosch]

Analóg szögadók (Rezolver)

Működése a forgórészen indukált feszültség fáziseltérésének mérésén alapul.

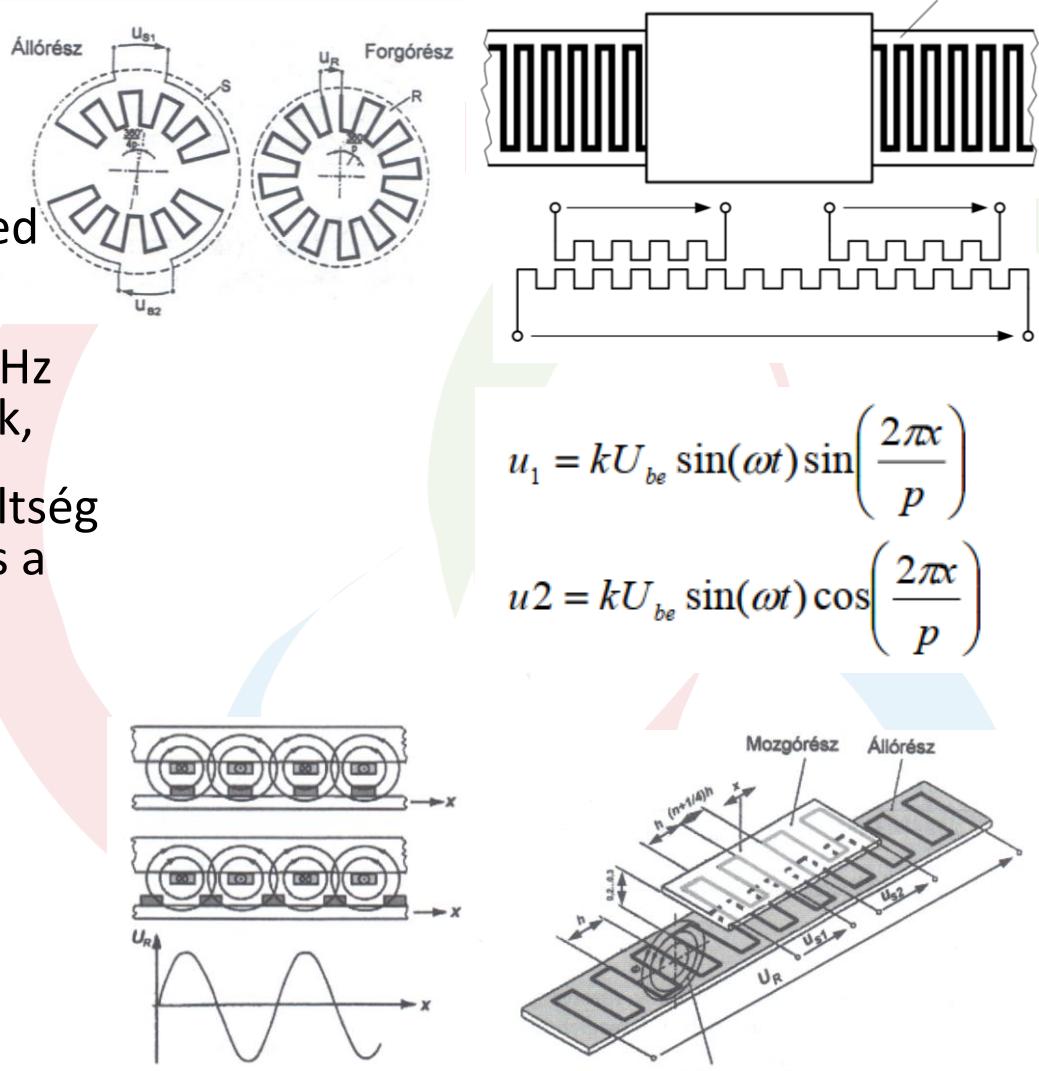
$$u_R = U_R \cdot \sin(\omega_s \cdot t - \varepsilon)$$

A gerjesztést az allórész tekercsei adják, amely 2 egymáshoz képest 90° -al eltolt fázisból áll.



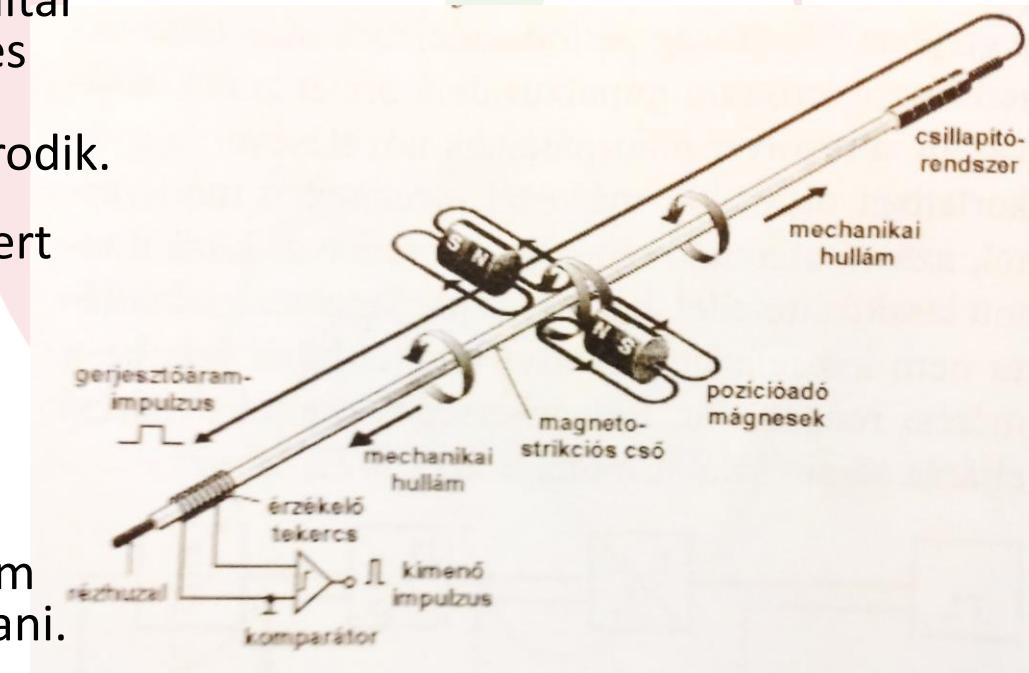
Induktosin

- Huzalozott pályája + csúszka,
- 0,1-0,15 mm légréssel,
- A csúszka 2 tekercset tartalmaz ¼-ed osztssal eltolva,
- A pálya tekercselését néhány kHz frekvenciájú feszültséggel gerjesztik,
- Ennek hatására a csúszkában feszültség indukálódik, ami arányos a pálya és a csúszka tekercsei közötti kölcsönös induktivitással. Ez pedig arányos a relatív elmozdulással.
- Az elérhető feloldás: 0,05-3 µm, szögmérésnél: 0,25" ... 0,05"
- Az abszolút hiba: 2,5 µm, szögmérésnél: +/-5"



Analóg Helyzetérzékelők (Magnetostríkciós útadó)

- Működési elve a Wiedemann effektuson alapszik.
- A mérőelem egy magnetostríkciós anyagból (Fe-Ni) készült cső ($d: 0,7 \text{ mm}$, $v: 0,1 \text{ mm}$) melynek belsejében áramvezető rézhuzal fut.
- Kívülről állandó gyűrűmágnes veszi körül, melynek pozícióját mérjük.
- A rézhuzalra adott áramimpulzus által keltett és a gyűrűmágnes mágneses terének kölcsönhatásaként a magnetostríkciós anyag megcsavarodik.
- A kialakult mechanikai hullám ismert sebességgel (2830 m/s) éri el a szálvégnél lévő vevőtekercset.
- A késleltetés idejéből számítható a mágnesgyűrű helyzete.
- Hossza több méter (max 10m). Nem kell kifeszített egyenes pályán tartani.



Analóg Helyzetérzékelők (Magnetostrikciós útadók jellemzői)

- nagy, akár 0,5 µm-ig terjedő felbontás
- max. 7620 mm-es mérési hossz
- több pozíciót és sebességet mér egyszerre
- érintés- és így kopásmentes – nincsenek leállások, hosszú élettartam
- könnyű integráció számos interfacen keresztül (pl. IO-Link, Profinet, EtherCAT, SSI és analóg programozható kimeneti jelek).



Analóg Helyzetérzékelők (Magnetorezisztív Érzékelő)

Működése egy (egyenes vagy körív mentén) elmozduló állandó mágnes által létrehozott mágneses teret érzékelő szenzoron lapszik.

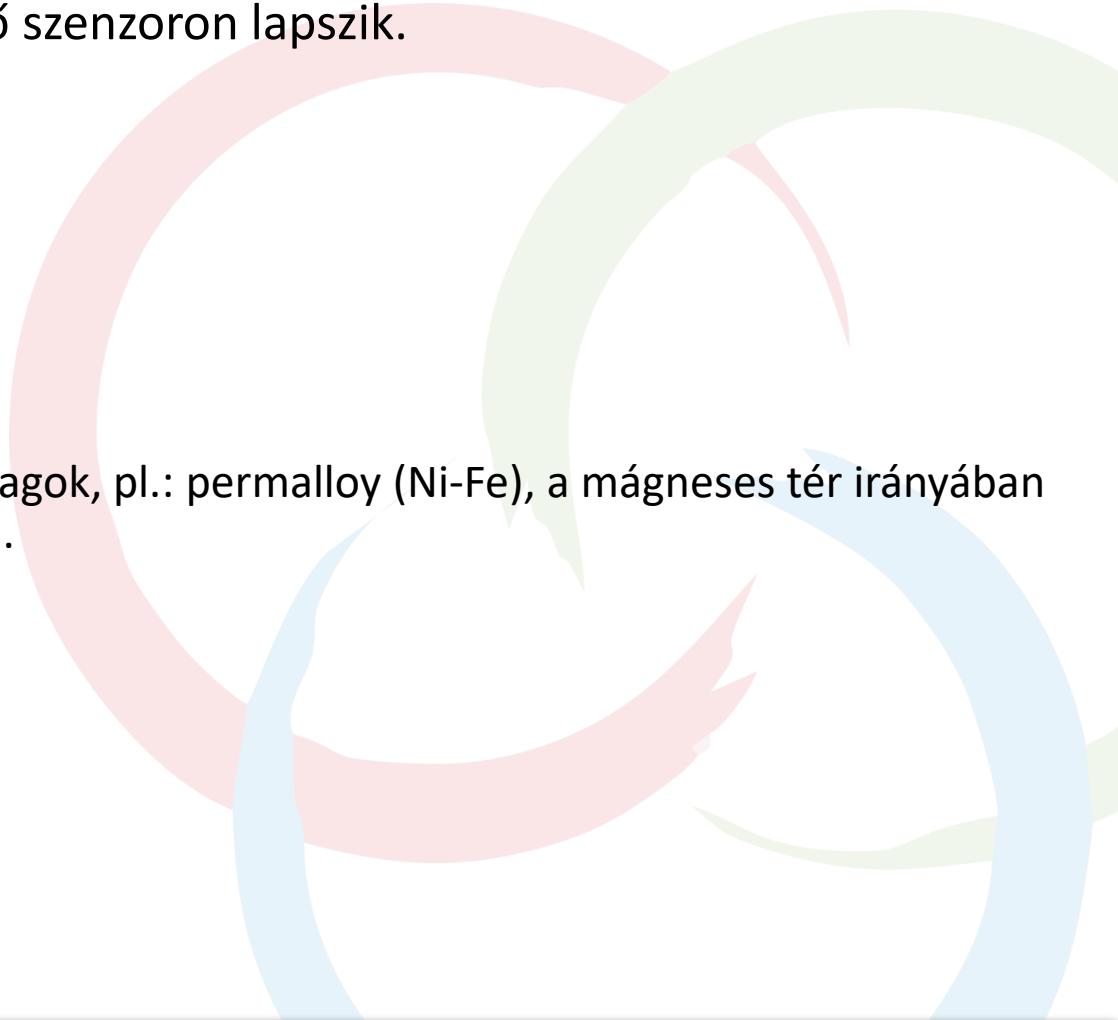
A szenzor elem lehet:

- magnetorezisztor,
- magnetodióda, vagy
- magnetotranzisztor.

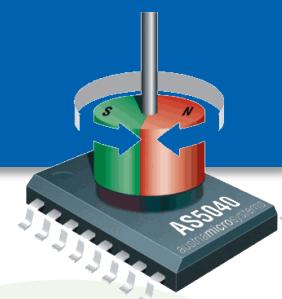
Anyaga lehet:

- Fém: AMR-anizotrop mágneses anyagok, pl.: permalloy (Ni-Fe), a mágneses tér irányában kis mértékben megnő az ellenállása.
- Félezető,

Mágneses árnyékolás szükséges.



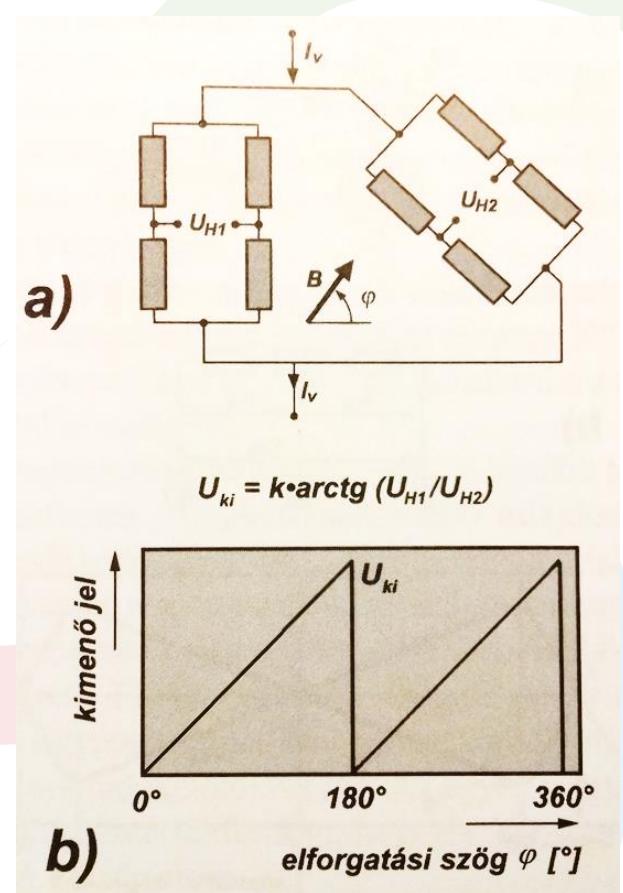
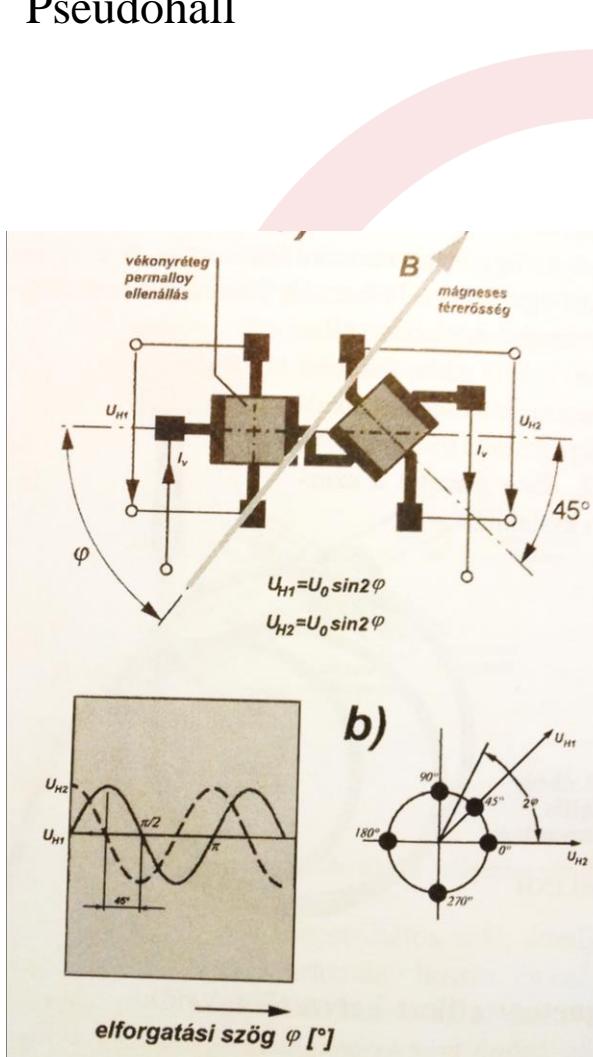
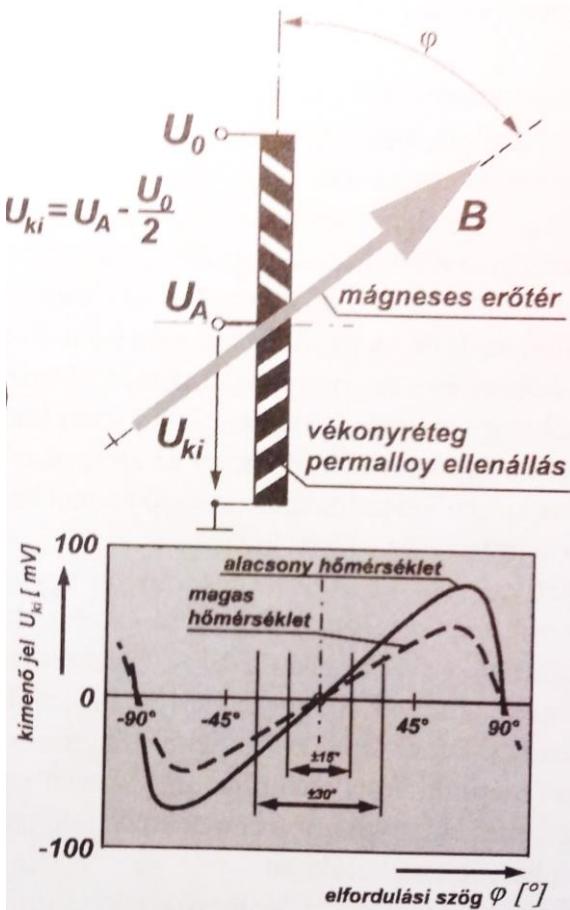
Analóg Helyzetérzékelők (Magnetorezisztív Szöghelyzet Érzékelők)



AMR

Pseudohall

2 Teljes hidas elrendezésű Pseudohall

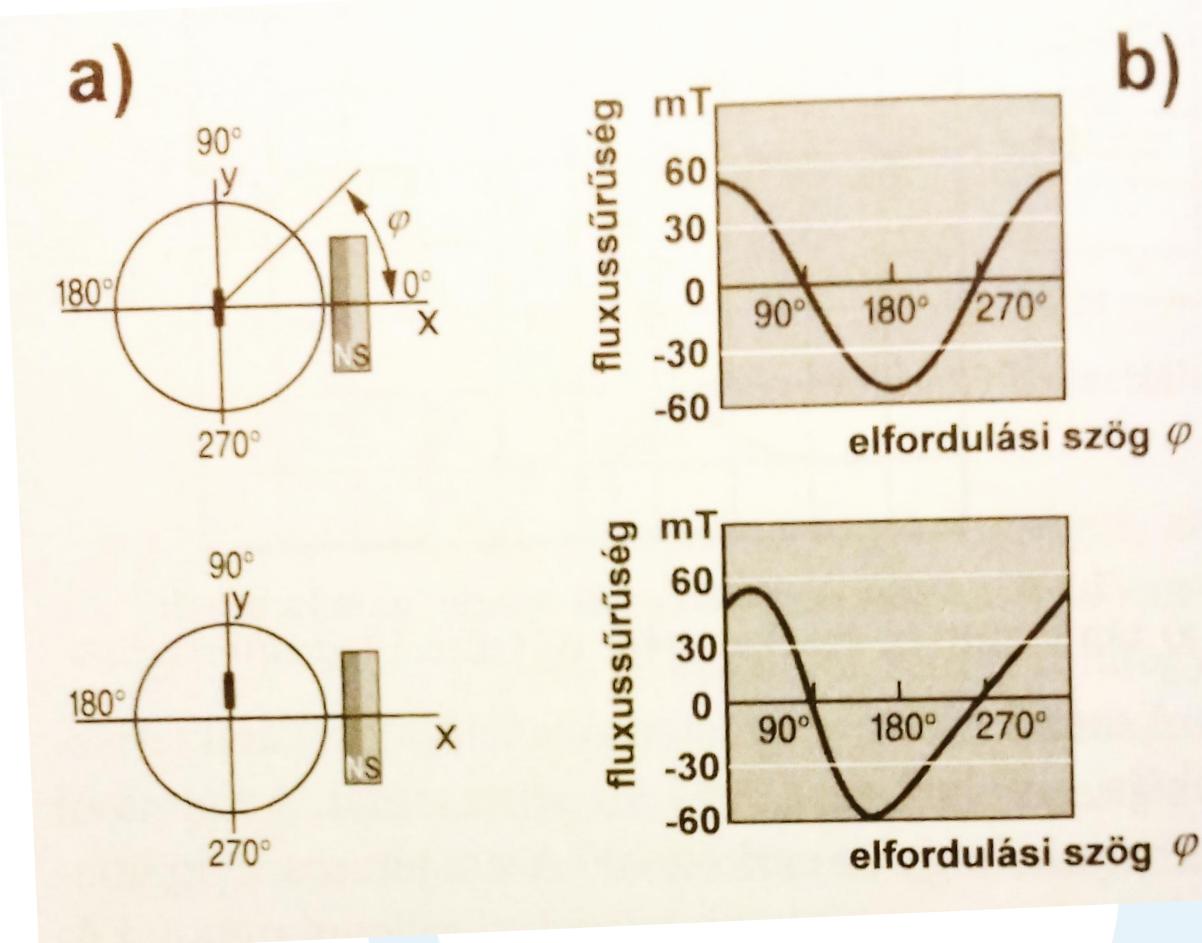


[Forrás: Lambert Miklós: Szenzorok.]



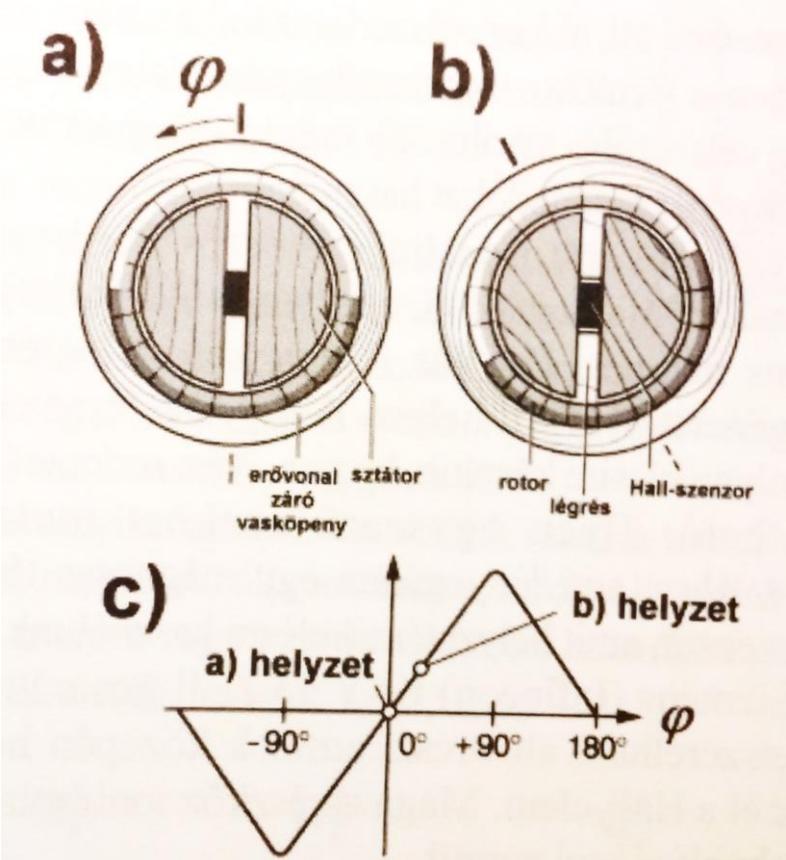
Analóg Helyzetérzékelők (Mágneses Hall Érzékelők)

- Működése a félvezetők galvanomágneses tulajdonságán, vagyis a Hall-effektuson alapul.
- Lényege, hogy a félvezetőn átfolyó áramot a mágneses tér eltéríti, ami az áram irányára merőleges oldalakon feszültséget hoz létre.

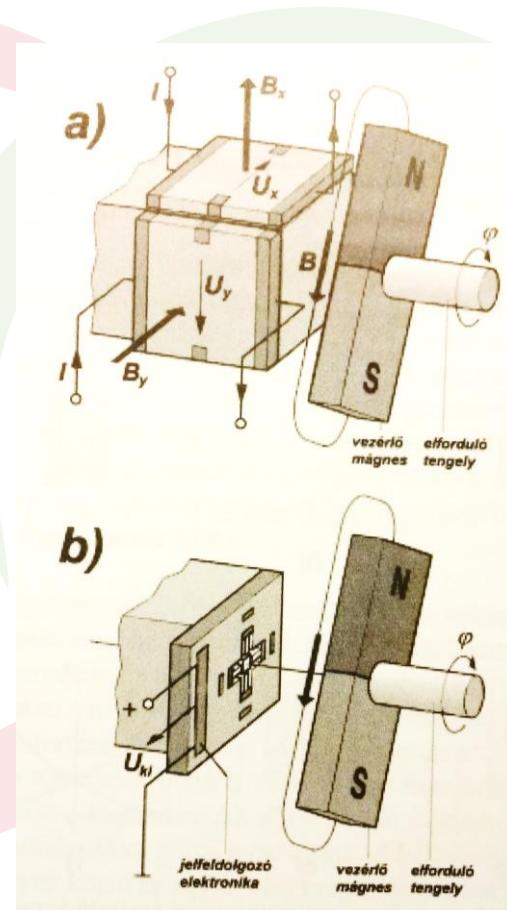


Analóg Helyzetérzékelők (Mágneses Hall Érzékelők)

$\pm 90^\circ$ -ra optimalizált kialakítás.

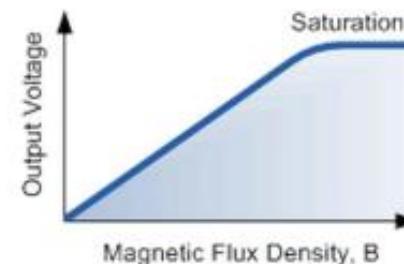
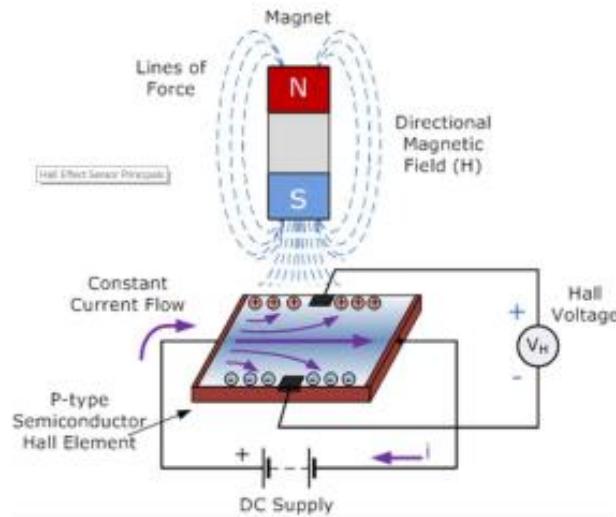


Teljes körül fordulásra kialakított.



Analóg Helyzetérzékelők (Mágneses Hall Érzékelők)

Mágneses kapcsolók: Hall-szonda – állandó mágnes jelenléte – egyszerű, zavarvédett, magas hőmérsékleten ($> \approx 200^\circ\text{C}$) nem működik



Where:

V_H is the Hall Voltage in volts

R_H is the Hall Effect co-efficient

I is the current flow through the sensor in amps

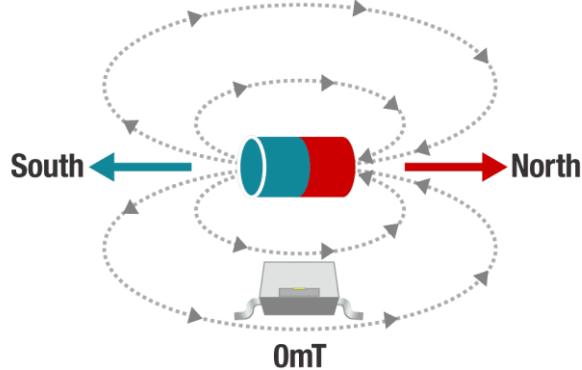
t is the thickness of the sensor in mm

B is the Magnetic Flux density in Teslas

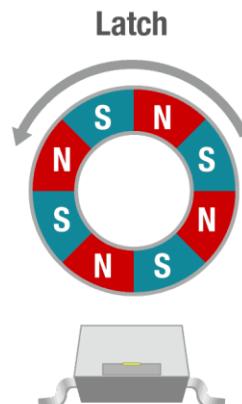


Analóg Helyzetérzékelők (Mágneses Hall Érzékelők)

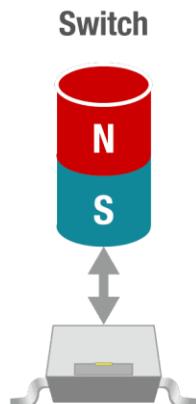
Analóg („linear”)



Inkrementális
(Növekményes)



Digitális
(Kapcsoló)



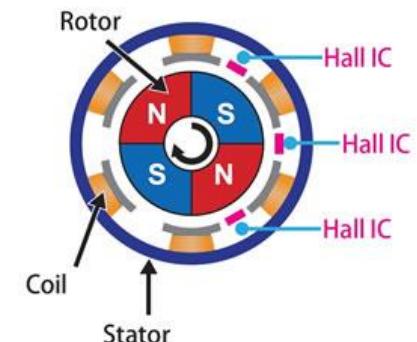
Alkalmazások:

- Kefe nélküli motorok szöghelyzet érzékelése

Automotive Hall Effect IC S-57P1 Series

150°C / 26V Operation

Example: Brushless Motor

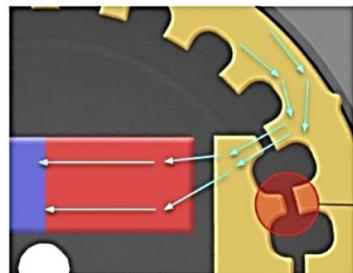
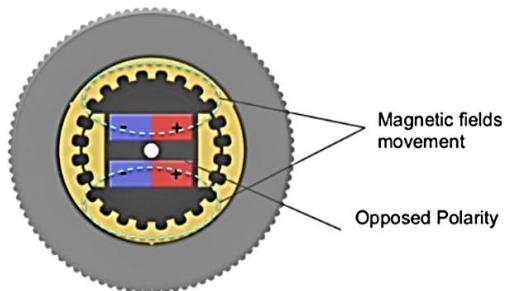


Mágneses elfordulásérzékelő

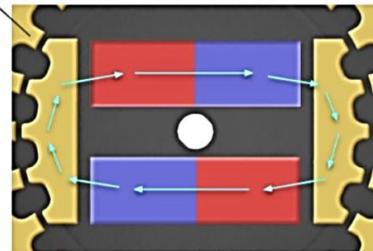
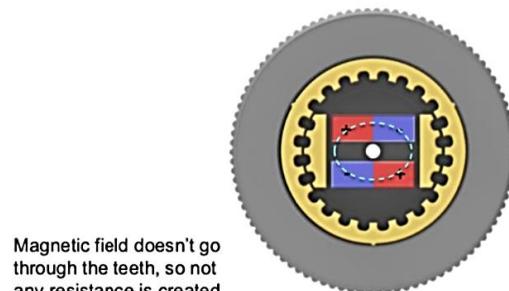
Gyorskereső (Scroll) funkció mágneses egérrel

Polaritásváltás elektromos impuluzzal

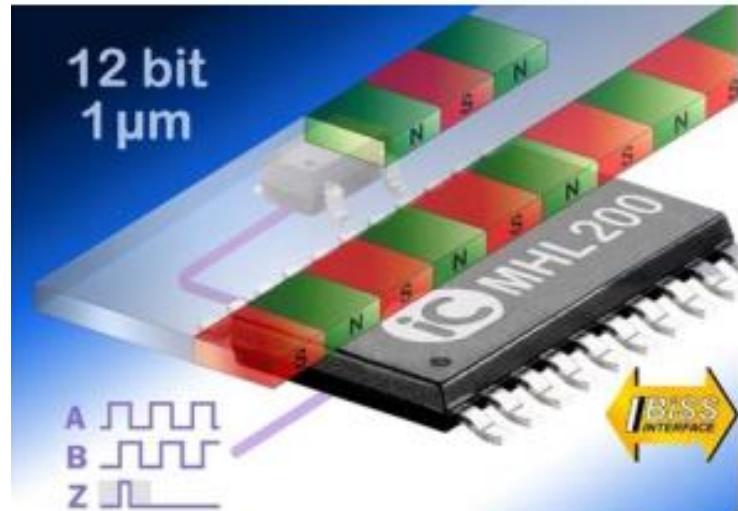
Racsnis üzemmód



Szabadon pörgő üzemmód

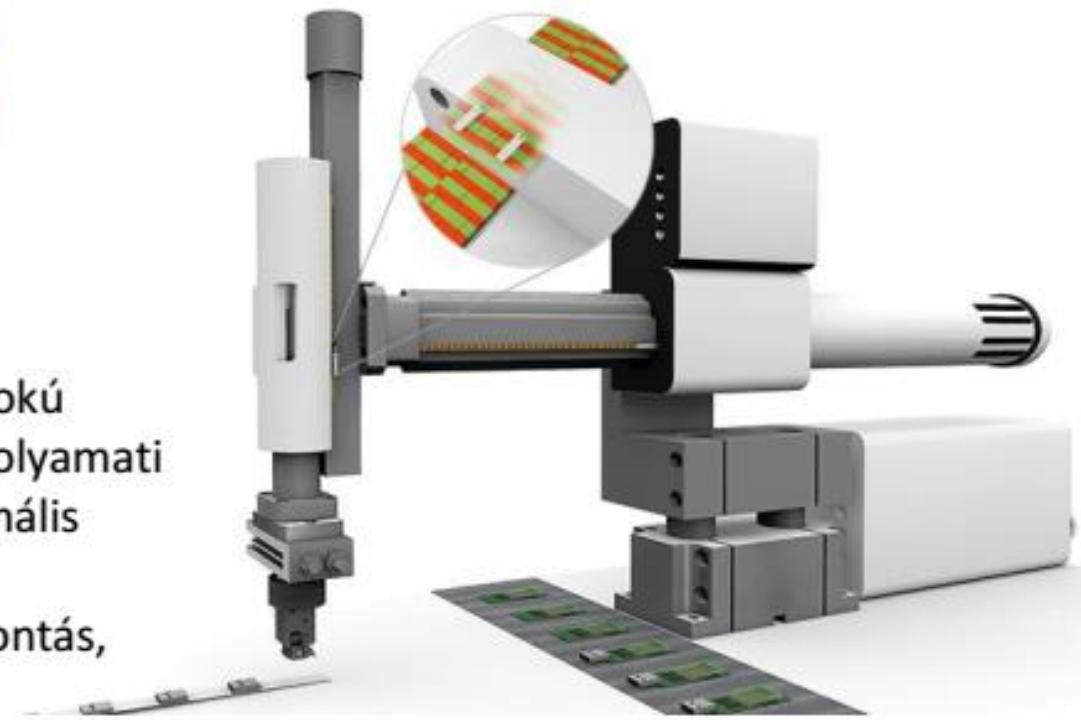


Inkrementális mágneses útadó



A felbontást a geometriai kialakítás határozza meg.

Valós idejű, érintésmentes, magas fokú linearitás, erősen dinamikus, nagy folyamati sebességű alkalmazásokban is optimális visszajelzést adnak a pozíóról, energiahatékony, akár 1 µm-es felbontás, néhány mikrométeres pontosság.



Kapacitív érzékelés elve

A mérődő jel

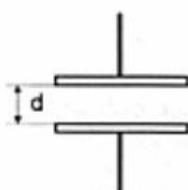


kapacitásváltozás

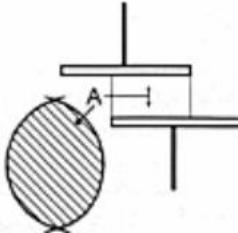
Párhuzamos elektródájú elrendezés

$$C_0 = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$$

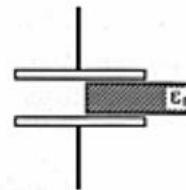
C [F] - a kondenzátor kapacitása,
 $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ As/Vm - a vákuum dielektrikus állandója,
 ϵ_r [1]: relatív dielektrikus állandó
 A [m^2] - elektróda felszíne
 d [m] - elektródák távolsága



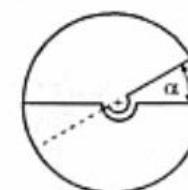
$$C \sim 1/d$$



$$C \sim A$$



$$C \sim \epsilon_m$$



$$C = C_0 + \alpha$$

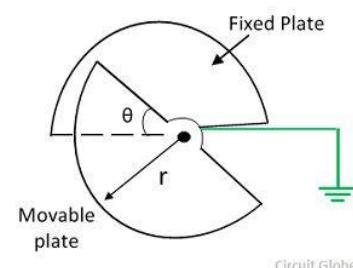
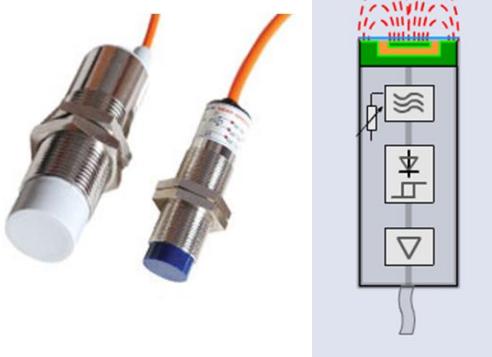
Lehetséges mérési elvek:

- Kondenzátor fegyverzetei távolságának változása, $C \sim 1/d$,
- Kondenzátor fegyverzeteinek közös felületének megváltozása
 - oldalirányú eltolódás, $C \sim A$,
 - Elfordulás, $C \sim C_0 + \alpha$,
- Dielektrikum változás, $C \sim \epsilon_r$,

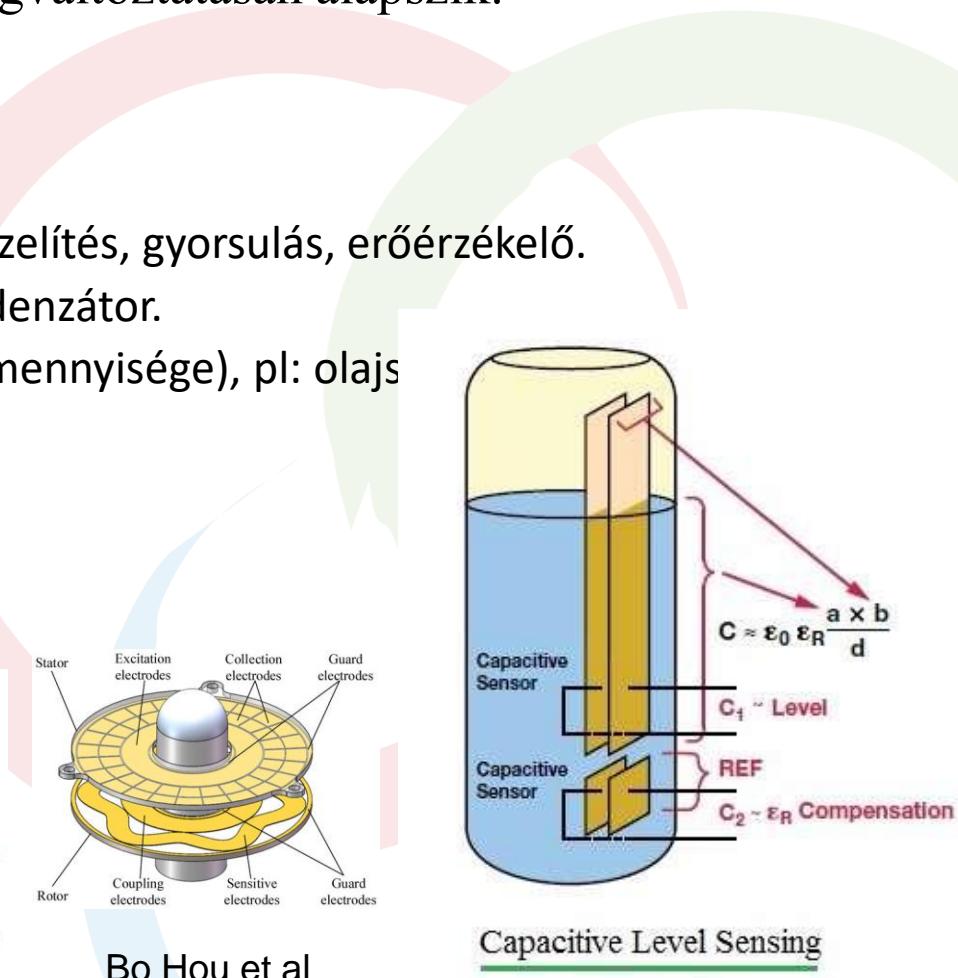


KAPACITÍV ÉRZÉKELŐK

- Működése a szenzor kapacitásának megváltoztatásán alapszik.
- $C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$
- Megváltozhat:
 - d – a fegyverzetek közötti távolság, pl.: közelítés, gyorsulás, erőérzékelő.
 - A – a fegyverzetek felülete, pl.: Forgókondenzátor.
 - ϵ_r – a fegyverzetek közötti dielektrikum (mennyisége), pl: olajs

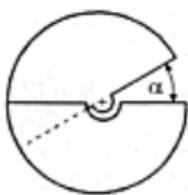


Bo Hou et al



Kapacitív érzékelők

(Fegyverzetek közös felületének megváltozása, $C \sim A$)



Fegyverzetek relatív elfordulása

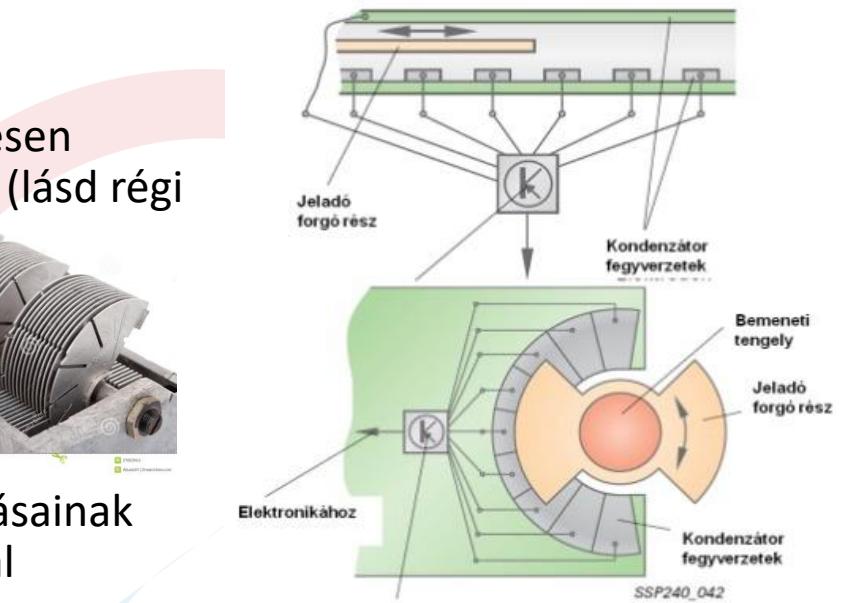
- Egybefüggő körcikk fegyverzetekből álló forgókondenzátor. A kapacitás fokozatmentesen változik a fegyverzetek relatív elfordulásával (lásd régi detektoros rádió).



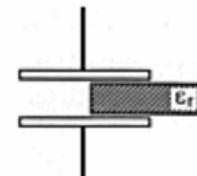
- Több szegmensből álló fegyverzetek kapacitásainak szelektív érzékelése útján diszkrét ugrásokkal állapítható meg a szögállás (pl. szervókormány szöghelyzet jeladó).

Fegyverzetek relatív elmozdulása (lineáris útadó)

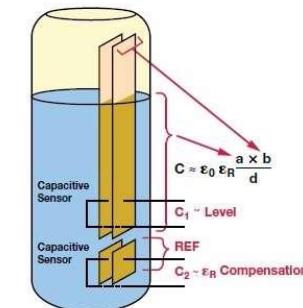
- Szegmentált fegyverzet,
- Inkrementális útmérés.



Kapacitív érzékelők (relatív dielektromos állandó megváltozása, $C \sim \epsilon_r$)



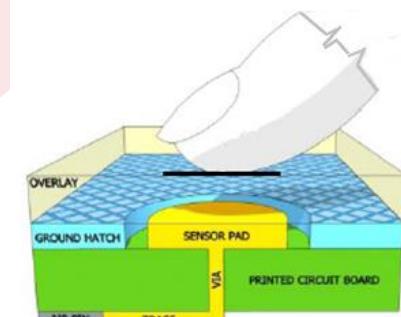
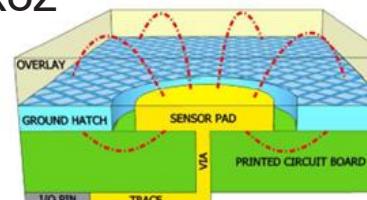
- Folyadékszint (üzemanyag, motorolaj, stb) – a kapacitás a fegyverzetek közötti tér folyadékkal való kitöltésével, vagyis a dielektromos állandó térbeli változásával arányos.



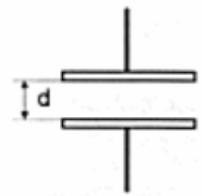
- Közelítés érzékelő - Egy adott anyaggal elérhető érzékelési távolság az ϵ_r dielektromos állandó függvénye, és az un. jellemző redukciós tényezővel megbecsülik:

Anyag:	FE 360	St 37	Víz	Búza	Fa	Üveg	Olaj	PVC	PE	Kerámia
Red. tény.	1	1	1	0,8	0,7	0,6	0,4	0,4	0,37	0,3

- Érintésérzékelés – a dielektromos állandó megváltozását az ujjak, vagy egyéb rajzeszköz jelenléte okozza.



Kapacitív érzékelők (Fegyverzetek távolságának változása, $C \sim d$)



Hagyományos fém fegyverzeses

- Közelítés érzékelő
 - Az érzékelési távolság az ϵ_r dielektrikus állandó függvénye,
 - Általában rezonancia módban működik, amit az érzékelt anyag jelenléte elhangol,
 - Általában tartalmazza a jelfeldolgozó elektronikát és a kimenete digitalis 1 / 0 jel (kapcsoló).
- Távolságmérő
 - Mérés váltakozó feszültségű táplálással,
 - Kimeneti feszültség a távolsággal arányos,
 - A céltárgy földelt elektródaként viselkedik.



Tisztán kapacitív, vagy pn átmenetes félvezetők

- Nyomás, gyorsulás, stb. közvetett mérése MEMS érzékelővel.

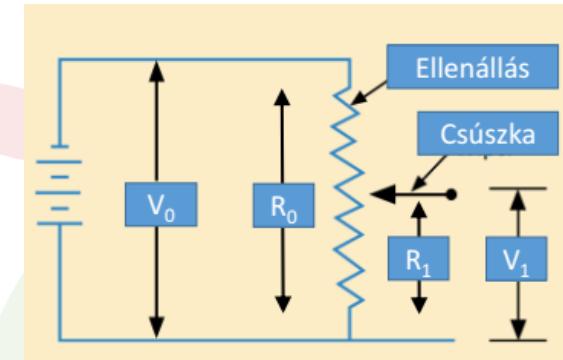
Analóg Helyzetérzékelők (Potenciométerek)

A potenciométer egy villamos ellenállás, melynek áramvezető testéhez érintkező csúszka csatlakozik.

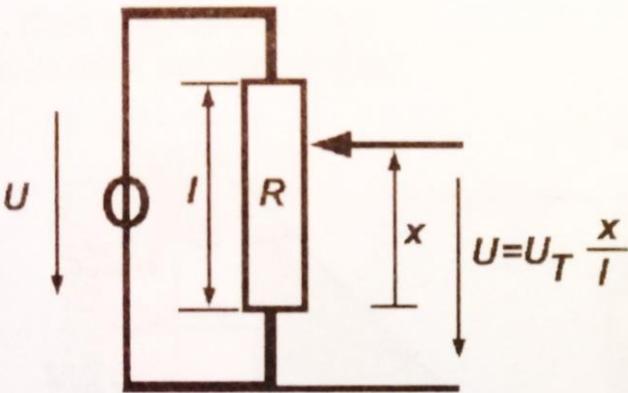
Elmozdulással / elfordulással arányos (ellenállás R_1) feszültségosztás.

Ellenállás anyaga:

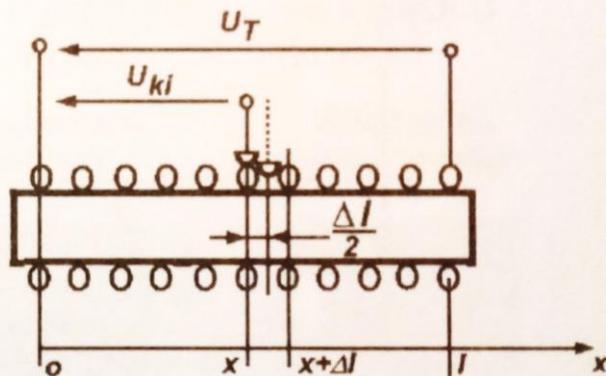
- Hagyományosan szénréteg vagy cement, kopik és zajos.
- A precíziós potenciométereket kis hőmérsékletérzékenységű konstantán huzalból csévélnek.
- Újabban vezető polimer anyagú ellenállásokat is használnak.



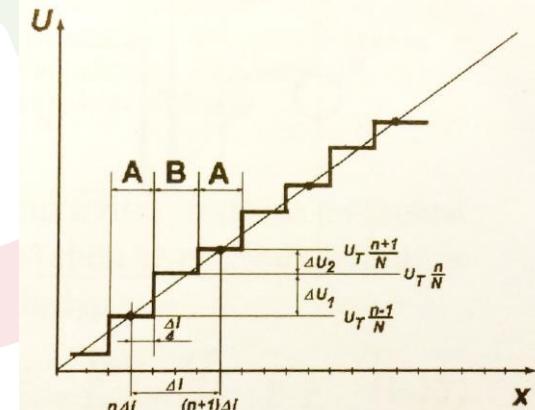
$$V_1 = \frac{R_1}{R_0} V_0$$



Huzalpotenciométer elvi kapcsolása



Elvi kialakítása



Statikus karakterisztikája



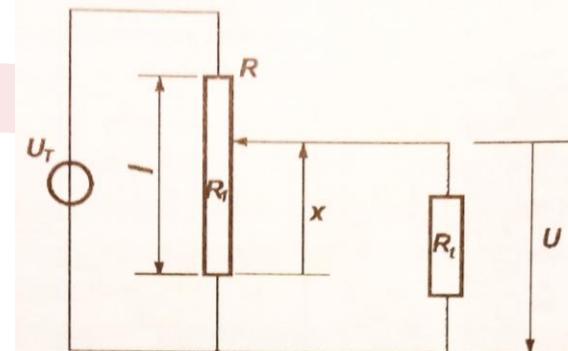
Analóg Helyzetérzékelők (Potenciométerek)

A csúszóríntkezőn mért feszültség – elmozdulás karakterisztika függ a terhelő R_t ellenállástól (a mérőeszköz bemeneti ellenállása).

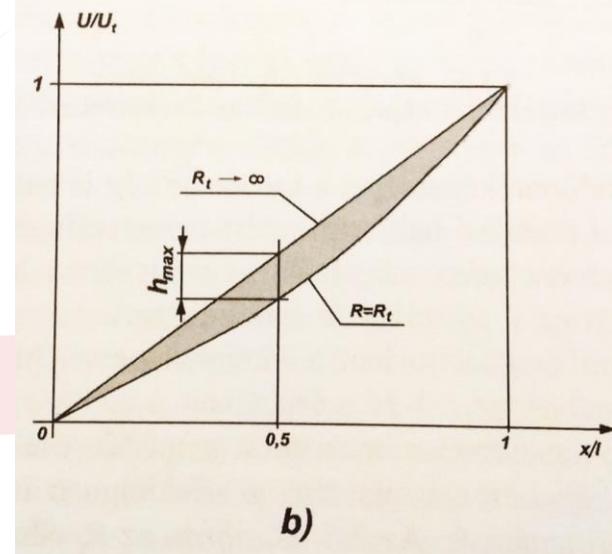
$$U = U_T \frac{R_t \times R_1}{R_t \times R_1 + (R - R_1)}$$

$$U = U_T \frac{R_1}{R}, \quad \text{ha } R_t \rightarrow \infty$$

Linearitási hiba < 1%, ha $R_t > 25R$



a)



b)



Analóg Helyzetérzékelők (Potenciométeres jelátalakítók kialakítása)



Potenciométeres lineáris útadó

[Forrás: <https://www.meter.hu/linearis.php>]



Potenciométeres szögadó

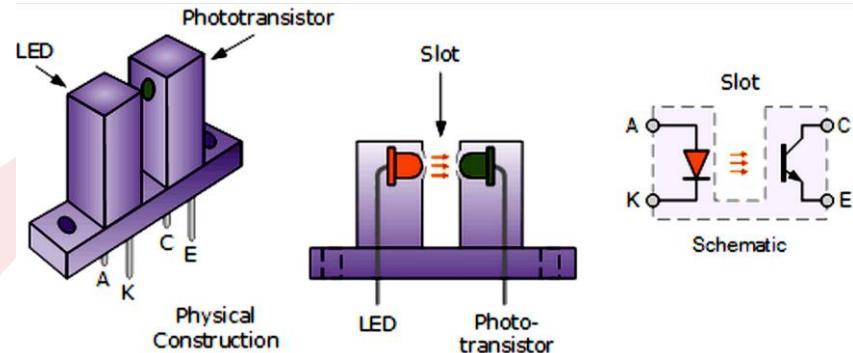
(PILLANGÓSZELEPÁLLÁS POTMÉTER)

[Forrás: <https://alkatreszek.hu>]

Optikai pozíció/szög jeladó (encoder)

Optikai érzékelő:

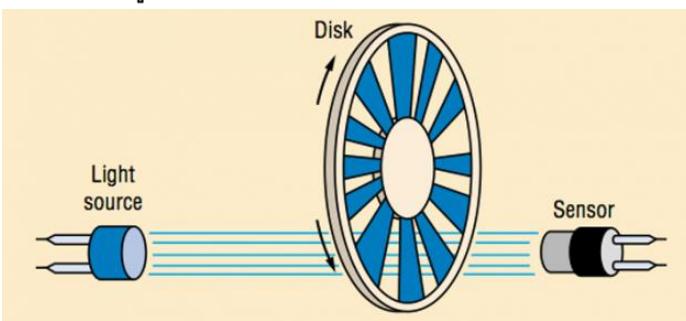
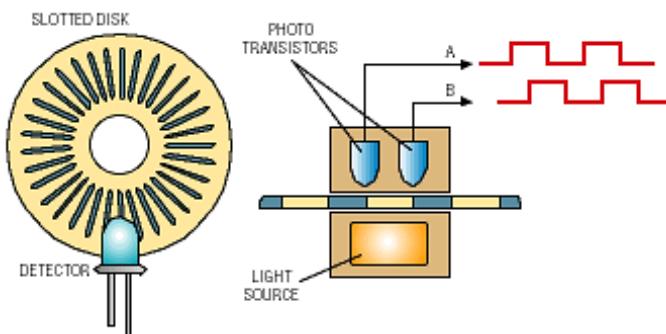
transzmissziós optokapu, légréssel
elleátott LED – fototranzisztor páros.



Inkrementális pozíció/szög érzékelő:

Kódtárcsa + optokapu

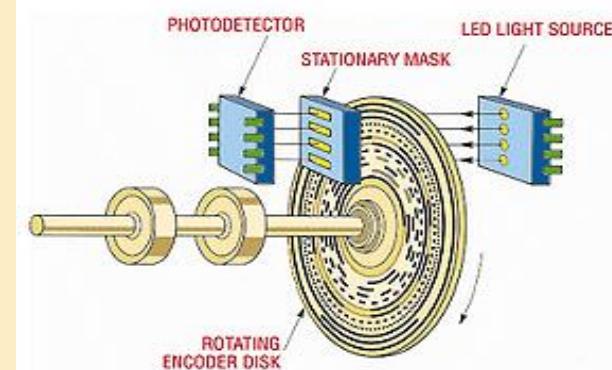
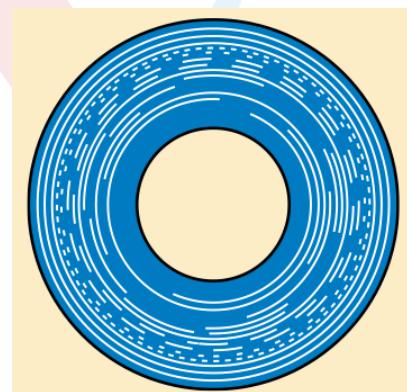
Irány érzékelése: 2 detektor $\frac{1}{4}$ osztással eltolva



Abszolút pozíció/szög érzékelő:

Kódtárcsa + optokapu

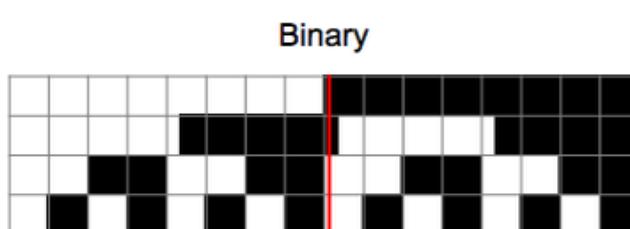
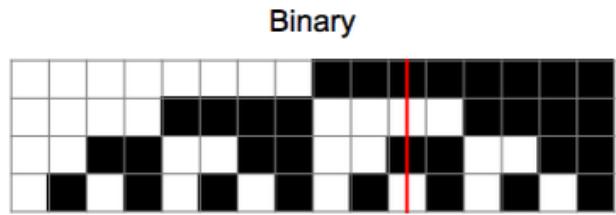
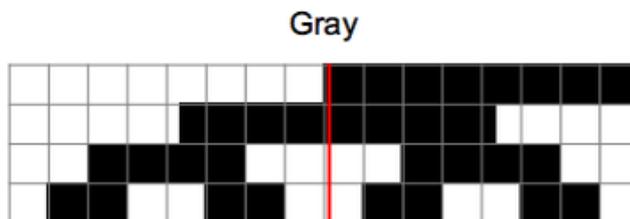
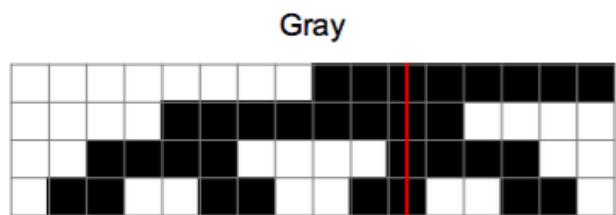
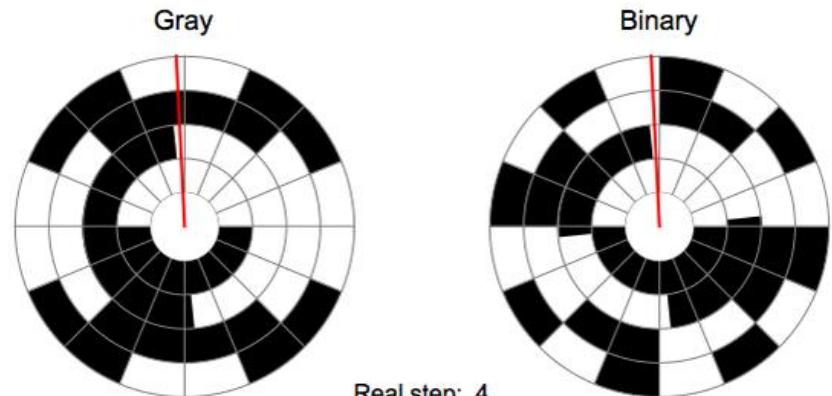
Felbontásnak megfelelő számú optoérzékelő.



Optikai abszolút pozíció/szög jeladó kódtárcsa

A sávok (detektorok) kis mértékű eltolódása által okozott hiba:

- Bináris kódtárcsa esetén több lépés is lehet, (egyszerre több kódátmenet)
- Gray kód esetén csak 1 lépést téveszthet a kiolvasáskor (egyszerre egy kódátmenet)

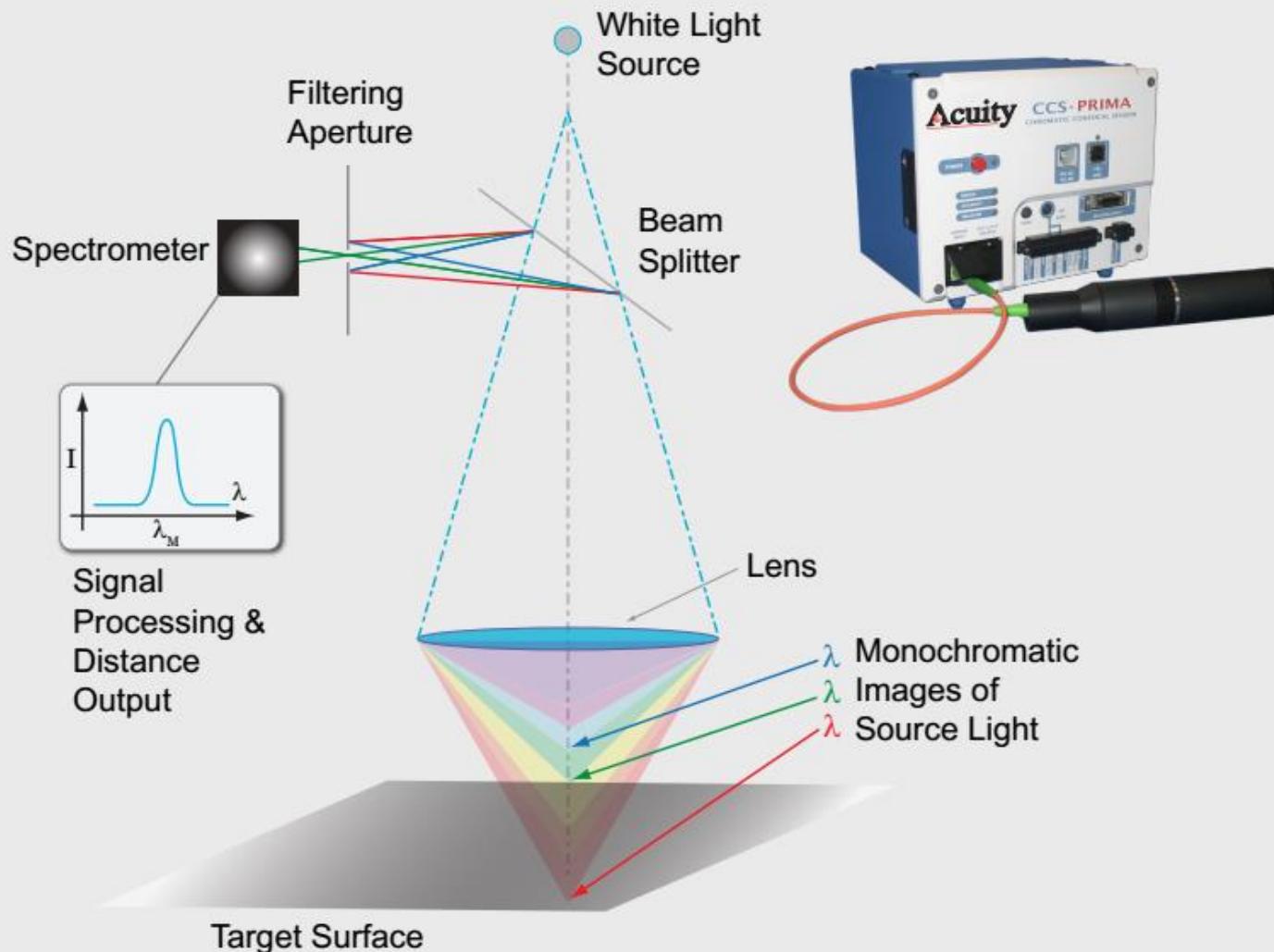


Optikai Távolságérzékelők (Konfokális Távolságérzékelő)

- Működési elve a fénytörés (fókuszpont helyének) hullámhossz függésén alapul.
 - Fényforrás: fehér fény, melynek különböző hullámhosszúságú összetevőit a lencserendszer eltérő távolságban fókuszálja.
 - A céltárgyról visszavert fény egy lyukszűrőn csak a céltárgyra eső fókusztávolságú fény halad át,
 - melynek hullámhosszát spektrofotométer méri.
- Előnyök
 - Nanométeres nagyságrendű felbontás
 - Közel anyagfüggetlen
 - Kisméretű mérőpont
 - Átlátszó anyagok vastagságmérése egy oldalról
 - Átlátszó, rétegelt anyagok rétegvastagságainak a mérése
 - Tükörfényes felületek mérése
- Kötöttségek
 - Korlátozott érzékelési távolság (0,3 ... 30 mm)
 - A fénynyalábon alapuló mérés tiszta környezetet feltételez



Optikai Távolságérzékelők (Konfokális Távolságérzékelő)



Optikai Távolságérzékelők (Konfokális Távolságérzékelő)

Confocal chromatic sensors



→

13

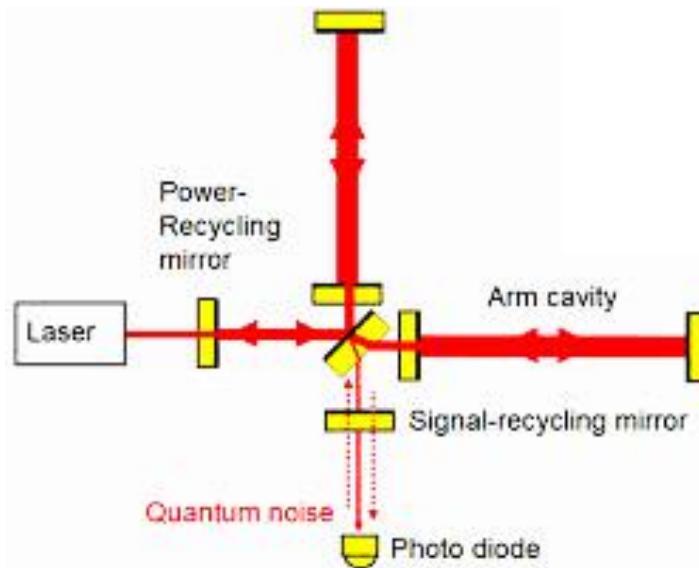
▶ ▶ ⏪ 0:00 / 3:48

Görgess a részletes adatokért



Michelson interferométer

Szubmikrométeres elmozdulások detektálása



Interferometria

Optikai úthossz-változás legérzékenyebb
detektálása

(Id. Gravitációs hullám interferometriás mérése 10^{-19} m
felbontással)

Előnyök:

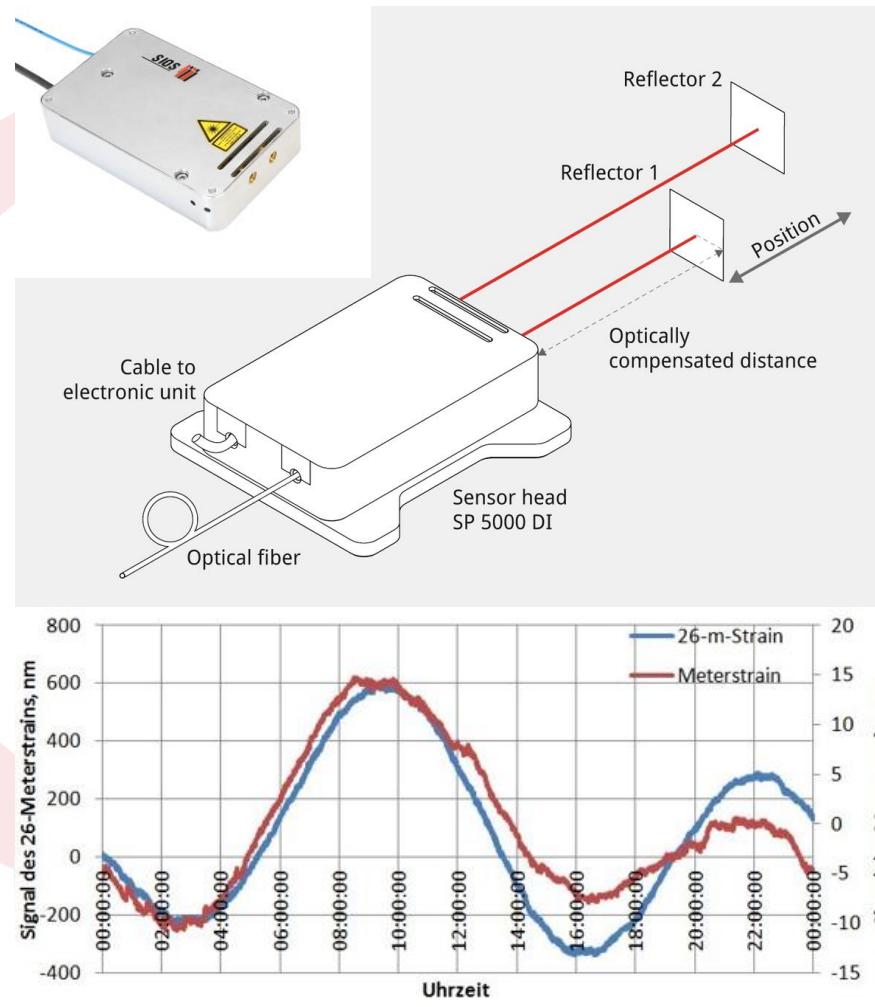
Nincs elektromos vagy mágneses zavarás, nagy érzékenység/felbontás ($\lambda/2, \lambda/4, \lambda/8, \lambda/16\dots$)

Hátrányok:

Bonyolultabb kiértékelés, hőmérsékletváltozásra érzékeny

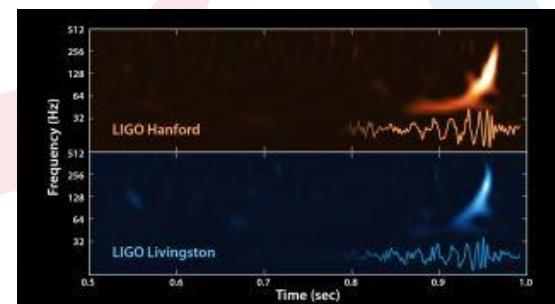
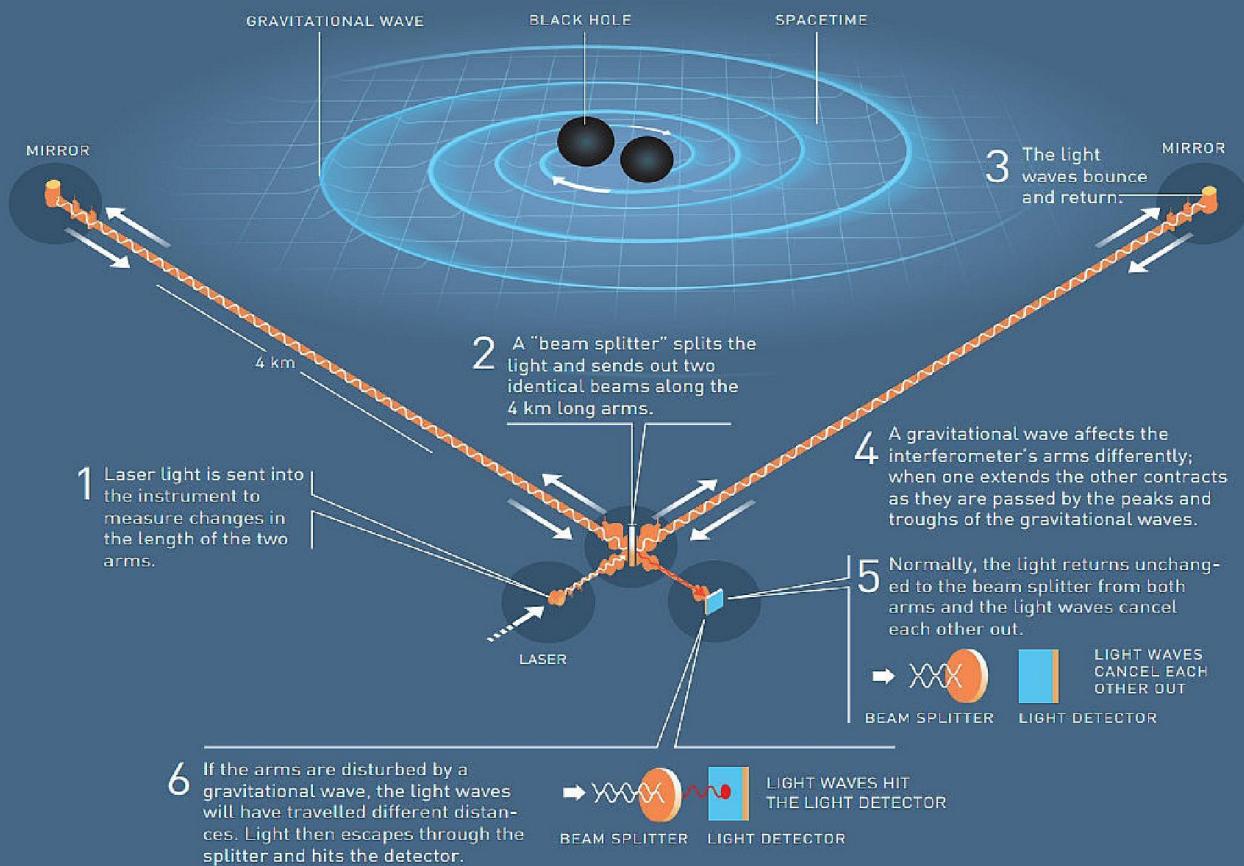
Interferometeres elmozdulásmérés

- Nagy pontosság:
 - ~ 10 (vákuumban)...
100 nm/meter (levegőben)
- Nagy felbontás: (5 pm)
- Nagy mérési tartomány: (itt, SP 5000 DI: 5m)
- Kompakt, integrált kivitel
- Több sugaras kivitel:
 - nagy távolságban lévő céltárgy mérésénél pontosság növelése,
 - Szög(hiba) mérése, felbontás: 0,001'',
- Nagy hőstabilitás <20nm/K
 - Az eszközre vonatkozik!
 - És a levegő (mint fényvezető közeg)?
- Bemelegedési idő (HeNe lézer): 10...20 perc.



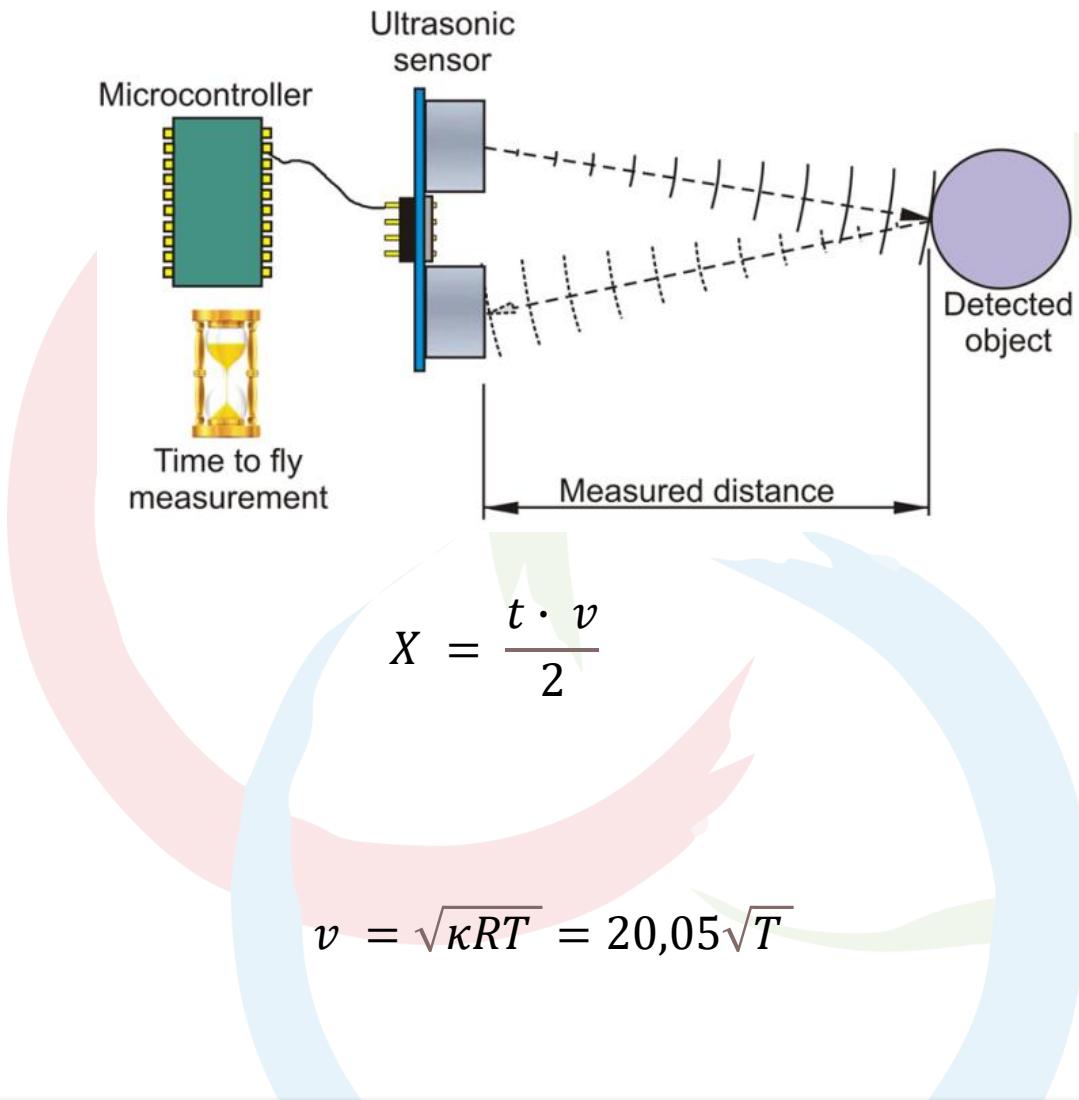
LIGO, gravitációs hullámok detektálására használt interferométer

LIGO – A GIGANTIC INTERFEROMETER



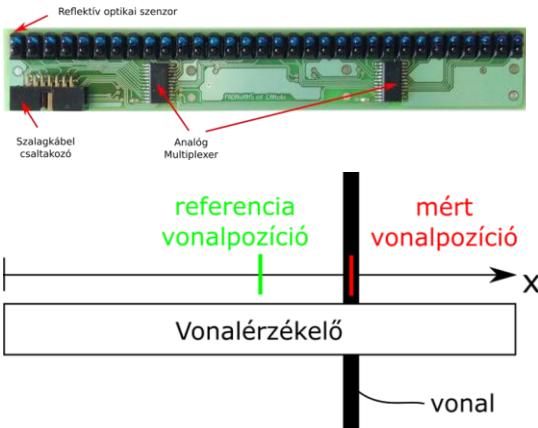
Ultrahangos távolságmérő

- A kiadott ultrahangos impulzus (hullámcsomag) futásidején alapul,
- A jellforrás és a vevő gyakran egy egység,
- A hang sebessége a közeg hőmérsékletétől függ.
- Alkalmazás:
 - Autóipar,
 - Folyadékszint mérés,
 - Stb.

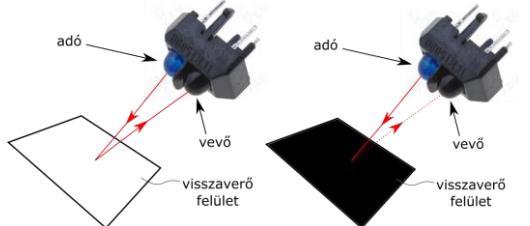


A szenzorok helye a mechatronikában (RobonAUT)

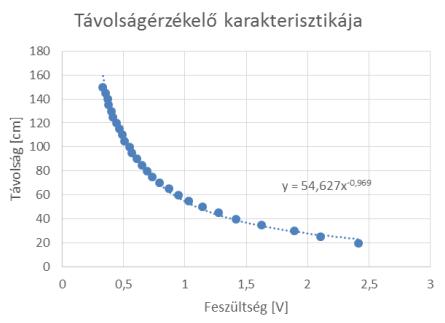
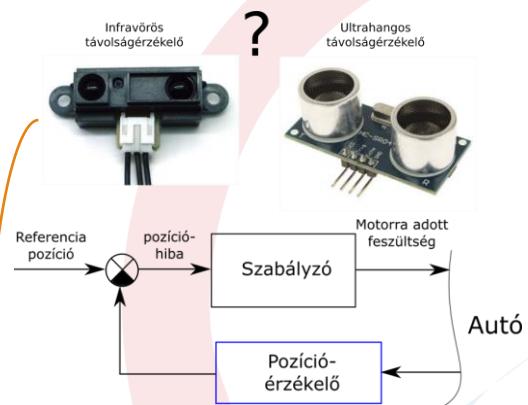
• Vonaldetektor



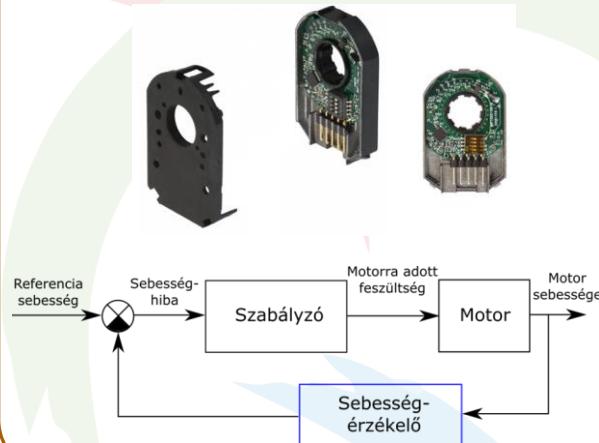
• Reflektív optikai szenzor



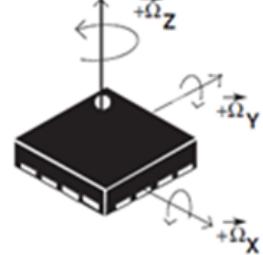
• Távolságmérő



• Enkóder



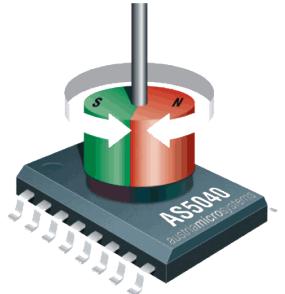
• Giroszkóp



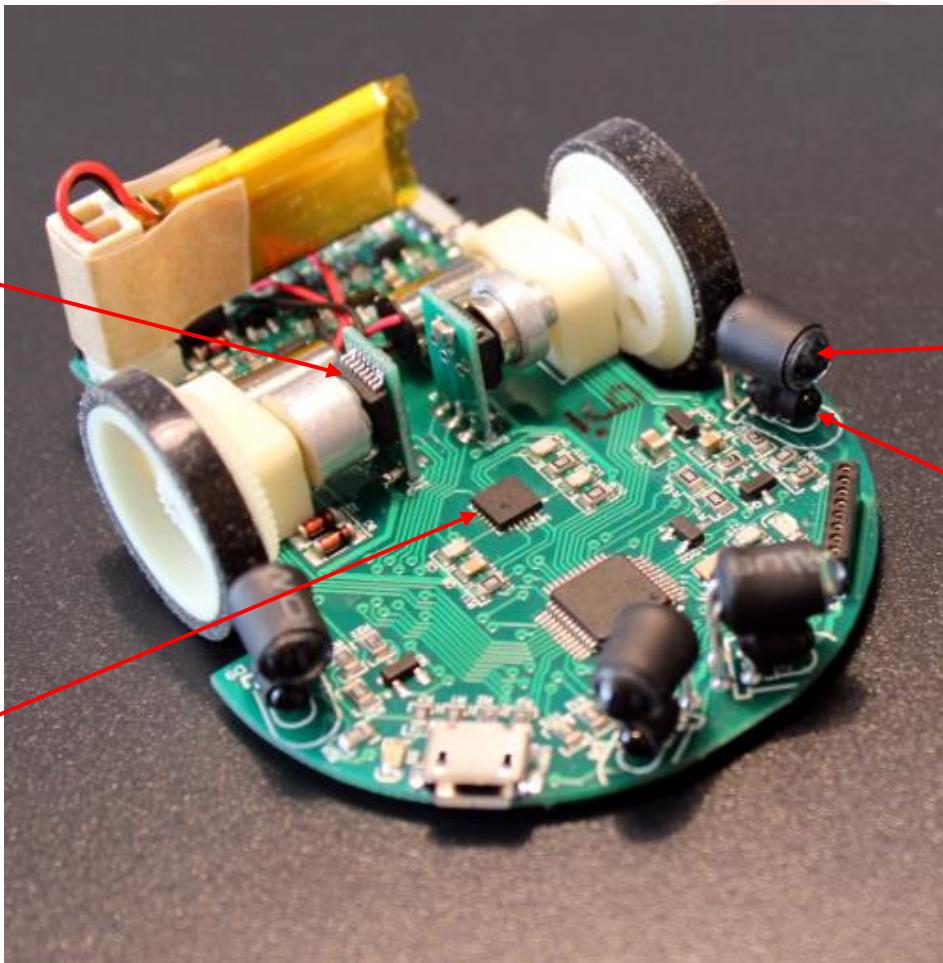
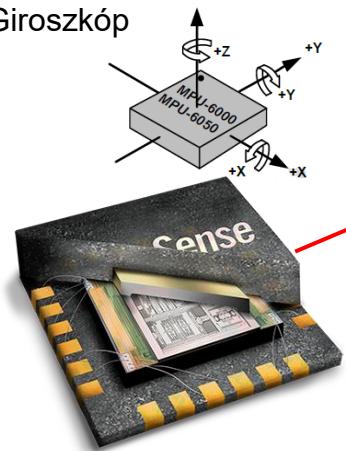
A szenzorok helye a mechatronikában (Micromouse)



Mágneses enkóderek



Giroszkóp



Infravörös LED



Fototranzisztor



Ellenőrző kérdések

Milyen induktív elven működő út vagy távolság érzékelő szenzorokat ismer? Felsorolás, ábra.

Mi a működés és felépítésbeli különbség a nyílt mágneskörű differenciál működésű merülővasmagos induktív útadó és a lineáris differenciál transzformátoros (LVDT) útadó között.

Mi a felépítésbeli különbség a nyílt mágneskörű merülővasmagos és a zárt mágneskörű útadók között? Milyen mérési tartomány jellemző rájuk?

Milyen elven működnek a rövidzár gyűrűs induktív útadók?

Milyen elven működik az induktosin? Jellemzze a felépítését!

Milyen elven működik a magnetostrikciós elmozdulás mérő?

Milyen elven működnek a Hall-szenzorok? Ábrával szemléltesse. Milyen mennyiségek mérésére alkalmas?

Milyen hatással van a potenciométeres út/szögadó karakterisztikájára a mérőeszköz bemenő ellenállása? Egyenlet, ábra. Ez alapján, milyen bemenő ellenállású műszerrrel célszerű mérni?

Egy kapacitás milyen paramétereinek változtatása által alkalmazhatjuk (út/szög/szint/stb.) érzékelőként? A kapacitás egyenlete és vázlatos ábrák segítségével szemléltesse.

Mi a fő előnye az optikai anszolút út/szög jeladókban hasznát Gray kódtárcsa alkalmazásának a Bináris osztásúval szemben?

Milyen módon lehet az elmozdulás/elfordulás irányát detektálni inkrementális (növekményes) út-/szögadókkal?

Milyen elven működnek a konfokális távolságérzékelők?

Milyen elven működik a Michelson interferometers elmozdulásmérés? Ábrával szemléltesse a sugármenetet! Jellemzően milyen nagyságrendű elmozdulások mérhetőek vele?



KÖSZÖNÖM A FIGYELMET!

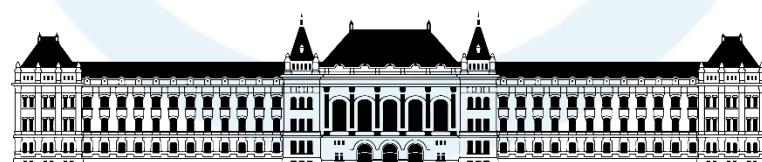
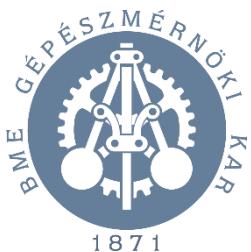
BOJTOS Attila
BME - MOGI Tanszék
bojtos@mogi.bme.hu



Szenzorteknika

Az erő- és gyorsulásmérés szenzorai

BOJTOS ATTILA
BME - MOGI TANSZÉK



M Ú E G Y E T E M 1 7 8 2



Tematika

Bevezetés a szenzorteknikába

- csoportosítás,
- méréstechnikai tulajdonságok,
- Jelfeldolgozás

Anyagszerkezet

- Atomszerkezet
- Kémiai kötések
- Sávszerkezet
- Félvezetők
- Fémek

Érzékelési elvek fizikai alapjai (szenzor)

- Termikus elvek, hőmérsékletmérés
- Optikai-elvek
- Ellenállásváltozás elvén működő érzékelés
- Piezoelektronos mérési elvek
- Kapacitás
- Mágneses mérési elvek
- Akusztikai elvek

Érzékelési módszerek, alkalmazások (jelátalakító)

- Hossz-, távolság-, elmozdulás-, elfordulásmérés szenzorai
- Sebesség-, térfogatáram-, **gyorsulásmérés szenzorai**
- **Nyomás-, erő-, nyomatékmérés szenzorai**
- (Kémiai érzékelés szenzorai)

Aktuátorok

- Motorok
- Piezoelektronos aktuátorok
- Magnetostrikciós aktuátorok

Integrált érzékelő és beavatkozó rendszerek (vendégelezés)

- Technológiai alapok, MEMS, NEMS, OEMS
- Szenzorhálózatok, IoT



12. Előadás áttekintése

- Erőmérők és Nyomatékmérők
 - Nyúlásmérő bélyeges
 - Piezoelektromos
 - Mágneses és induktív elven működő
 - MEMS erőmérő
- Gyorsulásérzékelők
 - Mérési elvek
- Nyomásmérők
 - Membrán típusok
 - MEMS nyomásmérők



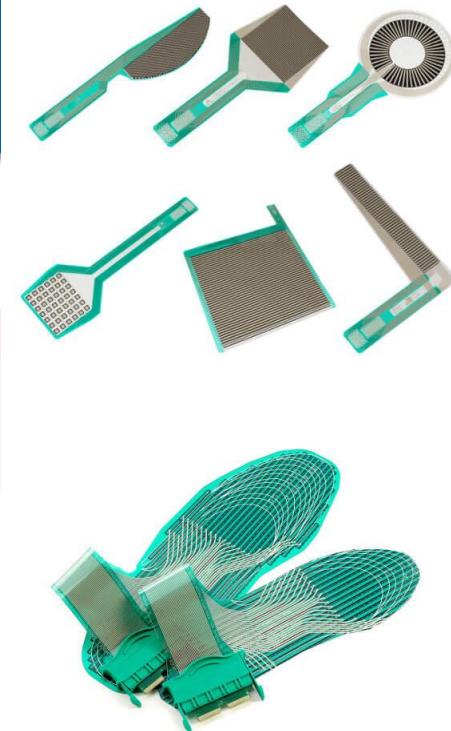
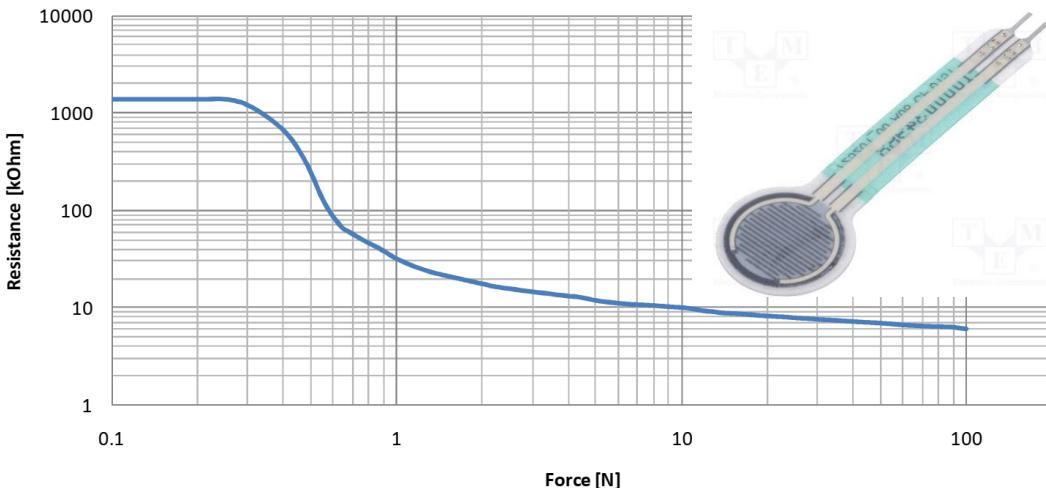
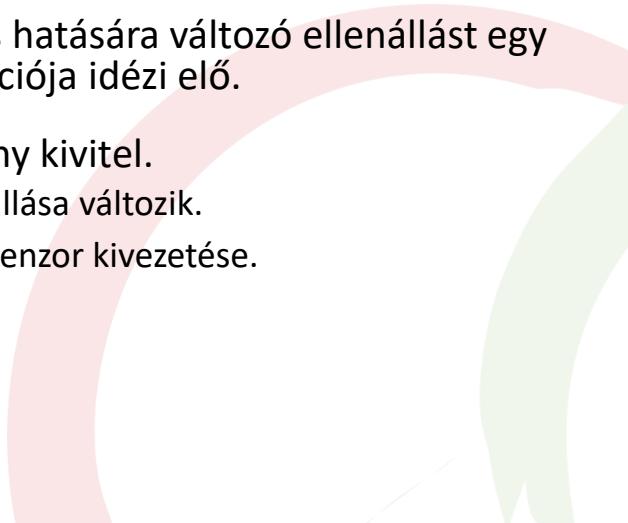
Erőmérők

- Közvetlen
 - Fajlagos ellenállásváltozás elvén működő (FSR)
 - Átmeneti ellenállásos
 - Magnetoelasztikus
 - Piezoelektrikus
- Közvetett (valamilyen közbülső mennyiség mérése által)
 - Nyúlásmérő bélyeges erőmérők (fajlagos nyúlás)
 - MEMS piezorezisztív (fajlagos nyúlás)
 - Mágneses, Induktív elven működő erőmérők (elmozdulás)
 - Kapacitív elven működő (elmozdulás)



FSR (Force Sensitive Resistance)

- Ellenállás változás elvén működő taktilis erő-, vagy nyomásérzékelő.
- A felületére (merőleges) kifejtett terhelés hatására változó ellenállást egy villamosan vezető polimer réteg deformációja idézi elő.
- Fő jellemzője a kis vastagság és a hajlékony kivitel.
 - PET hordozók közötti rezisztív réteg ellenállása változik.
 - A hordozó fóliákra felgőzölt fém réteg a szenzor kivezetése.
- Kialakítása lehet
 - Egypontos, vagy
 - Mátrix elrendezésű (tetszőleges alakú).
- Jellemző paraméterek:
 - Vastagság: ~0,5 mm (szélessége változatos)
 - Névleges ellenállás: > 1 MΩ
 - Tipikus működési tartomány: 1 MΩ ... 1 kΩ / 0,5 ... 100 N/cm²
 - Erősen nemlineáris,
 - Élettartam: 10^6 (1 kg/cm²; 1 Hz)
 - Tipikus válaszidő: 2-3 ms
 - Mérési hőmérséklet: -40..+185 °C

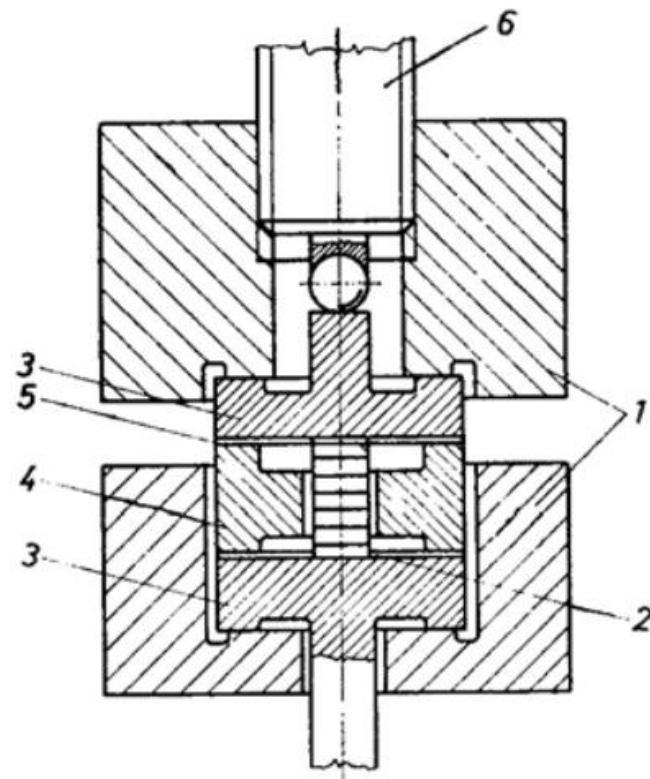


Átmeneti ellenállásos erőmérők

Két érintkező között lévő egyenáramú ellenállás mértéke az összeszorító erő függvénye:

$$R = \frac{k}{F^c}$$

- k – anyagtól függő (általában szén: 1,5...3,5 ΩN)
- c – geometriától függő tapasztalati állandók (sík érintkezők: 1
- Csak nyomóerő mérésére alkalmás.
- Előfeszítés alkalmazása.
- Érzékenység növelése több, sorosan kapcsolt Korong alkalmazásával.
- Ábra: Szénoszlopos nyomóerőmérő cella,
 1. Ház,
 2. Szénoszlop,
 3. Membrán,
 4. Távtartó,
 5. Csillámlémez (0,01 mm, szigetelő),
 6. Előfeszítést beállító csavar.



Magnetoelasztikus erőmérők

A ferromágneses anyagok permeabilitása megváltozik mechanikai feszültség hatására.

Egy felmágnesező (Pr) és egy mérő (S) tekercset tartalmaz.

Húzó és nyomófeszültségek érzékelésére is alkalmas.

Csavaró igénybevétel esetén is fellép, ezért nyomatékmérésre is alkalmas.

Nagy merevség és kis deformáció jellemzi.

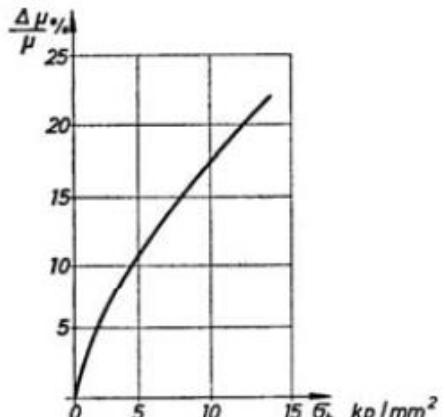
Jellemző tartomány: $10^3 \dots 10^{10}$ N.



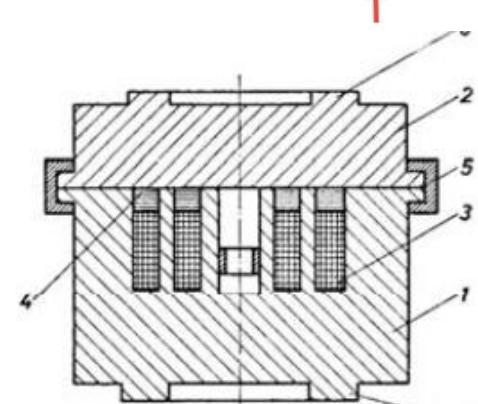
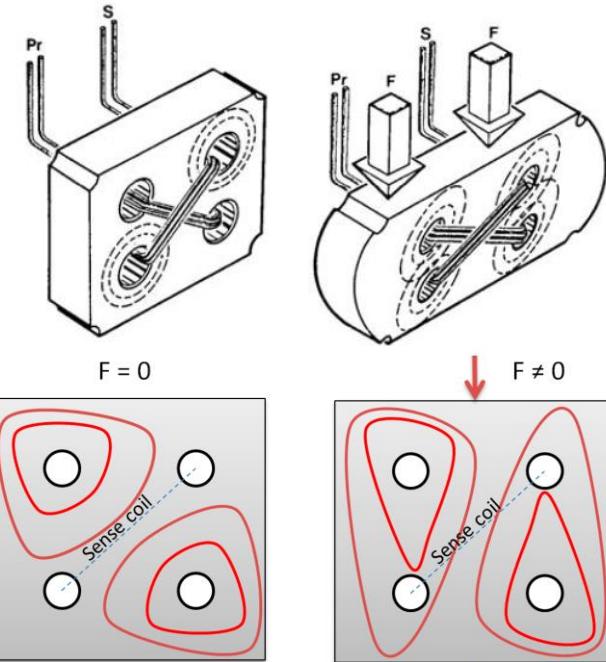
Forrás: <https://new.abb.com>



Forrás: <https://boltsafe.com/>



7.18. ábra. A húzófeszültség befolyása a permeabilitás változására Ni-Fe ötvözetről (Janowsky nyomán)



7.19. ábra. Magnetoelasztikus erőmérőcella
1 nyomótest; 2 fedél; 3 tekercs; 4 acélgyűrűk;
5 behengerelt rögzítő gyűrű; 6, 7 felfekvő gyűrűfelületek

Forrás: Halmai – Halas: Szenzorteknika előadás jegyzet.

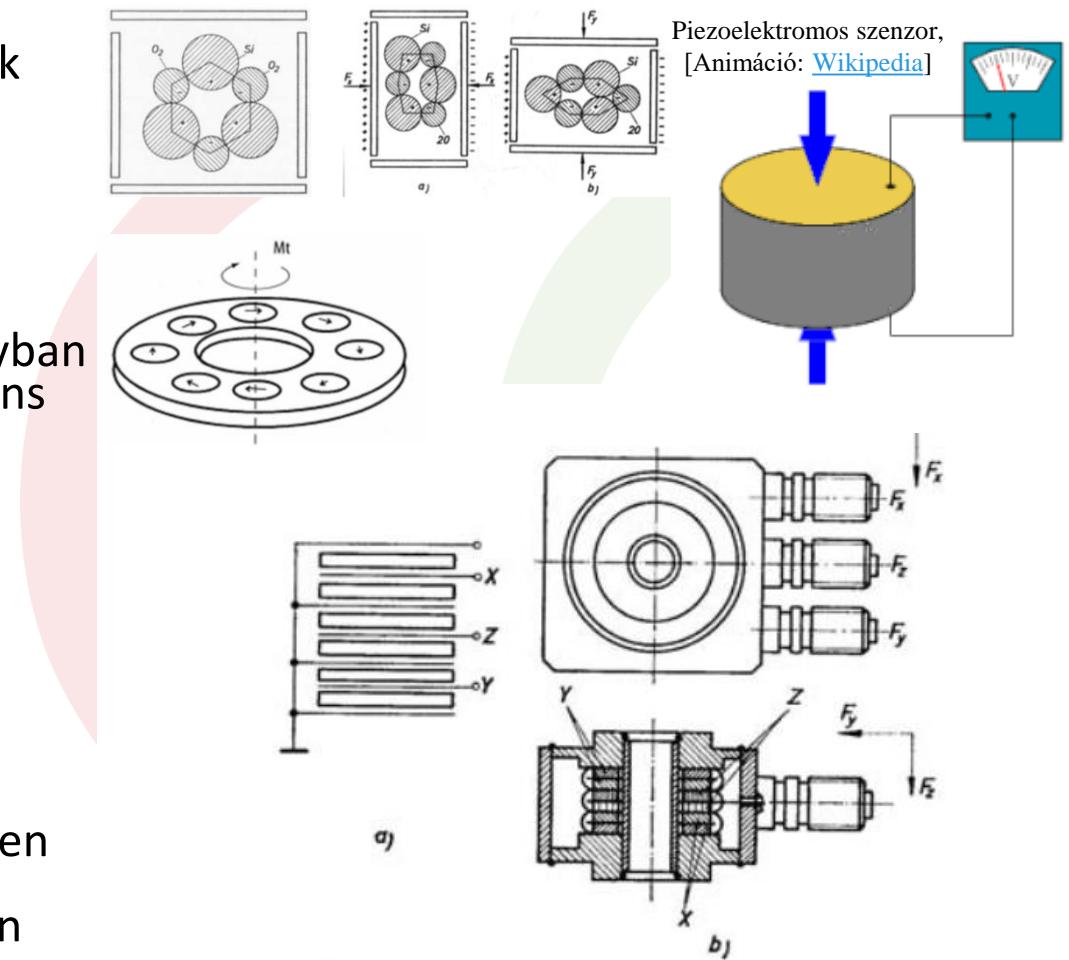
Michał Nowicki: Tensductor—Amorphous Alloy Based Magnetoelastic Tensile Force Sensor,
<https://www.mdpi.com/1424-8220/18/12/4420>



Piezoelektrikus erőmérők

Egyes ásványok (kvarc, turmalin, báriumtitánát, stb.) felületén töltések jelennek meg mechanikai feszültség hatására.

- Húzó és nyomófeszültségek érzékelésére is alkalmas.
- A kvarckristályból különböző irányban kihasított lemezek több komponens érzékelésére is alkalmas.
- Statikus mérésre nem alkalmas.
- Magas mechanikai dinamika tartomány: 10 ... 500 kHz
- Nagy merevség és kis deformáció jellemzi.
- Az érzékenység növelése érdekében több korongot helyeznek el mechanikailag sorasan, villamosan párhuzamosan kapcsolva.



11.3. ábra. Háromösszetevős piezoelektronos erőmérőcella
a) elvi kapcsolása; *b*) kiviteli alakja; *X*—*x* irányú, *Y*—*y* irányú, *Z*—*z* irányú erő összetevőket érzékelő kvarcelempárok

Piezoelektrikus erőmérők



Kistler Force Plate

Forrás: <https://www.kistler.com/INT/en/3d-force-plate/C00000090>



Piezoelektrikus Kistler erőmérő szenzorok

Forrás: <https://www.kistler.com/INT/en/c/force-sensors/CG21-force-sensors>



Piezoelektrikus Kistler
kombinált erő- és
nyomatékmérő szenzor



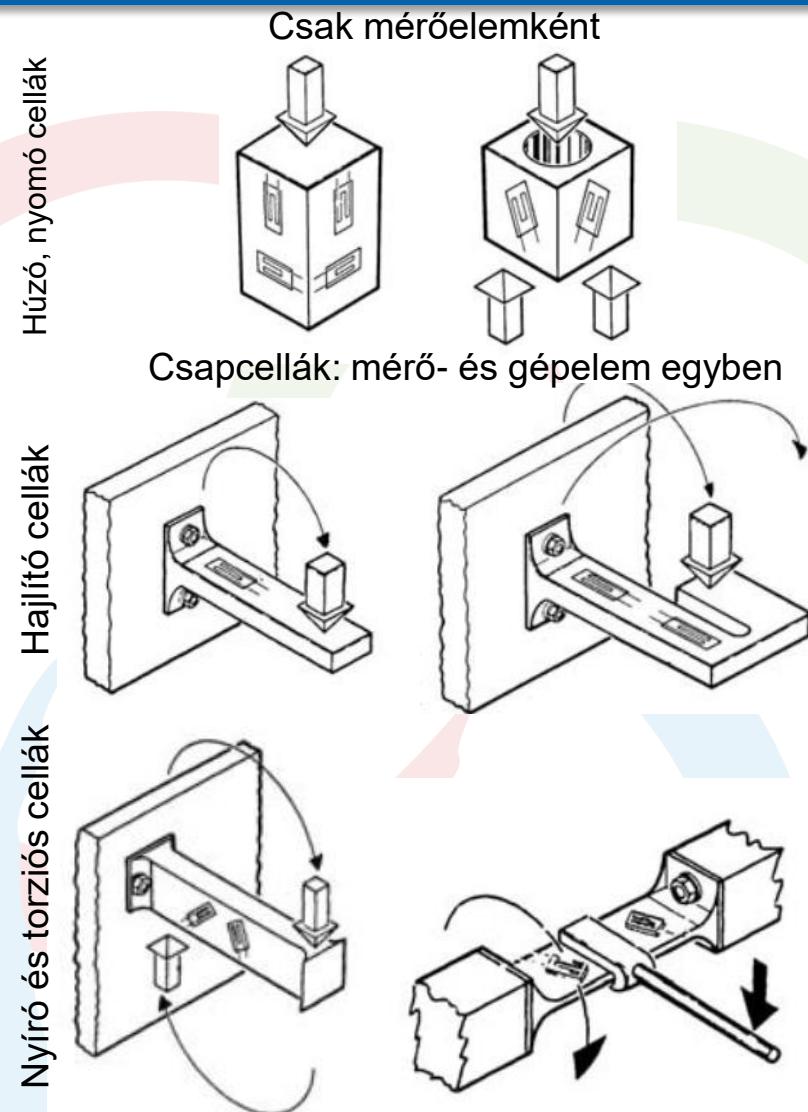
Triaxial force sensors,
ring force transducers,
 F_x , F_y , F_z (F_z max $\pm 3\text{kN}$
to $\pm 150 \text{ kN}$) / 90x7/8C



6-axis force-torque
sensors, multi-component
piezoelectric sensors (F_x ,
 F_y , F_z , M_x , M_y , M_z) /
9306A

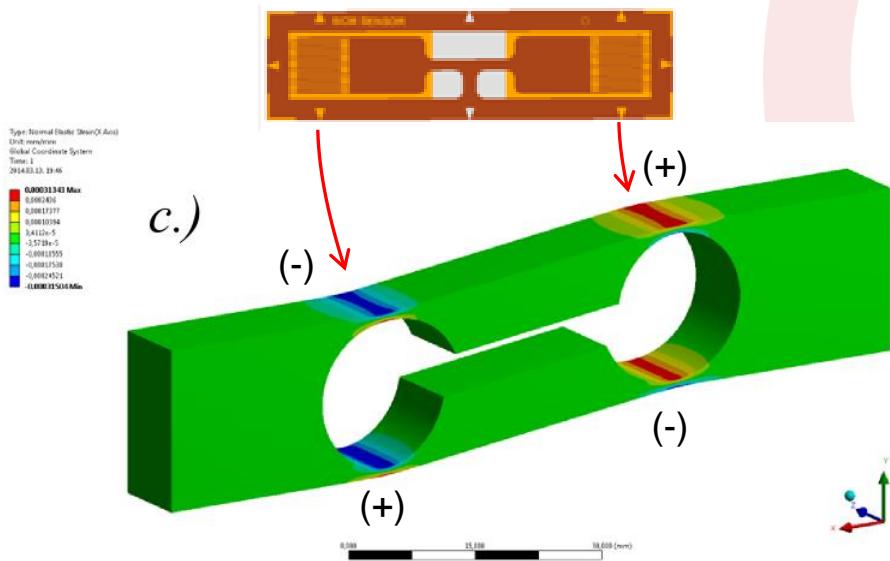
Nyúlásmérő bélyeges erőmérő cellák

- Megfelelően kialakított jelátalakító mérőtest alakváltozása nyúlásmérő ellenállással mérhető.
- Közvetett mérés
 - Mérendő mennyiség: erő
 - Elérhető mennyiség: alakváltozás
- Húzó és nyomófeszültségek érzékelésére is alkalmas.
- Statikus mérésre alkalmas.
- A dinamika tartományt korlátozza a nyúlásmérő ellenállás polimer hordozójának és ragasztójának viszkoelasztikus tulajdonságai (kúszás) és a kikönnyített mérőtest lengési hajlama (tömeg, rugóállandó).

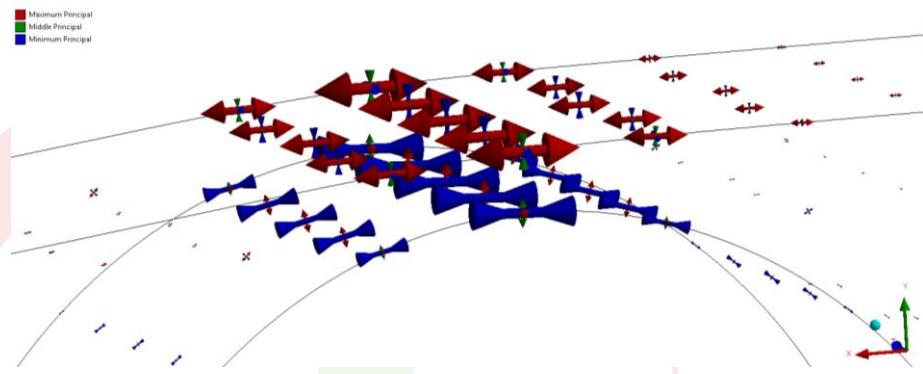


Nyúlás mérő bélyeges erőmérő cella

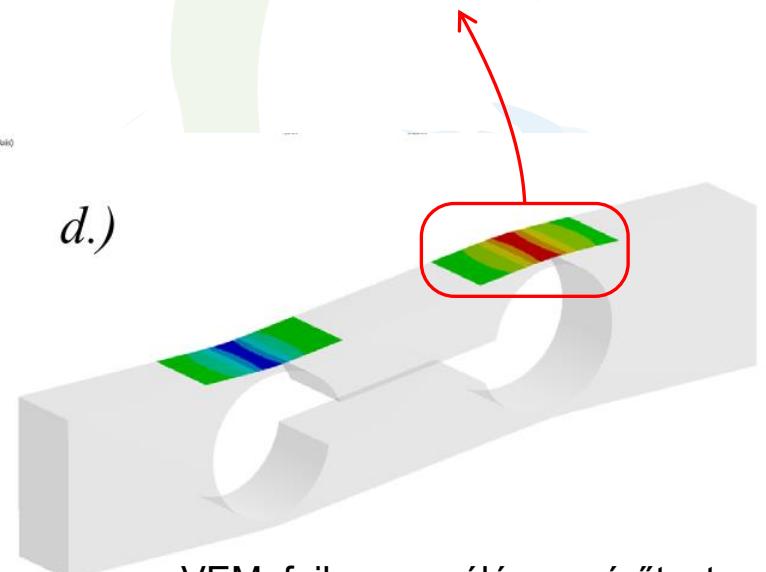
- A nyúlás mérő bélyeg felragasztásának helyén ébredő alakváltozási állapotra optimalizált jelátalakító mérőtest.
- A kikönnyítések helyén maximalizált alakváltozás.
- A bélyeg felragasztása a főirányok szerint.



VEM: alakváltozási tenzor térfelületi ábrázolása.



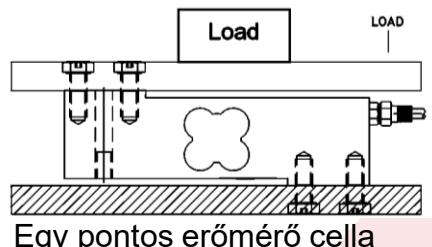
d.)



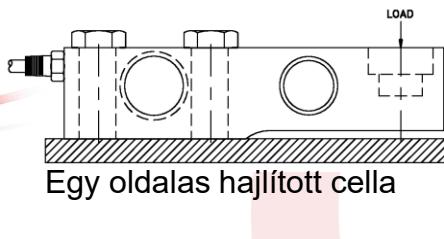
VEM: fajlagos nyúlás a mérőtesten



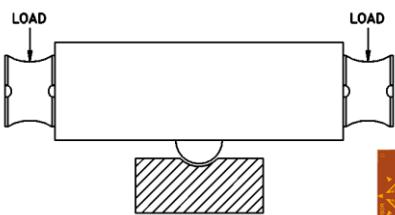
Leggyakoribb NyMB-es erőmérő cella kialakítások



Egy pontos erőmérő cella



Egy oldalas hajlított cella



Kétoldalas nyíró cella



RTN – Ring Torsion Load cell,
extrém nagy terhelésre (itt: 470 t-ig)



Oszlop típusú cella
(Rocker column load cell)

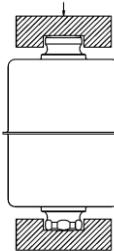


Figure 8: Rocker column load cell



Nyomótárcsa erőmérő cella
(Compression disk load cell)



Hibaforrások

Terheléssel arányos hibák:

- Cellatényező tűrése,
- A cellatényező hőmérsékletfüggése,
- A kúszás.

Terheléstől független hibák:

- Ofszet hiba
- Linearitási hiba,
- Nullhelyzet hőmérsékletfüggése,

Ismétlési, irányváltási hiba.

Beépítésből és terhelés módjából eredő hibák:

- Excentrikus terhelés,
- Ferde terhelés,
- A kettő kombinációja.

A mérés alaphibája: linearitási, ismétlési, irányváltási négyzetes középpértéke (cella pontossági osztály).

Figure 17a
CONCENTRIC ANGULAR
LOADING
AND SIDE LOADING

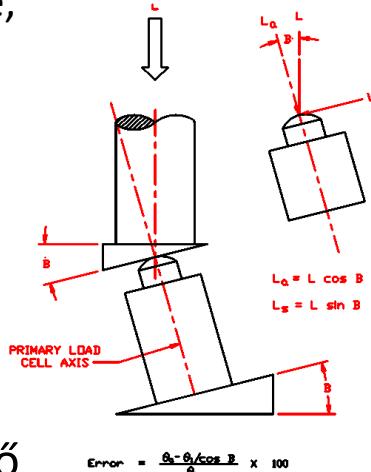


Figure 17b
ECCENTRIC ANGULAR
LOADING

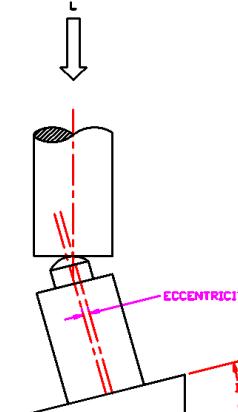
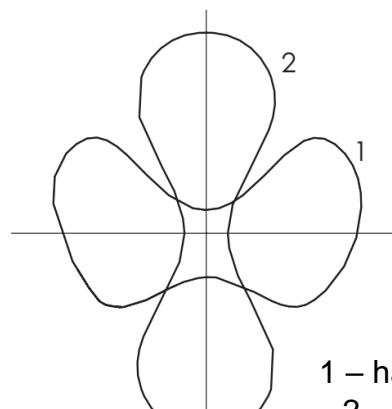
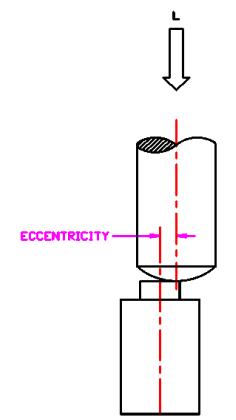
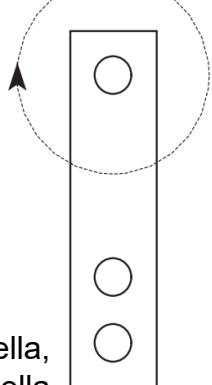


Figure 17c
ECCENTRIC LOADING



1 – hajlítócella,
2 – nyírócella

külpontos terhelésből eredő hibája.



Nyúlásmérő bélyeges erőmérő cella

Nyúlásmérő bélyeges erőmérő cella elvi felépítése.

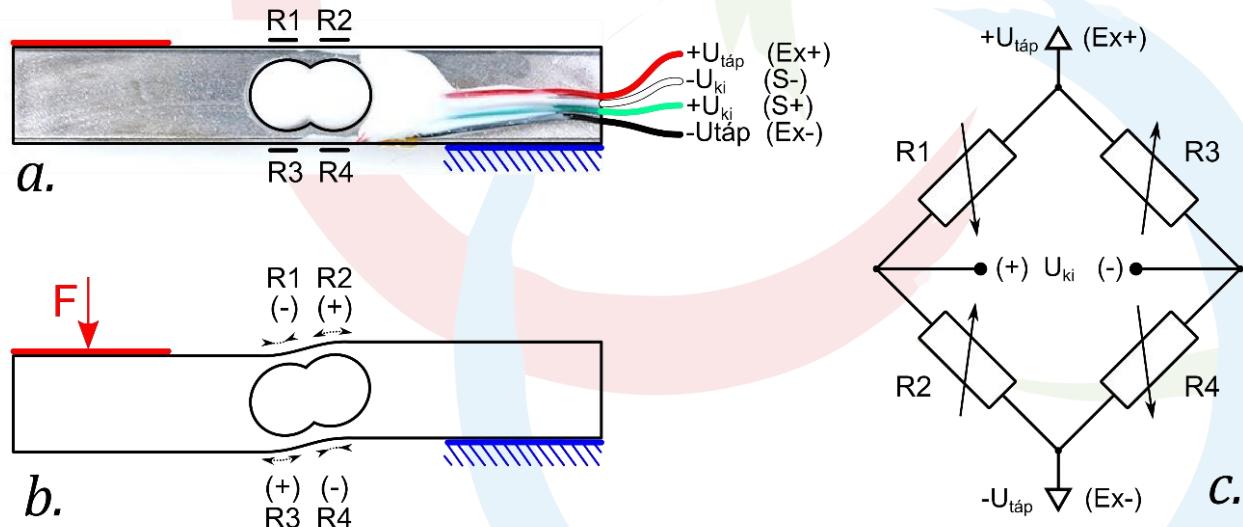
- a) Terheletlen állapot, nyúlásmérő bélyegek elhelyezkedése.
- b) Alakváltozás terhelt állapotban. A fajlagos nyúlás és az ellenállás változás előjele.
- c) A nyúlásmérő bélyegek elhelyezkedése a Wheatstone-hídban. Jó minőségű cellák esetén a nullpontot, a hőmérsékleti kompenzárást és az érzékenységet a hídban lévő további ellenállásokkal állítják be.

A cella (vagyis a Wheatstone-híd) kimenő jele az erőmérő érzékenysége vagy más néven cellatényezője (lásd adatlap: output sensitivity) alapján számolható.

A C [mV/V] cellatényező névleges terhelés esetén ($F = F_n$) adja meg a kimeneti feszültség [mV] és a tápfeszültség [V] hányadosát.

$$U_{ki} = U_{táp} \cdot C \cdot \frac{F}{F_n}$$

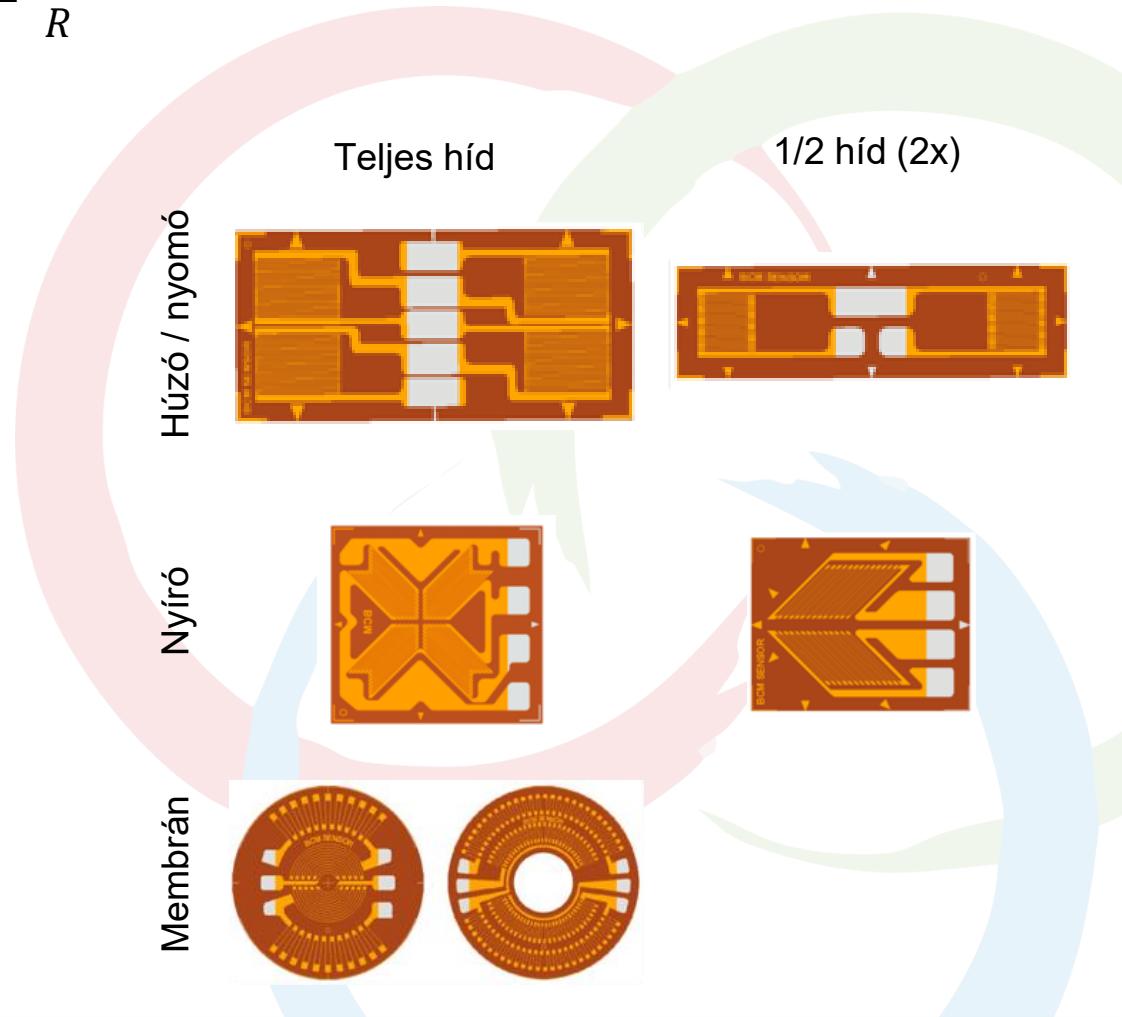
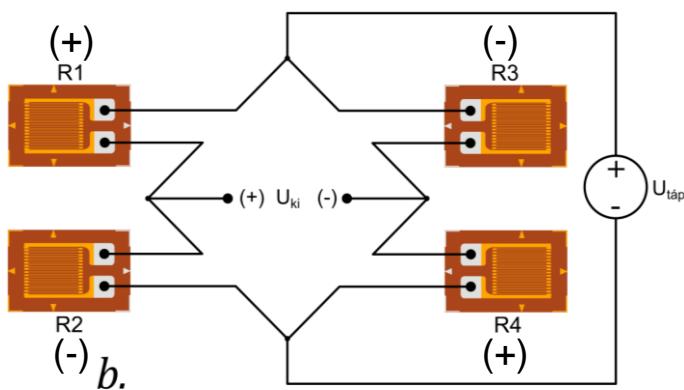
U_{ki} – kimenő feszültség [mV],
 $U_{táp}$ – az erőmérő tápfeszültsége [V],
 F – Aktuális terhelés [N],
 F_n – Névleges terhelés [N].,
 C – Cellatényező [mV/V].



Nyúlásmérő bélyegek jelének feldolgozása

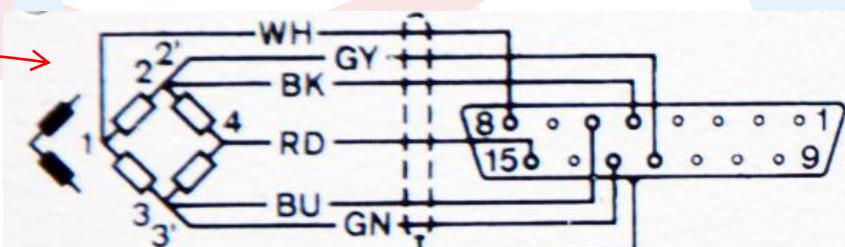
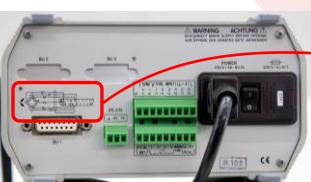
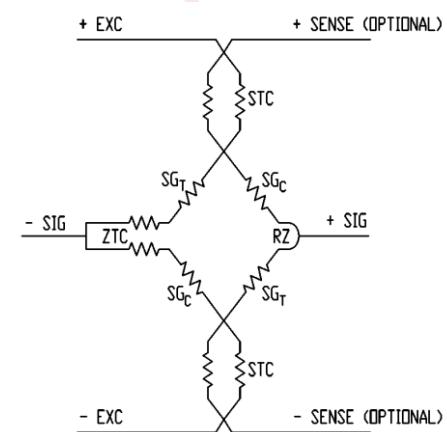
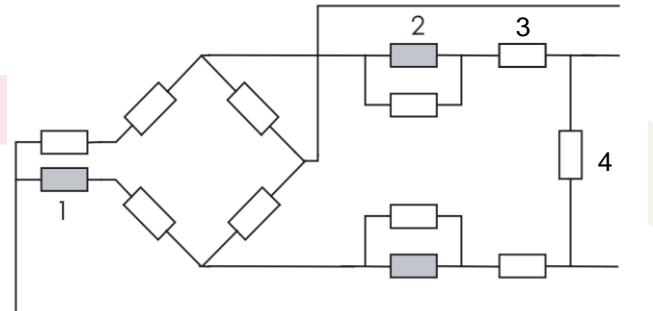
- Teljes hidás elrendezés
 - Hőkompenzáció
 - Nagyobb érzékenység.
- Speciálisan cellák készítésére kialakított nyúlásmérő ellenállások.

$$\frac{U_{ki}}{U_{táp}} = \frac{\Delta R}{R}$$



Teljeshidas NyMB elrendezés kiegészítő ellenállásai

- A cellák finombeállításához
 - ofszet és a hőmérséklet korrekció miatt,
 - a 4 aktív nyúlásmérő ellenálláson kívül további ellenállásokat alkalmaznak:
 - 1 – Ofszet és nullponti hőmérséklet kiegyenlítő,
 - 2 – Cellatényező hőmérsékletfüggését kompenzáló,
 - 3 – Cellatényezőt beállító,
 - 4 – Bemeneti ellenállást beállító.
 - Gyakran ezek is bélyeg kivitelűek, amit részek átvágásával lehet hangolni.
- 4 vezetékes táplálás (alsó ábra)
 - Hosszú vezeték estén a vezetékeken eső feszültség jelentős lehet ezért érdemes külön választani a táplálást (Excitation) a hídfeszültség visszamérésétől (Sense).



Forrás: Lambert Miklós: Szenzorok, 2009;

VPG Transducers: Load Cell Accuracy in Relation to the Conditions of Use, 2015. www.vpgtransducers.com

Scale Manufacturers Association: Load Cell Application and Test, 2010. www.scalemanufacturers.org Guideline 16



Többtengelyes erő- és nyomatékmérő nyúlás mérő bélyeges jelátalakítók

- Megfelelően kialakított mérőtest lehetővé teszi a több tengely menti
 - Erő, ill.
 - Erő és nyomatékmérést
- A mechanikai kialakítás lehet:
 - soros
 - párhuzamos

Soros kinematikájú 3 tengelyes erőmérő.



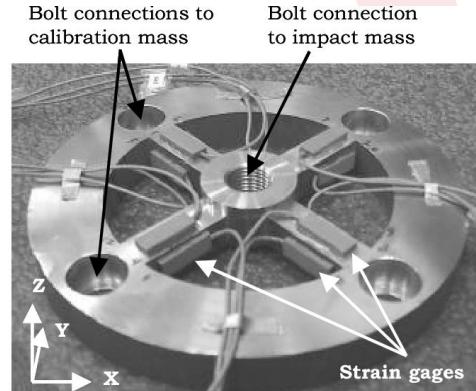
Forrás:

<https://www.forsensor.com>

Párhuzamos kinematikájú 6 tengelyes, erő és nyomatékmérő cellák



Forrás: O.Templeman, Brian B. Sheil, Tong Sun: Multi-axis force sensors: A state-of-the-art review. 2019



Forrás: <https://www.semanticscholar.org>



Forrás: <https://www.dlr.de>



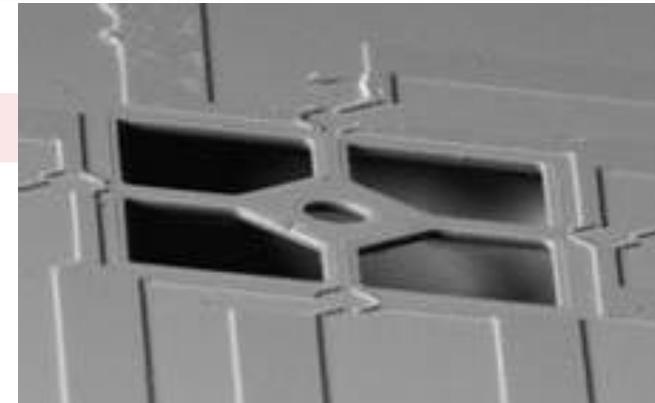
Mikroelektromechanikai (MEMS)

3 tengelyes MEMS erőmérő

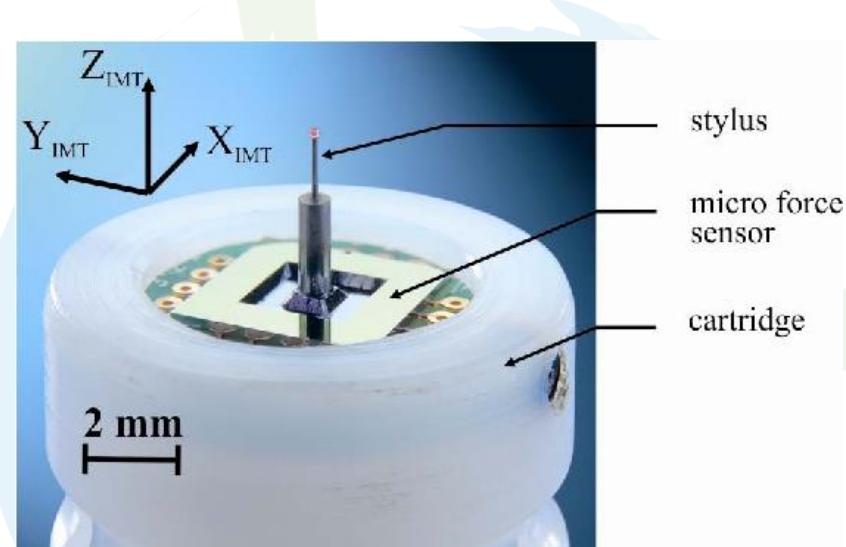
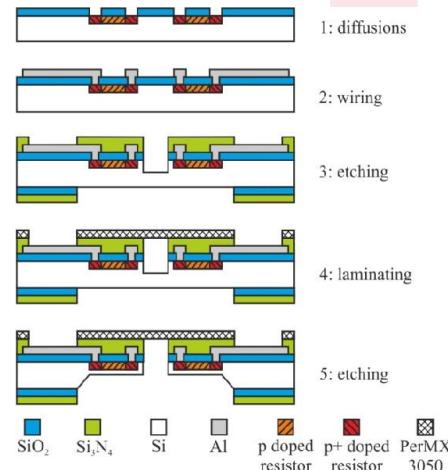
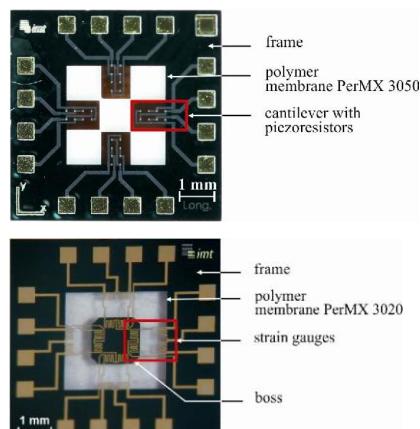
Mikromechanikai technológiával kialakított deformálódó elem,

Felületébe adalékolással kialakított vezető tartományok mint piezorezisztív nyúlásérzékelő elemek.

Az egyes hídágakban mért nyúlások összehasonlításával 3 tengely menti terhelés elkülöníthető.



Forrás: MTA-MFA, PPKE-ITK, 3 tengelyes MEMS erőmérő.



Forrás: N. Ferreira, T. Krah, J. A. Garcia: Micro sensors with polymer membrane for accurate 3D force and displacement measurements, 2013

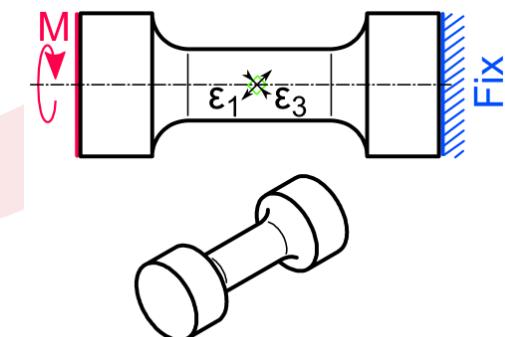
Nyomatékmérő jelátalakítók

Működési elv:

- A nyomaték hatására elcsavarodó tengely két végének relatív szögelfordulását (optikai, örvényáramú), vagy a tengely helyi fajlagos nyúlását (nyúlásmérő béllyeges) mérik.

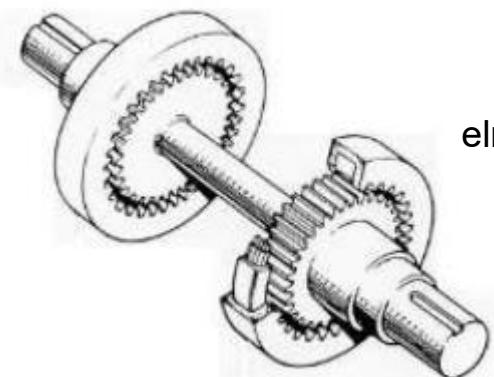
A mozgás formája szerint lehet:

- Álló – monolitikus cella közvetlen jelkivezetésekkel.
 - kalibrálóműszerekben,
 - forgó tengely nyomatékának mérése fékezőművön keresztül.
- Forgó
 - A tengelyen mért mennyiség jelének kivezetése:
 - csúszogyűrűkkel,
 - forgó transzformátorral,
 - Vezetéknélküli digitális jeltovábbítás (ZigBee, BT, ...).
 - Érintésmentes mérési eljárás
 - Optikai,
 - Magnetoelasztikus,
 - SAW,
 - Örvényáramú, ...



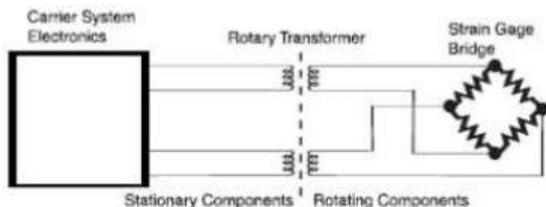
Érintésmentes forgó nyomatékmérők

Fogazott mágneses jeladók helyezkednek el a deformálódó tengely két végén, melyek szinuszos jelet szolgáltatnak. A nyomaték hatására a tengely elcsavarodik és a két tárcsa elfordul egymáshoz képest, ami fáziseltérést okoz a két szinuszos jel között.



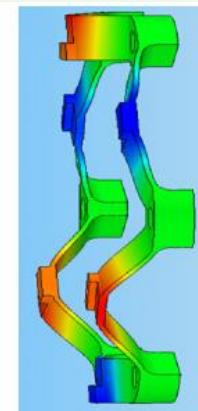
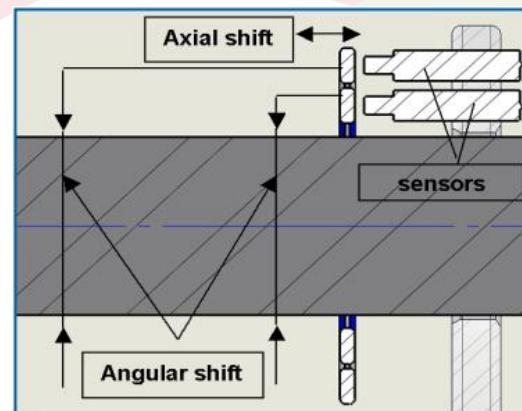
A fáziseltérés mérésének elve megjelenik hasonló elrendezésű optoelektronikai jeladós nyomatékmérő esetén is.

Nyúlás mérő bélyeges nyomatékmérő forgótranszformátoros jelátvitellel.



Forrás: Chih-Jer Lin* et al: Study on Wireless Torque Measurement Using SAW Sensors

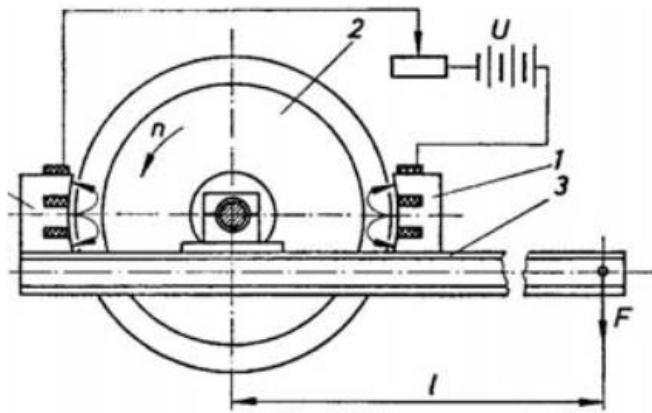
Contactless Torque Sensor CTS – a terhelőnyomaték hatására deformálódó tárcsán lévő bütykök távolságát örvényáramú közelítésérzékelők mérik.



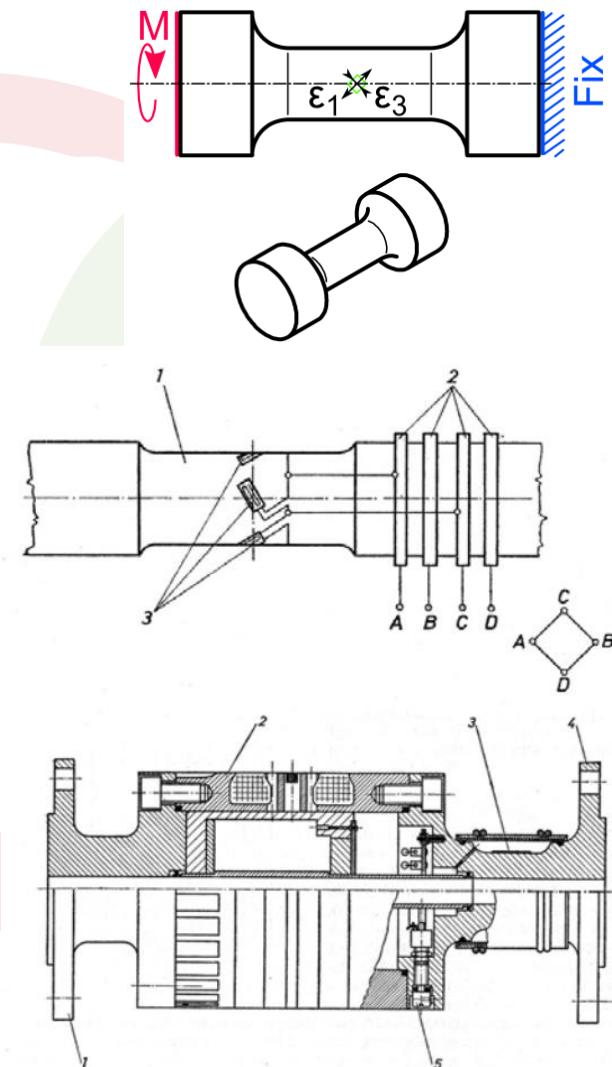
Forrás: www.cedrat.com

Nyúlásmérő bélyeges nyomatékmérők

- Csavaró vagy hajlítóigénybevétel mérésére.
- Általában egy tengely csavaró igénybevétel hatására létrejött nyíró alakváltozását mérik.
 - A tengellyel 45°-ot bezáró főirány.



11.22. ábra. Örvényáramú fék
1 mágnesek; 2 vezetőtárcsa; 3 mérlegkar



Nyúlás mérő bélyeges nyomatékmérők

(Forgó kivitel) Nyomatékmérő + integrált optikai szögsebesség jeladó.



(Álló/forgó kivitel) Nyomatékmérő + integrált mágneses szögsebesség jeladó.



(Forgó) nyomaték- és szögsebesség mérő jelátalakító.



(Álló) nyomatékmérő jelátalakító.
(1,5 MNm-ig)

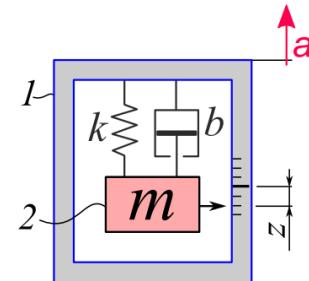


Gyorsulásmérés

Közvetett mérés

Fizikai mennyiség:

- gyorsulás: $a [m/s^2]$ - mérendő mennyiség,
- Erő: $F = m \cdot a, [N]$ – elérhető fizikai mennyiség
- Szeizmikus tömeg: $m [kg]$ - ismert,



b.)

Jelátalakító

- mérőtest deformációja (fajlagos nyúlás $\varepsilon(F)$, vagy elmozdulás $x(F)$) – köztes fizikai mennyiség.
- nyúlásmérő bélyeg (**Érzékelő**) ellenállás változása: $\Delta R/R = g \cdot \varepsilon$,
- Wheatstone-híd kimenő jele feszültség változás: $U_{ki}/U_{híd} = \Delta R/R$

Információ feldolgozó

- Erősítő, Szűrő, A/D átalakító, Matematika műveletek (összegzés, átlagolás, Stb).

Digitális kijelző / Tárolás / Folyamatszabályozás.



Gyorsulásmérés tartományai, tipikus gyorsulásértékek

Jellemző értékek

- Kézi lőfegyver golyó
- Teniszlabda
- Karambol (60 km/h)
- Földi gravitáció (9,81 m/s²)
- Motorkerékpár gyorsulás
- Személygépkocsi gyorsulás

~5000 g
500...700 g
30...40 g
1 g
0,5...0,8 g
0,2...0,3 g

Autóipari mérési tartományok

- Kopogás-szabályozás
- Légzsák, biztonsági öv
- Oldal- és frontális ütközés érzékelése
- Borulás érzékelés
- ESP, HHC, ABS
- Futómű szabályozás (rugózás): Felépítés
- Tengelyek, csillapítás
- gépkocsi riasztás

40 g
35...100 g
100...400 g
3...7 g
0,8...1,8 g
1 g
10...20 g
1 g



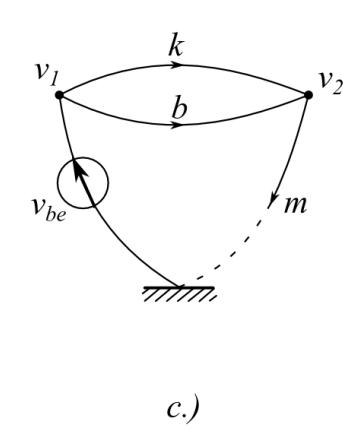
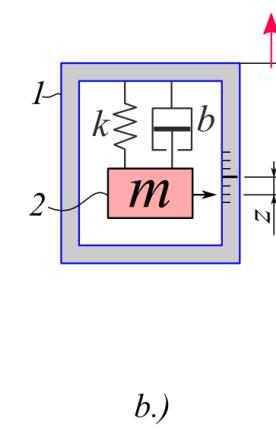
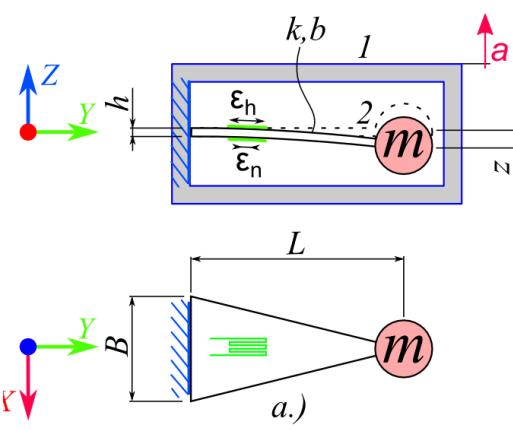
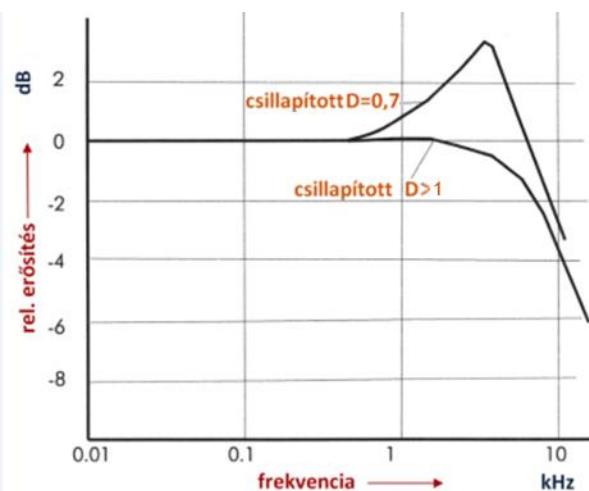
Gyorsulásmérés

- Másodrendű lengőrendszer mozgásegyenlete:
 - Nagy tömeg, kis csillapítás, kis rugómerevség: Útérzékeny rendszer,
 - Kis tömeg, kis rugómerevség, nagy csillapítás: Sebességérzékeny rendszer,
 - Nagy rugómerevség, kis tömeg, kis csillapítás: Gyorsulásérzékeny rendszer.
- A gyorsulásmérő jelátalakítók részegységei ezeket a funkciókat hordozzák más-más megoldással.

$$\ddot{x} + 2\xi\dot{x} + \alpha^2 x = -a$$

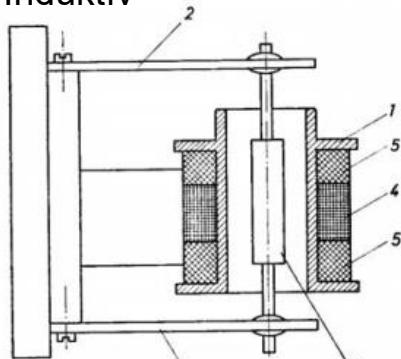
$$\alpha = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$\xi = \frac{b}{2} \sqrt{\frac{1}{mk}}$$



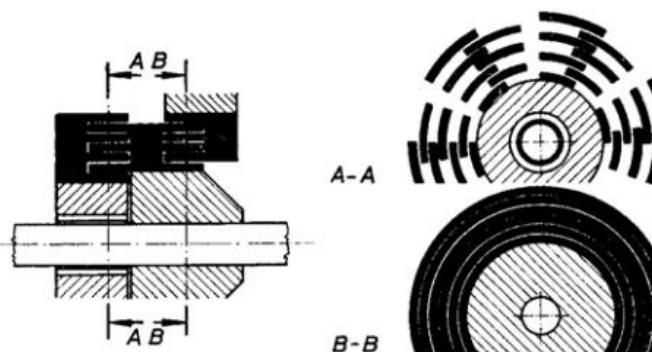
Gyorsulásmérő jelátalakító főbb típusai

Induktív



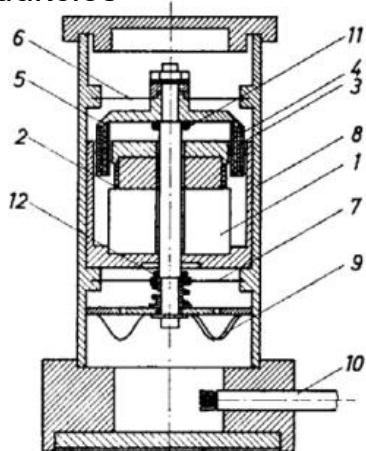
10.13. ábra. Induktív rezgésmérő
1 differenciáltranszformátor; 2 laprugók; 3 merülőmag (tömeg); 4 primer tekercs; 5 szekunder tekercsek

Kapacitív



10.14. ábra. Torziós rezgésmérő kapacitív mérőátlakítóval (DISA)

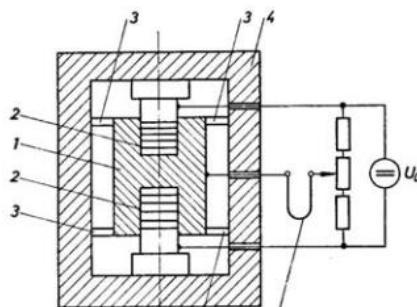
Indukciós



10.15. ábra. Szeizmikus elektrodinamikus (indukciós) rezgésmérő (Philips)

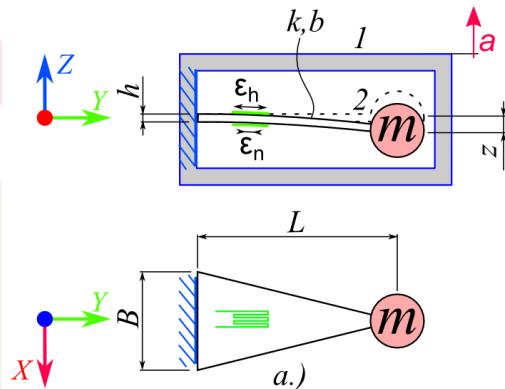
1 állandó mágnes; 2 korrekciós tekercs; 3 mérőtekercs; 4 csillapító henger; 5 membrán; 6, 7 ház; 8 húz; 9 kivételek; 10 háromszögű árnyékolt kábel; 11, 12 végállásúszközök

Szénoszlopos

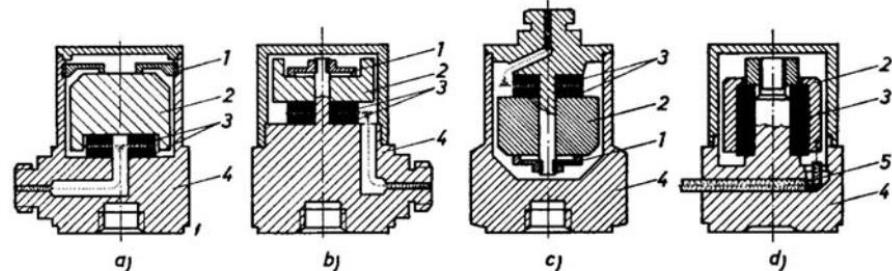


10.16. ábra. Szénoszlopos gyorsulásmérő és mérőkör
1 szeizmikus tömeg; 2 szénoszlopok; 3 a mozgó tömeg vezetése; 4 ház; 5 oszcilloszgráfihurok

Nyúlásmérő élyeges



Piezoelektronos



10.17. ábra. Szeizmikus piezoelektronos gyorsulásmérők különféle kivitelei (Brüel & Kjaer)

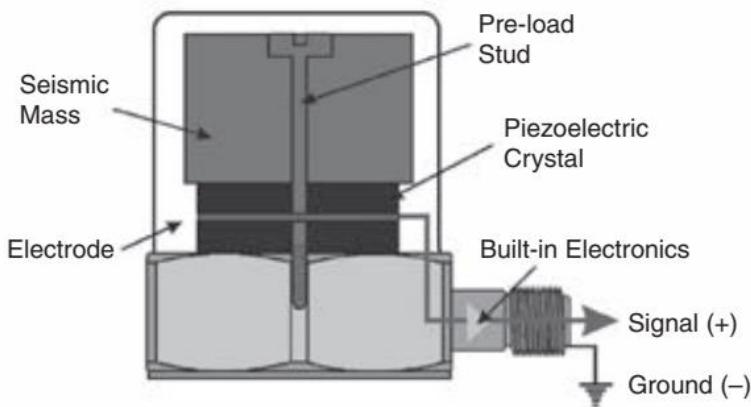
a) kerületen előfeszített; b) központilag előfeszített; c) központilag előfeszített fordított; d) nyírásra igénybevett piezoelektronos kristály

1 rugó; 2 tömeg; 3 piezokristály; 4 alaplemez; 5 kábelcsatlakozás

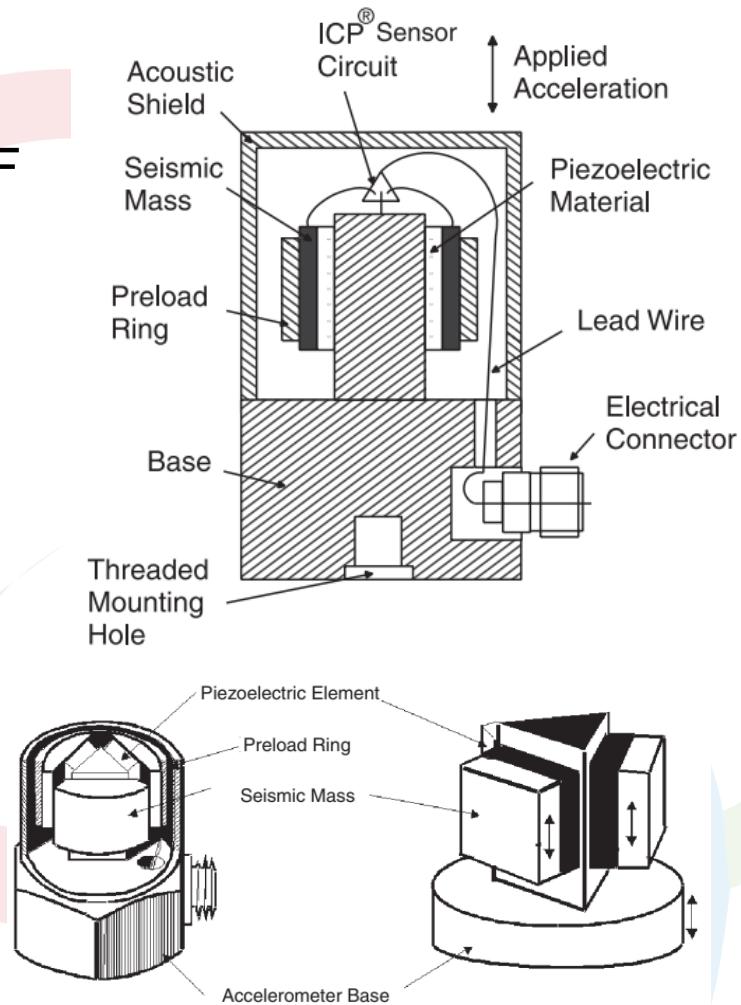


Piezoelektronos gyorsulásmérő

- Mérési elv: töltés szétválasztás kristályban erő hatására (rugó-tömeg rendszer)
- Anyagai: kerámia anyagok, PZT, kvarc, PVDF
- alkalmazási példák: kopogási szenzorok, korábban ütközési szenzorok is.
- Nagy rugómerevség, nagy frekvenciatartomány.
- Előfeszítés szükséges.



nyomó típusú piezorezisztív gyorsulásérzékelő.



Nyíró típusú piezorezisztív gyorsulásérzékelő.



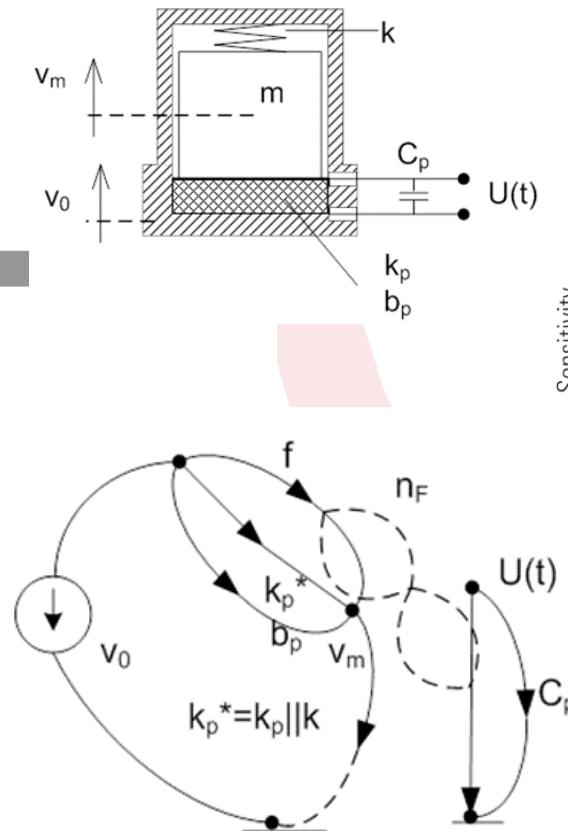
A szenzorok dinamikus karakterisztikái (Pl.: Piezoelektronos Gyorsulásérzékelő)

A piezoelektronos gyorsulásérzékelő sávszélességét balról az elektronikai tulajdonságai (töltésszivárgás miatt statikus mérésre nem alkalmas), jobbról a kéttárolós rendszer mechanikai viselkedése (rezonanciacsúcs) korlátozza.

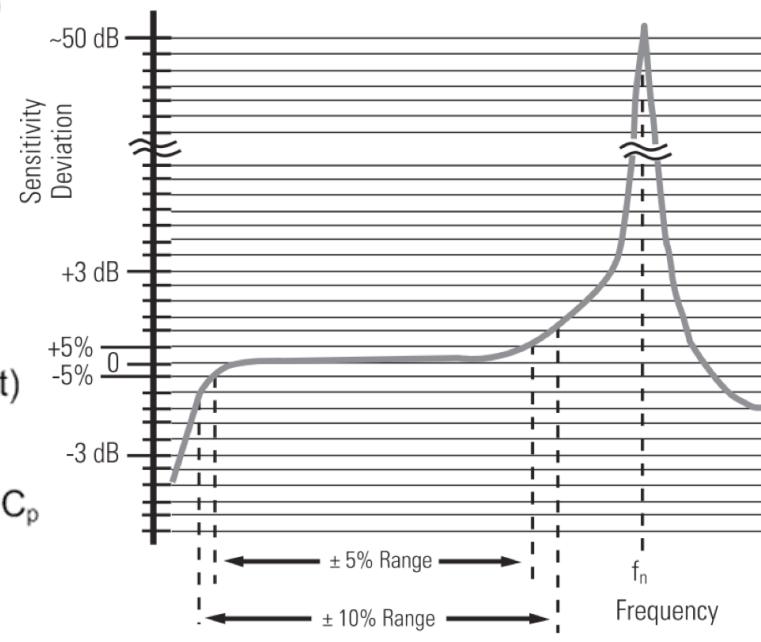
**4513 - CCLD accelerometer, 10 mV/g, side connector,
insulated base, excl. cable**



Overview	Specifications	Accessories	Services
Frequency	1 - 12000 Hz		
Sensitivity	10 mV/g		
Temperature	-51 - 121 °C		
Residual Noise Level in Spec Freq Range (rms)	± 0.4 mg		
Maximum Operational Level (peak)	500 g		
Maximum Shock Level (± peak)	5000 g		
Weight	8.6 gram		
Electrical Connector	10-32 UNF		
Mounting	Stud		
Accessory Included	None		
Clip/Stud/Screw included	10-32 Stud		
Output	CCLD		
Unigain	No		
Triaxial	No		
TEDS	No		
Dynamic Range			
Resonance Frequency	32 kHz		



$$G(s) = \frac{U_F(s)}{a(s)} = \frac{n_F}{C_F} \frac{m}{k_e} \frac{1}{s^2 \frac{m}{k_e} + s \frac{b}{k_e} + 1}$$



[Forrás: Dr. Huba A., et al.: Mechatronikai berendezések tervezése, Elektronikus jegyzet, Bp. 2014;
<https://www.slideshare.net/ajsatienza/sensors-13692410>]



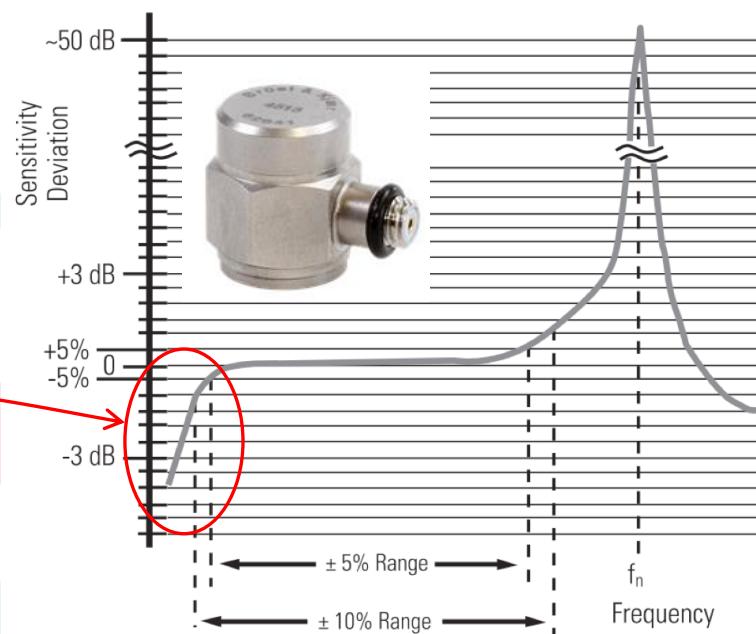
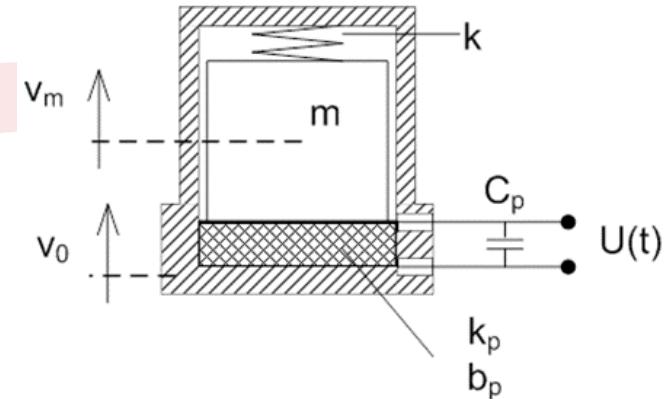
Piezoelektrikumok

Előnyök:

- nem kell tápfeszültség,(aktív szenzor),
- kis és nagy erők is jól mérhetőek,
- hőmérsékletváltozásra érzéketlen,
- sokféle geometria,
- elektromos zavarok alig befolyásolják

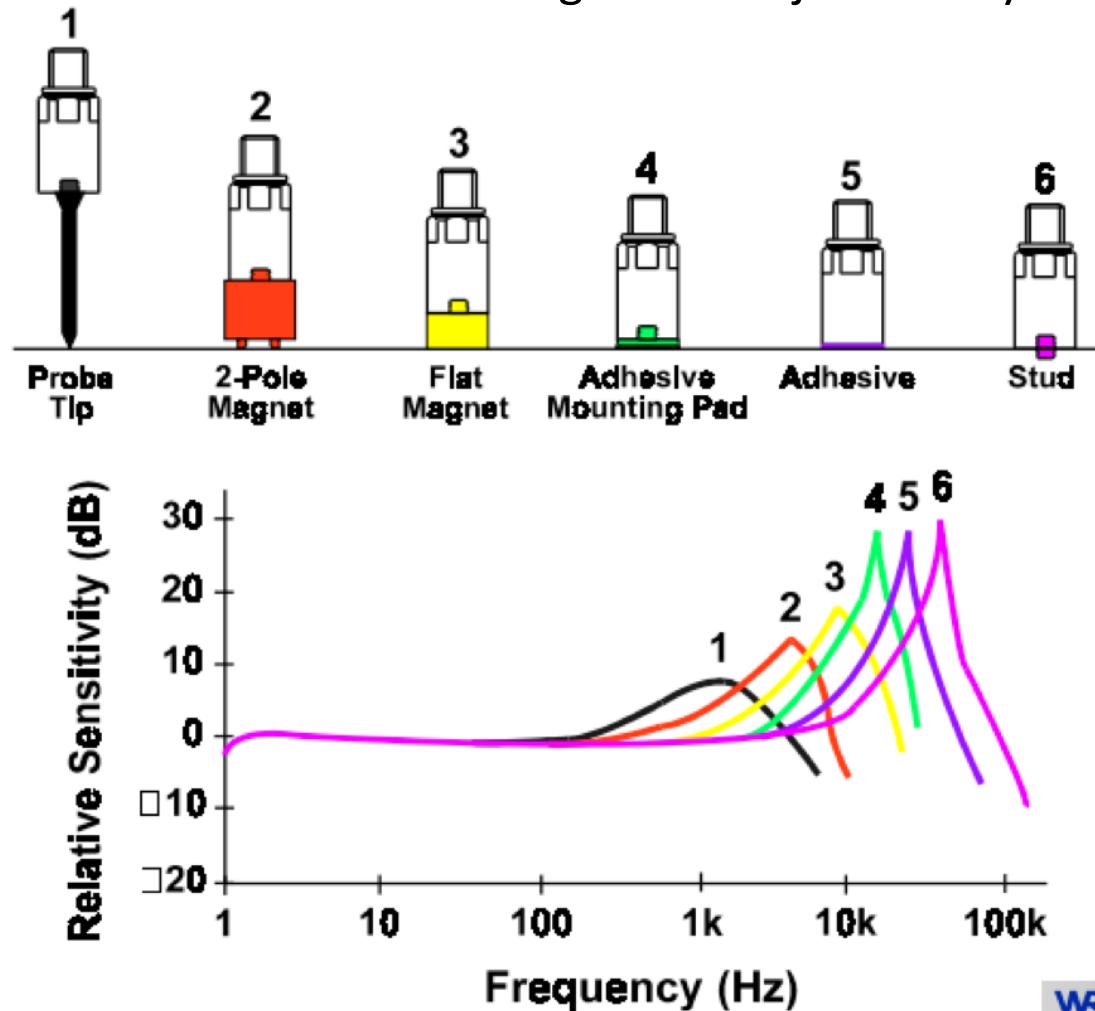
Hátrányok:

- csak jól megválasztott anyagok alkalmazhatók,
- csak *a mechanikai feszültség változása mérhető*, azaz statikus mérésre nem alkalmas!
- kristálytani irányfüggő.



A szenzorok dinamikus karakterisztikái (Pl.: Piezoelektronos Gyorsulásérzékelő)

A gyorsulásérzékelő frekvenciaátvitelét a rögzítés módja is befolyásolja.

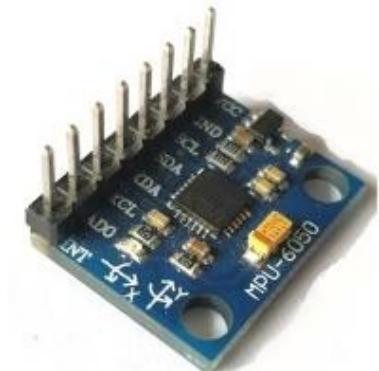
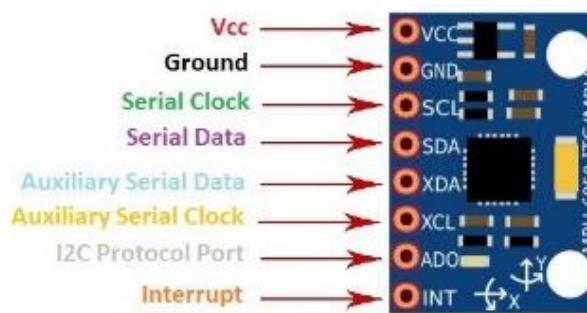


[Forrás: <https://esteq.co.za/2016/07/05/accelerometer-mounting-considerations/>]



MEMS gyorsulásmérő

- Rendkívül kis mérés → kisebb mértékben befolyásolja a mérést
- Digitális kommunikáció.
- Több tengely és kiegészítő szenzorok is egy tokozásba integrálhatók, pl. 9 DoF IMU:
 - 3 DoF gyorsulásérzékelő
 - 3 DoF giroszkóp (szögsebesség)
 - 3 DoF Mágneses érzékelő (iránytű)
 - + 1 Barometrikus magasságmérő
- Többféle mérési elv:
 - Piezorezisztív
 - Kapacitív
 - Termodinamikai



[Forrás: [Dr. Halmai, Attila; Dr. Samu, Krisztián: Mikromechanika. \(2014\).](#)]

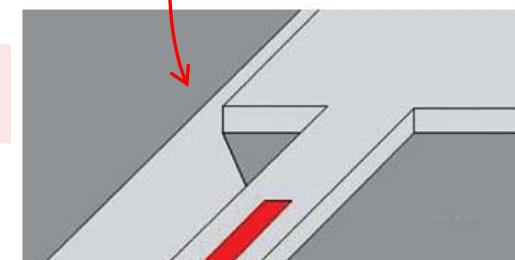
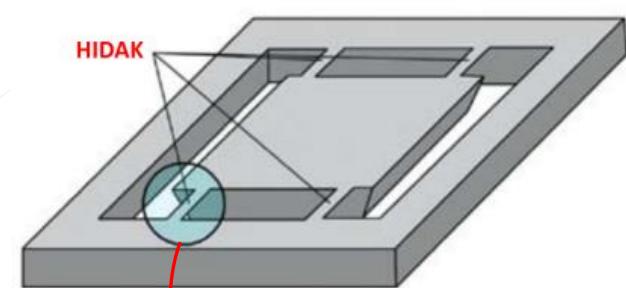
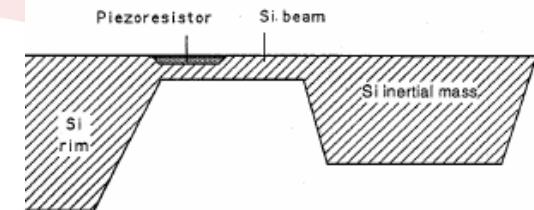


MEMS gyorsulásmérő (piezorezisztív)

- Mérési elv: a gyorsulás által létrejött megnyúlás detektálása ellenállás változással.
- Technológia:
 - szilícium tömbi mikromechanika,
 - Si anizotrop marása
 - vékonyréteg rendszerek
- Alkalmazás:
 - labor alkalmazások,
 - korábban ütközési szenzorok is
 - légsákok vezérlése



Példák mikromechanikai gyorsulásmérők szeizmikus tömegének kialakítására.



MEMS gyorsulásmérő (kapacitív)

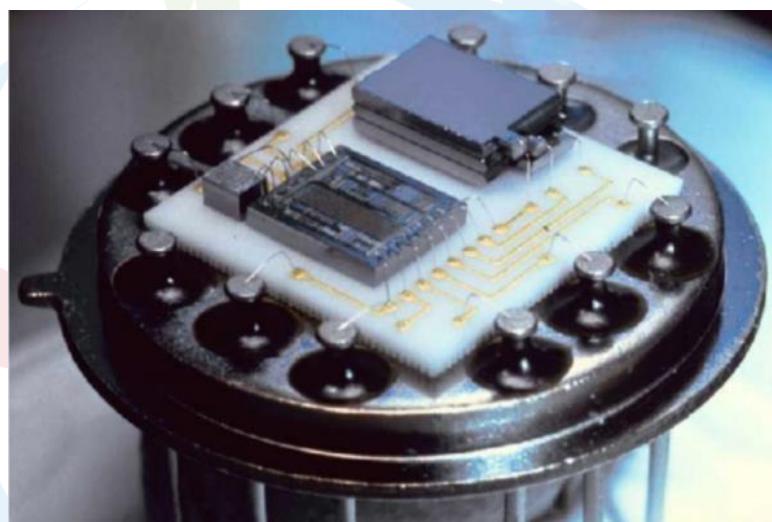
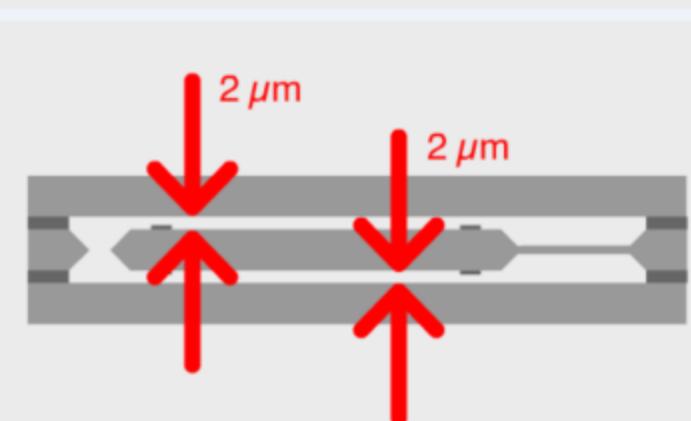
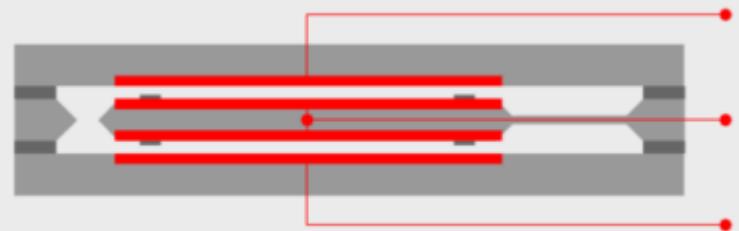
- Kis elmozdulásokra (síkkondenzátor közelítés)

$$\frac{\Delta C}{\Delta d} = -\varepsilon \frac{A}{d^2}$$

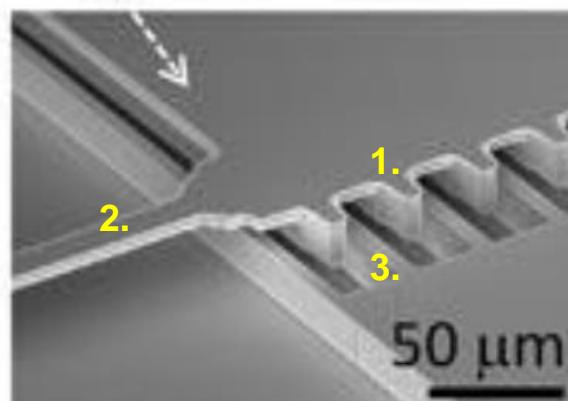
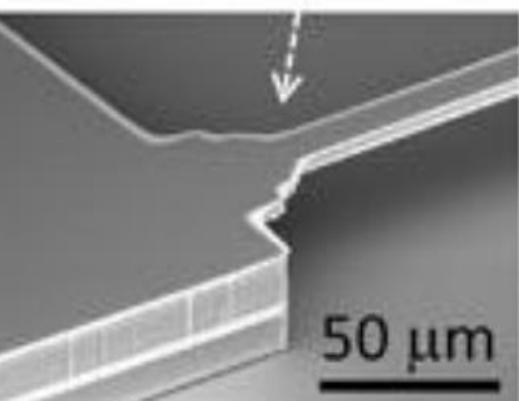
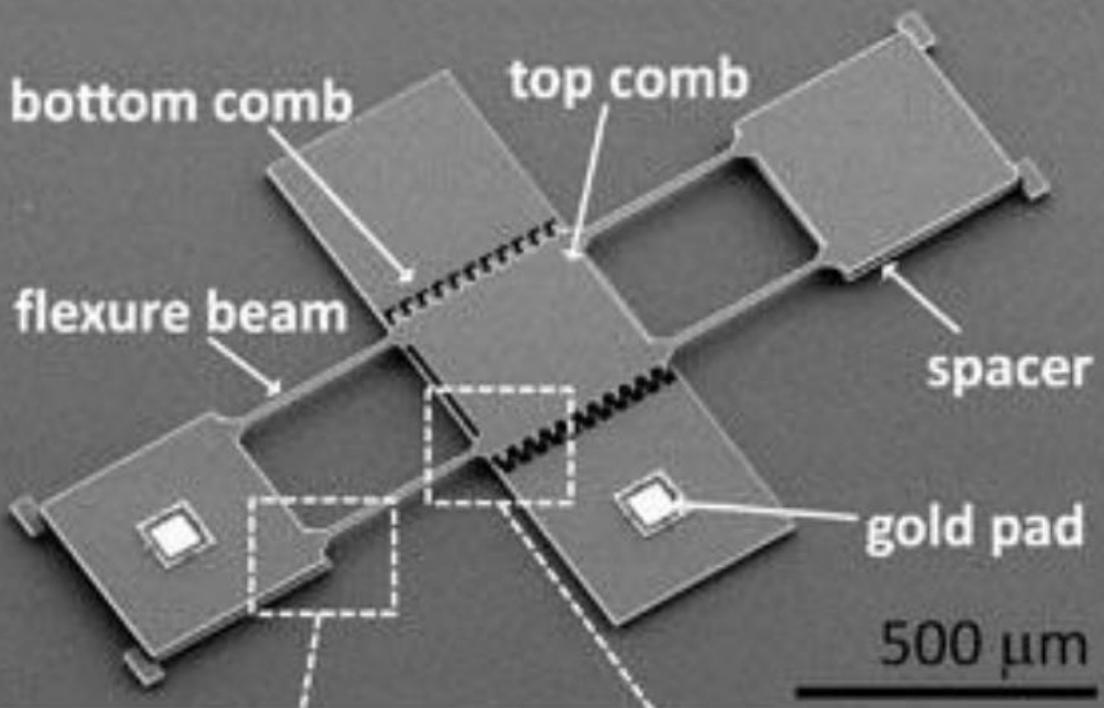
- Technológia:
 - szilícium tömbi mikromechanika,
 - felületi mikromechanika
- Alkalmazás:
 - Gépjárművekben, légzsákvezérlés, ...

Előnyök: csak a geometriai paramétereiktől és a rugalmassági állandótól függő nagy érzékenység, hőmérsékletfüggés csak a hőtágulásból adódik

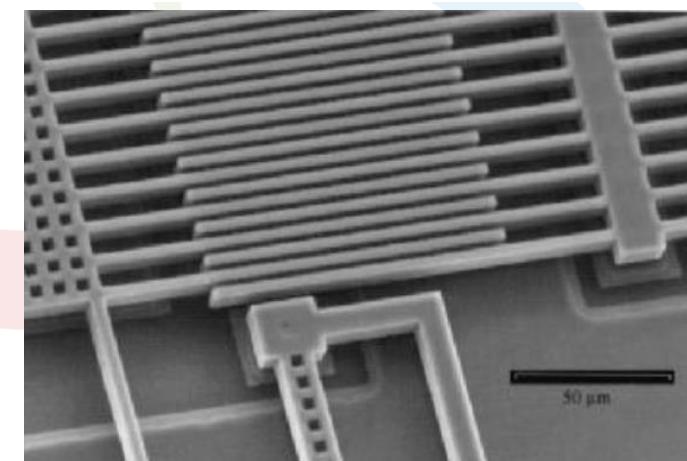
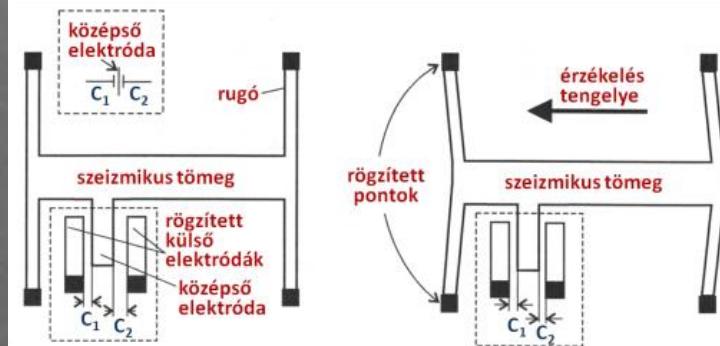
Hátrányok: nem-lineáris karakterisztika, nem egyenletes deformációból adódó kapacitásváltozás, nem elhanyagolható szort kapacitások



MEMS gyorsulásmérő (kapacitív)



1. Rúgós felfüggesztésű szeizmikus tömeg a mozgó fegyverzetekkel
2. Rugó
3. Rögzített fegyverzetek.

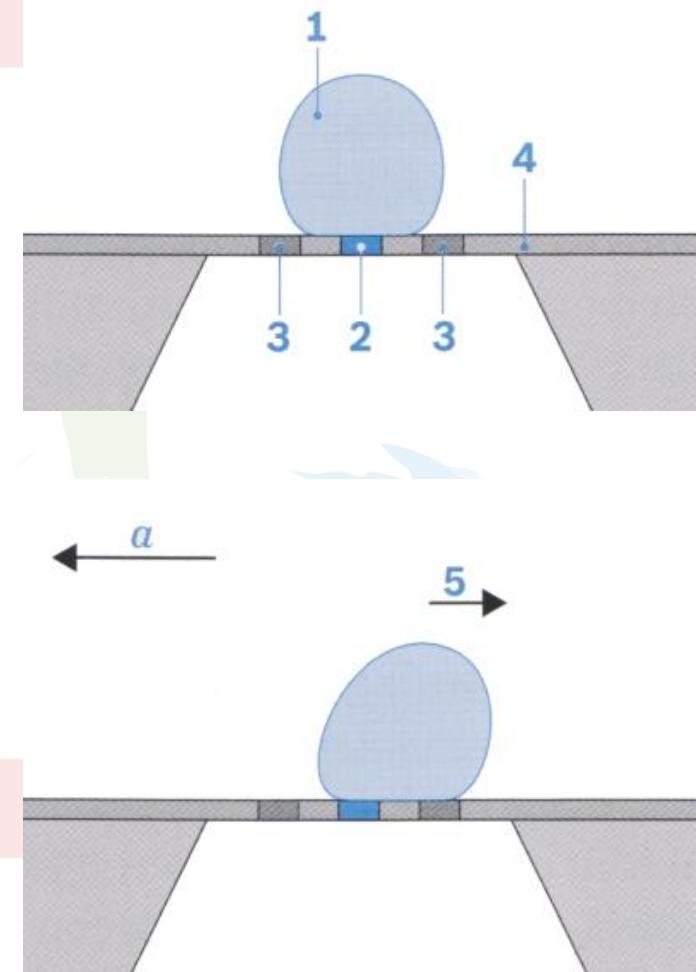


Forrás: Battistig Gábor: Szenzorok, előadásjegyzet.

MEMS gyorsulásérzékelők (termodinamikai)

Mérési elve egy fűtött gáztérfogat gyorsulás hatására történő elmozdulásának hőmérőkkel történő mérésén alapul.

- Egy szűk térben egy gázbuborékot (1) melegítének fel,
- a (2) fűtőtest segítségével.
- A felmelegített gázbuboréknak helytől függő hőmérséklet eloszlása szimmetrikus ha nincs gyorsulás.
- Ha van laterális gyorsulás, a felmelegített gáz elmozdul.
- Ezt a (3) hőmérséklet érzékelőkkel mérni lehet.



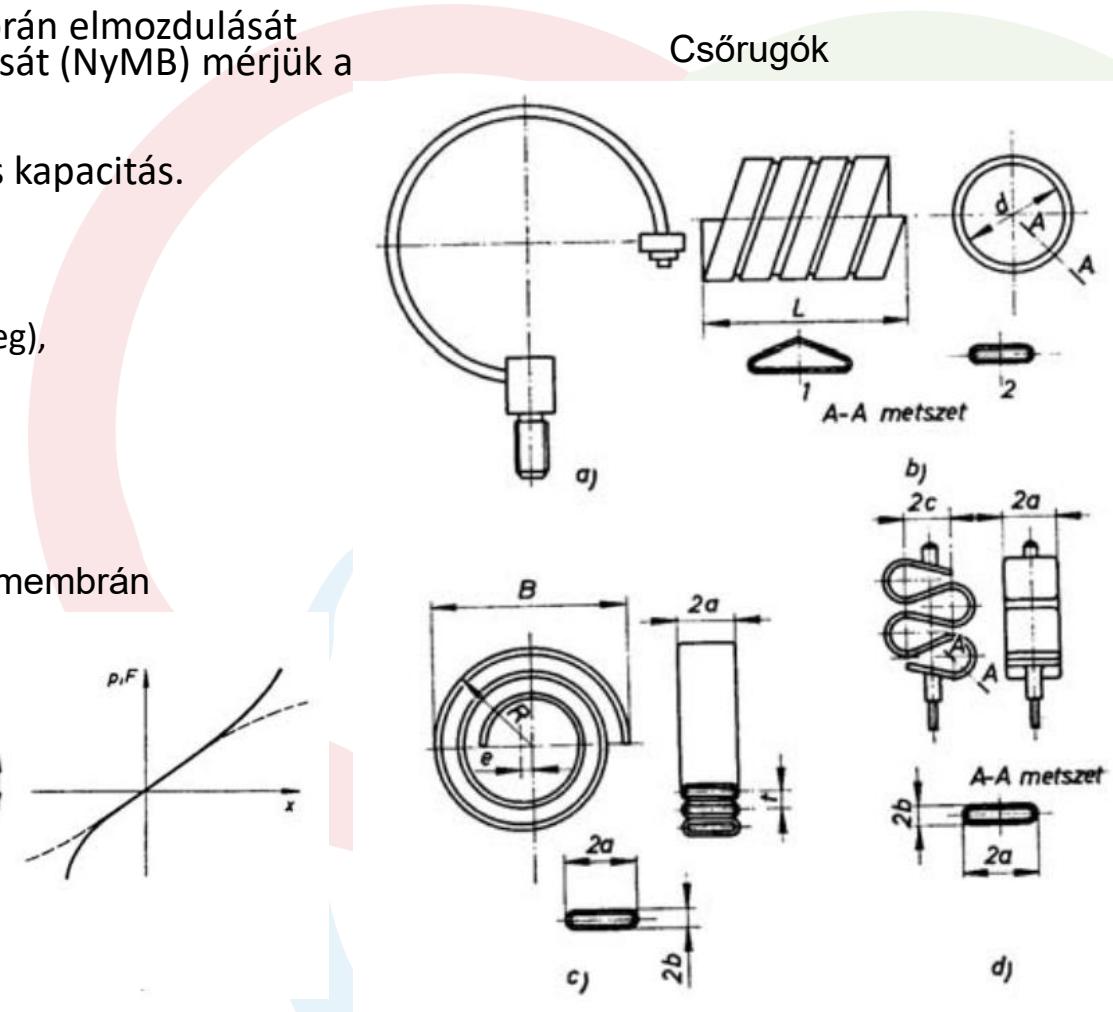
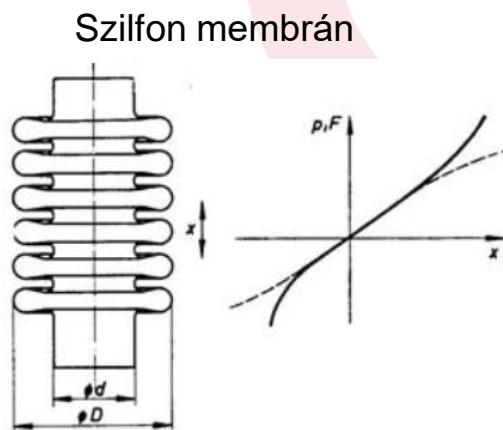
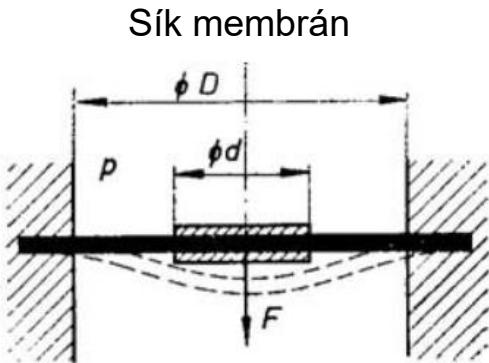
[Forrás: [Dr. Halmai, Attila; Dr. Samu, Krisztián: Mikromechanika. \(2014\).](#)]



Nyomásmérők

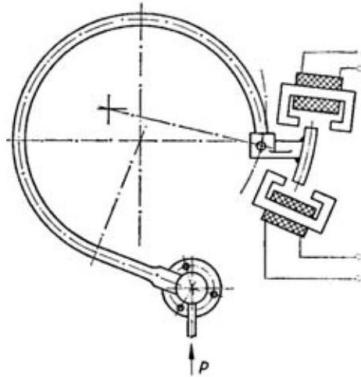
Közvetett mérés,

- A nyomás hatására deformálódó membrán elmozdulását (induktív, kapacitív), vagy fajlagos nyúlását (NyMB) mérjük a megfelelő szenzorral.
- Lehetőleg kis pneumatikus / hidraulikus kapacitás.
- Előnyök:
 - Nagy túlterhelhetőség,
 - Rezgésekre való érzéketlenség (kis tömeg),
- Hátrányok:
 - Hiszterézis,
 - Hőmérsékletfüggés.



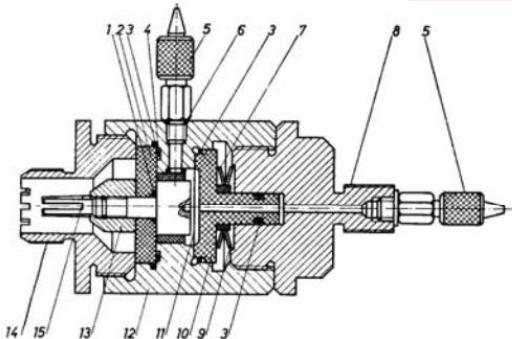
Nyomásmérők (membrános kialakítás)

Induktív



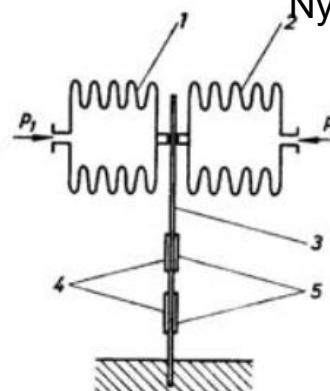
13.13. ábra. Induktív nyomásmérő gyorsan változó nyomásokhoz (Vibrometer)
1 membrán; 2 vasmag; 3 tekercsek; 4 vezető membrán;
5, 6 hűtőcsatlakozás, 7 villamos csatlakozás

Kapacitív

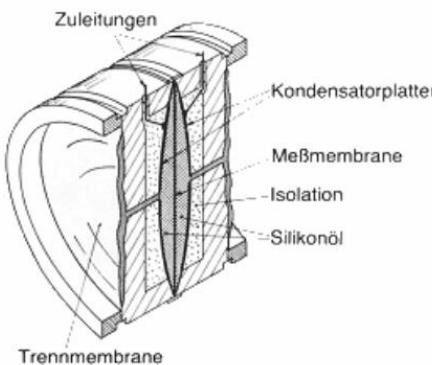


13.15. ábra. Kapacitív nyomásmérő metszete (DISA)
1 0-gyűrű; 2 szigetelés; 3 0-gyűrű; 4 távtartó; 5 csőcsatlakozó; 6 alátét; 7 alátét; 8 fedél; 9 távtartó; 10 szortígyűrű; 11 membrán; 12 ház; 13 központosító; 14 nagyfrekvenciás csatlakozó; 15 elektróda

Nyúlásnyomásmérő-bélyeges



13.10. ábra. Csőmembrános nyomás-különbségmérő hajlításra igénybevett segédmérőtesttel
1, 2 csőmembrán (mérőtestek);
3 hajlított rugó (segédmérőtest);
4, 5 nyúlásnyomásmérőbélyegek



13.11. ábra. Csöves mérőelemű nyúlásnyomásmérő-bélyeges nyomásmérő
1 érzékelőcső; 2 aktív; 3 kompenzálgó bélyegek



MEMS Nyomásmérők (Kapacitív)

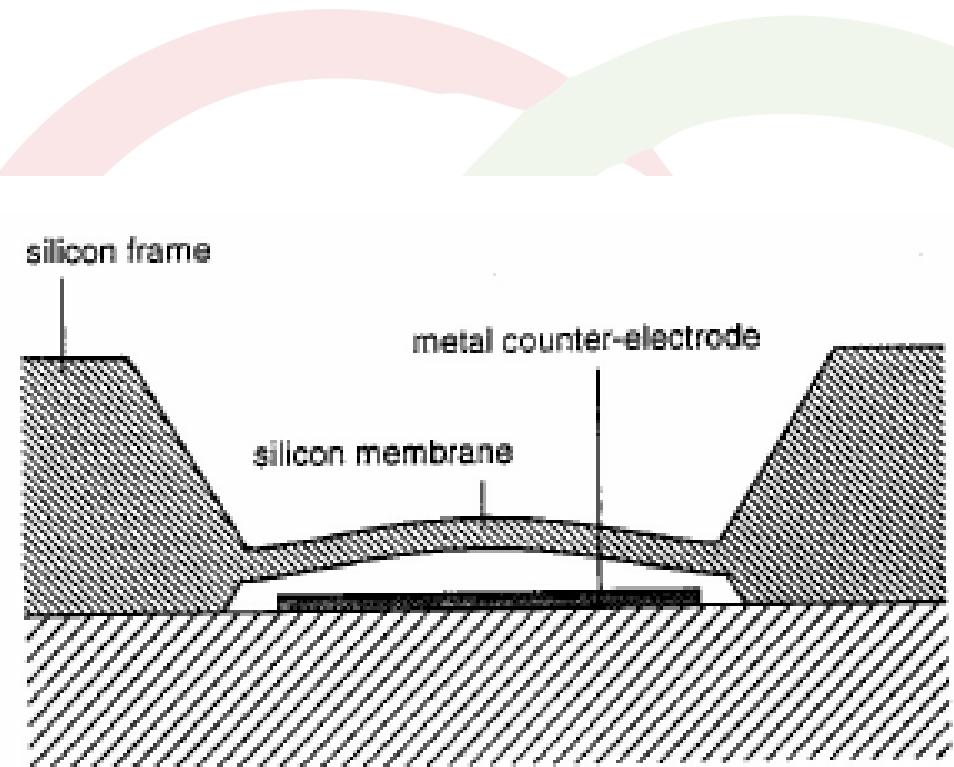
- Kis elmozdulásokra
(síkkondenzátor közelítés)

$$\frac{\Delta C}{C} = -p \frac{\Delta x}{x}$$

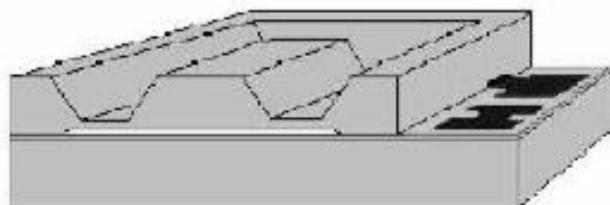
- Technológia:
 - szilícium tömbi mikromechanika,
 - felületi mikromechanika

Előnyök: csak a geometriai paraméterektől és a rugalmassági állandótól függő nagy érzékenység, hőmérsékletfüggés csak a hőtágulásból adódik

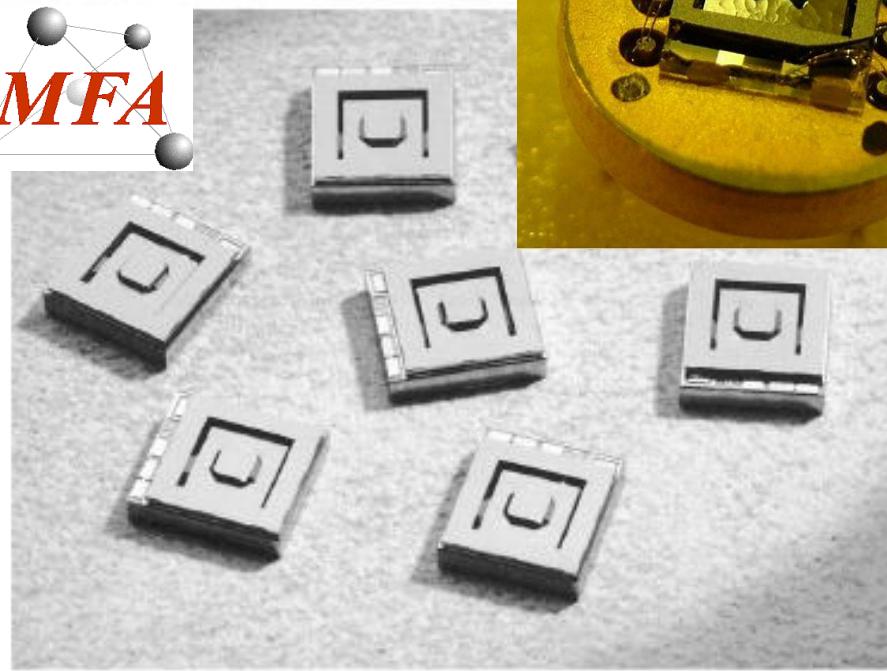
Hátrányok: nem-lineáris karakterisztika, nem egyenletes deformációból adódó kapacitásváltozás, nem elhanyagolható szort kapacitások



MEMS kapacitív nyomásmérő chip



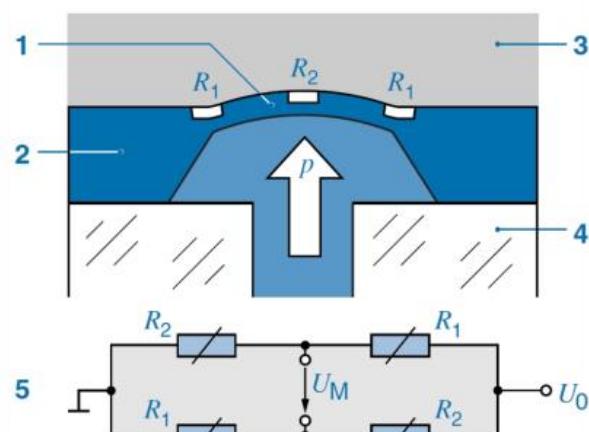
Felső elektróda: anizotrópan mart Si
Alsó elektróda: Si vagy Pyrex tüveg
Kivezetés: Al vagy adalékkolt poli Si



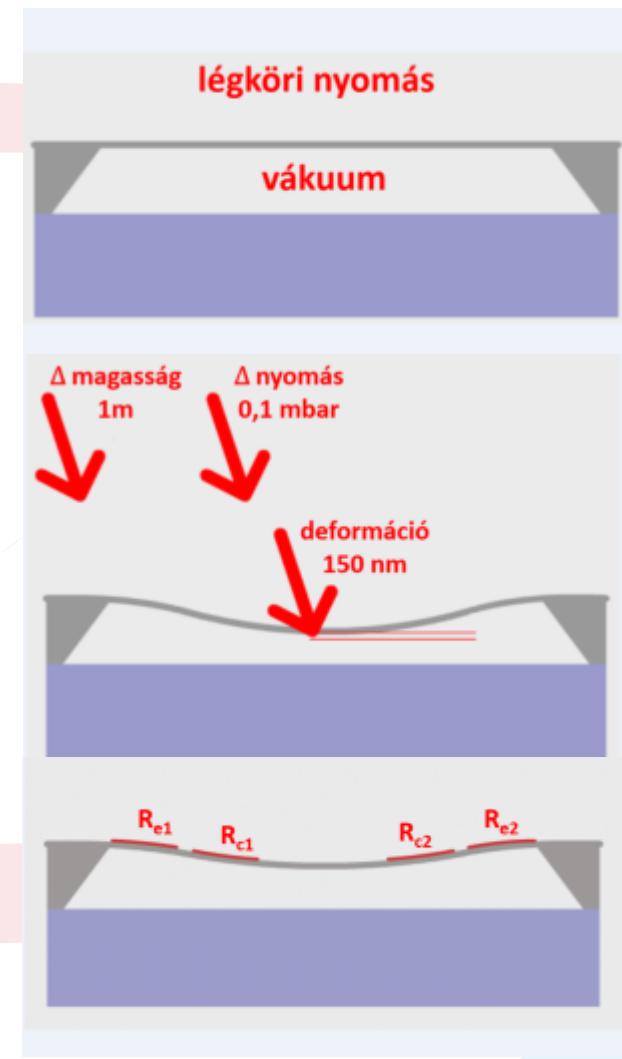
működési tartomány: 0.05...1.3 bar
hőmérséklet tartomány: -55-+80°C
érzékenység: 20fF/mbar
hiszterézis: ± 2 mbar
ismétlési hiba: ± 2 mbar
TCO: -80ppM/°C

MEMS Nyomásmérők (Piezorezisztív)

A mikromechanikai nyomásmérő referencia
vákuummal a struktúra oldalon



A mikromechanikai
nyomásmérő tokozás előtt



[Forrás: Dr. Halmai, Attila; Dr. Samu, Krisztián: Mikromechanika. (2014).]

Ellenőrző kérdések

Adja meg egy nyúlászmérő bélyeges erőmérő cella kimeneti feszültségét (egyenlet)!
Mit ad meg a cellatényező?

Mi a nyúlászmérő bélyeges erőmérő / nyomatékmérő jelátalakító mérőtest kialakításának fő szempontjai?

Mi a fő különbség a nyúlászmérő bélyeges és a piezoelektronos erőmérő között?

Milyen korlátai vannak a piezoelektronos erőmérő szenzor használatának?

Mondjon példákat a forgó nyomatékmérő mérési elveire és a jelkivezetés módjára!

Ábrázolja egy nyúlászmérő bélyeges/ induktív / MEMS piezorezisztív /MEMS kapacitív nyomásérzékelő jellemző felépítését.

Ábrázolja egy piezoelektronos elven működő gyorsulásérzékelő jellemző felépítését és dinamikus karakteristikáját (frekvencia tartományban)!

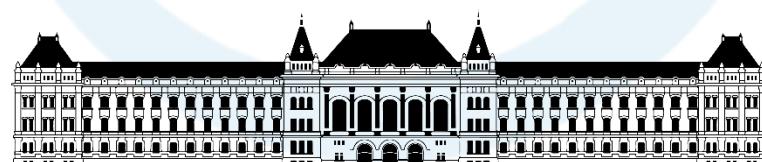
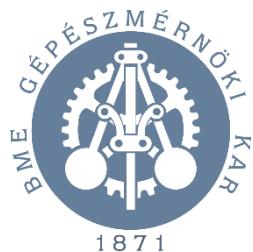


KÖSZÖNÖM A FIGYELMET!

BOJTOS Attila
BME - MOGI Tanszék
bojtos@mogi.bme.hu

Szenzorteknika Aktuátorok

BOJTOS ATTILA
BME - MOGI TANSZÉK



M Ú E G Y E T E M 1 7 8 2



Tematika

Bevezetés a szenzorteknikába

- csoportosítás,
- méréstechnikai tulajdonságok,
- Jelfeldolgozás

Anyagszerkezet

- Atomszerkezet
- Kémiai kötések
- Sávszerkezet
- Félvezetők
- Fémek

Érzékelési elvek fizikai alapjai (szenzor)

- Termikus elvek, hőmérsékletmérés
- Optikai-elvek
- Ellenállásváltozás elvén működő érzékelés
- Piezoelektronos mérési elvek
- Kapacitás
- Mágneses mérési elvek
- Akusztikai elvek

Érzékelési módszerek, alkalmazások (jelátalakító)

- Hossz-, távolság-, elmozdulás-, elfordulásmérés szenzorai
- Sebesség-, térfogatáram-, gyorsulásmérés szenzorai
- Nyomás-, erő-, nyomatékmérés szenzorai
- (Kémiai érzékelés szenzorai)

Aktuátorok

- **Motorok**
- **Piezoelektronos aktuátorok**
- **Magnetostrikciós aktuátorok**

Integrált érzékelő és beavatkozó rendszerek (vendégelezés)

- Technológiai alapok, MEMS, NEMS, OEMS
- Szenzorhálózatok, IoT

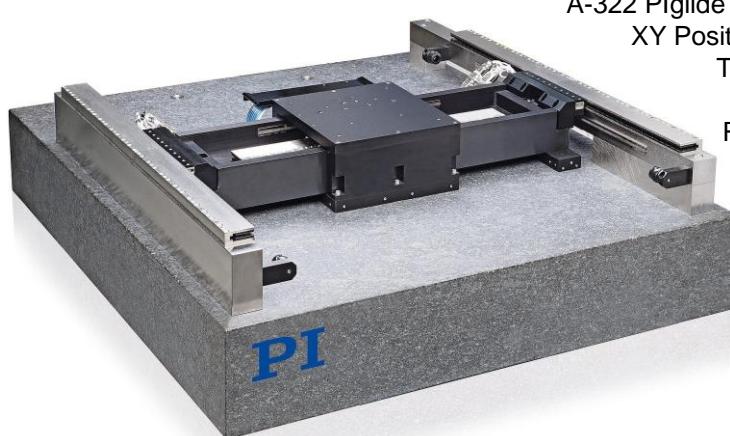


5. Előadás áttekintése

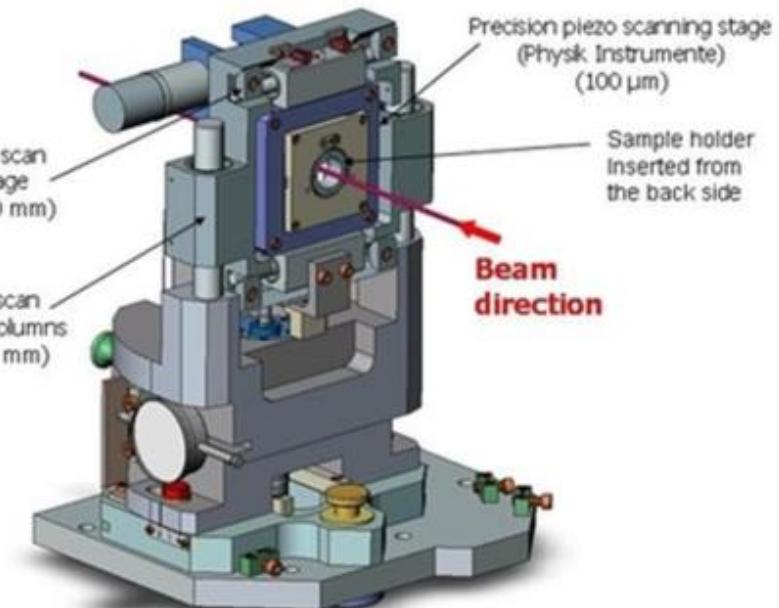
- Egyenáramú (DC) motorok
 - Soros gerjesztésű
 - Párhuzamos gerjesztésű
 - Külső gerjesztésű
 - Univerzális motorok
 - Egyenáramú (DC) szervomotorok konstrukciói
 - Mágneses elrendezések
 - Vasmagos forgózész
 - Légréstekerkes
 - Tárcsás
 - Mikromotorok
 - Elektronikusan kommutált motorok (BLDC)
 - Állórész tekrcselés
 - Egyfázisú, kétütemű
 - Háromfázisú, háromütemű
 - Négyfázisú, négyütemű
 - Háromfázisú, hatütemű
 - Konstrukciós kialakítások
 - Fordulatszámszabályozás
 - Aszinkron motorok
 - Segédfázis nélküli egyfázisú
 - Segédfázisos
 - Árnyékolt, (hasított pólosú) aszinkron motorok
 - Léptetőmotorok
 - Változó reluktancia
 - Állandómágneses
 - Hibrid
 - Léptetőmotorok vezérlése
- Lineáris motorok
 - Lineáris hybrid léptetőmotorok
 - Lineáris aszinkronmotorok
 - Piezoelektromos aktuátorok (Elektrostriktíciós)
 - Optikai piezoelektromos (fotostrikciós)
 - Magnetostrikciós
 - Emlékezőfémek (Shape Memory Alloys)
 - Elektrosztatikus mikromotorok
 - Vezérelhető folyadékok (MR, ER)
 - Pneumatikus, és hidraulikus finommechanikai aktuátorok,



Aktuátorok



A-322 PiGlide HS Planar Scanner with Air Bearing
XY Positioning System with 1 nm Resolution
Travel ranges to 500 mm × 1000 mm
Load capacity to 245 N
Resolution to 1 nm, Velocity to 2 m/s



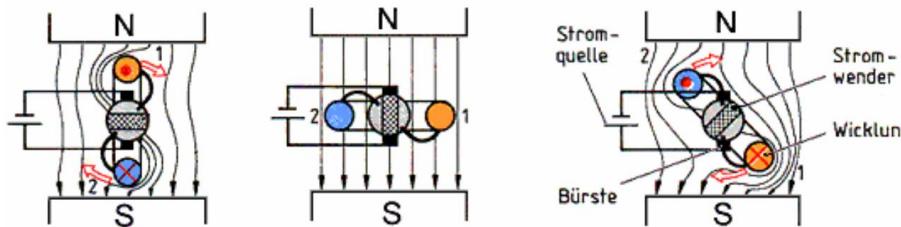
Precíziós x-y asztal



Elektromágneses motorok működési elve

- Lorentz-erő

- Mágneses térbe helyezett áramjárta vezetőre ható erő.
- Árammal átjárt vezetőkeretre forgatónyomaték hat.
- Folyamatos forgó mozgás az áram, vagy a mágneses térerősség irányának változtatásával érhető el.



- Mozgási indukció

- Mágneses térben mozgó vezetőben feszültség indukálódik,
- ami csökkenti a vezetőben folyó áramot.

$$\mathbf{F} = I(\mathbf{l} \times \mathbf{B})$$

Egymásra merőleges vektorok esetén:

$$F = IlB$$

$$\mathbf{E} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

Egymásra merőleges vektorok esetén:

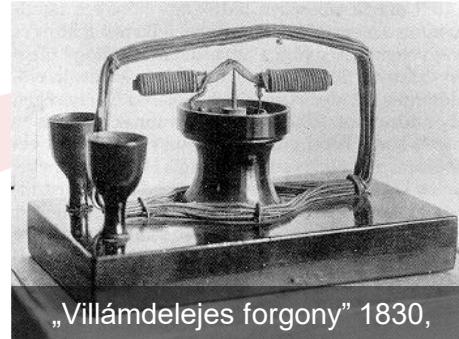
$$U_i = vLB$$

$$I = \frac{U - U_i}{R}$$

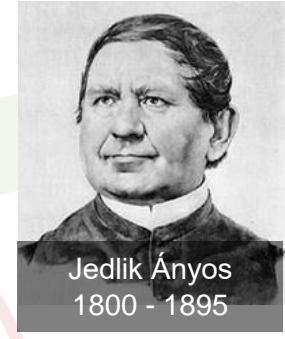


Elektromágneses motorok történelmi áttekintése

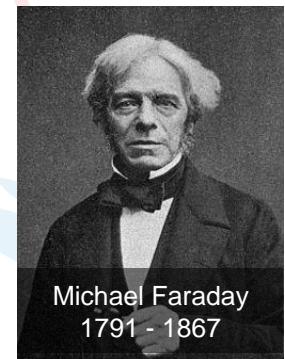
- Jedlik Ányos (1830)
 - Győri bencés gimnázium fizika kísérlet,
 - higany kommutátor.
 - Nem publikálta. ☹
- Michael Faraday (1831)
 - Két vezetéket csatlakoztatott egy rézlemezhez egy csúszó érintkezőn keresztül. Amikor a korongot egy patkómágnes pólusain keresztül forgatta, rájött, hogy az egyenáramot generál. Faraday így találta ki a legegyszerűbb generátort.
 - 1831-ben sikerült megépítenie az első villanymotort.
- Joseph Henry (1831)
 - egyidejűleg hasonló motoron dolgozott.
 - Az elektromágnes feltalálója és
 - Róla nevezték el az induktivitás SI-mértékegységét.



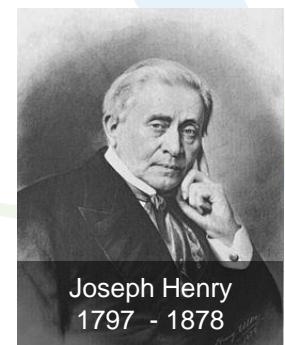
„Villámdelejes forgony” 1830,



Jedlik Ányos
1800 - 1895



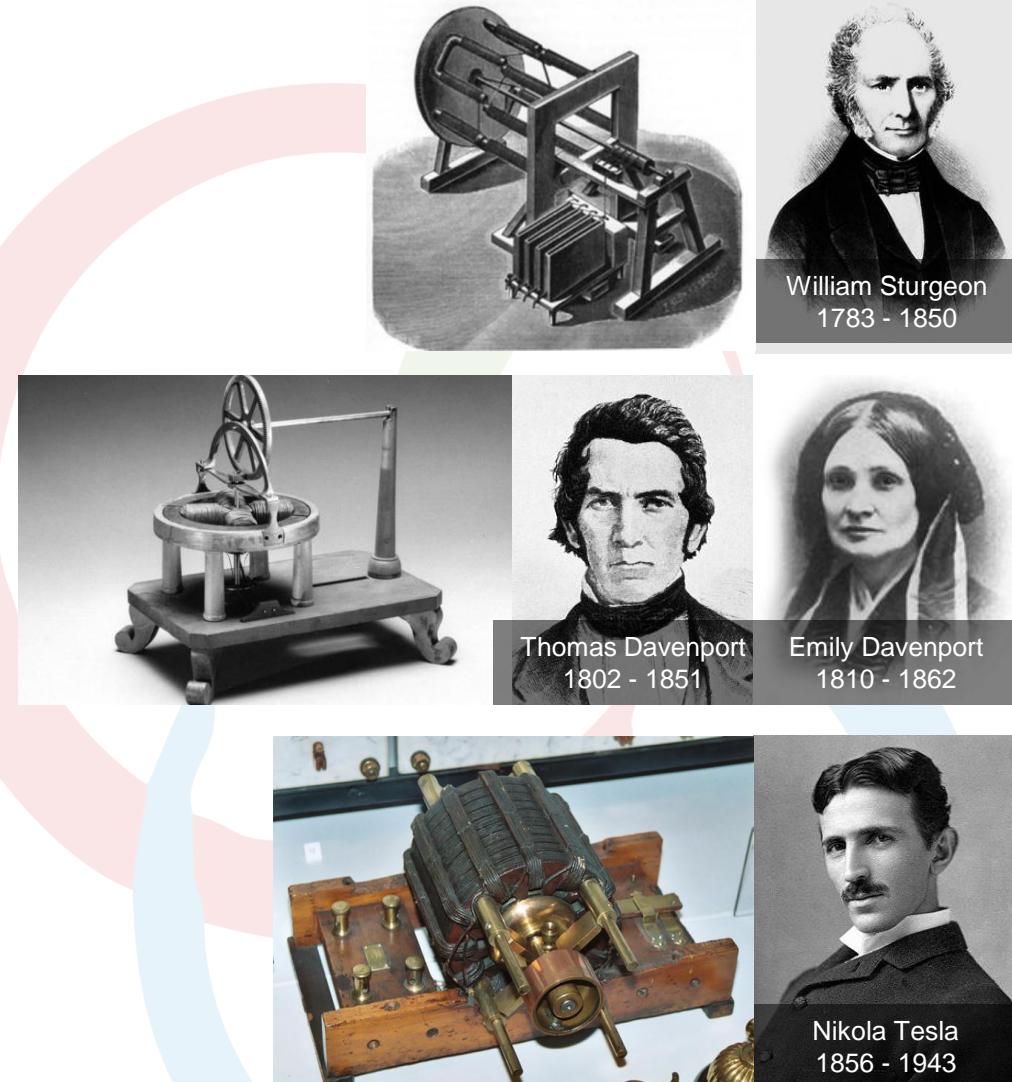
Michael Faraday
1791 - 1867



Joseph Henry
1797 - 1878

Elektromágneses motorok történelmi áttekintése

- William Sturgeon (1832)
 - Első gyakorlatban is használható kommutátorral ellátott (**Brit**) villanymotor.
- Thomas és Emily Davenport (1834)
 - Első akkumulátorral ellátott (**Amerikai**) villanymotor.
 - Elektromos jármű szabadalma (USA).
- Nikola Tesla (1882 – első AC motor)
 - Meghatározta a forgó mágneses tér elvét, és a forgó erőteret használta a gépek meghajtására. Ezen elv alapján 1883-ban új kétfázisú indukciós motort tervezett.



Egyenáramú (DC) motorok (Soros és párhuzamos gerjesztésű)

Párhuzamos gerjesztésű

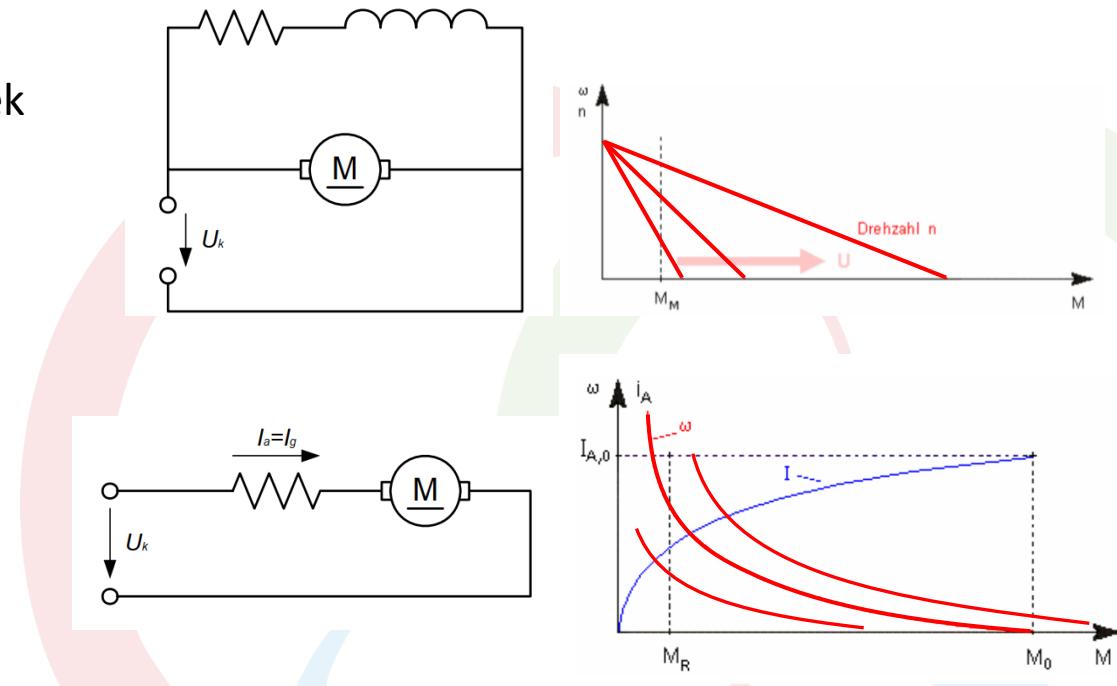
- Lineáris fordulatszám–nyomaték jelleggörbe,
- Kapocsfeszültséggel változik a motor merevsége: $m = \Delta M / \Delta n$
- A külső gerjesztésű többnyire kiszorította ezeket.

Soros gerjesztésű DC motorok

- Nemlineáris fordulatszám–nyomaték jelleggörbe,

Univerzális motor

- Soros kivitelű motor alkalmazható váltakozó feszültséggel is.
 - Gerjesztőáram megegyezik az armatúraárámmal.
 - A motornyomaték megközelíti az egyenáramú táplálást.
- Kivitel:
 - Kétpólusú, Lemezelt állórész vasmag, kis teljesítmény, nagy indítónyomaték, változatos fordulatszámra készül.
 - Kézi szerszámok, háztartási eszközök.



Egyenáramú (DC) motorok (Külső gerjesztésű)

Állandó gerjesztés

- Állandómágnes is lehet → nagyobb hatásfok,

Indítási áram:

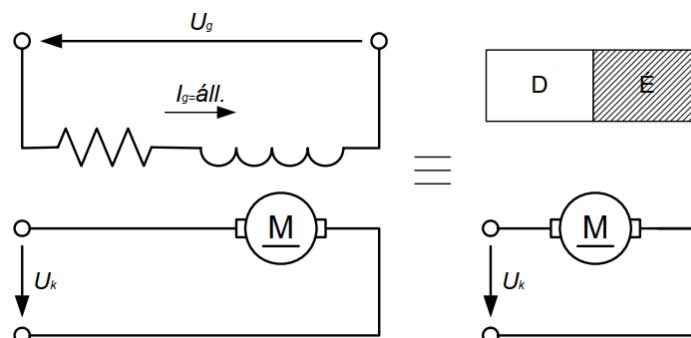
$$i_0 = \frac{U}{R_a}$$

Indítási nyomaték (max):

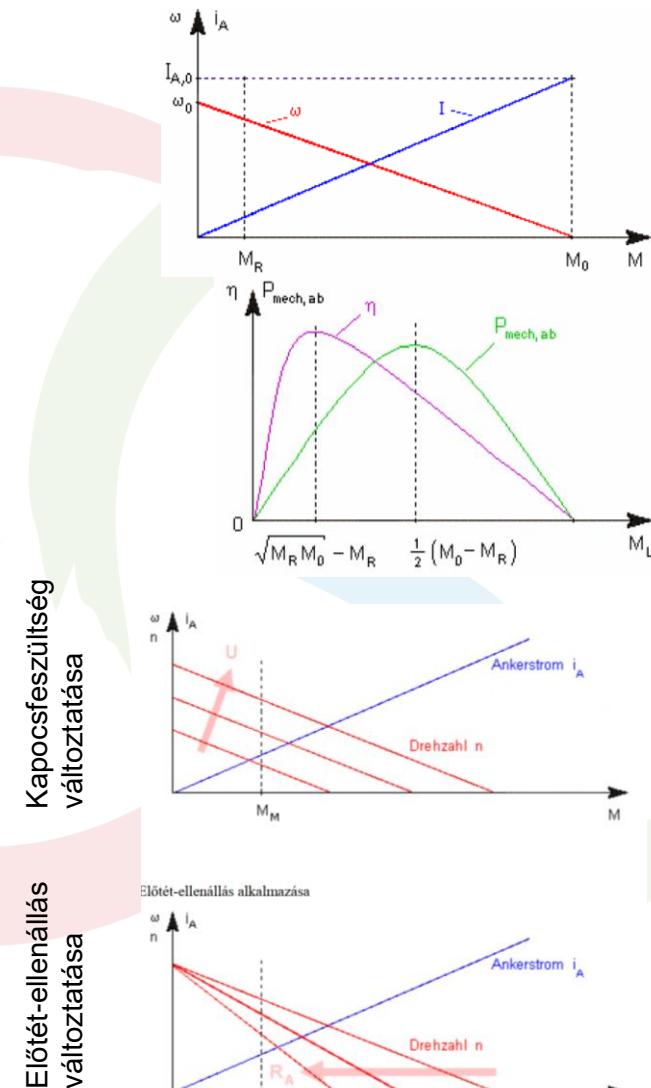
$$M_0 = \frac{k_M U}{R_a}$$

Üresjárási fordulatszám:

$$\omega_0 = \frac{U}{k_M}$$

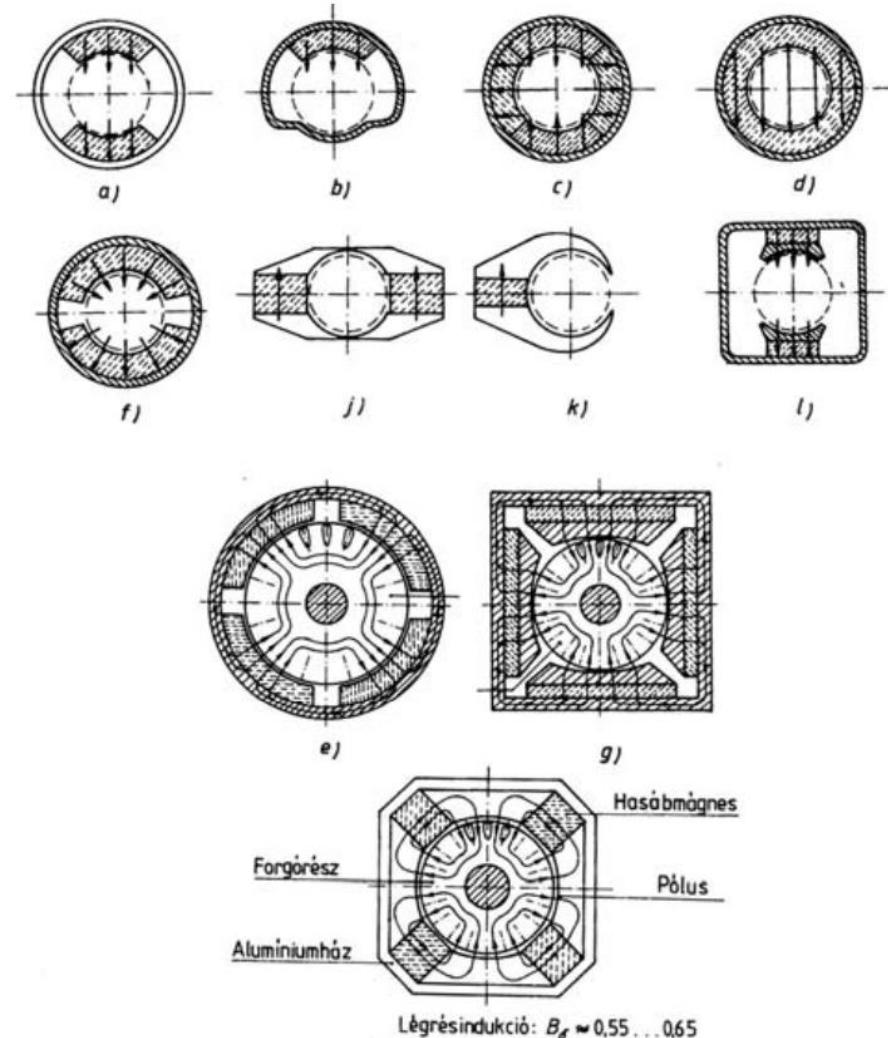


Forrás: Halmai – Halas: Aktuátorteknika előadásjegyzet;



Egyenáramú (DC) motorok konstrukciói

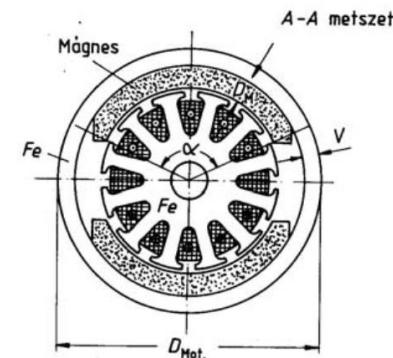
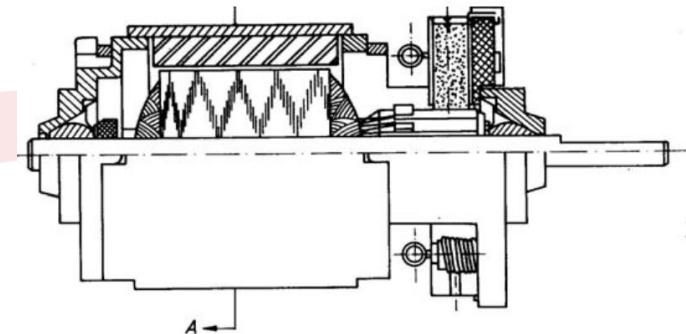
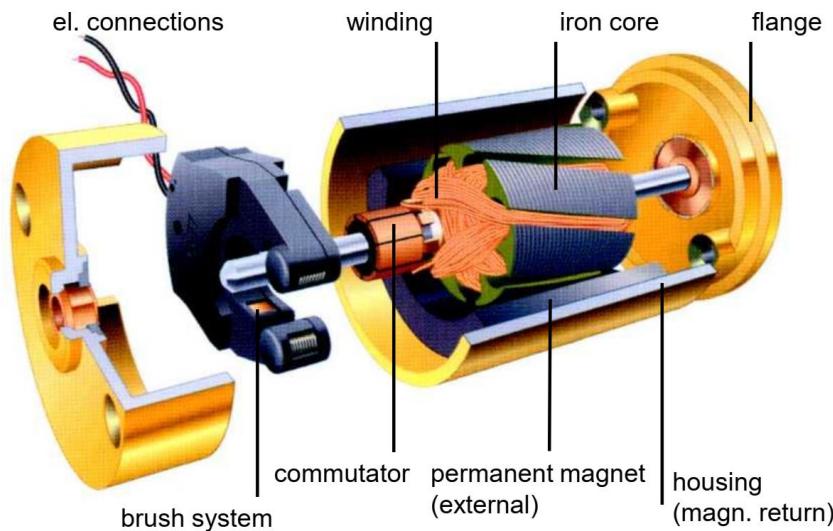
Mágneses elrendezések



Egyenáramú (DC) motorok konstrukciói

Vasmagos forgózéses konstrukció

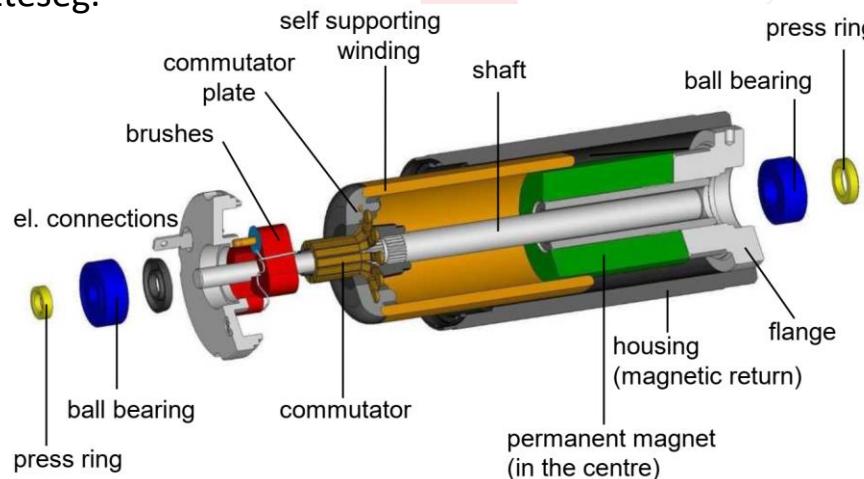
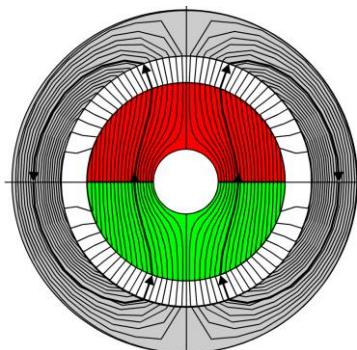
- Min. 3 pólus,
(2 esetén bizonytalan az elindulás),
- Nagy tehetetlenségi nyomaték,
- Vasveszteség,



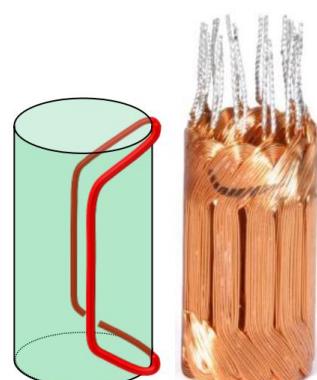
Egyenáramú (DC) motorok konstrukciói

Légréstekerces konstrukció

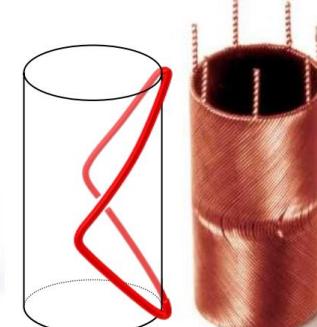
- Főbb részei:**
 - Állandómágnes – külső gerjesztés
 - Légrés – minél kisebb, annál erősebb a mágneses térerősség.
 - Ház – zárja a mágneses erővonalakat.
 - Serleges forgórész tekercs (általában öntartó),
- Jellemzői:**
 - Radiális fluxus,
 - Kis tehetetlenségi nyomaték,
 - Nincs vasveszteség.



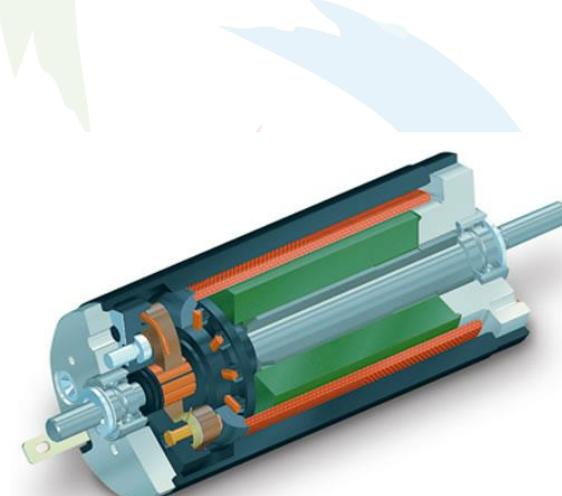
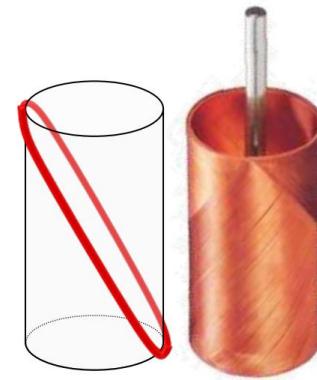
maxon
and others



maxon



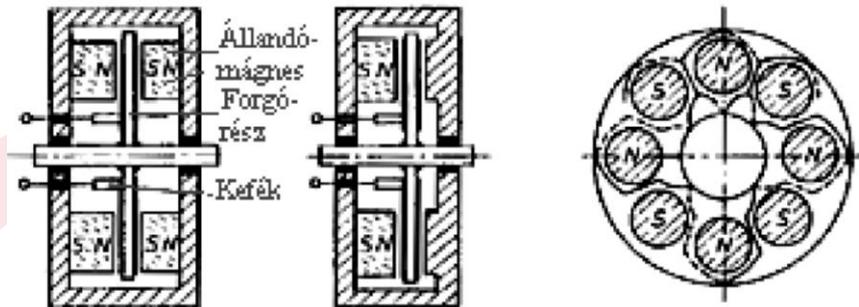
Faulhaber
Portescap



Egyenáramú (DC) motorok konstrukciói

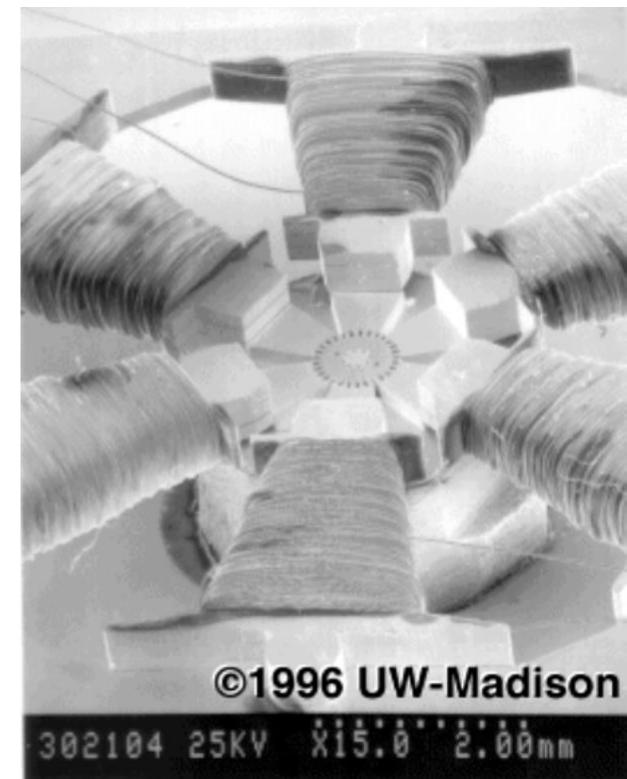
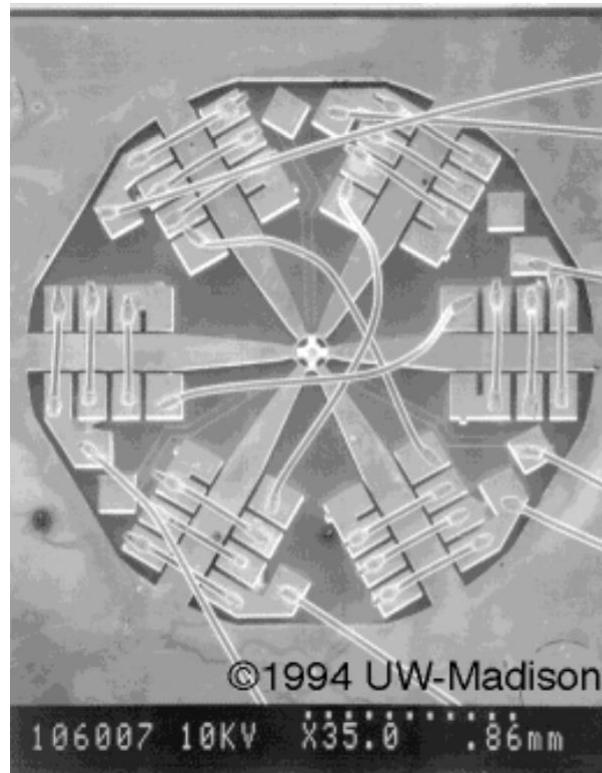
Tárcsás forgórészű konstrukció

- Axiális fluxus,
- A serlegessel egyező nyomatékképzés,
- Nagyobb tehetetlenségi nyomaték,
- Nincs vasveszteség,
- Készülhet nyomtatott áramköri technológiával is.



Egyenáramú (DC) motorok konstrukciói

Mikromotorok



Egyenáramú (DC) servomotorok

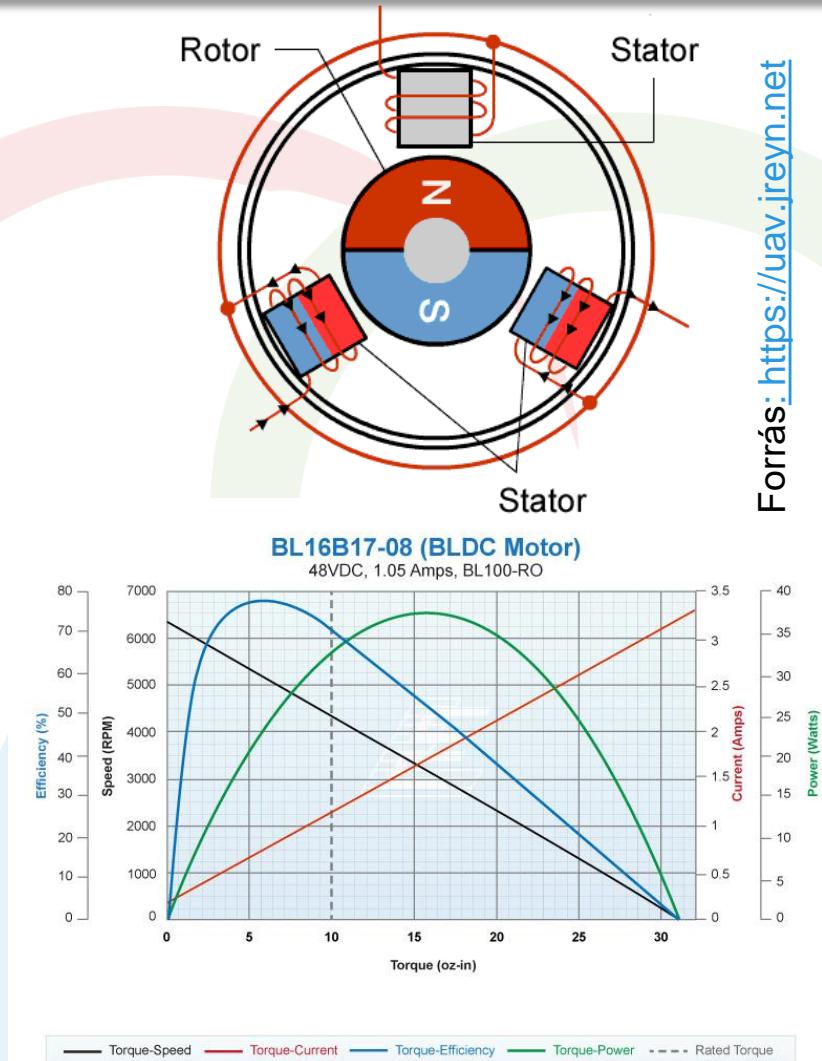
Mechatronikában, műszertechnikában legelterjedtebb motor,

- Előnyei
 - Folytonos (analóg) mozgás,
 - Jó szabályozhatóság,
- Hátrányai (a kommutáció miatt):
 - Érintkezési bizonytalanság,
 - Járulékos zajok,
 - Korlátozott élettartam,
 - Helyigény,
 - Súrlódási veszteség.



Elektronikusan kommutált motorok (BLDC)

- Kommutálás → Elektronikus fluxus váltás,
- A kefe nélküli (BLDC, brushless DC), vagy más néven elektronikusan kommutált (EC, Electronically Commutated) motor egy szinkron működésű DC motor.
- A vezérlést mikroprocesszoros elektronika valósítja meg, amely a forgórész forgásával szinkronban kapcsolja az egyes tekercsek áramát.
- Ennek megvalósításához ismerni kell a forgórész helyzetét, amit hagyományosan mágneses tér érzékelő (Hall) szenzorokkal végeznek.
- Főleg kis teljesítményű motorok esetén egyre elterjedtebb a Hall érzékelő nélküli motorok alkalmazása. Ebben az esetben az éppen nem vezérelt tekercsben indukált feszültséget felhasználva lehet meghatározni a tekercs és a forgórész relatív helyzetét



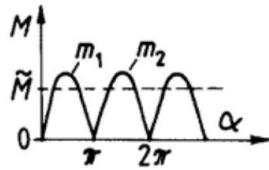
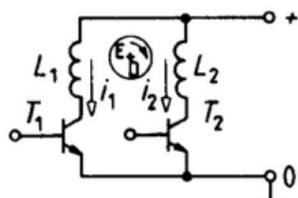
Forrás: <https://uav.ireyn.net>



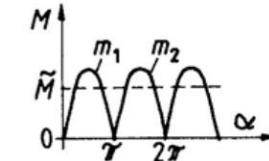
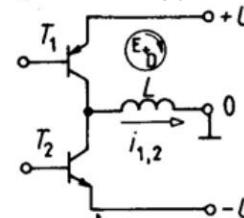
Elektronikusan kommutált motorok (BLDC)

Állórész tekercselés

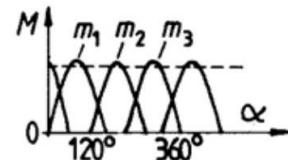
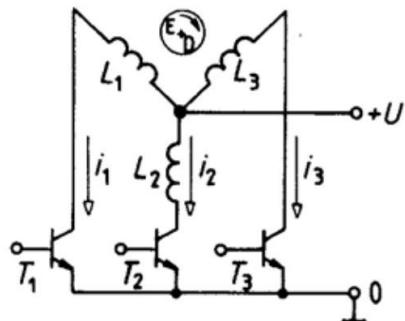
Kétfázisú, kétütemű



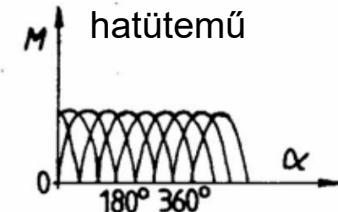
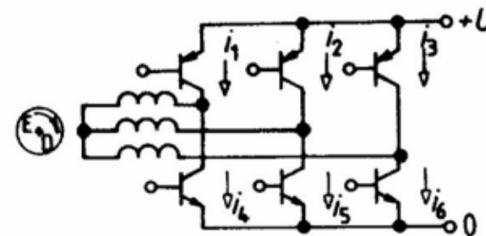
Egyfázisú, kétütemű



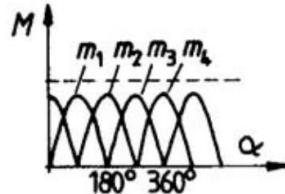
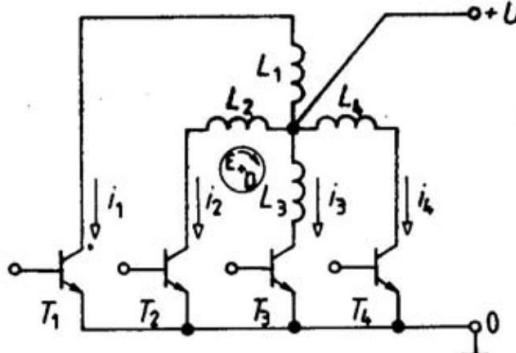
Háromfázisú, háromütemű



Háromfázisú, hatütemű

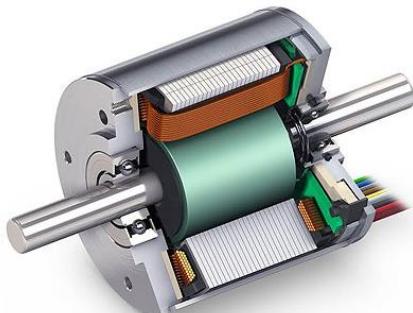


Négyfázisú, négyütemű

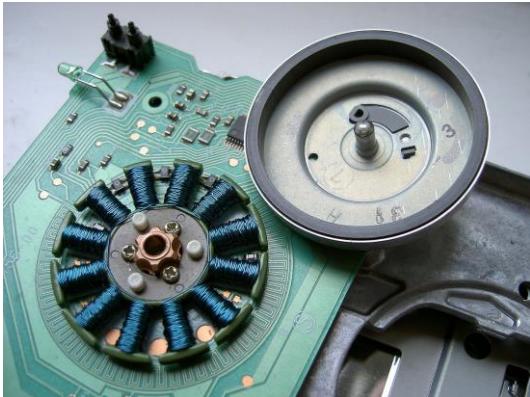


Elektronikusan kommutált motorok (BLDC)

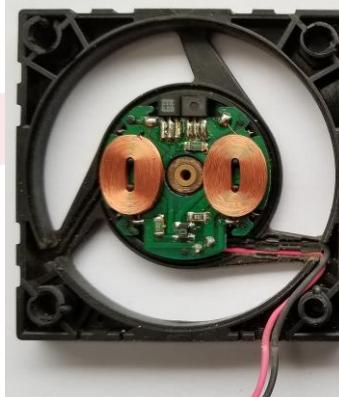
Konstrukció / alkalmazás



Belső forgórészű BLDC motor



Floppymeghajtó motorja.



Hűtő ventilátor motorja.



Külső forgórészű (drón) motor

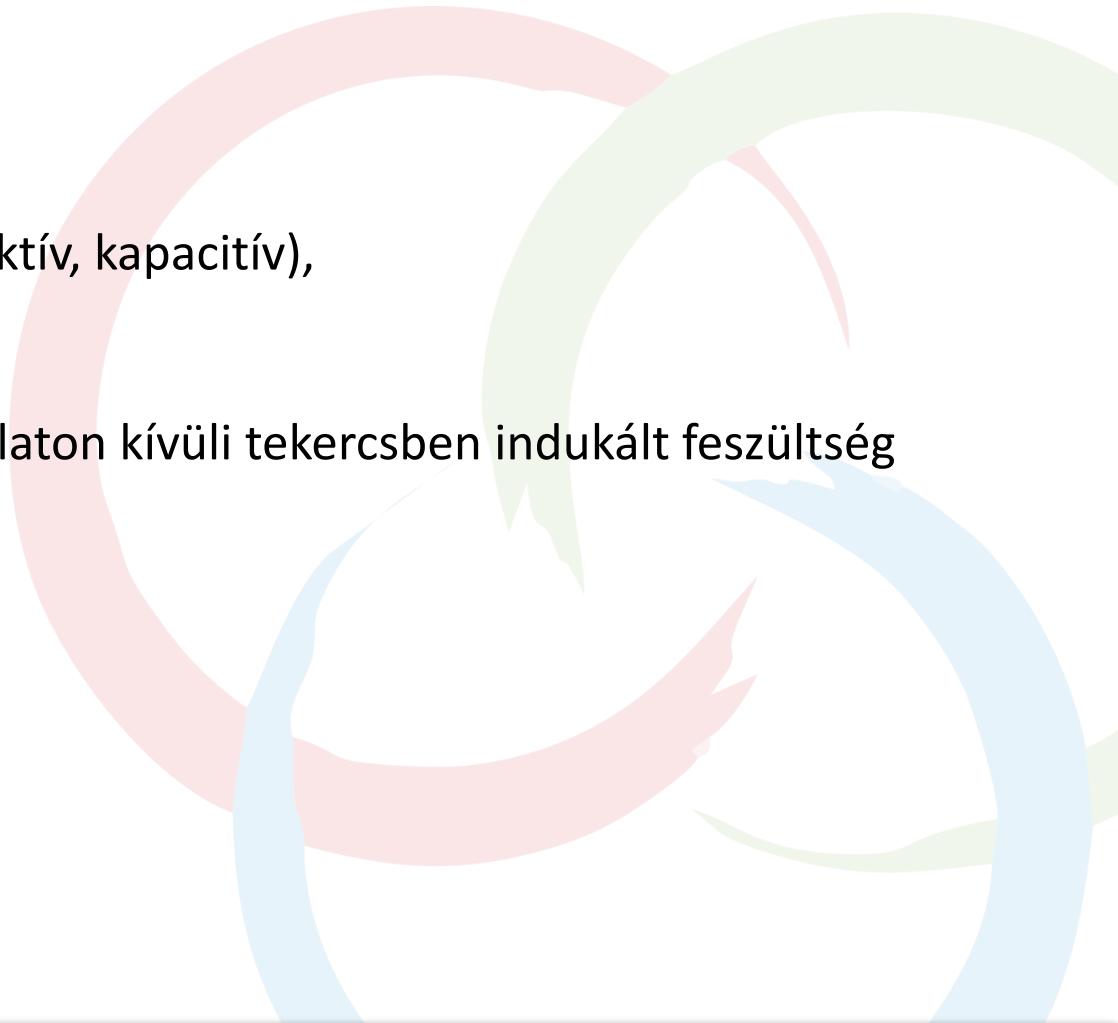


Elektromos bicikli motorja.

Elektronikusan kommutált motorok (BLDC)

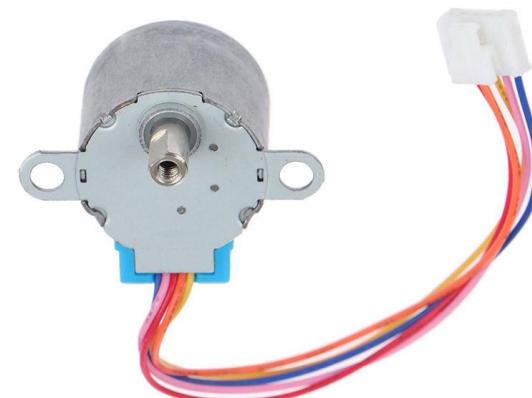
A forgórész helyzetének érzékelése

- Hall generátoros,
- Magnetorezisztív,
- Reed relés,
- Nagyfrekvenciás csatolású (induktív, kapacitív),
- Optoelektronikai,
- Érzékelő elem nélküli – a használaton kívüli tekercsben indukált feszültség mérésével.



Léptetőmotorok

- A léptetőmotor jellemzője, hogy visszacsatolás nélkül képes a kívánt pozícióba (szöghelyzetbe) állni és
- a pozíciót adott nyomatékkal megtartani,
- mindaddig, amíg nem terheli a névlegese érték feletti nyomaték.
- Ekkor ugyanis előfordulhat a lépéstevesztés.
- Vezérlése viszonylag egyszerű, de olyan vezérlő elektronikát igényel, ami képes a tekercsek áramát a megfelelő ütemben (szekvencia) biztosítani.
- A tekercsek a motor állórészén helyezkednek el.
- A tekercsek vezérlését általában külső vezérlő elektronika látja el.

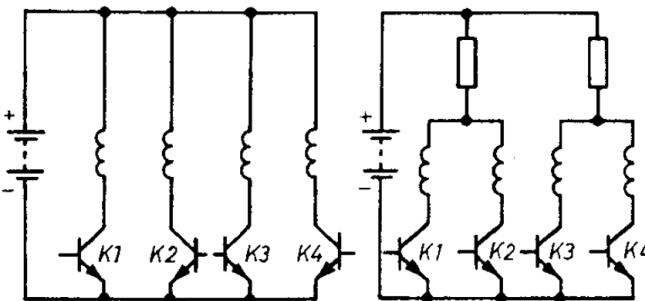


Léptetőmotorok vezérlése

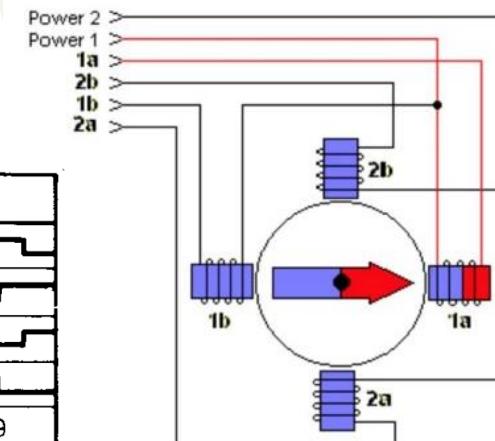
Vezérlés szempontjából lényeges különbséget mutat az **unipoláris** és a **bipoláris** kialakítás, ugyanis eltérő vezérlő elektronika tartozik hozzájuk.

Az unipoláris léptetőmotor

- tekercseinek középső része ki van vezetve, általában ezt kötik a +tápfeszültségre.
- A tekercsek másik kivezetéseit felváltva kapcsolják földre.
- Vezérlése egyszerűbb, 4 tranzisztorral (2/fázis) megoldható, általában Darlington kapcsolást használnak.
- A tekrcsek meg vannak osztva az egymással szemben lévő pólusok között.



Kapcsoló	Kapcsolási állapot	
K_1	Be	—
K_1	Ki	—
K_3	Be	—
K_3	Ki	—
K_2	Be	—
K_2	Ki	—
K_4	Be	—
K_4	Ki	—
Lépés	1	2
	3	4
	5	6
	7	8
	9	—



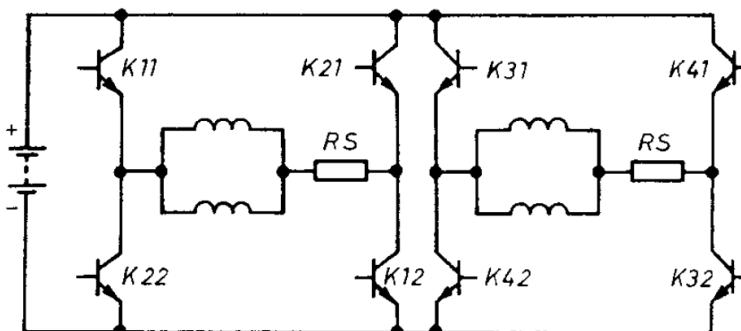
Forrás: <http://fabacademy.org/>



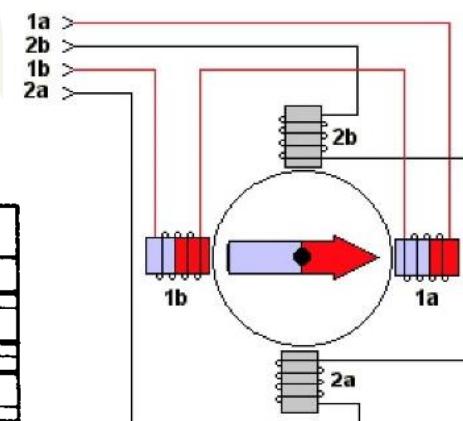
Léptetőmotorok vezérlése

A bipoláris motorok

- tekercsein változik a feszültség polaritása,
- Amihez fázisonként 1db. H-hidas vezérlő szükséges.
- Mivel minden lépés során ki van használva a tekercs teljes hossza, ezért jobb a teljesítmény/térfogat arány, mint az unipolárisnak.



Kapcsoló	Kapcsolási állapot
$K_{11} - K_{12}$	Be Ki
$K_{31} - K_{32}$	Be Ki
$K_{21} - K_{22}$	Be Ki
$K_{41} - K_{42}$	Be Ki
Lépés	1 2 3 4 5 6 7 8 9



Forrás: <http://fabacademy.org/>



Léptetőmotorok, Üzemmódot

Hullámhajtás

- Egyszerre csak egy tekercs gerjesztett,
- Vezérlési szekvencia: A, B, \bar{A}, \bar{B} .
- Hátránya a rossz tekercskehaználás (uni: 25%, Bip: 50%).

Egészlépéses üzemmód

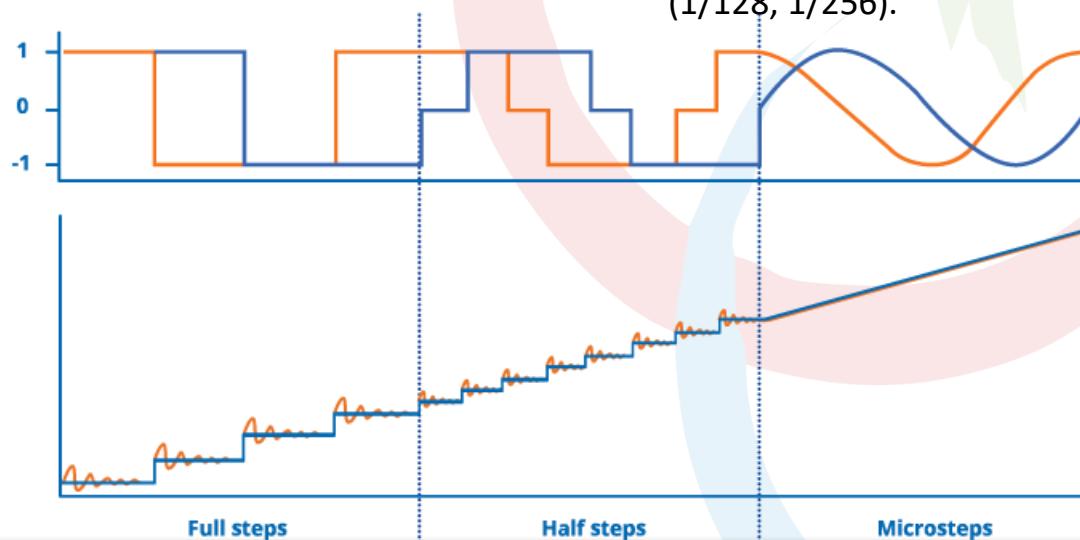
- Egyszerre két tekercs gerjesztett,
- Vezérlési szekvencia: $AB, \bar{A}\bar{B}, \bar{A}\bar{B}, A\bar{B}$.
- Ugyanaz a szögfordulás mint a hullámhajtásnál, de
- Közel kétszer akkora nyomatékkal.

Féllépéses üzemmód

- Egészlépés és hullámhajtás kombinációja,
- Vezérlési szekvencia: $A, AB, B, \bar{A}B, \bar{A}, \bar{A}\bar{B}, \bar{B}, A\bar{B}$.
- Lépésszög az egész lépés $\frac{1}{2}$ -e,
- A motor dinamikai tulajdonságai javulnak,

Mikrolépéses üzemmód

- A lépéseket még jobban aláosztjuk,
- A vezérlőáram erősségenek változásával érhető el.
- A motor dinamikai tulajdonságai javulnak,
- A nyomaték az aláosztás növelésével egyre csökken.
- Szokásos aláosztások: $1/4, 1/8, 1/16, 1/32, 1/64, (1/128, 1/256)$.

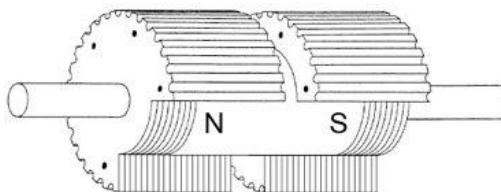


Forrás: Halmai – Halas: Aktuátorteknika előadásjegyzet;
<https://www.trinamic.com/technology/motor-control-technology/microstepping/>

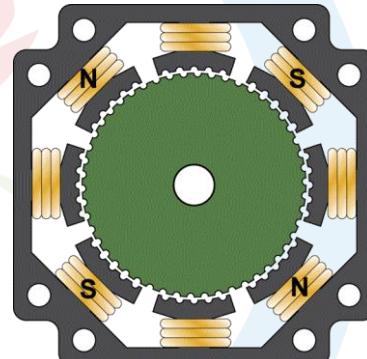
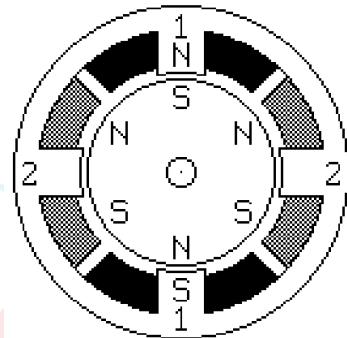
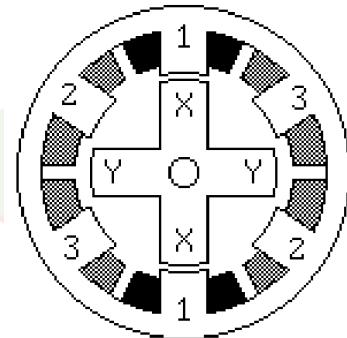


Léptetőmotorok konstrukciós kialakításai

- Változó reluktancia
 - Forgórész fogazott, lágymágneses anyag,
 - Az állórész és forgórész fogszáma különböző,
 - A forgórész vasmagja elforgatva változó légrést hoz létre. A mágneses erővonalak energiaminimumra, vagyis a mágneses ellenállás minimumára törekszenek. Így beforgatva a forgórész fogát a gerjesztő tekercs legközelebbi fogainak irányába.
 - Nincs tartónyomaték gerjesztetlen állapotban.
 - Rossz méret / nyomaték arány.
- Állandómágneses
 - A forgórész radiálisan mágnesezett állandómágnes.
 - A forgórész állandómágnesének mágneses tere a gerjesztő tekercs terének irányába fordul.
 - Gerjesztetlen állapotban is van tartónyomaték.
 - Nagyobb statikus nyomaték, kisebb határfrekvencia.
- Hibrid kialakítás
 - Állandó mágneses forgórész reluktancia hatást elősegítő alakú vas kalitkába van foglalva.
 - A forgórész fogazott kialakítása és az állórész többfázisú tekercselése teszi lehetővé a kisszögű léptetést (pl. $1,8^\circ$).



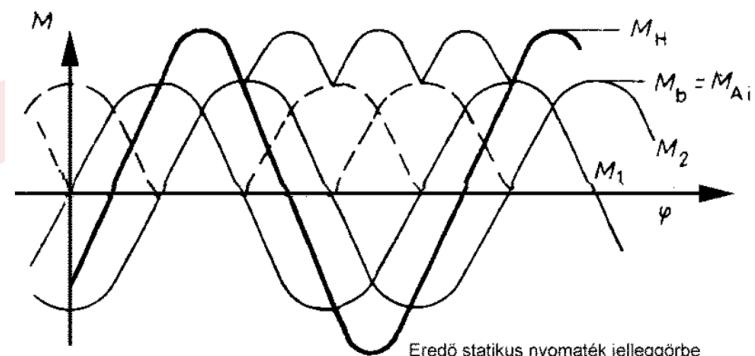
Hybrid Stepper Motor Rotor



Léptetőmotorok karakterisztikája

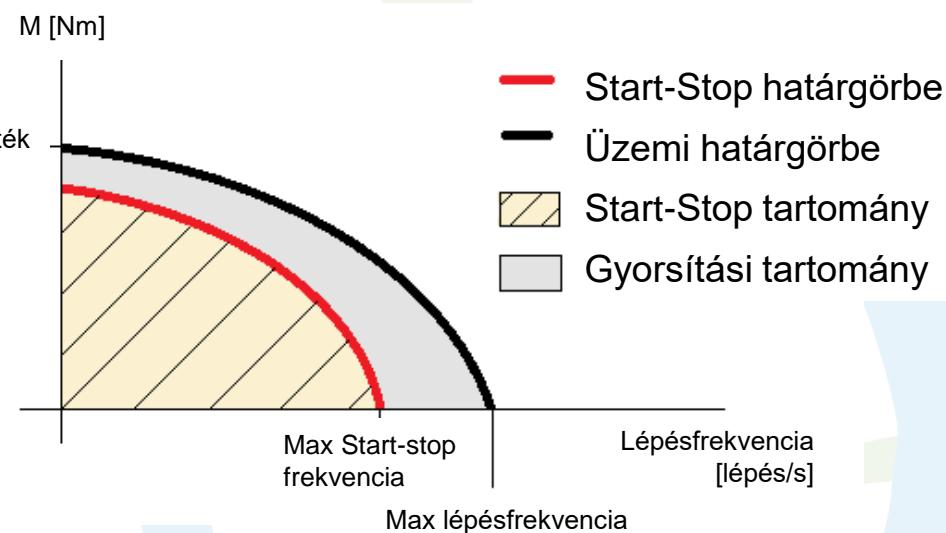
Statikus jellegörbe

- Nyomaték – lépés, vagy elfordulás összefüggés.
- Leolvasható a súrlódás hatása beállási pontosságra.
- Két tekercs gerjesztése: fél lépés eltolás, nyomaték $\sqrt{2}$ -szerese az egy tekercs gerjesztésének.



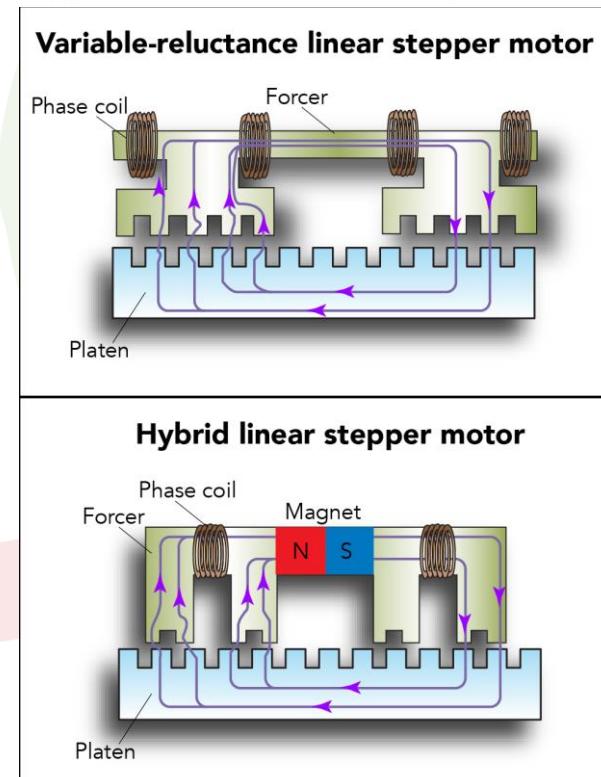
Dinamikus jellegörbe

- Megmutatja a motor nyomaték-sebesség (lépésfrekvencia) viszonyait.
- A tartónyomaték a motor maximális nyomatéka, amivel léptetés közben nem terhelhető.
- Ha motort nagyobb frekvenciával indítjuk, mint az indítási, v. start-stop határfrekvenciája, akkor lépést téveszt és leáll.
- A gyorsítási tartományba csak a Start-stop tartományból kerülhetünk.



Lineáris motorok, Lineáris léptetőmotorok

- Lineáris léptetőmotorok kialakításuk szerint reluktancia és hibrid változatban készülnek.
- A mozgó rész egy állandó mágnesből és két elektromágnesből áll.
- Gerjesztetlen állapotban az állandómágnes-kör az elektromágnesek szárain, a légrésen és az állórészen záródik.
- Az elektromágnes két tekercse gerjesztéskor az állandómágnes fluxusát az egyik póluson erősíti, a másikon kioltja.
- Oldalirányú erő csak a gerjesztett tekercsnél ébred, így a mozgó rész fél lépéssnyit lép.
- A teljesítmény a légrés nagyságától függ, annál nagyobb minél kisebb a légrés. Légcsapággyal kombinálva 15-20 µm nagyságú.



Lineáris motorok

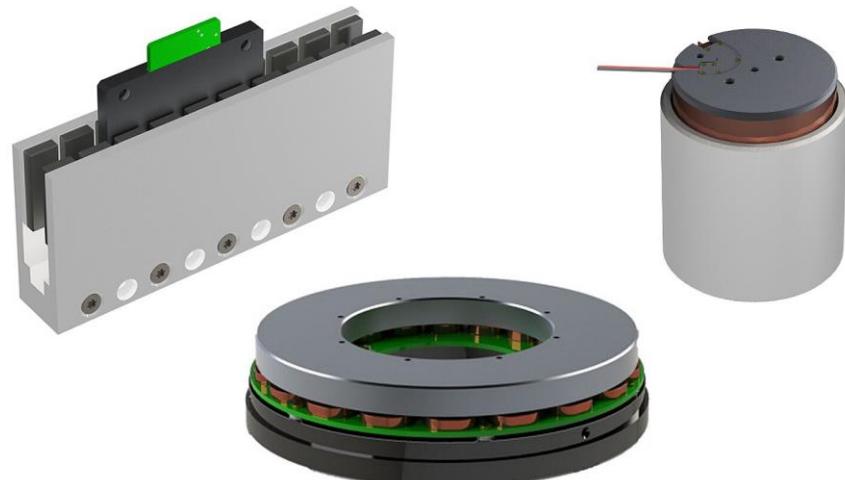
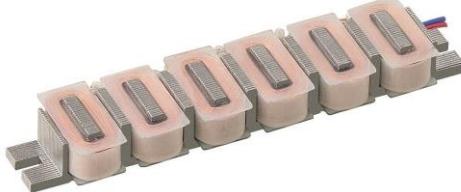
Lineáris elektromágneses motorok, direct meghajtások

Lineáris elektromágneses motorok

Az elektronikusan kommutált DC (BLDC) motorok kiterített változata.

A sín szerű állórész váltott polaritású állandómágnesek sorát tartalmazza,

A mozgó rész tartalmazza az elektromágneses tekercset, menynek gerjesztésével a sín és a mozgó rész közötti oldalirányú erő ébred.



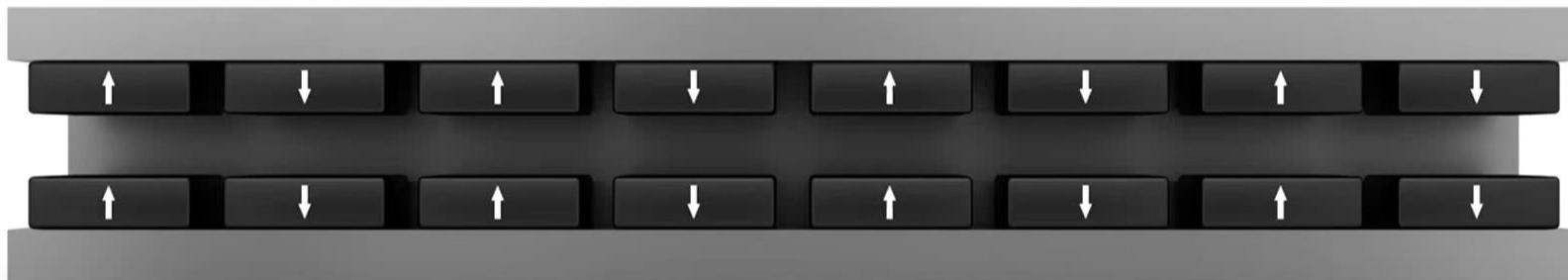
Lineáris motorok

Lineáris elektromágneses motorok, direkt meghajtások

 PI Ironless Linear Motors



Link másolása



TOVÁBBI VIDEÓK

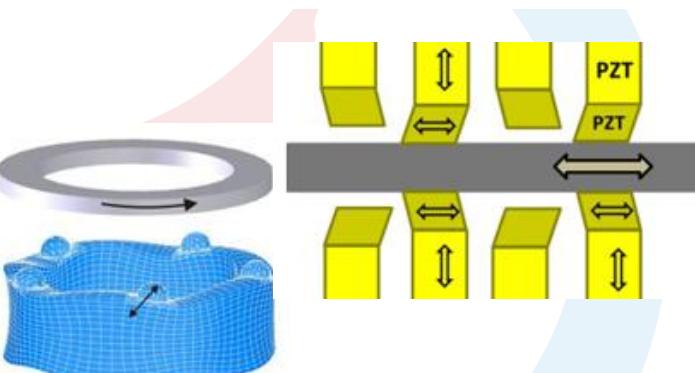
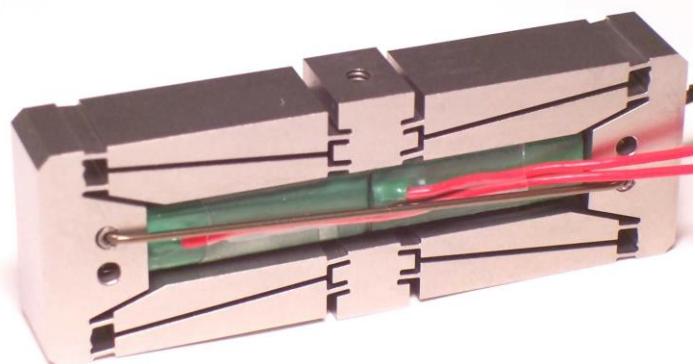
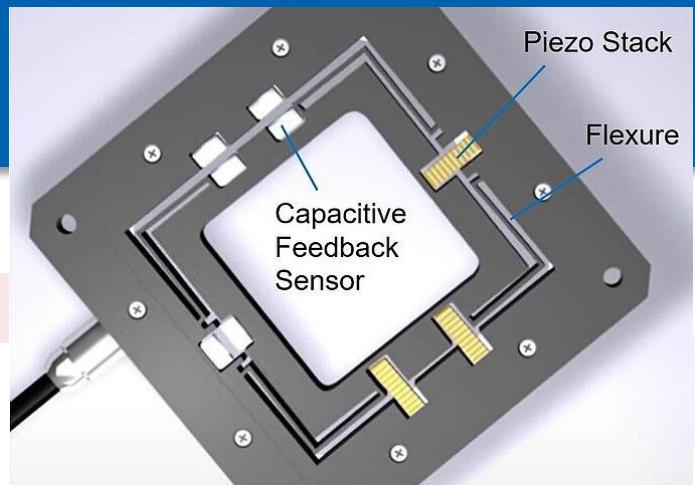
▶ 🔍 0:00 / 0:33

 YouTube 



Lineáris motorok, Piezoelektromos aktuátorok

- Elektrostrikciós
 - A piezokerámia feszültség hatására megváltoztatja alakját,
- Jellemzői:
 - nm-es feloldású pozicionálásra,
 - jellemzően $\sim 1 \mu\text{m}$ -es tartomány. (kis alakváltozás 0,1%);
 - Nagy merevség, és nagy kifejtett erő, → mechanikai áttételekkel növelhető az elmozdulás,
 - Jó frekvenciakövetés, gyors működés,
 - Alacsony energia disszipáció, magas hatásfok,
 - Hiszterézis,
- Alkalmazás: autofókusz, precíziós pásztázó mikroszkópia, optikai elemek mozgatása.
- Mozgatás típusa:
 - Analóg - a feszültséggel vezérelt nagyságú deformáció. Pl.: rugalmas vezetékes finompozicionáló,
 - Diszkrét - több lépést végző mozgatás, pl. piezo-motorok, lineáris aktuátorok.



Lineáris motorok, piezo aktuátorok



Precision Motion Control, Positioning, Drive and Automation Technologies - by PI www.pi.ws



TOVÁBBI VIDEÓK

▶ 🔍 0:00 / 9:57 • Fejezetek

≡⚙️YouTube ⓘ



Forrás: PI, <https://www.pi-usa.us>; <https://youtu.be/BJbYzLJ7kWA>;

30



Lineáris motorok

Optikai piezoelektromos (fotostrikciós)

Emlékezőfémek (Shape Memory Alloys)

Elektrosztatikus mikromotorok

Vezérelhető folyadékok (MR, ER)

Pneumatikus, és hidraulikus finommechanikai aktuátorok,



Ellenőrző kérdések

Mutassa be a DC (törpe) motor felépítését, működését és jellemző karakterisztikáját!

Mutassa be a kefe nélküli egyenáramú (BLDC) motor felépítését és működését!

Mutassa be a léptetőmotor felépítését, működését, típusait és vezérlésüket!

Mutassa be a léptetőmotor karakteristikáját, üzemi tartományát és dinamikus jelleggörbékét (időtartományban)!

Mutassa be az elektromágneses lineáris motor felépítését és működését!

Mutasson példát a piezoelektronos kristály (elektrostriktív) aktuátorként való alkalmazására! Milyen elv teszi alkalmassá a működésre, hogyan működik?

Hogyan működnek a magnetostríkciós aktuátorok.



KÖSZÖNÖM A FIGYELMET!

BOJTOS Attila
BME - MOGI Tanszék
bojtos@mogi.bme.hu