

Bevezetés az anyagtudományba

XII. előadás

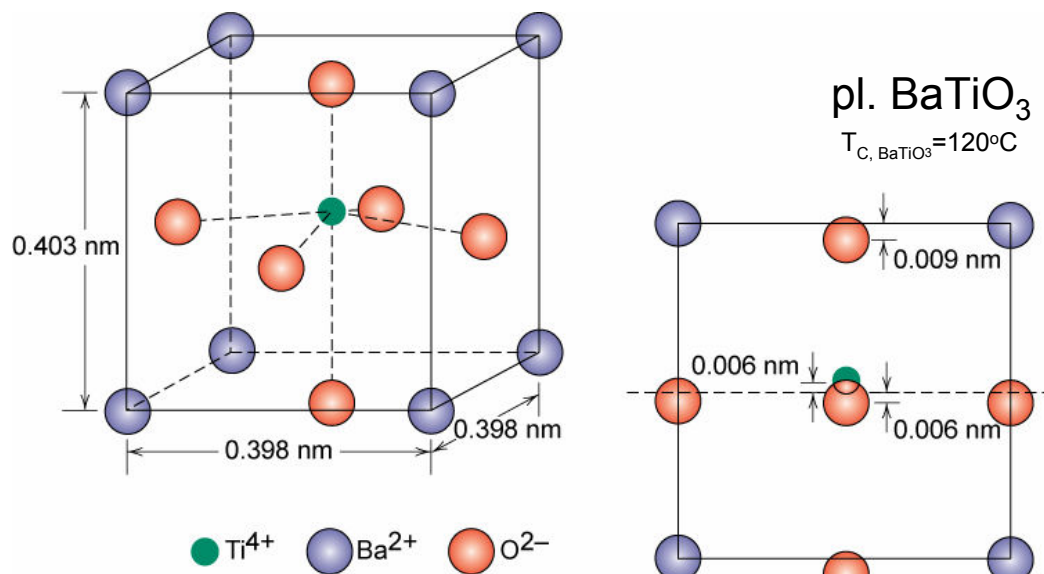
2010. április 29.

Ferroelektromos kerámiák

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

A ferroelektromos kerámiák a Curie hőmérséklet alatt polárisak.

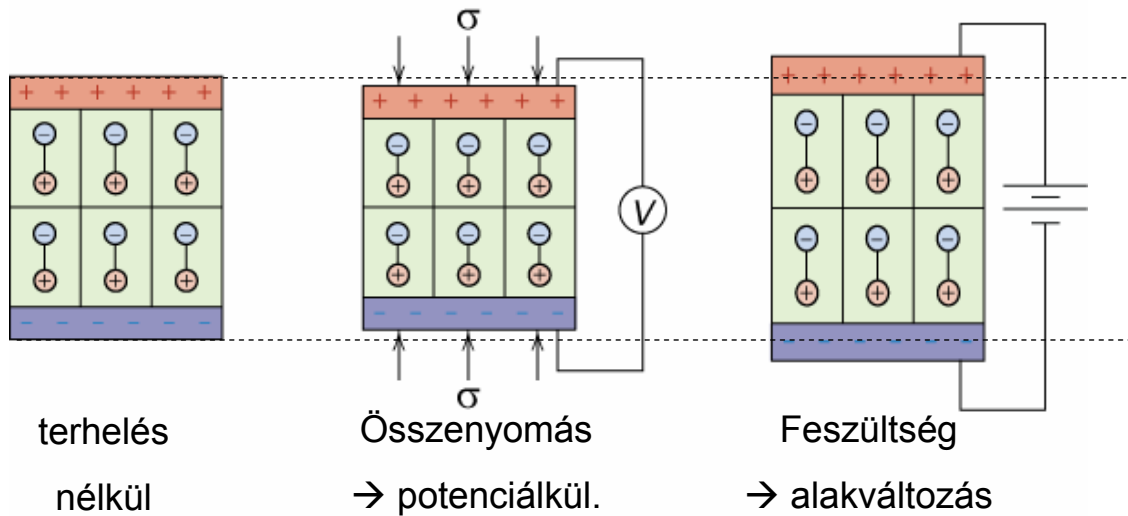
- Ha erős elektromos térben hűtjük T_c alá nagy dipól-momentumú anyagot kapunk.



extrém magas ϵ_r

Piezelektromosság

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



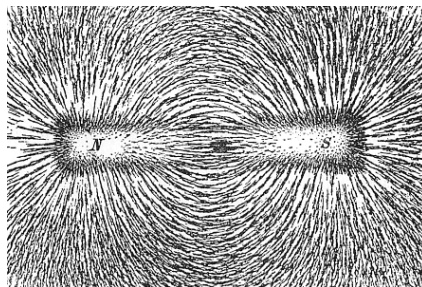
pl. BaTiO_3 , PbTiO_3 , PbZrO_3 ,
 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, kvarc

Alk.: szonár, pick-up, mikrofon, ultrahangos képal-
kotás, környezeti rezgések hasznosítása

XII/3

Mágneses viselkedés

Az *elektromágneses kölcsönhatás egyik formája*. Az a jelenség, amely testek egymás közötti vonzó és taszító hatásában nyilvánul meg.



Mágneses tulajdonságok:

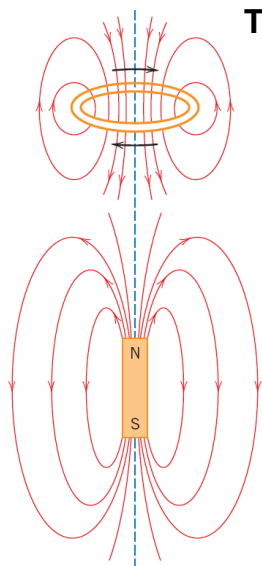
mi az anyag *válasza*, ha mágneses térbe helyezzük

A mágnesség és a mágneses anyagok alkalmazása széleskörű: pl. generátorok, transzformátorok, elektromos motorok, távközlés (rádió, TV, telefon), adattárolás, számítástechnika.

XII/4

Alapok

Tapasztalatok:



Mágneses anyagok (mágnesek) egymásra erőt, illetve nyomatékot fejtenek ki.

Mozgó töltések (áramok) mozgó töltésekre erőt, illetve nyomatékot fejtenek ki.

Az áramok mágnesekre és viszont erőt, illetve nyomatékot fejtenek ki.

Mágneses kölcsönhatás

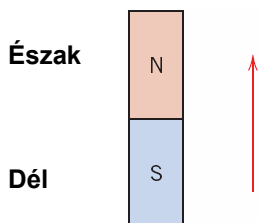
Ami ezt a hatást közvetíti:

Mágneses tér (mágneses mező)

Jellemzés:

Szemléletes kép: erővonalak, indukcióvonalak

Számszerűen: (mágneses) térerősség vektor, \vec{H}
indukció vektor, \vec{B}

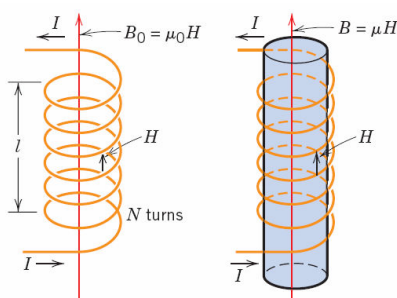


Egy mágnes: dipólus, amelyet a nyomatékával (dipólmomentum) jellemzünk. Ez is vektor!

Analog az elektromos dipóllal!

XII/5

Szolenoid



jobbcsavar-szabály

Ha a mágneses teret egy olyan N menetszámú, l hosszúságú, sűrűn csévélt, egyenes tekercssel hozzuk létre, amelynek keresztmetszete A és amelyben folyó áram erőssége I , akkor abban közel homogén mágneses tér alakul ki, melyek erőssége:

$$H = \frac{NI}{l}$$

menetszám N (green box), áram ($[I]=A$) I (yellow box), hosszúság ($[l]=m$) l (grey box), térerősség ($[H]=A/m$) H (red box)

XII/6

H és B

A H vektor nagyságát és irányát a Biot-Savart törvény adja meg (ami szigorúan a mágneses indukcióvektorra vonatkozik). Praktikusan: "jobbcsavar-szabály".

Ha a mágneses teret nem árammal, hanem mágnessel hozzuk létre, a térerősség vektor irányát egy adott pontban az ott elhelyezett mágnes északi pólusa felé mutató iránnyal (tehát a mágneses dipólmomentum irányával) definiáljuk. \Rightarrow Az erővonalak a mágnes északi pólusától a déli felé mutatnak.

A térerősség definíciójában nem szerepel anyagi állandó.

A mágneses indukcióvektor, B mutatja meg azt, hogy a H térerősség hatására milyen (mágneses) tér épül fel az *anyagban*. A térerősséget és az indukciót a μ permeabilitás kapcsolja össze :

$$B[\text{N/Am}] = \mu \text{ [N/A}^2\text{]} H [\text{A/m}]$$

permeabilitás

Dimenziók: $1\text{N/Am} = 1\text{ tesla (1 T)} = 1\text{ Wb/m}^2$. $\Rightarrow 1\text{ N/A}^2 = 1\text{ Wb/Am} = \text{H/m}$.

(weber: $\text{Wb} = \text{Vs}$, henry: $\text{H} = \text{Wb/A}$)

XII/7

A mágneses indukcióvektor egyéb definíciói

1. Homogén mágneses térben lévő egyenes áramvezetőre ható F erő nagysága arányos a vezetőben folyó áram I erősségével, a vezető mágneses térben lévő l hosszával és a mágneses indukció B nagyságával.

$$F = k I l B \sin \Theta.$$

A k arányossági tényezőt egynek választva a maximális erő:

$$F_{\max} = I l B$$

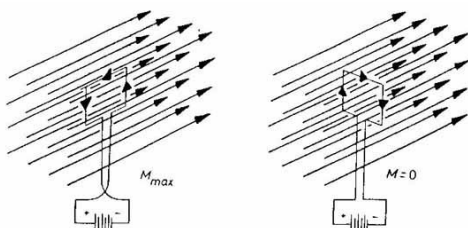
amiből az indukcióvektor *nagysága*:

$$B = F_{\max} / I l. [\text{N/Am}],$$

iránya pedig az, amelyikben az egyenes áramvezetőre ható erő zérus.

2. Mágneses térben a magnetométerre (rúd-mágnes vagy köráram) forgatónyomaték

hat. Egy adott pontban mérhető M forgatónyomaték egyenesen arányos a magnetométer áramának I erősségével, a vezeték által körülzárt A területtel, de független a vezetőkeret alakjától



$$M = B I A \sin \alpha$$

Figyelem, az M -et később más mennyiség jelölésére fogjuk használni!

XII/8

$$B = \mu H$$

Vákuumban $B_0 = \mu_0 H$, ahol $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ ($1,257 \cdot 10^{-6}$) H/m a vákuum permeabilitása.

$$\mu_r = \mu / \mu_0$$

ahol μ_r a relatív permeabilitás az anyag mágnesezhetőségének, vagy mágnesezettségének mértéke (a H mező milyen mértékben/mennyire könnyen tudja az anyagot mágnesezni).

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M$$

vákuum + anyag

A mágnesezettség, M azt jellemzi, hogy milyen mértékben járul hozzá az anyag a külső térhez a külső tér által orientált mágneses dipóljainak tere révén.

Kísérletileg: nem nagyon nagy térerősségek esetén egy anyag mágnesezettsége arányos a térerősséggel:

$$M = \chi_m H$$

$$\chi_m = \mu_r - 1$$

Az arányossági tényező a mágneses szuszceptibilitás.

Általában térfogategységre vonatkoztatják.

XII/9

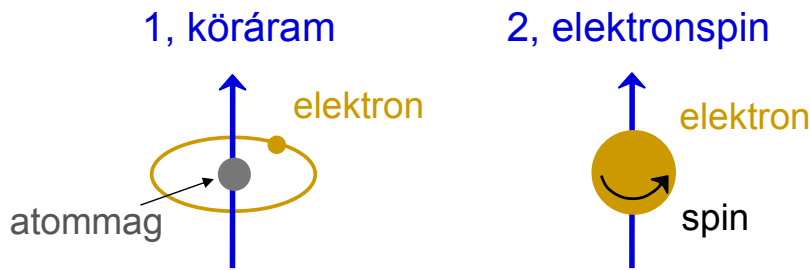
Analógia az elektromos és mágneses mennyiségek között

Mágneses		Elektromos
H <i>mágneses térerősség</i>		E <i>elektromos térerősség</i>
B <i>mágneses indukció</i>		D <i>elektromos eltolódás</i>
M <i>mágnesezettség</i>		P <i>polarizáció</i>
μ <i>permeabilitás</i>		ϵ <i>permittivitás</i>

XII/10

A mágneses tulajdonságok eredete

A makroszkópikus mágneses viselkedés az egyes elektronok mágneses momentumának következménye, melynek két forrása szemléletesen:



A köráram momentuma: $m_l \cdot \mu_B$
 ahol m_l az elektron mágneses kvantumszáma

A spin-momentum: $\pm \mu_B = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2$. Ez a Bohr magneton.
 Az előjel a spinállástól függ.

Az atom (molekula) mágneses momentuma az egyes elektronok momentumainak összege.
 A betöltött elektronhéjak nem adnak hozzájárulást. Az ilyen anyagok (pl. a nemesgázok, egyes ionok) permanensen nem mágnesezhetők.

Az anyagok lehetséges válasza szerint: **dia-**, **para-** és **ferromágnesség** (melyen belül még lehet antiferro- és ferrimágnesség).

XII/11

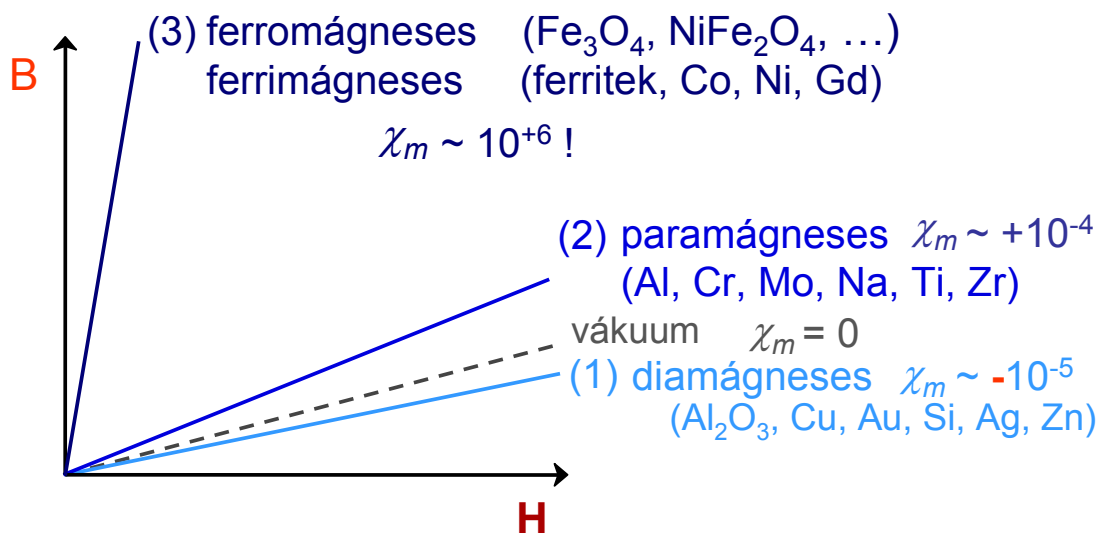
	Mágneses tér nélkül (H=0)	H mágneses térben	
<p>(1) diamágneses</p> <p>gyenge effektus, csak amíg a külső mező fennáll</p>	<p>nincs</p>	<p>ellenkező</p>	<p>Nem mágneses anyagok</p>
<p>(2) paramágneses</p> <p>az egyes atomok permanens dipól momentummal rendelkeznek (külső tér nélkül is)</p>	<p>rendezetlen</p>	<p>rendezett</p>	
<p>(3) ferromágneses ferrimágneses</p> <p>az egyes atomok nagy permanens dipól momentummal rendelkeznek (külső tér nélkül is) jórészt spinből származik + csatolás</p>	<p>rendezett</p>	<p>rendezett</p>	<p>Állandó mágnesek</p>

XII/12

A(z anyagra jellemző) szuszceptibilitás

$$B = (1 + \chi_m) \mu_0 H$$

a vákuum permeabilitása

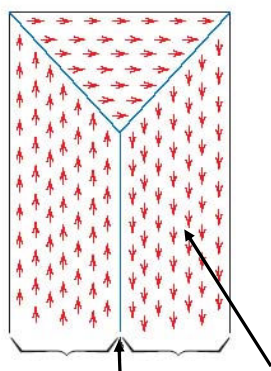


XII/13

Ferro- és ferrimágneses anyagok 1/6

Mivel $M = \chi_m H$ és χ_m nagy (tip. 10^6 nagyságrendű) $M \gg H$,

a $B = \mu_0 H + \mu_0 M$ összefüggés $B \approx \mu_0 M$ -re egyszerűsödik.



doménfal

Egy domén. A nyilak egy-egy atom dipólmomentumát reprezentálják.

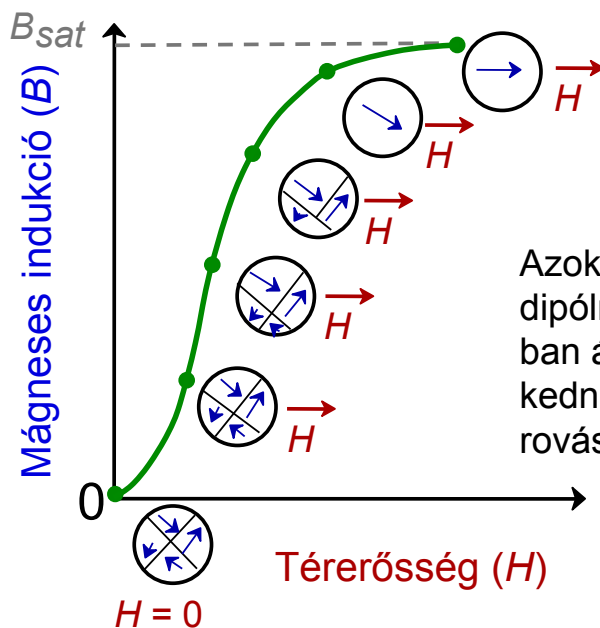
Az anyagban mágneses tér nélkül is olyan térrészek alakulnak ki, amelyekben az atomok mágneses momentumai rendezettek. A kristály ezen (viszonylag nagy) térfogatelemeit (mágneses) doméneknek nevezzük.

A domének tipikus mérete 10nm-es nagyságrendbe esik.

XII/14

Ferro- és ferrimágneses anyagok 2/6

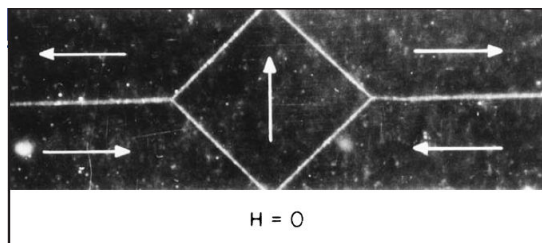
A H térerősség növekedésével a mágneses (dipól)momentumok beállnak a tér irányába.



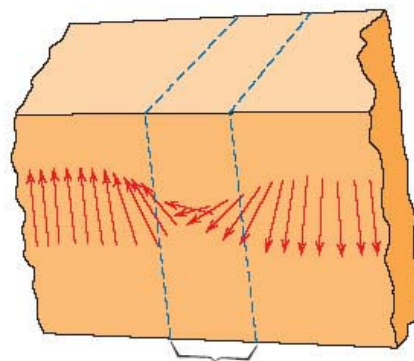
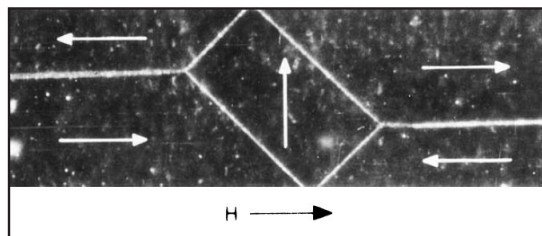
Azok a domének, amelyekben a dipólmomentumok a tér irányában állnak, fokozatosan növekednek a "rossz irányban állók" rovására.

XII/15

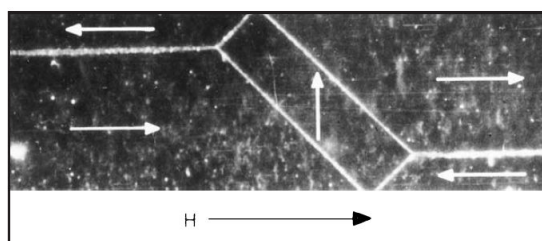
Ferro- és ferrimágneses anyagok 3/6



A domének méretváltozása mágneses tér hatására vas egykristályban.
(Optikai mikroszkópos felvétel.)



A dipólmomentumok irányának változása doménfalnál.



XII/16

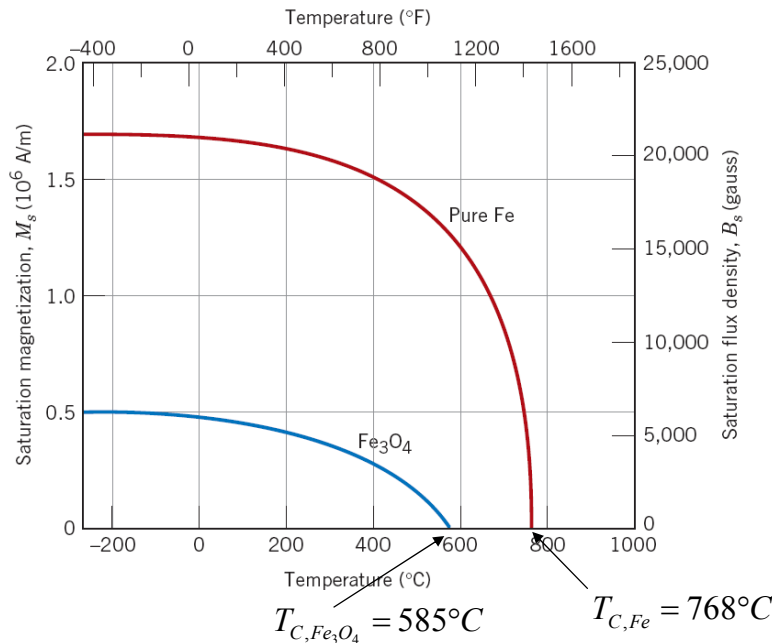
Ferro- és ferrimágneses anyagok 4/6

Telítési mágneszettség: minden dipól egy irányban áll.

értéke: egy atom dipólmomentuma [Am^2/atom] · az atomok száma [atom/m^3].

Ilyenkor

- minden doménre igaz, hogy bennük a mágneszettség elérte a telítési értéket.
- makroszkópicusan: minden domén beállt a külső tér irányába.

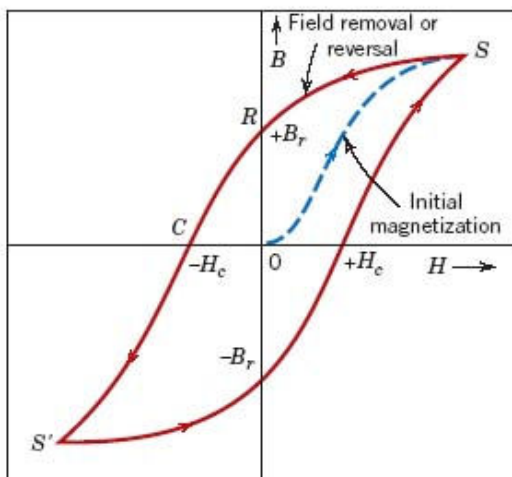


Mindez a T_C Curie hőmérséklet alatt igaz. T_C felett az anyag paramágnesessé válik.

Mekkora a mágneszettség és az indukció telítési értéke a $8.9\text{kg}/\text{m}^3$ sűrűségű nikkal esetében? (Minden Ni atom 0,6 Bohr magneton momentummal bír.)

XII/17

Ferro- és ferrimágneses anyagok 5/6



$$B = \mu H$$

$$\mu = \mu(H)$$

H nő \Rightarrow B a telítési értékig nő.

H csökken \Rightarrow B is, de ... hiszterézis.

Az R pontban: maradék (remanens) mágneszettség/indukció (remanencia).

A tér irányát meg kell fordítani ahhoz, hogy B nullára csökkenjen.

A $B=0$ -hoz tartozó térerősség, a C pontban, $-H_c$ térerőnél (koercitív erő) következik be.

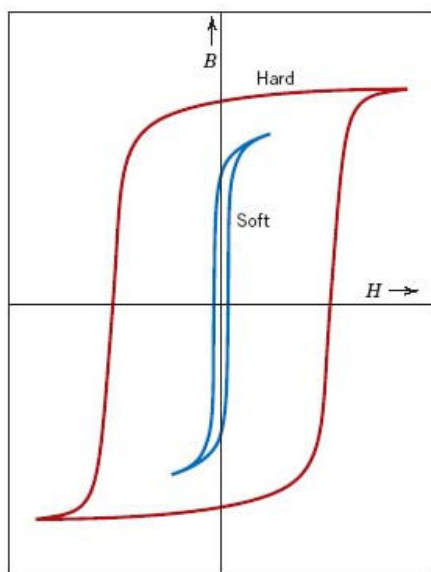
Ha nem megyünk el a telítésig, másik hiszterézis-hurokra kerülünk.

Lemágnesezés...

XII/18

Ferro- és ferrimágneses anyagok 6/6

Mit jelent a hiszterézis gyakorlati oldalról?



Az átmágnesezéshez munkát kell végezni.
A hiszterézisveszteség arányos a területtel.

Lágy/kemény mágneses anyagok:
kevés/sok energia

Lágy: nagy kezdeti permeabilitás, kis koercitív erő: vasmag – transzformátor

Kemény: kis kezdeti permeabilitás, nagy telítési és remanens mágnesezettség, nagy koercitív erő: permanens mágnesek

Anyagtudomány: a telítési érték az anyag összetételétől függ, míg a koercitív erőt a szerkezet befolyásolja (pl. a hibák gátolják a doménfalak mozgását).

XII/19

Néhány lágy mágneses anyag tulajdonsága

Material	Composition (wt %)	Initial Relative Permeability μ_i	Saturation Flux Density B_s [tesla (gauss)]	Hysteresis Loss/Cycle [J/m^3 (erg/cm ³)]	Resistivity ρ ($\Omega\cdot m$)
Commercial iron ingot	99.95Fe	150	2.14 (21,400)	270 (2700)	1.0×10^{-7}
Silicon-iron (oriented)	97Fe, 3Si	1400	2.01 (20,100)	40 (400)	4.7×10^{-7}
45 Permalloy	55Fe, 45Ni	2500	1.60 (16,000)	120 (1200)	4.5×10^{-7}
Supermalloy	79Ni, 15Fe, 5Mo, 0.5Mn	75,000	0.80 (8000)	—	6.0×10^{-7}
Ferroxcube A	48MnFe ₂ O ₄ , 52ZnFe ₂ O ₄	1400	0.33 (3300)	~40 (~400)	2000
Ferroxcube B	36NiFe ₂ O ₄ , 64ZnFe ₂ O ₄	650	0.36 (3600)	~35 (~350)	10^7

Néhány permanens mágnes tulajdonsága

Material	Composition (wt %)	Remanence B_r [tesla (gauss)]	Coercivity H_c [amp-turn/m (Oe)]	$(BH)_{max}$ [kJ/m^3 (MGOe)]	Curie Temperature T_c [$^{\circ}C$ ($^{\circ}F$)]	Resistivity ρ ($\Omega\cdot m$)
Tungsten steel	92.8 Fe, 6 W, 0.5 Cr, 0.7 C	0.95 (9500)	5900 (74)	2.6 (0.33)	760 (1400)	3.0×10^{-7}
Cunife	20 Fe, 20 Ni, 60 Cu	0.54 (5400)	44,000 (550)	12 (1.5)	410 (770)	1.8×10^{-7}
Sintered alnico 8	34 Fe, 7 Al, 15 Ni, 35 Co, 4 Cu, 5 Ti	0.76 (7600)	125,000 (1550)	36 (4.5)	860 (1580)	—
Sintered ferrite 3	BaO-6Fe ₂ O ₃	0.32 (3200)	240,000 (3000)	20 (2.5)	450 (840)	$\sim 10^4$
Cobalt rare earth 1	SmCo ₅	0.92 (9200)	720,000 (9,000)	170 (21)	725 (1340)	5.0×10^{-7}
Sintered neodymium-iron-boron	Nd ₂ Fe ₁₄ B	1.16 (11,600)	848,000 (10,600)	255 (32)	310 (590)	1.6×10^{-6}

XII/20

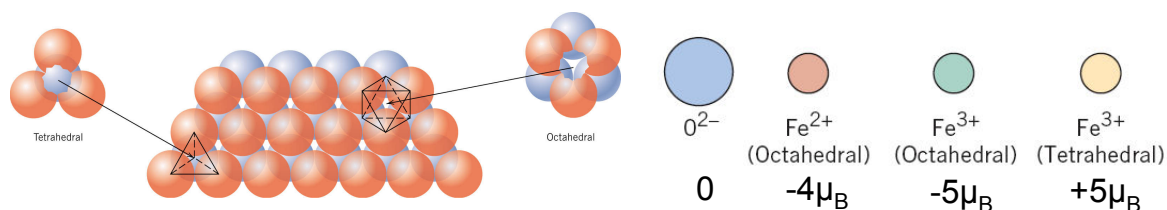
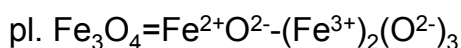
Ferrimágneses anyagok

Bizonyos kerámiák esetében megfigyelhető permanens mágnesezettség. Makroszkópikus szinten hasonlóan viselkednek mint a ferromágneses anyagok, a különbség köztük a mágneses momentumban „forrásában” rejlik.

Ferrit: mágneses viselkedésű kerámia (nem keverendő az α -vas hasonló nevű módosulatával!)

Típusai:

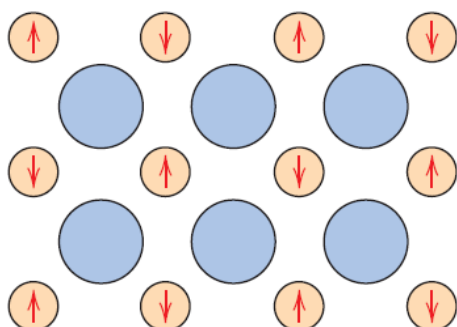
- Köbös ferritek (MFe_2O_4)
- Hexagonális ferritek ($AB_{12}O_{19}$)
- Gránátok ($M_3Fe_5O_{12}$)



Telítési mágnesezettség értéke nem annyira nagy, mint a ferromágneses anyagoké, ugyanakkor elektromos viselkedésük szerint a ferritek szigetelők (-> pl. nagy frekvenciás transzformátorok). XII/21

Antiferromágneses anyagok

pl. MnO



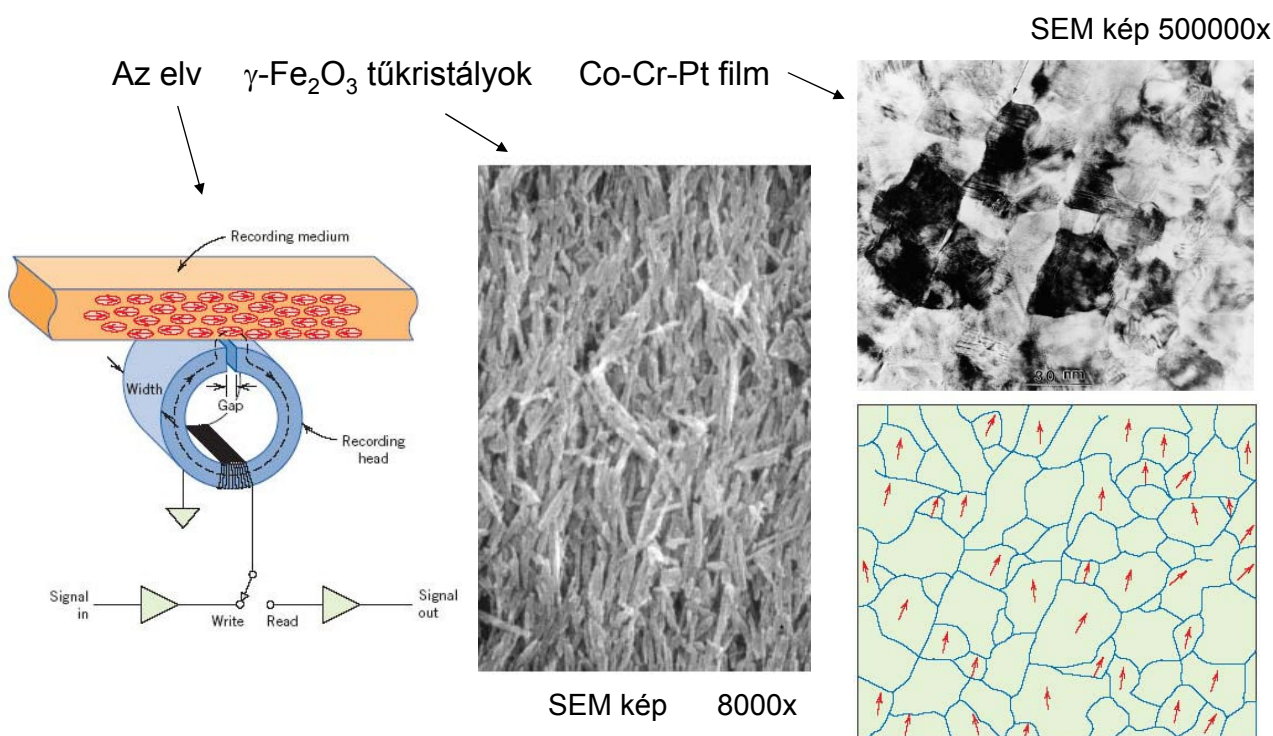
Az O^{2-} ionok esetében a spin és pályamomentumok kioltják egymást (nemesgázhéj szerkezet).

Az anyag kristályszerkezete olyan, hogy a szomszédos rétegek Mn^{2+} ionjainak spin momentumai – a csatolás révén – épp ellenkező irányba állnak be.

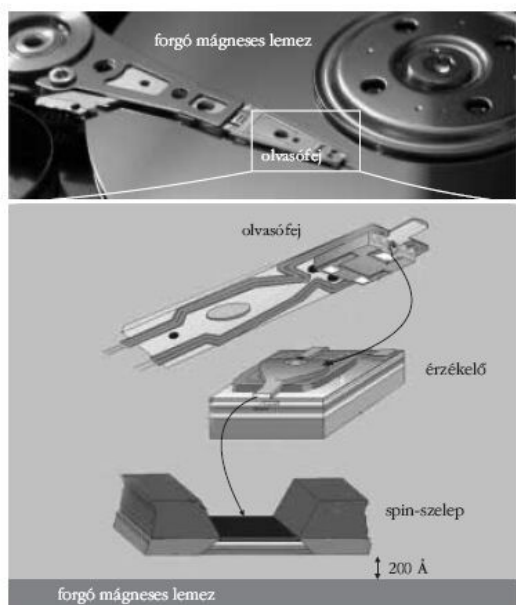
Értelemszerűen az anyag eredő mágneses momentuma zérus.

Van csatolás, mint a ferromágneses anyagokban, de még sincs eredő mágneses momentum.

Mágneses adattárolás



XII/23



2. ábra. A merevlemez olvasófejének szerkezete. Az érzékelő „spinszelep” az alatta 300 km/óra sebességgel haladó felület felett 200 Å távolságra helyezkedik el.

Ma már 0,1nm!

A mágneses merevlemez (winchester) a DVD-hez hasonlóan egy forgó lemez, a kiolvasás sebessége viszont közel százszor nagyobb. A merevlemezen az adatok tárolása mágneses jelek formájában történik. Azok a μm alatti méretű tartományok (tipikusan néhány száz domén), melyek mágnesezettségi iránya a 0 és 1 biteknek felel meg, szintén egy spirál mentén helyezkednek el. Az adatok írása (törlése és újrainírása) a forgó lemezhez közel helyezett mikrométeres tekercs segítségével történik, az áram iránya határozza meg a lemez anyagának felmágnesezését. A mágneses lemezen tárolható hatalmas adattömeg gyors kiolvasását az olvasófejben alkalmazott "spinszelep" biztosítja, ez teszi a 2. ábrán szétszedett állapotban mutatott merevlemez olvasót (HDD) a jelenleg létező legnagyobb teljesítményű adattároló eszközzé.

Forrás: Mihály György: Fizikai Szemle 2006/5.

0.5 Gbit/s adatátviteli sebesség

A lemez nem mágneses anyagból készül (ált. Al ötvözet, vagy üveg), melyet egy mágneses anyag (Fe(III)-oxid, vagy kobalt-ötvözet) jellemzően 10–20 nm vastag rétegével, s egy védő szénréteggel vonnak be.