

Mágneses tulajdonságok

Szilárd testek mágneses viselkedésének áttekintése
Lágy- és keménymágneses anyagok

Prof. Dr. Mészáros István Attila

1

Mágneses tér $\Leftrightarrow$ anyag kölcshatás

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

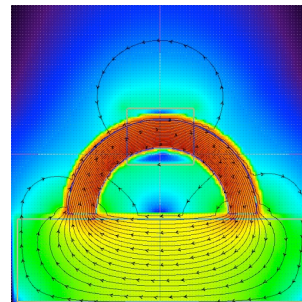
$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$$

$$\vec{M} = \kappa \vec{H} = \frac{1}{V} \sum \vec{P}_i$$

$$\mu_r = 1 + \kappa$$

Mágneses **permeabilitás**

Mágneses **szuszceptibilitás**
(érzékenység)



$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$$

$$B \left[\frac{Vs}{m^2} = T \right]$$

$$H \left[\frac{A}{m} \right]$$

2

2

Mágneses anyagok csoportosítása

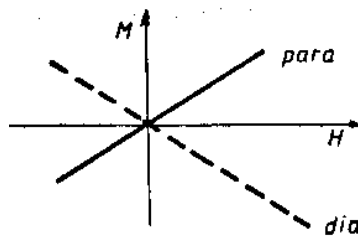
Gyengén mágneses anyagok

Dia (lezárt elektronhéj) $\kappa < 0$ ($\approx 10^{-5}$) Univerzális tulajd.
(Au, Pt, Ag, Si, Cu, Zn, Cd ...)

Para (legalább egy páratlan elektron) $\kappa > 0$ ($10^{-3} - 10^{-5}$)
(Mg, Al, Ti, W...)

Antimágnes

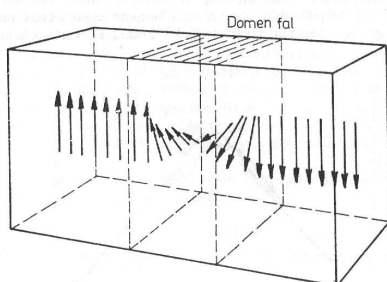
Mágnesezési görbék



3

3

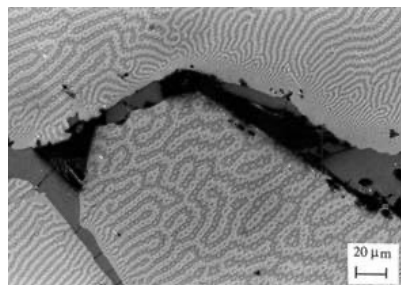
Ferromágneses anyagok doménszerkezete



Bloch-fal (tömbi anyag)

Egyensúlyi állapotba, a domének mágnesezettsége valamelyik **könnyű mágnesezési irányba** mutat.
⇒ doménfalak típusai

Fe [100] ⇒ 90° és 180°



Doménszerkezet, MOKE
FeBNd ($\text{Nd}_{16}\text{Fe}_{76}\text{B}_8$)

4

4

Rendezett mágneses szerkezetű anyagok típusai

Ferro ↑↑↑↑ (Fe, Co, Ni, Gd, Dy), ötvözetek, Heussler (Mn, Cr)

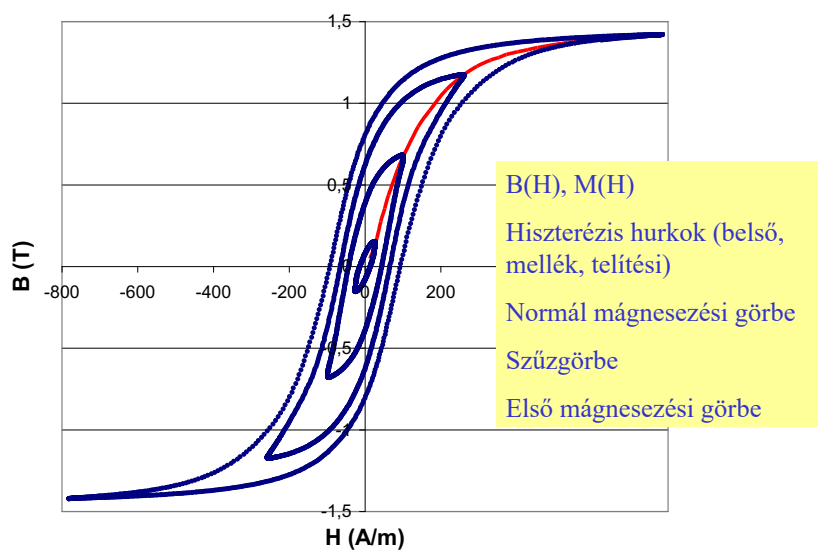
Antiferro ↑↓↑↓ (Cr, Mn)

Ferri ↑↓↑↓ (Fe₃O₄, CrO₂, ErO,
NiFe₂O₄, BaOFe₂O₃, Y₃FeO₁₂, MnFe₂O₄ ...)

5

5

Alapvető mágnesezési görbék



6

6

Hiszterézis görbéből származtatott fontosabb jellemzők

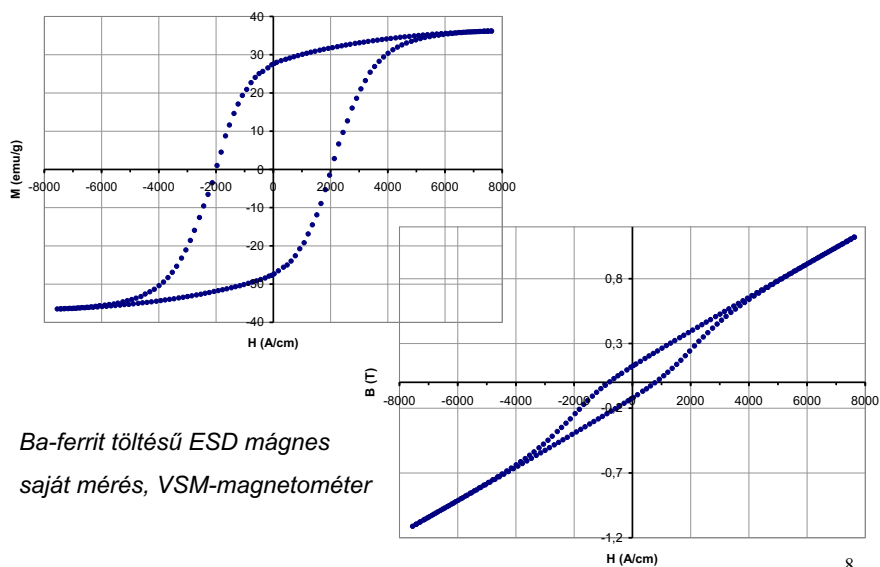
Telítési indukció (B_M)	Fe	2,15 T
Telítési polarizáció ($\mu_0 M_s$)	Ni	0,62 T
	Co	1,8 T
Remanens indukció (B_R)		
Koercitív tér (H_c)		
Permeabilitások (μ_r): kezdő, maximális, differenciális		
Jósági szám (BH) _{max}		
Szögletességi tényező B_R/B_M		
Veszteségi tényező		

7

7

M(H) vagy B(H)

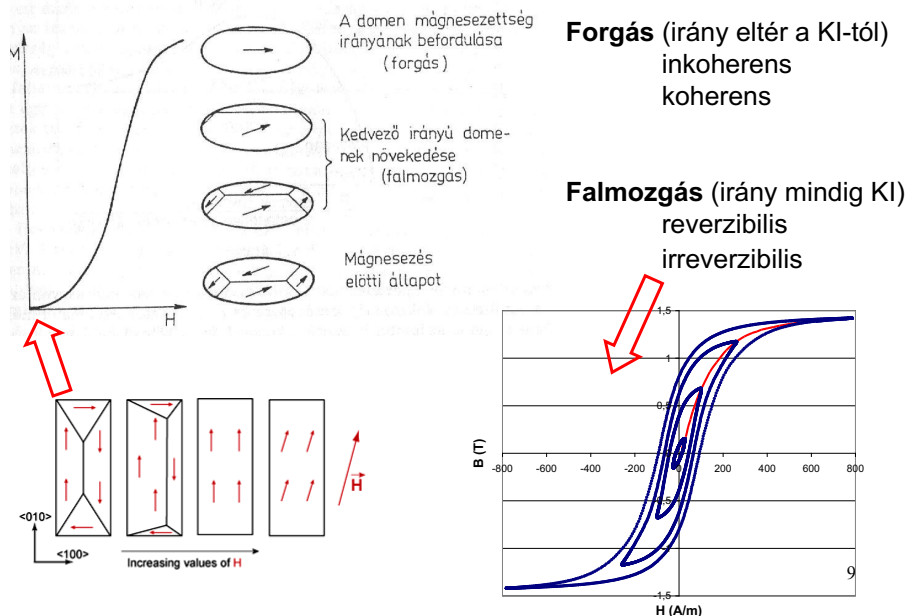
H_{cM} vagy H_{cB} (belső koercitív tér)



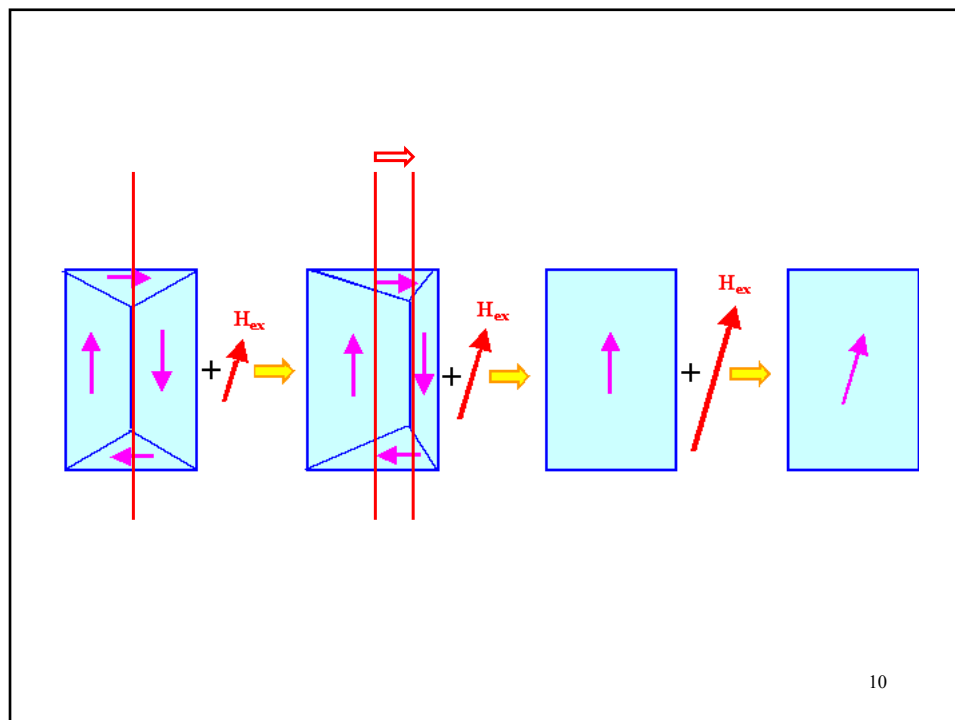
8

8

Az átmágnesezési folyamat kinetikája



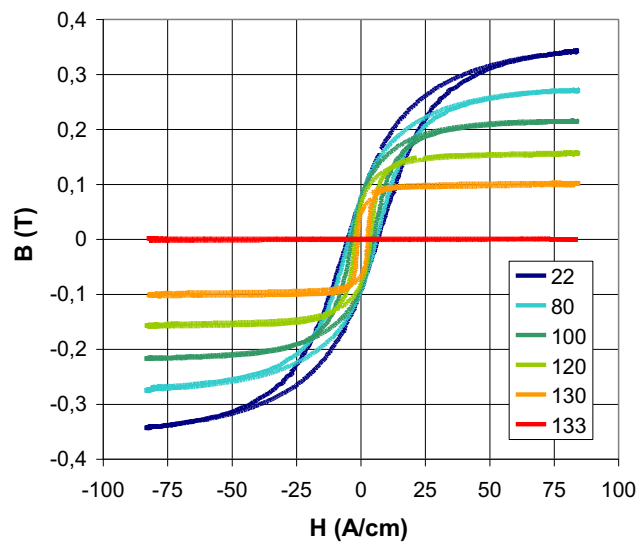
9



10

10

MnZn ferrit hiszterézis görbéjének hőmérsékletfüggése
Curie hőmérséklet: 133 °C



11

11

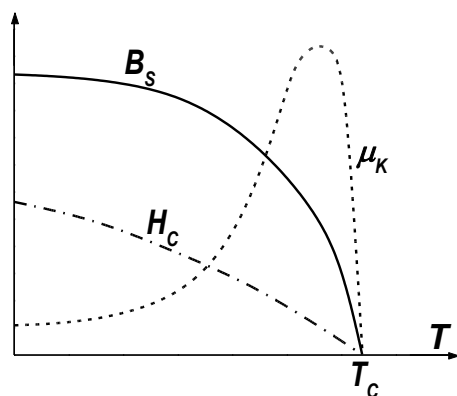
Néhány ferromágneses anyag Curie-hőmérséklete

Fe	770	°C
Co	1121	°C
Ni	368	°C
Gd	20	°C

12

12

Mágneses tulajdonságok hőmérsékletfüggése (ferromágnes)



Ferro $\Leftrightarrow$ Para

Curie-hőmérséklet

Reverzibilis, végtelenszer
ismételhető

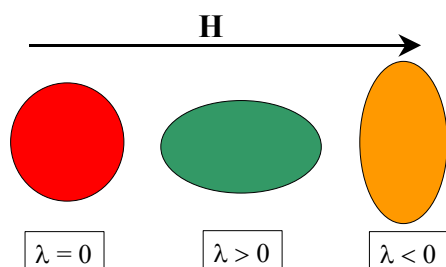
13

13

Magnetostrikció, magnetoelaszticitás

Mágneses tér hatására történő méretváltozás.

λ a telítéshez tartozó érték ($50-100 \cdot 10^{-6}$)



Fe $\lambda > 0$, Ni $\lambda < 0$

ultrahang generátor
transzformátor zúgása

$$\lambda_{\text{térfogati}} = \frac{\Delta V}{V}$$

$$\lambda_{\text{lineáris}} = \frac{\Delta l}{l}$$

Pl: 1 m hosszú

$\lambda = 100 \cdot 10^{-6}$

Méretváltozás: $\approx 0,1 \text{ mm}$

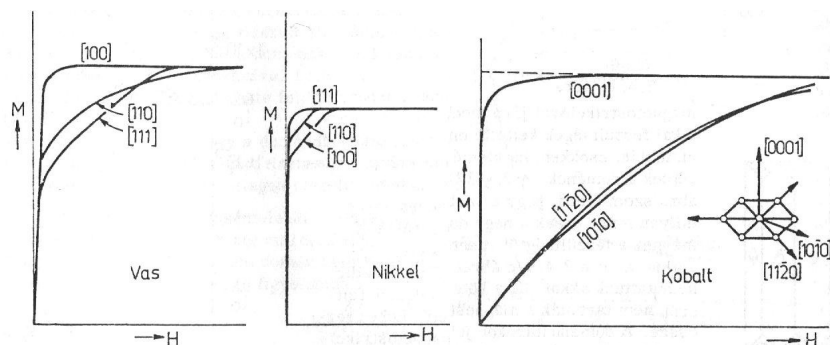
14

14

Mágneses anizotrópia energia

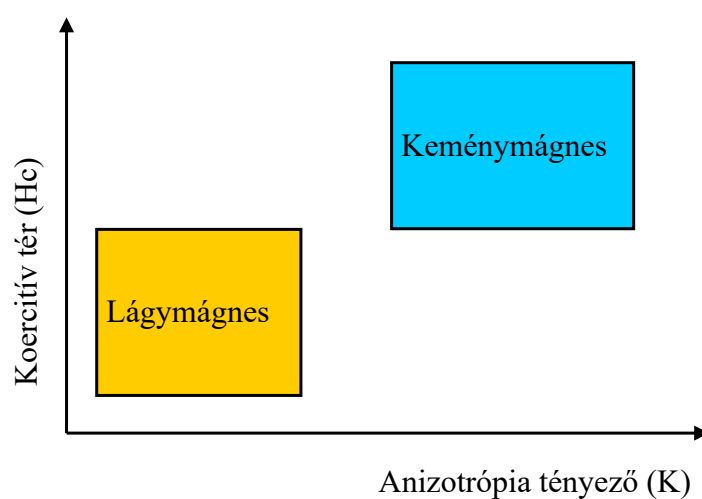
Könnyű és nehéz mágnesezési irányok.

Görbék alatti területek különbsége.



15

15



16

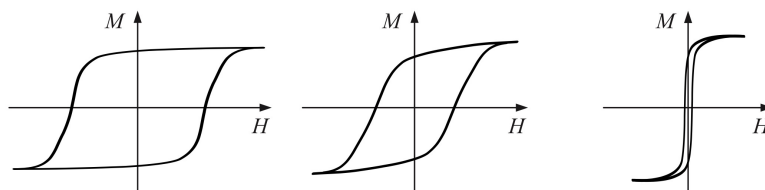
16

Mágneses anizotrópia

- Kristály anizotrópia
- Alak anizotrópia (makroszkópikus és szövetszerkezeti)
- Feszültség anizotrópia
- Indukált anizotrópia (anizotrópia keltés)
 - Mágneseres hőkezelés
 - Feszültségteres hőkezelés
 - Képlékeny alakítás
 - Irányított hőelvonás
 - Besugárzás
 - ...

17

A műszaki alkalmazások lágy- és keménymágneses anyagai



18

18

Lágymágnesek jellegzetes felhasználási területei

- **Fluxusvezető elemek**
- **Mágnestér árnyékolások**

Elektromechanikus eszközök:

Emelő, mozgató mágnesek, relék, mágneskapcsolók

Elektromágneses indukció alapján működő eszközök:

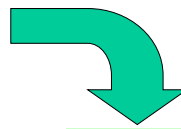
Transzformátorok, fojtók, generátorok, motorok, leválasztó elemek

19

19

Felhasználói igények a lágymágneses anyagoknál

B_M	Nagy
μ	Nagy
$0,01 \text{ A/cm} < H_C < 1 \text{ A/cm}$	
Fajlagos ellenállás	Nagy
Curie-hőmérséklet	Nagy
Alakíthatóság	Nagy
Veszteség	Kicsi
Hiszterézis terület	Kicsi



Tiszta fémek és homogén szilárd oldatok.

Ötvözetek jobbák.

Mechanikai keménység $\Leftrightarrow$ Mágneses keménység

20

20

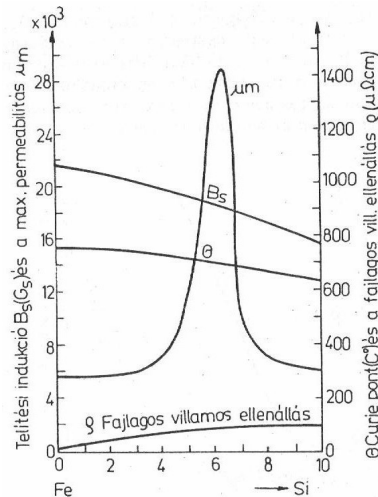
Fe - Si ötvözetek (lemez)

Erősáramú alkalmazás (nagy H, kis f)
Traszfórmátor, dinamó-lemez
(0,2 - 1 mm)
Si hatása: csökkenti az anizotrópiát

Optimum: 6,8 % Si **rideg, kemény**
Traszfórmátor: 4-4,5 % Si
Dinamó: 3,2-3,6 % Si

Interstíciós ötvözők: C, N, O, P, Mn, S
Maradó feszültség

Goss, kocka textúra

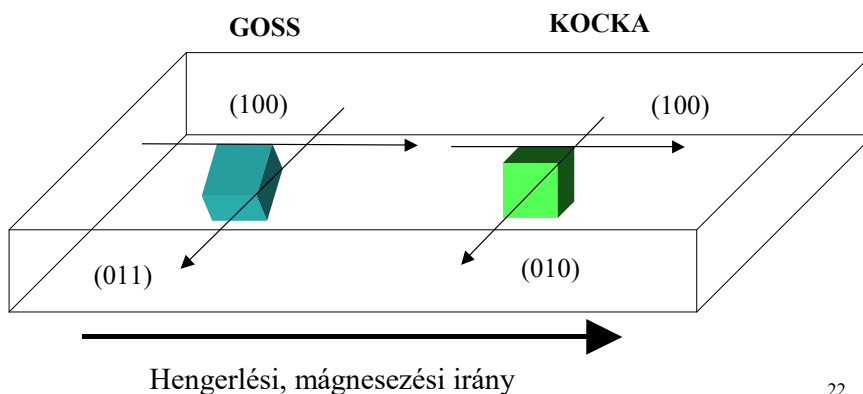


21

21

Textúrált Fe - Si lemezek

Külső H párhuzamos valamelyik könnyű mágnesezési iránnyal
Hengerlés $\Rightarrow$ szemcse orientáció $\Rightarrow$ anizotróp, textúrák szerkezet
Mágnesezési irány meghatározott !



22

22

Fe - Ni ötvözetek (Permalloy)

80% Ni - 20% Fe

Kis telítési indukció (1,2 T)

Nagy permeabilitás (20.000 - 70.000)

Kis veszteség

Ni₃Fe rendezett rács (75% Ni, 500 °C) megakadályozandó !

Alakítás rendkívül sokat ront a tulajdonságokon.

Lágyítás (900-1000 °C, 1h), gyors hűtés,
feszültségmentesítés (600 °C), gyors hűtés

mágnestéres hőkezelés

23

23

Amorf – nanokristályos ötvözetek

Vékony szalagok (0,02-0,05 mm)

Eutektikus összetétel

Átmeneti fém (Fe, Ni, Co)

Nem fémes ötv.: (Si, P, N, C, B)

Gyorchűtés (10^5 °C/sec)

Harold Liebermann (1976)

Finemet: Fe₇₄Cu₁Nb₃Si₁₅B₇

40-50 Vol% nanokristályos fázis

H_c = 0,01 A/cm

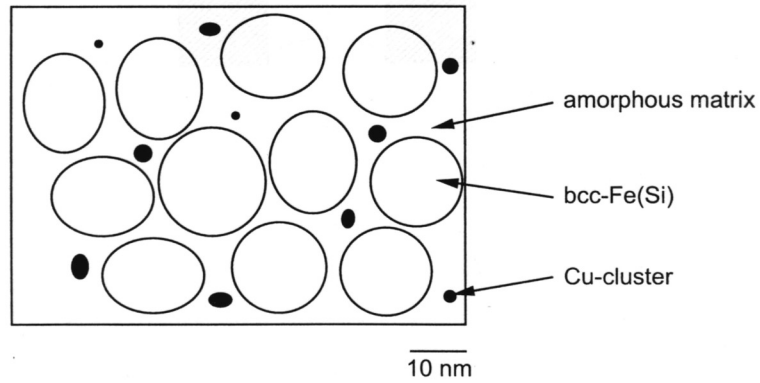
Fe, Ni, Co alapú
amorf ötvözetek



24

24

Nanokristályos állapot „szövetszerkezete”

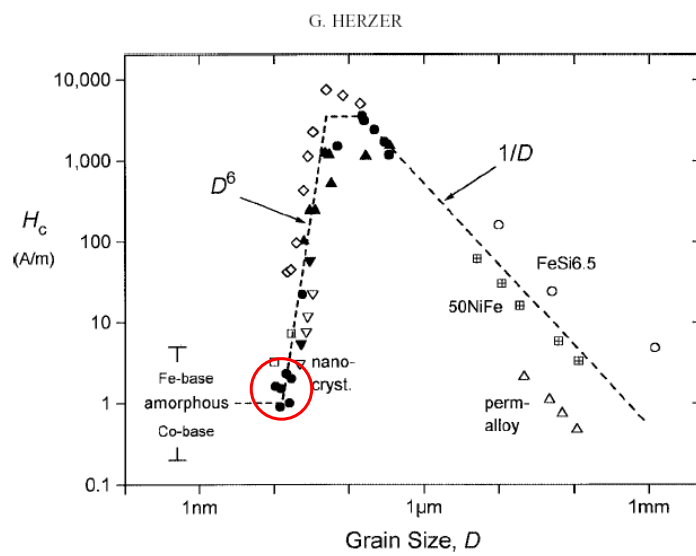


25

25

Giselher Herzer

Director R&D, Vacuumschmelze, Hanau, Germany



26

Lágy ferritek, gránátok

Kerámia mágnes (Köbös spinel, Ferrimágneses rend)

⇒ Porkohászati technológia

⇒ Rideg, törékeny, nem alakítható (kösörülés)

⇒ Szigetelő (rossz félvezető) ⇒ nagy frekvenciás alkalmazások

MOFe_2O_3

FERRIT

(M kétvegyértékű fém: Mn, Zn, Ni)

Fe momentumok kompenzálják egymást ⇒ B_s kicsi

$3\text{M}_2\text{O}_3\cdot 5\text{Fe}_2\text{O}_3$

GRÁNÁT

(M kétvegyértékű ritkaföldfém: Sm, Eu, Gd)

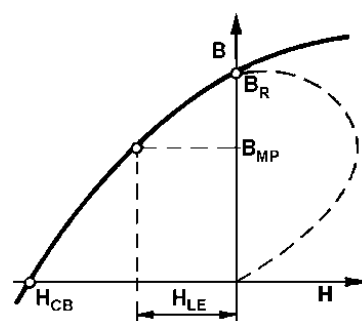
Ittrium ötvözés → YIG

27

27

Felhasználói igények a keménymágneses anyagoknál

B_M	Nagy
B_R	Nagy
$(BH)_{\max}$	Nagy
Hisztérezis terület	Nagy
$400 \text{ A/cm} < H_C < 9000 \text{ A/cm}$	



Keménymágnes jelleggörbe

28

28

Keménymágnesek jellegzetes felhasználási területei

Légrésben előírt indukció keltése / fenntartása.

Drága, sokszor alakíthatatlan.

Híradástechnika:

hangszórók, mikrofonok, mikrohullámú eszközök

Méréstechnika:

galvanométerek

Mechanikai mozgatás, rögzítés:

DC motorok, emelő mágnesek

Mágneses információ tárolás:

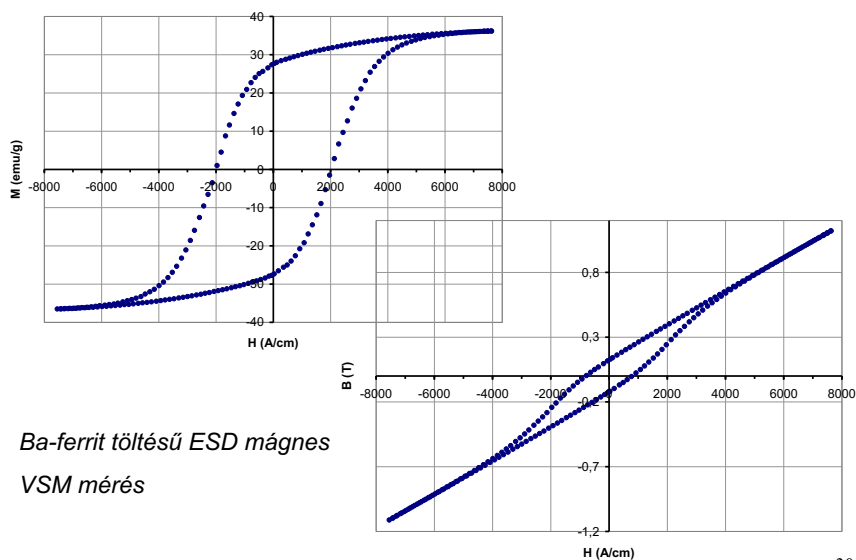
magnó, videó, floppy, merevlemez

29

29

M(H) vagy B(H)

H_{cM} vagy H_{cB} (belső koercitív tér)



Ba-ferrit töltésű ESD mágnes

VSM mérés

30

30

Fe - Al - Ni – Co ötvözetek Alnico

Domen méretű ferromágneses fázis nem mágneses „kvázi-domenfallal elválasztva. + alakizotrópia

$H_c \approx 300-500 \text{ A/cm}$

550 °C hőmérsékletig alkalmazható

Kitűnő termikus stabilitás

Rideg $\Rightarrow$ öntés, porkohászat

Izotróp, anizotróp

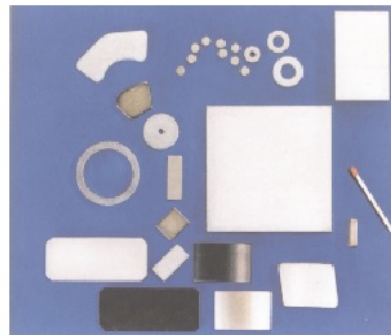
31

31

Ritkaföldfém mágnesek

- Ritkaföldfém (Sm, Nd)
- Előötvözet, őrlés, sajtolás (izosztatikus, mágneseres), hőkezelés
- Gyémánttárcsás vágás

$H_c = 4000 - 9000 \text{ A/cm}$



Shapes of permanent magnets made of VACODYM and VACOMAX

32

32

SmCo Samárium-Kobalt

SmCo₅ ill. Sm₂Co₁₇ összetételű intermetallikus vegyületek

Porkohászat

Hexagonális szerkezet $\Rightarrow$ nagy kritáyanizotrópia

$H_C = 4000 - 7000 \text{ A/cm}$

Rideg, törékeny

Drága

33

33

Vas-Bór-Neodímium Fe-B-Nd mágnesek

Olcsóbb mint a SmCo

$H_C = 6000 - 9000 \text{ A/cm}$

Kevésbé törékeny

Nd₂Fe₁₄B ferromágneses fázis
(tetragonális rács)

Korrodál (galvanikus Ni, Zn, polimer
bevonat)

Max. üzemi hőmérséklet: 80-180 °C



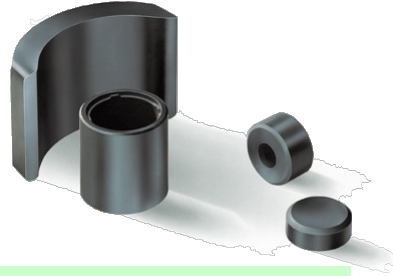
34

34

Kemény ferritek (Hexagonális ferritek)

Nemfémes mágnesek, kerámiák

Báriumferrit	$\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$
Stronciumferrit	$\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$



B_s kicsi (max. 0,46-0,47 T)

H_C nagy (1300-2500 A/cm) $\Leftarrow$ Nagy egytengelyű anizotrópia

Rideg, törékeny, alakíthatatlan (köszörülés)

Curie hőmérséklet alacsony $\Rightarrow$ prec. felhasználás nincs

Olcsó

35

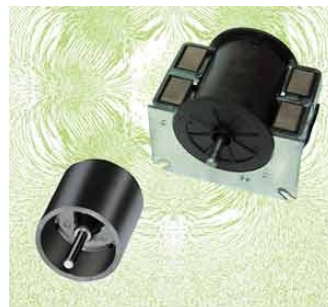
35

ESD mágnesek Elongated Single Domain

Hosszúka, egydomén méretű szemcsék

(CuNiFe, MnBi, Fe_3O_4 , Báriumferrit, Stronciumferrit...)

Kötőanyag (műanyag, gumi, alacsony op. fém)



36

36

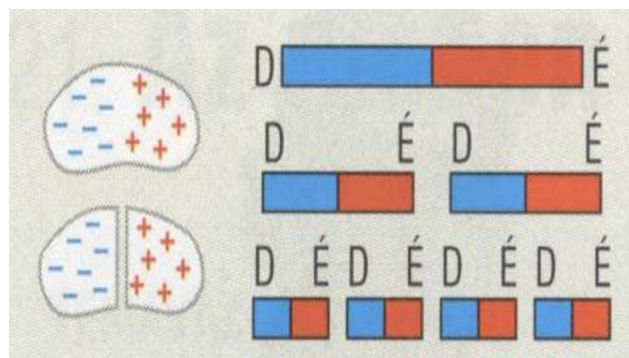
Az anyagok mágneses tulajdonságaival, a mágneses mérésekkel, az elektromágneses anyagvizsgálattal és az műszaki gyakorlat lágy- és keménymágneses anyagaival foglalkozó tantárgy:

Mágneses anyagok és vizsgálatok
BMEGEMT NGK3
2+0+1, 4 kp

37

37

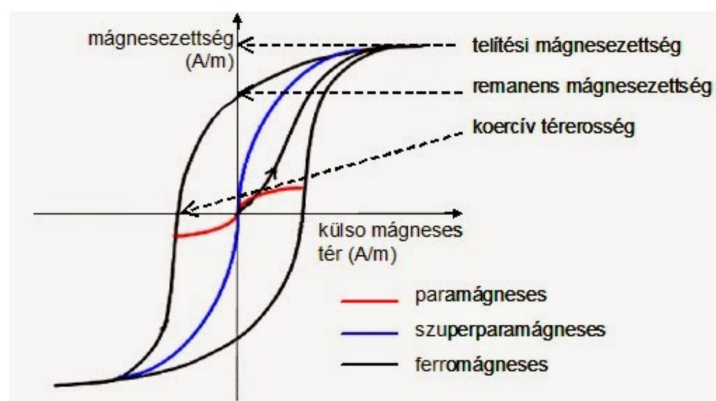
Mérethatás
Szuperparamágneses viselkedés



38

38

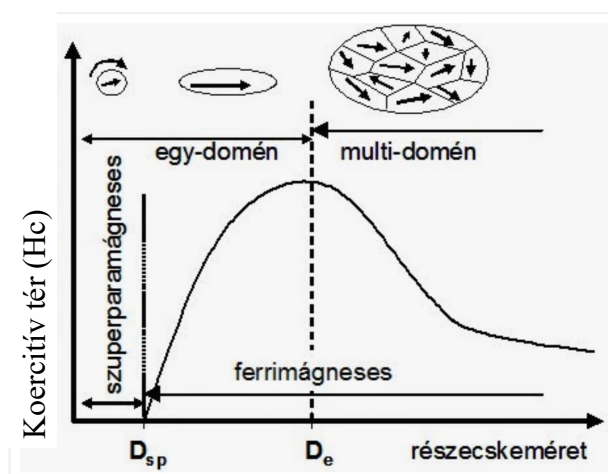
Mérethatás
Szuperparamágneses viselkedés
 $H_c = 0$ és M_s nagy



Magnetit esetén: $D_{sp} \sim 20$ nm és a $D_e \sim 120$

39

39

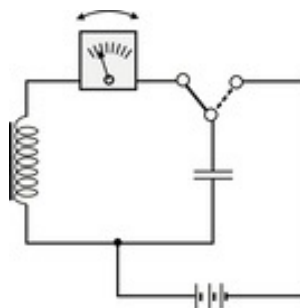
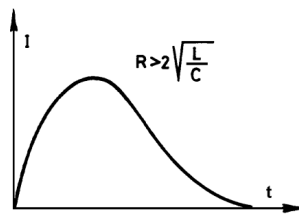
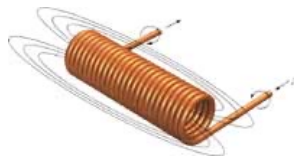


Magnetit esetén: $D_{sp} \sim 20$ nm és a $D_e \sim 120$

40

40

Fel- és lemágnesezés



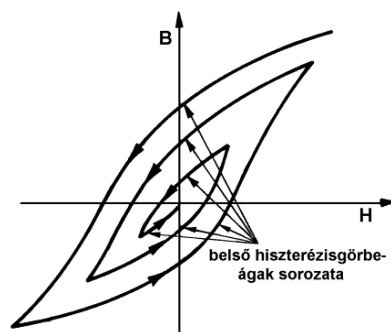
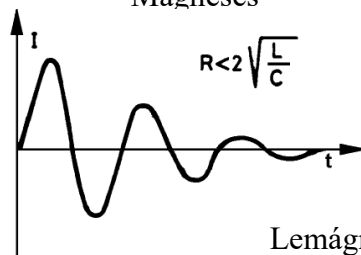
Felmágnesezés aperiodikus gerjesztéssel

41

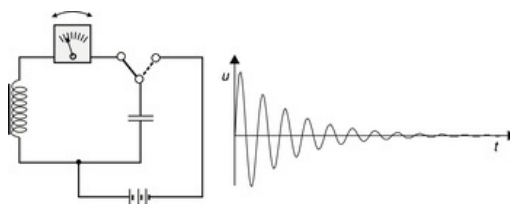
41

Lemágnesezés

Termikus
Mágneses



Lemágnesezés periodikus gerjesztéssel



42

42

Mágneses anyagok és vizsgálatok

BMEGEMT NGK3

2+0+0, vizsga, 4 kp

43