Anyagtudomány és Technológia Tanszék

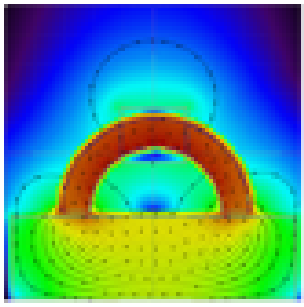
Mágneses tulajdonságok

Szilárd testek mágneses viselkedésének áttekintése
Lágy- és keménymágneses anyagok

Prof. Dr. Mészáros István Attila

1

Mágneses tér ⇔ anyag kölcsönhatás



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

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

$$\overline{M} = \kappa \overline{H} = \frac{1}{V} \sum \overline{P_i}$$

$$\mu_r = 1 + \kappa$$

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

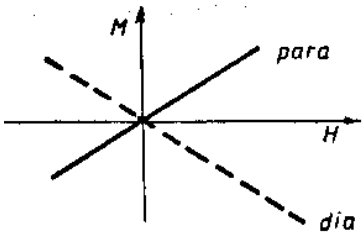
Gyengén mágneses anyagok

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

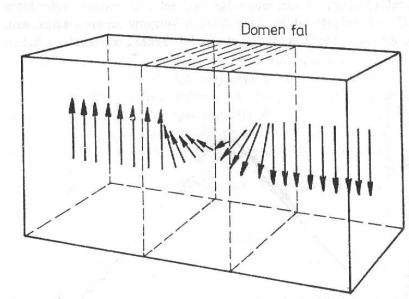
Mágnesezési görbék



3

3

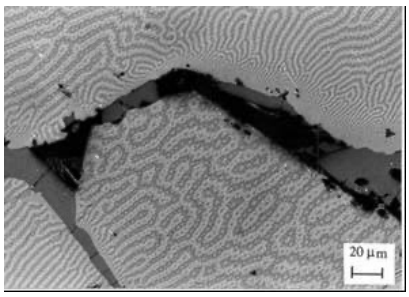
Ferromágneses anyagok doménszerkezete



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

Fe [100] ⇒ 90° és 180°

Bloch-fal (tömbi anyag)



Doménszerkezet, MOKE
FeBNd ($Nd_{16}Fe_{76}B_8$)

4

4

Rendezett mágneses szerkezetű anyagok típusai

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

Antiferro ↑↓↑↓ (Cr, Mn)

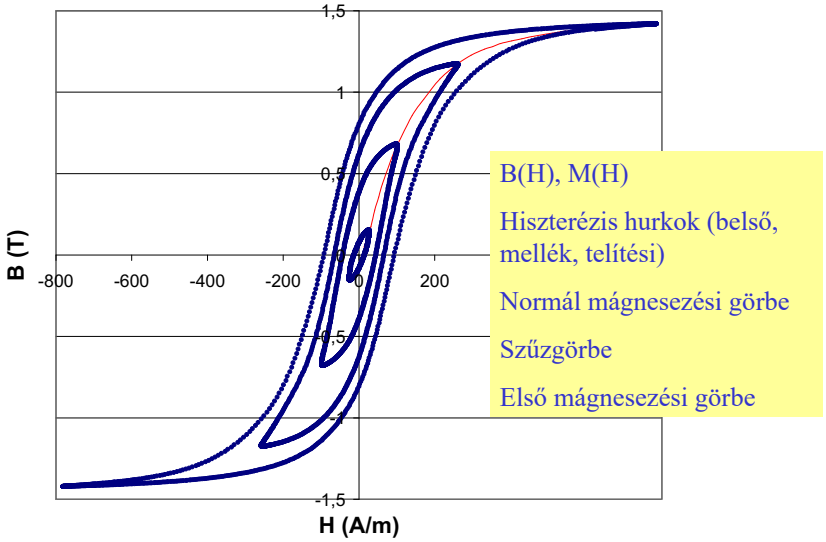
Ferri ⇑↓⇑↓ (Fe_3O_4, CrO_2, ErO,

$NiFe_2O_4$, $BaOFe_2O_3$, Y_3FeO_{12}, $MnFe_2O_4$ …)

5

5

Alapvető mágnesezési görbék



B(H), M(H)

Hiszterézis hurkok (belső, mellék, telítési)

Normál mágnesezési görbe

Szűzgörbe

Első mágnesezési görbe

6

6

Hiszterézis görbéből származtatott fontosabb jellemzők

Telítési indukció (B_M)

Telítési polarizáció ($\mu_0 M_s$) ⇒

Fe	2,15 T
Ni	0,62 T
Co	1,8 T

Remanens indukció (B_R)

Koercitív tér (H_c)

Permeabilitások (μ_r): kezdő, maximális, differenciális

Jósági szám $(\boldsymbol{BH})_{max}$

Szögletességi tényező B_R/B_M

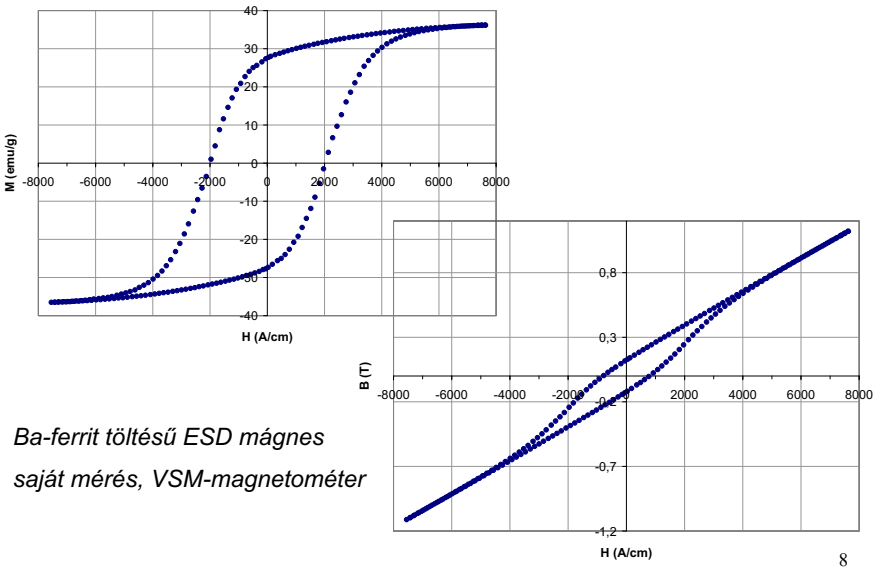
Veszteségi tényező

7

7

M(H) vagy B(H)

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



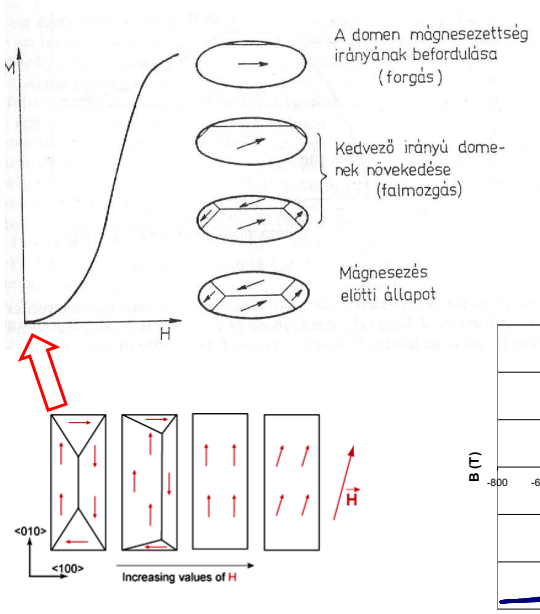
Ba-ferrit töltésű ESD mágnes

saját mérés, VSM-magnetométer

8

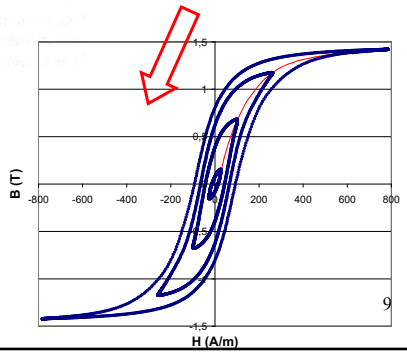
8

Az átmágnesezési folyamat kinetikája



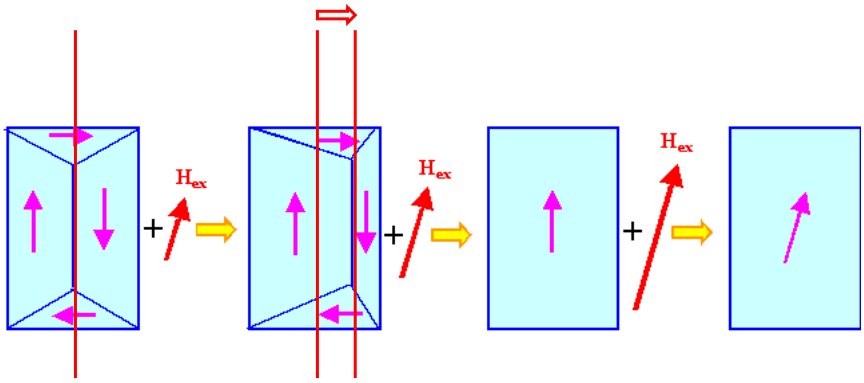
Forgás (irány eltér a KI-tól)
inkoherens
koherens

Falmozgás (irány mindig KI)
reverzibilis
irreverzibilis



9

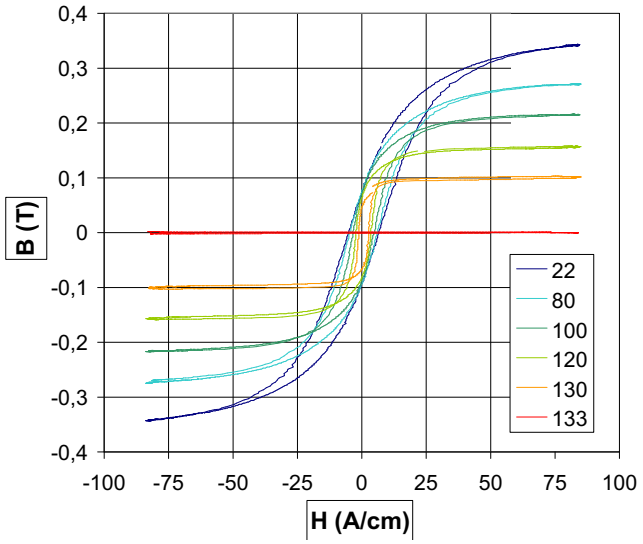
9



10

10

MnZn ferrit hiszterézis görbéjének hőmérsékletfüggése
Curie hőmérséklet: 133 °C



11

11

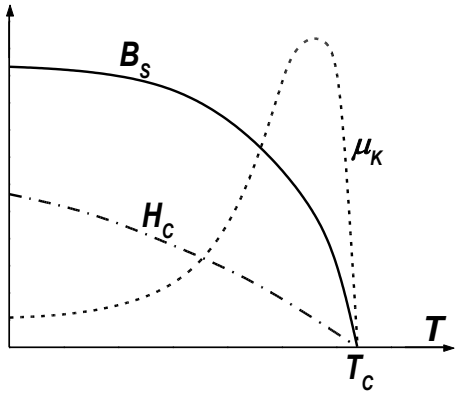
Néhány ferromágneses anyag Curie-hőmérséklete

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

12

12

Mágneses tulajdonságok hőmérsékletfüggése (ferromágnes)



Ferro <=> Para

Curie-hőmérséklet

Reverzibilis, végtelenszer ismételhető

13

13

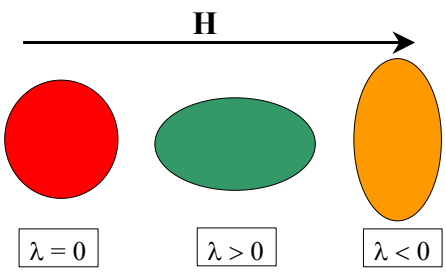
Magnetostrikció, magnetoelaszticitás

Mágneses tér hatására történő méretváltozás.

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

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

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



Fe λ >0, Ni λ<0

ultrahang generátor
transzformátor zúgása

Pl: 1 m hosszú
λ =100 10^{-6}
Méretvátozás: ≈ 0,1 mm

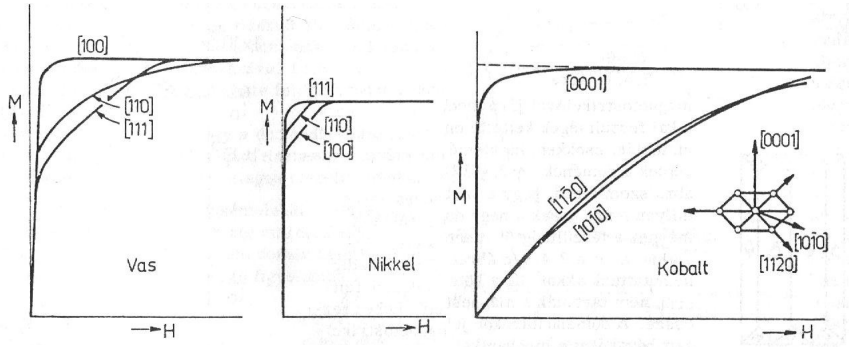
14

14

Mágneses anizotrópia energia

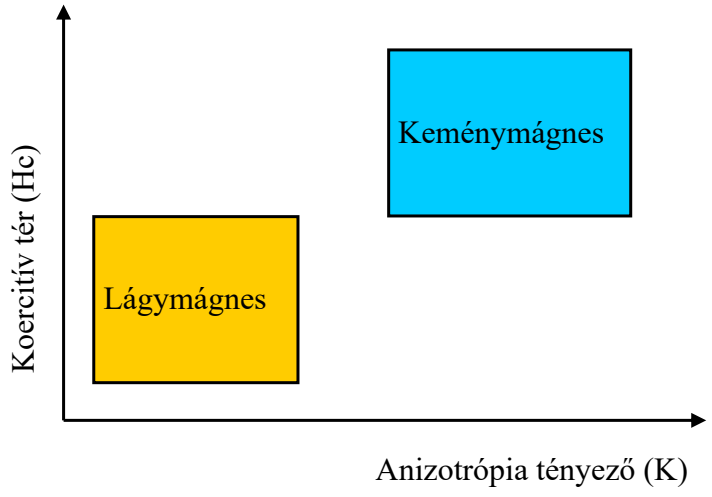
Könnyű és nehéz mágnesezési irányok.

Görbék alatti területek különbsége.



15

15



16

16

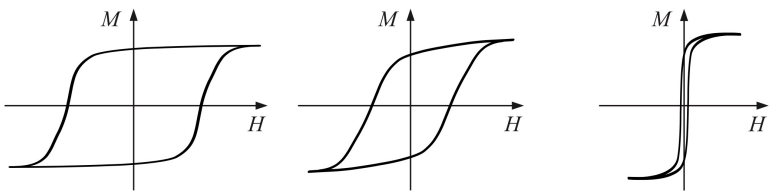
Mágneses anizotrópia

- Kristály anizotrópia
- Alak anizotrópia (makroszkópikus és szövetszerkezeti)
- Feszültség anizotrópia

- Indukált anizotrópia (anizotrópia keltés)
  - Mágnesteres 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 A/cm < **H_C < 1 A/cm**	
Fajlagos ellenállás	Nagy
Curie-hőmérséklet	Nagy
Alakíthatóság	Nagy
Veszteség	Kicsi
Hiszterézis terület	Kicsi

Tiszta fémek és homogén szilárd oldatok.

Ötvözetek jobbak.

Mechanikai keménység ⇔ Mágneses keménység

20

20

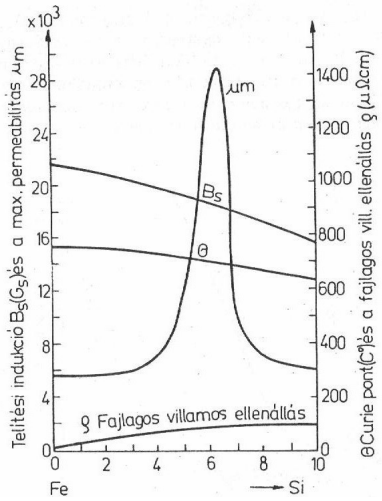
Fe - Si ötvözetek (lemez)

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

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

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

Goss, kocka textúra

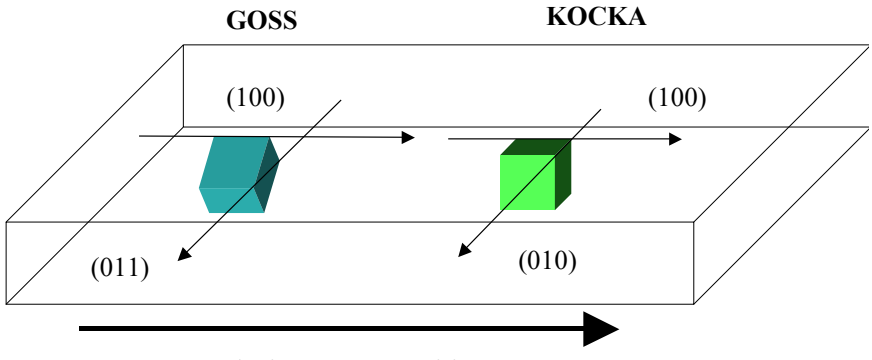


21

21

Textúrált Fe - Si lemezek

Külső H párhuzamos valamelyik könnyű mágnesezési iránnyal
Hengerlés ⇒ szemcse orientáció ⇒ anizotróp, textúrás 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

Ni_3Fe 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)

Gyorhűtés (10^5 °C/sec)

Harold Liebermann (1976)

Fe, Ni, Co alapú amorf ötvözetek





Finemet: $Fe_{74}Cu_1Nb_3Si_{15}B_7$

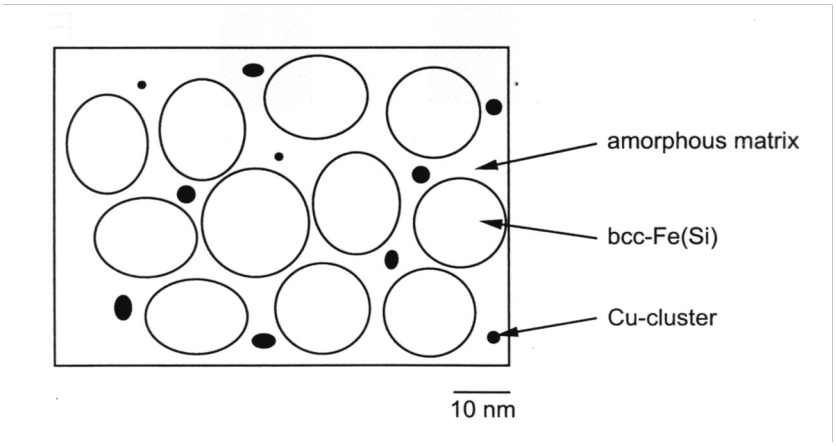
40-50 Vol% nanokristályos fázis

Hc = 0,01 A/cm

24

24

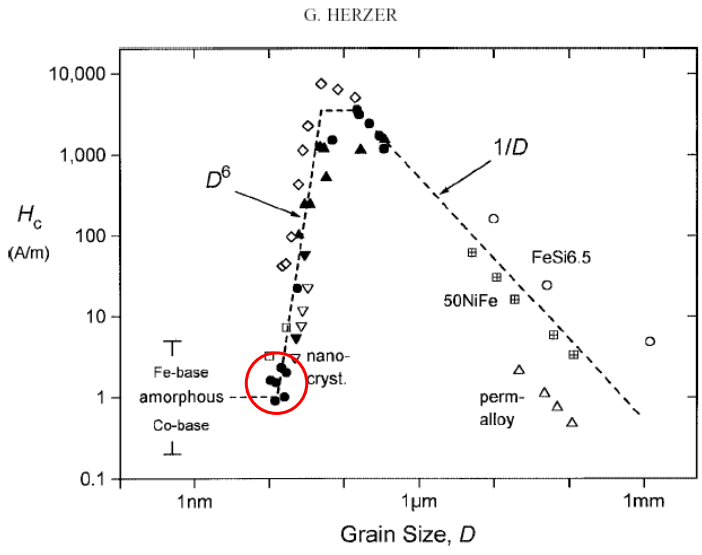
Nanokristályos állapot „szövetszerkezete”



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 (köszörülés)
⇒ Szigetelő (rossz félvezető) ⇒ nagy frekvenciás alkalmazások

$MOFe_2O_3$ FERRIT
(M kétvegyértékű fém: Mn, Zn, Ni)
Fe momentumok kompenzálják egymást ⇒ B_S kicsi

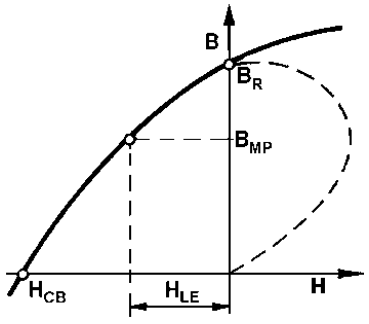
$3M_2O_35Fe_2O_3$ GRÁNÁT
(M kétvegyértékű ritkaföldfém: Sm, Eu, Gd)
Ittrium ötvözés → YIG

27

27

Felhasználói igények a keménymágneses anyagoknál

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



Keménymágnes jelleggörbe

28

28

Keménymágnesek jellegzetes felhasználási területei

Légrésben előírt indukció keltése / fenntartása.

Drága, sokszor alakíthatatlan.

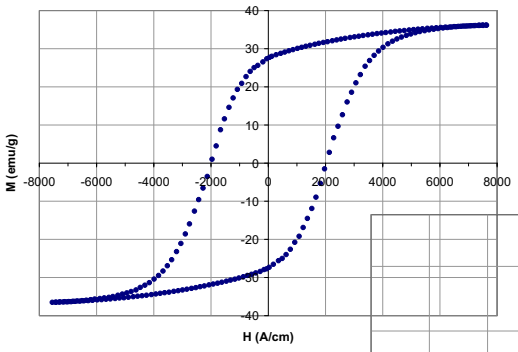
Híradástechnika:
hangszórók, mikrofonok, mikrohullámú eszközök
Méréstechnika:
galvanométerek
Mechanikai mozgatás, rögzítés:
DC motorok, emelő mágnesek
Mágneses információ tárolás:
magnó, videó, floppy, merevlemez

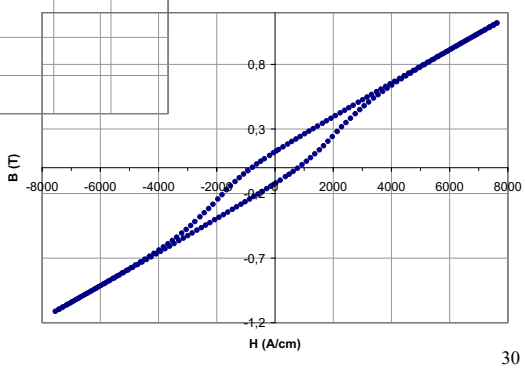
29

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. + alakanizotrópia

Hc ≈ 300-500 A/cm

550 °C hőmérsékletig alkalmazható

Kitűnő termikus stabilitás

Rideg ⇒ öntés, porkohászat

Izotróp, anizotróp

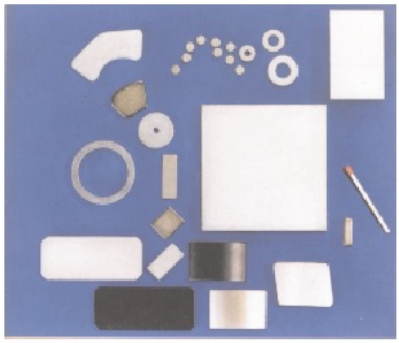
31

31

Ritkaföldfém mágnesek

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

H_C = 4000 - 9000 A/cm



Shapes of permanent magnets made of VACODYM and VACOMAX

32

32

SmCo
Samárium-Kobalt

$SmCo_5$ ill. Sm_2Co_{17} összetételű intermetallikus vegyületek

Porkohászat

Hexagonális szerkezet ⇒ nagy kritályanizotrópia

H_C = 4000 - 7000 A/cm

Rideg, törékeny

Drága

33

33

Vas-Bór-Neodímium
Fe-B-Nd mágnesek

Olcsóbb mint a SmCo

H_C = 6000 - 9000 A/cm

Kevésbé törékeny

$Nd_2Fe_{14}B$ ferromágneses fázis (tetragonális rács)

Korrodál (galvanikus Ni, Zn, polimer bevonat)

Max. üzemi hőmérséklet: 80-180 °C



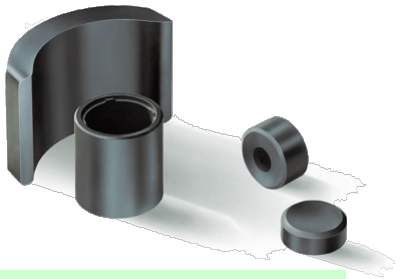
34

34

Kemény ferritek (Hexagonális ferritek)

Nemfémes mágnesek, kerámiák

Báriumferrit	$BaFe_{12}O_{19}$
Stronciumferrit	$SrFe_{12}O_{19}$



B_S kicsi (max. 0,46-0,47 T)
H_C nagy (1300-2500 A/cm) ⇐ Nagy egytengelyű anizotrópia
Rideg, törékeny, alakíthatatlan (köszörülés)
Curie hőmérséklet alacsony ⇒ prec. felhasználás nincs
Olcsó

35

35

ESD mágnesek
Elongated Single Domain

Hosszúkás, egydomén méretű szemcsék
(CuNiFe, MnBi, Fe_3O_4, Báriumferrit, Stronciumferrit…)

Kötőanyag (műanyag, gumi, alacsony op. fém)





36

36

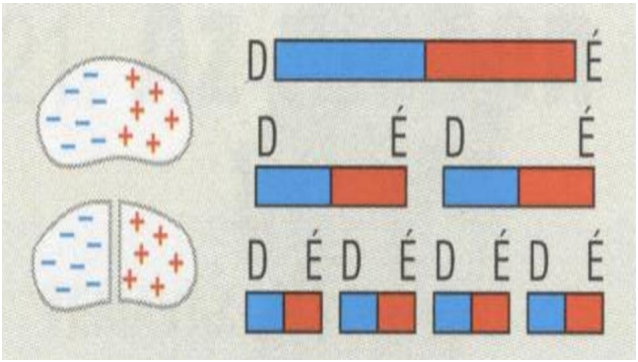
Az anyagok mágneses tulajdonságaival, a mágneses mérésekkel, az elektromágneses anyagvizsgálattal és az műszaki gyakorlat lágy- és keménymágneses anyagaival foglalkozó tantárgy:

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

37

37

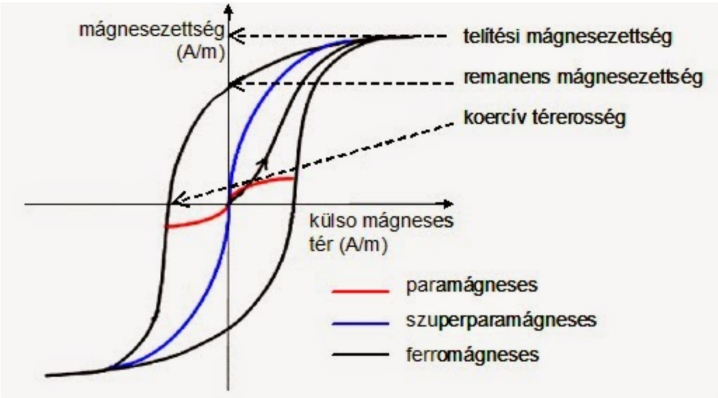
Mérethatás
Szuperparamágneses viselkedés



38

38

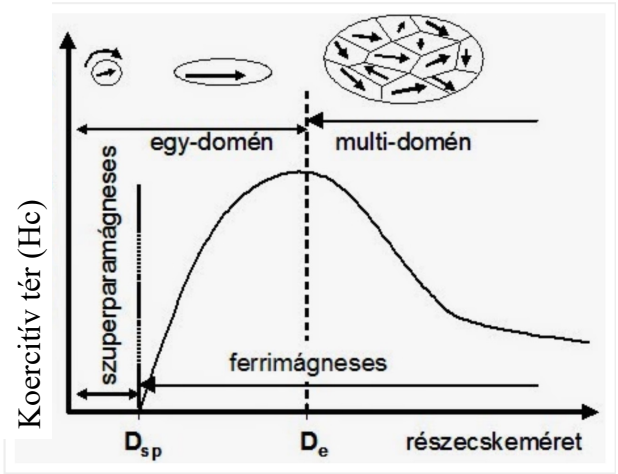
Mérethatás
Szuperparamágneses viselkedés
$H_c = 0$ és M_s nagy



Magnetit esetén: D_{sp} ~20 nm és a D_e~120

39

39

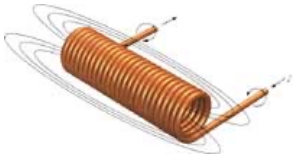


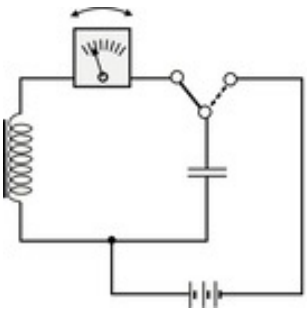
Magnetit esetén: D_{sp} ~20 nm és a D_e~120

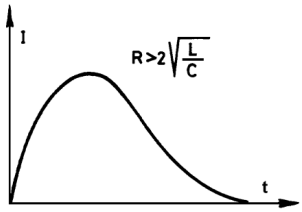
40

40

Fel- és lemágnesezés







Felmágnesezés aperiodikus gerjesztéssel

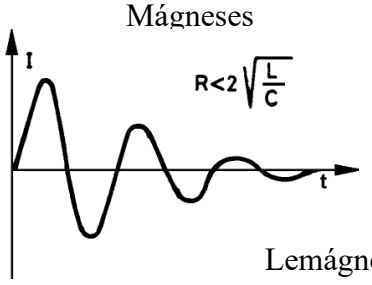
41

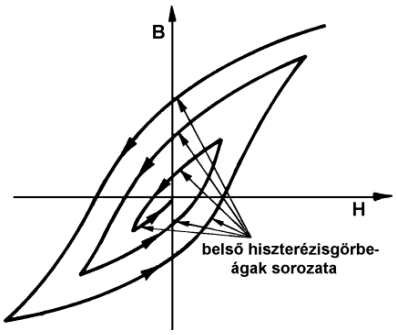
41

Lemágnesezés

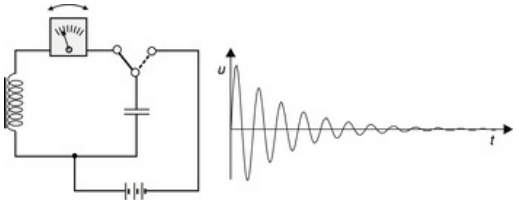
Termikus

Mágneses





Lemágnesezés periodikus gerjesztéssel



42

42