

3. Anizotropia, domeny i histereza

Plan:

- anizotropia magnetyczna i jej źródła
- domeny magnetyczne
- model Stonera-Wohlfartha i histereza
- proces magnetyzacji

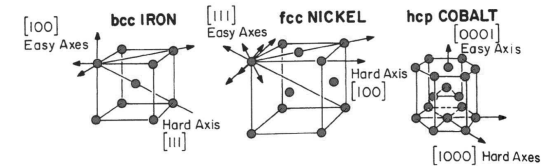
Literatura:

R.C. O'Handley, *Modern magnetic materials: principles and applications*

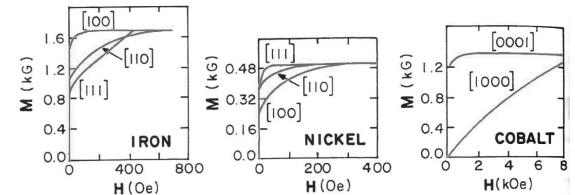
Michał Rams
Instytut Fizyki, Uniwersytet Jagielloński
www.uj.edu.pl/web/zinm
10.2020

Oś łatwa i trudna

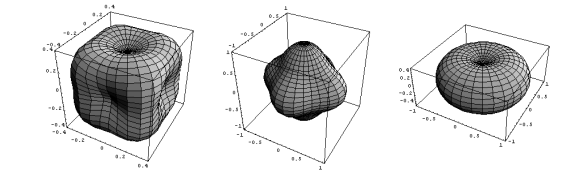
bez zewnętrznego pola mom.magn. w stanie uporządkowanym ustawiają się zwykle wzdłuż osi łatwej



obrót mom.magn. do innego kierunku wymaga przyłożenia pola H



energia anizotropii w funkcji kierunku



rys wg: R. O'Handley book

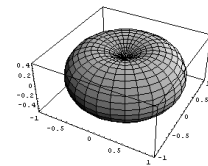
Anizotropia magnetyczna

Dla symetrii jednoosiowej gęstość energii

$$E_a = K_{u0} + K_{u1} \sin^2 \theta + K_{u2} \sin^4 \theta + \dots$$

dla $K_{u1} > 0$ jest to oś łatwa,

dla $K_{u1} < 0$ jest oś trudna.

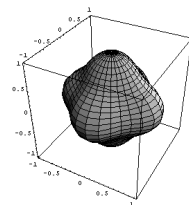


Co, $K_{u1} = +41 \times 10^4 \text{ J/m}^3$

W przypadku symetrii kubicznej

$$E_a = K_0 + K_1 (\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2) + K_2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \dots$$

$$\alpha_i = \cos \theta_i \quad \text{cosinusy kierunkowe}$$



Ni, $K_1 = -4.5 \times 10^4 \text{ J/m}^3$

Anizotropia magnetyczna cd.

Źródła

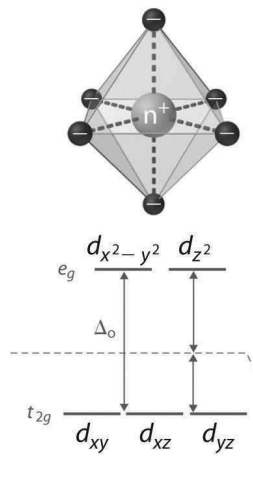
1. anizotropia jedno-jonowa - skutek istnienia pola krystalicznego
2. anizotropia kształtu - (współczynnik demagnetyzacji) szczególnie ważna dla układów niskowymiarowych
3. anizotropia oddziaływań wymiennych

Wielkość

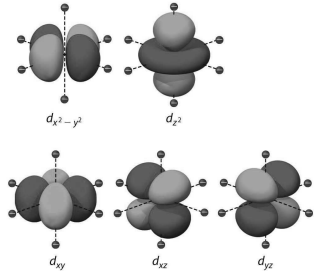
	T (K)	$K_1 (10^4 \text{ J/m}^3)$	$K_2 (10^4 \text{ J/m}^3)$
Fe	295	4.8	-1.0
Co ^u	295	41	15
Ni ₈₀ Fe ₂₀	295	-0.03	
Tb ^u	4.2	-5650	-460
Gd ^u	4.2	-12	
Fe ₃ O ₄	295	-0.9	
SmCo ₅ ^u	295	1100 - 2000	
Fe ₁₄ Nd ₂ B ^u	295	500	

^u = uniaxial : K_{u1} K_{u2}

Pole krystaliczne dla 3d

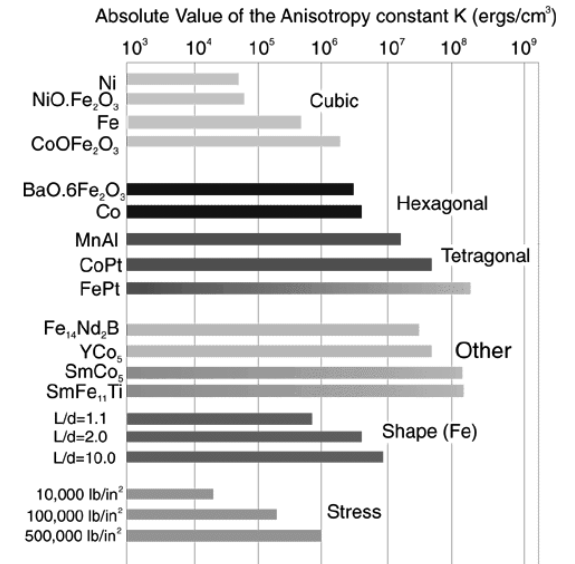


pole krystaliczne (pole ligandów) prowadzi do rozszczepienia powłoki 3d, powstałe orbitale są anizotropowe i mogą prowadzić do dużej anizotropii magnetycznej



rys wg: Principles of General Chemistry, CC

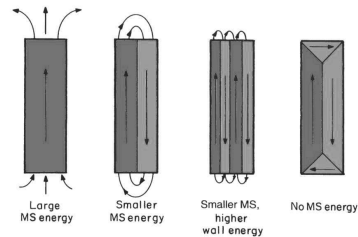
Anizotropia



Wykład: Materiały magnetyczne

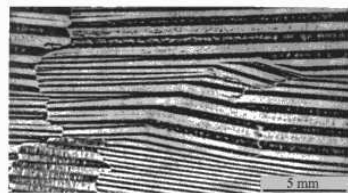
Domeny

Nienamagnesowany ferromagnetyk składa się z domen - obszarów w których magnetyzacja jest jednorodna. Średnia magnetyzacja wielu domen jest bliska zeru. Jest to wynik minimalizacji całkowitej energii (Landau, Lifschitz 1935, Kittel 1956).



Istotne gęstości energii:

- oddziaływań wymiennych
- anizotropii magnetycznej
- magnetostatyczna
- Zeemanowska
- magnetoelastyczna



Domeny w stali transformatorowej, obrazowanie metodą Bittera, S.Arai, Nippon Steel

Wykład: Materiały magnetyczne

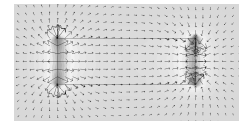
Energia magnetostatyczna

Gęstość energii $u = -\mu_0 \mathbf{M} \cdot \mathbf{H}$

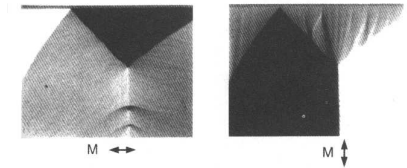
Dla jednej domeny $u = -\mu_0 \int \mathbf{H} \cdot d\mathbf{M} = \mu_0 N_d \int M dM = \mu_0 \frac{N_d}{2} M^2$

Pole H_d jest największe na końcach, tam gdzie $\text{div } \mathbf{M} \neq 0$

- układ domen dąży to ciągłości magnetyzacji, czyli na granicy domen powinno być $(\mathbf{M}_1 - \mathbf{M}_2) \cdot \mathbf{n} = 0$
- domeny domykające 90° też to spełniają



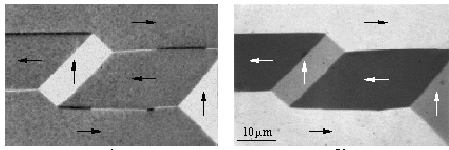
pole H demagnetyzacji domeny o stałym M



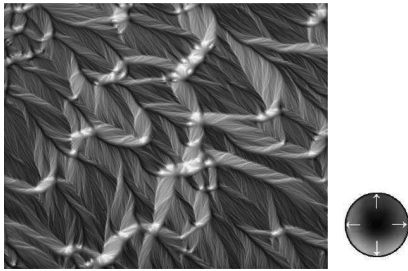
NiFe film, SEM with polarization analysis, Celotta et al. 1991

Wykład: Materiały magnetyczne

Domeny - galeria



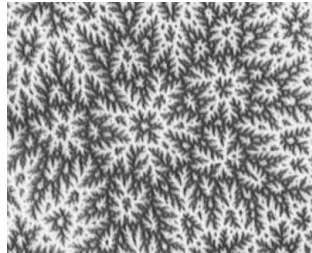
FeSi (100) crystal, Magneto Optical Kerr Microscope, 60x40um, A.Hubert, R.Schäfer, *Magnetic domains*, 1998



20nm layer of polycrystalline Co, Fresnel mode of Lorentz microscopy TEM (color represents direction), 200um, R. Dunin-Borkowski, Cambridge, 2004

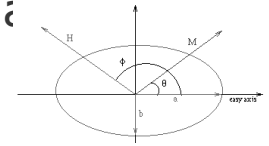


Nd2Fe14B, TEM



Co crystal base plane, Magnetic Force Microscopy, 25x20um, IFW Dresden

model Stonera-Wohlfartha

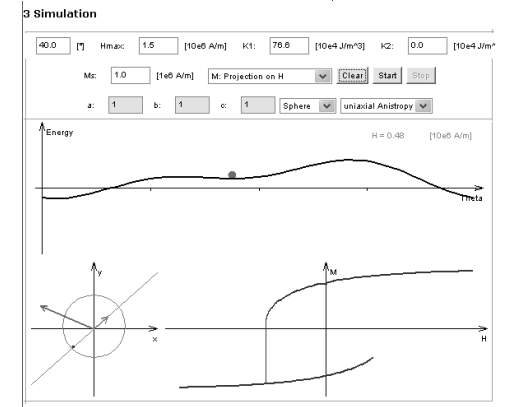


- H : zewnętrzne pole
- M : wektor magnetyzacji ziarna
- θ : kąt między osią łatwą a M
- φ : kąt między osią łatwą a H
- a, b, c : półosie ziarna (elipsoidy)

Całkowita energia ziarna składa się z

$$E = E_Z + E_C + E_S$$

- energii magnetostaticznej
 $E_Z = -\mu_0 M_s H \cos(\theta - \varphi)$
 M_s : magnetyzacja nasycenia
- energii anizotropii krystalicznej (tutaj jednoosiowej)
 $E_C = K_1 \sin^2\theta + K_2 \sin^4\theta + \dots$
- energii anizotropii kształtu
 $E_S = \mu_0 M_s^2 (N_a \cos^2\theta + N_b \sin^2\theta)/2$



java applet by Tim Mewes, Alabama Univ., <http://magneticslab.ua.edu/magnetization-reversal.html>

Pole anizotropii H_a

Magnetyzacja $M_s = \text{const.}$ w polu H prostopadłym do osi łatwej EA ($K > 0$) ma energię

$$E = K \sin^2 \theta - \mu_0 M_s H \sin \theta$$

Minimum E daje zależność $m = M/M_s = \sin \theta$ od H .

$$\frac{\partial E}{\partial \theta} = (2K \sin \theta - \mu_0 M_s H) \cos \theta = 0$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial \theta^2} = 2K \cos 2\theta + \mu_0 M_s H \sin \theta > 0$$

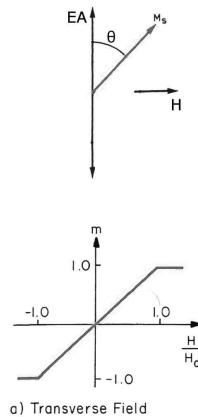
Rozwiązania:

$$\theta = +\pi/2 \text{ czyli } m = 1 \text{ gdy } H > H_a = \frac{2K}{\mu_0 M_s}$$

$$\theta = -\pi/2 \text{ czyli } m = -1 \text{ gdy } H < -H_a$$

$$m = \sin \theta = \frac{\mu_0 M_s H}{2K} = \frac{H}{H_a} \text{ gdy } -H_a < H < H_a$$

Obrót do $\theta = \pi/2$ (do osi trudnej) wymaga przyłożenia pola anizotropii H_a



to samo w polu równoległym do osi łatwej

Pole prostopadłe do osi anizotropii z $K < 0$ (osi trudnej - HA)

Identycznie jak poprzednio tylko jest $K < 0$

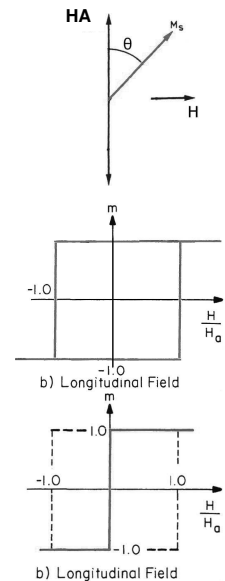
Rozwiązania:

$$\theta = +\pi/2 \text{ czyli } m = 1 \text{ gdy } H > -H_a$$

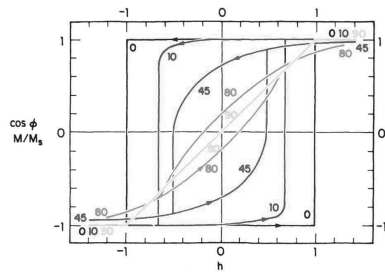
$$\theta = -\pi/2 \text{ czyli } m = -1 \text{ gdy } H < H_a = \frac{2|K|}{\mu_0 M_s}$$

Jeżeli bierzemy lokalne minima E to \Rightarrow

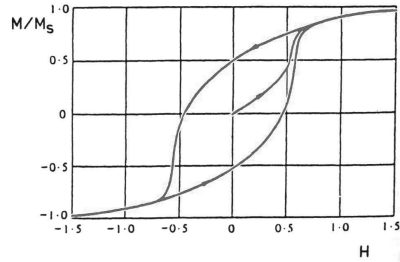
Jeżeli weźmiemy tylko globalne minimum E to \Rightarrow



SW model cd.



Pętla histerezy dla różnych kątów między osią łatwą a kierunkiem przykładania pola i pomiaru składowej momentu magn.



Pętla w modelu SW po uśrednieniu dla różnych kątów (polikryształ).

Podsumowanie: model SW tłumaczy istnienie histerezy zakładając, że (jednodomenowe) ziarna mają anizotropię magn., oraz że ich moment magnetyczny jest stały co do wartości i jedynie się obraca.

Pole koercji jest maksymalnie H_c dla polikryształu jest około 2 x mniejsze.

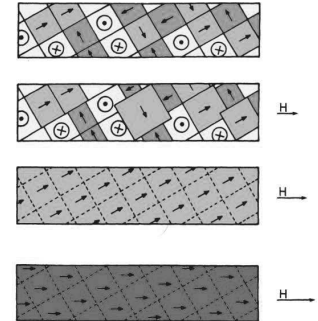
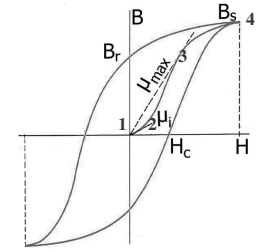
$$H_c = H_a = \frac{2K_{u1}}{\mu_0 M_s}$$

Histereza

- B_s – indukcja nasycenia [T]
- H_c – pole koercji [A/m]
- B_r – remanencja
- μ_{max} – maksymalna przenikalność
- μ_i – początkowa przenikalność

$H_c < 100 \text{ A/m}$ – materiały **magnetycznie miękkie** (mała anizotropia, mała magnetostrykcja, mało defektów, szerokie ścianki domenowe, duże domeny)

$H_c > 10000 \text{ A/m}$ – materiały **magnetycznie twarde** (duża anizotropia, dużo defektów, małe domeny, cienki ścianki, odpowiedni rozmiar ziaren)



Finite Element Method

