

### 3. Anizotropia, domeny i histereza

**Plan:**

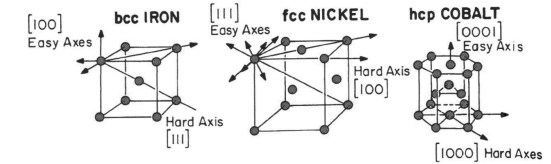
- anizotropia magnetyczna i jej źródła
- domeny magnetyczne
- model Stonera-Wohlfartha i histereza
- proces magnetyzacji

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

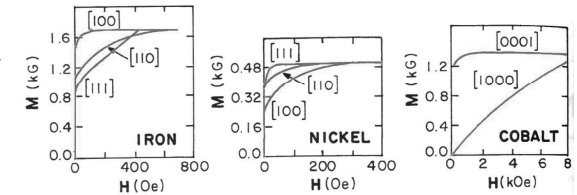
Michał Rams  
Instytut Fizyki, Uniwersytet Jagielloński  
www.uj.edu.pl/web/zinm  
11.2016

### Oś łatwa i trudna

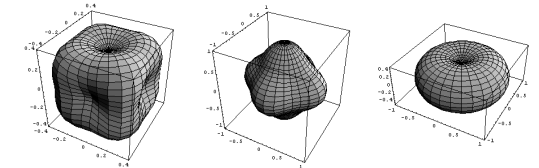
bez zewnętrznego pola mom.magn. w stanie uporządkowanym ustawiają się zwykle wzdłuż osi łatwej



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



energia anizotropii w funkcji kierunku



rys wg: R. O'Handley book

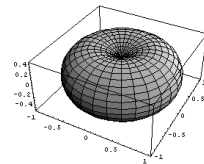
### Anizotropia magnetyczna

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 to oś trudna.

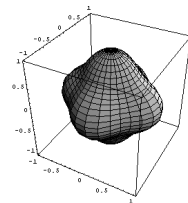


Co,  $K_{u1} = +41 \times 10^4 \text{ J/m}^3$

W przypadku symetrii kubicznej

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

$\alpha_i = \cos \theta_i$  cosinusy kierunkowe



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

### Anizotropia magnetyczna cd.

#### Źródła

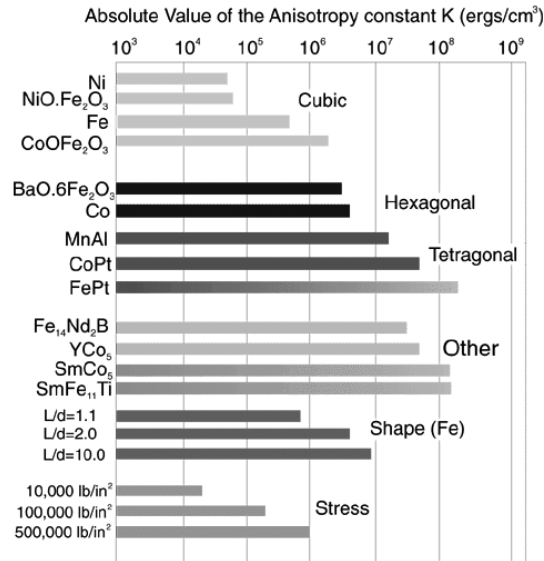
1. anizotropia jedno-jonowa - skutek istnienia pola krystalicznego
2. anizotropia kształtu - (współczynnik demagnetyzacji) szczególnie ważna dla układów niskowymiarowych
3. anizotropia oddziaływań wymiennych

#### 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 <sup>u</sup>	295	41	15
Ni <sub>80</sub> Fe <sub>20</sub>	295	-0.03	
Tb <sup>u</sup>	4.2	-5650	-460
Gd <sup>u</sup>	4.2	-12	
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	295	-0.9	
SmCo <sub>5</sub> <sup>u</sup>	295	1100 - 2000	
Fe <sub>14</sub> Nd <sub>2</sub> B <sup>u</sup>	295	500	

<sup>u</sup> = uniaxial :  $K_{u1}$   $K_{u2}$

# Anizotropia

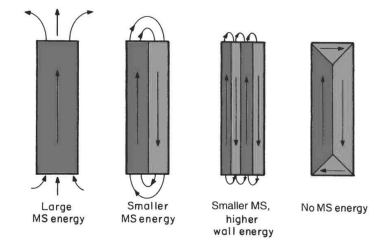


Wykład: Materiały magnetyczne

5

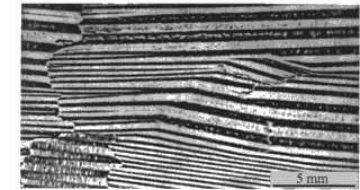
# Domeny

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

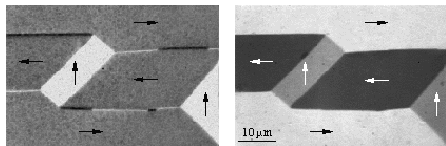


Domeny w stali transformatorowej, obrazowanie metodą Bittera, S.Arai, Nippon Steel

Wykład: Materiały magnetyczne

6

# Domeny - galeria



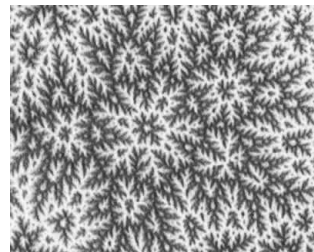
FeSi (100) crystal, Magneto Optical Kerr Microscope, 60x40um, A.Hubert, R.Schäfer, *Magnetic domains*, 1998



Nd2Fe14B, TEM



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



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

Wykład: Materiały magnetyczne

7

# Energia magnetostatyczna

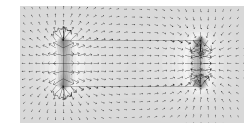
Gęstość energii  $u = -\mu_0 \mathbf{M} \cdot \mathbf{H}$

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

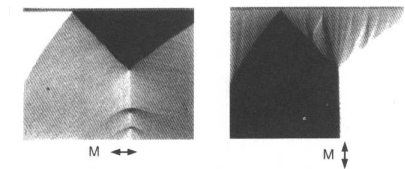
Pole  $H_d$  jest największe na końcach, tam gdzie  $\text{div } \mathbf{M} \neq 0$

➤ 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  $H_d$  demagnetyzacji domeny o stałym  $M$



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

Wykład: Materiały magnetyczne

8

# 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  $H$ .

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

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

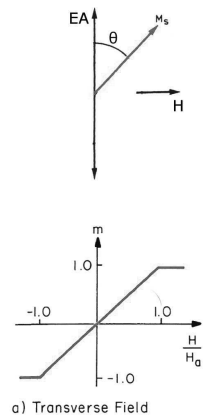
Rozwiązania:

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

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

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

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  $K < 0$

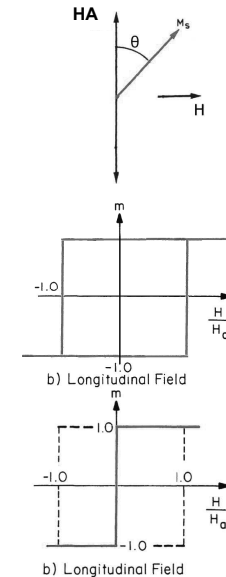
Rozwiązania:

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

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

Jeżeli bierzemy lokalne minima  $E$  to  $\Rightarrow$

Jeżeli weźmiemy tylko globalne minimum  $E$  to  $\Rightarrow$



# model Stonera-Wohlfartha

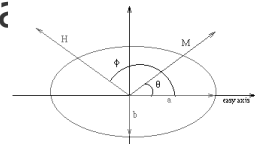
$H$ : zewnętrzne pole

$M$ : wektor magnetyzacji ziarna

$\theta$ : kąt między osią łatwą a  $M$

$\varphi$ : 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 magnetostatycznej

$$E_Z = -\mu_0 M_s H \cos(\theta - \varphi)$$

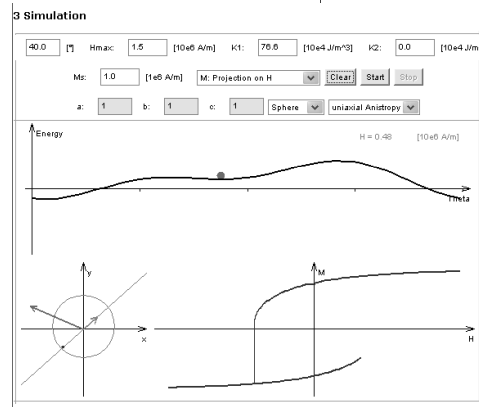
$M_s$ : magnetyzacja nasycenia

• energii anizotropii krystalicznej (tutaj jednoosiowej)

$$E_C = K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta + \dots$$

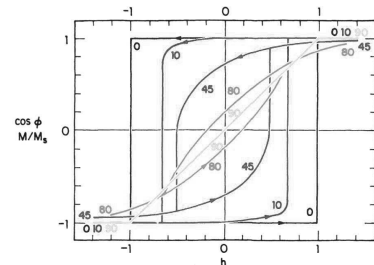
• energii anizotropii kształtu

$$E_S = \mu_0 M_s^2 (N_a \cos^2 \theta + N_b \sin^2 \theta) / 2$$

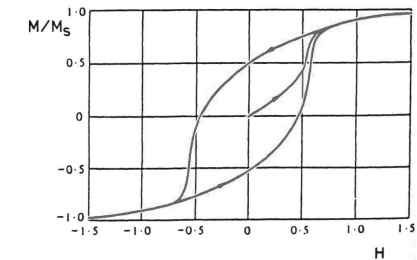


java applet by Tim Mewes, Alabama Univ., <http://www.bama.ua.edu/~tmewes/>

# 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

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

$H_c$  dla polikryształu jest około 2 x mniejsze.

# Histeresa

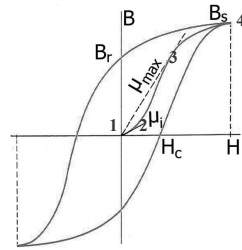
$B_s$  – indukcja nasycenia [T]

$H_c$  – pole koercji [A/m]

$B_r$  – remanencja

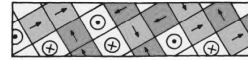
$\mu_{max}$  – maksymalna przenikalność

$\mu_i$  – 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, cienkie ścianki, odpowiedni rozmiar ziaren)

