Magnetyki

Maria Walczak

slajdy 1- 16 są tylko dla chętnych

Literatura podstawowa

- Marek Blicharski – Wstęp do inżynierii materiałowej WNT Warszawa 2001r
- Szczepańska H.: Procesy technologiczne w elektronice półprzewodników WNT, Warszawa, 1980.
- Zdzislaw Celiński – „Materiałoznawstwo elektrotechniczne"- Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1998.

Literatura dodatkowa

- St. Jaźwiński, A. Ciszewski, T. Radomski, A. Szummer- „Z zagadnień inżynierii materiałowej"
- Kittel Ch.:Wstep do fizyki ciala stalego, PWN, Warszawa 1999r.

Stałe materiałowe

- $\gamma=1/\rho$ - konduktywność= $e\cdot n\cdot v$ $1[As\cdot 1/m^3\cdot m^2/Vs] = 1S/m$
- ε - przenikalność dielektryczna = C/C_o $\varepsilon_0 = 8.854\cdot 10^{-12}$ F/m
- μ - przenikalność magnetyczna = B/H $\mu_0 = 4\cdot\pi\cdot 10^{-7}$H/m, μ_r ♍ 1- diamagnetyki, μ_r >1 – paramagnetyki, μ_r ◘ 1 - ferromagnetyki

Elementy teorii atomowej magnetyzmu

- Każdy elektron wirujący po orbicie jest obdarzony momentem magnetycznym : orbitalnym
- $\mu_L = -e/2m_e\cdot L = -e\cdot n\cdot h/4\pi m_e$, L- orbitalny moment pędu, e – ładunek elektronu, m_e – masa elektronu, n = 1,2,3..= K,L,M,N,O,P,Q spinowym
- $\mu_S = -e/m_e\cdot S$, S- spinowy moment pędu elektronu = ±1/2
- Magnetyczny moment jądra atomu(protony i neutrony) jest ok. 1000 razy mniejszy od momentu spinowego i orbitalnego.

Wypadkowy moment magnetyczny atomu = $\mu_L + \mu_S$

Magneton Bohra μ_B

$\mu_B = |e|\cdot h/4\pi m_e = 9.27\cdot 10^{-24}$ J/T (Am^2)

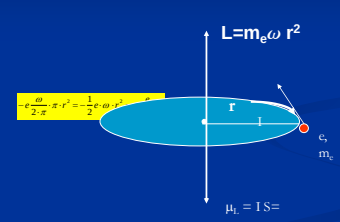
orbitalny moment magnetyczny:

$$\mu_L = \mu_B\cdot\sqrt{l\cdot(l+1)}$$
$$\mu_{Lz} = \mu_B\cdot m$$
$$l = 0,1,2....$$
$$m = -l,-l+1,...l-1,1$$

Spinowy moment magnetyczny

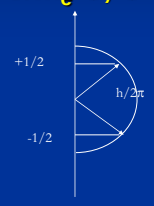
$$\mu_S = \mu_B\cdot\sqrt{s\cdot(s+1)}$$
$$s = 1/2$$
$$\mu_{S,z} = 2\cdot\mu_B\cdot m_S$$
$$m_S = \pm\frac{1}{2}$$

Momenty orbitalne elektronu



Momenty spinowe elektronu

- $\mu_S = -e/m_e \cdot S$, $S = \pm 1/2 h/2\pi$



Rozpatrujemy ruch elektronu na kołowej orbicie, w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku pola.
Gdy nie ma pola zewnętrznego, siła kulombowska jest siłą dośrodkową, określającą ruch kołowy elektronu z prędkością ω;

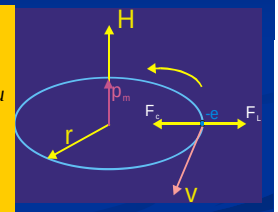
$$F_C = m\omega^2 \cdot r$$

$$F_L = Bev$$

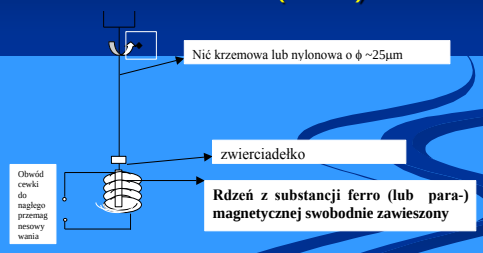
Ruch elektronu ulega spowolnieniu pod wpłpływ różóżni sił

$$mr(\omega - \Delta\omega)^2 = F_C - Bev$$

$$\Delta\omega = \frac{-eB}{2m}$$



Doświadczenie magnetomechaniczne Einsteina-de Haasa (1915)



Momenty mechaniczne

- **Moment orbitalny elektronu M_{orb}, moment spinowy elektronu M_{Sp}**
  - **Stosunek żyromagnetyczny:**

$$g = \frac{M_{magn\ atomu}}{M_{mech\ atomu}}$$

$$g_{orb} = \frac{1}{2} \cdot \frac{e}{m \cdot c}$$

$$g_{spin} = \frac{e}{m \cdot c}$$

Wielkości charakteryzujące pole magnetyczne

- $\varkappa = M/H$ – podatność magnetyczna bezwzględna, M=m/S- polaryzacja magnetyczna (gęstość powierzchniowa masy magnetycznej), H- zewnętrzne natężenie pola magnetycznego (bez pola wewnętrznego $H_w = \alpha M$, α- stała pola wewnętrznego, $\varkappa = C/T$)
- $B = \mu_0 H + M$ – indukcja magnetyczna $B = \Phi/S$
- $\mu = B/H$, $\mu_r = \mu/\mu_0$
- $B/H = \mu_0 + M/H = \mu_0 + \varkappa$
- $\mu = \mu_0 + \varkappa$, $\varkappa_r = \varkappa/\mu_0$
- $\mu = \mu_0(1 + \varkappa_r)$, $\mu_r = 1 + \varkappa_r$
- **Stała Curie C**

$$C = \frac{\mu_0 N \overline{m}_{ef}^{\,2} \mu_B^{\,2}}{3k}$$

$$k = 1.38 \cdot 10^{-21} \frac{J}{K} \qquad h = 6.625 \cdot 10^{-34} Js$$

Rozkład momentów spinowych

Powłoka	K	L		M			N	m	Własności magnetyczne
Podpowłoka	1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	μ_B	
O	↑↓	↑↓	↑↑↑ ↓					2	paramagnetyk
Ne	↑↓	↑↓	↑↑↑ ↓↓↓					0	diamagnetyk
Fe	↑↓	↑↓	↑↑↑ ↓↓↓	↑↓	↑↑↑ ↓↓↓	↑↑↑↑↑ ↓	↑↓	4	ferromagnetyk

Ferromagnetyki

- Spontaniczne namagnesowanie w domenach,
- Namagnesowanie przy braku zewnętrznego pola różne od 0
  - Fe, Ni, Co, Gd, Er, Dy, Tm (tul), Ho, Tb

M=(C/T)(H+αM)

Prawo Curie- Weissa

$\varkappa = C/(T-T_c)$

- Fe- 765^{0}C — T_{CGd}=289K , T_{CHo}=20K
- Co- 1075^{0}C — T_{CDy}=105K (89K), T_{CEr}=20K
- Ni – 356^{0}C — T_{CTb}=220K, T_{CTm}=32K

- Energia magnetyczna w atomie(momenty magnetyczne spinowe, orbitalne i jądra atomu):

10^{-23}J/atom

- Energia kinetyczna ruchów cieplnych atomów spowodowanych temperaturą w 293K

10^{-21}J/K

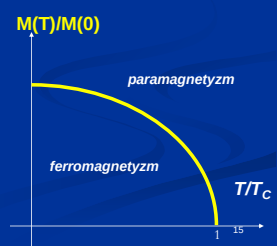
Wg Weissa istnieje pole wewnątrzmolekularne H_i = ηJ, gdzie η- siła wewnątrzmolekularnego pola

⇒ $H^{'}$=H+ ηJ

domeny Weissa ~0.01mm, ścianki Blocha ~30nm

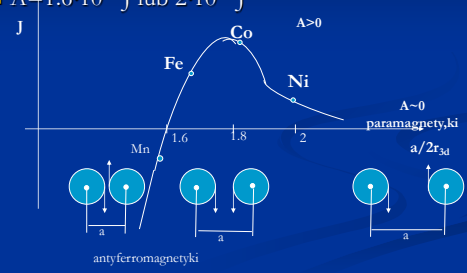
Prawo Curie-Weissa

$$\chi = \frac{C}{T - T_C}$$



Warunek dostateczny istnienia ferromagnetyzmu

- A=1.6·10^{-21}J lub 2·10^{-21}J



Paramagnetyki

Atomy, jony lub cząsteczki o nieparzystej l. elektronów np.. Na, gazowy NO, rodniki organiczne

Swobodne atomy i jony z niewypełnioną powłoką wewn. np. pierwiastki grupy przejściowej i pierwiastki ziem rzadkich – Mn^{2+}, Gd^{3+}, U^{4+}

Kilka związków o parzystej l. elektronów, O_2

Metale Al, Pt, Pd, Nd (1,0032)

Przykładowe diamagnetyki

- μ_r<1, $\varkappa_r$<0
- Ag, Au Cu, Zn, Pb, Hg, Si, S, P, Bi (0.999834), Sb, Tl, Ga, J, C-grafit,
- Niektóre stopy podwójne Cu-Zn, lód, woda, wszystkkie gazy oprócz tlenu
- Al_2O_3, NaCl

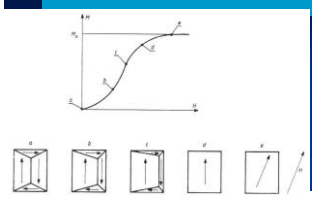
Antyferromagnetyzm

- Oddziaływanie między sąsiednimi jonami ustawia spiny przeciwrównolegle
- $m_{ef} \sim 0$
- μ_r mniejsze niż w ferromagnetykach, brak zastosowania praktycznego
- Kryształy o wiązaniach jonowych: MnO, MnAs, MnS, NiCr, Cr_2O_3, VO_2

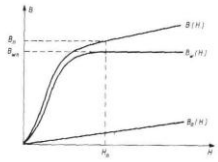
Ferrimagnetyzm

- Magnetyzm typu ferrytowego.
- Spiny antyrównoległe nie mają jednakowych wartości bezwzględnych
- $\mu_{r\ ferrimagn} < \mu_{r\ ferromagn}$
- Występuje w kryształach jonowych zbudowanych z dwóch nierównoważących się podsieci
- Fe_2O_3 + tlenki jednego lub kilku metali- Li, Zn, Cd, Pb, Cu, Mn, Mg

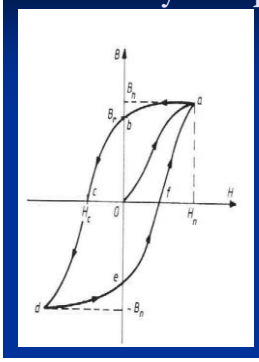
Magnesowanie ferromagnetyka



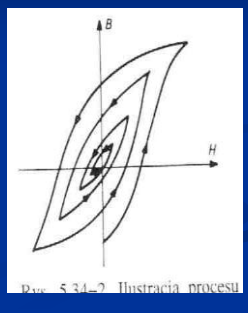
a) do H~0.01-0.1A/m – sprężyste i odwracalne przesunięcia granic domen
b) od 0.01A/m do H_C sprężyste przemieszczanie granic domen i skokowe zmiany kierunku wektora namagnesowania spontanicznego- pojawiają się procesy nieodwracalne
c)μ_{max}, skoki Berkhausena



Statyczna pętla histerezy



Dla dynamicznej f ⊙ ,μ⊙, ΔP_h⊙



Rys. 5.34–2. Ilustracja procesu

Straty w ferromagnetyku

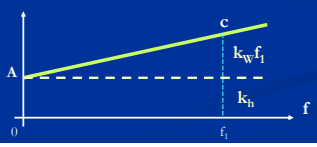
- Energia strat z histerezy

$$p_{h(1\,cykl)} = \oint HdB \quad na \quad jednostkę \quad obj.$$

$$P = P_h + P_w = k_h B_m^{\ \alpha} \cdot f + k_w B_m^{\ 2} f^2$$

- α =1.6-3.2, k_h=0.08-0.1, $k_W=C_W b^2/\varrho$, C_W – współczynnik zależny od materiału, b – grubość blachy, ϱ- rezystywność
- Jeśli B_m = const, f=var, α=2 $P=k_h f + k_W f^2$

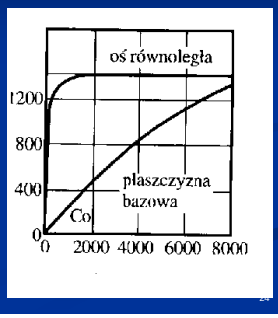
p/f



Anizotropia kryształów ferromagnetycznych

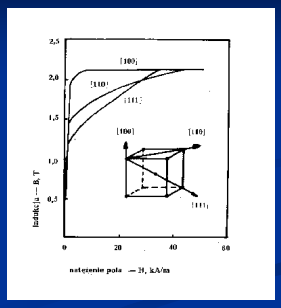
W kryształach ferromagnetycznych wyróżniamy:

- energię magnetyczną własną,
- energię wymiany,
- energię magneto-krystaliczną (anizotropii).



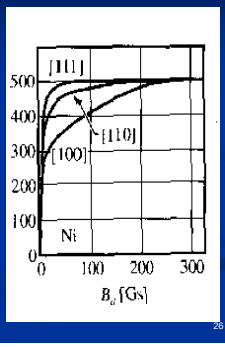
Anizotropia kryształu żelaza

- Fe - bcc, a=2.87 A.
- Co - hcp , a = 2.51 A, b=4.07 A



Anizotropia kryształu niklu

- Kryształ niklu - sieć fcc, a = 3.52 A
- Przeliczenie jednostek:
- 1 T = 10 000 Gs



Relaksacja magnetyczna

- The linewidth of the ferromagnetic resonance absorption in nickel, iron and cobalt was measured in pulsed magnetic fields up to 35 T at frequencies between 400 and 900 GHz. With this configuration the authors were able to determine the intrinsic relaxation in the temperature range between 10 and 300 K. Their results show that there is a universal behaviour of the relaxation for the 3d ferromagnets.

Współczynnik strat magnetycznych

- $tg\delta_m$- charakteryzuje kątowe opóźnienie wektora **B** względem natężenia pola magnetycznego **H**
- Dla ferrytów nie powinien przekraczać 0.02 przy f=1MHz
- Zredukowany współczynnik strat magnetycznych

$$\frac{tg\,\delta_m}{\mu}$$

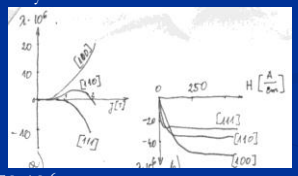
Magnetostrykcja

- **Zjawisko zmiany kształtu i rozmiarów materiałów magnetycznych pod wpływem pola magnetycznego lub przeciwnie – zjawisko zmiany własności magnetycznych pod wpływem przyłożonej z zewnątrz siły (zmiana orientacji domen)- wynika z samorzutnej deformacji prowadzącej do zmniejszenia energii anizotropii**
- **Zjawisko odkryte przez Jamesa Joula w 1842 (zmiana dł. Ni), efekt odwrotny – zjawisko Villari'ego,**
- **efekt Wiedemanna – skęcenie materiału przy śrubowym polu magnetycznym i odwrotny – Matteuci'ego.**
- **Miarą magnetostrykcji**

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} \quad \omega = \frac{\Delta V}{V} \quad \approx 10^{-5}...10^{-3}$$

Magnetostrykcja (c.d.)

- Wielkość m. zależy od składu chem. materiału, kierunku i wartości natężenia zewnętrznego pola magnetycznego, obróbki termicznej, mechanicznej i temperatury otoczenia



- λ_{max} ~$50\cdot10^{-6}$
- Zastosowanie- generacja ultradźwięków (SONAR- II wojna światowa)

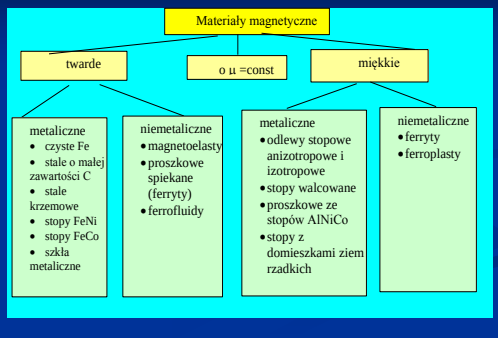
Współczesne materiały magnetostrykcyjne

- Tb i Dy 10 000x λ_{maxNi} , b. niskie temp.,
- $TbFe_2$, $DyFe_2$ 293K, ale silne pola magn.,
- od 1980 - $Tb_{.27}Dy_{.73}Fe_{1.95}$ (Terfenol-D)
  Tb.27Dy.73Fe1.95
  λ = 1500ppm

Starzenie się materiałów magnetycznych

- jest to zjawisko zmian w czasie własności ferro i ferrimagnetycznych
- μ⑩, H_C⑨, B_r⑩ (zmiana kształtu pętli histerezy)
- Wpływ na st. wywierają:
  - zanieczyszczenia materiału (zmiana rozkładu zanieczyszczeń, rozpad niestałych połączeń chemicznych
  - temperatura pracy w polu magn.
  - zmniejszenie naprężeń wewnętrznych
- Starzenie sztuczne – współdziałaniem podwyższonej temperatury i drgań mechanicznych μ

Podział materiałów magnetycznych



Magnetyki twarde

Materiał	Skład	B_r [T]	H_c [A/m^2]	$(BH)_{max}$ [J/m^3]
stal wolframowa	5% W, 0.7% C	1.0	5 500	$2.6\cdot10^3$
Alnico typ 5B	8% Al., 14% Ni, 24% Co, 3% Cu, reszta Fe	1.3	5 200	$4.4\cdot10^4$
Alnico typ 9	7% Al., 15% Ni, 35% Co, 4% Cu, reszta Fe	1.0	11 940	$8\cdot10^4$
Cunife	60% Cu, 20% Ni, 20% Fe	0.54	44 000	$1.5\cdot10^4$
węglowa stal martenzytyczna	98.1% Fe, 0.9% C, 1% Mn	0.95	4 000	1 600
stal wolframowa	92.8% Fe, 6% W, 0.5% Cr, 0.7% C	0.95	5 900	2 600
Cunico	29% Co, 21% Ni, 50% Cu	0.34	54 000	6 400
spiekany Alnico 8	34% Fe, 7% Al., 15% Ni, 35% Co, 4% Cu, 5% Ti	0.76	123 000	36 000
stop Sm- Cu- Co	(stop lekki w awiacji)		710 000	190 000
stop amorficzny Nd_2– Fe_{14} – B	taśma o grub. 30μm, ziarna 50 – 100 nm	1.2	1 000 000	$360\cdot10^3$ ($430\cdot10^3$)
orientowany Ferroxdur	BaO- $6Fe_2O_3$	0.32	240 000	20 000 ρ~10^4Ωm
ferryt Ba			$160\cdot10^3$	
ferryt Sr				$32\cdot10^3$
ferryt Li		0.6		

Typowe własności niektórych materiałów magnetycznych miękkich

Materiał	Skład	μ	B_s [T]	$\Delta p_h/f$ [J/m^3]	ρ [Ωm]	μ_{max}
Fe przetapiane w wodorze	Fe + 0.005%C, 0.001%O	20 000	2.15	(H_C= 2.4A/m)	$0.1\cdot10^{-6}$	340 000
Fe karbonylkowe	Fe + 0.005%C+ 0.005% O_2	3 300	2.17	(H_C = 6.4A/m)	$0.1\cdot10^{-6}$	21 500
Fe elektrolityczne	Fe+0.02 %C +0.01%O_2	1 000	2.16	(H_C= 28A/m)	$0.1\cdot10^{-6}$	15 000
Armco	Fe + 0.025% C +0.035%O	250	2.0	(H_C = 80A/m)	$0.15\cdot10^{-6}$	5 000
stop amorficzny METGLAS 2605 TCA	$T_{80}M_{20}$, T: np.Fe,Ni, Co; M – metaloid B, P, Al., C, Si		1.56	(H_C = 8.4 –19.7A/m)	$137\cdot10^{-6}$	160 000
Stop nanokrystaliczny VITROPERM	Fe, Si, B, Nb, Cu, 10nm		1.2	(H_C = 2.1 –12.7A/m)	$115\cdot10^{-6}$	100 000
PERMENORM	permalloy 50%NiFe		1.55	(H_C = 3.9-58.3A/m)	$45\cdot10^{-6}$	5 500

Typowe własności niektórych materiałów magnetycznych miękkich (c.d)

blacha krzemowa zimnowalcowana (orientow)	97% Fe, 3% Si	1400	2.01	40	$4.7\cdot10^{-7}$	40 000
żeliwo techn.	99.95% Fe	150	2.14	270	$1\cdot10^{-7}$	20 000
45 Permalloy	55% Fe, 45% Ni	2 500	1.6	120	$4.5\cdot10^{-7}$	
Supermalloy	79%Ni, 15% Fe, 5% Mo, 0.5% Mn	75 000	0.8T		$6\cdot10^{-7}$	100 000
Ferroxcube A	48% $MnFe_2O_4$, 52% $ZnFe_2O_4$	1 400	0.33	40	2 000	
Ferrocube B	36%Ni Fe_2O_4, 64% $ZnFe_2O_4$	650	0.36	35	10^7	

- Ferryty magnetyczne twarde.
  Struktura heksagonalna.
  Własności - Bmax = 0.3 – 0.4 T dla metalicznych 0.8 – 2.5 T.
  ρ = 102 do 109 Ωm
  Zastosowanie – w głośnikach.

Ferryty magnetyczne miękkie.

Zastosowanie – w telefonii wielokanałowej, w radiolokacji, elektroakustyce w szybkich elektronicznych maszynach cyfrowych

Max temp. Curie dla ferromagnetyków twardych metalicznych – 1121oC (Co), 670oC – ferryt Li,

- przenikalność początkowa max – 163 000 (Ni- Fe- Mo), 4000 – ferryt Mn- Zn.

Ferryty o prostokątnej pętli histerezy.

- Ferryty magnezo- managanowe oraz niektóre inne materiały posiadające pętlę histerezy prostokątnej znalazły zastosowanie jako elementy w urządzeniach logicznych i pamięciowych elektronowych maszyn cyfrowych.

Analogie

- $d\Phi = edt$
- $\Theta = R_\mu \Phi$
- $\Theta = Iz$
- $R_\mu = l/\mu S$