



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

## NAUKA O MATERIAŁACH

**Wykład XIII:  
Właściwości magnetyczne**

JERZY LIS  
Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki  
Katedra Ceramiki i Materiałów Ogniotrwałych

---

---

---

---

---

---

---

---



**Treść wykładu:**

Treść wykładu:

1. Wprowadzenie
2. Rodzaje magnetyzmu
3. Przyczyny powstawania momentu magnetycznego
4. Ferromagnetyki
5. Ferryty
  - a) Struktura
  - b) Mikrostruktura a właściwości




---

---

---

---

---

---

---

---



### Wprowadzenie

**Oddziaływanie pola magnetycznego na materiał**



Zachowanie materiału w polu magnetycznym znajduje zastosowanie w wielu materiałach funkcjonalnych

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH** WŁAŚCIWOŚCI MAGNETYCZNE

**Indukcja magnetyczna**

Wiadomości wstępne



Prąd przepływający w obwodzie zamkniętym lub trwały magnes wytwarza pole magnetyczne  
 W materiale znajdującym się w polu magnetycznym indukowane jest wewnętrzne pole magnetyczne mierzone wielkością indukcji magnetycznej **B**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH** WŁAŚCIWOŚCI MAGNETYCZNE

**Indukcja magnetyczna**

Wiadomości wstępne

$B = \mu_r \mu_0 H$   
 $B = \mu_0 H + M = \mu_0 H + \chi_m \mu_0 H = \mu_0 H (1 + \chi_m)$

**Gdzie:**  
 $\mu_r$  – przenikalność magnetyczna materiału  
 $\mu_0$  – przenikalność magnetyczna próżni  
 $H$  – natężenie pola magnetycznego  
 $B$  – indukcja magnetyczna  
 $M$  – namagnesowanie  
 $\chi_m$  – podatność magnetyczna materiału

---

---

---

---

---

---

---

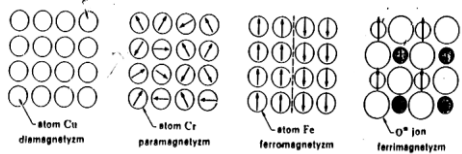
---

---

---

**AGH** WŁAŚCIWOŚCI MAGNETYCZNE

**Rodzaje magnetyzmu**



**Diamagnetyki** – każdy atom ma zerowy moment magnetyczny (np. Cu)  
**Paramagnetyki** – momenty magnetyczne są zorientowane przypadkowo i się znoszą (np. Cr)  
**Ferromagnetyki** – momenty magnetyczne są uporządkowane wewnątrz każdej domeny (np. Fe)  
**Ferrimagnetyki** – istnieją podstruktury posiadające zorientowane jednakowo i zróżnicowane momenty magnetyczne (np. spinele)

---

---

---

---

---

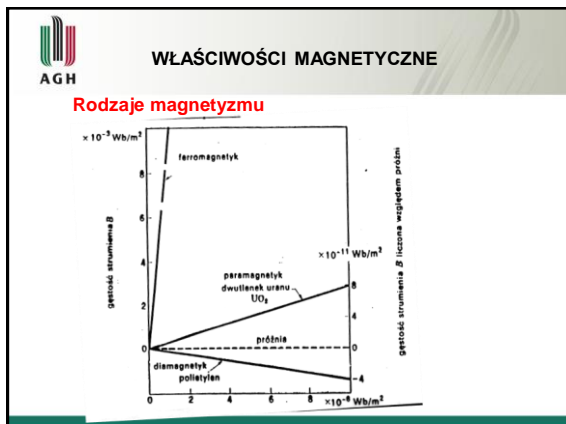
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**WŁAŚCIWOŚCI MAGNETYCZNE**

**Przyczyny powstawania momentu magnetycznego**

1. **Momenty magnetyczne orbitalne**  
 Krążące po orbitach (model) elektrony wywołują momenty magnetyczne  
 $m_{or} = (-e/2m_e)I$  I – moment pędu elektronu  
 Moment magnetyczny orbitalny jest skwantowany  
 $M_{or} = -m_B L$      $m_B = (h/2\pi)(e/2m_e) - \text{magneton Bohra} = 9,27 \times 10^{-24} \text{ J/T}$

2. **Momenty magnetyczne spinowe**  
 Spin elektronu (modelowo obrót wokół osi) wynosi:  
 $m_{sp} = -2m_B S$     S – wypadkowy moment spinowy pędu elektronu  
 Efektywny (nieskompensowany) spinowy moment magnetyczny  
 $m_{e,sp} = -2 m_B (S(S+1))^{1/2}$

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**WŁAŚCIWOŚCI MAGNETYCZNE**

**Przyczyny powstawania momentu**

Jon	Moment w $m_B$	Konfiguracja	Niesparowane e	Moment
$Gd^{3+}$	0	$(He)2s^2 4f^7$	0	0
$Mg^{2+}$	0	$(He)2s^2 2p^6$	0	0
$Mn^{2+}$	5,9	$(Ar)3d^5$	5	5,92
$Fe^{2+}$	5,4	$(Ar)3d^6$	4	4,9
$Fe^{3+}$	5,9	$(Ar)3d^5$	5	5,92
$Ni^{2+}$	3,2	$(Ar)3d^8$	2	2,83
$Zn^{2+}$	0	$(Ar)3d^{10}$	0	0
$Ce^{3+}$	2,4	$(Xe)4f^7 5s^2 5p^6$	1	2,54
$Nd^{3+}$	3,5	$(Xe)4f^7 5s^2 5p^6$	3	3,5

Nieskompensowane wypadkowe momenty magnetyczne występują w materiałach w których orbitale uczestniczące w wiązaniach nie są w pełni obsadzone czyli dla pierwiastków i kationów metali grup przejściowych i ziem rzadkich.  
 Nieskompensowane momenty magnetyczne zależą od momentów spinowych.

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**WŁAŚCIWOŚCI MAGNETYCZNE**

**Ferro i ferrimagnetyki**

- Przykładem ferromagnetyków są żelazo, kobalt, nikiel, pierwiastki ziem rzadkich
- Ferromagnetyki posiadają wysokie wartości nieskompensowanych momentów magnetycznych a w ich kryształach w niskich temperaturach, poniżej tzw. temperatury Curie powstają obszary posiadające wypadkowy silny moment magnetyczny – domeny
- pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego następuje porządkowanie domen wskutek ich obrotu i rozrostu
- w temperaturach powyżej temperatury Curie efekt ten zanika
- charakterystyczne stałe materiałowe ferromagnetyków: przenikalność magnetyczna początkowa, indukcja nasycenia, pole koercji (energia rozmagnesowania)

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**WŁAŚCIWOŚCI MAGNETYCZNE**

**Ferromagnetyki**

Krzywe histerezy ferromagnetyków „miękkich” i „twardych”

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**WŁAŚCIWOŚCI MAGNETYCZNE**

**Ferryty**

**Materiały tlenkowe zawierające jony  $Fe^{+3}$  posiadające właściwości ferrimagnetyków**

Typy struktur:  
 - Spinelu –  $MeFe_2O_4$   
 - Granatu –  $Y_3Fe_5O_{12}$   
 - Magnetoplumbitu –  $MeFe_{1-x}O_{13}$

Przykład – spinel manganowo żelazowy

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

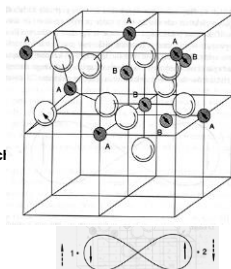
---

---

**AGH** WŁAŚCIWOŚCI MAGNETYCZNE

**Ferryty**

- > Struktura spinelu zbudowana jest z gęsto upakowanych anionów tlenu
- > Kationy znajdują się w lukach tetraedrycznych (A) lub oktaedrycznych (B)
- > Zapis  $A[B]_2O_4$  np.  $Fe^{3+}[Mn^{2+}Fe^{3+}]O_4$
- > Kationy znajdujące się w różnych lukach oddziałują ze sobą poprzez jony tlenu tzw. A-O-B wymiana kwantowo-mechaniczna
- > Spiny tych samych kationów ( $Fe^{3+}$ ) się znoszą natomiast  $Mn^{2+}$  pozostają niesparowane




---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH** WŁAŚCIWOŚCI MAGNETYCZNE

**Ferryty**

**Spinele – ferryty miękkie  
Granaty i magnetoplumbity – ferryty twarde**

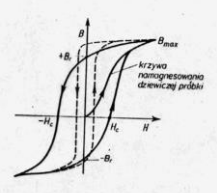
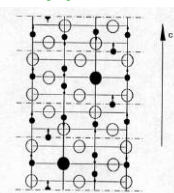



Fig. 6.4. Struktura magnetoplumbitu. Energia sieci kation – energia drzwiczy; sieci kationów:  $Fe^{3+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ; sieci kationów:  $Fe^{3+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ; sieci kationów:  $Fe^{3+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ .

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH** WŁAŚCIWOŚCI MAGNETYCZNE

**Ferryty**

Wzór ferrytu	$T_C, ^\circ C$
<b>Ferryty o strukturze spinelu:</b>	
$Fe^{3+}[Fe^{3+}Fe^{3+}]O_4$	574-587
$Fe^{3+}[Ni^{2+}Fe^{3+}]O_4$	583
$Fe^{3+}_0.7Zn^{2+}_0.3[Ni^{2+}_0.1Fe^{3+}_{1.3}]O_4$	435
$Fe^{3+}_0.5Zn^{2+}_0.5[Ni^{2+}_0.5Fe^{3+}_{1.5}]O_4$	295
<b>Ferryty o strukturze granatu:</b>	
$Y^{3+}_3Fe^{3+}_5O_{12}$	550-575
$Y^{3+}_3Al^{3+}_2Fe^{3+}_4O_{12}$	370-550
<b>Ferryty o strukturze magnetoplumbitu:</b>	
$BaFe_{12}O_{19}$ (izotropowy)	450
$BaFe_{12}O_{19}$ (anizotropowy)	340

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH**

## WŁAŚCIWOŚCI MAGNETYCZNE

### Ferryty

Ferryty są polikryształami ceramicznymi otrzymanymi drogą spiekania z proszków

Ich właściwości zależą zarówno od struktury: budowa krystaliczna i skład pierwiastkowy; jak i mikrostruktury: gęstość, porowatość, wielkość i kształt ziaren i porów




---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH**

## WŁAŚCIWOŚCI MAGNETYCZNE

### Ferryty

Właściwości wybranych ferrytów

Ferryty magnetyczne:	miękkie		twarde	
	MnZn <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Ni <sub>2</sub> Zn <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Y <sub>3</sub> Fe <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub>
Przenikalność początkowa $\mu_{r0}$	przy 1 kHz 6000-20000	500-1800		
	przy 5 MHz 500	400-450		0,21±0,41
Pole koercji $H_c$	[A/m] 1,6-3,2	15-60	120	200000
Temperatura Curie $T_c$	[°C] 105	80-250	200	340
Rezystywność $\rho$ w 20°C	[ $\Omega$ m] 0,003-0,005	$1 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^{10}$	
Indukcja nasycenia $B_s$	[T] 0,4-0,5	0,3-0,4	0,18	0,35-0,48

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH**

## WŁAŚCIWOŚCI MAGNETYCZNE

Niektóre zastosowania i wymagane właściwości ferrytów

Zastosowania	Wartości podawanych parametrów		Przykładowe ferryty
	miękkie	wysokie	
Magnesy trwałe		$H_c, B_r, B_s$	SmFe <sub>2</sub> O <sub>7</sub> , BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub>
Główce do zapisu magnetycznego		$\mu_r, B_r, \rho$	Ni <sub>2</sub> Zn <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
Rdzenie anten ferrytowych		$\mu_r$	Mn <sub>2</sub> Zn <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
Przewody na silny magnetyczny do zapisu (zasilacze audio, wideo i cyfrowych)		$B_s$	γ-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CrO <sub>2</sub>
Przemysł polimerizacyjny		$B_s, T_c$	Y <sub>3</sub> Gd <sub>2</sub> O <sub>10</sub> Fe <sub>23</sub> Si <sub>10</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>52</sub>
Rdzenie cewek indukcyjnych dla średnich częstotliwości		$\mu_r$	Mn <sub>2</sub> Zn <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
Rdzenie cewek indukcyjnych dla wysokich częstotliwości		$\mu_r, \rho$	Ni <sub>2</sub> Zn <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub>
Elementy urządzeń mikrofalowych (<math>10^3</math> MHz)		$B_s, \rho$	ferryty o strukturze magnetoplambin
Elementy urządzeń mikrofalowych (<math>10^9</math> MHz)		$\rho$	ferryty o strukturze splecia i granatu

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



---

---

---

---

---

---

---

---