

MAGNETNI MATERIJALI

MAGNETNI MATERIJALI

- ❑ Magnetizam je poseban oblik međudejstva između nosilaca naelektrisanja koji se kreću, a prenosilac tog međudejstva između razdvojenih materijalnih objekata naziva se magnetnim poljem. Svako kretanje nosilaca naelektrisanja predstavlja izvor magnetnog polja.
- ❑ Makroskopska magnetna svojstva materije se objašnjavaju postojanjem magnetnog momenta u atomima i molekulima materije.
- ❑ Kretanje elektrona u atomu uslovno se može razložiti na kretanje po određenim orbitama, zbog koga elektron poseduje orbitalni magnetni momenat i
- ❑ Kretanje oko sopstvene ose, koje se naziva spin, usled koga elektron poseduje magnetni momenat elektronskog spina (spinski magnetni momenat elektrona).
- ❑ Makroskopska veličina, kojom se karakteriše stanje namagnetisanosti, je **vektor magnetizacije** \vec{M} (vektor gustine magnetnog momenta).

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{m}}{\Delta V} \quad [\text{A/m}], \quad \text{gde je } \vec{m} \text{ magnetni momenat } [\text{Am}^2].$$

MAGNETNI MATERIJALI

Za magnetike koji imaju jednake magnetne momente važi:

$$\vec{M} = N\vec{m} \quad \text{gde je } N \text{ broj magnetnih momenata u jedinici zapremine.}$$

Za linearne magnetne materijale (sve magnetne materijale osim feromagnetnih) važi:

$$\vec{M} = \chi_m \cdot \vec{H} \quad \text{gde je } \chi_m \text{ magnetna susceptibilnost, a } \mathbf{H} \text{ jačina magnetnog polja A/m}$$

Magnetna indukcija \vec{B} je

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H}$$

gde je μ_0 **magnetna propustljivost (permeabilnost) vakuuma** [H/m] i iznosi

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H / m}$$

$1 + \chi_m = \mu_r$ gde je μ_r **relativna magnetna propustljivost** pa je:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad \left[T = \frac{H}{m} \frac{A}{m} = \frac{N}{A^2} \frac{A}{m} = \frac{N}{Am} \right]$$

PODELA MAGNETNIH MATERIJALA

Podela magnetnih materijala prema veličini μ_r odnosno χ_m

$\chi_m < 0$; $\mu_r < 1$ - dijamagnetni materijali

$\chi_m > 0$; $\mu_r > 1$ - paramagnetni materijali

$\chi_m \gg 0$; $\mu_r \gg 1$ - feromagnetni materijali

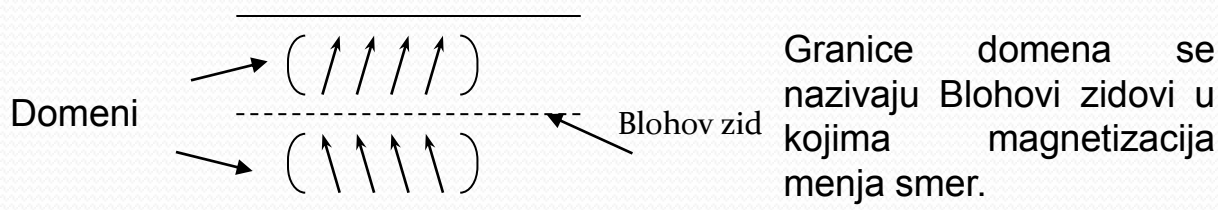
PODELA MAGNETNIH MATERIJALA

Podela prema prirodi elementarnih nosilaca magnetizma (atoma, jona, molekula) i prema karakteru njihovog međudejstva

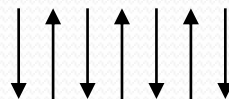
Dijamagnetni materijali - u odsustvu magnetnog polja izgradjivači strukture imaju potpuno kompenzovane magnetne momente (spinske i orbitalne magnetne momente elektrona) tako da se ovi materijali ponašaju magnetski neutralno.

Paramagnetni materijali - u odsustvu magnetnog polja postoje rezultujući magnetni momenti s tim što su usled stalnog haotičnog kretanja atoma haotično raspoređeni tako da je ukupna magnetizacija jednaka nuli, $\vec{M} = 0$. Unošenjem materijala u magnetno polje dolazi do delimične orijentacije magnetnog momenta tako da magnetizacija nije više jednaka nuli. Orijetaciji magnetnog momenta suprotstavlja se haotično termičko kretanje atoma.

Feromagnetni materijali - u odsustvu magnetnog polja postoje rezultujući magnetni momenti koji su orjentisani paralelno jedan u odnosu na drugi u pojedinim oblastima koje se nazivaju domeni.



Antiferomagnetni materijali - magnetni momenti susednih nosilaca magnetika su antiparalelni i jednaki po intenzitetu tako da je ukupna magnetizacija jednaka nuli.

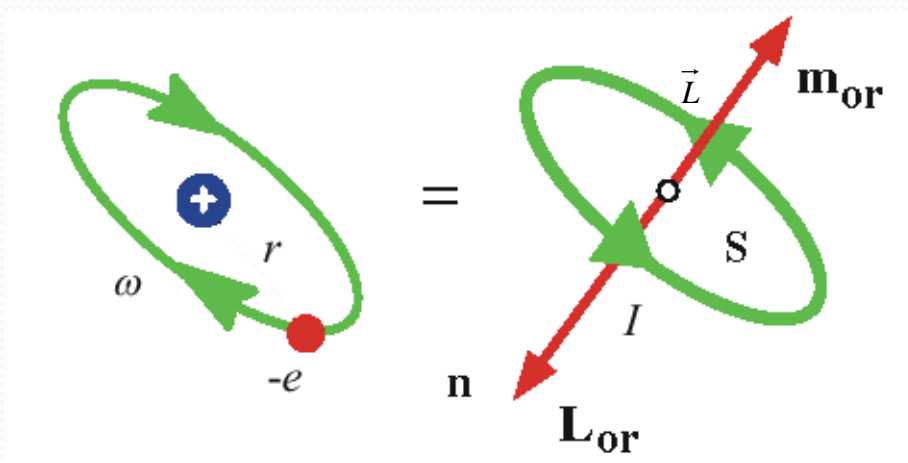


Ferimagnetni materijali - magnetni momenti susednih atoma su antiparalelni i različitog su intenziteta pa je ukupna magnetizacija različita od nule.



Magnetni momenti elektrona su: orbitalni i spinski magnetni momenti.

Orbitalni magnetni momenat elektrona potiče od kretanja elektrona oko jezgra, po odgovarajućim orbitalama.



$$\vec{L} = m_e \vec{r} \times \vec{v}$$

\vec{L} - orbitalni momenat količine kretanja

m_e - masa elektrona

r - radijus orbite

v - linearna brzina

$$m_B = \frac{e}{2 \cdot m_e} \cdot \frac{h}{2\pi}$$

- Borov magneton - kvant magnetnog momenta

$$m_B = 9.27 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2$$

Dijamagnetni materijali

Dijamagnetni efekat javlja se kod svih materijala zbog uticaja primenjenog magnetnog polja na kretanje elektrona po orbitama. Slab je efekat i uočava samo u materijalima bez stalnih magnetnih momenata.

Kada se primeni spoljašnje magnetno polje dolazi do promene fluksa u strujnoj konturi koju čini elektron kružeći po orbiti. U kolu se indukuje struja takvog smera da se suprotstavlja promeni fluksa. Indukovani magnetni momenat je uvek suprotan spoljašnjem magnetnom polju.

Susceptibilnost dijamagnetnog materijala:

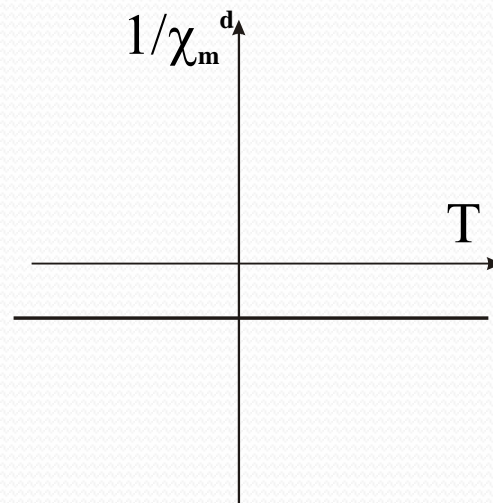
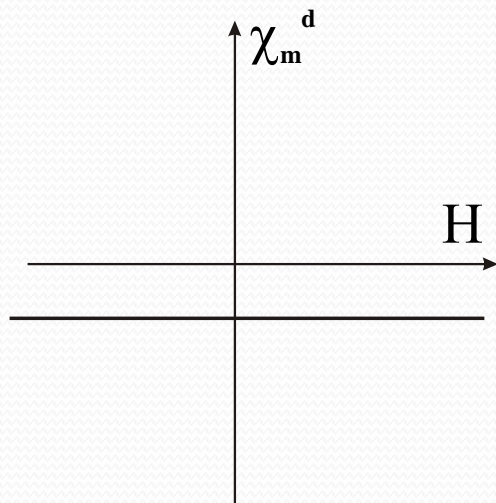
$$\chi_m^d = -\frac{\mu_0 e^2 N Z \langle r^2 \rangle}{6 m_e}$$

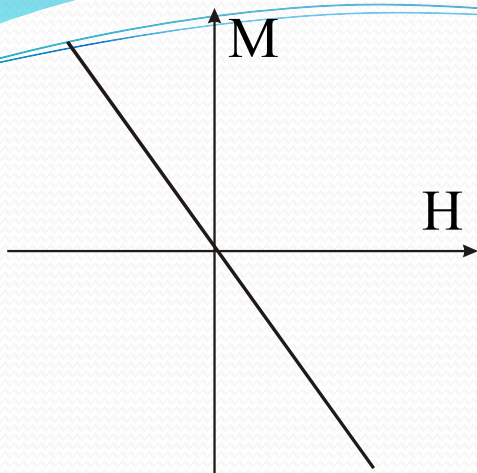
N - broj atoma po jedinici zaprem.

Z - broj elektrona u atomu

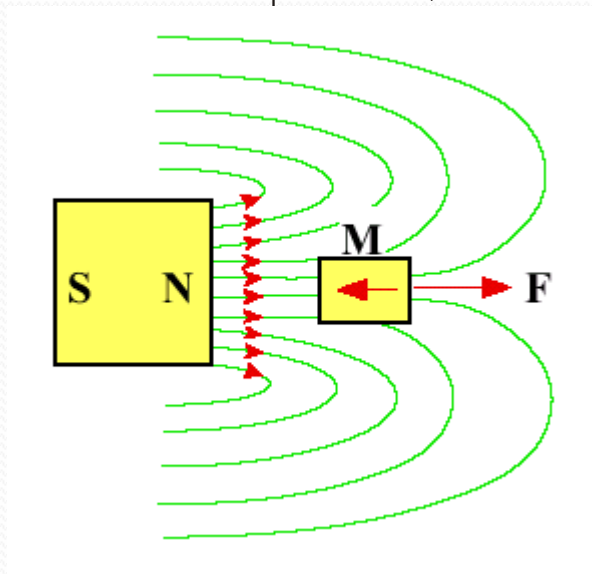
m_e - masa elektrona

$\langle r^2 \rangle$ srednji kvadrat poluprečnika putanje elektrona





$$\chi_m = \frac{M}{H}$$



Na dijamagnetni materijal smešten u neuniformno magnetno polje deluje sila usmerena ka manjim poljima. Zbog toga se dijamagnetni materijal istiskuje iz polja stalnog magneta

Dijamagnetni materijali:

Organski materijali (mnogi polimeri)

Kovalentni kristali (Si, Ge, dijamant)

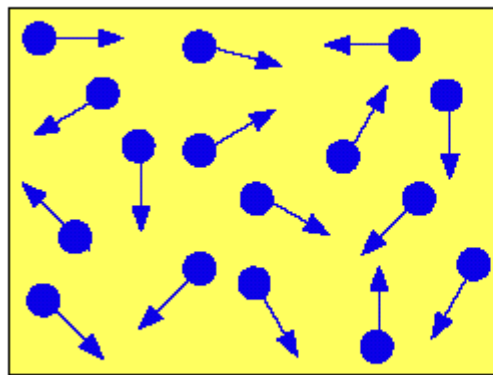
Neki jonski kristali (alkalni halogenidi)

Neki metali (Cu, Ag, Au)

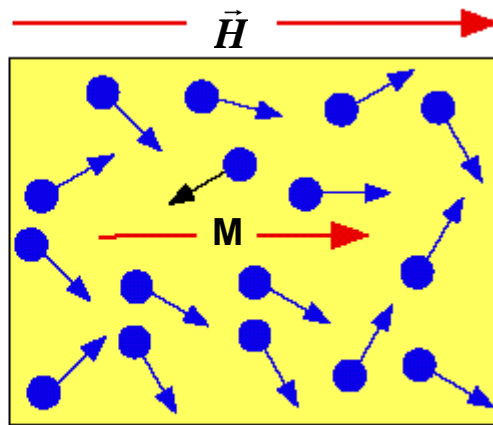
Superprovodnici (imaju veliku negativnu susceptibilnost, -1)

PARAMAGNETNI MATERIJALI

Paramagnetni materijali su oni materijali kod kojih postoje magnetni momenti i u odsustvu magnetnog polja. Uključivanjem polja dolazi do orijentacije magnetnog momenta, čemu se suprotstavlja haotično termičko kretanje atoma (posmatramo magnetne momente koji su orijentisani u pravcu polja i one orijentisane suprotno).



$$\vec{m} \neq 0 \quad \wedge \quad \vec{M} = 0$$



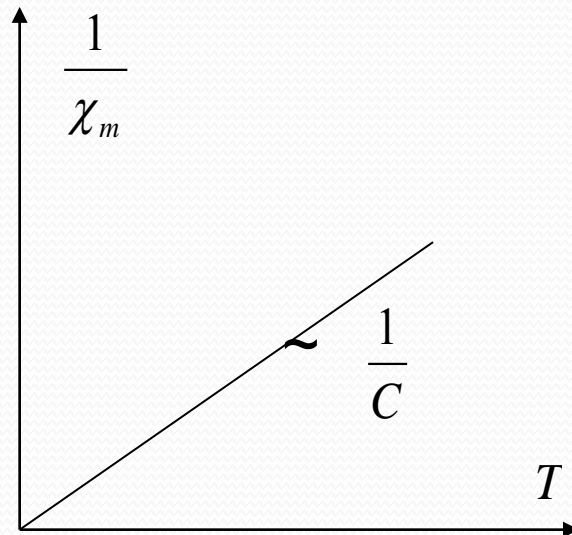
$$\vec{m} \neq 0 \quad \wedge \quad \vec{M} = \chi_m^p \vec{H}$$

PARAMAGNETNI MATERIJALI

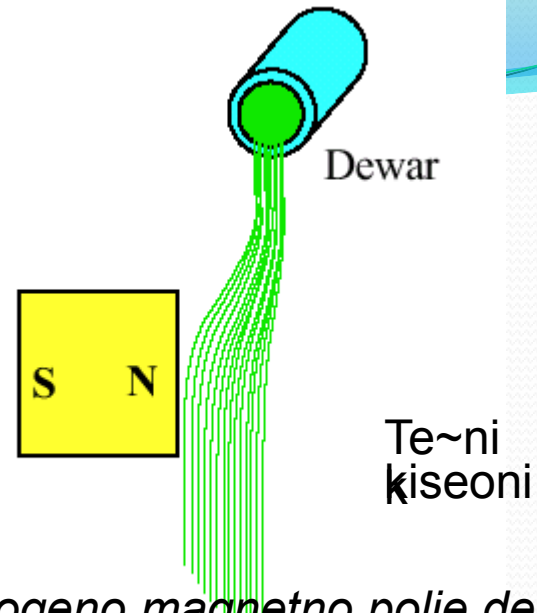
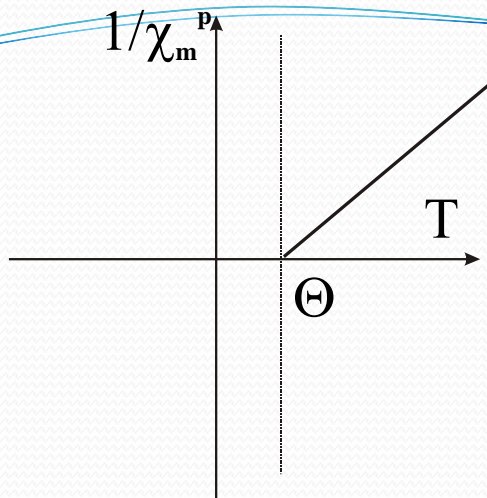
$$\chi_m = \frac{M}{H} = \frac{N \cdot \mu_0 \cdot m^2}{k} \frac{1}{T} = \frac{C}{T} \quad \text{Kirijev zakon}$$

$$C = \frac{N \cdot \mu_0 \cdot m^2}{k} \quad \text{Kirijeva konstanta}$$

$$\frac{1}{\chi_m} = \frac{1}{C} \cdot T$$



χ_m ne zavisi od magnetnog polja ali zavisi od temperature



Na paramagnetni materijal smešten u nehomogeno magnetno polje deluje sila prema većim vrednostima polja. Zbog toga stalni magnet privlači paramagnetni materijal (tečni kiseonik).

Paramagnetni materijali:

Gasoviti i tečni kiseonik

Vazduh

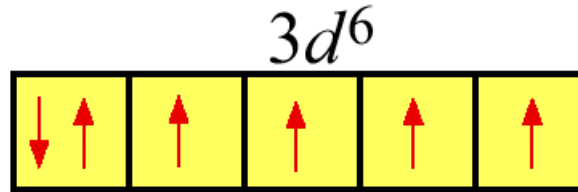
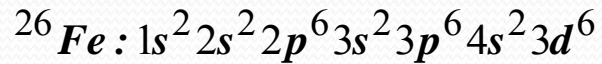
Azot-monoksid (NO)

Paramagnetne soli (CrCl_3 , $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, FeCl_3 , MnSO_4)

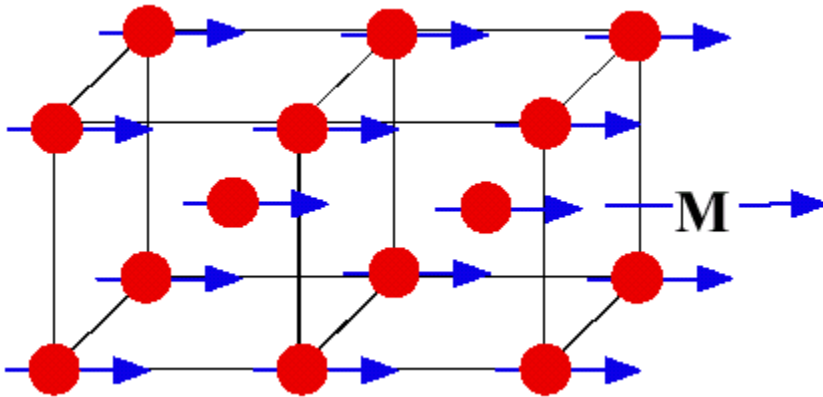
Alkalni i prelazni metali (zbog podešavanja spinova provodnih elektrona imaju susceptibilnost koja ne zavisi od T)

FEROMAGNETNI MATERIJALI

Feromagnetni efekat javlja se kod 3d-prelaznih elemenata (Fe, Co, Ni) i 4f-elemenata (Er, Gd, Tb, Eu). Ovi elementi poseduju velike stalne magnetske momente.



Izolovani atom Fe ima 4 nesparena spina i magnetski momenat $4m_B$.



U kristalnoj rešetki Fe svi magnetski momenti su spontano uredjeni u istom pravcu i smeru u odsustvu spoljašnjeg magnetnog polja.

Spontana uredjenost stalnih magnetskih momenata feromagnetika posledica je jakog medjudejstva momenata. Postoje dve vrste medjudejstva momenata:

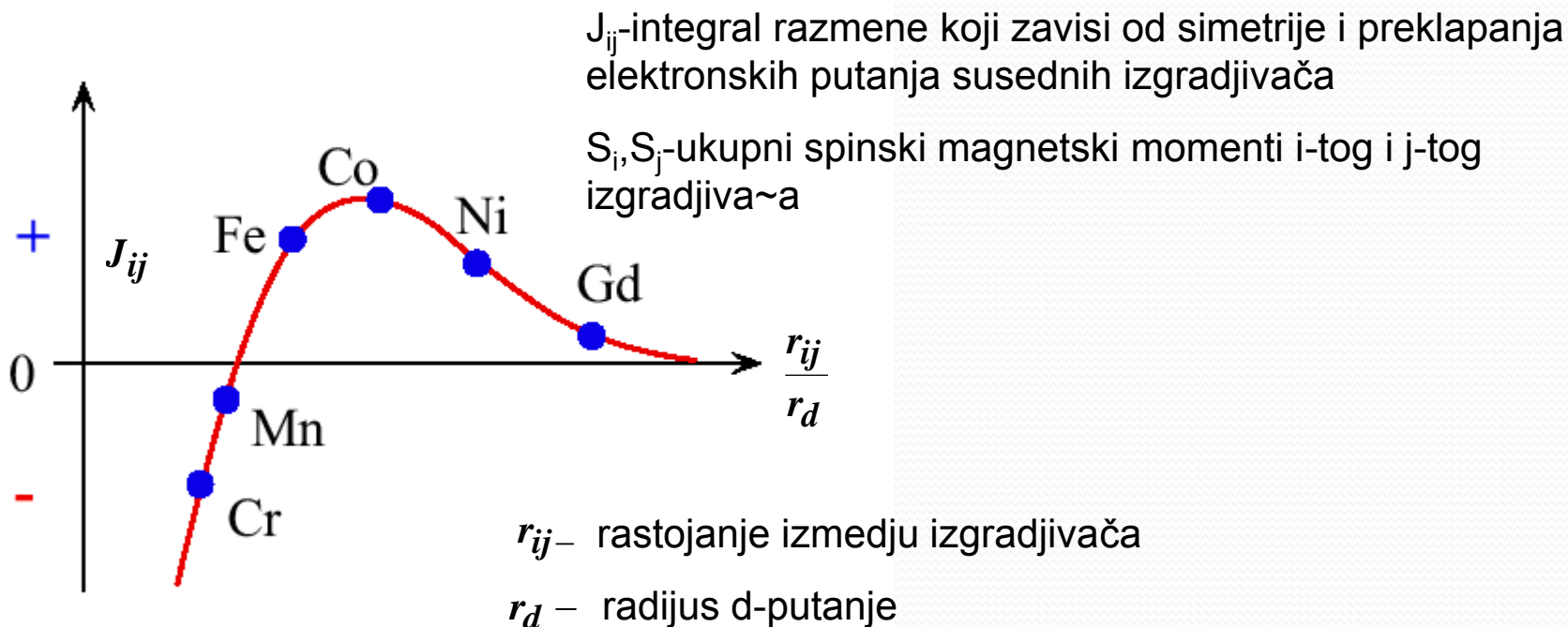
(a) klasično dipolno medjudejstvo

(posledica je postojanja unutrašnjeg magnetskog polja sopstvenih momenata)

(b) medjudejstvo razmene

(posledica je delovanja elektrostatičkih sila izmedju elektrona izgradjivača kristalne strukture; utiče na paralelnu orijentaciju spinskih magnetskih momenata)

Energija medjudejstva razmene izmedju i-tog i j-tog izgradjivača:

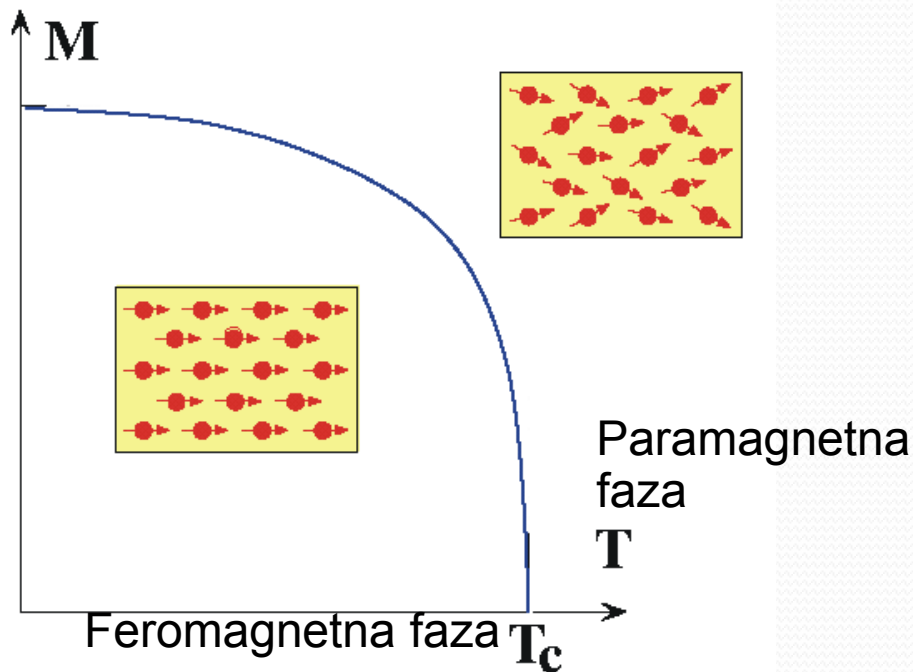


$J_{ij} > 0$ Paralelna orijentacija spinskih magnetskih momenata (feromagnetni materijali)

$J_{ij} < 0$ Antiparalelna orijentacija spinskih magnetskih momenata (antiferomagnetni i ferimagnetni materijali)

Hojlslerove legure: Mn-Al-Cu, Mn-Al-Ag pokazuju feromagnetna svojstva

Karakteristike feromagnetnih materijala



Zavisnost magnetizacije feromagnetika od temperature. Iznad Curie-jeve temperature T_c feromagnetik se ponaša kao paramagnetik.

FEROMAGNETNI MATERIJALI

Za svaki feromagnetni materijal je karakteristična Kirijeva temperatura (T_C) zato što na toj temperaturi materijal gubi feromagnetna svojstva i prelazi u paramagnetno stanje.

Na magnetne momente feromagnetika djeluje pored spoljašnjeg magnetnog polja, i unutrašnje magnetno polje koje potiče od magnetnog momenta u okolini i naziva se Vajsovo polje. Zbog toga umesto spoljašnjeg magnetnog polja posmatramo **efektivno magnetno polje** H_{eff} .

$$H_{eff} = H + H_v$$

gde je H spoljašnje polje, $H = bM$ Vajsovo polje (unutrašnje polje), a b konstanta Vajsovog polja (bezdimeziona veličina).

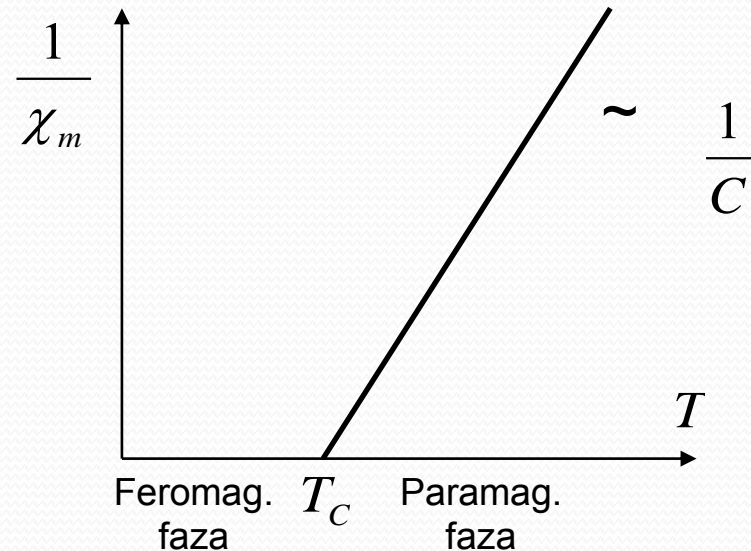
FEROMAGNETNI MATERIJALI

$$\chi_m = \frac{C}{T - Cb} = \frac{C}{T - T_C} \quad \text{Kiri - Vajsov zakon}$$

$$C = \frac{N \cdot \mu_0 \cdot m^2}{k} \quad \text{Kirijeva konstanta}$$

$$T_C = C \cdot b \quad \text{Kirijeva temperatura}$$

$$\frac{1}{\chi_m} = \frac{1}{C}(T - T_C)$$



FERIMAGNETNI MATERIJALI

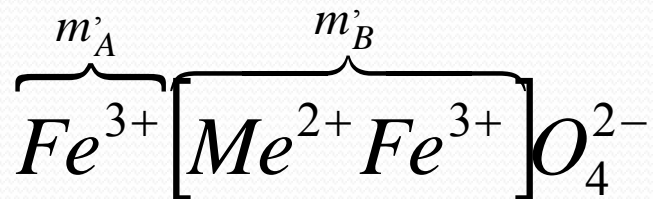
Ferimagnetne materijale odlikuje postojanje feromagnetnih podrešetaka koje se razlikuju po vrsti jona i po intenzitetu magnetnih momenata tih jona, tako da je ukupna magnetizacija kao zbir magnetizacija podrešetaka različita od nule. Tipični ferimagnetni materijali (**feriti**) imaju strukturu inverznog spinela čija je formula

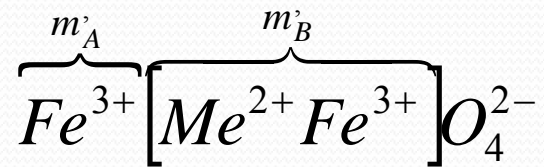


gde je Me dvovalentni metal (Zn, Cd, Fe, Ni, Co, Cu, Mg).

Ferite odlikuje postojanje magnetnih podrešetaka A i B.

Neutronsom analizom utvrđeno je da ferimagnetni materijali (feriti) imaju sledeću strukturnu formulu:





Joni Fe^{3+} nalaze se u tetraedarskom položaju u odnosu na jone kiseonika (okruženi su sa po 4 jona kiseonika) i imaju međusobno paralelne magnetne momente. Oni čine magnetnu podrešetku A.

Joni $Me^{2+}Fe^{3+}$ su u oktaedarskom položaju u odnosu na jone kiseonika (okruženi su sa po šest jona kiseonika) i imaju međusobno paralelne magnetne momente. Oni čine magnetnu podrešetku B. Magnetni momenti jona u podrešetkama su međusobno antiparalelni.

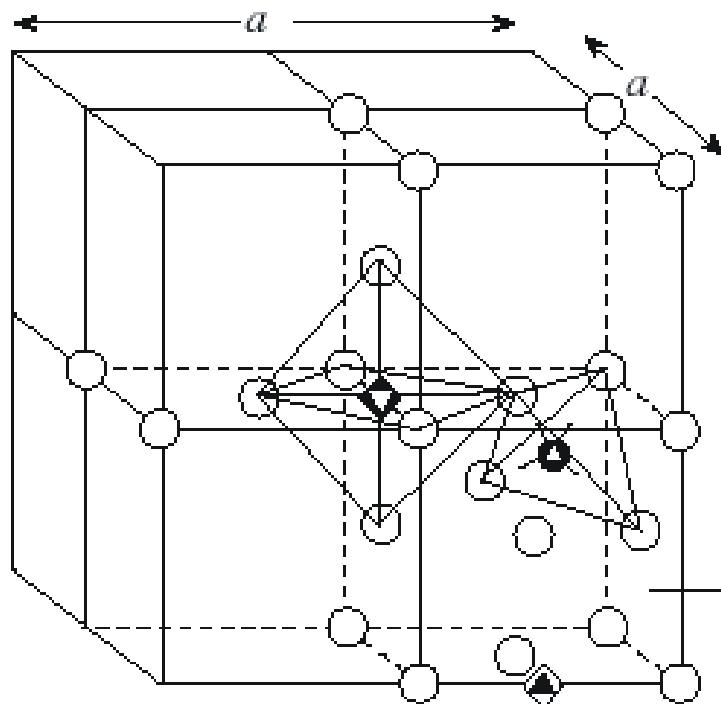
m'_A - **ukupni magnetni moment jona u tetraedarskom položaju**, podrešetka A

m'_B - **ukupni magnetni moment jona u oktaedarskom položaju**, podrešetka B

$m = m'_B - m'_A$ - **ukupni magnetni momenat jednog molekula ferita**

$$M_S = N \cdot m = \frac{8}{a^3} (m'_B - m'_A) \quad \text{magnetizacija zasićenja}$$

N - **broj molekula u jedinici zapremine** (Za strukturu inverznog spinela u jednoj elementarnoj ćeliji ima osam molekula.)



- O²⁻
- Fe³⁺ joni u tetraedarskom položaju
- ◆ Fe³⁺ joni u oktaedarskom položaju
- ◊ Ni²⁺ joni u oktaedarskom položaju

podrešetka

Kristalna struktura Ni-ferita. Elementarna ćelija ima 8 molekula NiFe₂O₄ ili ukupno 56 jona (8 Ni²⁺ i 8 Fe³⁺ u oktaedarskim položajima, 8Fe³⁺ u tetraedarskim položajima i 32 O²⁻). Spinovi jona u oktaedarskom položaju su međusobno paralelni, ali su antiparalelni spinovima jona u tetraedarskom položaju.

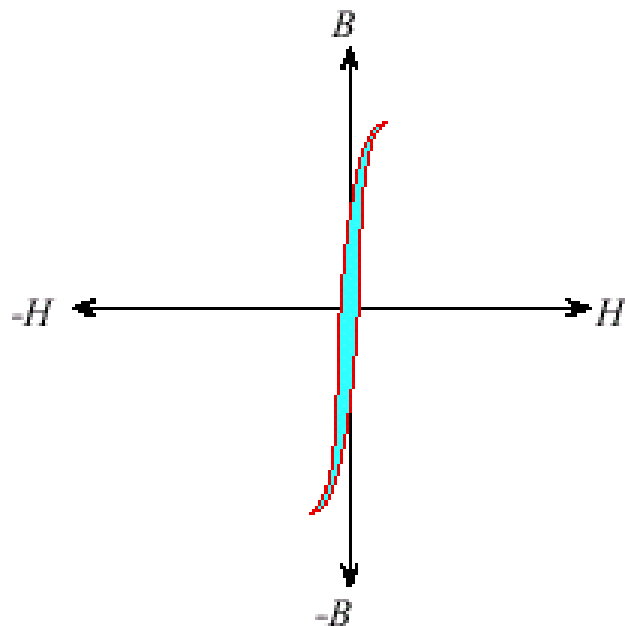
Primena magnetnih materijala

tehnologija \Rightarrow *osobine* \Rightarrow *primena*

struktura, sastav , *mikrostruktura*

$M_s, T_c, \text{magnetostr ikcija}$ μ, H_c, B_r

Meki magnetni materijali



Malo H_c , mala B_r , velika B_{max} , velika μ

Koercitivnost zavisi od anizotropije i smanjuje se na sledeći način:

1. Izborom materijala sa kubnom kristalnom strukturom ili amorfni materijala
2. Čestice materijala moraju da budu velike i multidomenske
3. Izborom materijala sa niskom magnetostr ikcijom i eliminisanjem naprezanja

Materijali za transformatore, induktore

(a) Legure Fe-Si

Materijal	μ	Hc (A/m)	Ukupni gubici (W/kg)
Komercijalno Fe	10^4	80	3.8
Fe-0.5%Si	5×10^3	70	3.0
Fe-3%Si	4×10^4	12	0.6
Fe-6%Si		8	0.4

(b) Metalna stakla

Materijal	Hc (A/m)	Ukupni gubici (W/kg)
Fe-B-Si-C	3.2	0.3
Fe-B-Si	1.5	0.3

(c) Magnetodielektrici Fe+(fenol-formaldehidne smola)

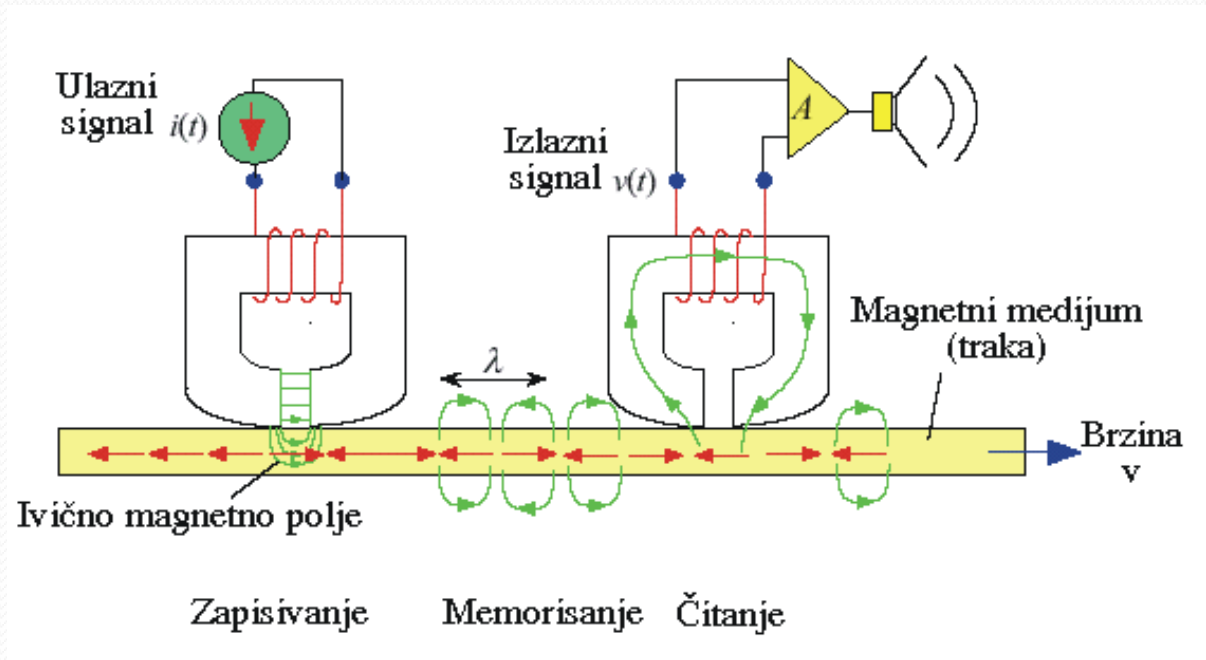
(d) Meki feriti Mn-Zn ferit, Mn-Ni ferit

2. Materijali za magnetno zapisivanje informacija

Koeficijent pravougaonosti petlje: $k_p = \frac{B_r}{B_{max}}$

(a) Magnetne glave (za pisanje, čitanje i brisanje informacija)

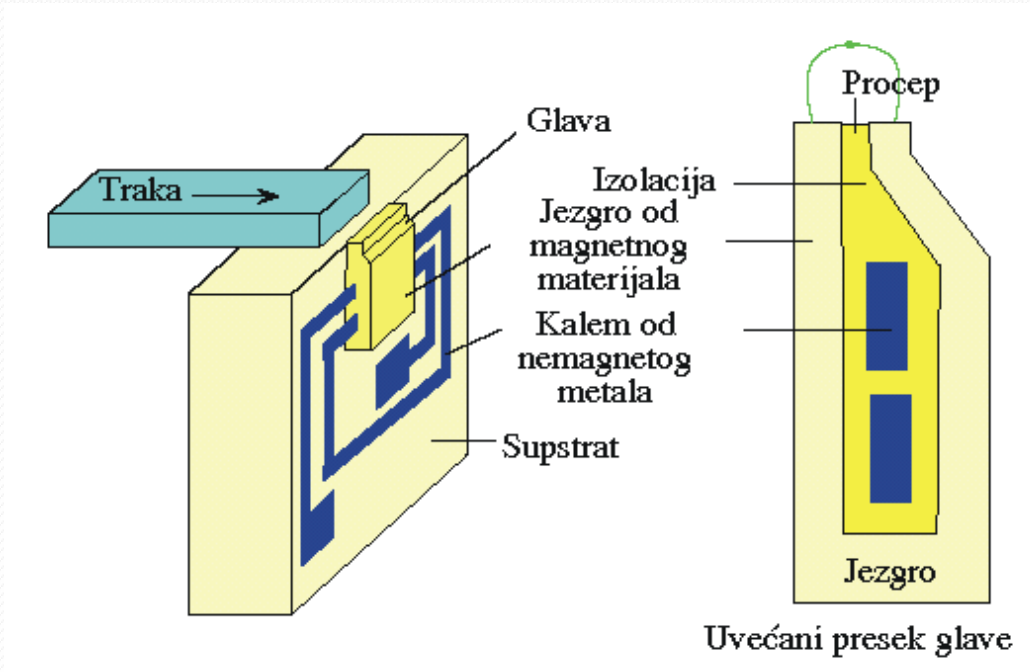
Elektromagneti sa malim vazdušnim procepom ($1\mu\text{m}$)



Princip longitudinalnog zapisivanja informacija na audio traci

Materijali za izradu magnetnih glava:

Permaloj (Ni-Fe), alfesil (Al-Fe-Si), meki feriti (Mn-Zn, Ni-Zn), amorfne legure (Co-Zr-Nb)



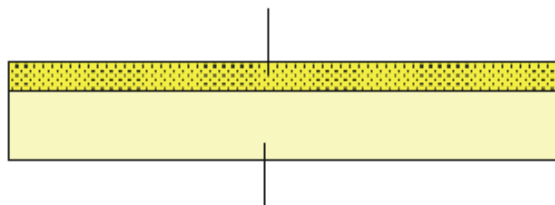
Magnetna glava izradjena u tehnologiji tankih filmova

(b) Magnetni memorijski medijumi

Magnetne (audio i video) trake
Flopi diskovi
Hard diskovi

Fleksibilni medijumi
Rigidni medijumi

Tanki magnetni sloj čestica (5-15 μm)



Magnetna traka

Plastična (polimerna)
traka (25-50 μm)

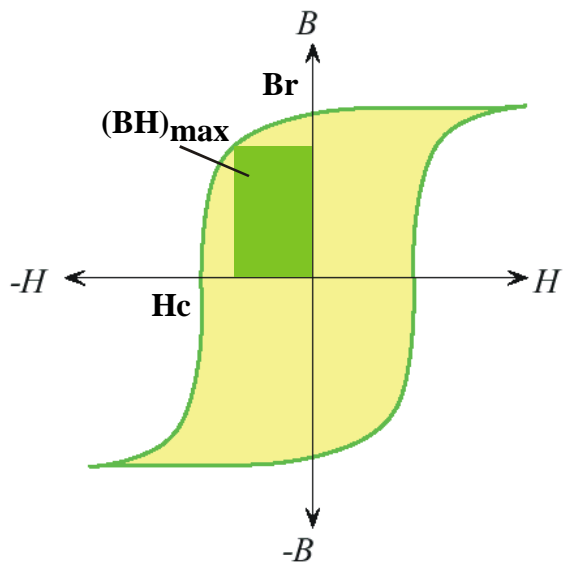
Magnetni materijali za fleksibilnem medijume

Materijal u vidu čestica	Primena	$\mu_o M_r$ (T)	$\mu_o H_c$ (T)
$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Audio trake (Tip I)	0.16	0.036
$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Flopi disk	0.07	0.03
$\text{Co}(\text{g-Fe}_2\text{O}_3)$	Video trake	0.13	0.07
CrO_2	Audio trake (Tip II)	0.16	0.05
CrO_2	Video trake	0.14	0.06
Fe	Audio trake (Tip IV)	0.30	0.11

Magnetni materijali za hard diskove

Tanki film	Supstrat	$\mu_o M_s$ (T)	$\mu_o H_c$ (T)
Co-(Retka zemlja)	Al disk	0.7- 0.8	0.05- 0.07
Co-Ni-P	Al disk	1	0.1

Tvrđi magnetni materijali



Veliko H_c , velika B_r , veliki $(BH)_{max}$

Koriste se za stalne magnete.

(a) Legirani čelici

Fe-C legiraju se W, Cr, Mo

(b) Livene tvrde magnetne legure

Alni legure (Al-Ni-Fe)

Alnisi legure (Al-Ni-Fe-Si)

Alniko legure (Al-Ni-Fe-Co)

Vikaloi (Fe-Co-V)

Legure na bazi Pt (Pt-Fe, Pt-Co)

Hojslerove legure (Ag-Mn-Al)

(c) Jedinjenja i legure retkih zemalja (Sm, Nd)

SmCo_5 , $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, Nd-Fe-B

(d) Tvrđi feriti

Ba-ferit, Sr-ferit



Upotreba stalnih magneta u:

1. radiotehnici, akustici, elektronicima za zvučnike, telefonske slušalice, mikrofone, elektronske muzičke instrumente, regulatore napona, brojila
2. uređajima automobila i aviona za magnetno paljenje, tahometre, kompase, uljane filtere
3. mernim instrumentima za ampermetre, voltmetre, seizmografe, kardiograf. aparate