

MATERIJALI ZA ELEKTRONIKU

Računske vežbe

9. MAGNETNI MATERIJALI

TEORIJSKI PREGLED

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** (vektor gustine magnetnog momenta), čija je jedinica A/m:

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{m}}{\Delta V}$$

gde je m , magnetni momenat. Za magnetike koji imaju jednake magnetne momente važi:

$$\vec{M} = N\vec{m}$$

gde je N broj magnetnih momenata u jedinici zapremine. Za linearne magnetne materijale (sve magnetne materijale osim feromagnetnih) važi:

$$\vec{M} = \chi_m \cdot \vec{H}$$

gde je χ_m magnetna susceptibilnost, a H jačina magnetnog polja [A/m]. **Magnetna indukcija 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 $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m. Kako je:

$$1 + \chi_m = \mu_r$$

gde je μ_r relativna magnetna propustljivost pa je:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}.$$

Podela magnetnih materijala prema veličini relativne magnetne propustljivosti, odnosno magnetne susceptibilnosti:

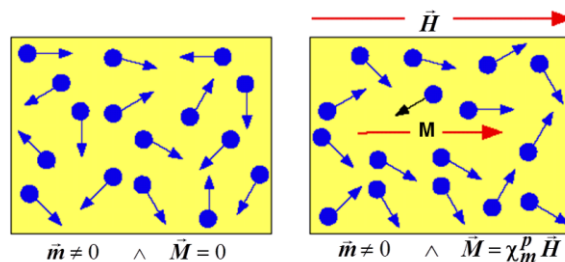
$\chi_m < 0$	$\mu_r < 1$	dijamagnetni materijali
$\chi_m > 0$	$\mu_r > 1$	paramagnetni materijali
$\chi_m \gg 0$	$\mu_r \gg 1$	feromagnetni materijali

Kod **dijamagnetnih materijala** 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. Drugim rečima, magnetni momenti atoma i molekula dijamagnetnih materijala su, u odsustvu spoljašnjeg polja, jednaki nuli. Međutim, u prisustvu spoljašnjeg polja indukuje se magnetni moment i materijal se magnetizuje. 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 suprotavlja promeni fluksa. Indukovani magnetni momenat je uvek suprotan spoljašnjem magnetnom polju. Ovaj priraštaj magnetnog momenta se naziva indukovanim magnetnim momentom. Indukovanje

MATERIJALI ZA ELEKTRONIKU**Računske vežbe**

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

Kod **paramagnetnih materijala** 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. Unošenjem materijala u magnetno polje dolazi do delimične orijentacije magnetnog momenta tako da magnetizacija nije više jednaka nuli. Orijentaciji magnetnog momenta suprotstavlja se haotično termičko kretanje atoma. Efekat je ilustrovan na slici 1.



Slika 1. Ilustracija paramagnetnog efekta

Sa porastom temperature, smanjuje se namagnetisanost, tj. smanjuje se susceptibilnost. Na višim temperaturama izraženo je toplotno kretanje atoma i haotična orijentisanost magnetnih momenata. Zavisnost je definisana Kirijevim zakonom:

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

gde je C – Kirijeva konstanta:

$$C = \frac{N \cdot \mu_0 \cdot m^2}{k}$$

Kod **feromagnetnih materijala** u odsustvu magnetnog polja postoje rezultujući magnetni momenti koji su orijentisani paralelno jedan u odnosu na drugi u pojedinim oblastima koje se nazivaju domeni. 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 dejstvuje 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 (bezdimenziona veličina). Zavisnost χ_m od temperature data je Kiri-Vajsovim zakonom:

$$\chi_m = \frac{C}{T - Cb} = \frac{C}{T - T_C}$$

gde je C – Kirijeva konstanta (već definisana), dok je T_C – Kirijeva temperatura:

$$T_C = C \cdot b$$

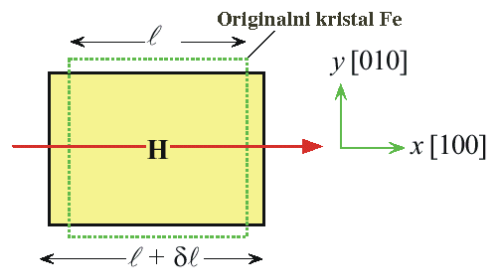
MATERIJALI ZA ELEKTRONIKU**Računske vežbe**

Kod **antiferomagnetnih materijala** magnetni momenti susednih nosilaca magnetika su antiparalelni i jednaki po intenzitetu tako da je ukupna magnetizacija jednaka nuli. Kod **ferimagnetnih materijala** magnetni momenti susednih atoma su antiparalelni i različitog su intenziteta pa je ukupna magnetizacija različita od nule. Drugima rečima, 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.

Magnetni momenti elektrona su: orbitalni i spinski magnetni momenti. Orbitalni magnetni moment elektrona potiče od kretanja elektrona oko jezgra, po odgovarajućim orbitalama. Kvant magnetnog momenta naziva se **Borov magneton**:

$$m_B = \frac{e}{2 \cdot m_e} \cdot \frac{h}{2\pi} = 9.27 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2 .$$

Magnetostrikcija je promena linearnih dimenzija feromagnetnih materijala pod dejstvom spoljašnjeg magnetnog polja. Rotacijom spinova elektrona u magnetnom polju, menja se raspodela elektronskog naelektrisanja oko atoma, što utiče na promenu energije veza atoma i međuatomsko rastojanje. Kada na kristal Fe deluje magnetno polje u pravcu [100], kristal se izdužuje u tom pravcu, a skuplja u pravcima normalnim na [100] (pozitivna magnetostrikcija). Ilustracija je prikazana na slici 2. Kristal Ni se sakuplja po pravcu lakog magnećenja u kome deluje spoljašnje magnetno polje (negativna magnetostrikcija). Magnetostrikcija se kontroliše legiranjem metala.



Slika 2. Ilustracija magnetostrikcije

MATERIJALI ZA ELEKTRONIKU**Računske vežbe**

ZADATAK 1. Gustina magnetnog momenta Cu ako se izloži magnetnom polju jačine 10^4 A/m, iznosi -0.005 A/m. Izračunati:

- Magnetni momenat po jednom atomu bakra znajući da bakar ima PCK rešetku konstante $a=3.6 \cdot 10^{-10}$ m.
- Magnetnu susceptibilnost bakra.
- Kojoj grupi magnetnih materijala pripada bakar?

Rešenje:

- Intenzitet vektora magnetizacije (gustina magnetnog momenta) je:

$$M = \frac{\sum m}{\Delta V}$$

Ako svi atomi imaju iste magnetne momente, $M = N \cdot m$, gde je m magnetni moment jednog atoma, a N broj atoma po jedinici zapremine. Za magnetni momenat se dobija:

$$N = \frac{n_i}{a^3}$$

$$n_{iPCK} = 4$$

$$m = \frac{M}{N} = \frac{M}{\frac{n_i}{a^3}} = \frac{M \cdot a^3}{n_i}$$

$$m = \frac{-0.005 \frac{A}{m} \cdot (3.6 \cdot 10^{-10} m)^3}{4} = -5.87 \cdot 10^{-31} Am^2$$

- Magnetna susceptibilnost je:

$$\vec{M} = \chi_m \cdot \vec{H}$$

$$\chi_m = \frac{M}{H} = \frac{-0.005}{10^4} = -5 \cdot 10^{-6}$$

- Kako je:

$$\chi_{Cu} < 0 \Rightarrow \text{bakar je dijamagnetni materijal.}$$

MATERIJALI ZA ELEKTRONIKU**Računske vežbe**

ZADATAK 2. Kirijeva temperatura za gvožđe Fe iznosi 1043K. Predpostaviti da atomi Fe poseduju magnetni moment jednak $2m_B$. Znajući da Fe kristališe u ZCK sistemu sa konstantom rešetke $a=2.85 \cdot 10^{-10}$ m, izračunati:

- Magnetizaciju zasićenja,
- Kirijevu konstantu,
- Konstantu Vajsovog polja,
- Vajsovo polje.

Rešenje:

- Magnetizacija zasićenja postoji kada su svi magnetni momenti orijentisani u istom smeru, tako da je:

$$M_s = N \cdot m$$

$$M_s = \frac{n_i}{a^3} 2m_B$$

$$n_i=2 \text{ (za ZCK)}$$

$$M_s = \frac{2 \cdot 2 \cdot 9.27 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2}{(2.85 \cdot 10^{-10} \text{ m})^3} = 1.6 \cdot 10^6 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

- Kirijeva konstanta je:

$$C = \frac{N \cdot \mu_0 \cdot m^2}{k} = \frac{2(2.85 \cdot 10^{-10})^{-3} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} (2 \cdot 9.27 \cdot 10^{-24})^2}{1.38 \cdot 10^{-23}} = 2.7 \text{ K}.$$

- Konstanta Vajsovog polja je:

$$b = \frac{T_C}{C} = 386.3.$$

- Vajsovo polje je:

$$H_v = b \cdot M_s = \frac{kT_C}{N \cdot \mu_0 \cdot m^2} N \cdot m = 6.18 \cdot 10^8 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$