

MATERIJALI ZA ELEKTRONIKU

Računske vežbe

8. DIELEKTRIČNI MATERIJALI

TEORIJSKI PREGLED

Dielektrici su materijali koji ne sadrže slobodne elektrone. Elementarna naelektrisanja vezana su elastičnim unutrašnjim atomskim i molekularnih silama u dielektriku i mogu se pomerati samo na malim rastojanjima pod dejstvom spoljašnjeg električnog polja. Širina zabranjene zone E_g je mnogo veća nego kod ostalih vrsta materijala (**veća od 3eV**). Kada se dielektrik unese u spoljašnje električno polje, na čestice deluju elektrostatičke sile. Pod dejstvom tih sila pozitivno naelektrisane čestice se pomeraju u pravcu i smeru spoljašnjeg električnog polja, a negativno naelektrisane čestice u suprotnom smeru. Pomeranje je na mikroskopski male dužine jer se dejstvu elektrostatičkih sila suprotstavljaju unutrašnje sile. Ako je dielektrik izotropni, tj. takav da su električne osobine iste u svim pravcima, to bi makroskopski efekti polarizacije trebalo da budu isti za sve izotropne dielektrike. Dielektrici se mogu podeliti na nepolarne i polarne.

Nepolarni dielektrici – u nepobuđenom dielektriku je raspored elementarnih nosioca naelektrisanja takav da se molekuli ponašaju električno neutralno u odnosu na svoju okolinu, tj. u odsustvu električnog polja centri pozitivnog i negativnog naelektrisanja u molekulu se poklapaju. Kada se priključi električno polje dolazi do pomeranja centara naelektrisanja (javlja se indukovan dipolni momenat).

Polarni dielektrici – u nepobuđenom dielektriku su centri pozitivnog i negativnog naelektrisanja u molekulu ne poklapaju (međusobno su pomereni) i pri tom obrazuju električne dipole. Dakle, postoje stalni dipolni momenti koji se priključivanjem električnog polja orijentišu u pravcu polja.

Dipolni momenat. Unešeni atom u spoljašnje električno polje se deformiše, jer će pod dejstvom polja, kojima se suprotstavljaju unutrašnje sile, zauzimaju novi položaj ravnoteže. Ako je pomeranje nosilaca (pozitivnog i negativnog) jednako nekom malom rastojanju d , jezgro i elektronski omotač obrazuju električni dipol, momenta:

$$\vec{p} = q \cdot \vec{d}$$

pri čemu osa dipola ima prava i orijentaciju spoljašnjeg električnog polja. Jedinica je Cm ili Asm.

Vektor polarizacije. Veličina koja karakteriše stanje polarizacije dielektrika, definiše se kao $\sum p$ - vektorski zbir momenata električnih dipola u elementu zapremine dielektrika dV . Za nepolarni i homogeno polarizovani dielektrik, intenzitet vektora polarizacije srazmeran je sa N – brojem molekula dielektrika u jedinici zapremine:

$$\vec{P} = \frac{\sum \vec{p}}{\Delta V} = N \cdot \vec{p}$$

Jedinica je As/m².

Dielektrična indukcija ili dielektrični pomeraj se definiše kao:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{K} + \vec{P}$$

MATERIJALI ZA ELEKTRONIKU**Računske vežbe**

gde je K jačina polja, ε_0 dielektrična propustljivost vakuuma ($\varepsilon_0=8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m). Za linearne dielektrike postoji linearna zavisnost polja i vektora polarizacije:

$$\vec{P} = \chi_e \varepsilon_0 \vec{K} = \alpha \vec{K}$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{K} + \chi_e \varepsilon_0 \vec{K} = \varepsilon_0 (1 + \chi_e) \vec{K} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{K} = \varepsilon \cdot \vec{K}$$

gde je χ_e - dielektrična susceptibilnost, ε_r - relativna dielektrična konstanta i ε -apsolutna dielektrična konstanta, α – polarizabilnost. Nelinearni dielektrici imaju nelinearnu zavisnost $D(K)$, zavisnost $P(K)$ ima histerezisni karakter.

Lokalno polje je rezultujuće polje koje deluje na molekul u dielektriku uslovljeno postojanjem slobodnih naelektrisanja na elektrodama na koje je priključen materijal, vezanih naelektrisanja i naelektrisanja svih molekula:

$$\vec{K}_l = \vec{K} + \frac{\vec{P}}{3\varepsilon_0}$$

gde je K – srednje makroskopsko polje. Za linearne dielektrike se pokazuje:

$$\vec{P} = \chi_e \varepsilon_0 \vec{K} = \varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1) \vec{K}$$

$$\vec{K}_l = \vec{K} + \frac{\varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1) \vec{K}}{3\varepsilon_0}$$

$$\vec{K}_l = \frac{\varepsilon_r + 2}{3} \vec{K}.$$

U specijalnom slučaju kada je:

$$\varepsilon_r \approx 1 \quad \Rightarrow \quad \vec{K}_l \approx \vec{K}.$$

Klauzijus - Mosotijeva jednačina za linearne dielektrike povezuje dielektričnu propustljivost ε_r sa koficijentom polarizacije molekula α i koncentracije molekula N :

$$\vec{P} = N \cdot \vec{p}$$

$$\vec{p} = \alpha \cdot \vec{K}_l$$

$$\left. \begin{array}{l} \vec{P} = N \cdot \alpha \cdot \vec{K}_l = N \cdot \alpha \frac{(\varepsilon_r + 2)}{3} \vec{K} \\ \vec{P} = \chi_e \cdot \varepsilon_0 \cdot \vec{K} = \varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1) \vec{K} \end{array} \right\} \Rightarrow N \cdot \alpha \frac{(\varepsilon_r + 2)}{3} = \varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1)$$

$$\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} = \frac{N\alpha}{3\varepsilon_0} = \frac{N}{3\varepsilon_0} (\alpha_e + \alpha_d + \alpha_j)$$

gde su α_e – elektronska polarizabilnost, α_d – dipolna polarizabilnost, α_j – jonska polarizabilnost.

Vrste polarizacija. Spontana polarizacija je polarizacija u dielektricima kada nisu izloženi dejstvu spoljašnjeg polja i različita je od nule. Pod dejstvom polja, polarizacija može biti: elektronska, jonska, orijentaciona (dipolna), piezoelektrična, piroelektrična, elektretna polarizacija.

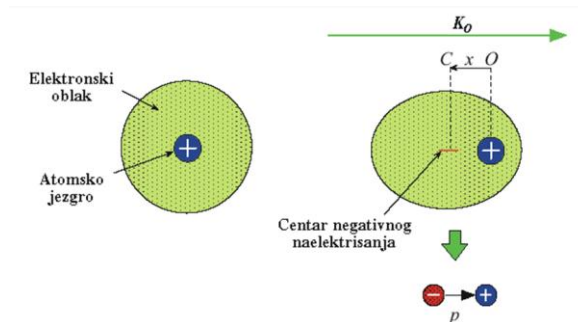
MATERIJALI ZA ELEKTRONIKU

Računske vežbe

Elektronska polarizacija je polarizacija u kojoj dolazi do deformacije elektronske orbitale, tj. pomeranja elektrona u odnosu na atomsko jezgro u pravcu polja (slika 1). Elektronska polarizabilnost je:

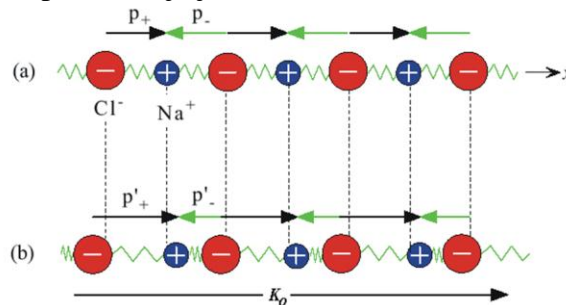
$$\alpha_e = 4\pi\epsilon_0 r_0^3$$

gde je r_0 – radijus atoma. Za $\alpha = \alpha_e$, važi da je $\epsilon_r = n^2$, gde je n indeks prelamanja. Vreme uspostavljanja polarizacije od trenutka priključenja dielektrika na napon (polje) je 10^{-14} do 10^{-15} s.



Slika 1. Ilustracija elektronske polarizacije

Jonska polarizacija se javlja u jonskim jedinjenjima kod kojih dolazi do pomeranja jona jednih u odnosu na druge pod dejstvom polja. Slika 2 ilustruje jonsku polarizaciju: lanac jona u kristalu NaCl u odsustvu električnog polja ima neto dipolni momenat po jonu jednak nuli, u prisustvu spoljašnjeg polja joni se pomeraju, što ima za posledicu stvaranje dipolnog momenta po jonu. Vreme uspostavljanja jonske polarizacije je 10^{-12} do 10^{-13} s.



Slika 2. Ilustracija jonske polarizacije

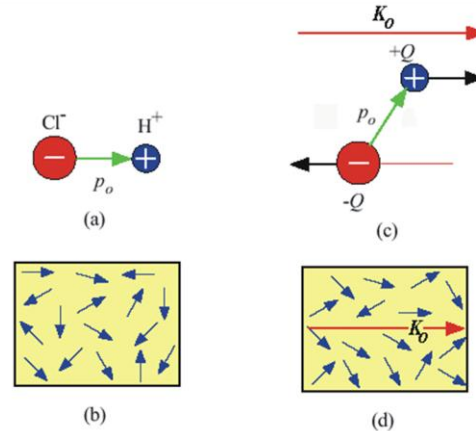
Dipolna (orjentaciona) polarizacija podrazumeva usmeravanje polarnih molekula pod dejstvom polja kod kojih postoji stalni dipolni momenat. Dipolna polarizabilnost se definiše kao:

$$\alpha_d = \frac{p^2}{3kT}$$

Slika 3 ilustruje dipolnu polarizaciju: molekul HCl ima stalni dipolni momenat (a); u odsustvu polja, a zbog termičkih vibracija molekula, dipolni momenti su haotično raspoređeni (b). U prisustvu polja dipol rotira pod dejstvom momenta sile (c). Dipolni momenti teže da zauzmu pravac električnog polja (d). Vreme uspostavljanja je duže nego kod deformacionih polarizacija, zato se još zove spora ili relaksaciona.

MATERIJALI ZA ELEKTRONIKU

Računske vežbe

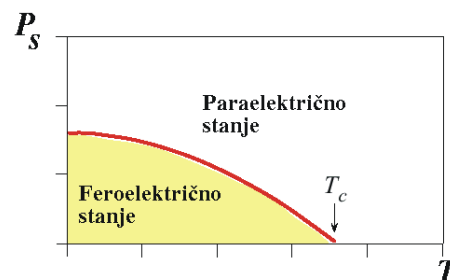


Slika 3. Ilustracija dipolne polarizacije

Kod svih vrsta dielektrika postoji elektronska polarizacija α_e . Ukupna polarizacija jednaka je zbiru elektronske, jonske i dipolne polarizacije:

$$\alpha = \alpha_e + \alpha_d + \alpha_j.$$

Feroelektrični materijali spadaju u grupu nelinearnih dielektrika. U odsustvu električnog polja poseduju spontanu polarizaciju zbog razdvajanja pozitivnog i negativnog naelektrisanja u kristalu. Tipičan predstavnik je barijum titanat (BaTiO_3) koji iznad 130°C ima kubnu kristalnu strukturu i spontana polarizacija je jednaka nuli, međutim na nižim temperaturama od kritične ima teragonalnu kristalnu strukturu i polarisan je i bez prisustva električnog polja. Kritična temperatura iznad koje prestaju feroelektrična svojstva naziva se Kirijevom temperaturom T_C . Materijal prelazi iz feroelektričnog u paraelektrično stanje na Kirijevoj temperaturi- kada je spontana polarizacija P_s jednaka nuli (slika 4).

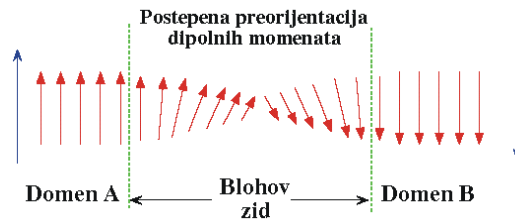


Slika 4. Zavisnost polarizacije od temperature kod feroelektričnih materijala

Domen je oblast u feroelektričnom materijalu koja je do određene temperature ili u određenom temperaturnom intervalu, spontano polarizovana. U ovim oblastima su, pri vrlo niskim temperaturama, svi električni momenti dipola molekula orijentisani u istom pravcu i smeru. Domeni su različito orijentisani jedan u odnosu na drugi. Formiranje domena snižava elektrostatičku energiju. Domenski (Blohov) zid predstavlja prelaznu oblast u kojoj se vektor spontane polarizacije postepeno preorijentiše (slika 5).

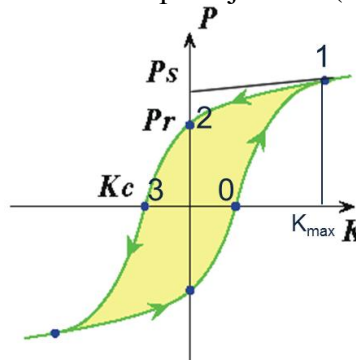
MATERIJALI ZA ELEKTRONIKU

Računske vežbe



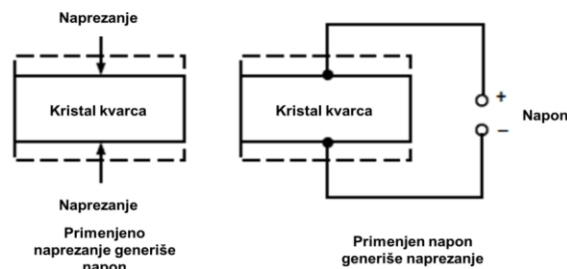
Slika 5. Domeni i Blohov zid

Zavisnost polarizacije od električnog polja K data je na slici 6. Kada se polje poveća od 0 do neke maksimalne vrednosti (K_{\max}), polarizacija će se menjati kao na krivoj 0-1. Kriva 0-1 se može zameniti pravom linijom pri dovoljno jakim poljima, kada P ne zavisi od K (tada je feroelektrični materijal polarizovan do zasićenja P_s). Smanjivanjem polja K smanjivaće se i polarizacija P po krivoj 1-2. Kada je polje $K=0$, polarizacija će biti različita od nule, biće jednaka P_r , tzv. zaostala polarizacija. Tako je feroelektrični materijal polarizovan i kada nema polja. Ako se polje povećava u suprotnom smeru, onda se smanjuje i polarizacija (2-3) do nule, pri polju E_c (koercitivno polje). Ako se dalje polje menja do $-K_{\max}$, pa zatim do K_{\max} , onda će se ukupna $P(K)$ zavisnost menjati po zatvorenoj krivoj (**dielektrični histerezis**). Ovo ponašanje se objašnjava pojavom domena. Slična zavisnost postoji i za $D(K)$.



Slika 6. Zavisnost polarizacije od električnog polja kod feroelektričnih materijala

Piezoelektrični materijali takođe spadaju u grupu nelinearnih dielektrika. Piezoelektrični materijali izloženi dejstvu mehaničke sile na svojoj površini indukuju naelektrisanje koje je proporcionalno primenjenoj sili. Do direktnog piezoelektričnog efekta dolazi kada se materijal savija, uvija, pritiska. Kada se na komad piezoelektričnog materijala primeni napon u njemu se generiše naprezanje, što se naziva inverzni piezoelektrični efekat. Piezoelektrični materijali su SiO_2 (kvarc), PZT keramika, BaTiO_3 ... Ilustracija direktnog i inverznog piezo efekta data je na slici 7.



Slika 7. Ilustracija direktnog i inverznog piezoelektričnog efekta

MATERIJALI ZA ELEKTRONIKU**Računske vežbe**

Piroelektrici pokazuju piroelektrični efekat, toplota koju kristal apsorbira povećava temperaturu za δT , što dovodi do promene polarizacije da δP . Posledica toga je promena napona δV koja se meri. **Elektreti** su materijali koji specifičnim načinom obrade stiču i zadržavaju polarizaciju. Poseduju stalne dipolne momente.

Primena dielektrika. Dielektrični materijali se koriste za izolaciju kablova, kao izolatori u integrisanim kolima, za izradu izolacionih slojeva kondenzatora u integrisanoj i diskretnoj tehnologiji. Optička vlakna se takođe prave od izolatorskih materijala i koriste se u telekomunikacijama za prenos signala sa nosećim frekvencijama od 10^{14} - 10^{15} Hz. Prednosti nad bakarnim kablovima su širi propusni opseg (~ 1 GHz), eliminacija preslušavanja, manje slabljenje signala. Optička vlakna sastoje se od jezgra (veći indeks prelamanja) i omotača (manji indeks prelamanja). Optički signal se prostire po principu totalne refleksije. Piezoelektrici, piroelektrici i elektreti koriste se za izradu pretvarača neelektričnih signala u električne, i obrnuto.

ZADATAK 1. Čvrst dielektrik sadrži $N=5 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$ atoma. Ako je polarizabilnost atoma $\alpha=3 \cdot 10^{-40} \text{ Fm}^2$ odrediti odnos srednjeg makroskopskog polja i lokalnog polja.

Rešenje:

Na osnovu definicije lokalnog polja dobija se:

$$\vec{K}_l = \vec{K} + \frac{\vec{P}}{3\epsilon_0}$$

$$\vec{P} = N \cdot \vec{p} = N \cdot \alpha \cdot \vec{K}_l$$

$$\vec{K}_l = \vec{K} + \frac{N\alpha}{3\epsilon_0} \vec{K}_l$$

$$\vec{K}_l \left(1 - \frac{N\alpha}{3\epsilon_0} \right) = \vec{K}$$

$$\frac{\vec{K}}{\vec{K}_l} = 1 - \frac{N\alpha}{3\epsilon_0} = 0.44$$

ZADATAK 2. NaCl ima PCK strukturu sa parametrom rešetke $a=5.64 \cdot 10^{-10} \text{ m}$. Elektronske polarizabilnosti jona Na i Cl su $\alpha_{\text{eNa}}=0.16 \cdot 10^{-40} \text{ Fm}^2$ i $\alpha_{\text{eCl}}=3.30 \cdot 10^{-40} \text{ Fm}^2$. Ako se smatra da je $\alpha=\alpha_e$ izračunati dielektričnu konstantu ϵ_r i indeks prelamanja n .

Rešenje:

Polazeći od Klauzijus-Mosotijeve jednačine dobija se:

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{N \alpha_e}{3\epsilon_0}$$

MATERIJALI ZA ELEKTRONIKU

Računske vežbe

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

$$n_{i(NaCl)} = 4$$

$$N = \frac{4}{(5.64 \cdot 10^{-10} \text{ m})^3} = 2.23 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$$

$$N = N_{Na} = N_{Cl}$$

$$N \cdot \alpha_e = N(\alpha_{eCl} + \alpha_{eNa})$$

$$N \cdot \alpha_e = 7.72 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = 0.291 \quad \Rightarrow \quad \epsilon_r = 2.23$$

$$\text{za } \alpha = \alpha_e \quad \Rightarrow \quad \epsilon_r = n^2 \quad \Rightarrow \quad n = \sqrt{\epsilon_r} = 1.49$$

ZADATAK 3. Amorfní selen (Se) ima dielektričnu konstantu $\epsilon_r=6.7$, atomsku masu $A_{Se}=78.96$ i redni broj $Z_{Se}=34$. Gustina selena je $4.3 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$.

- Izračunati lokalno polje u selenu ako je spoljašnje makroskopsko polje jačine 10^4 V/m .
- Izračunati elektronsku polarizabilnost izolovanog atoma Se ako je radijus atoma $r_{Se}=0.12 \text{ nm}$.
- Naći polarizabilnost selena u čvrstom stanju na osnovu Klauzijus-Mosotijeve jednačine i uporediti (naći odnos) je sa vrednošću polarizabilnosti selena u izolovanom stanju.
- Ako se selen nalazi u polju jačine 10^4 V/m izračunati pomeraj elektrona u odnosu na jezgro.

Rešenje:

a)

$$K_{LOK} = \frac{\epsilon_r + 2}{3} K = \frac{6.7 + 2}{3} 10^4 \frac{\text{V}}{\text{m}} = 2.9 \cdot 10^4 \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

b)

$$\alpha_e = 4\pi\epsilon_0 r_0^3 = 1.92 \cdot 10^{-40} \text{ Fm}^2$$

c)

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \frac{M}{d} = \frac{N_A \alpha_e}{3\epsilon_0} \Rightarrow \alpha_e = \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \frac{M}{d} \frac{3\epsilon_0}{N_A} = 5.3 \cdot 10^{-40} \text{ Fm}^2$$

MATERIJALI ZA ELEKTRONIKU**Računske vežbe**

d)

$$p = \alpha_e K_{LOK}, p = qd \Rightarrow qd = \alpha_e K_{LOK} = Zed \Rightarrow d(\text{pomeraj}) = \frac{\alpha_e K_{LOK}}{Ze}$$

$$d(\text{čvrsto}) = 2.825 \cdot 10^{-18} \text{ m}$$

$$d(\text{izolovano}) = 1.02 \cdot 10^{-18} \text{ m}$$

ZADATAK 4. Silicijum i germanijum pripadaju kovalentnim kristalima i poluprovodničkim elementima. Radijus atoma Si je $r_{Si}=0.262\text{nm}$, a Ge je $r_{Ge}=0.152\text{nm}$. Neka svojstva ovih elemenata data su u tabeli:

ELEMENT	ϵ_r	atomska masa	$d[\text{g}/\text{cm}^3]$	$\alpha_e(\text{kristal})$	$\alpha_e(\text{izolovan atom})$	n
Silicijum (Si)	11.9	28.09	2.33			
Germanijum (Ge)	16	72.61	5.32			

Na osnovu datih podataka popuniti tabelu vrednostima za elektronsku polarizabilnost kristala i elektronsku polarizabilnost izolovanih atoma.

Rešenje:

Korišćenjem sledećih formula rešavamo zadatak:

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{N\alpha_e}{3\epsilon_0} \quad \alpha_e = 4\pi\epsilon_0 r_0^3 \quad N = \frac{d \cdot N_A}{M} \quad n = \sqrt{\epsilon_r}$$

Silicijum (Si):

$$N_{Si} = \frac{2.33 \cdot 10^3 \cdot 6.02 \cdot 10^{26}}{28.09} = 4.99 \cdot 10^{28} \frac{1}{m^3}$$

$$\alpha_e = \frac{3(\epsilon_r - 1)\epsilon_0}{N(\epsilon_r + 2)} = \frac{(11.9 - 1) \cdot 3 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12}}{(11.9 + 2) \cdot 4.99 \cdot 10^{28}} = 4.17 \cdot 10^{-40} \text{ Fm}^2$$

$$n = \sqrt{11.9} = 3.45$$

$$\alpha_{eATOM} = 4\pi \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} (0.262 \cdot 10^{-9})^3 = 2 \cdot 10^{-39} \text{ Fm}^2$$

Germanijum (Ge):

$$N_{Ge} = \frac{5.32 \cdot 10^3 \cdot 6.02 \cdot 10^{26}}{72.61} = 4.41 \cdot 10^{28} \frac{1}{m^3}$$

$$\alpha_e = \frac{3(\epsilon_r - 1)\epsilon_0}{N(\epsilon_r + 2)} = \frac{(16 - 1) \cdot 3 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12}}{(16 + 2) \cdot 4.41 \cdot 10^{28}} = 5.01 \cdot 10^{-40} \text{ Fm}^2$$

$$n = \sqrt{16} = 4$$

$$\alpha_{eATOM} = 4\pi \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} (0.152 \cdot 10^{-9})^3 = 3.9 \cdot 10^{-40} \text{ Fm}^2$$

MATERIJALI ZA ELEKTRONIKU**Računske vežbe**

ZADATAK 5. MgO ima relativnu dielektričnu konstantu 9.6 koja je rezultat elektronske i jonske polarizacije. Indeks prelamanja MgO iznosi 1.74, a broj jona $5.4 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$.

- Ako se na dielektrik priključi električno polje jačine 10^4 V/m izračunati lokalno polje unutar dielektrika.
- Izračunati jonsku polarizabilnost datog jedinjenja.
- Za koliko se pomere joni Mg^{2+} u odnosu na jone O^{2-} u datim uslovima.

Rešenje:

a)

$$K_{LOK} = \frac{\epsilon_r + 2}{3} K = 3.87 \cdot 10^4 \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

b)

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{N\alpha}{3\epsilon_0}$$

$$\alpha = \alpha_e + \alpha_j$$

$$\epsilon_r = n^2 \Rightarrow \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{N\alpha}{3\epsilon_0}$$

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{N\alpha_j}{3\epsilon_0} + \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \Rightarrow \alpha_j = \frac{3\epsilon_0}{N} \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} - \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)$$

$$\alpha_j = 1.66 \cdot 10^{-40} \text{ Fm}^2$$

c)

$$p = Zed = 2ed$$

$$p = \alpha_j E_{lok} = \alpha_j \frac{\epsilon_r + 2}{3} E$$

$$2ed = \alpha_j \frac{\epsilon_r + 2}{3} E$$

$$\Rightarrow d = \alpha_j \frac{\epsilon_r + 2}{3} \frac{E}{2e} = 2 \cdot 10^{-17} \text{ m}$$