

Dejan Raković

**FIZIČKE OSNOVE I
KARAKTERISTIKE
ELEKTROTEHNIČKIH
MATERIJALA**

**ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET
BEOGRAD, 1995**

dr Dejan Raković, vanredni profesor
FIZIČKE OSNOVE I KARAKTERISTIKE
ELEKTROTEHNIČKIH MATERIJALA
univerzitetski udžbenik

1. izdanje

Recenzenti

dr Predrag Osmokrović, vanredni profesor
dr Dragan Đorđević, vanredni profesor

Izdavač

Elektrotehnički fakultet
Univerzitet u Beogradu
Beograd, Bulevar Revolucije 73

Uređivački odbor

Komisija za izdavačku delatnost
Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu

Glavni i odgovorni urednik

mr Gradimir Božilović

CIP – Katalogizacija u publikaciji
Narodna biblioteka Srbije, Beograd

621.315:66.017(075.8)

Raković, Dejan

Fizičke osnove i karakteristike elektrotehničkih materijala / Dejan Raković.

Beograd: Elektrotehnički fakultet, 1995 (Beograd: Beopres)

455 str. i graf. prikazi: 24 cm

Tiraž: 500. – Bibliografija uz svako poglavlje.

ISBN 86-7225-001-X

621.315:537(075.8) 538.9(075.8) 539.2/.8(075.8)

a) Elektrotehnički materijali

b) Fizika čvrstog stanja

ID=33147148

Predgovor

U osnovi naučno-tehnološkog progresa nalaze se materijali i tehnologije. Poslednjih decenija dobijeni su novi elektrotehnički materijali sa znatno boljim karakteristikama – poluprovodnici, superprovodnici, superdielektrici, kablovski materijali, magnetici itd. – koji su omogućili minijaturizaciju elektronskih naprava, mašina, aparata i uređaja, s jedne strane, i izradu moćnih generatora električne energije, s druge strane.

S obzirom da izuzetno brz razvoj elektrotehnike postavlja zahteve za brzu sintezu materijala odgovarajućih svojstava, to se poslednjih decenija razvila nauka o materijalima, koja je omogućila teorijsko modeliranje povezanosti zahtevanih karakteristika materijala sa njihovom strukturom i tehnologijom izrade. Ovo je bilo od izuzetnog značaja za izbegavanje često mukotrpnog, dugotrajnog i skupog eksperimentalnog istraživačkog rada.

Ovom udžbeniku prethodili su "Elektrotehnički materijali. Fizičke osnove, karakteristike i specijalne tehnologije", napisani u koautorstvu sa prof. P. Nikolićem, u izdanju Naučne knjige (1987). U međuvremenu su se dogodile promene u nastavnim planovima na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, gde je akcenat prebačen sa tehnologije na fiziku elektrotehničkih materijala, zbog čega je i bilo nužno znatno izmeniti koncepciju udžbenika.

U ovom udžbeniku akcenat je stavljen na fizičke osnove i karakteristike elektrotehničkih materijala. Udžbenik u celini predstavlja gradivo predmeta Fizika materijala II na Smeru za elektrotehničke materijale i tehnologije Odseka za fizičku elektroniku na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, pri čemu se podrazumeva da studenti poseduju osnovna znanja iz kvantne mehanike, statističke fizike i fizičke elektronike poluprovodnika (čiji repertorijumi su dati u Dodacima D.1–3). To se isto podrazumeva (ali u znatno manjem obimu) i za studente druge godine neenergetskih usmerenja Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, za koje ovaj udžbenik pokriva drugu polovinu predmeta Fizika materijala (ovi studenti mogu da propuste pri učenju Odeljke 1.1.3–4, 2.4, 3.2.1, 3.2.5, 3.4.1, 4.1–3, kao i one delove štampane sitnijim tekstom ili u obliku fusnota, uključujući i komplikovanija izvođenja, koji se vremenski ne mogu uklopiti u postojeći nastavni fond časova). Udžbenik može biti od koristi i studentima energetskih usmerenja, kojima se posebno preporučuje Glava 6, koja pokriva uporedne karakteristike elektrotehničkih materijala, sa osvrtom na njihove primene.

Jasno, ovaj udžbenik može korisno poslužiti i studentima elektrotehnike na drugim univerzitetima, kao i diplomiranim inženjerima i postdiplomcima –

kojima može biti i koristan priručnik iz oblasti elektrotehničkih materijala, pošto sadrži i mnogobrojne tablice, kako u osnovnom tekstu, tako i u Dodatku D.4.

U Udžbeniku se nalazi i veliki broj rešenih zadataka, čiji je cilj ili rasterećenje teksta od glomaznih izvođenja koja nose formalni karakter i remete ritam izlaganja, ili islustracija nekih iskaza iznetih u tekstu.

Autor se toplo zahvaljuje i recenzentima udžbenika, dr Predragu Osmokroviću, vanrednom profesoru i dr Draganu Đorđeviću, vanrednom profesoru.

Autor se toplo zahvaljuje i mladim saradnicima i/ili postdiplomcima Miroslavu Dramićaninu, Aleksandru Jelenku, mr Zoranu Ristovskom, Dejanu Veljkoviću, Romanu Šorđanu i Snežani Jenei, na korisnim sugestijama i/ili tehničkoj pomoći u izradi ovog udžbenika.

Veliku zahvalnost za sponzorisanje udžbenika dugujem Institutu za hemijske izvore struje – IHIS–Holding, d.d., IHIS–Fullerene Science and Technology Center, d.o.o., EI–Holding, FERITI, d.o.o., D.D. za telekomunikacije i elektroniku–IRITEL, i EI–Pupin, Javni komutacioni sistemi, D K T S, d.o.o. Pri tome, posebno se zahvaljujem dr Petru Rakinu za svesrdnu koordinaciju u pomenutoj organizaciono–finansijskoj podršci.

AUTOR

SADRŽAJ

Uvod	1
1 Struktura čvrstih kristalnih materijala	4
1.1 Prostorna struktura kristalnih tela	5
1.1.1 Translaciona simetrija	5
1.1.2 Recipročna rešetka. Prva Briluenova zona. Milerovi indeksi..	7
1.1.3 Simetrije kristalne strukture	11
1.1.4 Klasifikacija kristalnih struktura	13
1.1.5 Proste i složene kristalne strukture. Predstavnicu	17
1.2 Hemijske veze u čvrstim telima	22
1.2.1 Jonske veze	24
1.2.2 Kovalentne veze	25
1.2.3 Metalne veze	27
1.2.4 Van der Valsove veze	28
1.3 Nesavršenosti u kristalnoj strukturi	29
1.3.1 Šotkijevi i Frenkeljevi defekti	30
1.3.2 Primesni atomi	31
1.3.3 Dislokacije	33
1.3.4 Granice kristalnih zrna	36
1.4 Zadaci	36
1.5 Literatura	46
2 Model kvazislobodnih elektrona u kristalu	48
2.1 Energetske zone kristala	49
2.1.1 Podela elektrotehničkih materijala prema veličini energetskog procepa. Vrste energetskog procepa	55
2.2 Pojam efektivne mase kvazislobodnih nosilaca	57
2.3 Pojam kvazislobodnih nosilaca šupljina	59
2.4 Statistika kvazislobodnih nosilaca	60
2.4.1 Provodnici	61
2.4.2 Sopstveni poluprovodnici	63
2.4.3 Primesni poluprovodnici	66
2.5 Električna provodnost materijala	70
2.5.1 Podela elektrotehničkih materijala prema veličini specifične električne otpornosti	73
2.6 Toplotna provodnost materijala	74
2.7 Kontaktne pojave. Difuzija	78
2.7.1 Kontaktna razlika potencijala. Termoelektrične pojave	80
2.8 Zadaci	83
2.9 Literatura	90

3 Nedovoljnost modela kvazislobodnih elektrona – uticaj kristaln strukture	91
3.1 Vibracije atoma u kristalu - fononi	91
3.1.1 Rasejavanje kvazislobodnih nosilaca na nesavršenostima i vibracijama kristala. Temperaturska zavisnost specifične električne otpornosti.	95
3.1.8 Toplotno širenje kristala.	98
3.2 Dielektrična svojstva materijala	101
3.2.1 Veza između makroskopskih i mikroskopskih parametara dielektrika.	104
3.2.2 Teorija polarizabilnosti.	108
3.2.3 Dielektrična propustljivost. Zavisnost realnog i imaginarnog dela dielektrične propustljivosti od spoljašnjih činilaca (učestanosti, temperature i vlažnosti).	114
3.2.4 Dielektrična čvrstoća.	121
3.2.5 Nelinearni dielektrici (pirelektrici, piezoelektrici, feroelektrici, antiferoelektrici i elektreti).	123
3.3 Magnetna svojstva materijala.	127
3.3.1 Slabo magnetno uređenje (dijamagnetici i paramagnetici).	127
3.3.2 Jako magnetno uređenje (feromagnetici, antiferomagnetici i ferimagnetici).	130
3.3.3 Makroskopska struktura magnetika.	135
3.4 Superprovodnost.	138
3.4.1 Fenomenološke teorije.	141
3.4.2 Mikroskopska (BCS) teorija.	145
3.5. Zadaci.	150
3.6 Literatura.	182
4 Struktura čvrstih nekristalnih materijala	183
4.1 Amorfni materijali.	186
4.2 Tečni kristali.	191
4.3 Polimeri.	194
4.4 Zadaci.	199
4.5 Literatura.	199
5 Metode karakterizacije čvrstih tela	201
5.1 Određivanje prostorne strukture.	201
5.1.1 Rendgenska difrakcija.	202
5.1.2 Elektronska difrakcija.	206
5.1.3 Neutronska difrakcija.	206
5.1.4 Optička, elektronska i skanirajuća tunelska mikroskopija.	207
5.1.5 Defektoskopske metode.	207

5.2	Određivanje elektronske zonalne strukture	208
5.2.1	Optičke metode. Određivanje veličine i vrste energetskog procepa	208
5.2.2	Određivanje veličine energetskog procepa termičkom metodom	211
5.3	Određivanje tipa hemijskih veza	212
5.3.1	Spektroskopske vibracione metode. Infracrvena apsorpcija i Ramanovo rasejanje	213
5.3.2	Neelastično neutronske rasejavanje na vibracijama kristala	214
5.4	Određivanje transportnih karakteristika poluprovodnika	215
5.4.1	Holova metoda	215
5.4.2	Metode "vruće tačke" i "četiri tačke"	216
5.4.3	Ciklotronska rezonanca	218
5.5	Određivanje dielektričnih karakteristika materijala	219
5.5.1	Određivanje relativne dielektrične propustljivosti i tangensa ugla gubitaka	219
5.5.2	Određivanje unutrašnje i površinske specifične električne otpornosti	220
5.5.3	Određivanje dielektrične čvrstoće	221
5.6	Određivanje magnetne strukture materijala	221
5.6.1	Neutronska difrakcija i neelastično neutronske rasejanje	221
5.6.2	Nuklerana magnetna rezonanca	222
5.6.3	Određivanje temperaturske zavisnosti magnetne susceptibilnosti	222
5.6.4	Određivanje makroskopskih magnetnih karakteristika	222
5.6.5	Određivanje magnetne susceptibilnosti superprovodnika	223
5.7	Ispitivanje mehaničkih karakteristika materijala	224
5.7.1	Ispitivanje zatezanjem	225
5.7.2	Ispitivanje tvrdoće	228
5.7.3	Ispitivanje žilavosti	229
5.8	Zadaci	231
5.9	Literatura	242
6	Uparedne karakteristike elektrotehničkih materijala	243
6.1	Poluprovodnici	244
6.1.1	Inženjering energetskog procepa: poluprovodnička jedinjenja, legure i nanostrukture	244
6.1.2	Primena poluprovodničkih materijala prema veličini i vrsti energetskog procepa	247
6.1.3	Uparedne karakteristike silicijuma, germanijuma i galijum-arsenida	249

6.1.4 Ostali važniji poluprovodnički elementi, jedinjenja, legure i nanostrukture.	252
6.1.5 Organski poluprovodnici.	253
6.1.6 Metode dobijanja masivnih i tankoslojnih monokristala.	256
6.1.7 Silicijumska mikroelektronika.	260
6.1.8 Tankoslojna, debeloslojna i hibridna mikroelektronika	268
6.1.9 Perspektive daljeg razvoja poluprovodničkih mikroelektronika.	271
6.2 Provodnici.	280
6.2.1 Metali velike provodnosti.	281
6.2.2 Metali male provodnosti i otporni materijali.	282
6.2.3 Specijalni provodni materijali.	283
6.2.4 Organski provodnici.	287
6.2.5 Inženjering mehaničkih karakteristika metala.	289
6.3 Dielektrici.	304
6.3.1 Izolacioni materijali.	305
6.3.2 Kablovske tehnologije	307
6.3.3 Kondenzatorski materijali.	312
6.3.4 Specijalni dielektrični materijali.	314
6.3.5 Dielektrična mikroelektronika. Optičke memorije.	316
6.4 Magnetici.	318
6.4.1 Magnetno meki materijali.	320
6.4.2 Magnetno tvrdi materijali.	321
6.4.3 Magnetna mikroelektronika. Magnetne memorije.	323
6.5 Superprovodnici.	325
6.5.1 Niskotemperaturski i visokotemperaturski superprovodnici.	325
6.5.2 Organski superprovodnici.	327
6.5.3 Superprovodne žice i kablovi.	329
6.5.4 Superprovodna mikroelektronika. Džozefsonovi spojevi	331
6.6 Biomedicinski materijali.	333
6.7 Zadaci.	336
6.8 Literatura.	351
DODACI.	353
D.1 Repetitorijum iz kvantne mehanike.	354
D.1.1 Osnovni kvantnomehantički postulati. Šredingerova talasna jednačina.	354
D.1.2 Srednje vrednosti fizičkih veličina. Klasični limit.	356
D.1.3 Stacionarna stanja. Vremenski nezavisna Šredingerova talasna jednačina.	357
D.1.4 Hajzenbergove relacije neodređenosti. Klasični limit.	358
D.1.5 Svojstvene talasne funkcije komutirajućih operatora.	360

D.1.6	Razvoj talasne funkcije po proizvoljnom bazisnom skupu. Redukcija talasnog paketa.....	361
D.1.7	Hajzenbergova matrična forma kvantne mehanike.	362
D.1.8	Kvantnomehanički integrali kretanja.	365
D.1.9	Gustina struje verovatnoće.....	365
D.1.10	Talasna funkcija slobodne čestice. Kontinualni energetski spektar.	367
D.1.11	Grupna i fazna brzina slobodne čestice. Talasni paket.	368
D.1.12	Čestica u beskonačno dubokoj jednodimenzionoj potencijalnoj jami. Diskretni energetski spektar.	370
D.1.13	Tuneliranje čestice kroz pravougaonu jednodimenzionu Potencijalnu barijeru.	372
D.1.14	Talasna funkcija sistema N neinteragujućih čestica.	374
D.1.15	Talasne funkcije sistema bozona i fermiona. Paulijev princip isključenja.	375
D.1.16	Literatura.	378
D.2	Repetitorijum iz statističke fizike.	379
D.2.1	Statistička fizika, teorija informacija i termodinamika.....	379
D.2.2	Fermi-Dirakova, Boze-Ajnštajnova i Maksvel-Bolcmanova raspodela.	381
D.2.3	Literatura.	384
D.3	Repetitorijum iz fizičke elektronike poluprovodničkih struktura.	385
D.3.1.	p - n spoj. Diode.	385
D.3.2	p^+ - n , p^+ - p i n^+ - n spojevi. Omski kontakti.....	396
D.3.3	n - p - n i p - n - p spojevi. Bipolarni tranzistori.	398
D.3.4	Unipolarni tranzistori.	406
D.3.5	n - p - n - p spoj. Tiristori.....	412
D.3.6	Heterospojevi.	416
D.3.7	Nanostrukture. Superrešetke, kvantne žice i kvantne tačke	418
D.3.8	Izvori zračenja. Laseri i LED diode.	423
D.3.9	Detektori zračenja.	426
D.3.10	Sunčeve ćelije.	429
D.3.11	Zadaci.....	432
D.3.12	Literatura.	447
D.4	Karakteristike odabranih klasa elektrotehničkih materijala.	448
Tablica D.4.1	Karakteristike odabranih poluprovodničkih elemenata i jedinjenja.	448
Tablica D.4.2	Osnovne karakteristike metala male provodnosti	449
Tablica D.4.3	Legure za zagrevne elemente.	450
Tablica D.4.4	Neke karakteristike mekih lemova.	450

Tablica D.4.5 Neke karakteristike tvrdih lemova.	451
Tablica D.4.6 Vrednosti kritične temperature za odabrana superprovodna jedinjenja i legure.	451
Tablica D.4.7 Karakteristike važnijih dielektričnih materijala.	452
Tablica D.4.8 Karakteristike odabranih magnetno mekih materijala.	453
Tablica D.4.9 Svojstva odabranih magnetno tvrdih materijala.	453
Tablica D.4.10 Odnos zatezna čvrstoća–prema–gustini (σ_m/ρ) za neke konstrukcione materijale	454
Tablica D.4.11 Fizičke konstante.	455