Predgovor

Udžbenik *Uvod u elektroniku* obuhvata materijal za predavanja koji su autori dugi niz godina pripremali za nastavu iz istoimenog ili srodnih predmeta na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Banjoj Luci. Udžbenik je, prije svega, namijenjen studentima druge godine studija, jer u potpunosti odgovara sadržaju predmeta Uvod u elektroniku, koji je u nastavnom planu u trećem semestru na studijskim programima Elektronika i tekomunikacije (oba smjera) i Računarstvo i informatika, smjer Računarski inženjering.

Prilikom pripreme za publikaciju, vodili smo računa da materijal bude izložen na savremen način koji je neophodan za sticanje teorijskih i praktičnih znanja iz oblasti fizike i primjene osnovnih poluprovodničkih komponenata i linearnih pojačavača. Najveći broj komponenata napravljen je u silicijumskim tehnologijama. Stoga je prva glava, pod nazivom *Osnovi fizike poluprovodnika*, posvećena osnovnim poluprovodničkim svojstvima silicijuma i karakteristikama PN spoja pri različitim uslovima polarizacije. Pored toga, predstavljeni su osnovni tehnološki postupci planarnog procesa koji se koristi za proizvodnju poluprovodničkih komponenata.

U drugoj glavi, sa nazivom *Diode*, opisane su električne karakteristike poluprovodničkih dioda. Obrađeni su i drugi tipovi dioda koji imaju najviše primjena u praksi, pri čemu je princip njihove primjene ilustrovan na primjerima.

Treća glava, *Bipolarni tranzistori*, daje opis strukture, principa rada i električnih karakteristika bipolarnih tranzistora, dok četvrta glava, *Tranzistori sa efektom polja*, opisuje strukturu, princip rada i električne karakteristike unipolarnih tranzistora, JFET-a i MOS tranzistora. U ovim glavama opisane su i osnovne primjene tranzistora, kao pojačavača i prekidača, i dati su njihovi modeli za velike i male signale.

U glavi *Jednostepeni pojačavači* dat je opis jednostepenih pojačavača sa bipolarnim i MOS tranzistorima, opisani su načini polarizacije pojačavača i

urađena je dinamička analiza. Posebno su analizirani uticaji izvora signala i opterećenja na dinamičke parametre različitih konfiguracija jednostepenih pojačavača. Ukazano je i kako se tranzistori mogu koristiti u pojačavačima kao aktivna opterećenja.

U šestoj glavi, *Višestepeni pojačavači*, opisani su načini sprege pojačavačkih stepena u realizaciji višestepenih pojačavača. Posebno su analizirani kaskadni i kaskodni višestepeni pojačavači, kao i primjene ovih pojačavača.

Na kraju, posebno se zahvaljujemo recenzentima knjige, prof. dr Branku Dokiću i prof. dr Predragu Petkoviću, koji su pažljivo pročitali rukopis i svojim korisnim sugestijama i primjedbama doprinijeli kvalitetnijem tekstu.

Svjesni smo činjenice da u udžbeniku može biti izvjesnih nepreciznosti, grešaka i propusta, te unaprijed zahvaljujemo svima koji nam ukažu na iste.

Banja Luka, maj 2018. godine *Autori*

Sadržaj

1. Osnove fizike poluprovodnika **1**

1.1. Kristalna struktura poluprovodnika 2

1.2. Nosioci naelektrisanja 4

1.3. Energetske zone 6

1.4. Sopstveni poluprovodnici 12

1.5. Primjesni poluprovodnici 14

1.5.1. Poluprovodnik n-tipa 14

1.5.2. Poluprovodnik p-tipa 15

1.5.3. Uticaj primjesnih atoma na energetske nivoe 15

1.5.4. Kompenzovani poluprovodnik 18

1.6. Transport nosilaca naelektrisanja 20

1.6.1. Drift nosilaca naelektrisanja 20

1.6.2. Difuzija nosilaca naelektrisanja 24

1.6.3. Ajnštajnova relacija 25

1.7. PN spoj 27

1.7.1. Ravnotežno stanje 27

1.7.2. Inverzna polarizacija 33

1.7.3. Direktna polarizacija 36

1.7.4. Proboj PN spoja 40

1.8. Planarna tehnologija 41

1.8.1. Izrada silicijumske pločice 42

1.8.2. Termička oksidacija 43

1.8.3. Litografija 44

1.8.4. Difuzija 46

1.8.5. Jonska implantacija 47

1.8.6. Epitaksijalni rast 48

1.8.7. Depozicija tankih slojeva 49
1.8.8. Testiranje i pakovanje 50
1.9. Zadaci za vježbu 50

2. Diode **53**
2.1. Idealna dioda 54
2.2. Strujno-naponska karakteristika realne diode 56
2.2.1. Direktna polarizacija 57
2.2.2. Inverzna polarizacija 58
2.2.3. Oblast proboja 58
2.3. Određivanje statičke radne tačke 59
2.4. Model za male signale 67
2.5. Zener dioda 69
2.5.1. Temperaturne karakteristike 71
2.6. Dioda u ispravljačkim kolima 75
2.6.1. Jednofazni punotalasni ispravljači 75
2.6.2. Filtri na izlazu ispravljača 77
2.7. Prekidački režim rada diode 79
2.8. Tipovi dioda 81
2.8.1. Šotkijeva dioda 81
2.8.2. TVS diode 82
2.8.3. Varikap dioda 83
2.8.4. LE dioda 84
2.8.5. Fotodioda 87
2.9. Zadaci za vježbu 89

3. Bipolarni tranzistori **93**
3.1. Struktura bipolarnog tranzistora 93
3.2. Princip rada NPN tranzistora 95
3.2.1. Aktivni režim rada 96
3.3. Statičke I-V karakteristike 102
3.3.1. Ebers-Molov model 102
3.3.2. Ulazne I-V karakteristike 105
3.3.3. Izlazne I-V karakteristike 106
3.3.4. Erlijev efekat 110
3.3.5. Statičke I-V karakteristike tranzistora u spoju zajedničke baze 112

3.4. Temperaturne karakteristike . . . 114
3.5. Ograničenja u radu tranzistora . . . 115
3.6. Tranzistor kao pojačavač . . . 118
3.7. Tranzistor kao prekidač . . . 122
3.8. Analiza za male signale . . . 124
3.9. Modeli za male signale . . . 128
3.9.1. Hibridni π model . . . 128
3.9.2. T model . . . 129
3.10. PNP tranzistor . . . 130
3.10.1. Struktura i princip rada . . . 130
3.10.2. Modeli PNP tranzistora . . . 131
3.11. Fototranzistor . . . 135
3.11.1. Optokapler . . . 136
3.12. Zadaci za vježbu . . . 138

4. Tranzistori sa efektom polja **139**
4.1. JFET . . . 139
4.1.1. Analiza rada JFET-a . . . 141
4.1.2. Statičke I-V karakteristike . . . 143
4.1.3. Ograničenja u radu tranzistora . . . 146
4.1.4. JFET kao pojačavač . . . 147
4.2. MOS tranzistori . . . 151
4.2.1. Struktura i princip rada NMOS tranzistora . . . 152
4.2.2. Kapacitivnost MOS kondenzatora . . . 154
4.2.3. Napon praga . . . 156
4.2.4. Statičke strujno-naponske karakteristike . . . 157
4.2.5. Ograničenja u radu tranzistora . . . 165
4.2.6. MOS tranzistor kao prekidač . . . 167
4.2.7. Model za velike signale . . . 170
4.2.8. Model za male signale . . . 170
4.2.9. PMOS tranzistor . . . 172
4.2.10. MOS tranzistori sa ugrađenim kanalom . . . 176
4.2.11. MOS tranzistori u integrisanim kolima . . . 178
4.3. Zadaci za vježbu . . . 183

5. Jednostepeni pojačavači **185**

5.1. Naponski pojačavač 185
5.1.1. Ulazna otpornost 186
5.1.2. Izlazna otpornost 187
5.1.3. Naponsko pojačanje otvorenog kola 187
5.1.4. Ukupno naponsko pojačanje 187
5.2. Pojačavač sa zajedničkim emitorom 189
5.2.1. Polarizacija 189
5.2.2. Dinamička analiza 193
5.2.3. Stabilnost pojačavača 198
5.3. Pojačavač sa degenerisanim emitorom 199
5.3.1. Polarizacija 199
5.3.2. Dinamička analiza 201
5.3.3. Polarizacija preko emitora 208
5.4. Pojačavač sa zajedničkim sorsom 210
5.4.1. Polarizacija 210
5.4.2. Dinamička analiza 213
5.5. Pojačavač sa degenerisanim sorsom 216
5.5.1. Polarizacija 216
5.5.2. Dinamička analiza 218
5.6. Pojačavač sa zajedničkom bazom 222
5.7. Pojačavač sa zajedničkim gejtom 229
5.8. Pojačavač sa zajedničkim kolektorom 234
5.9. Pojačavač sa zajedničkim drejnom 239
5.10. Pojačavači sa aktivnim opterećenjem 243
5.11. Zadaci za vježbu 245

6. Višestepeni pojačavači **251**

6.1. Kaskadni pojačavači 251
6.1.1. Pojačavači sa direktnom spregom 253
6.1.2. Pojačavači sa kapacitivnom spregom 258
6.2. Kaskodni pojačavači 260
6.2.1. Bipolarni kaskodni pojačavač 261
6.2.2. MOS kaskodni pojačavač 267
6.3. Zadaci za vježbu 272

Glava 1

Osnove fizike poluprovodnika

U zavisnosti od vrijednosti specifične električne provodnosti σ (ili specifične električne otpornosti ρ), materijali se mogu svrstati u tri grupe: provodnici, poluprovodnici i izolatori. Specifična električna provodnost silicijuma (Si), najčešće korišćenog elementa u poluprovodničkoj industriji, može se mijenjati u opsegu od $5 \cdot 10^{-2}$ do $5 \cdot 10^{5}$ $(\Omega\text{cm})^{-1}$, što predstavlja promjenu od sedam redova veličine. Mogućnost promjene provodnosti poluprovodničkih materijala u tako širokom opsegu omogućava projektovanje veoma upotrebljivih elektronskih komponenata.

U Mendeljejevom periodnom sistemu elemenata, na lijevoj strani nalaze se provodnici (metali), krajnje desno su izolatori, dok su u središnjem dijelu grupisani poluprovodnici. U tabeli 1.1 prikazan je izvod iz periodnog sistema elemenata sa najčešće korišćenim poluprovodničkim elementima (osjenčena polja).

Tabela 1.1. Dio periodnog sistema elemenata sa naznačenim poluprovodničkim elementima

Perioda	**Grupa**				
	III	IV	V	VI	VII
Druga	**B** Bor	**C** Ugljenik			
Treća	**Al** Aluminijum	**Si** Silicijum	**P** Fosfor	**S** Sumpor	
Četvrta	**Ga** Galijum	**Ge** Germanijum	**As** Arsen	**Se** Selen	
Peta	**In** Indijum	**Sn** Kalaj	**Sb** Antimon	**Te** Telur	**J** Jod

Osim poluprovodničkih elemenata (datih u tabeli 1.1), za proizvodnju elektronskih kola i sistema koriste se i dvokomponentna i trokomponentna jedinjenja, pri čemu su najviše zastupljena takozvana III/V jedinjenja (jedan element treće i jedan element pete grupe). U tabeli 1.2 navedena su III/V poluprovodnička jedinjenja.

Tabela 1.2. III/V poluprovodnička jedinjenja

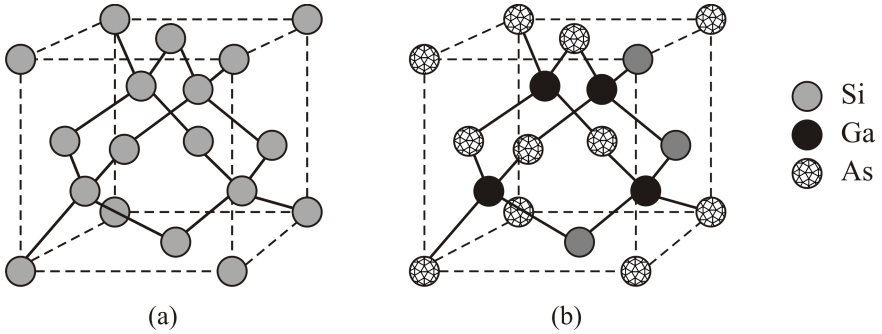
III/V jedinjenje	P (fosfor)	As (arsen)	Sb (antimon)
Al (aluminijum)	**AlP**	**AlAs**	**AlSb**
Ga (galijum)	**GaP**	**GaAs**	**GaSb**
In (indijum)	**InP**	**InAs**	**InSb**

1.1. Kristalna struktura poluprovodnika

Poluprovodnici koji se danas koriste (i elementarni poluprovodnici i jedinjenja) imaju kristalnu strukturu. Kristalna struktura elementarnih poluprovodnika je dijamantskog tipa (silicijum, germanijum), dok je kristalna struktura poluprovodničkih jedinjenja (GaAs, GaP, AlAs, InSb) uglavnom struktura sfalerita. Sfaleritna struktura je slična dijamantskoj, samo što strukturu čine dva elementa.

U poluprovodničkoj industriji najviše se koristi silicijum, bilo iz ekonomskih, bilo iz tehnoloških razloga. Atomski broj silicijuma je 14 i nalazi se u četvrtoj grupi periodnog sistema elemenata, što znači da u posljednjoj orbiti, koja je nepopunjena, ima četiri elektrona (valentni elektroni). Atomi silicijuma su, stoga, podložni davanju ili primanju četiri elektrona u cilju postizanja stabilnosti posljednje orbite. Valentni elektroni atoma silicijuma stvaraju kovalentne veze sa valentnim elektronima susjednih atoma silicijuma. Na ovaj način je svaki atom silicijuma vezan sa četiri susjedna atoma silicijuma. Atomi silicijuma međusobno su na istom rastojanju (tetraedralni radijus). Trodimenzioni prikaz tetraedralne kristalne strukture silicijuma dat je na sl. 1.1.a, dok je na sl. 1.1.b dat prikaz sfaleritne kristalne strukture galijum-arsenida.

Tetraedralni raspored atoma silicijuma dozvoljava konstrukciju zamišljene kocke, koja bi onda bila osnovna ćelija kristalne rešetke silicijuma. Dužina stranice kocke naziva se konstanta rešetke a i za silicijum iznosi $a \approx 0.543$ nm, dok je najkraće rastojanje između susjednih atoma silicijuma 0.118 nm. Osnovna ćelija se replicira, zatim se replicirane ćelije pomjeraju u x, y i z



Slika 1.1. Model tetraedralne kristalne rešetke dijamantskog (a) i tipa sfalerita (b)

pravcu uvijek za konstantu kristalne rešetke i povezuju sa drugim susjednim osnovnim ćelijama kako bi se izgradio model kristalne rešetke silicijuma.

Osnovna ćelija galijum-arsenida je vrlo slična, pri čemu se naizmjenično smjenjuju pozicije atoma galijuma i arsena. Svaki atom galijuma povezan je sa četiri atoma arsena i obrnuto.

U odnosu na uniformnost kristalne rešetke, mogu se razlikovati monokristalni, polikristalni i amorfni tip silicijuma. Ukoliko je struktura silicijuma (isto važi i za ostale poluprovodnike) pravilna po cijeloj zapremini kristala, onda takav kristal nazivamo monokristalom. Međutim, uvidom u osnovnu ćeliju kristala, može se zaključiti da je kristal anizotropan i da njegove osobine zavise od pravca. Zahvaljujući tome i osobine poluprovodničkih komponenata zavise od ravni po kojima se kristal siječe.

Bilo koja ravan u prostoru može se opisati jednačinom:

$$h\frac{x}{a} + k\frac{y}{b} + l\frac{z}{c} = 1, \tag{1.1}$$

gdje su a/h, b/k i c/l odsječci na x, y i z osi, redom. Vrijednosti za h, k i l pripadaju skupu cijelih brojeva. Karakteristične kristalografske ravni definisane su ovim skupom cijelih brojeva, koji se nazivaju još i Milerovim indeksima. Određena kristalografska ravan označava se sa (hkl). U slučaju negativnog odsječka na nekoj od osa, iznad pripadajuće oznake piše se crtica. Na primjer, $(h\bar{k}l)$.

Sem kristalografskih ravni, za kristale se definišu i kristalografski pravci. Po konvenciji, kristalografski pravac normalan na ravan (hkl) označava se sa $[hkl]$.

Na sl. 1.2 prikazani su Milerovi indeksi za tri najvažnije kristalografske ravni sa odgovarajućim pravcima u kristalnoj rešetki silicijuma.