

Uvod u elektroniku

Tatjana Pešić-Brđanin, Branko Blanuša

UVOD U ELEKTRONIKU

1. izdanje

Recenzenti

Prof. dr Branko Dokić

Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Banjoj Luci

Prof. dr Predrag Petković

Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu

Lektor

Dalibor Smiljić

Grafički dizajn korica

Marko Vujadinović

Izdavač

**Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet
Akademska misao, Beograd**

Štampa

Makoprint, Banja Luka

Tiraž

100 primjeraka

СРР - Каталогизација у публикацији
Народна и универзитетска библиотека
Републике Српске, Бања Лука

621.38(075.8)

ПЕШИЋ Брђанин, Татјана, 1971-

Uvod u elektroniku / Tatjana Pešić-Brđanin, Branko Blanuša. -
Banja Luka : Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet ;
Beograd : Akademska misao, 2018 ([s.l. : s.n.]). - XII, 284 str. : graf.
prikazi, tabele ; 28 cm

Tiraž 100. - Bibliografija: str. 277-279. - Registar.

ISBN 978-99955-46-29-8 (Elektrotehnički fakultet)

COBISS.RS-ID 7424792

© Univerzitet u Banjoj Luci i Akademska misao, 2018.

Sva prava zadržana. Nije dozvoljeno da bilo koji dio ove knjige bude snimljen, emitovan ili reprodukovan na bilo koji način, uključujući, ali ne ograničavajući se na fotokopiranje, fotografiju, magnetni ili bilo koji drugi vid zapisa, bez prethodne dozvole izdavača.

Tatjana Pešić-Brđanin
Branko Blanuša

UVOD U ELEKTRONIKU

Banja Luka
2018.

Draženu i Leni
Tatjana Pešić-Brđanin

Dijani i Nikolini
Branko Blanuša

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 telekomunikacije (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. Nosioći 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

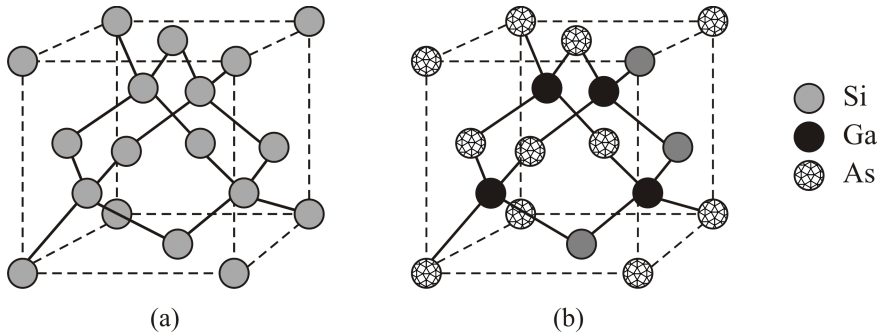
III/V jedinjenje	P (fosfor)	As (arsen)	Sb (antimon)
Al (aluminijum)	AlP	AlAs	AlSb
Ga (galijum)	GaP	GaAs	GaSb
In (indijum)	InP	InAs	InSb

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:

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

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 odsjeka 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.