

RANKO VOJINOVIĆ
RADOVAN BOŽOVIĆ

OSNOVE ELEKTRONIKE

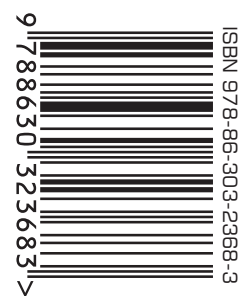
ZA I RAZRED
ELEKTROTEHNIČKE ŠKOLE

RANKO VOJINOVIĆ • RADOVAN BOŽOVIĆ

OSNOVE ELEKTRONIKE

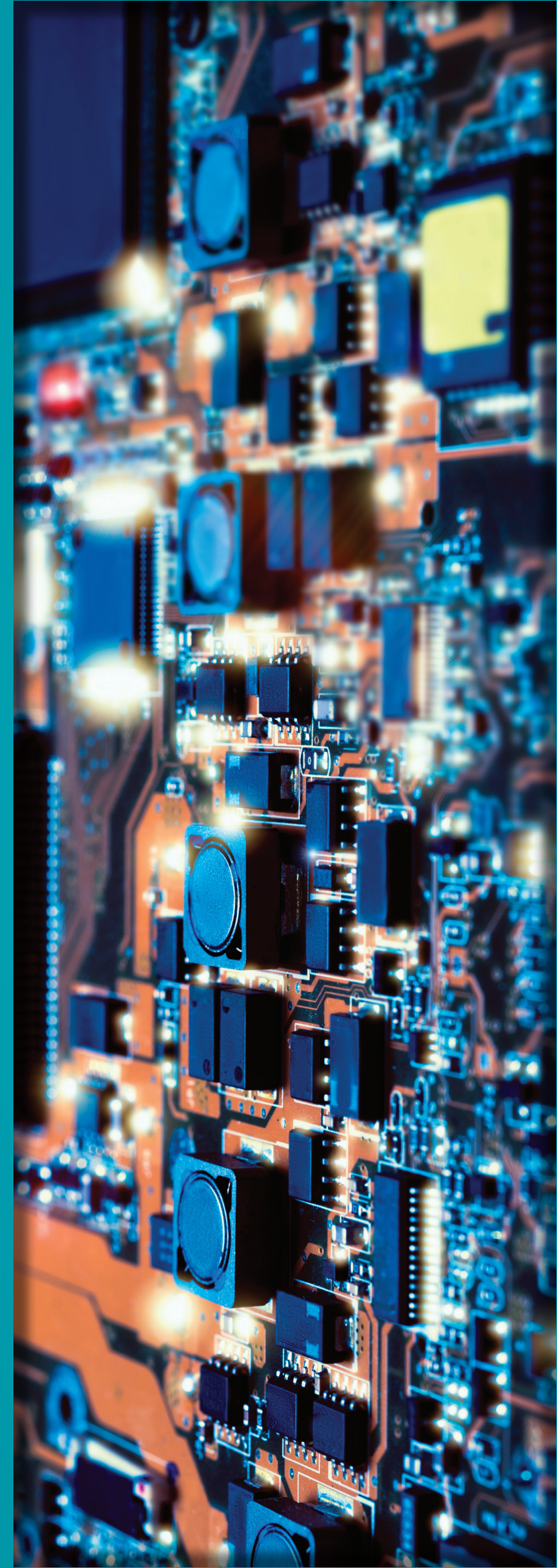


Zavod za udžbenike
i nastavna sredstva
PODGORICA



ISBN 978-86-303-2368-3

9 788630 323683 >



Ranko Vojinović • Radovan Božović

OSNOVE ELEKTRONIKE

za I razred elektrotehničke škole



Zavod za udžbenike i nastavna sredstva
PODGORICA, 2020.

Ranko Vojinović • Radovan Božović

OSNOVE ELEKTRONIKE

Udžbenik za prvi razred srednje stručne škole

Obrazovni program: Elektrotehničar/elektrotehničarka elektronike

Izdavač: Zavod za udžbenike i nastavna sredstva – Podgorica

Za izdavača: Pavle Goranović, direktor

Glavni urednik: Radule Novović

Odgovorni urednik: Lazo Leković

Urednica izdanja: Jadranka Đerković

Recenzenti:

dr Nedeljko Lekić

dr Anđela Draganić

Slavica Jovanović

Alen Šabanović

Biljana Terzić

Lektura: Dragan Batrićević

Korektura: Lidija Lakić

Ilustracija i grafička obrada: Zlatko Ljumić

Tehnička urednica: Dajana Vukčević

CIP – Каталогизација у публикацији
Национална библиотека Црне Горе, Цетиње

ISBN 978-86-303-2368-3
COBISS.CG-ID 14264068

Nacionalni savjet za obrazovanje, Rješenjem br. 10903-119/20-3335/19 od 24. 07. 2020. godine, odobrio je ovaj udžbenik za upotrebu u srednjim školama.

Copyright © Zavod za udžbenike i nastavna sredstva – Podgorica, 2020.

KAKO ČITATI UDŽBENIK

Udžbenik Osnove elektronike sastoji se od uvodnog odjeljka i osam poglavlja podijeljenih na nastavne teme. Svako poglavlje sadrži **kratak uvod**, koji čitaoca podstiče da razmišlja o sadržajima koji slijede, i **osnovni tekst nastavne teme** – obavezan sadržaj koji učenik/učenica treba da nauči. Tamo gdje je potrebno, osnovni tekst prate odgovarajuće **računske vježbe** koje pomažu razumijevanju tog teksta. Kroz osnovni tekst data su **kontrolna pitanja**, koja učeniku/učenici služe da provjeri da li je razumio/razumjela pročitani dio teksta. **Odgovori na kontrolna pitanja** dati su na kraju udžbenika, kao i tabelarni pregled **grafičkih simbola** korišćenih kroz udžbenik. Djelovi teksta koji nijesu obuhvaćeni predmetnim programom, a koje su autori smatrali važnim pominjanja, označeni su kao **neobavezno gradivo**. Udžbenik sadrži određen broj **projektnih zadataka** kojima se učenici podstiču na samostalno istraživanje i produbljuje njihovo interesovanje za elektroniku.

Iako na marginama, veoma je važan dio udžbenika koji sadrži **zanimljivosti, primjenu u praksi i veze sa ostalim predmetima**. Cilj tih elemenata jeste da učenika/učenicu dodatno zainteresuju za sadržaj osnovne teme, da omoguće saznanja o praktičnoj primjeni izložene materije, te da se pročitano povezuje s nastavnom materijom izučavanom u okviru drugih predmeta. Na marginama su date i informacije o **poznatim fizičarima** i objašnjeno je **značenje manje poznatih riječi, izraza i skraćenica**.

Na kraju svakog poglavlja dat je njegov **rezime** s preglednim i konciznim sadržajem poglavlja, kao i **pitanja i zadaci za provjeru razumijevanja gradiva**. Odgovori na pitanja nijesu dati u knjizi zbog namjere autora da kod učenika pobudi dodatnu radoznalost i motiviše ih da sami ili uz pomoć nastavnika/nastavnice traže odgovore, dok su za svaki zadatak data rješenja.

Osmo poglavlje sadrži dio koji obrađuje **praktične vježbe** predviđene Obrazovnim programom za modul Osnove elektronike. U **rječniku pojmova**, datom na kraju udžbenika, na pregledan način prikazani su i definisani pojmovi iz oblasti elektronike sadržani u udžbeniku.

Elektronika je jedna od temeljnih disciplina elektrotehnike. Na njoj se zasniva rad mnogih uređaja (mobilni telefon, računar, tablet i dr.), koje svakodnevno koristiš. Izučavanjem elektronike razumjećeš kako oni funkcionišu i kako da stečena znanja primjenjuješ i koristiš u životu, posebno u dijelu ostvarivanja socijalizacijskih ciljeva (svijest o poštovanju pravila, osjećaj važnosti racionalnog trošenja materijalnih dobara, odgovornost za poštovanje principa koji vode uspješnom poslovanju, osjećaj lične odgovornosti u radu i jačanju ekološke svijesti).

Autori



zanimljivost



pojašnjenje riječi, izraza i skraćenica



neobavezno gradivo



poznati fizicari



kontrolna pitanja



primjena u praksi



projektni zadatak



rezime



pitanja i zadaci

SADRŽAJ

Kako čitati udžbenik	3
Uvod u elektrotehniku	6
Osnovne karakteristike i struktura elektrotehničkih materijala	16

1 OSNOVNE KARAKTERISTIKE I STRUKTURA ELEKTROTEHNIČKIH MATERIJALA.....16

1.1 Struktura atoma	17
1.2 Vrste hemijskih veza	19
1.3 Vrste elektrotehničkih materijala	21
1.4 Kristalna struktura poluprovodnika	23
1.4.1 Kristalna struktura silicijuma	23
1.4.2 Poluprovodnici P-tipa i N-tipa	25
1.5 Primjena elektrotehničkih materijala	27

2 POLUPROVODNIČKE DIODE.....30

2.1 Obrazovanje PN-spoja	31
2.2 Polarizacija PN-spoja	33
2.2.1 Direktna polarizacija PN-spoja	33
2.2.2 Inverzna polarizacija PN-spoja	35
2.2.3 Proboj PN-spoja	36
2.3 Dioda	37
2.3.1 Snimanje strujno-naponske karakteristike diode	38

3 DIODA U ELEKTRIČNOM KOLU.....42

3.1 Način rada diode u električnom kolu	43
3.1.1 Radna prava	43
3.1.2 Radna tačka	44
3.1.3 Statička i dinamička otpornost diode	45
3.2 Analiza električnih kola s diodama	45
Računske vježbe	46

4 PRIMJENA DIODA.....54

4.1 Vrste dioda	55
4.1.1 LED i fotodioda	55
4.1.2 Varikap (kapacitivne) diode	55
4.1.3 Prekidačke diode	56
4.1.4 PIN diode	57
4.1.5 Tunel diode	58
4.1.6 Stabilizatorske (Zenerove) diode	58
4.2 Stabilizator napona sa Zenerovom diodom	60
4.3 Usmjerači (ispravljači) s diodama	62
4.3.1 Dioda u kolu s naizmjeničnim naponom	63
4.3.2 Polutalasn (jednostrani) usmjerač	64
4.3.3 Punotalasn (dvostrani) usmjerači	66
4.3.4 Punotalasn usmjerač sa četiri diode (Grecov usmjerač)	68
4.3.5 Stabilizacija jednosmjernog napona	69
Računske vježbe	70

5 BIPOLARNI TRANZISTORI76

5.1 Princip rada bipolarnih tranzistora	77
5.1.1 NPN tranzistori	78
5.1.2 PNP tranzistori	79
5.1.3 Polarizacija pomoću jednog izvora	79
5.2 Načini vezivanja bipolarnog tranzistora	80
5.3 Koeficijenti strujnog pojačanja	81
5.4 Statičke karakteristike bipolarnih tranzistora	82
5.4.1 Ulazna karakteristika	83
5.4.2 Izlazna karakteristika	84
5.4.3 Prenosne karakteristike	84
5.5 Režimi rada bipolarnog tranzistora	85
5.6 Ograničenja kod bipolarnog tranzistora	87
Računske vježbe	87

6 UNIPOLARNI TRANZISTORI92

6.1 Spojni tranzistori s efektom polja (FET)	93
6.1.1 Struktura FET-a	93
6.1.2 N-kanalni FET	94
6.1.3 P-kanalni FET	96
6.1.4 Polarizacija FET-a pomoću jednog izvora	96
6.1.5 Statičke karakteristike FET-a	96
6.1.5.1 Izlazna karakteristika FET-a	97
6.1.5.2 Prenosna karakteristika FET-a	99
6.1.6 Ograničenja kod FET-a	99
6.2 Tranzistori s efektom polja s izolovanim gejtom (MOSFET)	100
6.2.1 Struktura MOSFET-a	100
6.2.2 MOSFET s ugrađenim kanalom	100
6.2.2.1 Statičke karakteristike MOSFET-a s ugrađenim kanalom	101
6.2.3 MOSFET s indukovanim kanalom	103
6.2.3.1 Statičke karakteristike MOSFET-a s indukovanim kanalom	104
Računske vježbe	106

7 OPTOELEKTRONSKE KOMPONENTE110

7.1 Način rada i primjena optoelektronskih komponenti	111
7.1.1 Fotodioda	113
7.1.2 Fototranzistori	116
7.1.3 Fotootpornici	118
7.1.4 Svjetleća (LED) dioda	120
7.2 Značaj i primjena tečnih kristala	123

8 PRAKTIKUM128

8.1 Izvor jednosmjernog napona	130
8.2 Generator funkcija	131
8.3 Osciloskop	132
8.4 Multimetar	133
8.5 Eksperimentalna pločica za montiranje elektronskih komponenti	135
8.6 Softveri za simulaciju rada električnih kola (TINA)	136
8.7 Praktične vježbe	139
Odgovori na kontrolna pitanja	182
Grafički simboli	185
Rječnik pojmova iz elektronike	186
Literatura	191

UVOD U ELEKTROTEHNIKU

Elektronika, čije se osnove obrađuju u ovom udžbeniku, dio je fizike koji se naziva elektrotehnika. Elektrotehnika je zasnovana na proučavanju elektriciteta i pojava koje su s njim povezani, kao i primjenama saznanja o tome u svakodnevnom životu.

Elektrotehnika obuhvata različite oblasti, od kojih najveću praktičnu primjenu imaju:

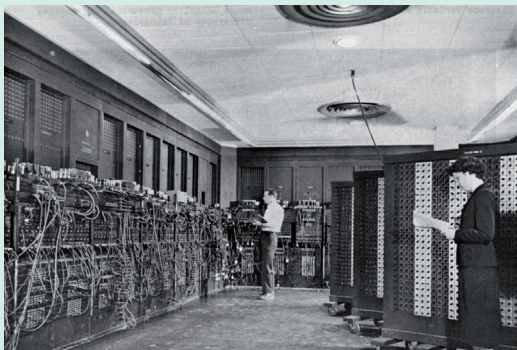
- **Elektroenergetika** se bavi proizvodnjom i prenosom električne energije s jedne lokacije na drugu. Razvoj savremenog društva zavisi od potreba industrije i domaćinstava za električnom energijom. Za njenu proizvodnju razvijeni su i razvijaju se sistemi za pretvaranje različitih oblika energije (toplotne, hidromehaničke, nuklearne, solarne, energije vjetra, elektrohemijske i dr.) u električnu energiju.
- **Telekomunikacije** su oblast elektrotehnike koja se bavi generisanjem, obradom i prenosom informacija. Informacije se prenose fizičkim provodnicima (bakarni vodovi i optički kablovi) i bežično, elektromagnetnim talasima.

Informacione tehnologije bave se razvojem i projektovanjem računarske opreme i sistema (hardver), kao i računarskih programa (softver) koji ovim uređajima i sistemima upravljaju i omogućuju njihovu primjenu. Procesi obrade signala i njihovog prenosa zasnovani su na informacionim tehnologijama, pa se oblast telekomunikacija i informacionih tehnologija danas tretira kao jedinstvena tehnologija – *informaciono-komunikacione tehnologije* (ICT, engl. *Information Communication Technologies*).

- **Elektronika** prožima sve oblasti savremene elektrotehnike, i na njoj je zasnovan rad skoro svih elektrotehničkih uređaja i sistema. Elektronika se bavi proučavanjem i konstrukcijom elektronskih komponenti kojima se upravlja električnom strujom i naponom, kao i povezivanjem ovih komponenti u složena kola. Osnovne komponente savremene elektronike jesu diode i tranzistori koji se povezuju u diskretna ili integrisana kola.

Iako postoji već oko 100 godina, elektronika je relativno nova oblast elektrotehnike. Usljed razvoja novih tehnologija i materijala, njen razvoj je veoma dinamičan. Osnovni trendovi njenog razvoja jesu miniaturizacija komponenti i integracija velikog broja komponenti u jedno integrisano kolo. Ovakav razvoj elektronike omogućio je znatno smanjivanje dimenzija elektronskih uređaja, smanjivanje potrošnje energije

Jedan od prvih elektronskih računara, ENIAC iz 1947. godine (slika 1), koji je imao memoriju od svega nekoliko kilobajta (kB), bio je smješten u prostoriju veličine sportske sale, a njegova potrošnja bila je nekoliko desetina kilovati (kW). Današnji komercijalni računari imaju daleko manje dimenzije, hiljadama puta bolje performanse, uz potrošnju električne energije od nekoliko desetina vati.



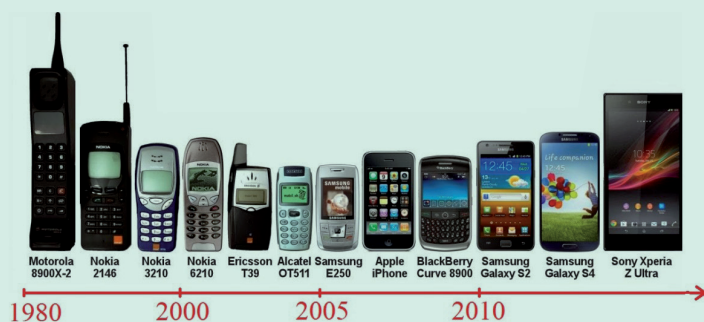
Slika 1. Elektronski računar ENIAC

kojom se ti uređaji napajaju, povećanje brzine rada i povećanje pouzdanosti uređaja.

Kako osnovne elektronske komponente funkcionišu, te kako se koriste u praktične svrhe, obrađeno je kroz ovu knjigu. Kao uvod u knjigu, radi njenog lakšeg praćenja i razumijevanja, dat je kratak pregled osnovnih pojmova iz oblasti elektrotehnike koji će detaljno biti obrađeni u sklopu drugih modula.



Drugi karakterističan primjer naglog razvoja elektronike jeste mobilni telefon (slika 2). Martin Kuper, inženjer u kompaniji Motorola, pozvao je 3. aprila 1973. svog kolegu iz konkurentske kompanije za telekomunikacije i saopštio mu da govori „s pravog mobilnog telefona“. Prvi model mobilnog telefona, uz neuporedivo lošije performanse u odnosu na današnje, bio je duži od 20 cm i težine skoro 1 kg, a baterija mu je trajala pola sata (slika 3).



Slika 2. Evolucija mobilnih telefona kroz istoriju



Slika 3. Martin Kuper sa prvim modelima mobilnih telefona

Naelektrisanje

Naelektrisanje je jedno od osnovnih svojstava materije, kao što je to npr. i masa. Postoje dvije vrste naelektrisanja: **pozitivno** i **negativno**. Za njih se kaže da su suprotnog znaka ili suprotnog polariteta. Dva naelektrisanja međusobno se privlače ako su suprotnog polariteta. Ako su istog, onda se međusobno odbijaju.

Naelektrisanje se označava sa q , a jedinica mu je **kulon (C)**.



Šarl-Ogisten de Kulon (1736–1806), francuski fizičar. Najpoznatiji je po otkrivanju zakonitosti u elektrotehnici koja je nazvana Kulonov zakon. Po njemu ime nosi i jedinica za naelektrisanje – kulon (C).



Naelektrisanja:

slobodna – naelektrisanja koja se pod dejstvom spoljašnje sile mogu lako pomjeriti na rastojanja koja su velika u odnosu na dimenzije atoma i molekula

vezana – naelektrisanja koja se nalaze unutar atoma ili molekula. U odsustvu spoljnih snažnih sila, ne mogu da se kreću slobodno i nezavisno, nego ostaju dio atoma ili molekula.



elektron – negativno naelektrisana čestica u atomu.

slobodan elektron – elektron koji je napustio atom i postao slobodan.

šupljina – nepopunjena veza na mjestu gdje je bio elektron.



Hajnrh Rudolf Herc
(1857–1894), njemački fizičar. Poznat je po pronalasku oscilatora koji je po njemu dobio ime, te brojnim eksperimentalnim dokazima i tvrđenjima u vezi s elektromagnetnim talasima i radio-tehnikom. Po njemu je nazvana jedinica za frekvenciju – herc (Hz).



DC – jednosmjerna veličina (napon ili struja)

AC – naizmjenična veličina (napon ili struja)

Električno polje je fizička pojava u okolini naelektrisanog tijela koja se manifestuje pojavom mehaničke sile između naelektrisanja. Ono je uvijek usmjereno od pozitivnog ka negativnom naelektrisanju.

Električna struja

Električna struja je usmjereno kretanje naelektrisanja u jedinici vremena.

Kod metalnih provodnika, električna struja predstavlja usmjereno kretanje elektrona. U elektrohemijским izvorima struje, električnu struju čini kretanje pozitivno ili negativno naelektrisanih jona, odnosno atoma koji su izgubili ili dobili dodatni elektron. U poluprovodnicima (kao što će kroz udžbenik detaljno biti objašnjeno) električna struja nastaje kretanjem slobodnih elektrona ili šupljina koje su nosioci pozitivnog naelektrisanja.

Električna struja predstavlja količnik protoka naelektrisanja u nekom vremenskom intervalu:

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

Oznaka za struju je ***I*** ili ***i***, a jedinica **amper (A)**. Amper je osnovna mjerna jedinica.

Električna struja može biti istog (**jednosmjerna struja**) ili promjenljivog smjera (**naizmjenična struja**). Jedna od osnovnih veličina naizmjenične struje jeste **učestanost** ili **frekvencija** (***f***), koja predstavlja broj promjena smjera struje u jednoj sekundi. Jedinica za frekvenciju jeste **herc (Hz)**.

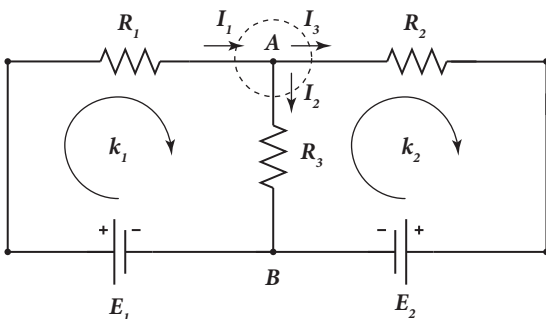
Napon

Napon predstavlja potencijalnu energiju (razliku potencijala) potrebnu za pomjeranje naelektrisanja između dvije tačke. Obično se označava sa **U**, dok mu je jedinica **volt (V)**. Volt predstavlja energiju od 1 J koja je potrebna za pomjeranje naelektrisanja od 1 C.

Električno kolo i referentni smjerovi struje i napona

Električno kolo čini skup električnih komponenti, međusobno povezanih provodnicima kroz koje teče struja. U zatvorenom električnom kolu, elektroni koje pokreće izvor struje polaze iz izvora, te obilazeći cijelo kolo vraćaju se na početni položaj.

Tačke u kolu u kojima se stiču najmanje tri provodnika nazivaju se čvorovi kola, a redne veze komponenti koje povezuju dva čvora nazivaju se grane kola (slika 4).



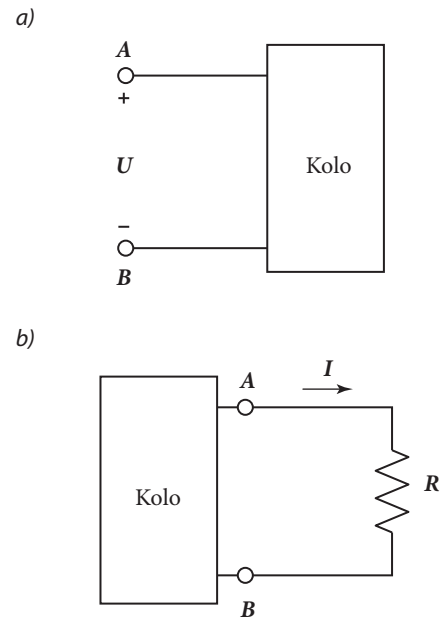
Slika 4. Primjer električnog kola

U kolu sa slike 4 zapažamo dva čvora (A i B) i tri grane. U složenom kolu takođe zapažamo i dva prosta kola, označena linijama k_1 i k_2 , koja se nazivaju **konture**. Konture se označavaju strelicama, koje određuju smjer obilaska te konture.

Da bi se odredio smjer struje u nekom električnom kolu, ili da bi se odredilo koja je od dvije tačke kola na višem potencijalu, uvode se referentni smjerovi struje i napona.

Znaci + i – označavaju *referentni smjer* napona, ili njegov polaritet. Tačka na višem potencijalu označava se sa +, a tačka na nižem sa –. Referentni smjer napona usvaja se proizvoljno. Neka je, na primjer, na slici 5a vrijednost napona $U = 6$ V. To znači da je potencijal tačke A veći za 6 V od potencijala tačke B. Ako bi se referentni smjer usvojio tako da + bude kod tačke B, u tom slučaju vrijednost napona bila bi $U = -6$ V.

Na slici 5b strelicom je označen referentni smjer proticanja struje od tačke A ka tački B. Referentni smjer struje takođe se može proizvoljno usvojiti. Pri analizi kola, ako se kao rezultat dobije da je $I > 0$, onda se stvarni smjer struje poklapa s referentnim smjerom. Ako se pak dobije da je $I < 0$, onda je stvarni smjer struje suprotan pretpostavljenom smjeru, odnosno smjeru koji je uzet kao referentan.



Slika 5. Označavanje: a) polariteta napona i b) referentnog smjera za struju

Pasivne i aktivne električne komponente

U električnim kolima se, pored izvora struje, javljaju *pasivne i aktivne komponente*.

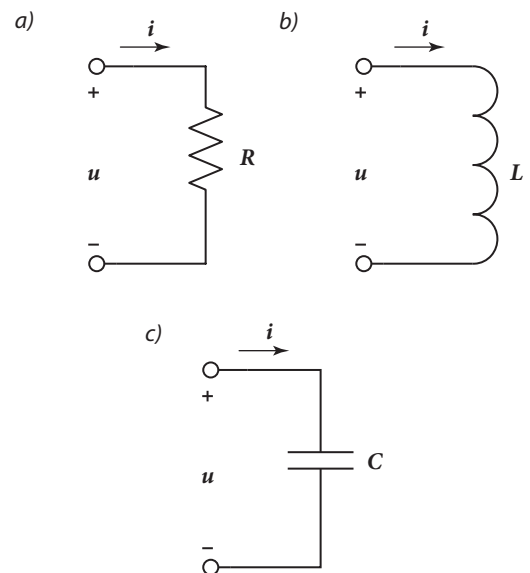
Pasivne komponente ne mogu pojačavati snagu signala koji se dovodi na njihov ulaz. To su *otpornik, kalem i kondenzator*. Oni se predstavljaju simbolima prikazanim na slici 6.

Otpornik predstavlja pasivnu električnu komponentu u kojoj se električna energija pretvara u toplotu. Veličina koja ga karakteriše jeste **električni otpor**, i ona predstavlja mjeru suprotstavljanja nekog provodnika prolasku električne struje. Označava se sa **R**, a jedinica joj je **om** (Ω). **Snaga** koja se razvija na otporniku jeste proizvod struje koja teče kroz njega i napona na njemu: $P = UI$.

Kalem predstavlja pasivnu električnu komponentu u kojoj se električna energija pretvara u energiju magnetnog polja. Veličina koja ga karakteriše naziva se **induktivnost** kalema, i označava se sa **L**, dok joj je jedinica **henri** (H).

Kondenzator predstavlja pasivnu električnu komponentu u kojoj se električna energija pretvara u energiju električnog polja. Veličina koja ga karakteriše naziva se **kapacitivnost** kondenzatora. Označava se sa **C**, dok joj jedinica **farad** (F).

Aktivne komponente se, za razliku od pasivnih, u električnim kolima koriste kao ispravljajući ili za pojačavanje snage signala koji se dovodi na njihov ulaz. Njihovo djelovanje vrši se na račun baterija iz kojih se te aktivne komponente napajaju. Aktivne komponente su *diode, tranzistori i integrisana kola*. Dioda i tranzistori biće detaljno obrađeni u ovoj knjizi.

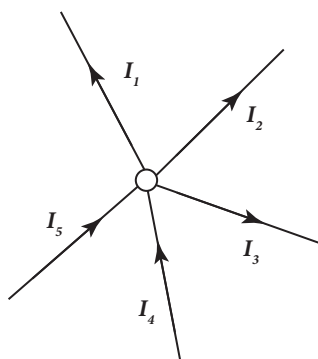


Slika 6. Simboli pasivnih električnih komponenti: a) otpornik, b) kalem i c) kondenzator

Omov zakon

Omov zakon definiše zavisnost napona na otporniku od struje kroz taj otpornik, i glasi:

Napon na otporniku direktno je proporcionalan struji kroz otpornik, $U = IR$.



Slika 7. Sticanje struja u čvor

Kirhofova pravila

Pri izračunavanju nepoznatih veličina u prostom električnom kolu s jednom konturom, služimo se samo Omovim zakonom. Međutim, pri razmatranju složenijih razgranatih kola s više kontura, potrebno je, pored primjene Omovog zakona, koristiti i dva Kirhofova pravila.

Prvo Kirhofovo pravilo glasi: *Zbir jačina struja koje ulaze u čvor električnog kola jednak je zbiru jačina struja koje izlaze iz čvora.*

Ako se smatra da su struje koje ulaze u čvor pozitivne a struje koje iz njega izlaze negativne, onda se može reći: *Zbir jačina struja koje se stiču u čvor jednak je nuli.*

Ovo se može matematički iskazati kao $\sum_{k=1}^n I_k = 0$.

Primjenom prvog Kirhofovog pravila, za čvor sa slike 7 može se napisati izraz:

$$I_4 + I_5 = I_1 + I_2 + I_3.$$

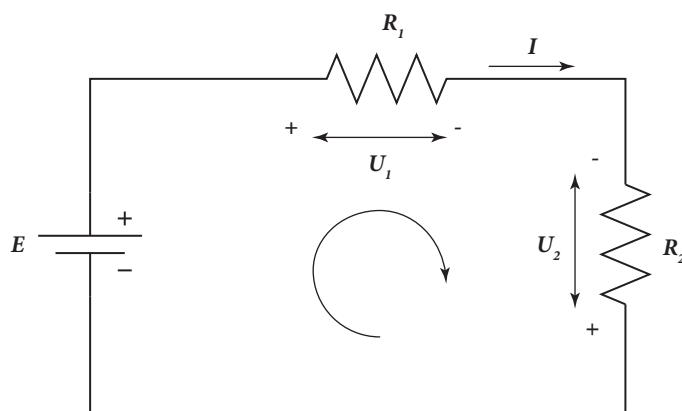
Drugo Kirhofovo pravilo glasi: *Algebarska suma svih elektromotornih sila u bilo kojoj zatvorenoj konturi električnog kola jednaka je algebarskoj sumi padova napona na svim otpornicima u toj konturi. Drugačije rečeno: Suma svih napona u konturi jednaka je nuli.*

Primjenom II Kirhofovog pravila, za kolo sa slike 8 važi izraz:

$$E - U_1 + U_2 = 0.$$

Sređivanjem tog izraza, dobija se:

$$E = U_1 - U_2.$$

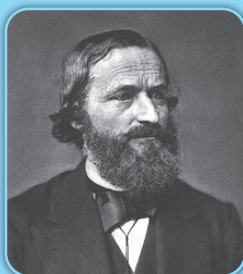


Slika 8. Električno kolo sa označenom konturom po II Kirhofovom pravilu



Gustaf Robert Kirhof

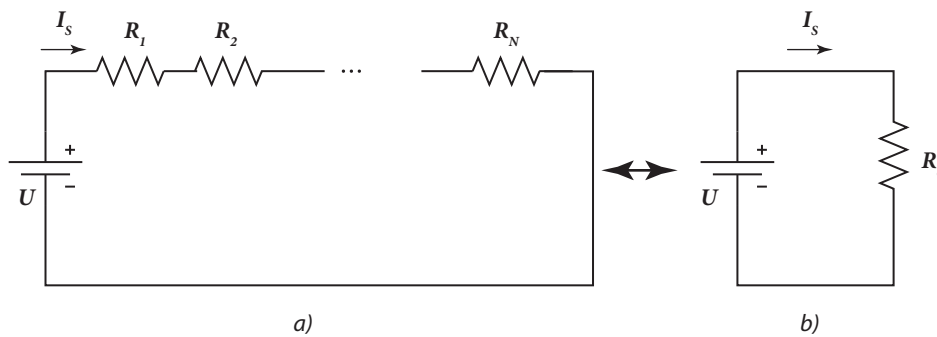
(1824 - 1887), njemački fizičar. Svojim radom je doprinio osnovnom razumjevanju strujnih kola, spektroskopije i emisije radijacije crnih tijela sa zagrijanim tijelima. Još kao student je formulisao zakone o odnosu struja i napona u strujnom kolu, koji su nazvani po njemu.



Redna i paralelna veza otpornika

U električnom kolu, otpornici se, kao i druge pasivne komponente, mogu povezivati *redno* i *paralelno*.

Ako se n otpornika poveže tako da se u svakom čvoru stiču samo po dva otpornika (osim kod prvog i posljednjeg čvora), dobija se *redna* ili *serijska veza* otpornika (slika 9a).



Slika 9. a) Redna veza otpornika; b) Šema s ekvivalentnim otpornikom

Kolo s rednom vezom otpornika (slika 9a) može se zamijeniti ekvivalentnom šemom (slika 9b) s ekvivalentnim otpornikom, čija je otpornost jednaka zbiru pojedinačnih otpornosti, odnosno:

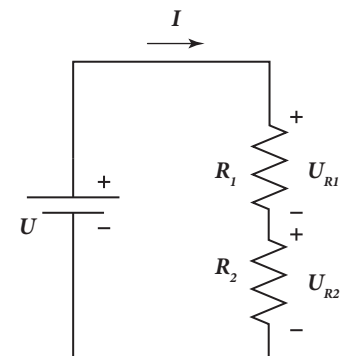
$$R_e = R_1 + R_2 + \dots + R_N.$$

Na primjer, pri rednoj vezi dva otpornika (slika 10), pošto kroz oba otpornika protiče ista struja i , naponi na tim otpornicima mogu se opisati izrazima:

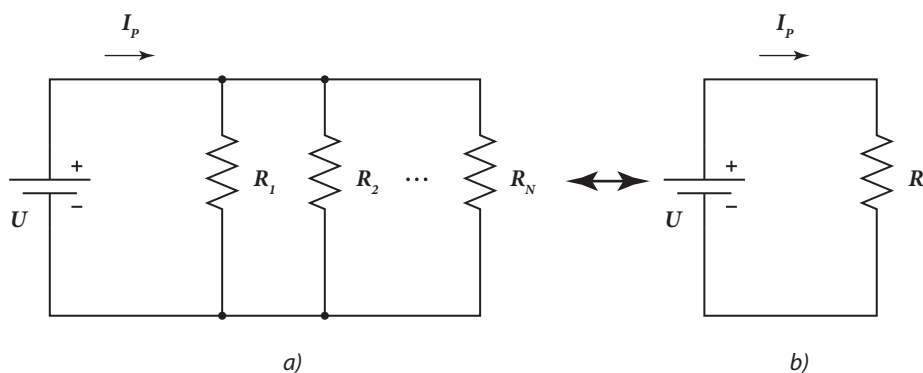
$$U_{R1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U, \quad U_{R2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U.$$

Napon izvora U dijeli se između otpornika R_1 i R_2 u direktnoj srazmjeri s njihovim otpornostima. Ovakvo kolo naziva se **djelitelj** ili **razdjelnik napona**, i ono se često primjenjuje u elektronici.

Ako se n otpornika poveže tako da svi imaju zajedničke priključke, onda se dobija *paralelna veza* otpornika (slika 11).



Slika 10. Djelitelj napona



Slika 11. a) Paralelna veza otpornika i b) šema s ekvivalentnim otpornikom

Ekvivalentna otpornost paralelno vezanih otpornika izračunava se iz izraza:

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N}.$$

Džul–Lencov zakon

Jedan od pratećih efekata električne struje jeste toplotni efekat, odnosno zagrijavanje provodnika pri proticanju struje. Rad električnih sila u električnom kolu se pretvara u toplotnu energiju:

$$\Delta E = \Delta A = UI \Delta t.$$

Izraz:

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = UI$$

predstavlja snagu koja se naziva **Džulova snaga**. Mjerna jedinica za snagu jeste **vat** (1 W = 1 J/s).

Ako neki provodnik ima otpornost R , za njega važi Ohmov zakon ($I = U/R$), pa se izraz za snagu može napisati i kao:

$$P = RI^2.$$

Ovaj izraz predstavlja matematički oblik Džul–Lencovog zakona.



RAČUNSKÉ VJEŽBE

U nastavku su dati urađeni primjeri nekoliko zadataka, čije je razumijevanje potrebno za izradu računskih vježbi iz Osnova elektronike.

Primjer U.1. Čovjeku je ugrožen život od strujnog udara ako mu u blizini srca proteče struja od 50 mA. Električar, radeći ozojnenih ruku, napravi čvrst kontakt s dva provodnika, koje drži po jedan u obje ruke. Ako je otpornost električara 2000 Ω, odredi vrijednost napona koja može biti smrtonosna po njega.

Rješenje:

$$U = IR = 50 \cdot 10^{-3} \text{ A} \cdot 2000 \text{ } \Omega = 100 \text{ V}$$

Primjer U.2. U strujni čvor utiču struje od 0,4 A i 0,3 A. Iz strujnog čvora ističu tri struje. Prva ima vrijednost 0,1 A, a druga 0,4 A. Odredi jačinu treće električne struje koja ističe iz čvora.

Rješenje:

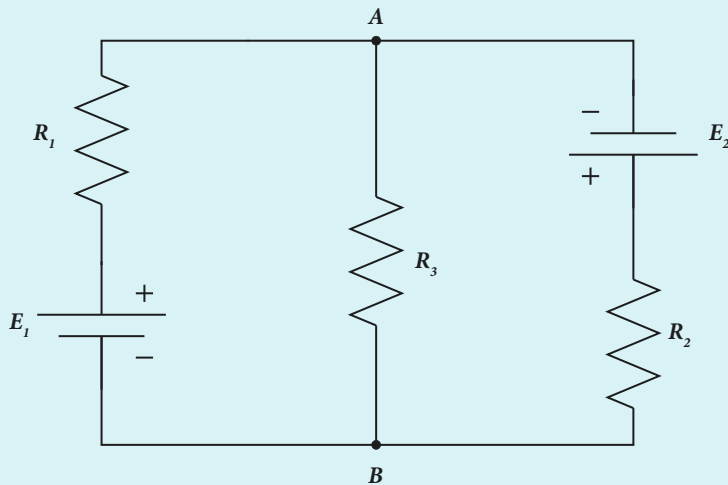
Primjenom I Kirhofovog pravila za strujni čvor, dobija se:

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5.$$

Odatle se, zamjenom poznatih struja, dobija:

$$I_5 = I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0,2 \text{ A.}$$

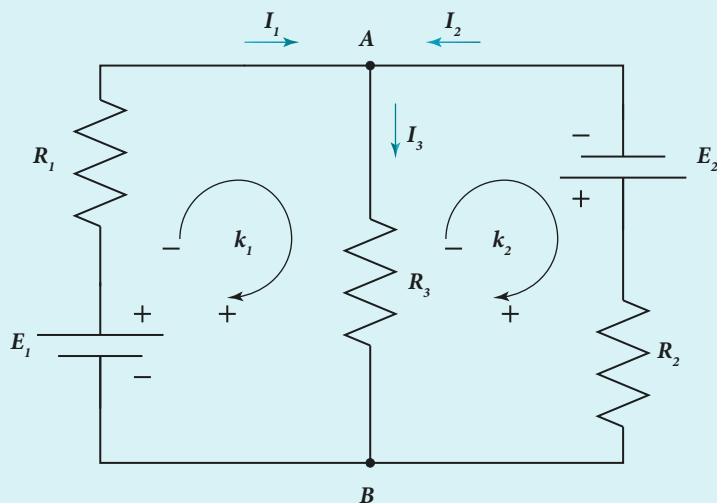
Primjer U.3. Na slici 12 prikazano je električno kolo, s veličinama: $E_1 = 6 \text{ V}$, $E_2 = 20 \text{ V}$, $R_1 = 70 \Omega$, $R_2 = 30 \Omega$ i $R_3 = 40 \Omega$. Izračunaj sve struje u kolu.



Slika 12

Rješenje:

Kolo sa slike 12 sastoji se od dva čvora (A i B) i tri grane kroz koje teku struje (I_1 , I_2 i I_3). Smjerovi tih struja nijesu unaprijed poznati, pa ćemo pretpostaviti da izgledaju kao na slici 13.



Slika 13

Pri daljim proračunima koristićemo pretpostavljene smjerove struja; a ako se kao rezultat za neku od struja dobije negativna vrijednost, konstatovaćemo da je stvarni smjer te struje suprotan u odnosu na pretpostavljeni.

Primjenom I Kirhofovog pravila, za čvor A može se napisati izraz:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0.$$

Dalje, primjenom II Kirhofovog pravila, za konturu K_1 , čiji je smjer označen na slici 13, dobija se:

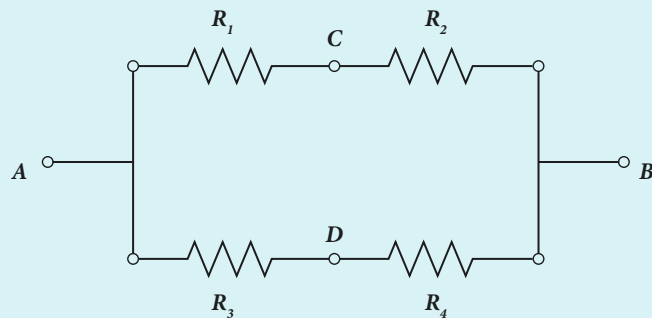
$$E_1 - R_1 I_1 - R_3 I_3 = 0.$$

Na sličan način za konturu K_2 dolazi se do izraza:

$$E_2 + R_3 I_3 + R_2 I_2 = 0.$$

Sređivanjem ovih izraza dobija se: $I_1 = 0,2 \text{ A}$, $I_2 = 0,2 \text{ A}$, $I_3 = 0,4 \text{ A}$. Kako je svaka od ovih vrijednosti pozitivna, smjerovi ovih struja odgovaraju pretpostavljenim smjerovima.

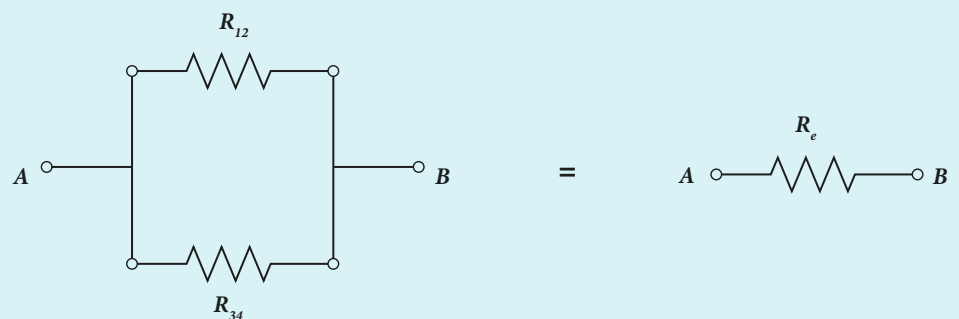
Primjer U.4. Izračunaj ekvivalentni otpor između tačaka A i B kola na slici 14. Vrijednosti otpornika su: $R_1 = R_2 = 10 \Omega$, $R_3 = 6 \Omega$, $R_4 = 4 \Omega$.



Slika 14

Rješenje:

Električno kolo se može uprostiti kako je prikazano na slici 15.



Slika 15

Najprije je potrebno ekvivalentirati rednu vezu otpornika R_1 i R_2 ekvivalentnom otpornošću $R_{12} = R_1 + R_2$. Isto važi i za otpornike R_3 i R_4 ($R_{34} = R_3 + R_4$).

Sa slike U.15 očigledno je da su otpornici R_{12} i R_{34} vezani paralelno, pa se ukupni ekvivalentni otpor kola nalazi kao:

$$R_e = \frac{R_{12} R_{34}}{R_{12} + R_{34}} = 6,67 \Omega.$$

Primjer U.5. Ako je grijač priključen na izvor napona od 220 V, kroz njega protiče struja od 20 A. Odredi snagu grijača, kao i električnu energiju koja se u grijaču pretvori u toplotnu energiju za vrijeme 2 h.

Rješenje:

Snaga grijača je:

$$P = U \cdot I = 4,4 \text{ kW.}$$

Električna energija koja će se za dva sata rada grijača pretvoriti u toplotnu energiju jeste:

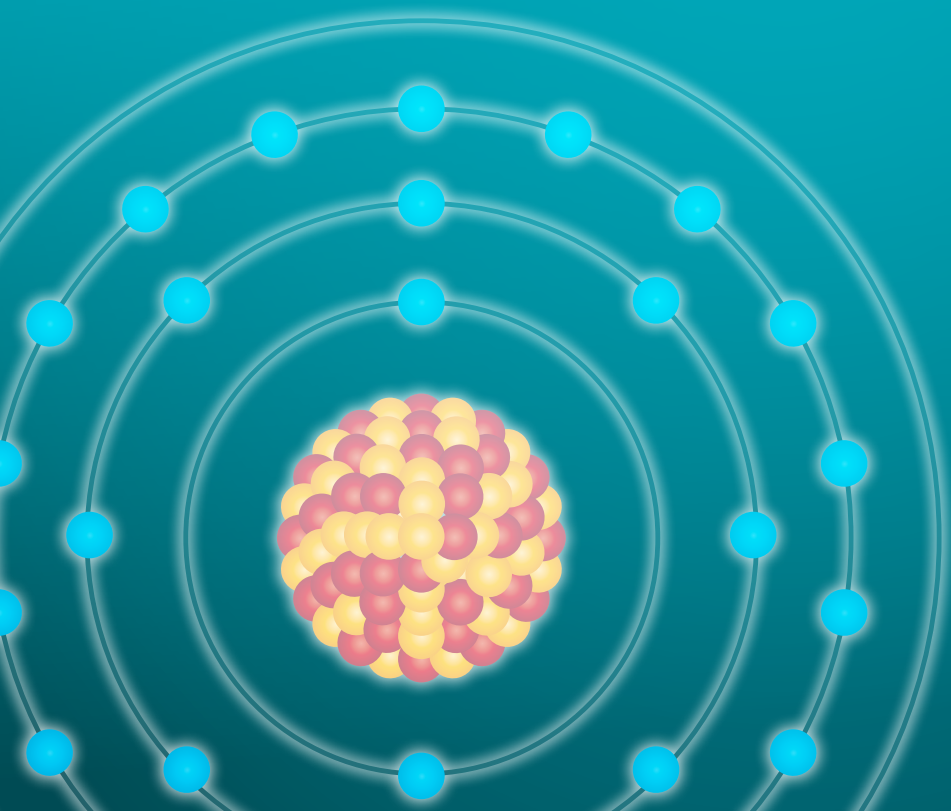
$$E = P \cdot t = 8,8 \text{ kWh.}$$

1

Osnovne karakteristike i struktura elektrotehničkih materijala

Sve materijale koji se koriste u elektrotehnici moguće je svrstati u tri grupe: provodnike, poluprovodnike i izolatore (dielektrike). Elektronske komponente i kola koja se koriste za realizaciju složenih uređaja i sistema u savremenim tehnologijama, najčešće se izrađuju od materijala s poluprovodničkim svojstvima.

U ovom poglavlju objašnjava se struktura atoma od kojih je sagrađena materija, vrste hemijskih veza između atoma, kao i priroda elektrotehničkih materijala, s posebnim osvrtom na fiziku poluprovodnika, glavnih gradivnih materijala većine elektronskih komponenti.



1.1

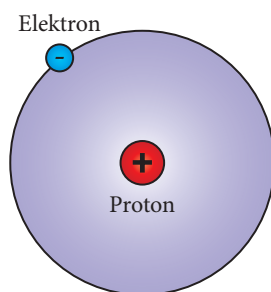
STRUKTURA ATOMA

Atom je najsitnija čestica nekog elementa koji određuje njegove fizičke i hemijske osobine.

Atom se sastoji se od **jezgra (nukleusa)**, u kojem su *protoni* (pozitivno naelektrisane čestice) i *neutroni* (električno neutralne čestice), dok oko jezgra kruže *elektroni* (negativno naelektrisane čestice). Elektroni oko jezgra kruže po putanjama sfernog oblika koje se nazivaju **orbite (ljuske)**. Kako su količina naelektrisanja protona i količina naelektrisanja elektrona nekog atoma jednake po apsolutnoj vrijednosti, i kako je broj protona i elektrona u atomu jednak, onda se za atom kaže da je električno neutralan.

Masa atoma uglavnom je sadržana u jezgru, jer su protoni i neutroni 1840 puta teži od elektrona. Elektroni kruže oko jezgra na sličan način kao što planete kruže oko Sunca. Električnu silu usmjerenu ka jezgru, koju prouzrokuje privlačenje negativno naelektrisanog elektrona od strane pozitivno naelektrisanog jezgra, uravnotežava mehanička sila usmjerena od jezgra, prouzrokovana obrtanjem elektrona. Kao rezultat djelovanja ovih dviju sila, elektron ostaje u svojoj orbiti oko jezgra.

Najjednostavniji je atom vodonika, koji se sastoji od jednog protona (smještenog u jezgru) i jednog elektrona (koji kruži oko jezgra). Na slici 1.1 ovaj model atoma je radi jednostavnosti prikazan u jednoj ravni.



Slika 1.1. Atom vodonika (H) nacrtan u jednoj ravni

U atomu koji sadrži više protona i elektrona od vodonika, svi protoni nalaze se u jezgru, dok se elektroni nalaze u jednoj ili više orbita. Ukupan broj orbita u jednom atomu može biti 7. One se označavaju slovima: K, L, M, N, O, P i Q, i u svakoj od njih je formulom $2n^2$ (n označava broj orbite) tačno definisan maksimalan broj elektrona koje može da primi. Tako, na primjer, u orbiti najbližoj jezgru mogu biti najviše 2 elektrona, u narednoj 8 elektrona itd. Raspored elektrona po orbitama određuje električnu stabilnost atoma.



Grčka riječ atom ima značenje nedjeljiv. Atomi su toliko mali da ih se na vrhu igle može smjestiti nekoliko milijardi. Elektroni i protoni još su manji.



proton – pozitivno naelektrisana čestica u atomu.

elektron – negativno naelektrisana čestica u atomu.

neutron – čestica u jezgru atoma koja nema naelektrisanje.



Borov model atoma

Model atoma u kojem se elektroni kreću oko jezgra, na sličan način kao što se planete okreću oko Sunca, naziva se planetarni model atoma.

Nedostatak planetarnog modela u tome je što ne objašnjava stabilnost atoma pri kružnom kretanju elektrona. Naime, pri kružnom kretanju elektrona moralo bi se emitovati elektromagnetno zračenje, čime bi se smanjivala energija i brzina elektrona, pa bi elektroni vrlo brzo pali na jezgro. Ali to se ne dešava, atom je vrlo stabilna struktura razdvojenih elektrona i jezgra.

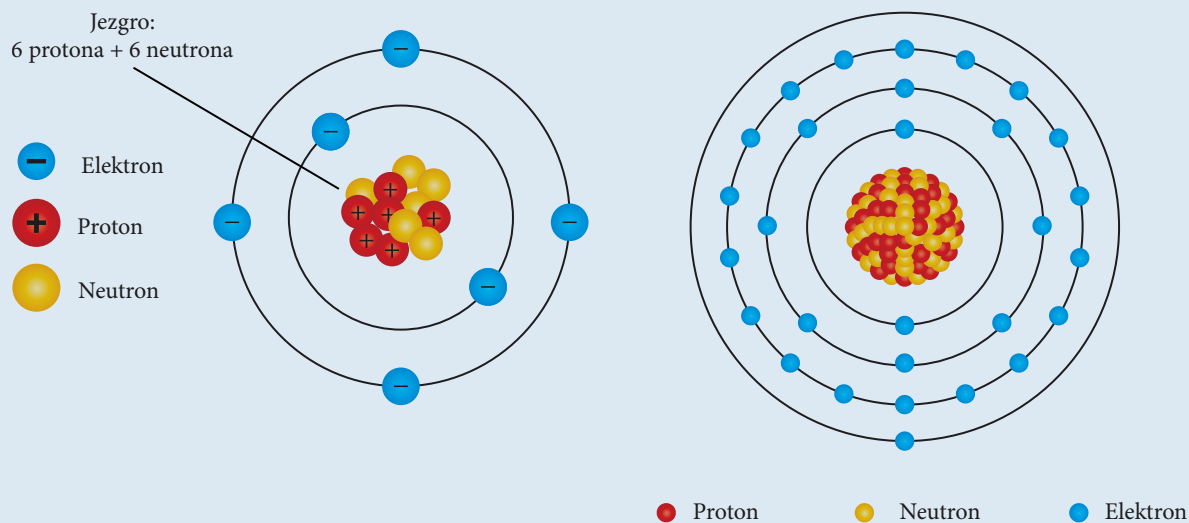
Da bi se prevazišao nedostatak planetarnog modela atoma, danski fizičar Nils Bor predložio je svoj model atoma, koji je zasnovan na tri postulata.

Prema prvom postulatu elektroni se u atomu kreću oko jezgra po određenim orbitama, koje se nazivaju stacionarne orbite. Dok je na stacionarnoj orbiti, elektron ne emituje elektromagnetno zračenje. Drugi postulat definiše koja su to stacionarna stanja, i pomoću njega se određuju poluprečnici stacionarnih orbita. Treći postulat govori o emitovanju i apsorbovanju energije pri prelasku elektrona s jedne stacionarne orbite na drugu. Drugi i treći postulat zasnovani su na kvantnoj fizici.

Posebno je važan broj elektrona u orbiti najviše udaljenoj od jezgra, koja se naziva *spoljašnja (valentna) orbita*. Spoljašnja orbita, izuzev kada atom ima samo jednu orbitu, za punu stabilnost atoma zahtijeva 8 elektrona.



Atom ugljenika, prikazan na slici 1.2a, ima šest protona u jezgru i šest elektrona raspoređenih u dvije orbite. U prvoj orbiti smještena su dva elektrona, dok se preostala četiri elektrona nalaze u drugoj orbiti.



Slika 1.2. Atomi nacrtani u jednoj ravni: a) ugljenik i b) bakar

Atom bakra, prikazan na slici 1.2b, ima 29 elektrona raspoređenih u četiri orbite. U spoljašnjoj – orbiti koja za punu stabilnost zahtijeva osam elektrona, atom bakra ima samo jedan elektron. Zbog toga je spoljašnja orbita atoma bakra manje stabilna od spoljašnje orbite atoma ugljenika.



atomski broj – broj koji označava koliko neki atom ima protona, odnosno elektrona.

maseni broj – broj koji označava zbir protona i neutrona nekog atoma.



Kontrolno pitanje 1.1 Nacrtaj i objasni strukturu atoma aluminijuma (Al) ukoliko je poznato da je njegov atomski broj 13 a maseni broj 27.

1.2

VRSTE HEMIJSKIH VEZA

Atomi sačinjavaju elementarne supstance koje imaju specifične karakteristike. Takve su npr. vodonik, kiseonik, ugljenik i bakar. *Element* je supstanca koja se hemijskim putem ne može dalje razložiti.

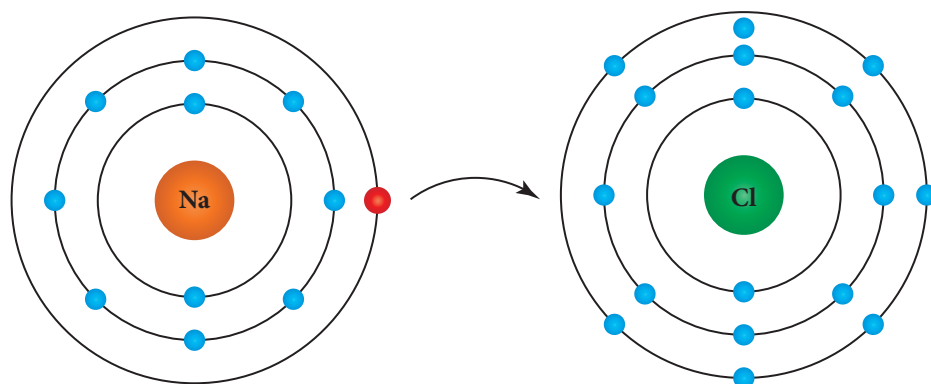
Grupa od dva ili više atoma formira molekule. Na primjer, dva atoma vodonika formiraju molekul vodonika. Kada se element vodonik hemijski sjedini s elementom kiseonik, dobija se svima dobro poznato jedinjenje voda. Jedinjenje se sastoji od dva ili više elemenata.

Molekul je najsitnija čestica nekog jedinjenja koja ima osobine tog jedinjenja.

Između atoma u molekulu djeluju privlačne sile, i one su uzrok stvaranja hemijskih veza. U formiranju hemijskih veza među atomima u molekulu učestvuju elektroni iz posljednje orbite u omotaču – valentni elektroni. Osnovni tipovi veze su **jonska, kovalentna i metalna**.

Jonsku vezu grade izraziti metali sa izrazitim nemetalima. Jonska veza nastaje reakcijom metala koji u valentnoj orbiti imaju mali broj elektrona i nemetala, koji u valentnoj orbiti imaju velik broj elektrona. Elektroni s atoma metala prelaze na atom nemetala, pri čemu nastaju naelektrisane čestice tj. *joni*.

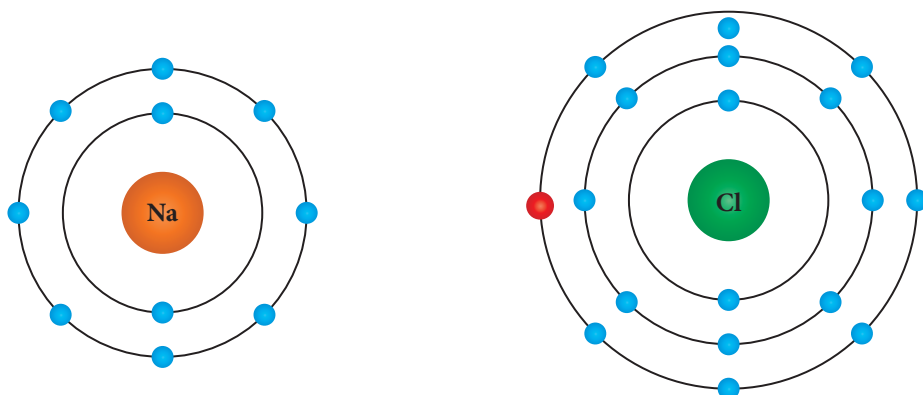
Primjer jonske veze jeste reakcija metala natrijuma (Na) i nemetala hlora (Cl), koji grade hemijsko jedinjenje natrijum-hlorid, poznatije kao kuhinjska so. Atom natrijuma u valentnoj orbiti sadrži 1, dok atom hlora sadrži 7 elektrona (slika 1.3).



Slika 1.3. Atomi natrijuma (Na) i hlora (Cl) prije građenja jonske veze

Pri sudaru atoma natrijuma i hlora, hlor teži da popuni zadnju orbitu kako bi u njoj imao 8 elektrona, odnosno postigao stabilno stanje spoljašnje orbite. Stabilno stanje spoljašnje orbite od osam elektrona, atom natrijuma postiže otpuštanjem tog jednog elektrona iz svoje spoljašnje orbite, pošto u pretposljednjoj orbiti ima 8 elektrona. Prelaskom elektrona s atoma natrijuma (metal) na atom hlora (neme-

tal), dobijaju se naelektrisane čestice – *joni*. Atom natrijuma više nije električno neutralan, jer je izgubio jedan elektron, u atomu ostaje višak pozitivnih čestica protona, pa postaje **pozitivno naelektrisani jon (katjon)**. Istovremeno, atom hlora dobija jedan elektron, takođe postiže stabilno stanje, i pritom postaje **negativno naelektrisani jon (anjon)**. Ta dva jona obrazuju molekul kuhinjske soli (slika 1.4).



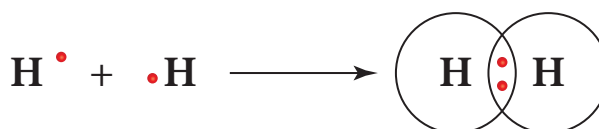
Slika 1.4. Jonska veza natrijuma (Na) i hlora (Cl)

Kovalentna veza nastaje između dva atoma nemetala. Ona se formira udruživanjem elektrona u zajedničke elektronske parove. Kovalentna veza može da bude *jednostruka, dvostruka i trostruka*.

Molekul vodonika ima jednostruku kovalentnu vezu. Dva atoma vodonika udružuju po jedan valentni elektron, i nastaje jedan zajednički elektronski par.

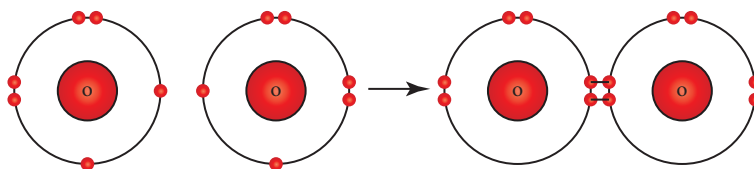


valentni elektron – elektron iz posljednje (spoljašnje) orbite u omotaču atoma.



Slika 1.5. Građenje kovalentne veze između atoma vodonika (H)

Molekul kiseonika ima dvostruku kovalentnu vezu. Atom kiseonika ima šest valentnih elektrona; da bi bio stabilan, nedostaju mu dva elektrona. Dva atoma kiseonika udružuju po dva elektrona, te nastaju dva zajednička elektronska para, odnosno dvostruka kovalentna veza.



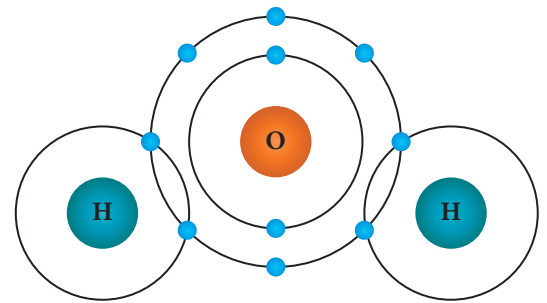
Slika 1.6. Građenje kovalentne veze između atoma kiseonika (O)



Kontrolno pitanje 1.2 Objasni vrstu i način formiranja hemijske veze između dva atoma azota. Atomski broj azota je 7.

I atomi različitih nemetala udružuju se gradeći pri tome zajedničke elektronske parove. Molekul vode gradi se tako što svaki atom vodonika s atomom kiseonika gradi po jedan zajednički elektronski par. Tako nastaju dvije kovalentne veze, po jedna sa svakim atomom vodonika.

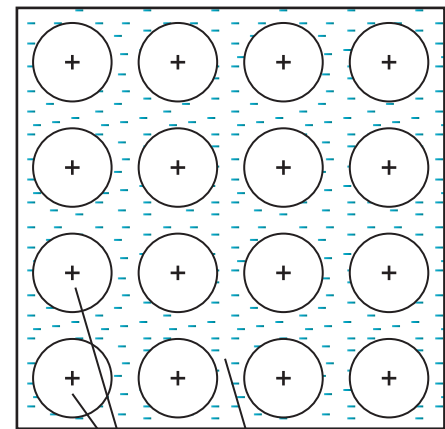
Metalna veza je tip hemijske veze koja se obrazuje između atoma metala. Ona potiče od elektrostatičkog privlačenja pozitivnih jona metalne rešetke i slobodnih elektrona koji se kreću između njih. Slikovito rečeno, metal se sastoji od pozitivnih jona koji „plivaju“ u negativno naelektrisanom „oblaku“ slobodnih elektrona (slika 1.8). Taj „elektronski oblak“ ne popunjava samo prostore između atoma, već djelimično prodire i unutar samih atoma. Atomi metala sadrže samo jedan elektron u spoljašnjoj ljusci. S porastom broja elektrona u spoljašnjoj ljusci, povećava se i čvrstoća veze elektrona s jezgrom, što u znatnoj mjeri određuje i kristalnu građu čvrstog metala.



Slika 1.7. Građenje molekula vode (H_2O)



Kontrolno pitanje 1.3 Odredi tip hemijske veze za sljedeća jedinjenja: a) ugljen-dioksid (CO_2) i b) magnezijum-oksidi (MgO). Atomske brojevi ugljenika, kiseonika i magnezijuma redom iznose: 6, 8 i 12.



Slika 1.8. Metalna veza atoma metala

1.3

VRSTE ELEKTROTEHNIČKIH MATERIJALA

Kao što je rečeno u uvodu, sve materijale koji se koriste u elektro-tehnici možemo svrstati u tri grupe: *provodnike*, *izolatore* (*dielektrike*) i *poluprovodnike*.

Valentna orbita određuje da li je neki element provodnik, poluprovodnik ili izolator. Ako se u njoj nalazi malo elektrona (od 1 do 3), ti elektroni lako napuštaju svoj atom i prelaze na drugi (kreću se), pa se tada radi o **provodniku**. Kada neki element ima mnogo valentnih elektrona (od 6 do 8), ti elektroni teže da ostanu u vlastitim orbitama, teško se oslobađaju, i riječ je o **izolatoru**. **Poluprovodnici** su elektro-tehnički materijali koji imaju izražena svojstva i provodnika i izola-



energetska zona – zona u kojoj elektroni imaju tačno određene vrijednosti energije.



električni otpor – veličina kojom se mjeri stepen suprotstavljanja nekog materijala prolasku električne struje.

električna provodnost – recipročna vrijednost električne otpornosti nekog materijala.

tora. Da bi mogli provoditi struju, potrebno im je dodati atome drugih materijala. Tipični poluprovodnici imaju četiri valentna elektrona.

Elektroni na orbitama imaju tačno određene energije. Oni prilikom prelaska s jedne orbite na drugu apsorbiraju ili emituju energiju. Ova energija jednaka je razlici energija elektrona na tim orbitama. Elektron apsorbira određenu količinu energije kada prelazi iz orbite s manjom u orbitu s većom energijom, u suprotnom slučaju, elektron emituje energiju.

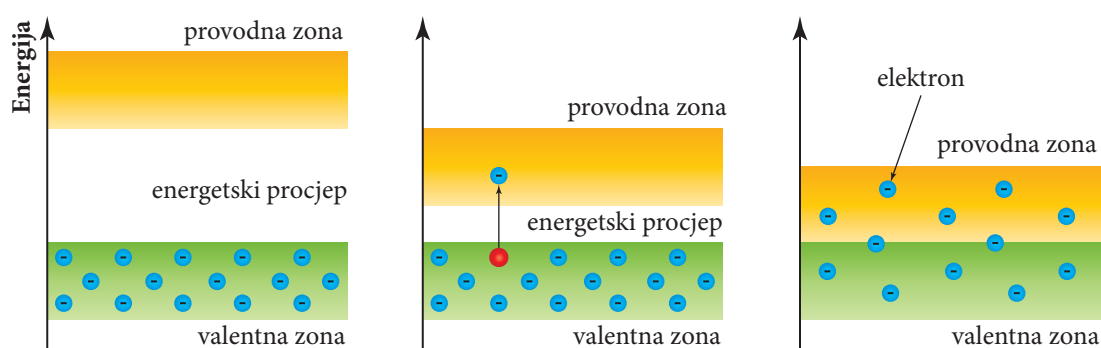
Elektroni su najjače vezani za jezgro u orbiti najbližoj jezgru. Što su elektroni udaljeniji od jezgra, to je njihova veza s jezgrom slabija, tako da je elektronima u posljednjoj orbiti potrebno najmanje energije za napuštanje atoma.

Šta se događa pri međusobnom približavanju atoma? Elektroni koji su imali iste energetske nivoe u različitim atomima, zbog razloga koji se objašnjavaju u kvantnoj fizici, ne mogu zadržati iste vrijednosti energije, već se svaki energetski nivo dijeli na više veoma bliskih energetskih podnivoa, formirajući **energetske zone**. Unutar jedne zone elektroni imaju tačno određene vrijednosti energije.

*Razlika energija između pojedinih energetskih zona naziva se **energetski procjep**.*

Veličina energetskog procjepa određuje električna svojstva materijala. Kod izolatora je energetski procjep toliki da je valentnom elektronu, koji se nalazi u spoljašnjoj ljusci, potrebno dati veliku energiju da bi prešao iz valentne zone u zonu slobodnog kretanja – *provodnu zonu*. Zbog toga izolatori imaju veoma mali broj slobodnih elektrona, a samim tim i lošu električnu provodnost. Za razliku od izolatora, kod provodnika se valentna i provodna zona preklapaju, pa postoji velik broj slobodnih elektrona, koji bi pod dejstvom električnog polja mogli obrazovati usmjereno kretanje elektrona, odnosno električnu struju. Poluprovodnici imaju procjep čija je vrijednost pri sobnoj temperaturi između one kod provodnika i izolatora, i samim tim malu električnu provodnost.

Na slici 1.9 prikazane su energetske zone izolatora, provodnika i poluprovodnika.



Slika 1.9. Energetske zone: a) izolatora, b) poluprovodnika i c) provodnika

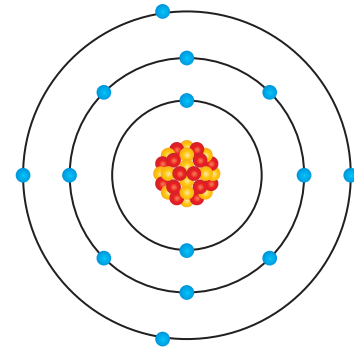
1.4

KRISTALNA STRUKTURA POLUPROVODNIKA

1.4.1 Kristalna struktura silicijuma

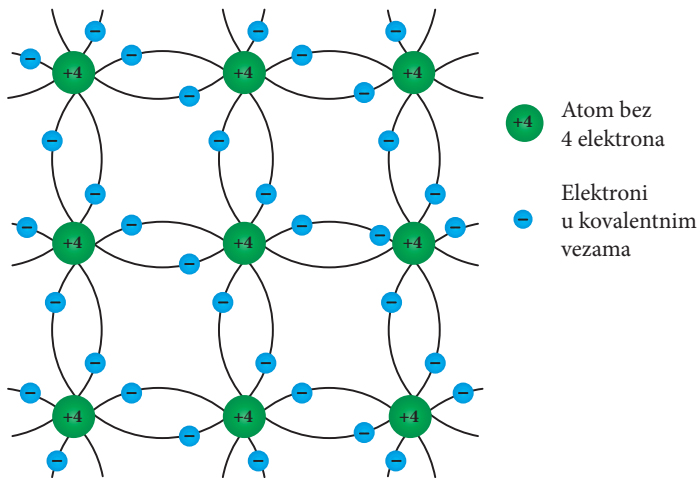
Silicijum je poluprovodnik koji ima veliku primjenu u elektronici. Na slici 1.10 prikazan je model atoma silicijuma u jednoj ravni. On sadrži 14 protona, 14 neutrona i 14 elektrona. Prva ljuska sadrži 2 elektrona, druga 8, dok posljednja valentna sadrži 4 elektrona.

Atomi poluprovodnika raspoređeni su u obliku kristalne rešetke. Kristalna rešetka silicijuma prikazana je na slici 1.11 u jednoj ravni iako su u stvarnosti atomi silicijuma raspoređeni u prostoru. Sa slike se vidi da je svaki atom silicijuma kovalentnim vezama vezan za četiri susjedna atoma. Kaže se da je silicijum četvorovalentan element.

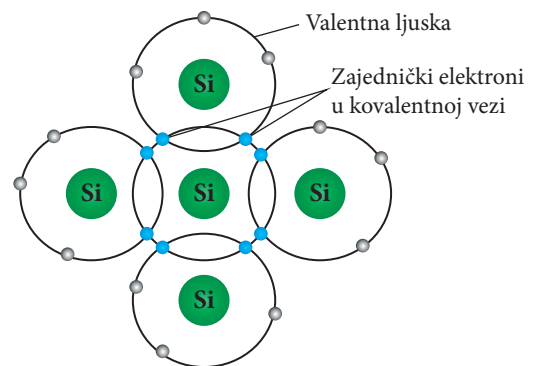


● Proton ● Neutron ● Elektron

Slika 1.10. Model atoma silicijuma



Slika 1.1. Kristalna rešetka silicijuma u jednoj ravni



Slika 1.12. Povezivanje atoma silicijuma građenjem kovalentne veze

Veza između atoma silicijuma ostvaruje se tako što dva susjedna atoma daju po jedan elektron iz svoje valentne orbite, gradeći na taj način kovalentnu vezu. Ova dva elektrona kruže oko oba jezgra i tako ih povezuju (slika 1.12).

Elektroni u kovalentnoj vezi čvrsto su vezani za atom, teško se od njega odvajaju, pa je čist kristal silicijuma slab provodnik električne struje. Ipak, neki od valentnih elektrona u kristalnoj rešetki mogu se osloboditi ako im se spolja dovede energija, npr. toplota ili svjetlost, što se i dešava na sobnoj temperaturi. Oni tada napuštaju kovalentne veze i postaju **slobodni elektroni**. Na mjestu gdje je bio elektron, ostaje nepopunjena veza, koja se naziva šupljina (slika 1.14). Šupljina se može smatrati kao elementarno *pozitivno naelektrisanje*, jer ona u stvari predstavlja mjesto gdje nedostaje jedan elektron.



Valenca je broj elektrona koji učestvuju u stvaranju hemijske veze.

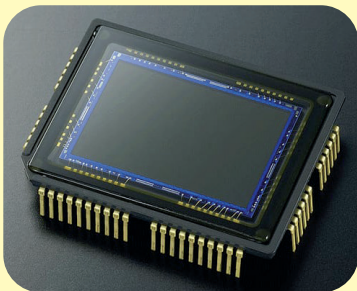


valencija (lat. *valentia*) – snaga, sposobnost.

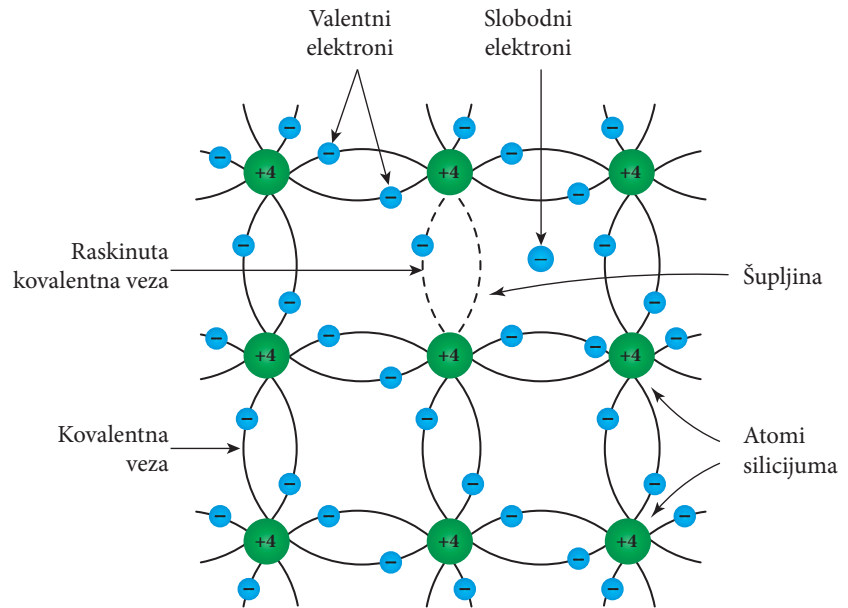


Poluprovodnički senzor u kamerama

Kod digitalnih kamera i fotoaparata pretvaranje svjetlosti u električni signal vrši se upotrebom senzora napravljenog od poluprovodničkog materijala (slika 1.13). Elementarne svjetlosne čestice (fotoni) koje prolaze kroz sočivo i padaju na poluprovodnički senzor, predaju potrebnu energiju elektronima i oni postaju slobodni. Ti oslobođeni elektroni sakupljaju se, i njihov broj proporcionalan je količini upadne svjetlosti, pa je moguće formirati električni signal koji odgovara toj svjetlosti.



Slika 1.13. Poluprovodnički senzor koji se koristi u kamerama



Slika 1.14. Generisanje para elektron–šupljina

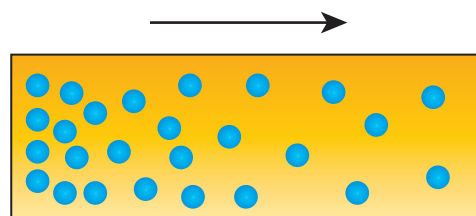
Dakle, kada elektron napusti valentnu zonu, nastaje par elektron–šupljina. Taj proces se naziva *generacija* para elektron–šupljina. Atom koji je izgubio elektron postaje pozitivno naelektrisan jon, te privlači elektrone. Zbog toga šupljinu može popuniti neki drugi slobodni elektron ili neki od susjednih valentnih elektrona, ostavljajući za sobom opet novo prazno mjesto, odnosno novu šupljinu. Šupljina se pomjerila na novo mjesto. Proces popunjavanja šupljina od strane elektrona naziva se *rekombinacija*.



Kontrolno pitanje 1.4 Ustanovi vezu između broja slobodnih elektrona i broja generisanih šupljina kod poluprovodnika.

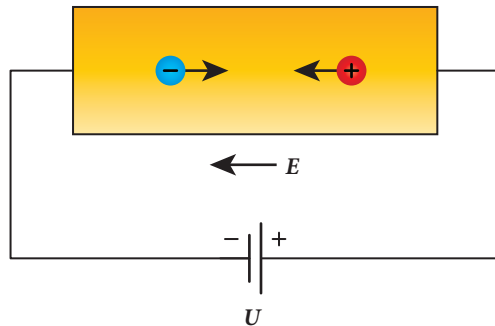
Električna struja je svako usmjereno kretanje naelektrisanih čestica.

Pomjeranje šupljina odgovara pomjeranju pozitivnih naelektrisanja. Na sobnoj temperaturi kretanje elektrona i šupljina je haotično. Međutim, može se desiti da koncentracija elektrona i šupljina bude veća na jednom kraju poluprovodnika. Usljed haotičnog kretanja, većina elektrona će se kretati ka oblasti u kojoj je njihova koncentracija manja (slika 1.15). Kretanje elektrona iz oblasti veće ka oblasti manje koncentracije naziva se **struja difuzije**.



Slika 1.15. Struja difuzije

Ako se na krajeve poluprovodnika priključi jednosmjerni napon (slika 1.16), u njemu će se formirati električno polje, koje je usmjereno od pozitivnog pola baterije za napajanje ka negativnom. Kako su negativno naelektrisan, slobodni elektroni kreću se ka pozitivnom polu baterije, dakle, u smjeru suprotnom od smjera električnog polja. Šupljine, koje predstavljaju pozitivna naelektrisanja, kreću se u smjeru suprotnom od kretanja elektrona, dakle, u smjeru polja. Usmjereno kretanje elektrona suprotno od smjera polja, i šupljina u smjeru polja, predstavljaju struju kroz poluprovodnik koja se naziva **struja provodnosti**. Kako je broj slobodnih elektrona, samim tim i šupljina, u silicijumu veoma mali, struja provodnosti silicijuma takođe je veoma mala.



Slika 1.16. Priključivanje jednosmjernog napona na krajeve poluprovodnika

1.4.2 Poluprovodnici P-tipa i N-tipa

Već je rečeno da je električna provodnost poluprovodnika veoma mala. Zbog toga se u praktičnim primjenama ne koriste čisti poluprovodnici, već oni s dodatkom atoma drugih hemijskih elemenata koji se nazivaju **primjese**. Proces dodavanja tih primjesa poluprovodniku naziva se *dopiranje*.

Primjese se dodaju da bi se u poluprovodniku povećao broj slobodnih elektrona, odnosno šupljina, čime se povećava provodnost tog poluprovodnika. Na koji se način to postiže?

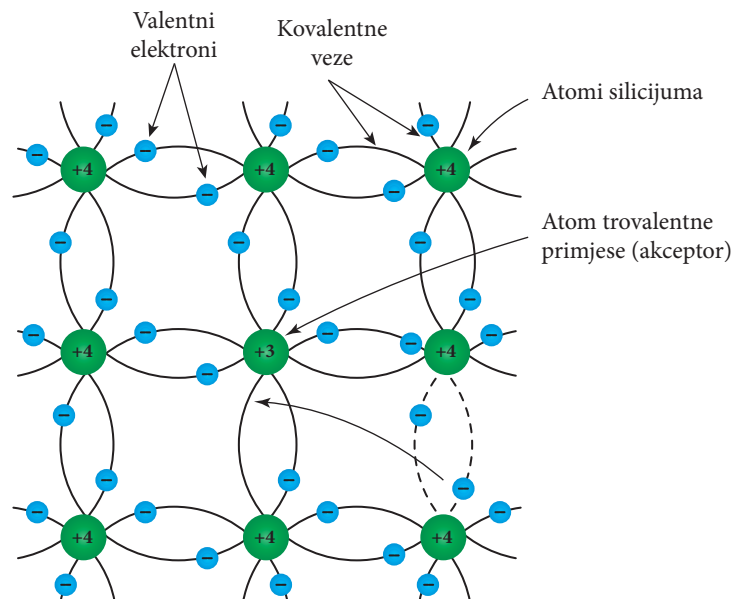
Kao primjese se koriste hemijski elementi koji u spoljašnjoj ljusci imaju 3 ili 5 valentnih elektrona. Kao trovalentne primjese obično se koriste aluminijum (Al), galijum (Ga) i indijum (In), dok se kao petovalentne primjese najčešće koriste arsen (As), antimon (Sb) i fosfor (P).

Poluprovodnik P-tipa

Ako se čistom poluprovodniku – silicijumu, koji je četvorovalentan – doda trovalentni primjesni element, na primjer aluminijum, onda će 3 od 4 valentna elektrona silicijuma ostvariti kovalentne veze sa 3 valentna elektrona primjese, dok će četvrta veza ostati nepopunjena (slika 1.17).



električno polje – fizička pojava u okolini naelektrisanog tijela koja se manifestuje pojavom mehaničke sile između naelektrisanja.



Slika 1.17. Kristal silicijuma dopiran trovalentnom primjesom



akceptor (lat. *acceptor*) – primalac, usvojilac.

Nepopunjena veza teži da se popuni nekim elektronom iz susjednog atoma, na čijem mjestu ostaje šupljina. Trovalentna primjesa prima elektron iz neke od susjednih kovalentnih veza, i naziva se *akceptor*. Sada ta primjesa ima višak negativnog naelektrisanja, odnosno postaje negativan jon (Al^-).

Novonastala šupljina može se popuniti tako što se iz susjedne veze istrgne elektron, čime se stvara nova šupljina, na čije mjesto može da dođe novi elektron itd. Ovaj proces obavlja se i na sobnoj temperaturi, jer je za izdvajanje elektrona iz kovalentne veze potrebna mala energija. Na ovaj način dolazi do kretanja šupljina. Kretanje šupljina predstavlja i kretanje naelektrisanja, jer se istovremeno sa šupljinama kreću i elektroni, ali u suprotnom smjeru.

Silicijum s primjesama trovalentnih elemenata postaje poluprovodnik u kojem šupljine čine **glavne (većinske) nosioce naelektrisanja**. Pošto se šupljine smatraju pozitivnim naelektrisanjima, ovakav poluprovodnik naziva se poluprovodnik P-tipa (P – engl. *positive*). U poluprovodnicima P-tipa, *slobodni elektroni* koji su nastali odvajanjem elektrona iz kovalentnih veza nazivaju se **sporedni (manjinski) nosioci naelektrisanja**, jer ih ima znatno manje od šupljina.

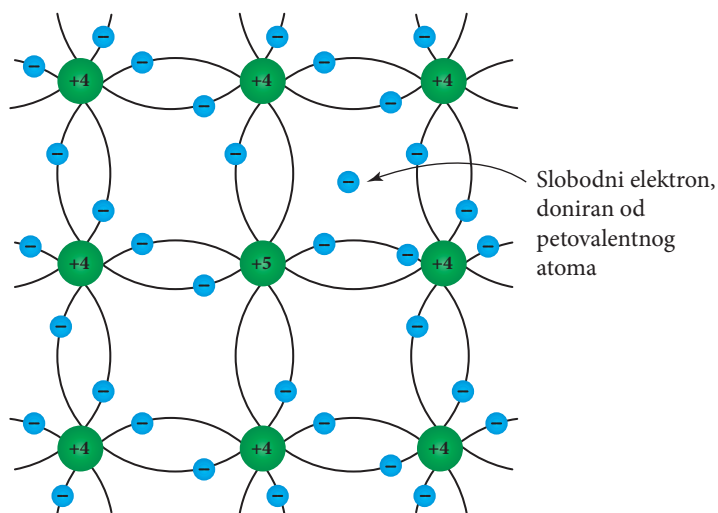
Kod poluprovodnika P-tipa kretanje naelektrisanja potiče od šupljina.

Poluprovodnik N-tipa

U kristalnu strukturu silicijuma može se unijeti i neka petovalentna primjesa, npr. fosfor. Tada će sva 4 elektrona iz posljednje orbite silicijuma ostvariti kovalentne veze sa 4 elektrona petovalentnog fosfora, dok će peti elektron fosfora ostati neuparen (slika 1.18). Petovalentna primjesa koja daje peti elektron naziva se *donor*.



donor (engl. *donor* od lat. *donare*) – darivalac.



Slika 1.18. Kristal silicijuma dopiran petovalentnom primjesom

Ovom elektronu potrebna je mala spoljašnja energija da napusti svoj atom i da postane slobodan. Ovaj slobodni elektron može da se kreće, ostavljajući iza sebe u kristalnoj strukturi poluprovodnika nepopunjeno mjesto jednog elektrona, odnosno pozitivno naelektrisani jon (P^+).

Silicijum s primjesama petovalentnih elemenata postaje poluprovodnik u kojem *elektroni* čine **glavne (većinske) nosioce naelektrisanja**. Pošto su elektroni negativnog naelektrisanja, ovakav poluprovodnik se naziva poluprovodnik N-tipa. U poluprovodnicima N-tipa, šupljine su **sporedni (manjinski) nosioci naelektrisanja**, jer ih ima znatno manje od elektrona.

Kod poluprovodnika N-tipa kretanje naelektrisanja potiče od elektrona.



Dodavanjem primjesa čistom poluprovodniku povećava se njegova provodnost. Ako se doda 1 atom primjese na 10 atoma čistog poluprovodnika, njegova provodnost povećaće se oko 20.000 puta. Pokretljivost šupljina tri puta je manja nego pokretljivost elektrona.

Klasifikacija čvrstih materijala koji imaju primjenu u elektrotehnici, može se izvršiti prema vrijednostima njihove specifične otpornosti. Materijali čija je specifična otpornost manja od $10^{-4} \Omega m$ nazivaju se provodnici, dok se za materijale specifične otpornosti iznad $10^3 \Omega m$ kaže da su izolatori. Postoji klasa materijala čija se specifična otpornost nalazi između ovih vrijednosti, pa se zbog toga zovu poluprovodnici. Zahvaljujući činjenici da se specifična otpornost poluprovodnika može kontrolisati dodavanjem atoma drugih materijala, moguća je proizvodnja različitih komponenti koje imaju veliku primjenu u elektronici.

Provodnici

Svi metali su dobri provodnici električne struje, posebno srebro i bakar, i u te svrhe koriste se u elektrotehnici.

Prema primjeni, provodne materijale možemo podijeliti na:

- materijale velike provodnosti (Cu, Ag, Au, Al)
- materijale male provodnosti (Fe, Ni, Zn, Ta, Pt)
- otporne legure
- provodne materijale specijalne namjene.

Tipovi provodnih materijala i njihova primjena dati su u tabeli 1.1.

Tabela 1.1. Tipovi provodnika i njihova primjena

Tip provodnika	Primjena
materijali velike provodnosti (Cu, Ag, Au, Al)	izrada izolovanih i neizolovanih provodnika (energetskih i telekomunikacionih) izrada žica i nanošenje provodnih slojeva u mikroelektronici
materijali male provodnosti (Fe, Ni, Zn, Ta, Pt)	izrada otpornika izrada zagrijevnih komponenti
otporne legure	izrada termičkih grijača
provodni materijali specijalne namjene	<ul style="list-style-type: none"> • termoparovi • električni kontakti • lemovi • topljivi osigurači • katode vakuumskih cijevi i dr.

Godišnje se za izradu raznih elektronskih uređaja u svijetu potroši i do nekoliko stotina tona zlata.



Slika 1.19. Procesor s kontaktima prekrivenim zlatom

diskretna komponenta – elektronska komponenta napravljena zasebno (otpornik, kalem, kondenzator, dioda, tranzistor i sl.).

integrirano kolo (čip) – mnoštvo elektronskih komponenti objedinjenih na jednom parčetu poluprovodnika gradeći složena elektronska kola.



Zlato

Zlato (Au), kao materijal koji ima izuzetna provodna svojstva, ima veliku primjenu u elektronici. Njegova je prednost u odnosu na druge metale u tome što je hemijski manje reaktivan, što ga čini i otpornijim na koroziju. Iz tog razloga koristi se pri izradi dijelova elektronskih kola koji imaju zadatak da obezbijede kontakt između dviju ili više elektronskih komponenti. Zlato se zbog svoje cijene, radi uštede materijala, najčešće nanosi preko drugih metala kako bi kontakte zaštitilo od korozije i na taj način obezbijedilo pouzdan rad elektronskih uređaja.

Izolatori

Izolatori (kao što su staklo, plastika, guma, papir te vazduh) imaju veliku primjenu u elektrotehnici – kada je potrebno spriječiti strujni tok ili kada je potrebno akumulirati naelektrisanja, npr. u kondenzatorima. U elektrotehnici se najčešće koriste za izolaciju raznih kablova, vodova, postrojenja, integrisanih kola i sl.

Najpoznatiji materijali iz ove grupe jesu: polivinil-hlorid (PVC), silikonska guma, kvarcno staklo, poliuretan, porculan, destilovana voda i drvo.

Poluprovodnici

Poluprovodnici imaju veliku primjenu u izgradnji elektronskih komponenti kao što su diode i tranzistori. Danas gotovo da ne postoji elektronski ili električni uređaj koji u sebi nema ugrađen neki dio od poluprovodničkog materijala.

Koriste se za izgradnju: diskretnih komponenti i integrisanih kola, optičkih detektora, optičkih izvora, solarnih ćelija i dr.

Tipični poluprovodnički materijali su silicijum i germanijum. Osim njih, još se koriste: selen, oksidi bakra, cinka i urana, srebro-sulfid, oksidi titanijuma i dr.

R

REZIME

- Atom kao najsitnija čestica nekog elementa sastoji se od jezgra i omotača. U jezgru su smješteni protoni i neutroni, dok oko jezgra kruže elektroni po putanjama koje se nazivaju orbite. Protoni su naelektrisani pozitivno, elektroni negativno, dok neutroni nemaju naelektrisanje. Naelektrisanja protona i elektrona su jednaka, ali su suprotnog znaka. Broj protona u atomu jednak je broju elektrona, pa je atom električno neutralan.
- Elektroni na orbitama imaju tačno određene energije – energetske zone. Razlika energija pojedinih energetskih zona naziva se energetska procjep.
- Između atoma u molekulu djeluju privlačne sile, i one su uzrok stvaranja hemijske veze. U formiranju hemijskih veza među atomima u molekulu, učestvuju elektroni iz posljednje orbite – valentni elektroni. Osnovni tipovi veze su: jonska, kovalentna i metalna. Jonsku vezu grade izraziti metali sa izrazitim nemetalima. Kovalentna veza nastaje između dva atoma nemetala, i ona se formira udruživanjem elektrona u zajedničke elektronske parove. Metalna veza obrazuje se između atoma metala.
- Elektrotehnički materijali dijele se na provodnike, izolatore i poluprovodnike. Kada se elektron može lako kretati iz atoma u atom u materijalu, riječ je o provodniku. Svi metali su dobri provodnici. Materijal s atomima u kojima elektroni teže da ostanu u vlastitim orbitama jeste izolator, i on ne može lako provoditi električnu struju. Poluprovodnici, kao što su silicijum i germanijum, slabiji su provodnici u odnosu na metale, ali su bolji od izolatora.
- Atomi poluprovodnika raspoređeni su u obliku kristalne rešetke. Elektroni koji se u kristalnoj rešetki mogu osloboditi, ako im se spolja dovede energija, napuštaju matične atome i postaju slobodni elektroni. Na mjestu gdje je bio elektron, ostaje nepopunjena veza, koja se naziva šupljina. Šupljina se može smatrati elementarno pozitivnim naelektrisanjem. Nastajanje para elektron–šupljina naziva se generacija parova elektron –šupljina. Šupljinu može popuniti i neki od susjednih elektrona. Proces popunjavanja šupljina naziva se rekombinacija.
- U praktičnim primjenama poluprovodnici se koriste s dodatkom drugih elemenata, koji se nazivaju primjese. Dodavanje primjese poluprovodniku naziva se dopiranje. Poluprovodnik s primjesama u kojem elektroni čine većinske nosioce naelektrisanja naziva se poluprovodnik N-tipa, a poluprovodnik s primjesama u kojem šupljine čine većinske nosioce naelektrisanja naziva se poluprovodnik P-tipa.
- Provodnici se koriste za provođenje električne struje, dok se izolatori upotrebljavaju za oblaganje i zaštitu tih provodnika. Poluprovodnici su materijali od kojih je napravljena većina elektronskih komponenti, i na njihovoj upotrebi počiva čitava elektronika.



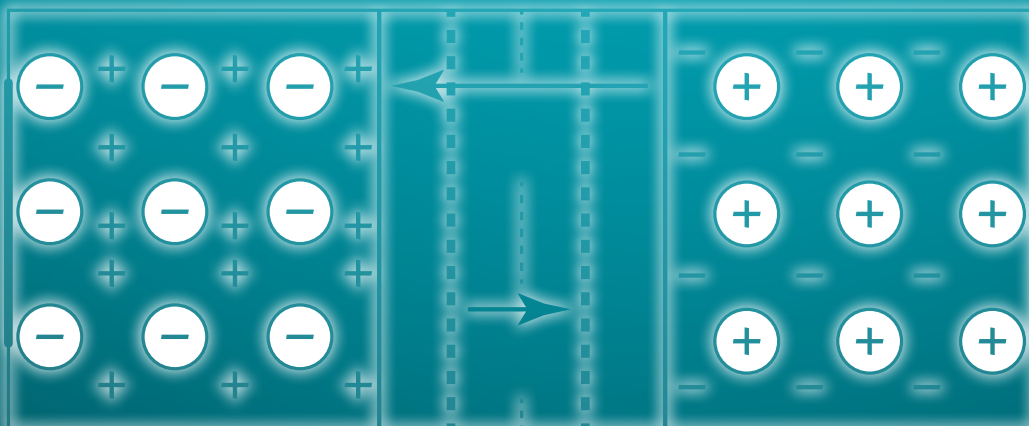
1. Objasni zašto se za atom kaže da je električno neutralna čestica.
2. Objasni razliku između jonske i kovalentne hemijske veze.
3. Pronađi na internetu tri jedinjenja koja nastaju građanjem: a) jonske i b) kovalentne veze.
4. Klasifikuj elektrotehničke materijale prema broju elektrona u posljednjoj orbiti.
5. Definiši energetska procjep i objasni njegov uticaj na provodna svojstva nekog materijala.
6. Objasni razliku između pojmova: elektron, šupljina, pozitivan i negativan jon.
7. Navedi uslove pri kojima može doći do generisanja parova elektron–šupljina kod čistog poluprovodnika.
8. Objasni razliku između pojmova generacija i rekombinacija.
9. Objasni razliku između struje difuzije i struje provodnosti.
10. Definiši pojmove: dopiranje, donor, akceptor.
11. Uporedi procese formiranja poluprovodnika P-tipa i N-tipa. Navedi većinske i manjinske nosioce naelektrisanja u oba slučaja.
12. Navedi primjere primjene različitih vrsta elektrotehničkih materijala u svakodnevnom životu.

2

Poluprovodničke diode

PN spoj predstavlja osnovni gradivni element savremene elektronike. Praktično sve najvažnije komponente današnje elektronike sadrže PN-spoj. PN-spoj formira se kada se neki poluprovodnik obradi tako da jedan njegov dio bude P-tipa a drugi N-tipa. Tada nastaje materijal koji se po svojim električnim svojstvima suštinski razlikuje od materijala iz kojih je izgrađen.

U ovom poglavlju objašnjeni su fizički procesi koji se odvijaju pri formiranju PN-spoja, kao i princip rada diode, osnovne elektronske komponente koju čini PN-spoj. Prateći dio ovog poglavlja jesu praktične vježbe 1–7 koje se nalaze na kraju udžbenika, u okviru glave VIII. Njihovom realizacijom učenici će se osposobiti za rad s laboratorijskim uređajima i softverima za simulaciju rada električnih kola, kao i za utvrđivanje načina rada poluprovodničke diode snimanjem strujno-naponske karakteristike.

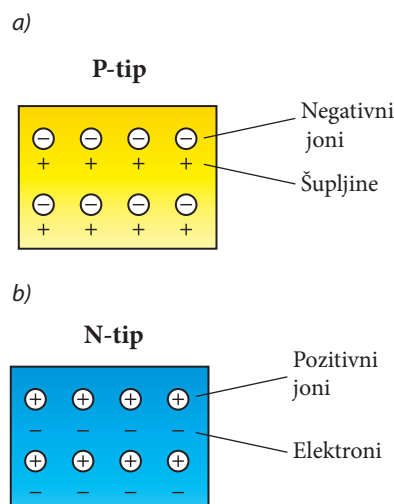


2.1

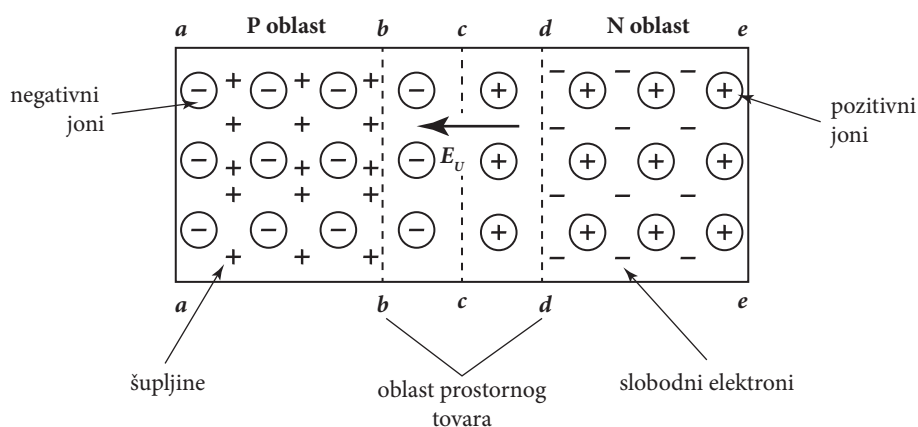
OBRAZOVANJE PN-SPOJA

U prethodnom poglavlju se moglo vidjeti da su kod poluprovodnika N-tipa *glavni nosioci naelektrisanja elektroni*, dok su *sporedni nosioci šupljine*. Pored tih pokretnih naelektrisanja, ovaj tip poluprovodnika sadrži i nepokretne strukture – *pozitivne jone* (atomi primjese koji su izgubili elektron). Kod poluprovodnika P-tipa *glavni nosioci naelektrisanja su šupljine*, dok su *sporedni nosioci elektroni*. Takođe, ovaj tip poluprovodnika sadrži i stabilne, nepokretne strukture – *negativne jone* (atomi primjese koji su primili elektron). Nosioci naelektrisanja i joni kod poluprovodnika P-tipa i N-tipa, prikazani su na slici 2.1.

Poluprovodnik, npr. silicijum, može se posebnim tehnološkim postupkom obraditi da mu jedan dio bude P-tipa a drugi N-tipa. U tom slučaju, zbog različitih koncentracija elektrona i šupljina kao pokretnih nosilaca naelektrisanja u P-dijelu i N-dijelu poluprovodnika, nastaje težnja za izjednačavanjem tih koncentracija u svim djelovima poluprovodnika, odnosno dolazi do *difuznog kretanja* elektrona i šupljina. Elektroni počinju da se kreću od mjesta veće ka mjestu manje koncentracije, odnosno iz N-oblasti ka P-oblasti poluprovodnika. To važi i za šupljine, koje se kreću u suprotnom smjeru, iz P-oblasti ka N-oblasti poluprovodnika (slika 2.2).



Slika 2.1. Većinski nosioci naelektrisanja i nepokretni joni kod poluprovodnika: a) P-tipa i b) N-tipa



Slika 2.2. Poprečni presjek PN-spoja

Prilikom kretanja elektrona i šupljina jednih ka drugima, na mjestu spajanja P-oblasti i N-oblasti (na slici označenog kao presjek *cc*), dolazi do popunjavanja šupljina elektronima, odnosno do njihove rekombinacije. Na taj se način oko granice spoja obrazuje oblast u kojoj

nema pokretnih nosilaca naelektrisanja. U toj oblasti sa strane P-tipa poluprovodnika postoje samo negativni, a sa strane N-tipa samo pozitivni nepokretni joni. Kako s jedne strane imamo negativno a s druge strane pozitivno naelektrisanje, u tom dijelu poluprovodnika dolazi do obrazovanja *unutrašnjeg električnog polja* E_u .

Jačina formiranog polja najveća je na mjestu spoja. Njegov smjer je takav da se protivi daljem kretanju elektrona, odnosno šupljina. Naime, pozitivni pol tog polja sada će se suprotstavljati daljem prelasku šupljina iz P-oblasti u N-oblast, ako se ima u vidu da se naelektrisanja različitog polariteta privlače a istog odbijaju. Po istom principu, negativni pol tog polja neće dozvoliti preostalim elektronima iz N-oblasti da pređu u P-oblast. U trenutku kada intenzitet polja postane dovoljno velik da spriječi kretanje elektrona, odnosno šupljina, prestaje difuzno kretanje. Kaže se da se unutar PN-spoja formirala posebna oblast, koja se naziva *oblast prostornog tovara* (OPT). Ova oblast je na slici 2.2 oivičena presjecima *bb* i *dd*.

Dio oblasti prostornog tovara na N-dijelu poluprovodnika nalazi se na pozitivnom potencijalu, dok se dio oblasti prostornog tovara koji leži na P-strani poluprovodnika nalazi na negativnom potencijalu.

*Razlika potencijala između krajeva oblasti prostornog tovara se naziva **potencijalna barijera**.*

Da bi slobodna šupljina prešla iz P-oblasti u N-oblast, morala bi savladati potencijalnu barijeru, jer njeno električno polje potiskuje šupljine nazad ka P-oblasti. Slično važi i za slobodne elektrone, jer ih električno polje potencijalne barijere potiskuje nazad u N-oblast. Većinski nosioci naelektrisanja u normalnim uslovima, tj. bez prisustva nekog stranog električnog polja, nijesu u stanju da pređu potencijalnu barijeru s obje strane spoja.

Na sobnoj temperaturi razlika potencijala ove barijere za silicijumski PN-spoj iznosi oko 0,7 V, a za PN-spoj od germanijuma oko 0,2 V.



oblast prostornog tovara – oblast u neposrednoj okolini dodira poluprovodnika P-tipa i N-tipa u kojoj nema slobodnih nosilaca naelektrisanja.



Kontrolno pitanje 2.1 Opiši na koji će način formirano unutrašnje električno polje djelovati na manjinske nosioce naelektrisanja u oblastima P i N.

2.2

POLARIZACIJA PN-SPOJA

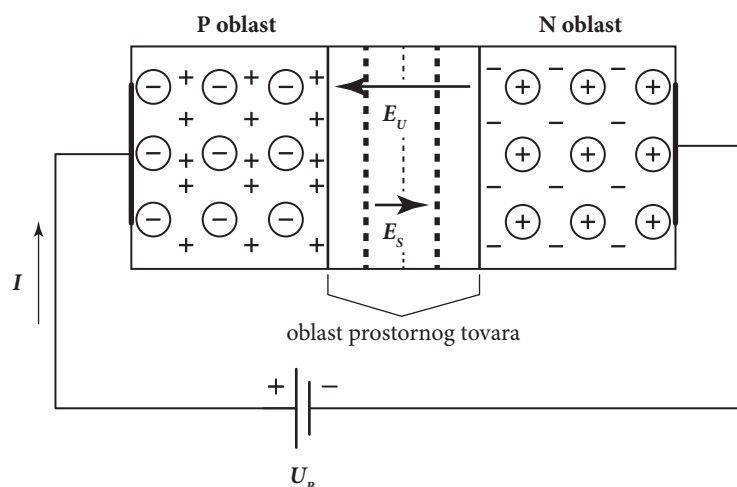
Poluprovodnici kao elektrotehnički materijali izučavaju se radi poboljšanja njihovih provodnih svojstava i da se kroz njih, kada je to potrebno, ostvari usmjereno kretanje naelektrisanja, odnosno proticanje struje. Dopiranjem poluprovodnika i formiranjem PN-spoja poboljšava se njegova provodnost, jer u ovom slučaju postoji dovoljan broj slobodnih naelektrisanja koja mogu učestvovati u provođenju struje. Problem se sada svodi na to kako elektronima i šupljinama pomoći da savladaju potencijalnu barijeru. Takođe, nakon što se to dogodi, potrebno je obezbijediti stalno kretanje slobodnih nosilaca, jer je difuzno kretanje koje se javilo u poluprovodniku prilikom obrazovanja PN-spoja privremenog karaktera.



polarizacija PN-spoja – priključenje PN-spoja u električno kolo s jednosmjernim izvorom napajanja.

2.2.1 Direktna polarizacija PN-spoja

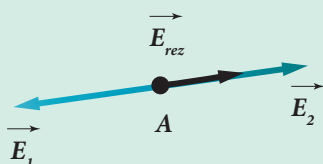
Razmotrimo na koji će se način PN-spoj ponašati kada se na njegove krajeve priključi izvor jednosmjernog napona (slika 2.3). Ukoliko pozitivni pol izvora napajanja priključimo na P-oblast, a negativni pol na N-oblast, onda se radi o *direktnoj polarizaciji PN-spoja*.



Slika 2.3. Direktna polarizacija PN-spoja

Ukoliko je napon izvora napajanja (U_B) priključenog na PN-spoj manji od napona potencijalne barijere, onda je spoljašnje električno polje E_s koje potiče od tog izvora, manje od unutrašnjeg polja E_u . Spoljašnje polje koje je usmjereno od P-oblasti ka N-oblasti, podstiče većinske slobodne nosioce da prelaze iz jedne u drugu oblast, dok se unutrašnje polje tome suprotstavlja. Rezultantno polje kojim se može predstaviti dejstvo ova dva polja usmjereno je kao jače polje, u ovom slu-

Dejstvo dva električna polja različite jačine i suprotnog smjera može se predstaviti trećim rezultantnim poljem, čiji je intenzitet jednak razlici ova dva polja, a smjer isti kao kod jačeg polja (slika 2.4).



Slika 2.4. Rezultantno polje

čaju unutrašnje polje, odnosno od N-oblasti ka P-oblasti. Kako je spoljašnje polje slabije od unutrašnjeg, oblast prostornog tovara se suzila, ali neće doći do prelaska slobodnih nosilaca naelektrisanja s jedne na drugu stranu graničnog spoja. Na slici 2.3, sužena oblast prostornog tovara oivičena je isprekidanom linijom.

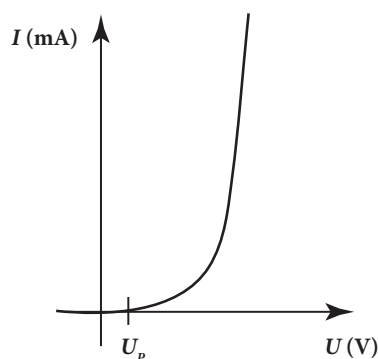
Ukoliko je pak spoljašnje električno polje E_s veće od unutrašnjeg polja E_u , tada je rezultantno polje istog smjera kao i spoljašnje, i usmjereno je od P-oblasti ka N-oblasti. Rezultantno polje sada potiskuje šupljine u N-oblast, a elektrone u P-oblast. Šupljine koje pristižu u N-oblast rekombinuju se s elektronima koji se u ovoj oblasti već nalaze. Na mjesto rekombinovanih šupljina pristižu nove iz P-oblasti, dok na mjesto rekombinovanih elektrona pristižu novi elektroni iz negativnog pola izvora.

Sličan proces se odvija i u P-oblasti: elektroni koji pristižu iz N-oblasti rekombinuju se sa šupljinama koje se već tamo nalaze. Na njihovo mjesto stalno pristižu novi elektroni iz N-oblasti, dok na mjesto rekombinovanih šupljina dolaze nove, koje nastaju napuštanjem PN-spoja od strane elektrona i njihovim odlaskom u metalni provodnik kola jednosmjerne struje, koji povezuje PN-spoj sa izvorom napajanja.

Neprekidno kretanje šupljina u smjeru spoljašnjeg polja i elektrona u suprotnom smjeru, predstavlja struju kroz PN-spoj. Ta struja će postojati dok god je PN-spoj izložen dejstvu spoljašnjeg polja čiji je intenzitet veći od intenziteta unutrašnjeg polja.

Strujno-naponska karakteristika direktno polarisanog PN-spoja

Na slici 2.5 prikazana je zavisnost struje koja protiče kroz direktno polarisani PN-spoj, od vrijednosti spoljašnjeg napona kojim se vrši polarizacija PN-spoja. Zavisnost struje od napona naziva se **strujno-naponska karakteristika**. Sa U_p označen je minimalni napon spoljašnjeg izvora koji je potrebno priključiti na PN-spoj da bi se savladala potencijalna barijera, i on se naziva *napon praga provođenja*. Već smo rekli da je njegova vrijednost oko 0,6–0,7 V za silicijumski spoj, a oko 0,2–0,3 V za germanijumski. Kada je napon direktne polarizacije veći od praga provođenja, kroz PN-spoj počinje da teče struja. U početku je ta struja veoma mala, reda μA , ali daljim povećanjem spoljašnjeg napona ona naglo raste i dostiže vrijednosti reda mA ili čak A.



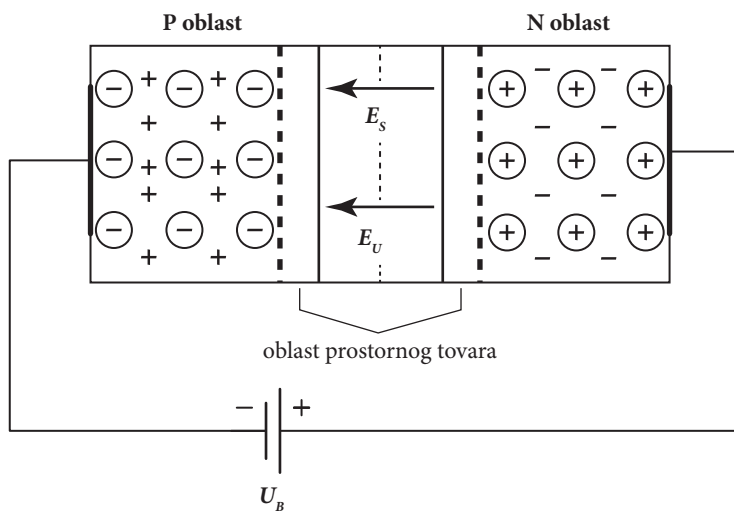
Slika 2.5. Strujno-naponska karakteristika direktno polarisanog PN-spoja



Kontrolno pitanje 2.2 Komentariši na koji način promjena napona priključenog spoljašnjeg izvora utiče na proticanje struje kroz PN-spoj.

2.2.2 Inverzna polarizacija PN-spoja

Razmotrimo sada na koji će se način PN-spoj ponašati kada je na njegove krajeve priključen jednosmjerni izvor napajanja čiji je pozitivni pol spojen na N-oblast a negativni na P-oblast. Sada se radi o *inverzno polarisanom PN-spoju* (slika 2.6). U ovom slučaju, polje koje potiče od izvora napajanja ima isti smjer kao i unutrašnje polje koje potiče od napona potencijalne barijere, a takođe se suprotstavlja prelasku slobodnih nosilaca iz jedne u drugu oblast. Rezultantno polje još više će potiskivati elektrone u N-oblast, a šupljine u P-oblast. Oblast prostornog tovara proširiće se, većinski elektroni i šupljine još više će se udaljiti od graničnog spoja, i neće biti njihove rekombinacije. Kroz PN-spoj praktično ne teče struja.

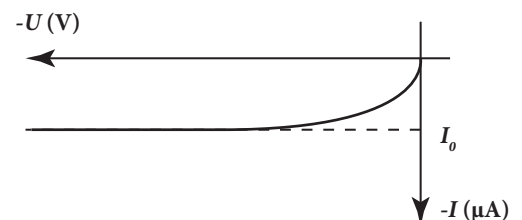


Slika 2.6. Inverzna polarizacija PN-spoja

Šta se dešava s manjinskim nosiocima naelektrisanja? Da podsjetimo, i u čistom poluprovodniku, usljed zagrijavanja, nastaju parovi elektron–šupljina. Označili smo ih kao manjinske nosioce naelektrisanja jer je njihov broj zanemarljivo mali. Smjer spoljašnjeg polja pogoduje tim naelektrisanjima, pa se elektroni iz P-oblasti kreću ka N-oblasti, a šupljine iz N-oblasti ka P-oblasti, pri čemu dolazi do njihove rekombinacije. Kako je ovih nosilaca veoma malo, i struja koja nastaje njihovim kretanjem veoma je slaba, reda nanoampera (nA). Ova struja, koja se javlja pri inverznoj polarizaciji PN-spoja, naziva se *inverzna struja PN-spoja*. Inverzna struja PN-spoja neće se povećavati povećanjem priključenog napona, s obzirom na to da je čine sporedni nosioci koji nastaju zagrijavanjem poluprovodnika.

Strujno-naponska karakteristika inverzno polarisanog PN-spoja

Na slici 2.7 prikazana je zavisnost struje koja protiče kroz inverzno polarisani PN-spoj od vrijednosti priključenog spoljašnjeg napona. Sa slike se vidi da se pri početnom povećavanju inverznog napona pove-



Slika 2.7. Strujno-naponska karakteristika inverzno polarisanog PN-spoja

ćava struja kroz PN-spoj, ali samo do jedne granice. Pri daljem povećanju inverznog napona struja ostaje konstantna.

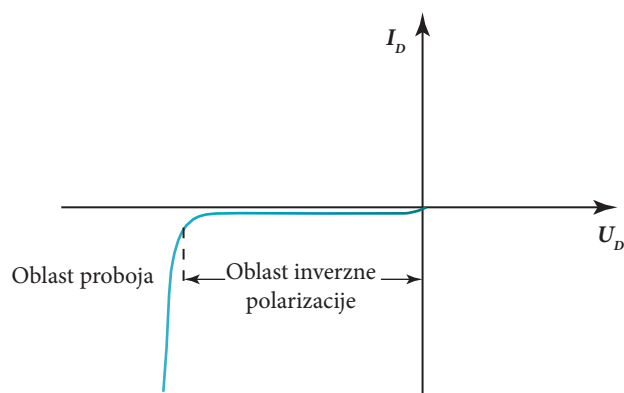
2.2.3 Proboj PN-spoja

Ukoliko se inverzni napon poveća preko određene granice, dolazi do proboja PN-spoja. Postoji više vrste proboja.

Već je rečeno da pri inverznom naponu polarizacije kroz diodu protiče inverzna struja, sačinjena od manjinskih nosilaca naelektrisanja. Pri isuviše visokom inverznom naponu, usljed proticanja inverzne struje, poluprovodnik se dodatno zagrijava. To će usloviti da elektroni lakše napuštaju matične atome i postaju slobodni. Porast broja slobodnih elektrona izazvaće povećanje inverzne struje. Kako je ovo proces koji se stalno ponavlja, temperatura nastavlja da raste, i kada pređe određenu graničnu vrijednost, dolazi do razaranja PN-spoja, pri čemu poluprovodnik gubi svoja svojstva. Ova vrsta proboja naziva se **toplotni proboj**.

Slobodni elektroni koji postoje u poluprovodniku, pod uticajem povišenog inverznog napona dodatno se ubrzavaju u smjeru suprotnom od smjera električnog polja koje stvara taj napon. Ubrzani elektroni sudaraju se s atomima kristalne rešetke poluprovodnika, predajući im dio svoje energije. Primljena energija u atomu prouzrokuje oslobađanje novih elektrona, koji se pod dejstvom spoljašnjeg polja takođe ubrzavaju i sudaraju s atomima rešetke, stvarajući još više slobodnih elektrona. Broj slobodnih elektrona naglo raste, odnosno stvara se **lavina elektrona**, koja prouzrokuje naglo povećanje struje. Kada dostigne određenu vrijednost, ova struja može da razori PN-spoj. Efekat proboja PN-spoja strujom nastalom od lavine elektrona naziva se **lavinski proboj**. Lavinski proboj javlja se pri naponima iznad 8 V.

Poseban oblik proboja PN-spoja dešava se kod provodnika koji imaju veliku koncentraciju primjesa. Povećavanjem inverznog napona PN-spoja iznad određene granice, povećava se i električno polje unutar poluprovodnika, koje čupa elektrone iz atoma kristalne rešetke poluprovodnika, te ih potiskuje u smjeru suprotnom od smjera polja. Porast broja slobodnih elektrona ima za posljedicu nagli porast inverzne struje, koja dovodi do razaranja PN-spoja, odnosno do njegovog proboja. Veća koncentracija primjesa u poluprovodniku omogućava lakše izvlačenje elektrona iz atoma, pa je kod veće koncentracije primjesa probojni napon niži, i iznosi oko 5 V. Ovakav tip proboja naziva se **Zenerov proboj**. Na slici 2.8 prikazana je zavisnost struje kroz inverzno polarisani PN-spoj od vrijednosti spoljašnjeg napona pri Zenerovom proboju.



Slika 2.8. Strujno-naponska karakteristika PN-spoja pri Zenerovom proboju



proboj PN-spoja – pojava naglog povećanja struje inverzno polarisanog PN-spoja.

Važno je naglasiti da proboj nije destruktivna pojava sve dok struja kroz PN-spoj ima dozvoljenu jačinu. Ako struja kroz PN-spoj ne prelazi dozvoljenu granicu, onda i u slučaju dostizanja probojnog napona spoj neće biti uništen.

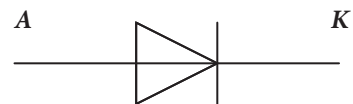
2.3

DIODA

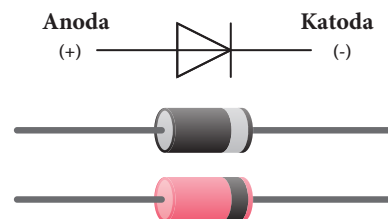
Poluprovodnički PN-spoj s metalnim priključcima (elektrodama) pomoću kojih se priključuje na izvor napajanja, opisan u prethodnom odjeljku, naziva se **dioda**. Dioda ima veliku primjenu u elektronici. Na električnim šemama se predstavlja kao na slici 2.9.

Metalna elektroda postavljena na P-oblast naziva se *anoda* (*A*), dok se metalna elektroda postavljena na N-oblast naziva *katoda* (*K*). Simbol diode istovremeno označava i smjer u kojem teče struja kroz diodu: od P-oblasti ka N-oblasti, odnosno od anode ka katodi. Na slici 2.10, uz simbol diode prikazan je i način označavanja katodnog priključka na diodi.

Kako dioda nije ništa drugo do PN-spoj s metalnim elektrodama, uslov za proticanje struje kroz diodu jeste da anoda bude na većem potencijalu u odnosu na katodu, za onoliko koliko iznosi napon potencijalne barijere. Podsjećanja radi, za silicijumsku diodu prag provođenja iznosi 0,6–0,7 V, dok je kod germanijumske ta vrijednost 0,2 V.



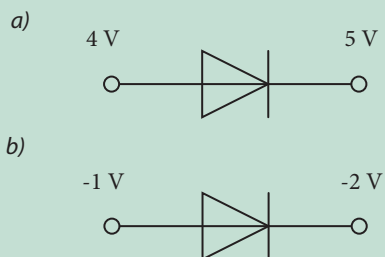
Slika 2.9. Simbol diode



Slika 2.10. Označavanje katode



Kontrolno pitanje 2.3 Odredi koja od dioda sa slike 2.11 provodi struju.

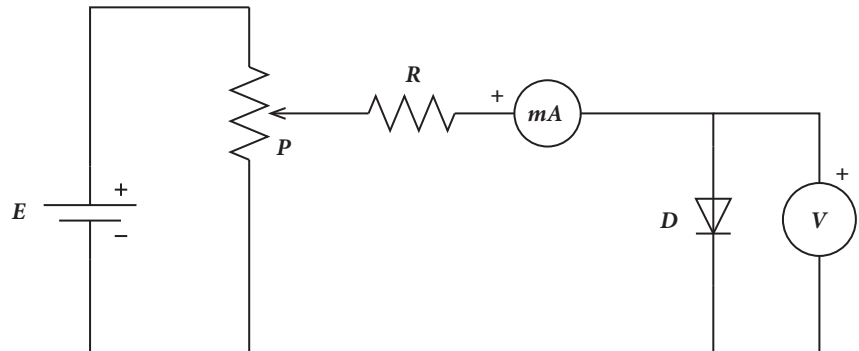


Slika 2.11. Primjeri polarizacije diode

2.3.1 Snimanje strujno-naponske karakteristike diode

Strujno-naponska karakteristika diode predstavlja zavisnost struje diode od napona na diodi. Ova zavisnost razmatrana je prilikom analize zavisnosti struje PN-spoja od napona na tom spoju. U ovom odjeljku opisano je kako se u praksi snimaju strujno-naponske karakteristike diode.

Snimanje karakteristika diode pri direktnoj polarizaciji obavlja se pomoću kola prikazanog na slici 2.12.



Slika 2.12. Šema kola za snimanje strujno-naponske karakteristike diode pri direktnoj polarizaciji

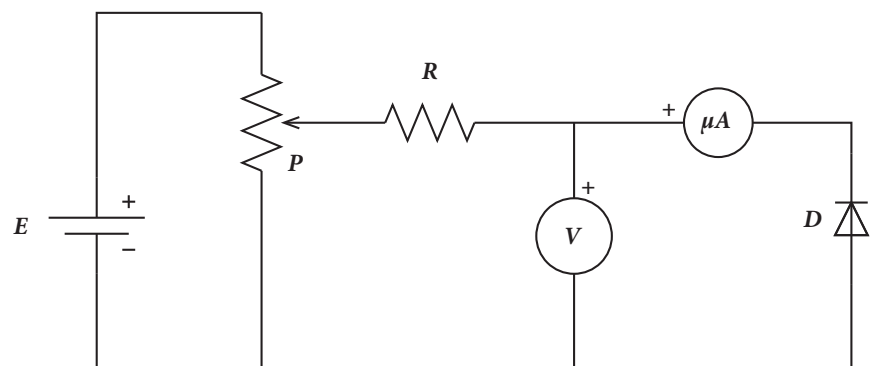


Potenciometar je promjenljivi otpornik koji djeluje kao razdjelnik napona. Jednostavnim okretanjem dugmeta, mijenja se otpor na njegovim krajevima, a time i vrijednost napona između tih krajeva.

E predstavlja izvor jednosmjernog napona, čija se vrijednost obično kreće između 5 i 15 V. Otpornik R služi da ograniči struju kroz diodu. Koliki će se dio od ukupnog napona koji daje izvor koristiti za polarizaciju diode, određuje se potenciometrom P . Struja kroz diodu mjeri se miliampermetrom (priklučenim na red između otpornika i diode), dok se napon na diodi mjeri voltmetrom (priklučenim paralelno u odnosu na diodu).

Izmjerene vrijednosti napona i struje unose se u odgovarajuću tabelu, na osnovu koje se na milimetarskom papiru crta grafička zavisnost struje od napona: $I = f(U)$.

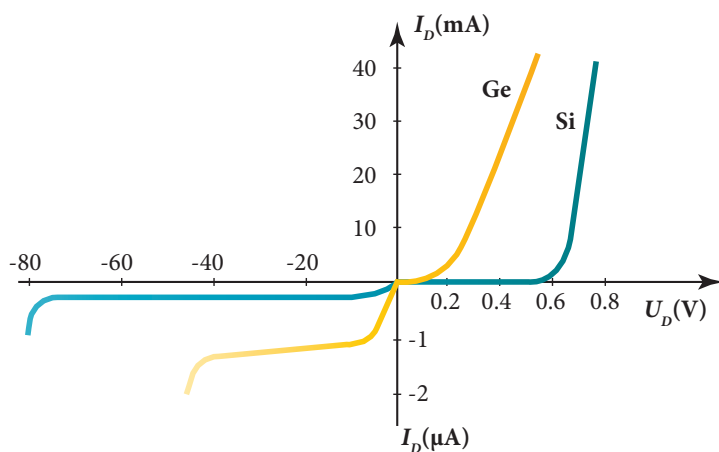
Snimanje inverzne karakteristike diode izvodi se pomoću električnog kola prikazanog na slici 2.13. U ovom se slučaju voltmetar u kolo stavlja prije miliampermetra kako miliampermetar ne bi mjerio struju kroz voltmetar. U suprotnom, ova struja mogla bi da utiče na rezultate mjerenja, jer je inverzna struja kroz diodu isuviše mala. Izmjereni podaci unose se u tabelu, na osnovu čega se crta grafik zavisnosti: $I = f(U)$.



Slika 2.13. Šema kola za snimanje strujno-naponske karakteristike diode pri inverznoj polarizaciji

Snimanje karakteristike diode u inverznom smjeru izvodi se samo za germanijumske diode, pošto je inverzna struja kod silicijumskih dioda veoma mala, reda nanoampera, i ne može se mjeriti standardnim instrumentima. Struja kod germanijumskih dioda je reda nekoliko mikroampera.

Potpune karakteristike silicijumske i germanijumske diode date su na slici 2.14. Treba obratiti pažnju da razmjera za pozitivne i negativne vrijednosti struje nije ista. Na pozitivnom dijelu strujne ose vrijednosti su date u mA, dok su na negativnom dijelu date u μA .



Slika 2.14. Potpune karakteristike silicijumske (Si) i germanijumske (Ge) diode



ampermetar – instrument za mjerenje jačine električne struje.

voltmetar – instrument za mjerenje električnog napona.



Pronađi na internetu jednostavan projekat s diodama. Nacrtaj električnu šemu i napravi popis elektronskih komponenti potrebnih za realizaciju tog projekta. Nabavi te komponente u prodavnici elektronskih komponenti u svom gradu ili poručivanjem putem interneta. U terminu koji je dogovoren s nastavnikom/nastavnicom, koristeći laboratorijske uređaje i eksperimentalnu pločicu, prezentuj svoj projekat.



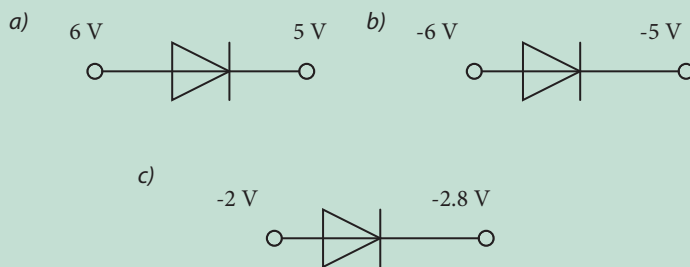
REZIME

- PN spoj formira se kad se parče poluprovodnika obradi tako da jedan njegov dio bude P-tipa a drugi N-tipa. Većinski nosioci naelektrisanja kod poluprovodnika P-tipa jesu šupljine, a manjinski nosioci elektroni, dok su kod poluprovodnika N-tipa elektroni većinski, a šupljine manjinski nosioci naelektrisanja.
- Kroz PN-spoj teče struja kada se on direktno polarise: na P-oblast priključuje se pozitivni, a na N-oblast negativni priključak jednosmjernog izvora napajanja.
- Pri inverznoj polarizaciji PN-spoja na P-oblast dovodi se negativni, a na N-oblast pozitivni priključak baterije. U tom slučaju kroz PN-spoj neće proticati struja.
- PN spoj sa svojim metalnim priključcima predstavlja poluprovodničku diodu. Priključak na P-oblasti naziva se anoda, dok se priključak na N-oblasti naziva katoda. Uslov proticanja struje kroz diodu jeste da se anoda nađe na većem potencijalu u odnosu na katodu za onoliko koliko iznosi napon potencijalne barijere. Napon provođenja kod silicijumskih dioda iznosi oko 0,6–0,7 V.
- Zavisnost struje kroz diodu od vrijednosti spoljašnjeg napona naziva se strujno-naponska karakteristika diode.



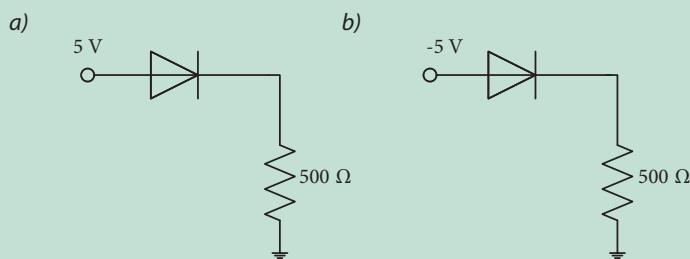
1. Imenuj većinske i manjinske nosioce naelektrisanja kod poluprovodnika N-tipa, odnosno P-tipa.
2. Objasni na koji se način dopiranjem slojeva u PN-spoju utiče na njegovu provodnost.
3. Definiši potencijalnu barijeru kod PN-spoja.
4. Objasni uzrok nastanka potencijalne barijere.
5. Opiši uticaj potencijalne barijere na slobodna naelektrisanja iz obje oblasti kod PN-spoja.
6. Opiši okolnosti pri kojima dolazi do promjene dimenzija oblasti prostornog tovara.
7. Objasni razliku između direktne i inverzne polarizacije kod PN-spoja.
8. Opiši uticaj promjene napona polarizacije na intenzitet struje kroz PN-spoj pri inverznoj polarizaciji.

9. Navedi koliko iznosi struja pri inverznoj polarizaciji za silicijumsku, a koliko za germanijumsku diodu.
10. Definiši strujno-naponsku karakteristiku diode.
11. Definiši prag provođenja.
12. Uporedi prag provođenja kod silicijumske i germanijumske diode.
13. Koji opseg vrijednosti uzima struja kroz diodu pri direktnoj polarizaciji? Na koji se način ona mijenja s promjenom napona polarizacije?
14. Zbog čega se silicijumska dioda ne koristi za snimanje strujno-naponske karakteristike diode pri inverznoj polarizaciji?
15. Objasni kako dolazi do: a) toplotnog, b) lavinskog i c) Zenerovog proboja.
16. Po čemu je specifičan Zenerov u odnosu na ostale vrste proboja?
17. Utvrdi koja od dioda sa slike 2.15 provodi.



Slika 2.15

18. Utvrdi koja od dioda sa slike 2.16 provodi.



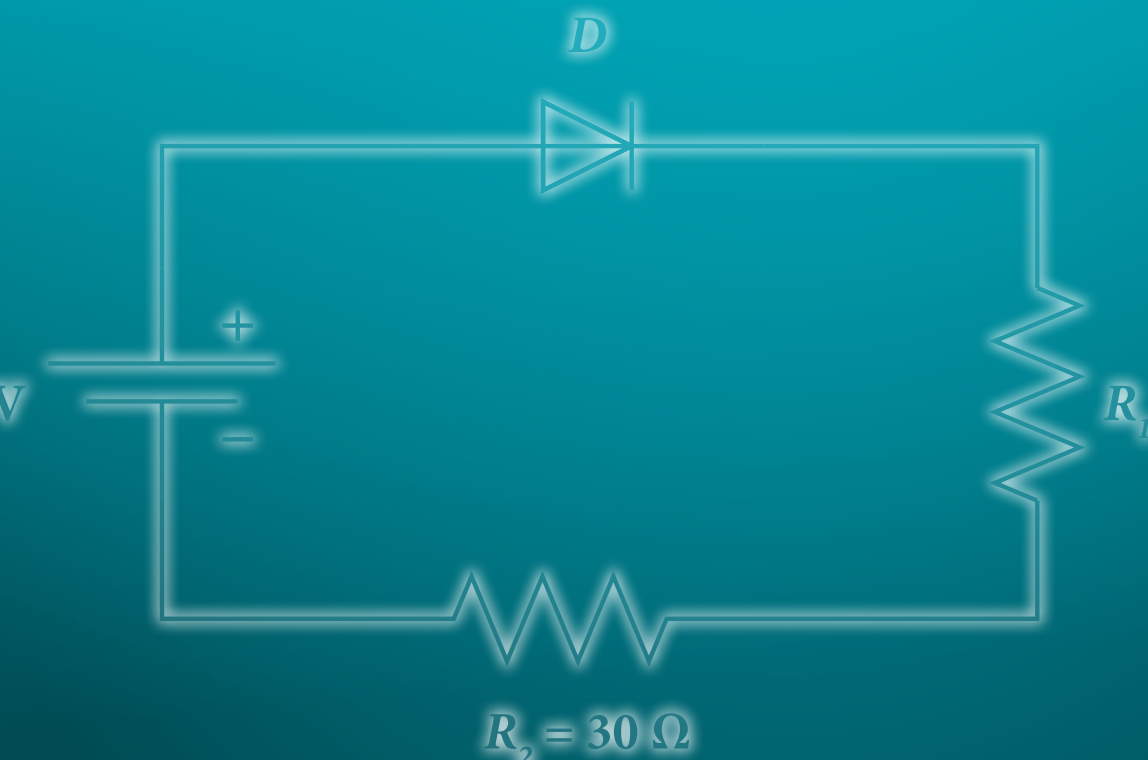
Slika 2.16

3

Dioda u električnom kolu

Dioda je elektronska komponenta koja dozvoljava protok električne struje u jednom smjeru uz veoma mali otpor, dok u suprotnom smjeru predstavlja veoma velik otpor. Na ovom principu, da ima provodni i neprovodni smjer, zasniva se rad diode u električnim kolima.

U ovom poglavlju opisan je način rada diode u električnom kolu, te analizirana promjena osnovnih električnih veličina u zadatim primjerima prostih i složenih električnih kola s diodama. Prateći dio ovog poglavlja jesu praktične vježbe 8 i 9 koje se nalaze na kraju udžbenika, u okviru glave VIII. Njihovom realizacijom učenici će se osposobiti za korišćenje eksperimentalne pločice i ispitivanje načina rada diode u električnom kolu.



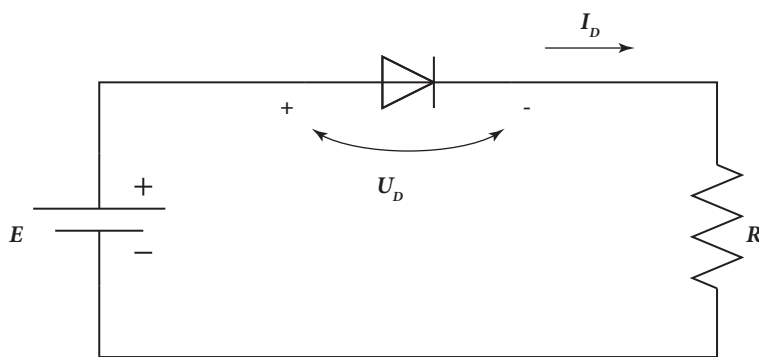
3.1

NAČIN RADA DIODE U ELEKTRIČNOM KOLU

Kada se dioda direktno polariše, ona postaje provodna. Tada i pri maloj promjeni napona na diodi dolazi do velikih promjena struje kroz diodu. To u praksi znači da je struju diode teško kontrolisati njenim direktnim priključivanjem na izvor napajanja. Kako prevelika struja kroz diodu znači i preveliku snagu disipacije na diodi, pa time i visoku temperaturu, izvodi se zaključak da se dioda ne smije direktno priključiti na izvor napajanja, već je potrebno s njom redno vezati otpornik. Na taj način može se kontrolisati intenzitet struje kroz diodu.

3.1.1 Radna prava

Na slici 3.1 prikazano je prosto električno kolo koje se sastoji od diode, jednosmjernog izvora napajanja E i otpornika R . Pošto je dioda direktno polarisana kroz nju, a time i čitavo kolo, struja će teći. Ta struja prouzrokuje pojavu napona na diodi, na slici označenog sa U_D .



Slika 3.1. Prosto električno kolo s diodom

Prema II Kirhofovom zakonu, za dato strujno kolo važi:

$$E - U_D - RI_D = 0.$$

Elementarnim algebarskim transformacijama dobija se da je struja kroz diodu:

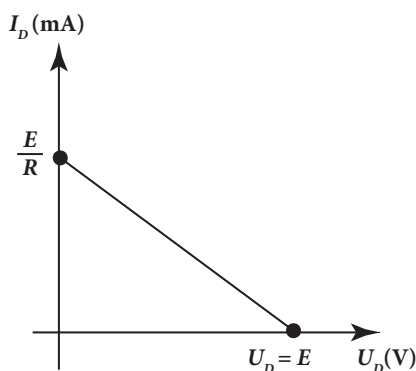
$$I_D = \frac{E}{R} - \frac{U_D}{R}.$$

Napon diode U_D veoma se malo mijenja, čak i pri većim promjenama struje kroz diodu. Ukoliko je napon izvora napajanja mnogo veći od promjene napona na diodi, može se smatrati da struja kroz diodu uglavnom zavisi od napona izvora E i otpornosti otpornika R .



Disipacija je rasipanje energije, u ovom slučaju energije pokretnih elektrona, pri čemu se ona pretvara u toplotu.

Snaga disipacije na diodi jeste količina energije koja je usljed kretanja elektrona pretvorena u toplotu. Ona je direktno proporcionalna struji kroz diodu, pa s porastom struje raste i ona.



Slika 3.2. Radna prava diode

Zavisnost struje kroz diodu I_D od napona na diodi U_D , pri čemu su veličine E i R konstantne (ne mijenjaju se), predstavlja jednačinu prave. Ova prava naziva se **radna prava**, i prikazana je na slici 3.2.

Iz matematike je poznato da je svaka prava u potpunosti određena s dvije tačke. Da bi se odredile te dvije tačke, dovoljno je u jednačini prave prvo jednu, a zatim i drugu promjenljivu izjednačiti s nulom, te u oba slučaja izračunati vrijednost one druge promjenljive.

Ukoliko se najprije pretpostavi da je u izrazu $I_D = \frac{E}{R} - \frac{U_D}{R}$ promjenljiva $I_D = 0$,

jednostavnim matematičkim operacijama dolazi se do prve tačke kroz koju prolazi radna prava,

i to je $U_D = E$.

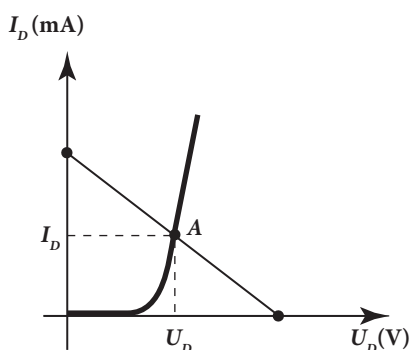
Druga tačka kojom se određuje radna prava jeste $I_D = \frac{E}{R}$,

i do nje se dolazi kada se pretpostavi da je $U_D = 0$.

Na ovaj način u potpunosti je određena radna prava kod diode,

i moguće ju je grafički predstaviti.

3.1.2 Radna tačka



Slika 3.3. Pronalaženje radne tačke

Na slici 3.3, na istom grafiku, predstavljena je radna prava diode koja se nalazi u prostom kolu sa slike 3.1, sa svojom strujno-naponskom karakteristikom. Tačka u kojoj se one presijekaju, naziva se **radna tačka (A)**.

Radna tačka određuje struju kroz diodu (I_D) i pad napona na diodi (U_D) pri toj struji, kada je dioda vezana u neko električno kolo.

Dakle, vrijednosti napona i struje u radnoj tački odgovaraju naponu i struji u datom električnom kolu. Struja i napon diode moraju pripadati njenoj strujno-naponskoj karakteristici, ali istovremeno i radnoj pravnoj. Ta dva uslova ispunjava isključivo radna tačka.

U slučaju da se promijeni vrijednost napona izvora ili otpornost u kolu, promijenice se i vrijednosti napona i struje diode u ovom kolu. Promjenom vrijednosti otpornika R ili vrijednosti napona izvora napajanja E , mijenja se nagib radne pravice, a time i pozicija radne tačke na strujno-naponskoj karakteristici diode.

Ukoliko se E poveća ili R smanji, radna tačka pomjera se ka gore. Pri tome, zbog velike strmine strujno-naponske karakteristike, mali porast napona na diodi izaziva velik porast struje kroz diodu. Kada se E smanji a R poveća, radna tačka pomjera se ka dolje. U nekom trenutku, za određeni položaj radne tačke, dioda će prestati da provodi struju. Ako je cilj da u nekom kolu dioda provodi struju, onda bi radna tačka trebalo da se nalazi u dijelu strujno-naponske karakteristike koji je približno linearan.



Kontrolno pitanje 3.1 Objasni na koji način promjena vrijednosti otpornika R utiče na promjenu strmine radne pravice.

3.1.3 Statička i dinamička otpornost diode

Parametri diode su veličine koje karakterišu ponašanje diode. Osnovni parametar diode jeste njena *inverzna struja zasićenja*. To je struja koja teče kroz diodu pri naponima inverzne polarizacije. Ona je veoma mala, i kreće se od 10^{-8} do 10^{-2} mA za germanijumske, i od 10^{-12} do 10^{-6} mA za silicijumske diode.

Drugi važan parametar diode jeste njena otpornost. Razlikujemo *statičku* i *dinamičku otpornost diode*.

Ako se jačina struje u radnoj tački označi sa I_A a napon sa U_A (slika 3.4), vrijednost $R_D = \frac{U_A}{I_A}$ predstavlja **statičku otpornost diode**.

Ako se promjeni jačina struje kroz diodu, npr. od neke vrijednosti I_1 do vrijednosti I_2 , onda će se i napon na diodi mijenjati od neke vrijednosti U_1 do U_2 . Količnik promjene napona i promjene struje predstavlja **dinamičku otpornost diode**, i dat je izrazom:

$$r_D = \frac{\Delta U_D}{\Delta I_D} = \frac{U_2 - U_1}{I_2 - I_1}$$

gdje je ΔU_D promjena napona, a ΔI_D promjena struje na diodi.

Na slici 3.4 grafički su predstavljene karakteristične vrijednosti napona i struje pri definisanju statičke i dinamičke otpornosti diode.

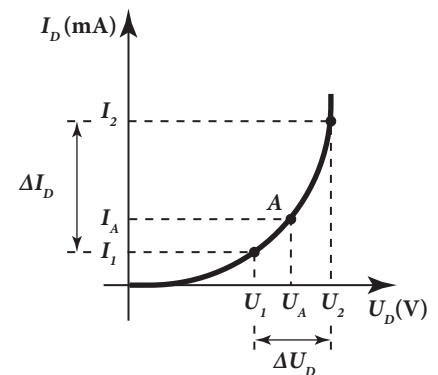


Kontrolno pitanje 3.2 Na osnovu datih definicija statičke i dinamičke otpornosti, ocijeni koja je od tih otpornosti veća.



statičan – koji nije u pokretu, nepokretan, nepromjenljiv.

dinamičan – pokretan, onaj koji se mijenja.



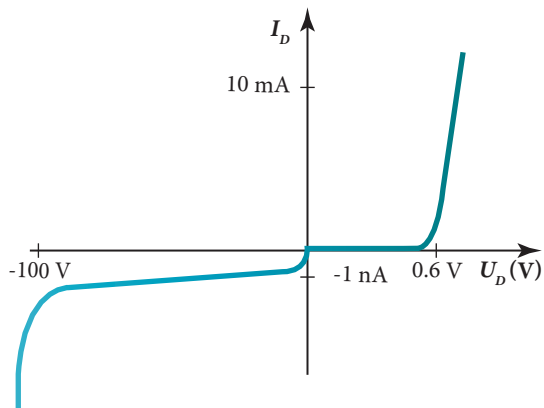
Slika 3.4. Pronalaženje statičke i dinamičke otpornosti diode

3.2

ANALIZA ELEKTRIČNIH KOLA S DIODAMA

Do sada je analiziran rad diode u prostom električnom kolu, koje se sastoji od izvora napajanja, diode i otpornika. U praksi je, međutim, primjena ovakvih kola vrlo rijetka. Dioda se obično upotrebljavaju u kolima koja imaju više elektronskih komponenti. Takva kola nazivaju se **složena električna kola**. Analiza složenih kola obuhvata računanje električnih veličina u kolu, kao što su *napon, jačina struje, otpornost i snaga*.

Prije početka analize primjera složenih kola s diodama, treba se prisjetiti kako izgleda strujno-naponska karakteristika diode. Na slici 3.5 prikazana je strujno-na-

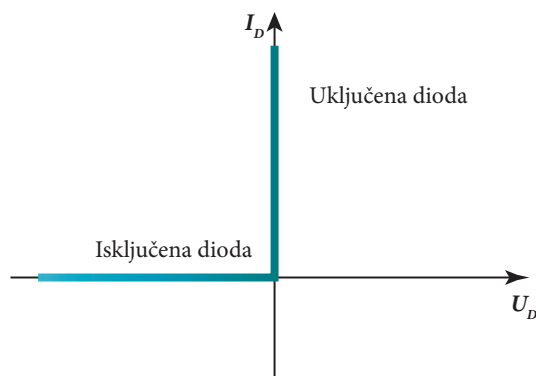


Slika 3.5. Strujno-naponska karakteristika silicijumske diode

ponaska karakteristika tipične silicijumske diode na sobnoj temperaturi (300 K). Grafik strujno-naponske karakteristike predstavljen je za negativne vrijednosti U_D i I_D u drugoj razmjeri.

Napon provođenja diode pri direktnoj polarizaciji iznosi 0,6–0,7 V. Struja diode pri inverznoj polarizaciji (inverzna struja) iznosi oko 1 nA (10^{-9} A). Pri povećanju temperature okoline, smanjuje se napon provođenja diode za 2 mV na svako povećanje temperature za jedan stepen kelvina (K). Inverzna struja se udvostručava za svako povećanje temperature od 10 K.

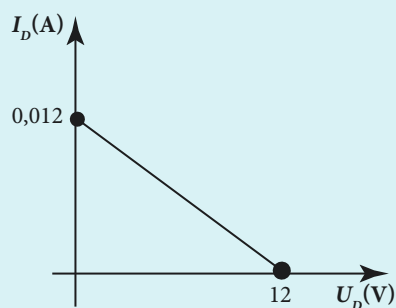
Pri proračunu električnih kola s diodama, strujno-naponska karakteristika tih dioda može se aproksimirati *idealnom karakteristikom* (slika 3.6). U idealizovanom slučaju dioda se u propusnom smjeru ponaša kao idealan provodnik, a u nepropusnom kao idealan izolator. Kada se dioda ponaša kao provodnik, ona se u električnom kolu zamjenjuje kratkom vezom. U slučaju kada se ponaša kao izolator, ona predstavlja prekid u kolu.



Slika 3.6. Strujno-naponska karakteristika idealne diode



RAČUNSKE VJEŽBE



Slika 3.7. Radna prava diode u primjeru 3.1

Primjer 3.1 Dioda je priključena na izvor jednosmjernog napona od 12 V, preko otpornika od 1 k Ω . Nacrtaј odgovarajuću radnu pravu.

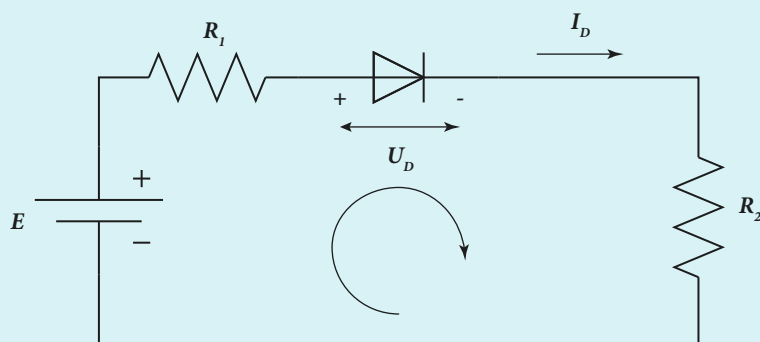
Rješenje:

Struja kroz diodu (istovremeno struja u čitavom kolu), primjenom II Kirhofovog zakona i zamjenom poznatih veličina, će biti opisana izrazom:

$$I_D = \frac{E}{R} - \frac{U_D}{R} = \frac{12 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} - \frac{U_D}{1 \text{ k}\Omega} = 0,012 \text{ A} - \frac{U_D}{1 \text{ k}\Omega}.$$

Odgovarajuća radna prava prikazana je na slici 3.7.

Primjer 3.2 Izračunaj napon na diodi u kolu sa slike 3.8. Vrijednosti elemenata kola: $E = 2 \text{ V}$, $R_1 = 10 \Omega$, $R_2 = 90 \Omega$. Karakteristiku diode smatrati poznatom, pri čemu je prag provođenja diode 0,5 V.



Slika 3.8. Kolo uz primjer 3.2

Rješenje:

Primjenom II Kirhofovog pravila za konturu označenu na slici i sređivanjem izraza dobija se izraz za radnu pravu diode:

$$E = (R_1 + R_2)I_D + U_D$$

Za njeno crtanje neophodne su dvije tačke, koje se najlakše određuju za vrijednosti $U_D = 0$ V i $I_D = 0$ A. Zamjenom poznatih veličina u jednačini prave za ova dva slučaja, dobijaju se vrijednosti predstavljene u tabeli 3.1. Na osnovu te tabele crtamo radnu pravu, na istom grafiku sa strujno-naponskom karakteristikom diode (slika 3.9).

Tabela 3.1

I_D (mA)	0	20
U_D (V)	2	0

Tačka presjeka radne prave sa strujno-naponskom karakteristikom diode jeste radna tačka diode, označena sa Q. Ona predstavlja trenutne vrijednosti struje i napona diode u datom električnom kolu. U ovom slučaju, očitavanjem s grafika približno se dobija da je $I_D = 12$ mA i $U_D = 0,8$ V.

Primjer 3.3 Odredi statičku otpornost diode, ako je pri naponu na diodi od 0,7 V struja diode 10 mA.

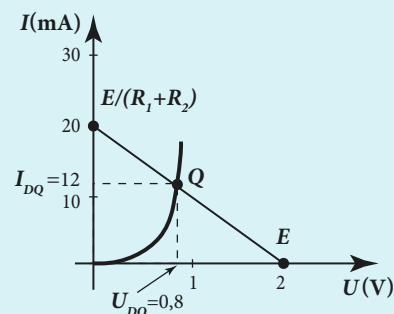
Rješenje:

$$R_D = \frac{U_A}{I_A} = \frac{0,7 \text{ V}}{10 \cdot 10^{-3} \text{ A}} = 70 \Omega$$

Primjer 3.4 Promjeni struje diode od 20 mA odgovara promjena napona na diodi od 100 mV. Odredi dinamičku otpornost te diode.

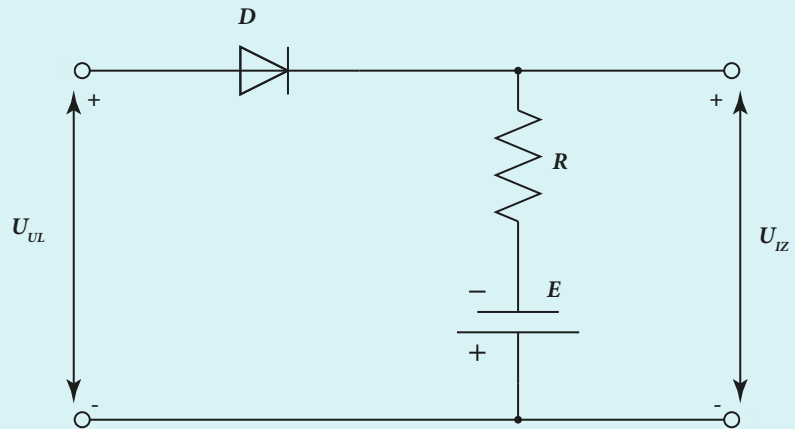
Rješenje:

$$r_D = \frac{\Delta U_D}{\Delta I_D} = \frac{100 \text{ mV}}{20 \text{ mA}} = 5 \Omega$$



Slika 3.9. Određivanje struje i napona na diodi u primjeru 3.2

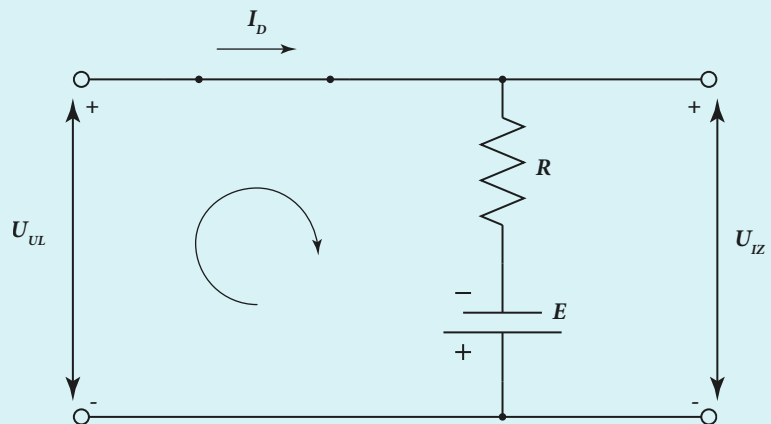
Primjer 3.5 Za kolo sa slike 3.10 odredi struju kroz diodu I_D i izlazni napon U_{Iz} , za sljedeće vrijednosti ulaznog napona: (a) $U_{Ul} = 6\text{ V}$ i (b) $U_{Ul} = -6\text{ V}$. Poznate vrijednosti su $E = 4,5\text{ V}$ i $R = 10\text{ k}\Omega$. Dioda je idealna.



Slika 3.10

Rješenje:

Sa slike se uočava da režim rada diode zavisi od ulaznog napona i izvora napajanja. Uvodi se pretpostavka da dioda provodi. U tom slučaju dioda se na električnoj šemi zamjenjuje kratkom vezom, kao što je to učinjeno na slici 3.11. Ukoliko se kao rezultat dobije pozitivna vrijednost struje, pretpostavka je tačna, i ta šema se može koristiti za ostale proračune. U suprotnom, ukoliko struja ima negativnu vrijednost, znači da je ona suprotnog smjera od onog pri kojem dioda provodi, pa polazna pretpostavka nije dobra. Za dalje proračune koristila bi se nova šema, na kojoj bi dioda predstavljala prekid u kolu.



Slika 3.11

Primjenom II Kirhofovog zakona, za konturu sa slike dobija se:

$$U_{Ul} - RI_D + E = 0$$

odnosno, sređivanjem:

$$I_D = \frac{U_{Ul} + E}{R}.$$

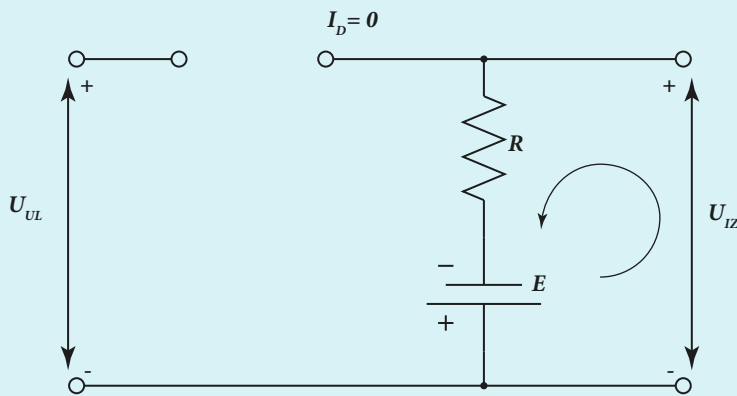
Zamjenom poznatih veličina u zadatku pod (a) dobija se $I_D = 1,05 \text{ mA} > 0$, tj. polazna pretpostavka je ispravna. U tom slučaju, sa slike se lako dolazi do izlaznog napona:

$$U_{IZ} = U_{UL} = 6 \text{ V.}$$

(b) Ukoliko ulazni napon ima vrijednost $U_{UL} = -6 \text{ V}$, za struju diode dobija se da je:

$$I_D = -0,15 \text{ mA} < 0.$$

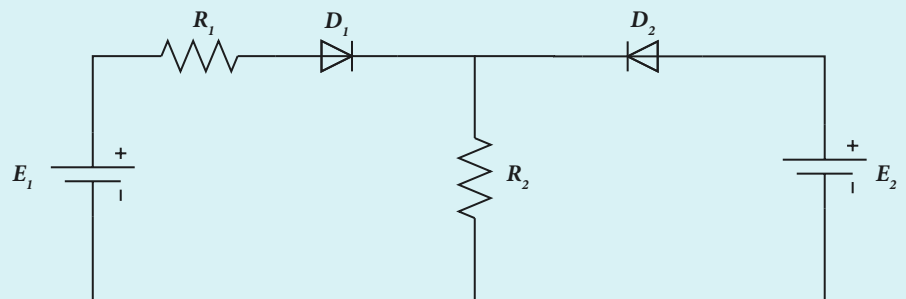
U ovom slučaju polazna pretpostavka nije tačna, tj. dioda ne provodi. Ekvivalentna šema odgovara onoj sa slike 3.12.



Slika 3.12

Obilazeći datu konturu, lako se dobija $U_{IZ} + E = 0$, odnosno $U_{IZ} = -E = -4,5 \text{ V}$.

Primjer 3.6 Analiziraj složeno električno kolo s dvije diode, prikazano na slici 3.13, čiji elementi imaju sljedeće vrijednosti: $E_1 = 10 \text{ V}$, $E_2 = 3 \text{ V}$, $R_1 = 4 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 6 \text{ k}\Omega$. Dioda smatraj idealnim.

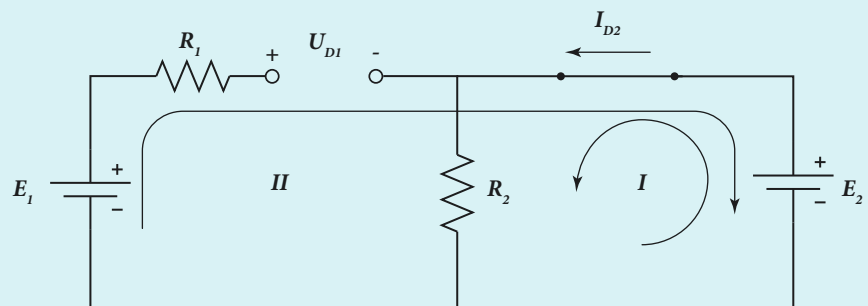


Slika 3.13. Složeno električno kolo s dvije diode

Rješenje:

Pri analizi kola potrebno je odrediti struje i napone na dvjema diodama. Najprije se uvodi pretpostavka o tome koja je od dioda provodna, a koja nije.

Korak 1. Pretpostavimo da je dioda D_1 isključena (prekid kola), a da je dioda D_2 uključena (kratka veza). Ekvivalentna šema kola prikazana je na slici 3.14.



Slika 3.14. Ekvivalentna šema u slučaju kada D_2 vodi a D_1 je isključena

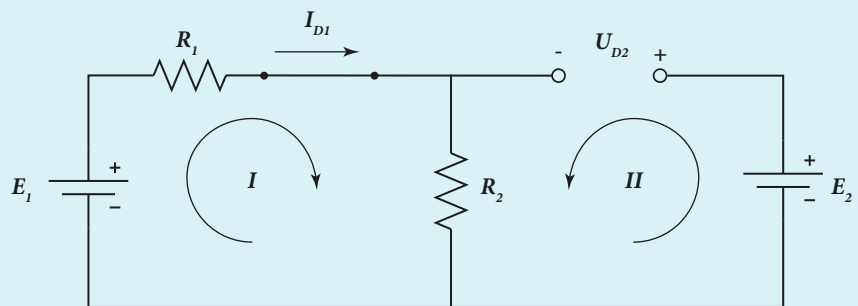
Primjenom II Kirhofovog pravila za konturu I i sređivanjem izraza pronalazimo struju I_{D2} :

$$I_{D2} = \frac{E_2}{R_2} = \frac{3\text{V}}{6 \cdot 10^3 \Omega} = 0,5\text{mA}.$$

Na isti način, za konturu II dobija se $E_1 = U_{D1} + E_2$, odnosno $U_{D1} = 7\text{V}$.

S obzirom na to da smo dobili da je napon na diodi $D_1 = 7\text{V}$, taj napon bio bi dovoljan da dioda provodi, što je suprotno polaznoj pretpostavci da je dioda D_1 neprovodna. Dakle, polaznu pretpostavku moramo odbaciti.

Korak 2. Pretpostavićemo da je dioda D_1 provodna, a dioda D_2 neprovodna. Ekvivalentna šema kola prikazana je na slici 3.15.



Slika 3.15. Ekvivalentna šema u slučaju kada D_1 vodi a D_2 je isključena

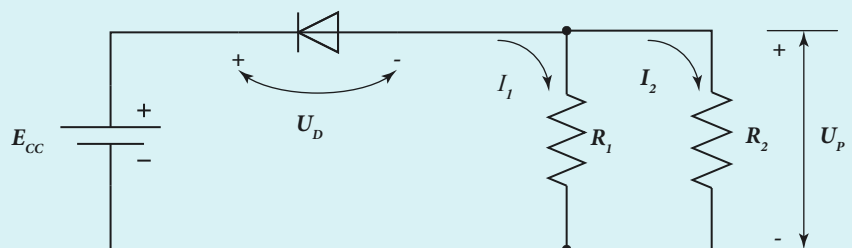
Na sličan način kao u prvom slučaju, pronalaze se vrijednosti napona U_{D2} i struje I_{D1} u ekvivalentnom kolu:

$$I_{D1} = \frac{E_1}{R_1 + R_2} = \frac{10\text{V}}{10 \cdot 10^3 \Omega} = 1\text{mA}$$

$$U_{D2} = E_2 - I_{D1}R_2 = 3\text{V} - 10^{-3}\text{A} \cdot 6 \cdot 10^3 \Omega = -3\text{V}.$$

Budući da napon na diodi D_2 iznosi -3V , to nije dovoljno da ta dioda provodi, što je saglasno polaznoj pretpostavci da je dioda D_2 neprovodna. Struja kroz diodu D_1 je reda mA, što odgovara režimu rada kada dioda provodi. Dakle, polazna pretpostavka je tačna: dioda D_1 je provodna, a dioda D_2 neprovodna.

Primjer 3.7 Inverzna struja diode u kolu sa slike 3.16 iznosi $60\ \mu\text{A}$, a napon napajanja $E_{CC} = 12\text{V}$. Odredi struje I_1 i I_2 , napon na izlazu U_p i napon na diodi U_D , kao i snagu disipacije (gubitaka) na diodi. Vrijednost otpornika u kolu je $R_1 = 20\text{k}\Omega$, $R_2 = 10\text{k}\Omega$.



Slika 3.16. Slika uz primjer 3.7

Rješenje:

Kako je dioda inverzno polarisana, kroz nju u smjeru od katode ka anodi protiče inverzna struja zasićenja I_S . S obzirom na to, a imajući u vidu označene smjerove za struje I_1 i I_2 , važi izraz:

$$I_S = I_1 + I_2.$$

Primjenom II Kirhofovog pravila, za konturu koju je moguće obrazovati u dijelu kola gdje su otpornici dobija se:

$$I_1 R_1 = I_2 R_2.$$

Iz prethodna dva izraza, rješavanjem po I_1 i I_2 , te zamjenom poznatih vrijednosti, lako se dobija da je:

$$I_1 = I_S \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 20 \cdot 10^{-6} \text{ A}$$

$$I_2 = I_S \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 40 \cdot 10^{-6} \text{ A}.$$

Znajući struje, može se izračunati napon na otpornicima. Kako su otpornici vezani paralelno, važi:

$$U_p = I_1 R_1 = I_2 R_2 = 0,4 \text{ V}.$$

Pad napona na diodi iznosi:

$$U_D = E_{CC} - U_p = 12 \text{ V} - 0,4 \text{ V} = 11,6 \text{ V}.$$

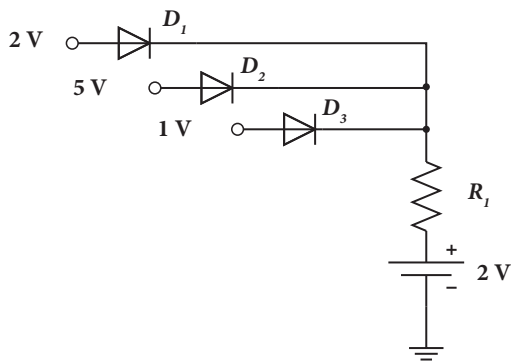
Snaga gubitaka na diodi jednaka je proizvodu struje i napona:

$$P_D = U_D I_S = 11,6 \text{ V} \cdot 60 \cdot 10^{-6} \text{ A} = 696 \text{ } \mu\text{W}.$$

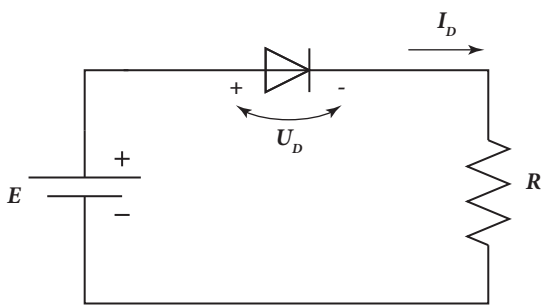


REZIME

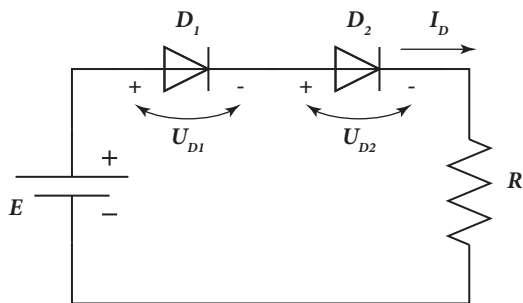
- Prosto električno kolo s diodom sastoji se od izvora napajanja, diode i otpornika za regulaciju struje kroz diodu. Regulacijom struje kroz diodu ograničavaju se i gubici, tj. kontroliše se snaga disipacije i zagrijavanje diode.
- Radna prava predstavlja zavisnost struje kroz diodu I_D od napona na diodi U_D .
- Tačka u kojoj se radna prava presijeca s karakteristikom diode naziva se radna tačka. Struja i napon diode moraju pripadati njenoj strujno-naponskoj karakteristici, ali i radnoj pravoj. Ta dva uslova ispunjava isključivo radna tačka.



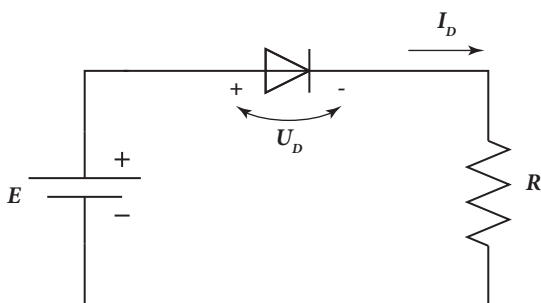
Slika 3.17



Slika 3.18



Slika 3.19



Slika 3.20



1. Objasni i grafički ilustruj čime je određen položaj radne tačke kod diode.
2. Objasni od čega zavisi nagib radne prave kod diode.
3. Objasni razliku između statičke i dinamičke otpornosti diode.
4. Dioda u kolu na slici 3.17 idealne su i identičnih karakteristika. Utvrdi koja od njih provodi.

Rezultat: Samo dioda D2.

5. Kroz kolo sa slike 3.18 protiče struja $I_D = 10 \text{ mA}$. Ako je otpornost otpornika $R = 390 \Omega$ i napon napajanja $E = 4,2 \text{ V}$, izračunaj pad napona na diodi.

Rezultat: $U_D = 0,3 \text{ V}$.

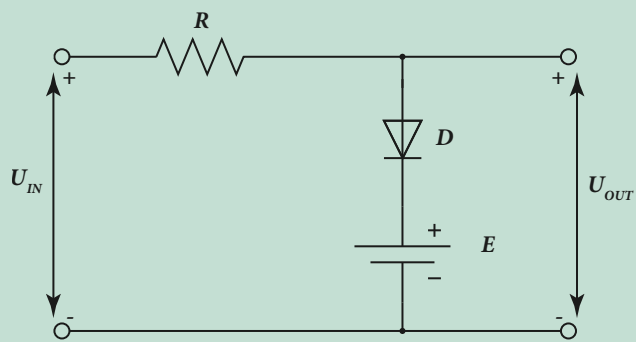
6. Kroz kolo na slici 3.19 protiče struja $I_D = 10 \text{ mA}$. Ako su silicijumske diode identičnih karakteristika, otpornost otpornika $R = 560 \Omega$ i napon napajanja $E = 7 \text{ V}$, izračunaj napone na diodama.

Rezultat: $U_{D1} = U_{D2} = 0,7 \text{ V}$.

7. Napon provođenja diode sa slike 3.20, $U_V = 0,5 \text{ V}$, napon napajanja iznosi $E = 5 \text{ V}$, dok je vrijednost otpornika $10 \text{ k}\Omega$. Utvrdi da li dioda provodi. Izračunaj napon na otporniku, struju kroz diodu, snagu kojom se zagrijava dioda i snagu kojom se zagrijava otpornik.

Rezultat: Da. $I_D = 0,45 \text{ mA}$, $U_R = 4,5 \text{ V}$, $P_D = 0,225 \text{ mW}$, $P_R = 2,025 \text{ mW}$.

8. Za kolo sa slike 3.21 odredi struju kroz diodu (I_D) i izlazni napon (U_{OUT}) za sljedeće vrijednosti ulaznog napona: a) $U_{IN} = 5 \text{ V}$ i b) $U_{IN} = -5 \text{ V}$. Poznato je: $E = 1,3 \text{ V}$ i $R = 47 \text{ k}\Omega$. Pad napona na direktno polarisanoj diodi jeste $U_V = 0,6 \text{ V}$.



Slika 3.21

Rezultat: a) $I_D = 0,066 \text{ mA}$, $U_{OUT} = 1,9 \text{ V}$; b) $I_D = 0 \text{ A}$, $U_{OUT} = U_{IN} = -5 \text{ V}$.

9. Za kolo na slici 3.22 dati su podaci: $R = 45 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 5 \text{ k}\Omega$, $U_V = 0,5 \text{ V}$, $E = 5 \text{ V}$. Odredi: a) najveći potencijal u tački A pri kome dioda ne provodi i b) najveću vrijednost otpornika R_1 pri kojoj dioda ne provodi.

Rezultat: a) $V_A = 0,5 \text{ V}$, b) $R_1 = 5 \text{ k}\Omega$.

10. Za kolo na slici 3.22 dati su podaci: $R = 45 \text{ k}\Omega$, $R_1 = 9 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 5 \text{ k}\Omega$, $U_Y = 0,5 \text{ V}$, $E = 5 \text{ V}$. Odredi jačinu struje koja protiče kroz diodu i snagu diode.

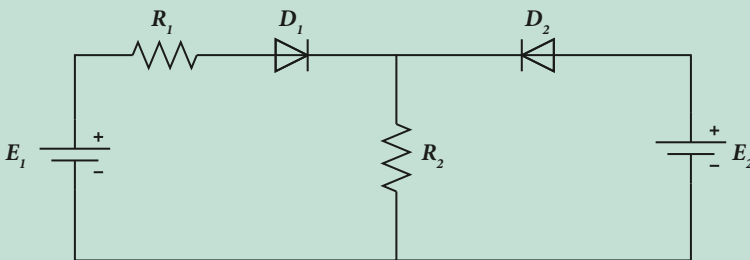
Rezultat: a) $I_D = 26,67 \text{ }\mu\text{A}$; b) $P_D = 13,34 \text{ }\mu\text{W}$.

11. Za kolo na slici 3.23 dati su sljedeći podaci: $R_1 = 4,7 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 2,2 \text{ k}\Omega$, $U_Y = 0,5 \text{ V}$, $E_{CC} = 10 \text{ V}$. Odredi struju kroz diodu i izlazni napon U_I .

Rezultat: $I_D = 2,1 \text{ mA}$, $U_I = -0,38 \text{ V}$

12. Za kolo prikazano na slici 3.24, čiji elementi imaju vrijednosti: $E_1 = 10 \text{ V}$, $E_2 = 3 \text{ V}$, $R_1 = 4 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 6 \text{ k}\Omega$, pokaži da:

- a) obje diode ne mogu biti neprovodne
b) obje diode ne mogu biti provodne.



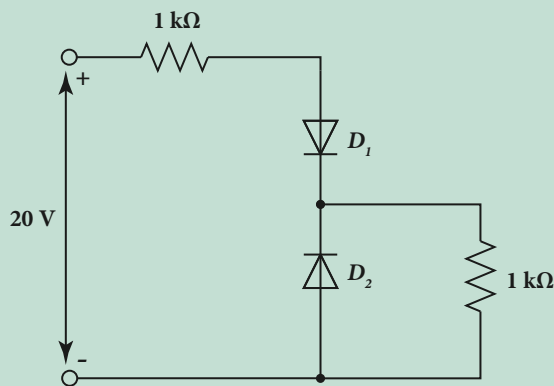
Slika 3.24

13. Za kolo sa slike 3.25 odredi struje u svim granama kola i izlazni napon U_I . Dioda je idealna.

Rezultat: $I_1 = 30 \text{ mA}$, $I_D = 30 \text{ mA}$, $I_2 = 0 \text{ A}$, $U_I = 0 \text{ V}$.

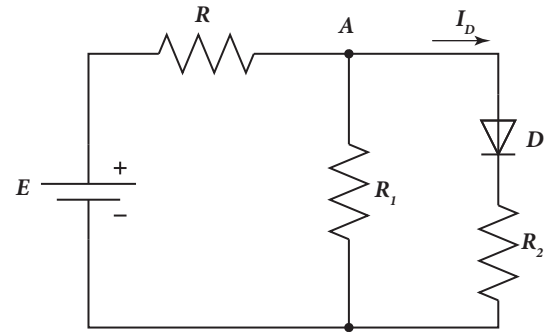
14. U kolu na slici 3.26 diode D_1 i D_2 su idealne, istih karakteristika. Odredi:

- a) struju kroz diodu D_1
b) struju i napon na otporniku paralelno vezanom s diodom D_2 .

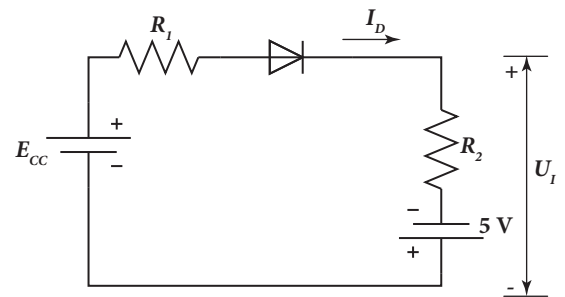


Slika 3.26

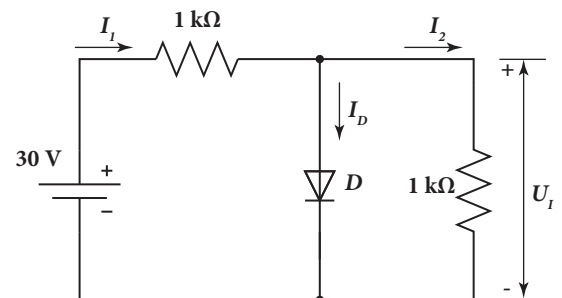
Rezultat: $I_D = I_R = 10 \text{ mA}$, $U_D = 10 \text{ V}$.



Slika 3.22



Slika 3.23



Slika 3.25

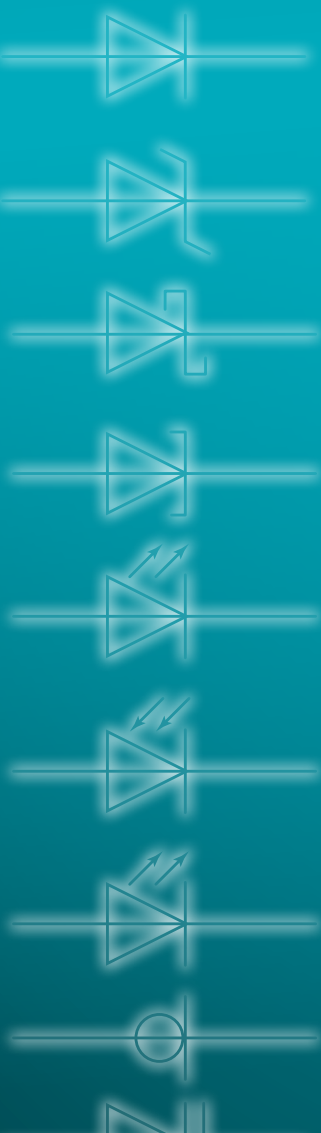
4

Primjena dioda

Jedan od osnovnih zadataka elektronike jeste izučavanje pojava povezanih s kretanjem naelektrisanja kroz poluprovodnike, na čemu se kasnije bazira izrada komponenti i uređaja koji imaju praktičnu primjenu.

U ovom poglavlju analizirane su karakteristike i primjena svake od različitih vrsta dioda, kao jednih od osnovnih poluprovodničkih komponenti. Takođe, zbog svoje široke primjene, posebno su obrađeni stabilizator napona sa Zenerovom diodom i usmjeračka kola. Poglavlje sadrži urađene primjere računskih zadataka, čijom se izradom postiže bolje razumijevanje gradiva.

Prateći dio ovog poglavlja jesu praktične vježbe 10–14 koje se nalaze na kraju udžbenika, u okviru glave VIII. Njihovom realizacijom učenici će se osposobiti za analizu rada različitih električnih kola s diodama, pomoću laboratorijskih uređaja i primjenom softvera za simulaciju rada električnih kola.



4.1

VRSTE DIODA

U elektronskim kolima i uređajima, zahvaljujući njihovim različitim izvedbama, koristi se više vrsta dioda. Najveću primjenu imaju: *ispravljačke*, *Zenerove*, *kapacitivne*, *tunel*, *PIN*, *LED*, *prekidačke* i *fotodiode*. Za sve njih zajedničko je to što im je funkcionisanje zasnovano na fizici PN-spoja.

4.1.1 LED i fotodiode

LED dioda (*Light Emitting Diode* – dioda koja emituje svjetlost) jeste dioda koja električnu energiju koja se na nju dovede pretvara u svjetlost. U strujno kolo priključuje se kao direktno polarisana dioda.

LED diode najčešće se primjenjuju kao indikatori, ukrasno osvjetljenje, u industriji zabave, za prenos signala kod daljinskih TV i muzičkih upravljača, u telekomunikacijama za prenos podataka optičkim kablovima i dr.

Fotodiode su poluprovodničke komponente koje provode struju kada se izlože dejstvu svjetlosti. Izrađuju se od silicijuma i selena kao primjese. Fotodiode se u strujno kolo priključuje kao inverzno polarisana dioda.

LED i fotodiode spadaju u takozvane *optoelektronske* komponente, čiji će način rada i primjena detaljnije biti objašnjeni u VII poglavlju.

4.1.2 Varikap (kapacitivne) diode

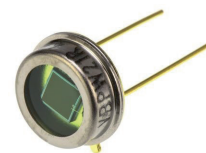
Kapacitivnost PN-spoja

PN spoj se ponaša kao kondenzator jer se na jednoj strani nalaze šupljine (pozitivna naelektrisanja), a na drugoj elektroni (negativna naelektrisanja). Kod PN-spoja razlikujemo *difuznu* i *barijernu* kapacitivnost.

Difuzna kapacitivnost javlja se kod propusno polarisanog PN-spoja. Priključivanjem spoljašnjeg jednosmjernog napona na PN-spoj, dolazi do naglog kretanja šupljina iz P-oblasti u N-oblast, kao i elektrona iz N-oblasti u P-oblast. Stalno povećavanje broja šupljina u N-oblasti, odnosno elektrona u P-oblasti, podsjeća na početno punjenje kondenzatora. Isključivanjem napona direktne polarizacije nestaje električno



Slika 4.1. LED diode



Slika 4.2. Fotodiode

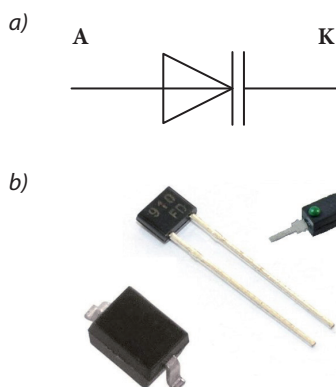


Kondenzator je električna komponenta koja se obično sastoji iz dvije provodne metalne obloge, na kojima se sakupljaju pozitivna, odnosno negativna naelektrisanja. Kao što je svaki otpornik opisan svojom otpornošću, tako je i kod kondenzatora jedna od osnovnih karakteristika kapacitivnost. Kapacitivnost pločastog kondenzatora data je izrazom:

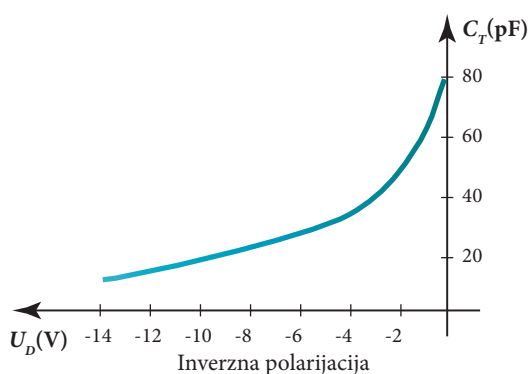
$$C = \epsilon \cdot \frac{S}{d}$$

gdje je ϵ – dielektrična permitivnost materije, S – površina ploča kondenzatora i d – rastojanje između ploča kondenzatora.

Iz izraza se može uočiti da je kapacitivnost kondenzatora veličina obrnuto proporcionalna rastojanju između njegovih ploča. To znači da se **s porastom rastojanja između ploča smanjuje kapacitivnost kondenzatora.**



Slika 4.3. a) Simbol i b) fizički izgled različitih tipova varikap diode



Slika 4.4. Zavisnost kapacitivnosti varikap diode od napona inverzne polarizacije

polje koje je uslovljavalo kretanje slobodnih naelektrisanja, pa se šupljine vraćaju u P-oblast a elektroni u N-oblast. Ovaj proces odvija se postepeno, pa se tada PN-spoj ponaša slično kondenzatoru koji se prazni. Tipična vrijednost difuzne kapacitivnosti PN-spoja jeste 100 pF.

Barijerna kapacitivnost javlja se pri inverznoj polarizaciji PN-spoja. Oblast prostornog tovara predstavlja izolator, jer u njoj nema slobodnih nosilaca naelektrisanja. Oblasti PN-spoja lijevo i desno od oblasti prostornog tovara odgovaraju oblogama kondenzatora, na kojima se nalaze pozitivna i negativna naelektrisanja. Pri inverznoj polarizaciji, oblast prostornog tovara se povećava, što odgovara povećanju rastojanja između obloga kondenzatora. Povećavanjem rastojanja između obloga kondenzatora, smanjuje se njegova kapacitivnost.

Varikap diode (slika 4.3) jesu diode čija se kapacitivnost mijenja promjenom vrijednosti inverznog napona koji je priključen na njih. One imaju primjenu kao promjenljivi kondenzatori u uređajima koji rade na visokim frekvencijama.

Promjena kapacitivnosti varikap diode u zavisnosti od napona inverzne polarizacije, data je na slici 4.4. Lako se može uočiti da kapacitivnost diode opada s porastom napona inverzne polarizacije.

4.1.3 Prekidačke diode

Diode koje se u elektronskim kolima ponašaju tako što prelaze iz provodnog u neprovodno stanje, i obratno, nazivaju se **prekidačke diode**. Na taj način ove diode obavljaju funkciju elektronskog prekidača kojim se razdvajaju ili spajaju određeni dijelovi kola, pa svoju primjenu pronalaze u impulsnim i digitalnim kolima. Impulsna i digitalna kola biće izučavana u II i III razredu.

Prekidačke diode imaju male dimenzije i malu količinu primjesa, pa im je kapacitivnost mala. Kao posljedica toga, brzina uspostavljanja i prekidanja struje kroz njih je velika, odnosno vrijeme uključivanja i isključivanja takve diode je malo. Posebno je važno da vrijeme isključivanja diode bude što kraće, i ono kod prekidačkih dioda iznosi nekoliko nanosekundi.

Posebna vrsta prekidačkih dioda, koje imaju najveću brzinu isključivanja, jesu Šotkijeve diode (slika 4.5). Kod ovih dioda nema klasičnog PN-spoja, već se izrađuju tako što se na poluprovodnik N-tipa nanosi metal, koji zamjenjuje P-oblast. Slobodni elektroni usljed difuzije prelaze iz poluprovodnika u metal, ostavljajući za sobom pozitivne jone. Za razliku od PN-spoja, gdje šupljine usljed difuzije napuštaju P-oblast i prelaze u N-oblast, ostavljajući za sobom negativne jone, ovdje se to ne događa. Oblast prostornog tovara formira se samo u poluprovodniku, ne i u metalnom dijelu spoja. Zbog toga je unutrašnje električno polje, koje se suprotstavlja daljem prelasku elektrona u metal, kod Šotkijeve diode manje nego kod standardnog PN-spoja, pa je manja i potencijalna barijera. Zbog niže potencijalne barijere, prag provodjenja ovih dioda niži je nego silicijumskih, i najčešće se kreće u opsegu 0,2–0,4 V. Formirani spoj između poluprovodnika N-tipa i metala istovremeno predstavlja i priključak za anodu (A).



Prelazak bilo koje diode – pa i prekidačke – iz provodnog u neprovodno stanje (i obrnuto) nije trenutno, već je potrebno neko vrijeme da se to dogodi. Vrijeme koje je potrebno da se struja kroz diodu promjeni od neke vrijednosti do nule naziva se **vrijeme isključivanja diode**. Mnogo je manje vremena potrebno da bi dioda iz neprovodnog prešla u provodno stanje, i to vrijeme naziva se **vrijeme uključivanja diode**.

S druge strane poluprovodnika N-tipa obrazuje se N^+ oblast, tj. oblast s velikom koncentracijom primjese (slobodnih elektrona). Upravo od ove koncentracije primjese zavisi koliko će tačno iznositi prag provođenja Šotkijeve diode. Na nju se nanosi metalni priključak, koji predstavlja katodu (K) ove diode.

Izgled nekoliko različitih tipova Šotkijevih dioda prikazan je na slici 4.6.

Polarizacija Šotkijeve diode vrši se na isti način kao kod obične diode. Pri direktnoj polarizaciji struja protiče od anode ka katodi, dok pri inverznoj polarizaciji nema proticanja struje kroz diodu.



Kontrolno pitanje 4.1 Komentariši uticaj promjene kapacitivnosti spoja kod prekidačke diode na brzinu uspostavljanja i prekidanja struje kroz diodu.

Prednosti Šotkijeve diode u odnosu na klasičnu jesu:

- mala kapacitivnost spoja
- kratko vrijeme isključivanja diode
- velika struja provodnosti za mali ulazni napon
- nizak prag provođenja
- visoka efikasnost
- rad na visokim frekvencijama i dr.

Mana Šotkijeve diode jeste visoka inverzna struja zasićenja.

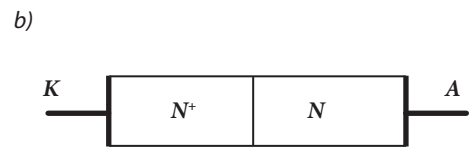
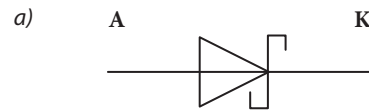
Šotkijeve diode se koriste:

- kao ispravljajući opšte namjene
- u kolima s visokim frekvencijama
- za izradu napajanja
- za detekciju signala
- u logičkim kolima i dr.

Vrijeme uključivanja i isključivanja Šotkijeve diode obično je 100 ps (pikosekundi).

4.1.4 PIN diode

PIN diode razlikuju se od običnih po tome što između P-spoja i N-spoja imaju I-oblast koja je čist poluprovodnik, jer sadrži veoma malu koncentraciju primjese (slika 4.7). Pri direktnoj polarizaciji glavni nosioci naelektrisanja prolaze kroz I-oblast, i PIN dioda radi kao i ostale diode. Otpornost I-oblasti mijenja se u zavisnosti od jačine jednosmjerne struje koja teče kroz diodu. Ona se smanjuje s porastom jačine struje, i obrnuto. Zbog toga se PIN diode koriste kao promjenljivi



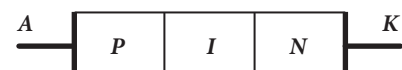
Slika 4.5. Šotkijeve diode: a) simbol i b) struktura



Slika 4.6. Izgled različitih tipova Šotkijeve diode



Valter Šotki (1886–1976), njemački fizičar. Bavio se proučavanjem emisije elektrona i jona. Pronašao je vakuumsku cijev sa rešetkom – triodu. Dao je značajan doprinos razvoju i primjeni poluprovodničkih uređaja.



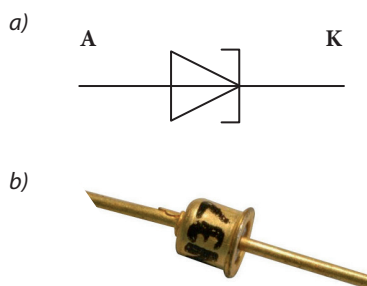
Slika 4.7. Struktura PIN diode

otpornici. PIN diode mogu se koristiti u kolima s visokim naponom, kao brzopromjenljivi prekidač, fotodetektor i dr.

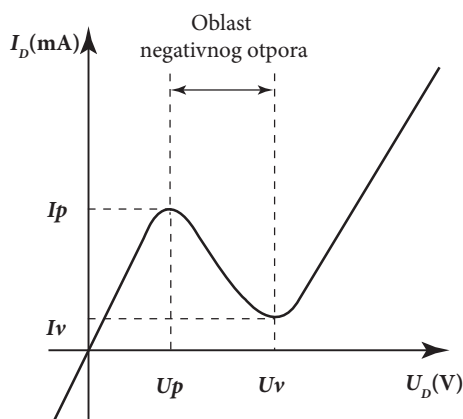
Potrebno je znatno više vremena da bi slobodni nosioci kroz I-oblast stigli do svoje oblasti, pa je vrijeme uključivanja i isključivanja PIN diode relativno veliko.



Kontrolno pitanje 4.2 Objasni uzroke znatno kraćeg vremena uključivanja i isključivanja Šotkijeve u odnosu na PIN diodu.



Slika 4.8. Tunnel dioda:
a) simbol i b) fizički izgled



Slika 4.9. Strujno-naponska karakteristika tunnel diode

4.1.5 Tunel diode

Tunel dioda (slika 4.8) jako je dopirana dioda (i do tri puta jače u odnosu na klasičan PN-spoj), s veoma uzanim spojem između P-oblasti i N-oblasti. Kod ove diode struja se kroz diodu smanjuje pri porastu napona polarizacije, u određenom opsegu tog napona. Tunel dioda radi na principu tunel efekta. Tunel efekt je fenomen provođenja struje kroz poluprovodnički materijal, pri čemu nosioci naelektrisanja pri prelasku iz jedne u drugu oblast na potencijalnoj barijeri prave otvor u vidu tunela.

Strujno-naponska karakteristika tunnel diode data je na slici 4.9.

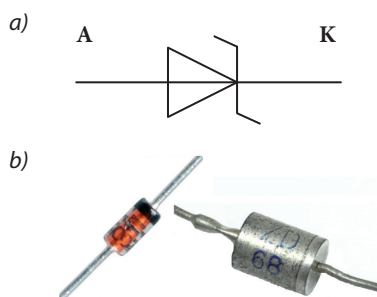
Struja kroz ovu diodu odmah počinje da teče, pa skoro da nema praga provođenja. S porastom napona polarizacije raste i struja kroz diodu. Struja dostiže maksimalnu vrijednost I_p pri naponu polarizacije U_p . Pri daljem povećanju napona polarizacije, struja počinje da se smanjuje sve dok napon ne dostigne vrijednost U_v usljed tzv. tunel efekta. Naponu U_v odgovara minimalna vrijednost struje I_v . Oblast za vrijeme koje se struja kroz diodu smanjuje, na grafiku je označena kao oblast negativnog otpora. Za vrijeme ove oblasti, tunel dioda proizvodi snagu, umjesto da ju troši. Nakon toga struja opet počinje da raste.

Osobine tunnel diode su: *velika brzina rada, mala disipacija snage, dugotrajnost* i dr. Koriste se kao prekidači velike brzine i visokofrekventni oscilatori.

4.1.6 Stabilizatorske (Zenerove) diode

U prethodnim poglavljima vidjeli smo da u određenim slučajevima, pri inverznoj polarizaciji diode, dolazi do lavinskog ili Zenerovog proboja. Diode koje su tehnološki prilagođene da rade u oblasti inverznih probojnih napona nazivaju se **stabilizatorske** ili **Zenerove diode** (slika 4.10).

Pri direktnoj polarizaciji strujno-naponska karakteristika Zenerove diode identična je onoj kod standardne diode (slika 4.11). Kod inverzne polarizacije, za napone veće od Zenerovog probojnog napona U_z , dioda provodi. Daljim i najmanjim povećanjem inverznog napona, struja kroz diodu znatno se povećava. Može se smatrati da je u režimu proboja napon konstantan, približno jednak U_z i da ne zavisi od struje.

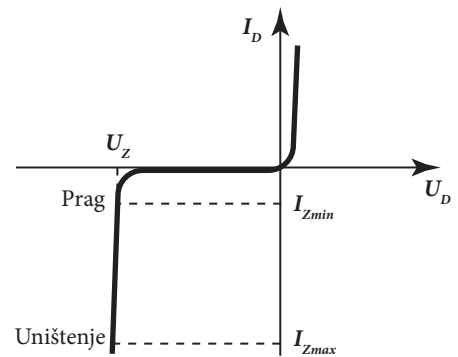


Slika 4.10. Zenerova dioda:
a) simbol i b) fizički izgled

Ova osobina Zenerove diode omogućava njenu primjenu u kolima za stabilizaciju napona. Struja inverzno polarisane Zenerove diode može se povećavati do određene granice I_{Zmax} i njeno dalje povećanje dovelo bi do uništenja diode.

Najvažnije karakteristike Zenerove dioda jesu napon proboja i dozvoljena snaga. Najčešće se koriste Zenerove diode s probojnim naponom između 6 i 15 V, snage do 1 W. Na osnovu ovih parametara može se izračunati i maksimalna struja kroz Zenerovu diodu pri kojoj neće doći do uništenja diode. Za probojne napone niže od 6 V strujno-naponska karakteristika manje je strma (napon nije konstantan) i dioda se ne može koristiti za stabilizaciju napona.

Simbol i fizički izgled za svaku od prethodno navedenih dioda dati su na slici 4.12.



Slika 4.11. Strujno-naponska karakteristika Zenerove diode

SIMBOL	NAZIV	FIZIČKI IZGLED
	Dioda	
	Zener dioda	
	Šotkijeva dioda	
	Tunel dioda	
	LED dioda	
	Fotodioda	
	Laserska dioda	
	Varikap dioda	

Slika 4.12. Simbol i fizički izgled različitih tipova dioda



Stabilizacija napona podrazumijeva održavanje konstantne vrijednosti izlaznog napona, bez obzira na promjenu vrijednosti ulaznog napona ili opterećenja.



Klarens Zener (1905–1993), američki fizičar, bavio se problemima iz oblasti superprovodnosti, metalurgije i elastičnosti. Prvi je opisao manifestacije koje se odnose na proboj električnih izolatora. Ova otkrića kasnije su iskorišćena u razvoju Zenerove diode, koja je po njemu dobila ime.



superprovodnost – pojava da otpornost provodnika nestaje pri ekstremno niskim temperaturama, bliskim apsolutnoj nuli.

4.2

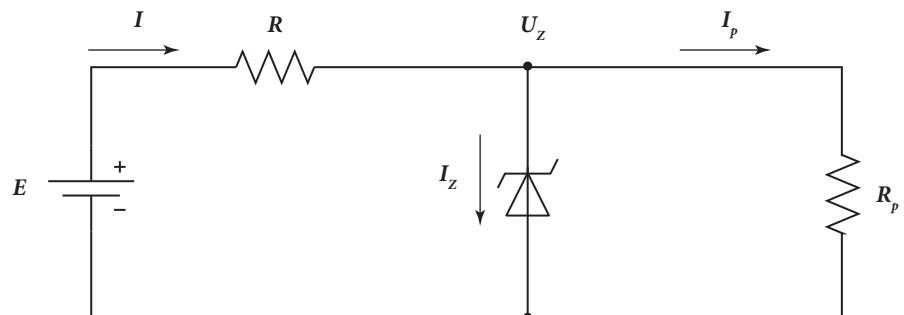
STABILIZATOR NAPONA
SA ZENEROVOM DIODOM

Veliki broj elektronskih uređaja napaja se iz izvora električne struje. Pri priključenju tog uređaja na izvor napajanja, usljed promjene opterećenja izvora, mijenjaju se napon i struja koju daje izvor. Međutim, elektronski uređaji u svom radu zahtijevaju konstantan, tj. stabilan napon napajanja, pa je to potrebno i obezbijediti pomoću odgovarajućih kola.

*Električno kolo koje održava napon napajanja približno konstantnim u okviru određenih granica naziva se **stabilizator napona**.*

Jednostavna stabilizatorska kola koriste stabilizatorske osobine Zenerove diode. Pri inverznoj polarizaciji, u probojnom režimu, napon na Zenerovoj diodi približno je konstantan bez obzira na porast struje, pa se ona može koristiti za stabilizaciju napona.

Na slici 4.13 prikazano je kolo jednostavnog stabilizatora sa Zenerovom diodom. Kolo se sastoji od izvora napajanja, otpornika i Zenerove diode. Pozitivan pol izvora napajanja priključen je preko otpornika R na katodu, dok je negativan pol priključen na anodu, pa je dioda inverzno polarisana. Na stabilizator je priključen potrošač čija je otpornost R_p , i njemu je potrebno obezbijediti stabilan napon napajanja.



Slika 4.13. Kolo stabilizatora sa Zenerovom diodom



Kontrolno pitanje 4.3 Objasni ulogu otpornika R kod stabilizatorskog kola sa slike 4.13.

Pri analizi kola uzima se pretpostavka da je Zenerova dioda idealna, odnosno da ukoliko se obezbijedi da struja koja kroz nju protiče bude u opsegu od I_{Zmin} do I_{Zmax} (slika 4.11), onda je pad napona na njoj U_z uvijek isti. Napon koji daje izvor E je nestabilan i on se mijenja u rasponu od E_{min} do E_{max} . Kada u kolu ne bi postojala

Zenerova dioda, napon na potrošaču bi bio takođe promjenljiv i njegova vrijednost bi zavisila od otpornosti R i R_p . Stabilizator zahvaljujući Zenerovoj diodi teži održati stalni pad napona U_Z na otporniku R_p za sve vrijednosti ulaznog napona, čak i u slučaju promjene otpora potrošača R_p . To je moguće postići ako se struja kroz Zenerovu diodu nalazi unutar dozvoljenih granica I_{Zmin} i I_{Zmax} .

Porastom ulaznog napona raste i struja I . Pad napona na Zenerovoj diodi, time i na potrošaču, se ne mijenja pa se onda ne mijenja ni struja kroz potrošač. Izvodi se zaključak da porast struje I utiče na porast struje kroz diodu (I_Z). Najmanja struja teče kroz diodu kada struja kroz potrošača ima najveću vrijednost, a napon izvora najmanju, tj.

$$I_{Zmin} \leq I_{min} - I_{pmax} = \frac{E_{min} - U_Z}{R} - \frac{U_Z}{R_p}.$$

Sređivanjem prethodnog izraza, pronalazi se minimalna vrijednost otpornosti potrošača pri kojoj Zenerova dioda ima stabilizatorska svojstva:

$$R_p \geq \frac{U_Z R}{E_{min} - U_Z - R I_{Zmin}}.$$

Struja kroz diodu će biti maksimalna kada potrošač nije priključen, pri čemu napon izvora ima najveću vrijednost. Na slici 4.14 je prikazano ekvivalentno kolo za taj slučaj.

Struja u kolu u tom slučaju je data izrazom:

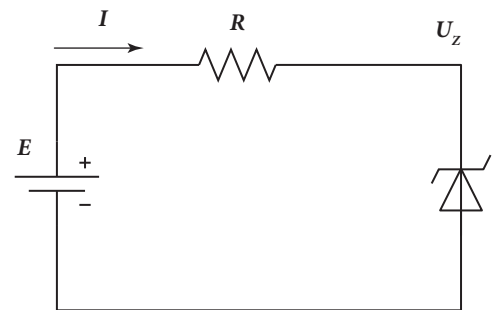
$$I = \frac{E_{max} - U_Z}{R} \leq I_{Zmax},$$

odakle se za minimalnu vrijednost otpornika R dobija:

$$R \geq \frac{E_{max} - U_Z}{I_{Zmax}}.$$

Prema vrijednostima struje i napona u kolu stabilizatora, određuju se i snage na otporniku R i Zenerovoj diodi. Ukoliko se ukloni potrošač, sva struja u kolu protiče kroz diodu, pa se na njoj tada razvija najveća snaga. Snaga na diodi se povećava i u slučaju povećanja napona izvora, jer se tada povećava i struja kroz diodu.

Kod stabilizatorskih dioda, mora se voditi računa da snaga razvijena na diodi, usljed zagrijavanja, ne uništi diodu. U praksi se obično mora obezbijediti dodatno hlađenje diode, što se postiže montažom hladnjaka na diodu.



Slika 4.14. Kolo stabilizatora sa Zenerovom diodom bez priključenog potrošača



Kontrolno pitanje 4.4 Predvidi na koji način će povećanje otpornosti otpornika za ograničavanje struje kroz diodu, uticati na snagu koja se razvija na potrošaču.

4.3

USMJERAČI (ISPRAVLJAČI) S DIODAMA



Neki od primjera upotrebe usmjerača: adapter za mobilni telefon ili laptop, napajanje za računar, napajanje za razne elektronske sisteme (neki tipovi interfona, video-nadzor, alarmi), kod kućnih elektronskih uređaja, u energetici, industriji, telekomunikacijama, željeznici itd.



Slika 4.15. Računarsko napajanje (na izlazu daje više nivoa jednosmjernog napona)

Za napajanje elektronskih uređaja uglavnom se koristi jednosmjerni napon. On se dobija iz baterija za napajanje, akumulatora ili iz električne mreže, pri čemu se u tom slučaju napon mreže koji je naizmjeničan, mora prethodno pretvoriti u jednosmjerni.

Uređaji koji naizmjenični napon pretvaraju u jednosmjerni se nazivaju **usmjerači** ili **ispravljači**.

Diode se, zahvaljujući osobini da provode struju u samo jednom smjeru, koriste u električnim kolima u kojima se naizmjenični napon pretvara u jednosmjerni. Takve diode nazivaju se usmjeračke ili ispravljačke diode, i najčešće se izrađuju od silicijuma.



Napon, struja ili snaga tokom vremena mogu da imaju uvijek istu vrijednost (ne mijenjaju se, konstantne su), ili da u različitim vremenskim trenucima uzimaju različite vrijednosti (promjenljivi su). Takođe, vremenski promjenljiva struja (ili napon) može da bude uvijek istog smjera (polariteta), ili da tokom vremena, osim intenziteta, mijenja i smjer (polaritet).

Veličine koje tokom vremena mijenjaju i svoj intenzitet i smjer (struja), odnosno polaritet (napon), nazivaju se **naizmjeničnim veličinama**.

Pravilo je da se jednosmjerne veličine označavaju velikim, a naizmjenične malim slovima (u , i ili čak $u(t)$, $i(t)$). Opšti izraz kojim se opisuju prostoperiodične naizmjenične veličine predstavljen je relacijom:

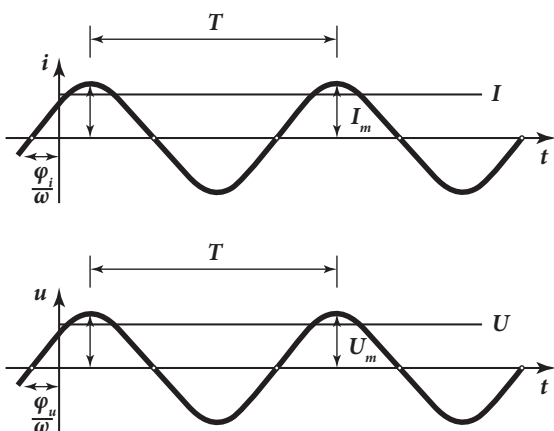
$$x(t) = X_m \sin(\omega t + \varphi)$$

gdje $x(t)$ može biti napon ili struja.

Na slici 4.16 horizontalna (x -osa) predstavlja vremensku osu, dok vertikalna (y -osa) predstavlja naizmjeničnu veličinu, tj. napon ili struju. Kada su vrijednosti signala iznad vremenske ose, struja kroz neki provodnik ili potrošač protiče u jednom smjeru; a kada su vrijednosti signala ispod vremenske ose, struja protiče u suprotnom smjeru. Slično važi i za napon: kada su njegove vrijednosti iznad, on ima jedan polaritet; a kada su mu vrijednosti ispod vremenske ose, on mijenja svoj polaritet (+ i – mijenjaju mjesta).

Promjene neke naizmjenične veličine opisane su njenim parametrima kao što su: perioda, učestanost, kružna učestanost, maksimalna vrijednost (amplituda), ugao, efektivna vrijednost, srednja vrijednost i početna faza. Za razumijevanje gradiva koje slijedi naročito su značajne sljedeće veličine:

- *perioda* (T) – najmanji vremenski interval nakon kojeg naizmjenična veličina uzima iste trenutne vrijednosti



Slika 4.16. Naizmjenična struja i napon u u funkciji vremena

- *kružna učestanost* (ω) – karakteristična veličina periodičnih signala koja je obrnuto proporcionalna periodi,

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

- *maksimalna vrijednost* (I_m, U_m, \dots) – maksimalna vrijednost koju dostiže neka naizmjenična veličina
- *efektivna vrijednost* (I_{ef}, U_{ef}, \dots ili samo I, U, \dots) – stalna vrijednost neke naizmjenične veličine pri kojoj se za vrijeme od jedne periode proizvede ista količina toplote kao i pri posmatranoj naizmjeničnoj veličini,

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

- *srednja vrijednost* (I_{sr}, U_{sr}, \dots) – stalna vrijednost naizmjenične struje pri kojoj za vrijeme od jedne polovine periode kroz provodnik proteče ista količina naelektrisanja kao i pri posmatranoj naizmjeničnoj struji.

$$I_{sr} = \frac{2}{\pi} I_m$$

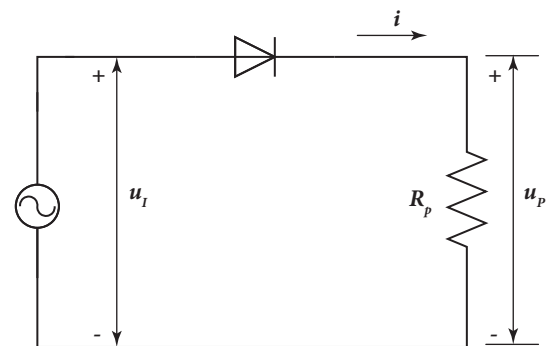
4.3.1 Dioda u kolu s naizmjeničnim naponom

Silicijumska usmjeračka dioda priključena je na red s potrošačem, kao što je to prikazano na slici 4.17. Za vrijeme pozitivne poluperiode ulaznog naizmjeničnog napona, anoda je na većem potencijalu u odnosu na katodu, pa će dioda provoditi struju. U toku negativne poluperiode ulaznog napona, potencijal na anodi manji je od onog na katodi, dioda je inverzno polarisana i kroz nju tada ne protiče struja.

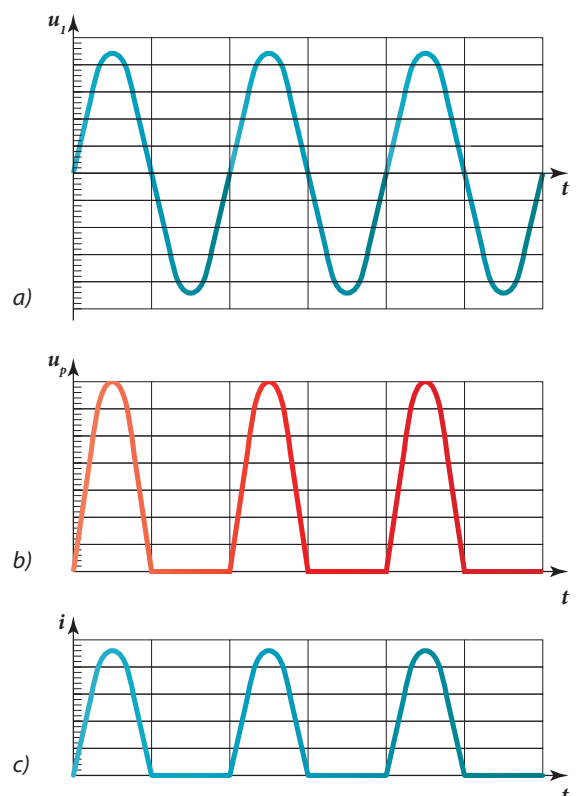


Kontrolno pitanje 4.5 Da li je tvrdjenje da dioda provodi struju za vrijeme pozitivne poluperiode ulaznog napona uvijek tačno?

Na osnovu talasnih oblika za napone i struju u kolu (slika 4.18), uočava se da struja kroz diodu, time i potrošač, protiče za vrijeme pozitivne poluperiode ulaznog napona. Za vrijeme proticanja struje kroz diodu, na potrošaču se javlja pad napona koji je – ukoliko se zanemari pad napona na diodi – približno jednak ulaznom naponu. Za vrijeme negativne poluperiode ulaznog napona dioda je inverzno polarisana, kroz kolo ne protiče struja, pa je i napon na potrošaču jednak nuli.



Slika 4.17. Dioda u kolu s naizmjeničnim naponom



Slika 4.18. Talasni oblici: a) napona na ulazu kola, b) napona na potrošaču i c) struje kroz diodu

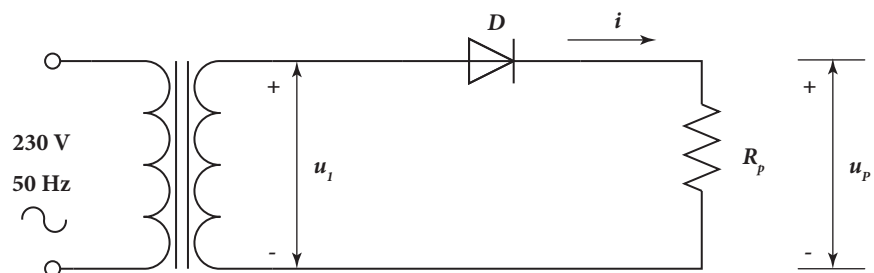
4.3.2 Polutaladni (jednostrani) usmjerač

Već je rečeno da većina elektronskih uređaja koji su u svakodnevnoj upotrebi za svoj rad zahtjeva nepromjenljiv jednosmjerni napon. Međutim, napon mreže suviše je visok da bi se njegovim ispravljanjem napajao uobičajeni elektronski uređaj. Zbog toga je neophodno da se ovaj napon prethodno snizi na odgovarajuću vrijednost pa tek onda ispravlja.

Električni uređaj koji naizmjenični napon jedne vrijednosti pretvara (transformiše) u naizmjenični napon druge vrijednosti naziva se **transformator**.

On se pravi tako što se na magnetno jezgro postavljaju dva namotaja kabela koji se nazivaju *primar* i *sekundar*. Na primar transformatora dovodi se naizmjenični napon, koji je potrebno transformisati, dok se na njegovom sekundaru dobija željeni naizmjenični napon.

Na slici 4.19 prikazana je električna šema najjednostavnijeg usmjerača. Na primar transformatora priključuje se mrežni napon, a na sekundar usmjeračko kolo s jednom diodom i potrošačem.



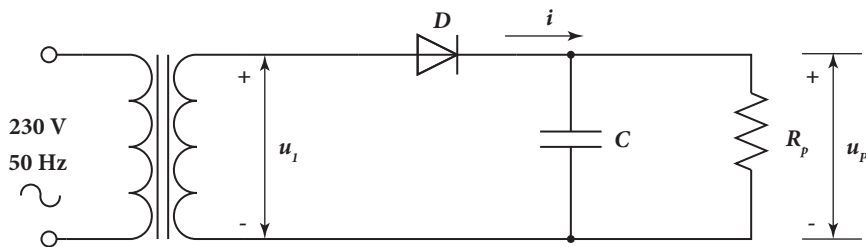
Slika 4.19. Usmjerač s jednom diodom (polutaladni)

Taladni oblici napona i struje identični su onim prikazanim na slici 4.18. Kako napon na potrošaču postoji samo za vrijeme pozitivne poluperiode ulaznog napona, ova vrsta usmjerača naziva se **polutaladnim**.

Napon na potrošaču uvijek je pozitivan, i ne mijenja polaritet, tj. radi se o jednosmjernom naponu. Usljed njegovih stalnih promjena ovaj napon je neupotrebljiv za napajanje elektronskih uređaja jer oni zahtijevaju konstantan jednosmjerni napon. Zbog toga se usmjeračkom kolu dodaju komponente koje će smanjiti varijacije izlaznog napona a istovremeno obezbijediti da on postoji i za vrijeme negativne poluperiode ulaznog napona. Ovo se postiže priključivanjem elektrolitskog kondenzatora velike kapacitivnosti, paralelno s potrošačem, na način prikazan na slici 4.20.

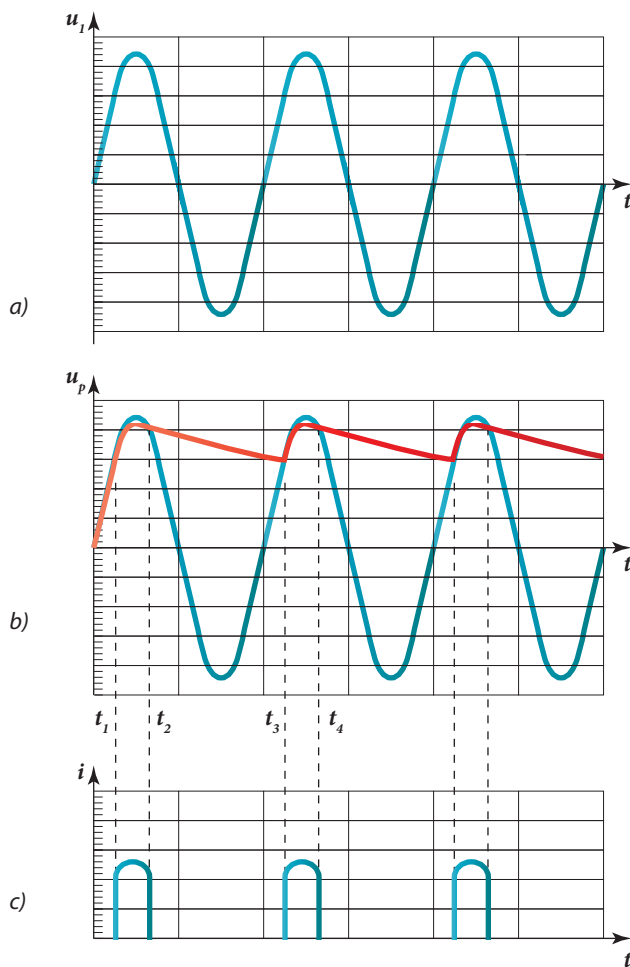


Kontrolno pitanje 4.6 Uporedi u kakvom su međusobnom odnosu napon na potrošaču i napon na kondenzatoru sa slike 4.20.



Slika 4.20. Polutalasni usmjerač s kondenzatorom

Na slici 4.22 prikazani su talasni oblici naizmjeničnog ulaznog napona, struje kroz diodu i napona na potrošaču kod polutalasnog usmjerača s kondenzatorom.



Slika 4.22. Talasni oblici: a) ulaznog napona $u_1(t)$, b) napona na potrošaču $u_p(t)$ i c) struje kroz diodu $i(t)$

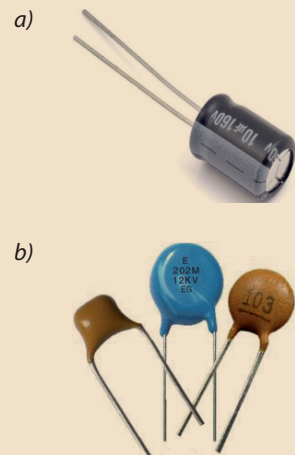
U početnom trenutku kondenzator je prazan i počinje da se puni strujom koja teče kroz direktno polarisanu diodu, pri čemu napon na njemu počinje da raste i prati promjenu ulaznog napona. To traje sve do trenutka t_2 , kada vrijednost ulaznog napona postaje manja od napona na kondenzatoru, tj. potencijal anode niži je od onog na katodi, i dioda prestaje da provodi struju. Sada se kondenzator ponaša kao izvor iz koga se napaja potrošač, usljed čega počinje da se prazni, i taj proces traje do trenutka t_3 .

Sa slike 4.22 može se uočiti da je pražnjenje kondenzatora znatno sporije u odnosu na punjenje, što je posljedica veće otpornosti u kolu pražnjenja u odnosu na otpornost u kolu punjenja. Nakon što se kondenzator isprazni toliko da napon na



elektrolit – vodeni rastvor neke kiseline ili baze.

Elektrolitski kondenzatori (slika 4.21a) jesu kondenzatori velikih kapacitivnosti koji imaju visok radni napon. Metalna folija predstavlja jednu ploču tog kondenzatora, tanki oksid na površini ove folije predstavlja izolator (dielektrik), a metalna posuda s provodnim elektrolitom u koju je potopljena folija predstavlja drugu elektrodu kondenzatora. Korišćenjem tankog oksidnog sloja postiže se velika kapacitivnost elektrolitskog kondenzatora. Elektrolit je tečnost s poluprovodničkim osobinama.



Slika 4.21. Kondenzatori: a) elektrolitski i b) pločasti

njemu bude niži od ulaznog napona, anoda je na većem potencijalu u odnosu na katodu i dioda opet počinje da provodi struju (kondenzator se puni). Ovaj ciklus se neprekidno ponavlja dok god postoji ulazni napon.

Napon na potrošaču je jednosmjernan, s malim promjenama svoje vrijednosti. Kaže se da je napon na izlazu **filtriran**. Ulogu filtra koji je „ispegla“ napon na potrošaču ima elektrolitski kondenzator, kapacitivnosti reda 500 do 1000 μF .

Maksimalan inverzni napon koji se javlja u kolu polutalasnog usmjerača bez filternog kondenzatora jednak je maksimalnoj vrijednosti ulaznog napona U_m . U kolu polutalasnog usmjerača s filternim kondenzatorom, maksimalni inverzni napon jednak je dvostrukoj maksimalnoj vrijednosti ulaznog napona.

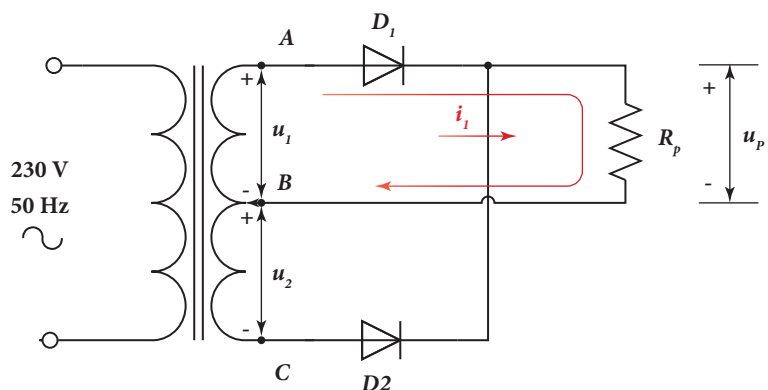
Vremenska konstanta kondenzatora

Proizvod RC , gdje je R otpornost potrošača a C kapacitet kondenzatora, naziva se *vremenska konstanta pražnjenja kondenzatora*. U praksi se uzima da vremenska konstanta bude bar pet puta veća od vremena pražnjenja kondenzatora, odnosno da bude $CR > 5T$. Kako se kondenzator u usmjeračkom kolu napaja s gradske mreže, njegovo vrijeme pražnjenja biće jednako periodi napona gradske mreže (T), koja iznosi $T = 1/f = 1/50 \text{ Hz} = 20 \text{ ms}$.

4.3.3 Punotalasni (dvostrani) usmjerači

Osnovni nedostatak polutalasnog usmjerača u tome je što struja teče samo u jednoj poluperiodi, zbog čega se neravnomjerno opterećuje izvor naizmjenične struje i otežava filtriranje (peglanje) jednosmjernog napona na izlazu kola. Zbog toga se mnogo češće koriste *punotalasni* ili *dvostrani usmjerači*, i oni se u praksi realizuju s dvije ili sa četiri diode.

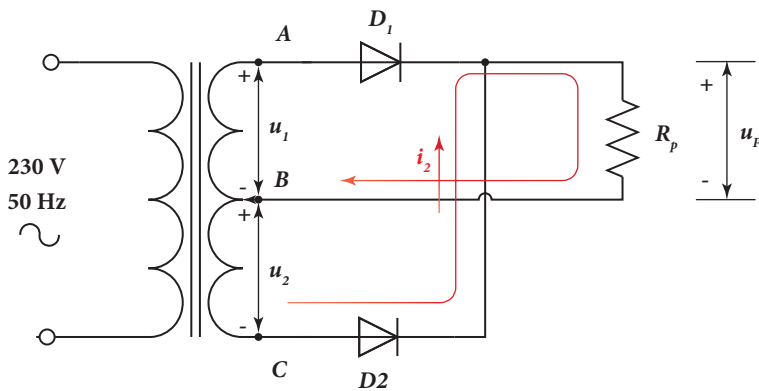
Na slici 4.23 prikazan je **punotalasni usmjerač s dvije diode**. Sekundar transformatora sastoji se od dva namotaja kalema između kojih postoji srednji izvod (priključak), što omogućava formiranje dva nezavisna strujna kola s diodama D_1 i D_2 . Dioda D_1 provodi za vrijeme pozitivne, dok dioda D_2 provodi za vrijeme negativne poluperiode ulaznog napona, čime se obezbjeđuje punotalasno ispravljanje ulaznog napona.



Slika 4.23. Punotalasni usmjerač s dvije diode sa označenim tokom struje za vrijeme pozitivne poluperiode ulaznog napona

Tokom pozitivne poluperiode ulaznog napona mreže, na osnovu polariteta napona $u_1(t)$ i $u_2(t)$ na sekundaru transformatora, sa slike 4.23 uočava se da je dioda D_1 direktno polarisana, dok je dioda D_2 inverzno polarisana. Struja tada teče od tačke A, kroz diodu i potrošač ka srednjem izvodu transformatora označenom kao tačka B. Za to vrijeme dioda D_2 je zakočena, jer je njena anoda na nižem potencijalu u odnosu na katodu.

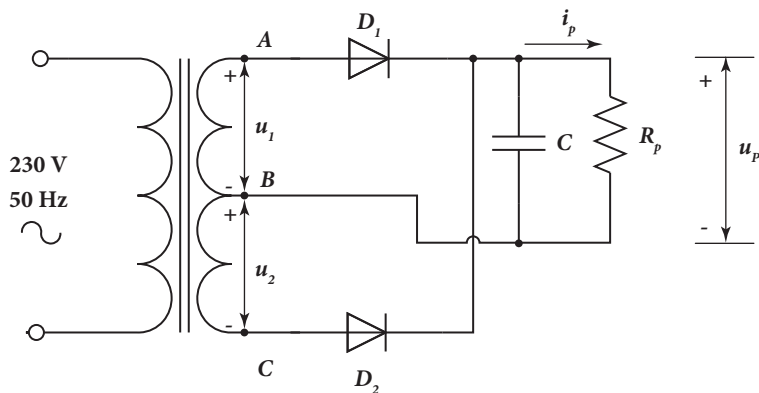
Za vrijeme negativne poluperiode ulaznog napona dioda D_1 je zakočena, dok dioda D_2 provodi struju. Smjer struje kroz potrošač pritom je isti kao u prvom slučaju, s tim što sada ta struja potiče od diode D_2 (slika 4.24). Napon na potrošaču sada je jednosmjernan, ali i dalje promjenljiv (slika 4.25), te ga je potrebno dodatno „ispeglati“ pomoću kondenzatora.



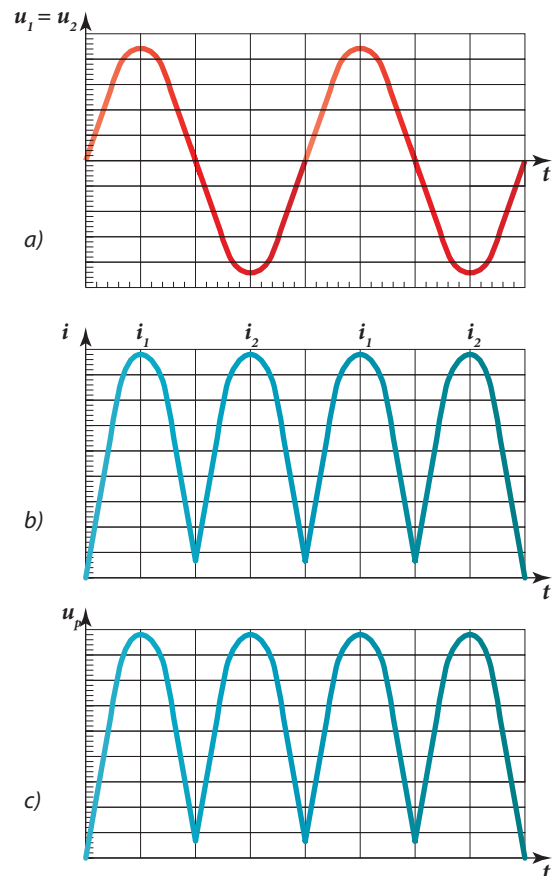
Slika 4.24. Punotalasni usmjerač s dvije diode sa označenim tokom struje za vrijeme negativne poluperiode ulaznog napona

Punotalasni usmjerač s dvije diode i kondenzatorom

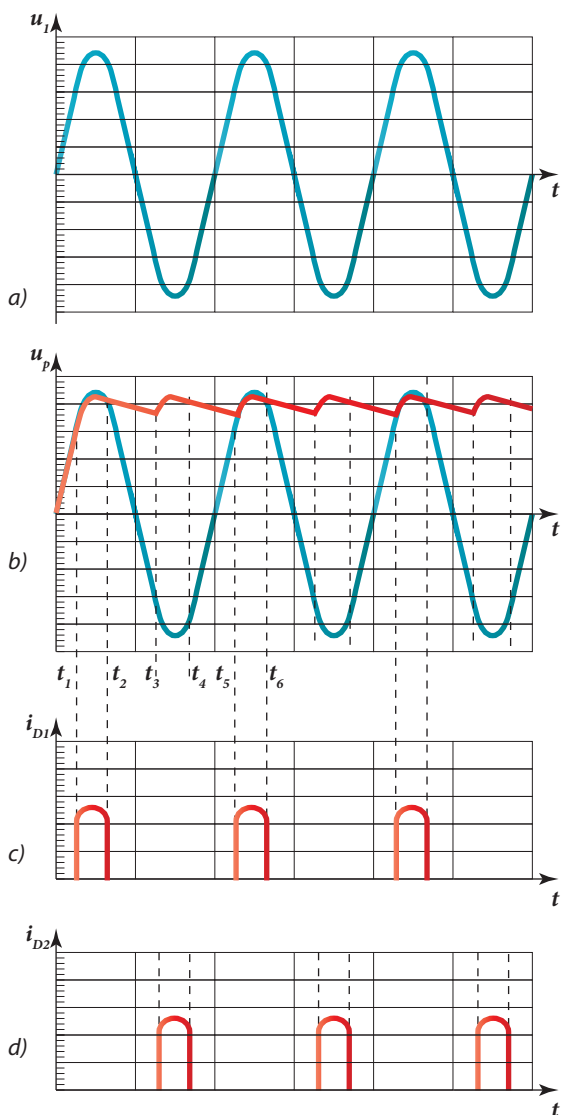
Kako bi se izlazni napon što manje mijenjao i bio približno konstantan, prethodno opisanom punotalasnom usmjeraču s dvije diode potrebno je dodati odgovarajući kondenzator, paralelno s potrošačem (slika 4.26).



Slika 4.26. Punotalasni usmjerač s dvije diode i kondenzatorom



Slika 4.25. Talasni oblici: a) naizmjeničnih napona na sekundaru transformatora, b) struje kroz potrošač $i(t)$ i c) napona na potrošaču $u_p(t)$



Slika 4.27. Talasni oblici: a) ulaznog napona $u_1(t)$, b) filtriranog napona na potrošaču $u_p(t)$, c) struje kroz diodu D_1 , i d) struje kroz diodu D_2

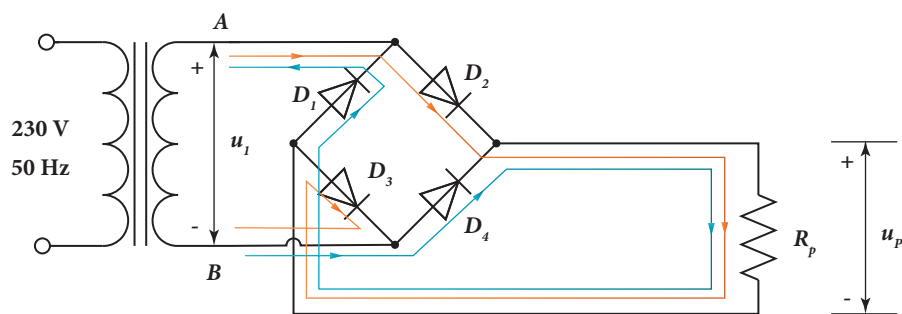
Na slici 4.27 prikazani su talasni oblici ulaznog napona, filtriranog napona na potrošaču, kao i struje kroz diode D_1 i D_2 .

U početnom trenutku kondenzator je prazan, i katode dioda D_1 i D_2 tada se nalaze na nultom potencijalu. Ulazni napon pri tome je pozitivan, pa je dioda D_1 direktno polarisana (provodi struju), a dioda D_2 inverzno polarisana (ne provodi). Kondenzator počinje da se puni strujom koja teče kroz direktno polarisanu diodu D_1 , pri čemu napon na njemu počinje da raste i prati promjenu ulaznog napona. To traje sve do trenutka t_2 , kada vrijednost ulaznog napona postane manja od napona na kondenzatoru. I dioda D_1 sada postaje inverzno polarisana i prestaje da provodi struju. Sada se kondenzator ponaša kao izvor iz koga se napaja potrošač, usljed čega počinje da se prazni, i taj proces traje od trenutka t_2 do trenutka t_3 . Za vrijeme negativne poluperiode ulaznog napona, anoda diode D_2 nalazi se na pozitivnom potencijalu. Uslov da ova dioda počne da provodi struju jeste da se kondenzator isprazni toliko da napon na njemu (istovremeno i potencijal katode diode D_2) bude niži od potencijala anode. To će se dogoditi u trenutku t_3 , kada dioda D_2 postaje direktno polarisana i počinje da provodi struju. Kondenzator tada opet počinje da se puni, i to punjenje traje sve do trenutka t_4 . Potencijal anode diode D_2 nakon tog trenutka postaje niži od potencijala katode (napona na kondenzatoru), što uslovljava da dioda prestaje da provodi struju. Kondenzator se pri tome opet prazni kroz potrošač sve do trenutka t_5 . Ovaj proces dalje se stalno ponavlja. Na ovaj način obezbijeđeno je da se jednosmjerni napon kojim se napaja potrošač manje mijenja u odnosu na onaj koji daje usmjerač s jednom diodom (polutalasni).

Vrijeme pražnjenja kondenzatora koji se koristi kod punotalasnog usmjerača s dvije diode dvaput je manje u odnosu na kondenzator kod polutalasnog usmjerača. Zbog toga i kapacitivnost kondenzatora kod ovog usmjerača može biti dva puta manja u odnosu na polutalasni usmjerač.

4.3.4 Punotalasni usmjerač sa četiri diode (Grecov usmjerač)

Glavni nedostatak punotalasnog usmjerača s dvije diode u tome je što mu je neophodan dvostruki namotaj na sekundaru transformatora. Zbog toga se u praksi češće koriste usmjerači s transformatorom s jednim sekundarnim namotajem i četiri diode (slika 4.28).

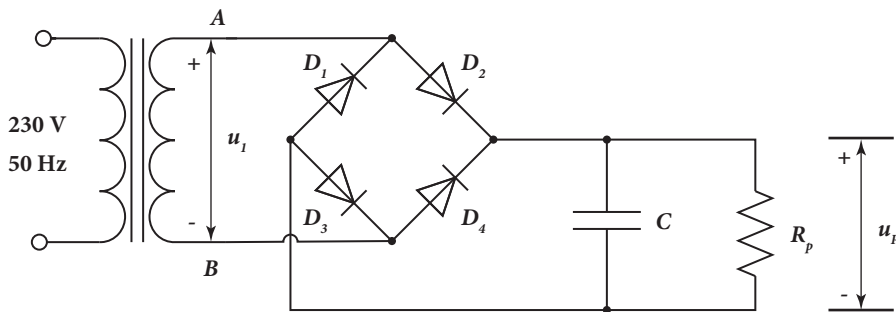


Slika 4.28. Punotalasni usmjerač sa četiri diode (Grecovim spojem)

Kada je napon na sekundaru transformatora pozitivan, diode D_2 i D_3 su direktno a D_1 i D_4 inverzno polarisane. Struja tada teče od tačke A kroz diodu D_2 , zatim kroz potrošač te diodu D_3 i nazad do tačke B na sekundaru transformatora. Tok ove struje na slici je označen crvenom bojom. Kada je napon na sekundaru negativan, struja teče od tačke B kroz diodu D_4 , potrošač, diodu D_1 i nazad do tačke A na sekundaru transformatora (zeleno boja). U oba slučaja smjer struje kroz potrošač je isti, pa je i pad napona koji ta struja na njemu stvara takođe jednosmjernan.

Talasnici oblici karakterističnih napona i struje isti su kao kod punotalasnog usmjerača s dvije diode (slika 4.25).

Ovom kolu se iz istih razloga kao kod ostalih tipova usmjerača dodaje kondenzator (slika 4.29).



Slika 4.29. Punotalasni usmjerač sa četiri diode i kondenzatorom

Intervali punjenja i pražnjenja kondenzatora u ovom se slučaju poklapaju s onim kod punotalasnog usmjerača s dvije diode i kondenzatorom, pa su i talasni oblici karakterističnih veličina isti kao na slici 4.27.

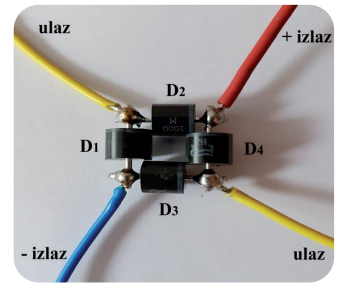
Opisano diodno kolo sa četiri diode naziva se **Grecov spoj** (slika 4.30). Nedostatak Grecovog usmjerača jeste u upotrebi četiri diode, manje zbog utroška materijala a više zbog dvostruko većeg pada napona na diodama i dvostruko veće disipacije snage.

4.3.5 Stabilizacija jednosmjernog napona

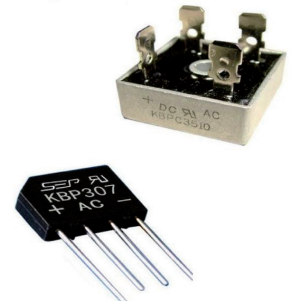
Usljed promjene mrežnog napona ili opterećenja, jednosmjerni napon sa izlaza usmjerača može znatno da mijenja svoju vrijednost. Zbog toga je, radi ispravnog rada uređaja koji zahtijevaju nepromjenljiv (konstantan) jednosmjerni napon, na izlaz usmjerača potrebno dodati stabilizatorsko kolo. Jednosmjerni napon na izlazu iz filtra treba učiniti i dovoljno stabilnim kako na njega ne bi uticale promjene mrežnog napona. Zbog toga se na izlazu filtra postavlja kolo stabilizatora.

Dakle, možemo zaključiti da se **izvor jednosmjernog napona** sastoji od sljedećih blokova:

- transformator
- usmjeračko kolo
- filter (kondenzator)
- stabilizator.



a)



b)

Slika 4.30. Grecov spoj realizovan: a) pomoću diskretnih komponenti – diode i b) kao posebna komponenta

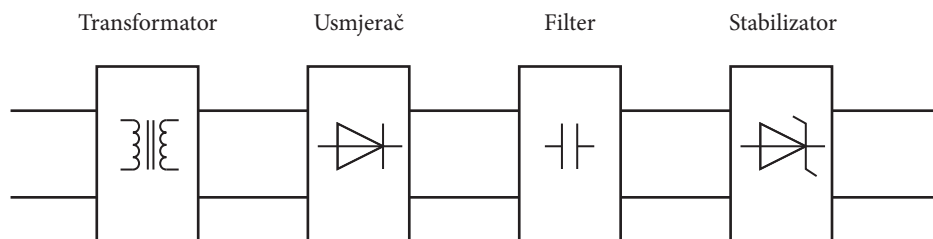


Leo Greig (1856–1941), njemački fizičar. Bavio se izučavanjem elektromagnetske energije i termodinamike. Po njemu se naziva diodni ispravljački most (Grecov spoj) koji je otkrio i objavio 1897. godine.



Uloga svakog od ovih dijelova ranije je objašnjena.

Na slici 4.31 prikazana je blok-šema izvora jednosmjernog napona.

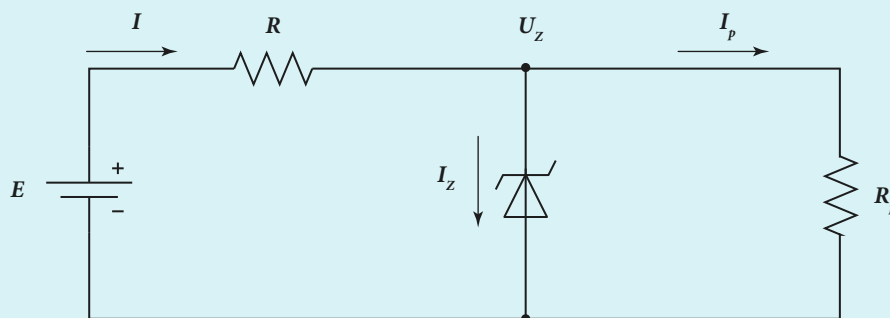


Slika 4.31. Blok-šema izvora jednosmjernog napona



RAČUNSKÉ VJEŽBE

Primjer 4.1 Za kolo naponskog stabilizatora sa slike 4.32 odredi minimalne vrijednosti otpornika R i otpora potrošača R_p pri kojima će kolo obavljati stabilizatorsku funkciju. Napon izvora napajanja iznosi $20\text{ V} \pm 10\%$, dok upotrijebljena dioda ima sljedeće parametre: $U_Z = 10\text{ V}$, $I_{Zmax} = 20\text{ mA}$ i $I_{Zmin} = 1\text{ mA}$.



Slika 4.32. Kolo stabilizatora sa Zenerovom diodom

Rješenje:

Minimalna vrijednost otpornika R se dobija iz izraza:

$$R \geq \frac{E_{max} - U_Z}{I_{Zmax}}$$

pa se zamjenom vrijednosti dobija:

$$R \geq \frac{22\text{ V} - 10\text{ V}}{20 \cdot 10^{-3}\text{ A}} = 600\ \Omega.$$

Vrijednost otpora potrošača R_p dobija se iz izraza pa je:

$$R_{pmin} = \frac{10\text{ V} \cdot 600\ \Omega}{18\text{ V} - 10\text{ V} - 600\ \Omega \cdot 10^{-3}\text{ A}} = 811\ \Omega.$$

Primjer 4.2 Za kolo naponskog stabilizatora sa slike 4.32 koje se napaja iz izvora čiji je napon 15 V , struje kroz diodu i potrošača iznose 5 mA i 10 mA respektivno, dok je vrijednost stabilisanog napona 7 V . Odredi snagu koja se razvija na diodi i otporniku za ograničavanje napona na diodi. Izračunaj snagu na diodi za slučaj kada se potrošač ukloni.

Rješenje:

Snaga diode je $P_z = U_z I_z = 5 \text{ mA} \cdot 7 \text{ V} = 35 \text{ mW}$,

struja kroz otpornik R je $I_R = I_z + I_p = 15 \text{ mA}$

dok pad napona na njemu iznosi $U_R = E - U_z = 15 \text{ V} - 7 \text{ V} = 8 \text{ V}$,

pa se za snagu na njemu dobija:

$$P_R = 15 \text{ mA} \cdot 8 \text{ V} = 120 \text{ mW}.$$

Ukoliko se potrošač ukloni, sva struja teče kroz diodu, pa je snaga na njoj

$$P'_z = 15 \text{ mA} \cdot 8 \text{ V} = 120 \text{ mW}.$$

Primjer 4.3 Zenerova dioda u stabilizatoru napona sa slike 4.32 ima napon proboja 6 V uz minimalnu struju 4 mA , dok joj je najveća dozvoljena snaga 200 mW . Odredi najveću vrijednost otpora R pri kojoj sklop djeluje kao stabilizator. Izračunaj koliko iznosi najveći ulazni napon kojeg sklop još uvijek može stabilizovati za tu vrijednost otpora R . Poznato je još: $R_p = 500 \Omega$ i $E = 10 \text{ V}$.

Rješenje:

Struja koja protiče kroz potrošač se dobija iz izraza:

$$I_p = \frac{U_z}{R_p} = 12 \text{ mA}.$$

Što je otpor R veći, struja kroz njega I_R je manja, pa će prema tome i struja kroz diodu imati minimalnu vrijednost. Kombinacijom izraza:

$$I_{Rmin} = I_{Zmin} + I_p \text{ i } R_{max} = \frac{E - U_z}{I_{Rmin}},$$

dobija se $R_{max} = 250 \Omega$.

Što se drugog dijela zadatka tiče, maksimalna struja kroz Zenerovu diodu se pronalazi iz izraza:

$$I_{Zmax} = \frac{P_{Zmax}}{U_z} = \frac{200 \text{ mW}}{6 \text{ V}} = 33,33 \text{ mA}.$$

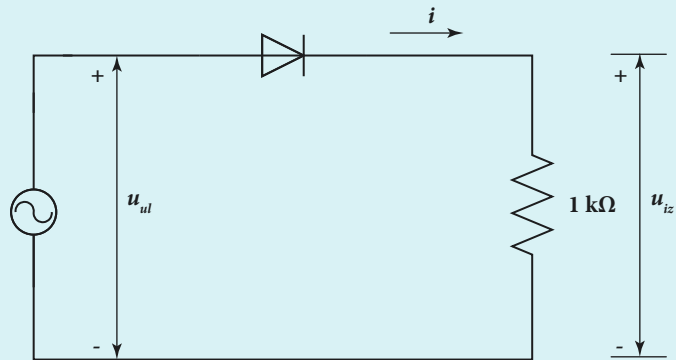
Maksimalnom ulaznom naponu odgovara i maksimalna struja I_R , kao i maksimalna struja kroz Zenerovu diodu I_{Zmax} . Iz izraza:

$$R_{max} = \frac{E - U_z}{I_{Rmax}}$$

dobija se:

$$E = R(I_{Zmax} + I_p) + U_z = 17,33 \text{ V}.$$

Primjer 4.4 Kolo sa silicijumskom diodom sa slike 4.33 napaja se naponom u_{ul} čija je maksimalna vrijednost $U_{um} = 5$ V. Izračunaj maksimalnu vrijednost izlaznog napona U_{im} pri čemu je dioda realna.



Slika 4.33

Rješenje:

Kako je dioda realna, na njoj postoji pad napona od 0,7 V, karakterističan za silicijumsku diodu. Stoga se maksimalna vrijednost izlaznog napona dobija kao:

$$U_{im} = U_{um} - U_D = 5 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 4,3 \text{ V}.$$

Primjer 4.5 Za kolo sa slike 4.33 izračunaj srednje vrijednosti napona, struje i snage na potrošaču ako je efektivna vrijednost naizmjeničnog napona na ulazu kola 22 V. Diodu u ovom primjeru smatrati idealnom.

Rješenje:

Kako se radi o idealnoj diodi, maksimalna vrijednost izlaznog napona je ista kao i maksimalna vrijednost ulaznog napona. Imajući to u vidu, lako se dolazi do srednje vrijednosti napona na izlazu:

$$U_{isr} = \frac{U_{im}}{\pi} = \frac{\sqrt{2}U_{ief}}{\pi} = 9,9 \text{ V}.$$

Na osnovu toga lako se dolazi i do vrijednosti za srednju vrijednost struje:

$$I_{sr} = \frac{U_{isr}}{R_p} = \frac{9,9 \text{ V}}{1 \cdot 10^3 \Omega} = 9,9 \text{ mA},$$

odnosno snage:

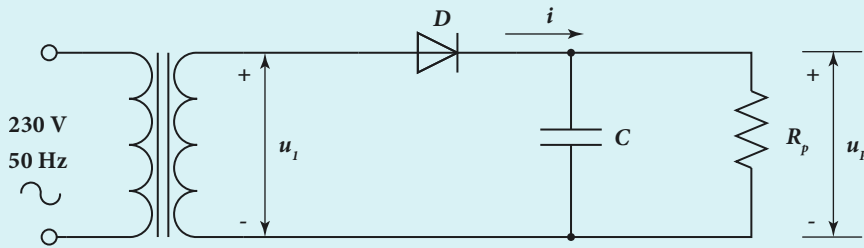
$$P_{sr} = U_{isr} I_{sr} = 98 \text{ mW}.$$

Primjer 4.6 U kolu polutalasnog usmjeraja bez filtarskog kondenzatora i sa filtarskim kondenzatorom, odredi maksimalni inverzni napon na diodi.

Rješenje: a) U kolu polutalasnog ispravljača bez filtarskog kondenzatora maksimalni inverzni napon koji može da se javi na diodi odgovara najvećoj negativnoj vrijednosti ulaznog napona, tj. $U_{KAmax} = U_m$.

b) Najniža moguća vrijednost potencijala anode iznosi $V_A = -U_m$. Potencijal katode odgovara padu napona na kondenzatoru koji je u tom trenutku nešto manji od U_m , pa ćemo smatrati da je $V_K \approx U_m$. Na osnovu toga lako se izračunava da je $U_{AK} = -2U_m$.

Primjer 4.7 Potrošač se napaja pomoću kola prikazanog na slici 4.34. Ako potrošač zahtijeva jednosmjerni napon 10 V pri struji od 100 mA, odredi kapacitet filtarskog kondenzatora.



Slika 4.34

Rješenje: Otpornost potrošača je:

$$R_p = \frac{U}{I} = \frac{10 \text{ V}}{0,1 \text{ A}} = 100 \Omega.$$

S obzirom na to da se za vremensku konstantu uzima da je $CR > 5T$, onda se lako dolazi do tražene kapacitivnosti kondenzatora:

$$C > 5 \cdot 20 \cdot \frac{10^{-3} \text{ s}}{100 \Omega} = 1 \text{ mF}.$$

Primjer 4.8 Za kolo punotalasnog usmjerača s dvije diode (slika 4.35) izračunaj srednju vrijednost napona, struje i snage na potrošaču otpornosti 100Ω , ako je efektivna vrijednost naizmjeničnog napona na ulazu kola 12 V.

Rješenje: Prema izrazu za srednju vrijednost napona i zamjenom poznatih veličina, dobija se:

$$U_{psr} = \frac{2U_m}{\pi} = 10,8 \text{ V}.$$

Odatle se lako dolazi do izraza za srednje vrijednosti struje:

$$I_{sr} = \frac{U_{psr}}{R_p} = \frac{10,8 \text{ V}}{1 \cdot 10^2 \Omega} = 0,108 \text{ A},$$

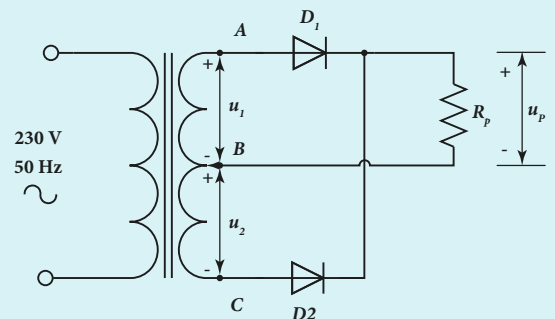
odnosno snage:

$$P_{sr} = U_{sr} \cdot I_{sr} = 1,17 \text{ W}.$$

Primjer 4.9 Odredi kapacitivnost filtarskog kondenzatora usmjerača s dvije diode ako je otpornost potrošača 80Ω , $T = 20 \text{ ms}$ i ako je $RC > 2,5T$.

Rješenje:

$$RC > 2,5T \Rightarrow C > \frac{2,5 \cdot 20 \cdot 10^{-3} \text{ s}}{80 \Omega} = 625 \mu\text{F}.$$



Slika 4.35



REZIME

- U elektronskim kolima se, na osnovu njihovih karakteristika, koriste različite vrste dioda. Neke od njih koriste se za emitovanje i detektovanje svjetlosti (LED i fotodiode), neke za uspostavljanje i prekidanje struje u kolu (prekidačke – Šotkijeve), za stabilizaciju napona (Zenerove), pretvaranje naizmjeničnog napona u jednosmjerni (usmjeračke) itd.
- Električno kolo koje održava napon napajanja u okviru određenih granica naziva se stabilizator napona. Jednostavna stabilizatorska kola koriste stabilizatorske osobine Zenerove diode, koja pri inverznoj polarizaciji u režimu proboja održava približno konstantan napon.
- Uređaji u kojima se naizmjenični napon pretvara u jednosmjerni nazivaju se usmjerači. Za usmjeravanje napona obično se koriste silicijumske usmjeračke diode. Pretvaranje naizmjeničnog napona u jednosmjerni u toku jedne poluperiode, naziva se polutalarno usmjeravanje, a u toku obje poluperiode – punotalarno usmjeravanje. Grecov usmjerač predstavlja najkompletniji, ujedno i najčešće korišćeni tip usmjerača.



1. Objasni razliku između LED i fotodiode.
2. Definiši varikap diodu.
3. Navedi osobine prekidačkih dioda.
4. Opiši način formiranja Šotkijeve diode.
5. Objasni uzrok nižeg praga provođenja kod Šotkijeve diode u odnosu na klasičnu.
6. Navedi karakteristike Šotkijeve diode i njenu primjenu.
7. Objasni na koji se način vrši ograničenje struje kroz Zenerovu diodu.
8. Navedi specifičnost tunel diode u odnosu na ostale diode.
9. Grupiši sve pomenute diode na one koje svoju primarnu namjenu ostvaruju pri direktnim i one koje to čine pri inverznim naponima polarizacije.
10. Navedi ulogu stabilizatora napona.
11. Definiši uslove pri kojima Zenerova dioda radi kao stabilizator napona.
12. Objasni na koji će se način promijeniti jednosmjerni napon kod polutalarnog usmjerača ako se otpornost potrošača smanji.
13. Predvidi šta će se desiti u kolu punotalarnog usmjerača: a) sa dvije i b) sa četiri diode ako jedna od dioda pregori.
14. Za kolo naponskog stabilizatora sa slike 4.13 uz Zenerov napon $U_z = 6\text{ V}$ i napon izvora $13\text{ V} \pm 10\%$, izračunaj vrijednost otpornika R i najmanju dozvo-

ljenu vrijednost otpora potrošača R_p . Najveće i najmanje vrijednosti struje kroz diodu su: $I_{Zmax} = 8 \text{ mA}$ i $I_{Zmin} = 3 \text{ mA}$.

Rezultat: $R = 1,037 \text{ k}\Omega$, $R_p = 2,4 \text{ k}\Omega$.

15. Napon proboja Zenerove diode iznosi 18 V uz minimalnu struju 20 mA. Ako je najveća dozvoljena struja kroz Zenerovu diodu 300 mA, odredi za koje će vrijednosti otpora R sklop djelovati stabilizirajuće, ako se ulazni napon mijenja između 21 i 24 V. Otpor potrošača iznosi 180 Ω .

Rezultat: $20 \Omega \leq R \leq 25 \Omega$.

16. Matematičkim proračunom odredi šta će se dogoditi ako kratko spojimo potrošač u kolu naponskog stabilizatora. Napon proboja Zenerove diode iznosi 5,1 V, najveća dopuštena snaga Zenerove diode 250 mW, najveća dopuštena snaga na otporniku R iznosi 500 mW, a ulazni napon 12 V. Poznato je $R = 100 \Omega$.

Rezultat: Zenerova dioda će pregorjeti jer je $P_Z = 351,9 \text{ mW} > P_{Zmax} = 250 \text{ mW}$.

17. Odredi najmanji kapacitet filtarskog kondenzatora usmjerača s dvije diode ako je otpornost potrošača 1000 Ω , $T = 20 \text{ ms}$, i ako je $RC > 2,5 T$.

Rezultat: $C > 50 \mu\text{F}$.

18. Za kolo usmjerača s dvije diode bez filtarskog kondenzatora, izračunaj srednju vrijednost napona, struje i snage na potrošaču otpornosti 100 Ω , ako je efektivna vrijednost naizmjeničnog napona na sekundaru transformatora 24 V.

Rezultat: $U_{sr} = 21,6 \text{ V}$, $I_{sr} = 0,22 \text{ A}$, $P_{sr} = 4,75 \text{ W}$.

19. Za kolo usmjerača s Grecovim spojem bez filtarskog kondenzatora, izračunaj srednje vrijednosti napona, struje i snage na potrošaču otpornosti 100 Ω , ako je efektivna vrijednost naizmjeničnog napona na sekundaru transformatora 12 V.

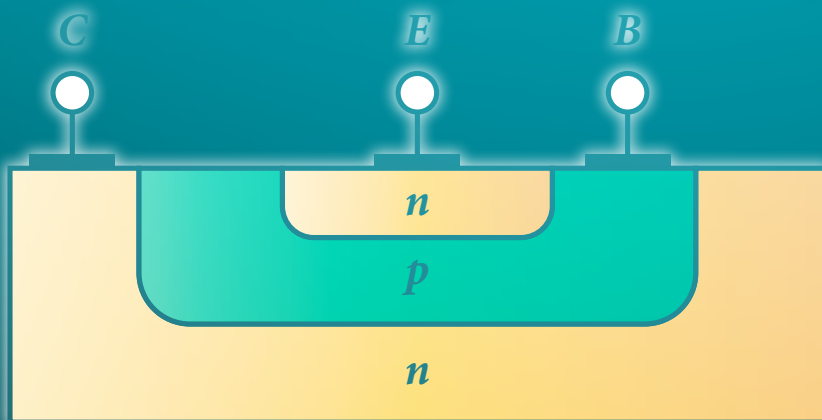
Rezultat: $U_{sr} = 10,8 \text{ V}$, $I_{sr} = 0,108 \text{ A}$, $P_{sr} = U_{sr} \cdot I_{sr} = 1,17 \text{ W}$.

5

Bipolarni tranzistori

U elektronici se često postavlja zahtjev za pojačavanjem slabih električnih signala. Elektronske komponente koje na potrošač prenose električni signal veće snage od one koju ima električni signal na njihovom ulazu, nazivaju se aktivne komponente. Tranzistori pripadaju klasi aktivnih elektronskih komponenti. Na račun snage koju za njihovo napajanje ulaže jednosmjerna baterija, oni mogu da istovremeno pojačavaju i struju i napon signala koji se dovede na njihov ulaz. Osim kao pojačavači, tranzistori se koriste i kao prekidači pošto se mogu brzo prevesti u dva različita stanja: jedno u kome predstavljaju kratak spoj, i drugo u kome se ponašaju kao prekid kola. Zbog ovih osobina tranzistori imaju izuzetno važnu ulogu u elektronici. Bez njih je nezamisliv rad elektronskih uređaja. Tranzistor se smatra jednim od najvećih izuma u XX vijeku.

U ovom poglavlju analizirani su struktura, režimi rada i statičke karakteristike različitih vrsta bipolarnih tranzistora. Prateći dio ovog poglavlja jesu praktične vježbe 15–17 koje se nalaze na kraju udžbenika, u okviru glave VIII. Njihovom realizacijom učenici će se osposobiti za utvrđivanje rada bipolarnih tranzistora snimanjem statičkih karakteristika.



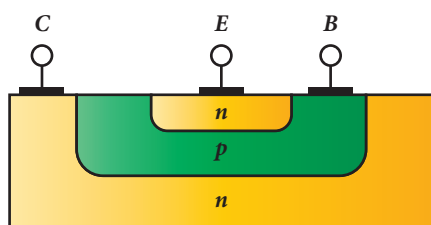
5.1

PRINCIP RADA BIPOLARNIH TRANZISTORA

Poluprovodničke komponente s tri metalna kontakta (elektrode) nazivaju se **tranzistori**. Postoje dvije vrste tranzistora: unipolarni i bipolarni. Kod **unipolarnih tranzistora** u provođenju struje učestvuje samo jedna vrsta slobodnih nosilaca naelektrisanja (ili elektroni ili šupljine), pa otuda i njihov naziv. Tranzistori kod kojih u provođenju struje učestvuju istovremeno obje vrste slobodnih nosilaca naelektrisanja nazivaju se **bipolarni tranzistori**.

Bipolarni tranzistor (*Bipolar Junction Transistor – BJT*) poluprovodnička je komponenta s dva PN-spoja i tri metalne elektrode pomoću kojih se tranzistor priključuje u električno kolo. Te elektrode predstavljaju kontakte za tri oblasti: *emiter (E)*, *bazu (B)* i *kolektor (C)*. U zavisnosti od toga na koji su način te oblasti dopirane, tj. da li pripadaju N-tipu ili P-tipu poluprovodnika, razlikujemo dvije vrste bipolarnih tranzistora: NPN i PNP. Njihovi električni simboli i strukture prikazani su na slici 5.1.

Na osnovu strukture bipolarnog tranzistora lako se može uočiti da se sastoji iz dva PN-spoja: jednog između baze i emitera (BE), i drugog između baze i kolektora (BC). Poprečni presjek NPN bipolarnog tranzistora u planarnoj tehnici koja se primjenjuje u proizvodnji integriranih kola dat je na slici 5.2.



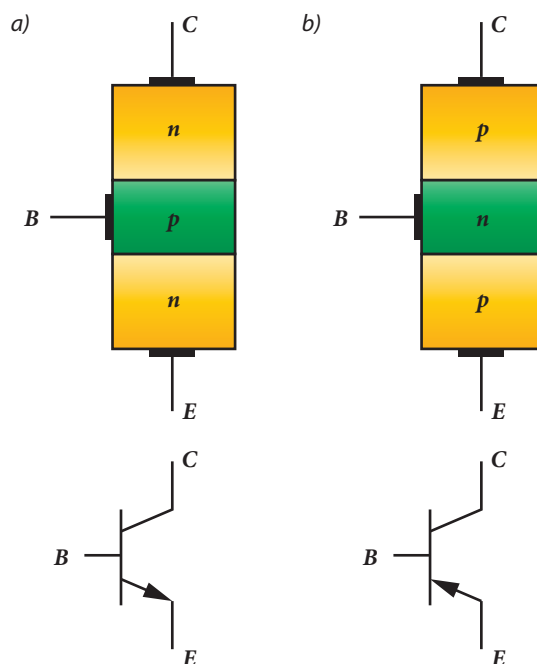
Slika 5.2. Poprečni presjek NPN tranzistora

Prisjetimo se da je za usmjereno kretanje slobodnih naelektrisanja (proticanje struje) kroz PN-spoj bilo potrebno izvršiti njegovu polarizaciju, tj. na njegove elektrode priključiti izvor jednosmjernog napona. Kako, za razliku od diode, kod bipolarnih tranzistora imamo tri metalne elektrode i dva PN-spoja, za njegovu polarizaciju potrebno je koristiti dva izvora jednosmjernog napona, tj. potrebno je izvršiti polarizaciju oba PN-spoja.

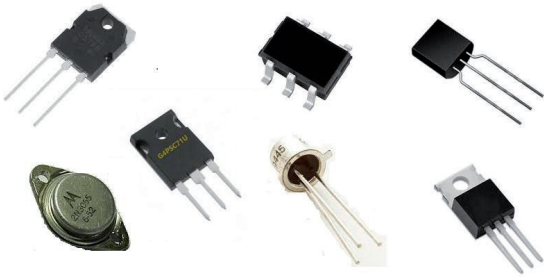
Pri adekvatnoj polarizaciji, emiter počinje da generiše (stvara, emituje) slobodne nosioce naelektrisanja, koji se preko bazne oblasti prebacuju u kolektorsku, gdje bivaju sakupljeni (kolektovani) od stra-



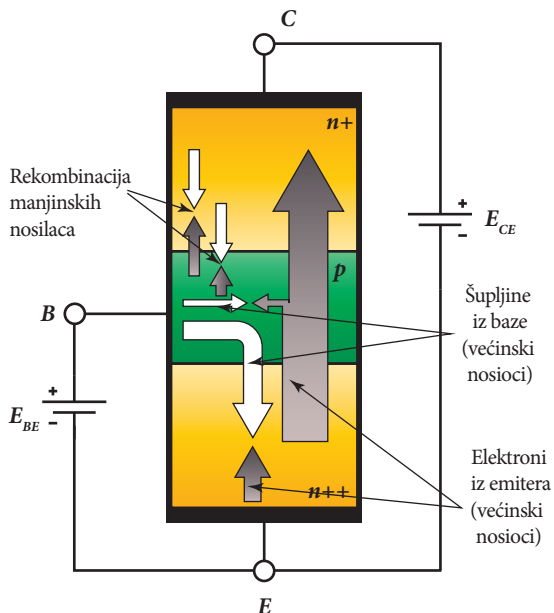
Naziv tranzistor je složenica nastala od engleskog izraza *TRANSfer reSISTOR*, što znači prenosni otpornik. Tranzistor su otkrili Vilijam Šokli, Džon Bardin i Valter Bretejn 1947. godine u Belovim laboratorijama. Za svoj izum i otkriće tranzistorskog efekta dobili su Nobelovu nagradu. Prije pronalaska bipolarnog tranzistora koristile su se elektronske cijevi, koje su imale krupne nedostatke: visoku cijenu, veliku potrošnju energije i velike dimenzije.



Slika 5.1. Struktura i električni simbol: a) NPN bipolarnog tranzistora i b) PNP bipolarnog tranzistora



Slika 5.3. Izgled kućišta različitih vrsta bipolarnih tranzistora



Slika 5.4. Polarizacija NPN tranzistora

ne kolektora. Na taj način obezbijeđeno je stalno proticanje struje, pri čemu se intenzitet te struje kontroliše preko baze. Ta struja protiče od kolektora ka emiteru, jer je konvencijom usvojeno da je smjer struje suprotan od smjera kretanja slobodnih naelektrisanja.

5.1.1 NPN tranzistori

Kod NPN bipolarnog tranzistora emitera i kolektorska oblast izrađuju se kao poluprovodnik N-tipa, s tim što je emitera oblast jače dopirana (na slici 5.4 označeno kao n^{++}), tj. ima veću koncentraciju primjesa, time i slobodnih nosilaca naelektrisanja. Oblast baze izrađuje se kao poluprovodnik P-tipa, znatno je uža nego oblast emitera i kolektora, i ima najmanju koncentraciju primjesa. Da bi se obezbijedio stalni protok struje kroz NPN tranzistor, spoj između baze i emitera direktno se polariše pomoću izvora E_{BE} , dok se spoj između baze i kolektora inverzno polariše pomoću izvora E_{CE} (slika 5.4).

U emitera oblasti glavni nosioci naelektrisanja su elektroni a sporedni šupljine, dok su u oblasti baze glavni nosioci šupljine a sporedni elektroni. Kad se PN-spoj BE propusno polariše izvorom E_{BE} , elektroni iz emitera kreću se ka bazi, dok se šupljine iz baze kreću ka emiteru. Dakle, imamo proticanje dvije struje: prvu čine šupljine koje iz baze prelaze u emiter, a drugu elektroni koji iz emitera prelaze u bazu. Šupljine koje iz baze dopijevaju u emiter tamo se rekombinuju s elektronima. S obzirom na to da je oblast baze slabo dopirana i da u njoj postoji mali broj slobodnih šupljina, struja koja nastaje na taj način veoma je mala.

Mnogo značajnija jeste struja koju čine elektroni koji iz emitera prelaze u oblast baze. Ova struja mnogo je veća jer je emitera oblast snažno dopirana, pa u njoj postoji velik broj slobodnih elektrona. Manji broj elektrona, koji iz emitera dopijevaju u bazu, rekombinuje se sa šupljinama, jer je tih šupljina veoma malo, pa će najveći dio nastaviti kretanje ka spoju između baze i kolektora (BC), u namjeri da se ravnomjerno rasporede u čitavoj oblasti baze (struja difuzije).

Sada je potrebno razmotriti uticaj drugog izvora (E_{CE}) kojim se vrši polarizacija spoja BC . Polje koje stvara taj izvor takvo je da ne dozvoljava elektronima iz kolektorske oblasti da prelaze u oblast baze, niti dozvoljava šupljinama da prelaze iz oblasti baze u kolektorsku oblast, pa kažemo da je ovaj spoj *inverzno polarisan*. Međutim, smjer tog polja odgovara elektronima koji su u bazu dospjeli iz emitera i preživjeli rekombinaciju. Zbog toga će svi ti elektroni preći u kolektorsku oblast, i dalje nastaviti svoje kretanje preko kolektorske elektrode, kroz provodnik, sve do samog izvora.

U emitera oblast stalno će iz izvora E_{BE} pristizati novi elektroni, pa će se ovaj proces ponavljati, tj. imaćemo stalno proticanje struje kroz NPN bipolarni tranzistor. Očigledno je da struju kroz tranzistor čine i elektroni i šupljine, što opravdava njihov naziv *bipolarni tranzistori*.

Na početku je rečeno da je oblast baze znatno uža u odnosu na oblast emitera i kolektora. Razlog tome jeste da se elektronima omogućiti da što lakše dopiju iz emitera u kolektorsku oblast.



Kontrolno pitanje 5.1 Navedi razloge zbog kojih je oblast baze: a) slabije dopirana i b) uža od emitterske i kolektorske oblasti.

Ne treba zaboraviti da kod spoja baza–kolektor postoji i inverzna struja koja potiče od manjinskih nosilaca naelektrisanja, ali je ona kod silicijumskog tranzistora zanemarljivo mala i ne utiče na njegov rad.



Kontrolno pitanje 5.2 Odredi da li silicijumski tranzistor provodi struju ukoliko napon između baze i emitera iznosi 0,2 V. Objasni!

5.1.2 PNP tranzistori

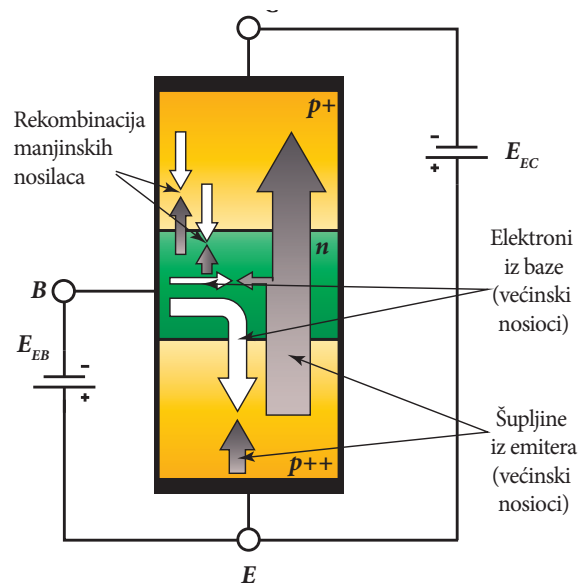
Kod PNP bipolarnog tranzistora emitterska i kolektorska oblast izrađuju se kao poluprovodnici P-tipa, dok je oblast baze N-tipa. Da bi PNP tranzistor provodio struju, izvori kojima se vrši polarizacija suprotnog su polariteta u odnosu na one kod NPN tranzistora (slika 5.5). Njegov princip rada sličan je onom kod NPN tranzistora, s tim što su sada šupljine te koje se kreću od emitera ka kolektoru i učestvuju u provođenju struje kroz čitav tranzistor. Sjetite se da su šupljine samo prazna mjesta na kojima nedostaju elektroni i da se privid njihovog kretanja u jednom smjeru ostvaruje na račun kretanja elektrona u suprotnom smjeru. Zbog toga su i smjerovi struja koje protiču kroz provodnike, priključene na elektrode PNP tranzistora, suprotni u odnosu na struje kod NPN tranzistora. Struja baze u ovom slučaju potiče od elektrona.

PNP tranzistori su slabijih karakteristika nego NPN zbog manje pokretljivosti šupljina u odnosu na elektrone.

Zbog toga se u praksi češće koriste NPN tranzistori, dok se PNP koriste tamo gdje nije moguće upotrijebiti NPN tranzistore. Postoje kola u kojima se upotrebljavaju oba tipa navedenih tranzistora.

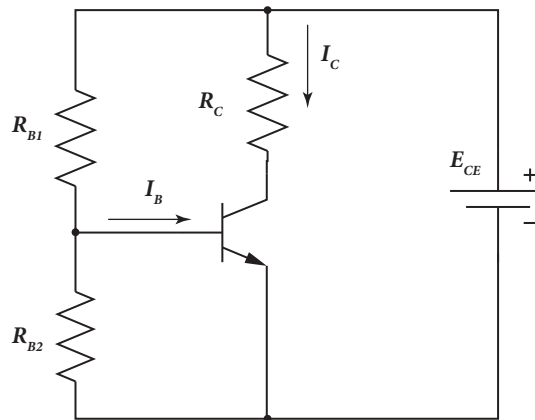
5.1.3 Polarizacija pomoću jednog izvora

Kako bi se struja koja će proticati kroz PN-spojeve kod bipolarnog tranzistora mogla kontrolisati (ograničiti), u praktičnim realizacijama se, slično kao kod diode, redno s jednosmjernim izvorima dodaju otpornici. Takođe, izbjegava se upotreba dvije baterije za polarizaciju tranzistora, već se radi ekonomičnosti polarizacija vrši jednom baterijom za napajanje priključenom između kolektora i emitera (slika 5.6). Struja iz baterije dijeli se na dvije struje: jednu će proticati kroz otpornik R_C a druga kroz otpornik R_{B1} . Ta druga struja se dalje dijeli na struju baze i onu koja će proticati kroz otpornik R_{B2} . Na tom otporniku javlja se pad napona koji će poslužiti za polarizaciju spoja baza–emiter.



Slika 5.5. Polarizacija PNP tranzistora

Intenzitet tog napona kontroliše se pomoću otpornosti R_{B1} i R_{B2} .



Slika 5.6. Polarizacija NPN tranzistora jednom baterijom

Pošto u kolu postoje samo jednosmjerni izvori napona, sve struje u kolu takođe će biti jednosmjerne.

5.2

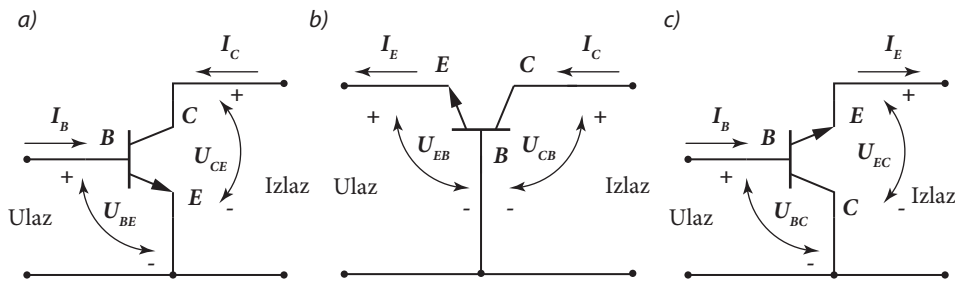
NAČINI VEZIVANJA BIPOLARNOG TRANZISTORA

Da bi tranzistor mogao da se veže u složenim elektronskim kolima, potrebno mu je odrediti dva kraja za priključivanje ulaznog signala (ulaz) i dva kraja gdje bi se priključio potrošač (izlaz). Kako tranzistor ima tri priključka (emiter, bazu i kolektor), onda se za formiranje dva ulazna i dva izlazna priključka, jedan od ta tri priključka mora koristiti kao zajednički za ulaz i za izlaz. U zavisnosti od toga koji se od ta tri priključka koristi kao zajednički, razlikujemo tri načina vezivanja bipolarnih tranzistora:

- spoj sa zajedničkim emiterom (ZE)
- spoj sa zajedničkom bazom (ZB)
- spoj sa zajedničkim kolektorom (ZC).

Ako se ulaz nalazi između baze i emitera a izlaz između kolektora i emitera, onda se radi o tranzistoru u **spoju sa zajedničkim emiterom** (slika 5.7a). Ako je ulaz između emitera i baze a izlaz između kolektora i baze, onda se radi o tranzistoru u **spoju sa zajedničkom bazom** (slika 5.7b). Na kraju, ako je ulaz između baze i kolektora a izlaz između emitera i kolektora, onda je to tranzistor u **spoju sa**

zajedničkim kolektorom (slika 5.7c). Na slici 5.7, osim ulaza i izlaza, označeni su ulazni naponi, izlazni naponi, ulazne struje i izlazne struje za svaki od tri slučaja.



Slika 5.7. Tranzistor u spoju sa zajedničkim: a) emiterom, b) bazom i c) kolektorom

Kola sa zajedničkim emiterom imaju najveću primjenu, i u elektronici se najčešće koriste. Zbog toga će u svim narednim razmatranjima biti korišćen upravo ovaj način vezivanja.

5.3

KOEFICIJENTI STRUJNOG POJAČANJA

Struje u tranzistoru zavise od napona polarizacije na spojevima između emitera i baze, odnosno kolektora i baze. Kako je oblast baze veoma uska, emitterski i kolektorski spoj nalaze se u neposrednoj blizini. Usljed toga, struja kroz kolektorski spoj zavisiće ne samo od napona na spoju BC, nego i od napona na spoju BE. Slično važi i za uticaj ovih napona na struju kroz emitterski spoj.

Kod NPN tranzistora, pod uticajem izvora E_{BE} , elektroni iz emitera prelaze u bazu (struja emitera I_E), dok šupljine idu u suprotnom smjeru (struja baze I_B). Elektroni koji u oblasti baze prežive rekombinaciju, nastavljaju dalje svoj put ka kolektoru i predstavljaju struju kolektora (I_C). Kako je tehnički smjer struje suprotan od smjera kretanja elektrona, onda su smjerovi ovih struja identični onim na slici 5.8.

Na osnovu datih smjerova za struje, moguće je napisati izraz:

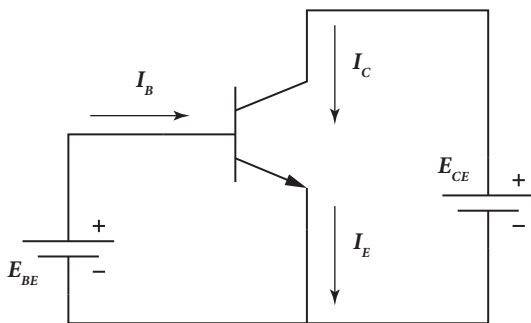
$$I_E = I_C + I_B.$$

Struja baze je, zbog male koncentracije šupljina koje ju sačinjavaju, zanemarljivo mala u odnosu na struje emitera i kolektora. Već je naglašeno da većina elektrona koji iz emitera pređu u bazu nastavi svoje kretanje ka kolektorskom kontaktu, pa prema tome možemo reći da su struje emitera i kolektora približno jednake, i može se napisati:

$$I_E \approx I_C,$$

odnosno:

$$I_B \approx 0.$$



Slika 5.8. NPN tranzistor sa izvorima napajanja u spoju sa ZE



Pronađi na internetu jednostavni projekat s bipolarnim tranzistorima. Nacrtaj električnu šemu i napravi popis elektronskih komponenti potrebnih za realizaciju tog projekta. Nabavi te komponente u prodavnici elektronskih komponenti u svom gradu ili poručivanjem putem interneta. U terminu koji je dogovoren s nastavnikom/nastavnicom, koristeći laboratorijske uređaje i eksperimentalnu pločicu prezentuj svoj projekat.

Zavisno od načina vezivanja tranzistora u električno kolo, ulazne i izlazne veličine, odnosno struje i naponi se mogu mijenjati.

Za tranzistor u spoju sa zajedničkim emiterom (slika 5.8) ulazna struja je I_B a izlazna struja I_C . Količnik izlazne i ulazne struje predstavlja **koeficijent jednosmjernog strujnog pojačanja**, i dat je izrazom:

$$\beta_E = \frac{I_C}{I_B}$$

Pošto je kolektorska struja znatno jača od bazne, to je ovaj koeficijent znatno veći od jedinice. Njegova tipična vrijednost je oko 100. Kod ovakvih kola, male promjene bazne tj. ulazne struje uzrokuju velike promjene kolektorske, odnosno izlazne struje. **Na ovom tvrđenju zasnovana je pojačavačka osobina bipolarnih tranzistora.**

Kod bipolarnog tranzistora u spoju sa zajedničkom bazom, ulazna je emitorska struja I_E , dok kolektorska struja I_C predstavlja izlaznu struju. U tom slučaju, koeficijent jednosmjernog strujnog pojačanja može se opisati izrazom:

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E}$$

Kako je emitorska struja veća od kolektorske, važi da je $\alpha < 1$, pa se ovdje zapravo i ne radi o pojačanju.

5.4

STATIČKE KARAKTERISTIKE BIPOLARNIH TRANZISTORA

Pri analizi rada tranzistora veoma važne su njegove statičke karakteristike. One predstavljaju grafičke prikaze odnosa ulaznih i izlaznih veličina, tj. struja i napona tranzistora. Razlikujemo sljedeće statičke karakteristike kod tranzistora: *ulaznu*, *izlaznu* i *prenosne* karakteristike.

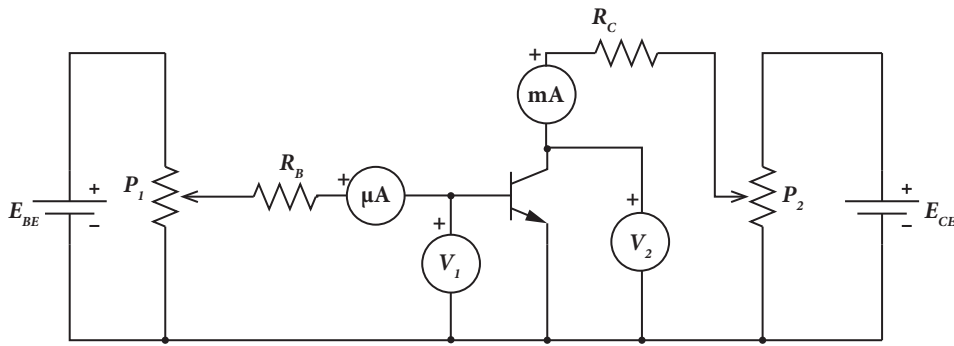
Ulazna karakteristika predstavlja međusobnu zavisnost ulaznih veličina, najčešće ulazne struje od ulaznog napona, pri čemu se ostale karakteristične veličine tranzistora, u ovom slučaju izlazni napon, održavaju konstantnim.

Izlazna karakteristika predstavlja međusobnu zavisnost izlaznih veličina, prvenstveno zavisnost izlazne struje od izlaznog napona, pri čemu je sada ulazna struja parametar koji se održava konstantnim.

Prenosne karakteristike tranzistora predstavljaju zavisnost izlazne struje od jedne od ulaznih veličina, napona ili struje, pri čemu je izlazni napon konstantan.

Šta će se smatrati ulaznim a šta izlaznim veličinama, zavisi od načina vezivanja tranzistora. Sve statičke karakteristike biće objašnjene na primjeru NPN tranzistora u spoju sa zajedničkim emiterom, jer se on najviše koristi. Kod njega je ulazna struja baze (I_B), ulazni napon je napon između baze i emitera U_{BE} , izlazna struja je struja kolektora (I_C), dok je izlazni napon onaj između kolektora i emitera (U_{CE}).

Statičke karakteristike se mogu dobiti računskim putem i mjerenjem. Računski metod je složen, pa se pri određivanju statičkih karakteristika najbolje oslanjati na rezultate koji se dobijaju mjerenjem.



Slika 5.9. Kolo za snimanje statičkih karakteristika bipolarnog tranzistora

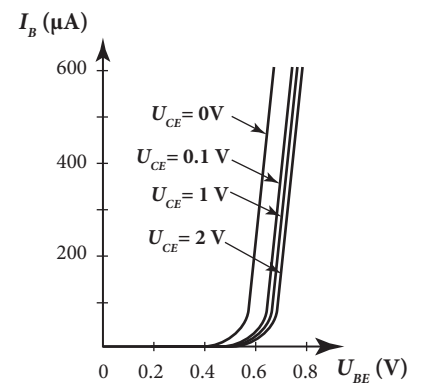
Statičke karakteristike mogu se snimiti pomoću kola sa slike 5.9. Polarizacija spojeva vrši se pomoću izvora E_{BE} i E_{CE} , kako je već objašnjeno. Pomoću promjenljivih otpornika (potencijometara) P_1 i P_2 , slično kao kod snimanja karakteristike diode, kontroliše se s kolikom će se vrijednošću napona polarisati spojevi BE i BC , respektivno. Otpornici R_B i R_C imaju zadatak da ograniče struje kroz ove spojeve kako usljed dovođenja većeg ulaznog napona ne bi došlo do uništenja tranzistora. Takođe, na slici se mogu uočiti dva voltmetra i dva ampermetra pomoću kojih će se izvršiti mjerenje ulaznih i izlaznih napona i struja. Na osnovu rezultata tih mjerenja snimaju se (crtaju) statičke karakteristike tranzistora.

5.4.1 Ulazna karakteristika

Kako je već rečeno, **ulazna karakteristika** tranzistora u spoju sa zajedničkim emiterom predstavlja zavisnost struje baze od napona između baze i emitera, pri čemu je napon između kolektora i emitera konstantan ($I_B = f(U_{BE})$, $U_{CE} = const.$).

Potencijetrom P_2 mijenja se napon U_{CE} sve dok se na voltmetru V_2 ne očitava željena vrijednost. Zatim se pomoću potencijometra P_1 u malim koracima mijenja napon U_{BE} i njegove vrijednosti očitavaju pomoću voltmetra V_1 . Na kraju, promjenom ovog napona mijenja se struja baze i njene vrijednosti očitavaju se na ampermetru za svaku očitavanu vrijednost ulaznog napona. Kada se sve te vrijednosti ulazne struje i napona prikažu na jednom grafiku, dobija se ulazna karakteristika silicijumskog NPN tranzistora u spoju sa zajedničkim emiterom (slika 5.10).

Sa slike se vidi da je ulazna karakteristika tranzistora slična karakteristici diode u propusnom smjeru, što je i očekivano, s obzirom da se u oba slučaja radi o direktno polarisanom PN-spoju. Dok je napon između baze i emitera niži od praga provođenja PN-spoja, struja baze je jednaka nuli. Kada se dostigne prag provođenja koji za silicijumski tranzistor iznosi oko 0,6 V, bazna struja počinje da teče. Daljim povećanjem napona između baze i emitera, za konstantnu vrijednost napona između kolektora i emitera, povećava se struja baze.

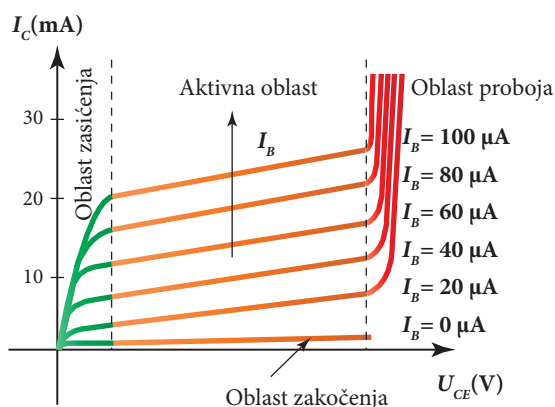


Slika 5.10. Ulazne karakteristike tranzistora za različite vrijednosti napona U_{CE}

Sa slike se uočava da se za veće napone U_{CE} , za istu vrijednost ulaznog napona U_{BE} , dobija nešto manja struja baze. To se objašnjava činjenicom da se povećanjem napona U_{CE} povećava oblast prostornog tovara između baze i kolektora, čime se sužava oblast baze i smanjuje broj šupljina koje će učestvovati u formiranju struje baze.



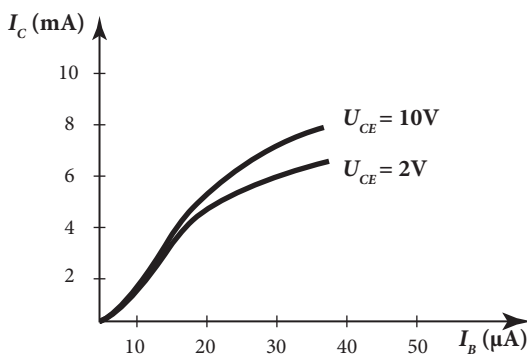
Kontrolno pitanje 5.3 Na osnovu karakteristike sa slike 5.10 zaključite kog reda veličine je struja baze I_B ?



Slika 5.11. Izlazne karakteristike tranzistora za različite vrijednosti struje baze

5.4.2 Izlazna karakteristika

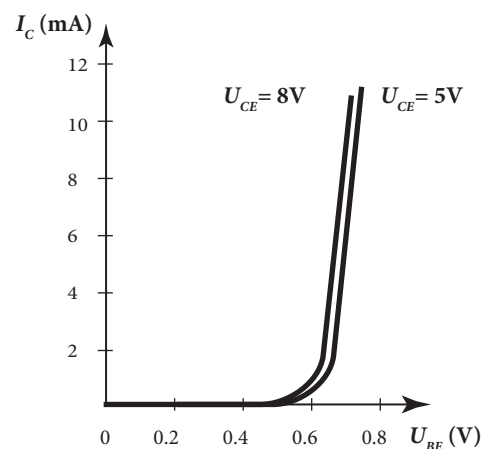
Izlazna karakteristika tranzistora u spoju sa zajedničkim emiterom daje zavisnost kolektorske struje od napona između kolektora i emitera, pri čemu je struja baze konstantna ($I_C = f(U_{CE}), I_B = const.$). Najprije se struja baze podesi na željenu vrijednost pomjeranjem potenciometra P_1 . Zatim se bilježe vrijednosti izlaznog napona očitane pomoću voltmetra V_2 i nanose na isti grafičari s vrijednostima izlazne struje očitane pomoću ampermetra u istim trenucima. Na slici 5.11 su prikazane izlazne karakteristike NPN tranzistora u spoju sa zajedničkim emiterom, dobijene za različite vrijednosti struje baze.



Slika 5.12. Direktna prenosna karakteristika

Sa slike se vidi da se s porastom struje baze, za istu vrijednost napona U_{CE} znatno povećava kolektorska struja, što je i očekivano s obzirom na pojačavačka svojstva tranzistora izražena relacijom koja povezuje kolektorsku i baznu struju: $I_C = \beta_E I_B$. Povećanjem napona U_{CE} , za konstantnu vrijednost bazne struje, kolektorska struja sporo raste.

Na datoj karakteristici razlikuju se: *oblast zasićenja*, *aktivna oblast* i *oblast proboja*. Sa slike se vidi da daljim povećavanjem izlaznog napona iznad neke granične vrijednosti za aktivni režim, struja kolektora opet naglo počinje da raste. Ukoliko se ona ne ograniči nekim spoljnim elementom, doći će do uništenja tranzistora. Pri struji baze $I_B = 0$ tranzistor se nalazi u zakočenju.



Slika 5.13. Povratna prenosna karakteristika tranzistora za različite vrijednosti izlaznog napona

5.4.3 Prenosne karakteristike

Kod bipolarnih tranzistora razlikuju se **direktna** i **povratna** prenosna karakteristika. **Direktna prenosna karakteristika** predstavlja zavisnost izlazne kolektorske struje od ulazne struje baze, pri čemu se izlazni napon U_{CE} održava konstantnim ($I_C = f(I_B), U_{CE} = const.$). Ova karakteristika data je na slici 5.12 za dvije različite vrijednosti napona U_{CE} . Sa slike se može uočiti da promjena izlaznog napona minimalno utiče na promjenu izlazne struje.

Mnogo značajnija jeste **povratna prenosna karakteristika** (slika 5.13). Ona predstavlja zavisnost izlazne kolektorske struje od ulaznog napona U_{BE} , pri čemu je napon U_{CE} opet parametar koji se ne mijenja ($I_C = f(U_{BE}), U_{CE} = const.$). Očigledno je da je ova karakteristika slična ulaznoj, s tim što su vrijednosti na strujnoj osi kod prenosne karakteristike β puta veće od onih kod ulazne karakteristike, gdje je β koeficijent strujnog pojačanja.



Kontrolno pitanje 5.4 Objasni razliku između dva tipa prenosnih karakteristika.

5.5

REŽIMI RADA BIPOLARNOG TRANZISTORA

Zavisno od načina polarizacije spojeva emiter–baza (emitterski spoj) i kolektor–baza (kolektorski spoj), tranzistor se može naći u različitim režimima rada. Ti režimi prikazani su u tabeli 5.1.

U **aktivnom režimu** rada bipolarnog tranzistora emitterski spoj je direktno polarisan, a kolektorski inverzno. Kroz tranzistor teku emitterska struja, struja baze i kolektorska struja. Kolektorska struja je proporcionalna struji baze, odnosno važi da je $I_C = \beta I_B$. Zbog toga u aktivnom režimu rada bipolarni tranzistor daje veliko pojačanje struje, napona ili snage sa svog ulaza, pa se koristi kao pojačavač. Kao pojačavač ima veliku primjenu u analognoj elektronici. Iako se napaja iz jednosmjernih izvora, on se koristi za pojačavanje naizmjeničnih signala dovedenih na njegov ulaz. U ovom režimu važi: $U_{BE} = 0,6 \text{ V}$, $I_C = \beta I_B$, $I_E = I_C + I_B$ i $U_{CE} > U_{CES} = 0,2 \text{ V}$.

Tabela 5.1. Režimi rada kod bipolarnog tranzistora

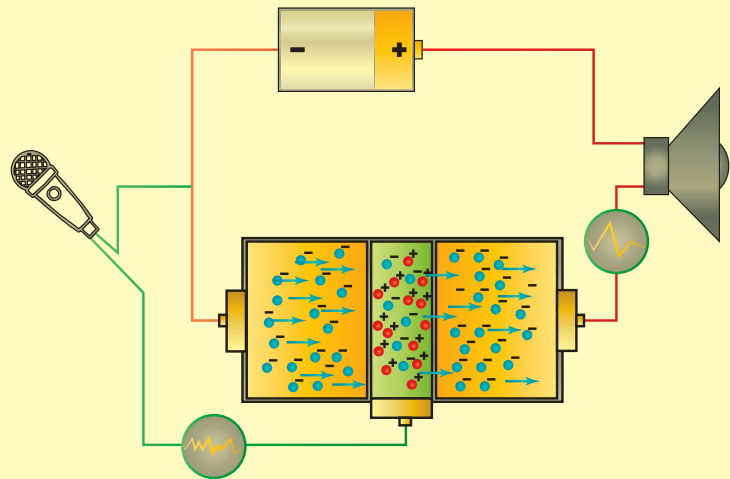
Režim rada	Način polarizacije spojeva		Namjena
	emiter–baza	kolektor–baza	
Aktivni režim	direktna	inverzna	pojačavač
Režim zasićenja	direktna	direktna	prekidač
Režim zakočenja	inverzna	Inverzna	prekidač
Inverzni aktivni režim	inverzna	direktna	nema veliku primjenu

Povećavanjem napona inverzne polarizacije kod spoja baza–kolektor iznad vrijednosti probojnog napona, dolazi do **proboja** tranzistora kada struja kolektora naglo raste. Ukoliko se rast te struje ne ograniči, ona može trajno uništiti tranzistor.



Tranzistor kao mikrofonski pojačavač

Kao što je već rečeno, tranzistor se u aktivnom režimu koristi kao pojačavač. Naizmjenični signal doveden na ulaz tranzistora pojačava se na račun baterije za napajanje, tako da se na izlazu tranzistora dobija pojačan signal. Kola u kojima se vrši pojačanje snage signala s ulaza, nazivaju se pojačavačka kola. Primjer pojačavačkog kola jeste mikrofonski pojačavač (slika 5.14). Na ulaz pojačavača dovodi se signal iz mikrofona koji se u pojačavačkom kolu pojačava, i tako pojačan vodi na zvučnik.



Slika 5.14. Tranzistor kao mikrofonski pojačavač

U režimu **zasićenja** (engl. *saturation*), oba spoja direktno su polarisana. Napon između baze i emitera je iznad praga provođenja, što je dovoljno da kroz bazu protiče struja. Pri niskim vrijednostima napona između kolektora i baze, spoj baza–kolektor praktično je direktno polarisan, pa nema velikog protoka elektrona od baze ka kolektoru. Kolektorska struja nije proporcionalna baznoj struji, i napon između kolektora i emitera (U_{CE}) ne može biti veći od napona zasićenja tranzistora U_{CES} . Napon zasićenja kod silicijumskih tranzistora je reda 0,2–0,3 V. U režimu zasićenja važi $\beta I_B > I_C$, $I_E = I_C + I_B$ i $U_{CE} = U_{CES} = 0,2$ V.

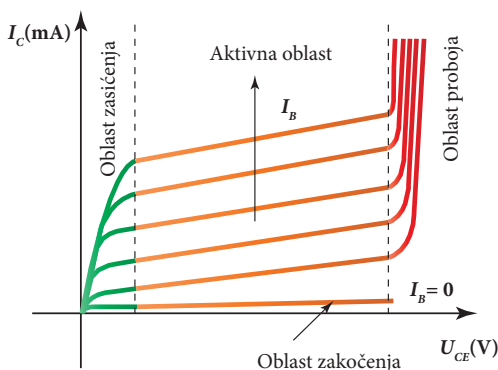
Kada su emitterski i kolektorski spoj inverzno polarisani ili je napon na njima niži od napona provođenja PN-spoja, tranzistor je **zakočen**. Kako je, usljed inverzne polarizacije PN-spoj emiter–baza neprovođan, onda od emitera ka bazi neće teći struja, a samim tim neće biti ni kolektorske struje. Tranzistor praktično ne radi. U režimu zakočenja važi: $U_{BE} \leq 0,6$ V i $I_B = I_C = I_E = 0$.

Tranzistor koji se po potrebi prevodi iz režima zasićenja u režim zakočenja, i obrnuto, ima primjenu u prekidačkim kolima u impulsnoj i digitalnoj elektronici.

Naime, digitalna kola rade s dva naponska stanja: visok napon (nivo logičke jedinice – binarna jedinica) i nizak napon (nivo logičke nule – binarna nula). Kada je tranzistor zakočen, kolektorska struja jednaka je nuli, pa je napon na kolektoru jednak naponu baterije za napajanje E_{CE} . Dakle, kada je tranzistor zakočen, napon na izlazu mu je visok, čime se predstavlja stanje logičke jedinice. Kada je tranzistor u zasićenju, kolektorski napon mu je nizak, reda 0,2 do 0,3 V, što predstavlja stanje logičke nule.

U **inverznom aktivnom režimu** spoj emiter–baza polarisan je inverzno, a kolektor–baza direktno. U ovom režimu tranzistor ima slaba pojačavačka svojstva i ne koristi se često.

Na slici 5.15 prikazana je izlazna karakteristika tranzistora za nekoliko različitih vrijednosti struje baze, podijeljena u četiri oblasti: *oblast zasićenja*, *aktivna oblast*, *oblast zakočenja* i *oblast proboja*.



Slika 5.15. Režimi rada bipolarnog tranzistora

5.6

OGRANIČENJA KOD BIPOLARNOG TRANZISTORA

Pri radu s bipolarnim tranzistorima postoje tri vrste ograničenja o kojima se mora voditi računa kako bi se obezbijedila pouzdanost u njegovom radu. Ograničenja koja proizvođač postavlja jesu *maksimalna struja*, *maksimalan napon* i *maksimalna snaga disipacije*. Za izlaznu struju I_C proizvođač daje maksimalnu vrijednost. Ukoliko se ona pređe, dolazi do prekomjernog zagrijavanja tranzistora i uništenja kristalne strukture poluprovodnika. Isto važi i za struju emitera I_E . Napon U_{CE} i U_{BE} takođe su ograničeni nekim maksimalnim vrijednostima; ako se pređu, dolazi do proboja tranzistora. Uzrok proboja najčešće je pojava lavinskog efekta, koji je identičan onom kod inverzno polarisanog PN-spoja. Pošto snaga direktno utiče na povećanje radne temperature, povećanje izlazne snage (koja predstavlja proizvod izlazne struje i napona) može rezultirati previsokom radnom temperaturom, koja može uništiti tranzistor. U aktivnom režimu rada kolektorski PN-spoj najčešće je opterećen jer kroz njega teče velika kolektorska struja, i tu se razvija najveća snaga disipacije.

Primjer 5.1 Odredi režim rada za NPN tranzistor sa slike 5.16 ako je poznato: a) $U_{BE} = 0,7 \text{ V}$, $U_{CE} = 2 \text{ V}$, $U_{CES} = 0,2 \text{ V}$ i b) $U_{BC} = 0,7 \text{ V}$, $U_{CE} = -2 \text{ V}$, $U_{CES} = 0,2 \text{ V}$.

Rješenje:

a) Na osnovu datih podataka može se zaključiti da je spoj baza-emiter direktno polarisan. Ostaje da se ispita da li je u direktnom aktivnom režimu ili u zasićenju. Kako je napon između kolektora i emitera veći od napona zasićenja U_{CES} , zaključujemo da je tranzistor u direktnom aktivnom režimu.

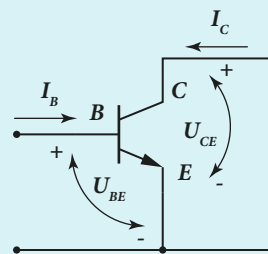
b) Na osnovu datih podataka zaključuje se da se tranzistor nalazi u inverznom aktivnom režimu.

Primjer 5.2 Odredi režim rada za PNP tranzistor sa slike 5.17 ako je poznato: $U_{BE} = -0,8 \text{ V}$, $U_{CE} = -0,2 \text{ V}$, $U_{CES} = -0,2 \text{ V}$.

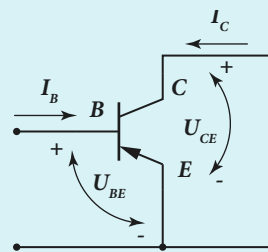
Rješenje: Kako se radi o PNP tranzistoru, na osnovu datih podataka može se zaključiti da su oba spoja direktno polarisana, pa se tranzistor nalazi u režimu zasićenja.



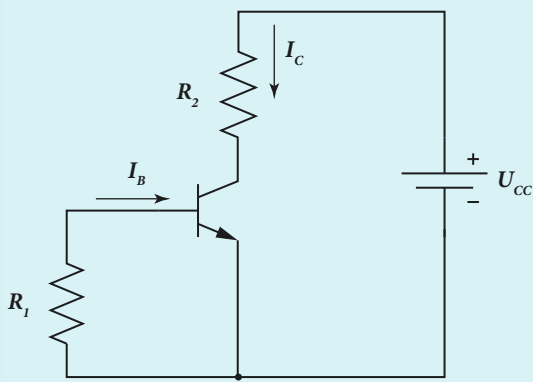
RAČUNSKE VJEŽBE



Slika 5.16



Slika 5.17

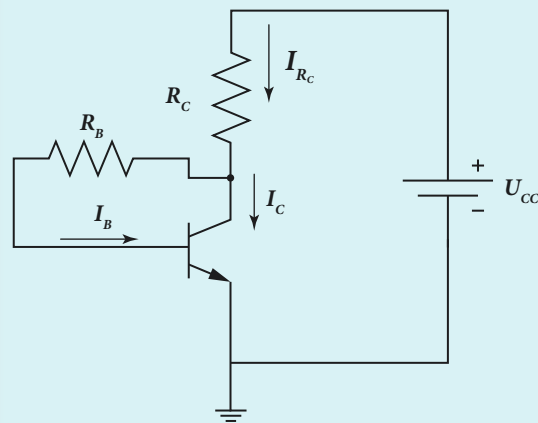


Slika 5.18

Primjer 5.3 Za kolo sa slike 5.18 poznato je: $U_V = U_{BE} = 0,6 \text{ V}$, $U_{BES} = 0,6 \text{ V}$, $U_{CES} = 0,2 \text{ V}$, $\beta = 100$, $U_{CC} = 12 \text{ V}$, $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$. Odredi režim rada tranzistora.

Rješenje: Najprije ćemo pretpostaviti da je tranzistor zakočen. U tom slučaju treba da bude $U_{BE} < U_V$; i ako to pokažemo, onda je pretpostavka tačna.

Ako je tranzistor zakočen, onda su struje tranzistora jednake nuli, odnosno važi da je: $I_E = I_B = I_C = 0$. S obzirom na to da je struja baze jednaka nuli, krajevi otpornika R_1 na istom su potencijalu, pa je potencijal baze $V_B = 0$. Sa slike se vidi da je emiter kratko spojen s masom, pa je $U_{BE} = V_B - V_E = 0 < U_V$. Prema tome, pretpostavka je tačna, tj. tranzistor je zakočen.



Slika 5.19

Primjer 5.4 Za kolo sa slike 5.19 poznato je: $U_V = U_{BE} = 0,7 \text{ V}$, $U_{BES} = 0,7 \text{ V}$, $U_{CES} = 0,2 \text{ V}$, $\beta = 75$, $U_{CC} = 10 \text{ V}$, $R_B = 5 \text{ k}\Omega$, $R_C = 1,2 \text{ k}\Omega$. Odredi režim rada tranzistora.

Rješenje: Najprije ćemo pretpostaviti da je tranzistor zakočen. U tom slučaju treba da bude $U_{BE} < U_V$; i ako to dokažemo, onda je pretpostavka tačna.

Ako je tranzistor zakočen, onda su struje tranzistora jednake nuli, odnosno važi da je $I_E = I_B = I_C = 0$. U tom slučaju potencijal baze je $V_B = U_{CC}$. Pošto je emiter kratko spojen s masom, onda je $V_E = 0$, pa je napon $U_{BE} = V_B - V_E = V_B = U_{CC} > U_V$. Zaključujemo da pretpostavka da je tranzistor zakočen – nije tačna. Sada je potrebno ispitati da li je tranzistor u direktnom aktivnom režimu ili zasićenju.

Pretpostavimo da je tranzistor u aktivnom režimu. Tada je $U_{CE} > U_{CES}$; i ako to dokažemo, onda je pretpostavka tačna.

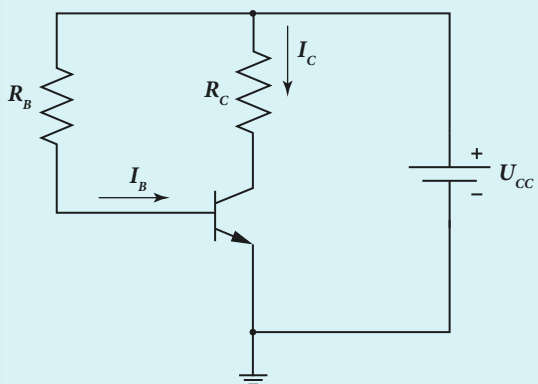
Primjenom II Kirhofovog pravila, u kolu imamo:

$$U_{CC} - R_C I_{R_C} - R_B I_B - U_{BE} = 0.$$

Sa slike se uočava da se struja I_{R_C} može opisati izrazom $I_{R_C} = I_B + I_C$. Budući da je $I_C = \beta I_B$, dolazi se do izraza za struju baze:

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_C(\beta + 1) + R_B} = 96,6 \mu\text{A}.$$

Na sličan način dolazi se i do vrijednosti napona $U_{CE} = 1,18 \text{ V}$. Kako je ovaj napon veći od U_{CES} , pretpostavka je tačna, tj. tranzistor se nalazi u direktnom aktivnom režimu.



Slika 5.20

Primjer 5.5 Za kolo sa slike 5.20 poznato je: $U_V = U_{BE} = 0,6 \text{ V}$, $U_{BES} = 0,6 \text{ V}$, $U_{CES} = 0,2 \text{ V}$, $\beta = 100$, $U_{CC} = 3 \text{ V}$, $R_B = 20 \text{ k}\Omega$, $R_C = 10 \text{ k}\Omega$. Odredi režim rada tranzistora i napone i struje svih priključaka tranzistora.

Rješenje: Najprije ćemo pretpostaviti da je tranzistor zakočen. Slično kao u prethodnim zadacima dolazi se do saznanja da pretpostavka nije tačna.

Pretpostavimo sada da je tranzistor u aktivnom režimu. Tada je $U_{CE} > U_{CES}$; i ako to dokažemo, onda je pretpostavka tačna.

Primjenom II Kirhofovog pravila, dolazimo do napona između kolektora i emitera:

$$U_{CE} = V_C - V_E = U_{CC} - R_C I_C = U_{CC} - R_C \beta I_B = U_{CC} - R_C \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B} = -17 \text{ V} < U_{CES}$$

Ni ova pretpostavka nije tačna.

Pretpostavimo sada da je tranzistor u zasićenju. Tada je $\beta I_B > I_C$; i ako to dokažemo, pretpostavka je tačna.

Kako imamo da je:

$$\beta I_B = \beta \frac{U_{CC} - U_{BES}}{R_B} = 12 \text{ mA}$$

i

$$I_C = \frac{U_{CC} - U_{CES}}{R_C} = 0,28 \text{ mA},$$

to je $\beta I_B > I_C$, pa je pretpostavka tačna. Zaključujemo da tranzistor radi u režimu zasićenja.



REZIME

- Bipolarni tranzistor je poluprovodnička komponenta koja se sastoji od dva PN-spoja i tri elektrode: emitera, baze i kolektora. U zavisnosti od njihove strukture, postoje NPN i PNP tranzistori. Da bi tranzistor provodio u direktnom aktivnom režimu, potrebno je da naponi pomoću kojih se vrši polarizacija spojeva baza–emiter i baza–kolektor, budu tako odabrani da spoj baza–emiter bude direktno, a spoj baza–kolektor inverzno polarisan.
- Prilikom vezivanja u složenijim kolima, kod tranzistora razlikujemo dva ulazna i dva izlazna priključka. Budući da on ima tri elektrode, jedna od njih se smatra zajedničkom za ulaz i izlaz. Ako se emitterski priključak koristi kao zajednički priključak za izlaz i ulaz, onda se radi o tranzistoru u spoju sa zajedničkim emiterom. Ako je zajednički priključak baza, onda se radi o tranzistoru u spoju sa zajedničkom bazom. Ako je zajednički priključak kolektor, onda je to tranzistor u spoju sa zajedničkim kolektorom.
- Tranzistor ima veliku primjenu u pojačavačkim kolima, pod uslovom da se nalazi u direktnom aktivnom režimu. Odnos među strujama kroz tranzistor može da se prikaže sljedećim izrazom: $I_E = I_C + I_B$.
- Zavisnost karakterističnih struja i napona izražava se statičkim karakteristikama. Ulazna karakteristika prikazuje međusobnu zavisnost ulazne struje od ulaznog napona. Izlazna karakteristika predstavlja međusobnu zavisnost izlazne struje od izlaznog napona. Direktna prenosna karakteristika tranzistora predstavlja zavisnost izlazne struje od ulazne, dok povratna prenosna karakteristika daje zavisnost izlazne struje od ulaznog napona.
- U zavisnosti od načina polarizacije spojeva emiter–baza i kolektor–baza, tranzistor se može naći u različitim režimima rada. U aktivnom režimu rada, kada je emitterski spoj direktno polarisan, a kolektorski inverzno, bipolarni tranzistor koristi se kao pojačavač. U režimu zasićenja, emitterski i kolektorski spoj direktno su polarisani. Kolektorska struja postaje manja od βI_B , i napon između kolektora i emitera ne može biti veći od napona zasićenja tranzistora U_{CES} . Kada je tranzistor zakočen, emitterski i kolektorski spoj inverzno su polarisani, i tranzistor praktično ne radi. Tranzistor koji se prevodi iz zasićenja u zakočenje, i obrnuto, svoju primjenu pronalazi kod prekidačkih kola u impulsnoj i digitalnoj elektronici. Tranzistor koji radi u inverznom aktivnom režimu nema neku naročitu primjenu.



1. Objasni razliku između unipolarnih i bipolarnih tranzistora.
2. Uporedi strukture i raspodjelu slobodnih naelektrisanja kod NPN i PNP bipolarnih tranzistora.
3. Opiši način funkcionisanja NPN bipolarnog tranzistora.

4. Komentariši kretanje slobodnih naelektrisanja pri direktnoj polarizaciji spoja baza–emiter.
5. Potkrijepi argumentima činjenicu da se samo mali broj elektrona pristiglih u bazu rekombinuje sa šupljinama koje se tamo nalaze, a većina nastavlja put ka kolektorskoj oblasti.
6. Opravdaj stav da glavni nosioci naelektrisanja koji dopiju u bazu i prežive rekombinaciju, nastavljaju svoj put ka kolektoru uprkos tome što je spoj baza–kolektor inverzno polarisan.
7. Opiši na koji se način tranzistor može polarisati pomoću jednog izvora jednosmjernog napona.
8. Protumači na koji način napon potencijalne barijere pri inverznoj polarizaciji spoja BC utiče na proticanje struje kroz NPN tranzistor.
9. Navedi načine vezivanja bipolarnog tranzistora.
10. Napiši relaciju za odnos struja kod bipolarnog tranzistora.
11. Definiši koeficijent strujnog pojačanja kod bipolarnog tranzistora u spoju sa zajedničkim emiterom.
12. Navedi vrste statičkih karakteristika kod bipolarnog tranzistora.
13. Definiši svaku od statičkih karakteristika.
14. Razluči karakteristične veličine na nezavisno promjenljive, zavisno promjenljive i one koje se održavaju konstantnim pri snimanju svake od statičkih karakteristika bipolarnog tranzistora.
15. Opravdaj potrebu za prisustvom otpornika u kolektorskoj i baznoj grani kola s bipolarnim tranzistorom.
16. Komentariši sličnost između ulazne karakteristike bipolarnog tranzistora sa strujno-naponskom karakteristikom diode.
17. Grafički ilustruj a zatim komentariši na koji se način mijenja izlazna struja u aktivnom režimu.
18. Navedi uslove pri kojima tranzistor radi u: a) aktivnom režimu, b) u oblasti zasićenja i c) zakočenju.
19. Utvrdi režim rada za NPN tranzistor ako je poznato:

$$U_{BE} = 0,5 \text{ V}, U_{CE} = 10 \text{ V}, U_{CES} = 0,2 \text{ V}.$$

Rezultat: Zakočen.

20. Utvrdi režim rada za PNP tranzistor ako je poznato:

$$U_{EB} = 0,7 \text{ V}, U_{EC} = 2 \text{ V}, U_{ECS} = 0,2 \text{ V}.$$

Rezultat: Direktan aktivni režim.

6

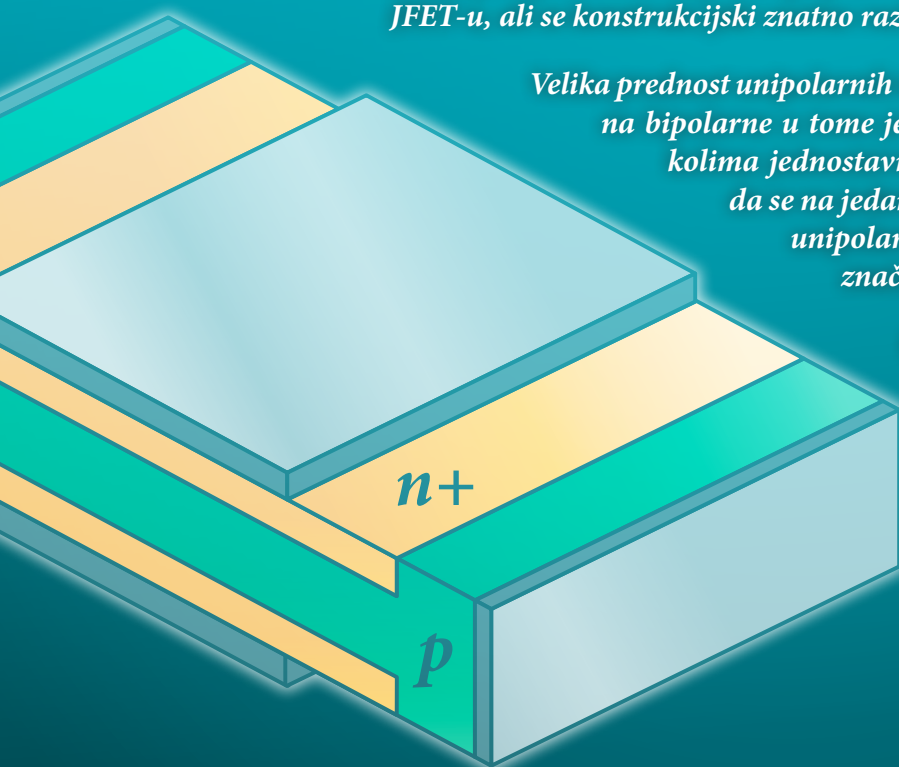
Unipolarni tranzistori

Za razliku od bipolarnih tranzistora, kod kojih se struja sastoji od obje vrste slobodnih nosilaca naelektrisanja, kod unipolarnih tranzistora u provođenju struje učestvuju samo glavni nosioci naelektrisanja. Zbog toga se ovi tranzistori nazivaju unipolarni. Njihov princip rada zasnovan je na mijenjanju provodnosti poluprovodnika dejstvom spoljašnjeg električnog polja. Zbog toga se unipolarni tranzistori nazivaju i tranzistori s efektom polja. Karakteristika ovih tranzistora jeste velika ulazna otpornost i slaba zavisnost izlazne struje od izlaznog napona.

Postoje dvije različite strukture unipolarnih tranzistora: spojni tranzistor s efektom polja (JFET ili samo FET), u kojem se između obloga od poluprovodnika jednog tipa nalazi poluprovodnik suprotnog tipa, i MOSFET koji je po principu rada veoma sličan JFET-u, ali se konstrukcijski znatno razlikuje od njega.

Velika prednost unipolarnih tranzistora, naročito MOSFET-ova, u odnosu na bipolarne u tome je što je proces njihove izrade u integrisanim kolima jednostavniji, pa zauzimaju manje prostora. To znači da se na jedan poluprovodnički čip može ugraditi veći broj unipolarnih tranzistora nego bipolarnih, što je veoma značajno.

U ovom poglavlju analizirani su struktura, režimi rada i statičke karakteristike različitih vrsta unipolarnih tranzistora. Prateći dio ovog poglavlja jesu praktične vježbe 18–20 koje se nalaze na kraju udžbenika, u okviru glave VIII. Njihovom realizacijom učenici će se osposobiti za utvrđivanje rada unipolarnih tranzistora snimanjem statičkih karakteristika.



6.1

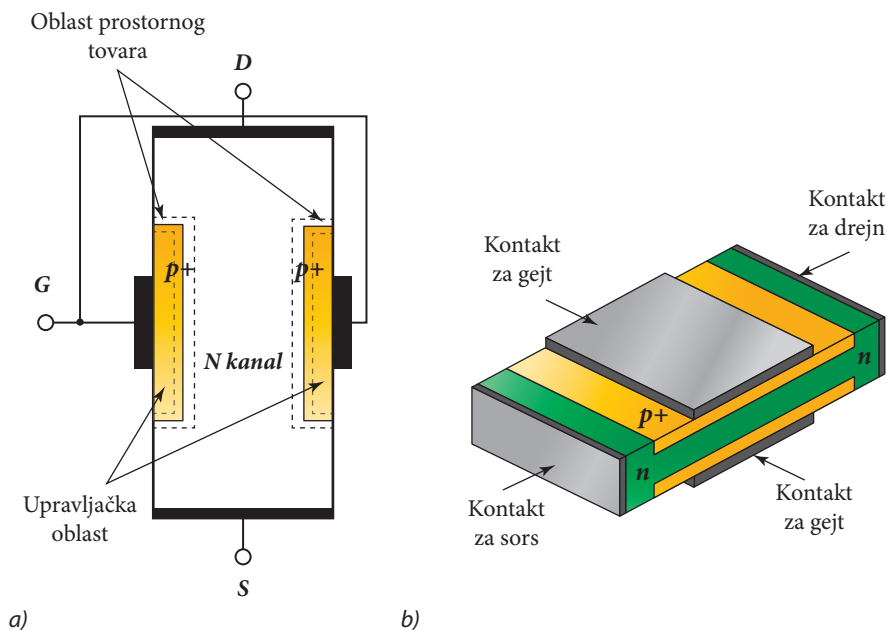
SPOJNI TRANZISTORI S EFEKTOM POLJA (FET)

6.1.1 Struktura FET-a

Proučavajući PN-spoj do sada se moglo uočiti da se promjenom napona polarizacije mijenja širina oblasti prostornog tovara. Konkretno, povećanjem napona direktne polarizacije oblast prostornog tovara se sužava, dok se povećanjem napona inverzne polarizacije ta oblast širi. Princip rada unipolarnih tranzistora zasnovan je upravo na ovoj pojavi.

Struktura i trodimenzionalni izgled jednog unipolarnog tranzistora dati su na slici 6.1. Između dvije obloge napravljene od jače dopiranog poluprovodnika P-tipa (oblast P^+) nalazi se poluprovodnička oblast suprotnog tipa (N oblast).

Centralna poluprovodnička oblast (u ovom slučaju N-oblast) predstavlja provodni *kanal*, i na svojim krajevima ima priključene dvije elektrode, koje se nazivaju **sors** (**S**) i **drejn** (**D**). Oblast P-tipa na sebi ima priključenu elektrodu koja se naziva **gejt** (**G**), i predstavlja *kontrolnu* ili *upravljajuću oblast*. Nazivi ovih elektroda potiču iz engleskog jezika (*Source, Gate, Drain*) i redom imaju značenje *izvor, kapija i ponor (odvod)*. Na osnovu toga, lako se izvodi zaključak da se nosioci naelektrisanja kreću od sorsa ka drejnu, dok se njihov protok kontroliše pomoću napona na gejtu.

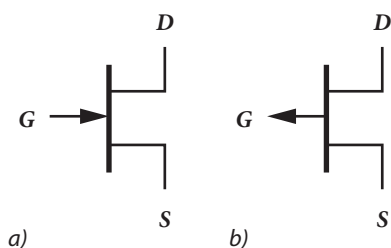


Slika 6.1. N-kanalni FET: a) struktura i b) trodimenzionalni izgled



Julius Edgar Lilienfeld (1882–1963), fizičar i inženjer elektrotehnike, zaslužan za prve patente zasnovane na tranzistoru s efektom polja (FET) koji je otkrio 1925. godine.





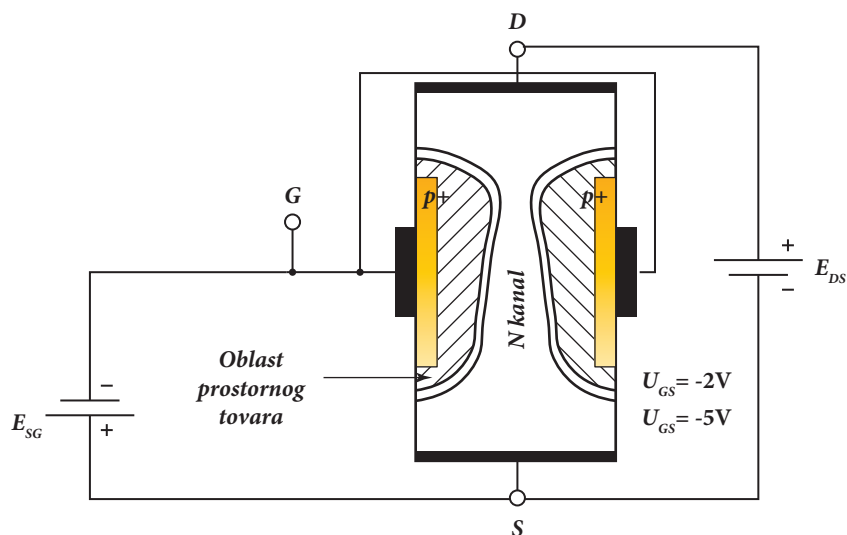
Slika 6.2. Simboli FET-a: a) N-kanalnog i b) P-kanalnog

Ovakva poluprovodnička struktura se naziva **spojni tranzistor s efektom polja** (engl. *Junction Field Effect Transistor – JFET* ili samo *FET*, kako će se nazivati u daljem tekstu). Riječ ‘spojni’ u nazivu označava da je kontrolna oblast direktno spojena s provodnim kanalom. U zavisnosti od toga da li je provodni kanal izrađen od poluprovodnika N-tipa ili P-tipa, razlikuju se **N-kanalni** i **P-kanalni** FET-ovi. Njihovi električni simboli prikazani su na slici 6.2.

6.1.2 N-kanalni FET

Struktura N-kanalnog FET-a već je prikazana na slici 6.1. Pri formiranju PN-spojeva između upravljačke oblasti i kanala formiraju se oblasti prostornog tovara, ravnomjerno duž tih spojeva. S obzirom na to da je N-oblast s manjom koncentracijom primjese u odnosu na P^+ oblast, broj šupljina koje će pri formiranju PN-spoja preći iz upravljačke oblasti u oblast kanala veći je od broja elektrona koji će iz kanala preći u upravljačku oblast. To za posljedicu ima da se nakon rekombinacije formira oblast prostornog tovara, koja se dominantno prostire na račun provodnog kanala (slika 6.1).

Kako bi se omogućilo proticanje struje kroz kanal, odnosno kretanje većinskih nosilaca naelektrisanja (elektrona u slučaju N-kanalnog FET-a) od sorsa ka drejnu, potrebno je između tih elektroda priključiti jednosmjerni naponski izvor E_{DS} . Pozitivan pol tog izvora vezuje se na drejnu, dok se njegov negativan pol vezuje na sors (slika 6.3). Na taj način formira se električno polje usmjereno od drejna ka sorsu, usljed čega će elektroni početi da se kreću od sorsa ka drejnu, odnosno doći će do proticanja struje.



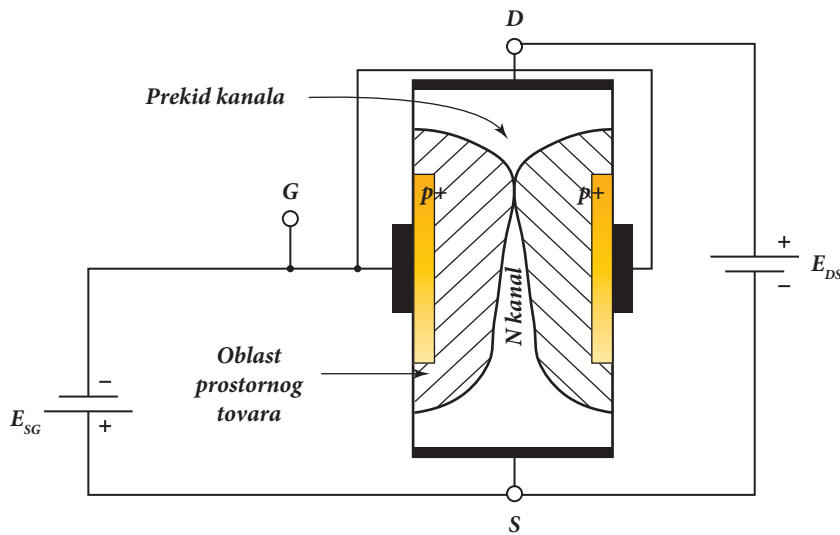
Slika 6.3. Polarizacija N-kanalnog FET-a

Takođe, da bi se protok te struje mogao kontrolisati, između sorsa i gejta priključuje se jednosmjerna baterija E_{SG} tako što se njen pozitivan pol vezuje na sors, dok je negativan pol povezan na gejt. Na taj način PN-spojevi između upravljačkih oblasti (P^+ oblasti) i kanala (N oblast) inverzno su polarisani, što je i logično kada se ima u vidu da proticanje struje treba da se odvija kroz kanal a ne tako što će slobodni nosioci naelektrisanja da prelaze iz jedne oblasti u drugu, kao što je to bio slučaj s bipolarnim tranzistorima.

Kada je napon između gejta i sorsa jednak nuli, oblast prostornog tovara je uska, pa kanal ima najveću širinu. Tada je njegova otpornost veoma mala i elek-

troni mogu nesmetano da se kreću od sorsa ka drejnu. Struja kroz FET tada je maksimalnog intenziteta za određenu vrijednost napona U_{DS} . Povećanjem napona inverzne polarizacije E_{SG} (**napon U_{GS} se pritom povećava u negativnom smjeru!**) oblast prostornog tovara se širi, odnosno kanal se sužava (slika 6.3). Pod uticajem napona E_{SG} šupljine se sve više potiskuju u upravljačku oblast, dok se slobodni elektroni pri tome potiskuju ka sredini provodnog kanala. Otpornost kanala pri tome se povećava, pa je tim elektronima sve teže da se kreću ka drejnu. To za posljedicu ima smanjenje intenziteta struje kroz kanal. Što je napon U_{GS} više negativan, oblast prostornog tovara sve je šira.

Kada napon polarizacije E_{SG} dostigne neku određenu vrijednost, oblasti prostornog tovara se dodirnu, tj. prošire na cijeli kanal, pa struja kroz taj kanal prestaje da teče (slika 6.4).



Slika 6.4. Prekid kanala pri $E_{SG} = U_p$

Napon na kojem se kanal zatvara naziva se **prekidni napon** ili **napon dodira**, i označava sa U_p .

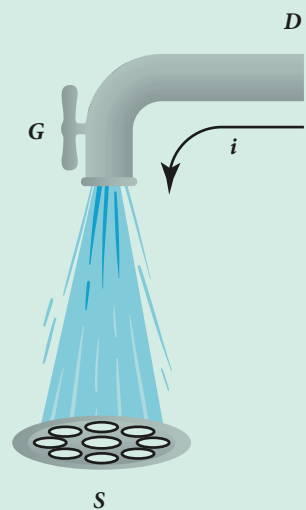
Na ovaj način dokazano je da se promjenom napona između gejta i sorsa može kontrolisati intenzitet struje kroz kanal, pa čak i da se potpuno ukine ta struja.

Sa slika 6.3 i 6.4 može se uočiti da je oblast prostornog tovara na strani drejna šira nego što je to slučaj na strani sorsa. To je posljedica postojanja napona U_{DS} ($U_{DS} = E_{DS}$). Kada je ovaj napon nizak ili jednak nuli, oblast prostornog tovara jednako je široka duž čitavog PN-spoja. Širina te oblasti tada zavisi od napona između gejta i sorsa (U_{GS}). Međutim, s porastom napona U_{DS} , napon inverzne polarizacije između dijela kanala koji se nalazi na strani drejna i upravljačke oblasti postaje veći. Pri tome, električno polje kojim se elektroni potiskuju ka sredini provodnog kanala je jače, što za posljedicu ima širenje oblasti prostornog tovara na strani drejna. Porast ovog napona neće uticati na širinu oblasti prostornog tovara na strani sorsa, jer je tamo inverzni napon niži i zavisi isključivo od napona između gejta i sorsa U_{GS} .

Na ovaj način dokazana su početna tvrđenja da u provođenju struje kod unipolarnih tranzistora učestvuje samo jedna vrsta slobodnih nosilaca naelektrisanja, što opravdava njihov naziv.



Kontrolisanje struje kroz kanal pomoću gejta kod FET-a može se uporediti s proticanjem vode kroz česmu. Na slici 6.5 označen je smjer proticanja struje, dok je smjer kretanja slobodnih nosilaca naelektrisanja suprotan (od sorsa ka drejnu).



Slika 6.5. Poređenje FET-a sa česmom

6.1.3 P-kanalni FET


Kod P-kanalnog FET-a kanal se izrađuje kao poluprovodnik P-tipa, dok se upravljačke oblasti izrađuju kao jače dopirane N^+ oblasti (slika 6.6). Jednosmjerne baterije kojima se vrši polarizacija spojeva i podstiče kretanje slobodnih nosilaca naelektrisanja (u ovom slučaju šupljina) kroz kanal, imaju suprotan polaritet u odnosu na N-kanalni FET. Pod uticajem napona U_{SD} koji stvara baterija E_{SD} , šupljine se kreću od sorsa ka drejnu. Imajući u vidu da su šupljine samo prazna mjesta na kojima nedostaju elektroni i da se privid njihovog kretanja u jednom smjeru ostvaruje na račun kretanja elektrona u suprotnom smjeru, smjer struje koja protiče kroz P-kanalni FET suprotan je smjeru struje kod N-kanalnog.

Pomoću baterije E_{GS} se, slično kao kod N-kanalnog FET-a, obezbeđuje inverzna polarizacija između kanala i kontrolne oblasti i vrši kontrolisanje intenziteta struje koja protiče kroz kanal. Uticaj priključenih jednosmjernih izvora na rad P-kanalnog FET-a može se izvesti prema analogiji sa N-kanalnim.

U praksi se češće koriste N-kanalni FET-ovi.

6.1.4 Polarizacija FET-a pomoću jednog izvora

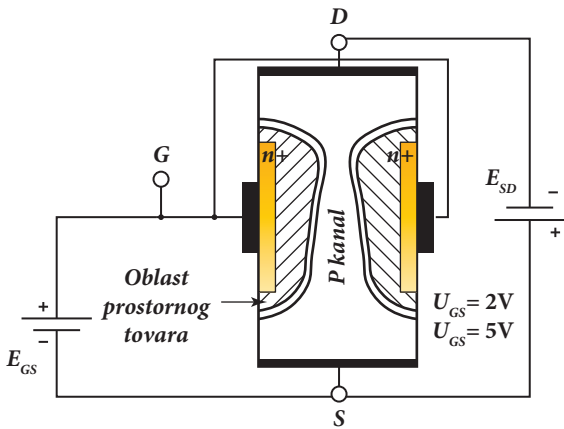
Kako bi se FET zaštitio od pogrešnog uključivanja (previsokih napona U_{DS} i U_{GS}), u praktičnim realizacijama se, slično kao kod prethodno obrađenih poluprovodničkih komponenti, redno s jednosmjernim izvorima dodaju otpornici. Takođe, u praksi se izbjegava upotreba dvije baterije za polarizaciju FET-a, već se, radi ekonomičnosti, polarizacija vrši jednom baterijom za napajanje priključenom između drejna i sorsa (slika 6.7). U tom slučaju potreban je otpornik u grani sorsa koji će podići potencijal sorsa iznad potencijala gejta. Polarizaciju gejta jednim izvorom moguće je izvršiti i bez otpornika R_1 i R_2 pri čemu je gejta tada potrebno spojiti na tačku s najnižim potencijalom u kolu.



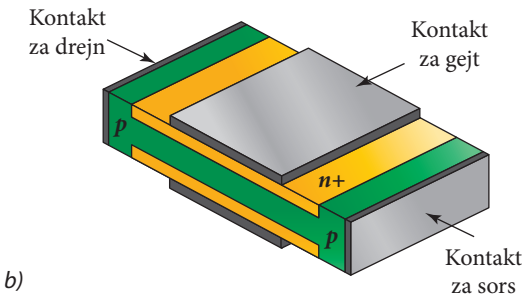
Pronađi na internetu jednostavni projekat s unipolarnim tranzistorima. Nacrtaj električnu šemu i napravi popis elektronskih komponenti potrebnih za realizaciju tog projekta. Nabavi te komponente u prodavnici elektronskih komponenti u svom gradu ili poručivanjem putem interneta. U terminu koji je dogovoren s nastavnikom/nastavnicom, koristeći laboratorijske uređaje i eksperimentalnu pločicu prezentuj svoj projekat.

6.1.5 Statičke karakteristike FET-a

Pri analizi bipolarnih tranzistora bilo je potrebno upoznati se s tri vrste statičkih karakteristika: *ulaznom*, *izlaznom* i *prenosnom*. Kod unipolarnih tranzistora dovoljno je poznavati samo dvije: **izlaznu** i **prenosnu**. Kako su kod FET-a oba PN-spoja uvijek inverzno polarisa-

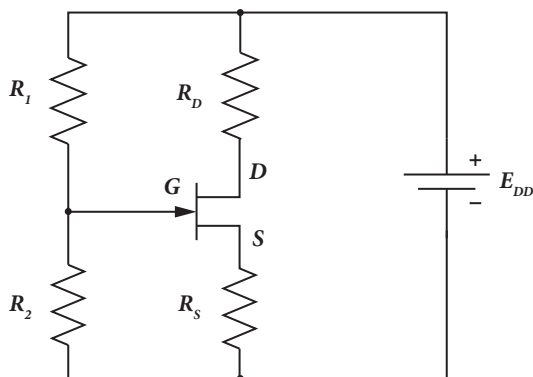


a)



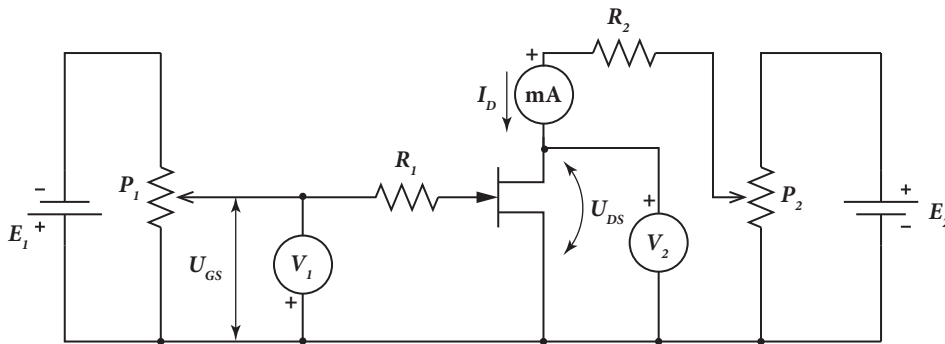
b)

Slika 6.6. P-kanalni FET:
a) polarizacija i b) trodimenzionalni izgled



Slika 6.7. Polarizacija N-kanalnog FET-a jednim izvorom

na, struja gejta praktično je jednaka nuli. Imajući u vidu ovu činjenicu, jasno je da se za FET ne crta statička zavisnost ulazne struje od ulaznog napona (ulazna karakteristika), kao ni zavisnost izlazne struje od ulazne (kod bipolarnih tranzistora to je bila direktna prenosna karakteristika). Zbog toga su pri analizi rada FET-a važne samo tri veličine: *struja drejna* (I_D) i naponi U_{GS} i U_{DS} . Njihovu međusobnu zavisnost u potpunosti je moguće opisati sa samo dvije karakteristike: izlaznom i prenosnom. Snimanje tih karakteristika moguće je izvršiti pomoću kola sa slike 6.8. Uloga svake od upotrijebljenih elektronskih komponenti lako se može utvrditi na osnovu analogije sa šemom za snimanje karakteristika kod bipolarnog tranzistora i prethodno izložene teorije.

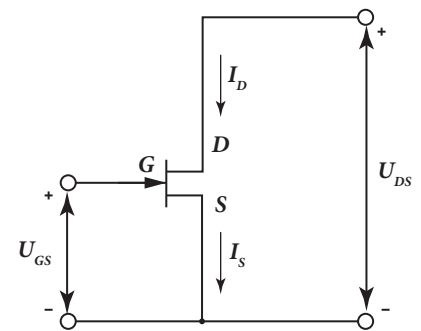


Slika 6.8. Kolo za snimanje karakteristika FET-a

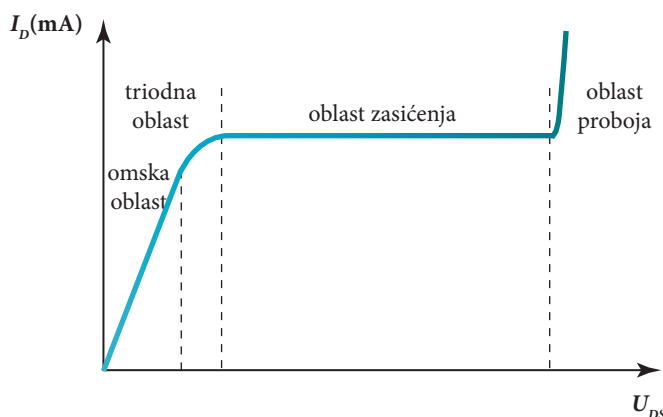
6.1.5.1 Izlazna karakteristika FET-a

Na slici 6.9 je prikazan simbol N-kanalnog FET-a sa označenim karakterističnim naponima i strujama koje kroz njega u tom slučaju protiču.

Zavisnost izlazne struje I_D (struja drejna) od izlaznog napona U_{DS} kod N-kanalnog FET-a, odnosno njegova *izlazna karakteristika*, data je na slici 6.10. Pri tome se napon između gejta i sorsa (U_{GS}) smatra konstantnim, i veći je od prekidnog napona U_p ($U_p < U_{GS} < 0$).



Slika 6.9. N-kanalni FET sa označenim karakterističnim veličinama



Slika 6.10. Izlazna karakteristika N-kanalnog FET-a ($I_D=f(U_{DS})$)

Na datoj karakteristici jasno se razlikuju tri oblasti: **triodna oblast**, **oblast zasićenja** i **oblast proboja**.



Dio karakteristike označen kao **triodna oblast** ima taj naziv jer je sličan karakteristici elektronske cijevi (triode). **Elektronska cijev** je elektronska komponenta čiji se rad zasniva na kretanju elektrona kroz vakuum pod uticajem elektrostatičkog polja koje se javlja između elektroda. Ova komponenta skoro da se više i ne koristi, pa se i sam naziv triodna oblast rjeđe upotrebljava.

U početnom trenutku napon U_{DS} je jednak nuli, pa tada nema ni proticanja struje kroz kanal. Kada se uspostavi taj napon, pri njegovim nižim vrijednostima (najčešće do 1 V) izlazna struja I_D raste proporcionalno porastu tog napona. Ta zavisnost je približno linearna, kanal se tada ponaša kao otpornik, i zbog toga se taj dio triodne oblasti naziva *omaska oblast*, odnosno za FET se tada kaže da radi u **omskom režimu**.

Pri daljem povećanju napona U_{DS} , usljed širenja oblasti prostornog tovara na strani drejna, kanal se u tom dijelu sužava, pa struja drejna prestaje da prati promjenu tog napona i sporije se mijenja. Na karakteristici je to dio triodne oblasti koji se nalazi između omske oblasti i oblasti zasićenja.

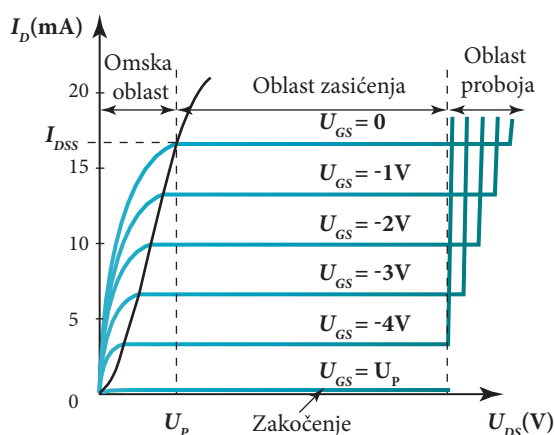
Kada napon U_{DS} dostigne neku određenu vrijednost, struja drejna više ne zavisi od promjene izlaznog napona i prestaje da raste (preciznije, neznatno se mijenja). Dakle, bez obzira na to što će napon U_{DS} nastaviti da raste, struja se neće mijenjati i biće približno konstantna. To odgovara trenutku kada se oblast prostornog tovara u blizini drejna proširi na čitav kanal, stvarajući uzak provodni kanalčić kroz koji će elektroni koji i dalje pristižu iz pravca sorsa da se „prebacuju“ ka drejnu. Tranzistor se tada nalazi u **zasićenju**. Režim zasićenja kod FET-a analogan je aktivnom režimu rada kod bipolarnog tranzistora, i u njemu se FET koristi kao **pojačavač**.

Kada bi se napon U_{DS} prekomjerno povećao, došlo bi do proboja kanala, usljed čega bi struja drejna počela naglo da raste, što bi u krajnjem najvjerojatnije izazvalo uništenje čitavog FET-a. Na datoj izlaznoj karakteristici to je označeno kao **probodna oblast**. Napon pri kom dolazi do proboja varira od tranzistora do tranzistora, i najčešće iznosi nekoliko desetina volti.

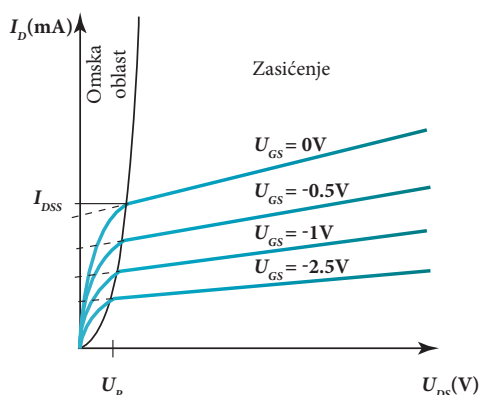
Ne treba zaboraviti da izlazna struja zavisi i od napona između gejta i sorsa, pa će pri svakoj njegovoj promjeni izlazna karakteristika FET-a biti drugačija. Na slici 6.11 prikazano je više izlaznih karakteristika N-kanalnog FET-a za različite vrijednosti napona U_{GS} . S porastom tog napona, naravno u negativnom smjeru, karakteristika će imati isti oblik, ali će za iste vrijednosti napona U_{DS} struja drejna biti niža. To svakako odgovara činjenici da se pri porastu napona inverzne polarizacije oblast prostornog tovara širi, odnosno provodni kanal postaje uži. Time se povećava otpornost kanala, što u krajnjem rezultira manjom strujom koja kroz njega protiče.

Pri dovoljno velikom negativnom naponu U_{GS} tranzistor ulazi u **zakočenje**.

Prethodno analizirane karakteristike su idealizovane. Treba napomenuti da struja drejna u oblasti zasićenja ipak neznatno raste (slika 6.12).



Slika 6.11. Idealizovane izlazne karakteristike N-kanalnog FET-a za različite vrijednosti napona U_{GS}



Slika 6.12. Realne izlazne karakteristike N-kanalnog FET-a za različite vrijednosti napona U_{GS}



Kontrolno pitanje 6.1 Zaključite zbog čega se stalno naglašava za napon U_{GS} da je negativan.

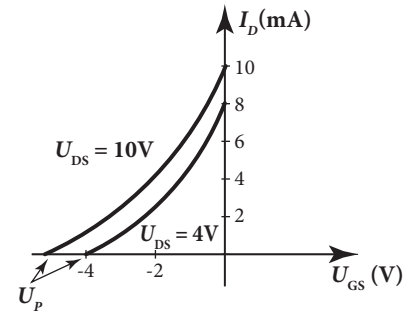
Izlazne karakteristike za P-kanalni FET iste su kao i za prikazani N-kanalni, s tim što napon U_{GS} raste u pozitivnom smjeru ($U_{GS} > 0$).

6.1.5.2 Prenosna karakteristika FET-a

Da bi se u potpunosti razumio princip rada spojnog tranzistora s efektom polja, potrebno je poznavati i na koji način struja drejna zavisi od napona između gejta i sorsa, odnosno njegovu *prenosnu karakteristiku*. Na slici 6.13 date su prenosne karakteristike N-kanalnog FET-a za dvije vrijednosti napona U_{DS} .

Prenosna karakteristika FET-a postoji samo pri negativnim vrijednostima napona U_{GS} , jer je samo tada PN-spoj između kanala i upravljačke oblasti inverzno polarisan. Maksimalna struja drejna (I_{DSS}) javlja se kada je napon $U_{GS} = 0$, jer je tada oblast prostornog tovara najmanja, odnosno kanal maksimalnih dimenzija pa pruža najmanji otpor. S porastom napona U_{GS} u negativnom smjeru, struja drejna eksponencijalno opada i biva sve manja. Konačno, kada se ovaj napon izjednači s prekidnim naponom U_p , nastaje potpuni prekid kanala, te struja drejna prestaje da teče. Ne treba zaboraviti: da bi struja uopšte proticala kroz kanal, neophodno je da drejn bude na većem potencijalu u odnosu na sors ($U_{DS} > 0$). Intenzitet izlazne struje veći je kada je napon U_{DS} veći.

Pregled režima rada kod N-kanalnog FET-a dat je u tabeli 6.1. Za P-kanalni FET tabelarni pregled svih režima rada, u zavisnosti od karakterističnih veličina, izvodi se na sličan način. Pri tome svi naponi imaju suprotan polaritet.



Slika 6.13. Prenosna karakteristika N-kanalnog FET-a

Tabela 6.1. Tabelarni pregled režima rada N-kanalnog FET-a

Režim rada	U_{GS}	U_{DS}	I_D
<i>zakočenje</i>	$U_{GS} \leq U_p$	-	$I_D = 0$
<i>omski režim</i>	$U_p < U_{GS} < 0$	$U_{DS} < U_{DSzas}$	I_D raste s porastom napona U_{DS}
<i>zasićenje</i>	$U_p < U_{GS} < 0$	$U_{DS} \geq U_{DSzas}$	$I_D \approx \text{const.}$



Kontrolno pitanje 6.2 Nacrta i opiši na koji će se način mijenjati prenosna karakteristika kod P-kanalnog FET-a.

6.1.6 Ograničenja kod FET-a

Pri radu sa FET-ovima postoje tri vrste ograničenja o kojima se mora voditi računa, i za koje proizvođač postavlja upozorenja. Tri vrste ograničenja su: *maksimalna struja*, *maksimalan napon* i *maksimalna snaga disipacije*. Izlazna struja I_D ograničena je nekom maksimalnom vrijednošću, koja se ne smije preći. Jer ako se ta vrijednost pređe, doći će do prekomjernog zagrijavanja tranzistora, te uništenja kristalne strukture poluprovodnika. Izlazni napon U_{DS} također je ograničen nekom maksimalnom vrijednošću – ako se pređe, dovodi do proboja tranzistora. Pošto snaga direktno utiče na povećanje radne temperature, povećanje izlazne snage (koja predstavlja proizvod izlazne struje i napona) može rezultirati previsokom radnom temperaturom, koja može uništiti tranzistor.



Kontrolno pitanje 6.3 Ustanovi što bi se dogodilo kod spojnog FET-a kada bi napon U_{GS} bio veći od nule ($U_{GS} > 0$).

6.2

TRANZISTORI S EFEKTOM POLJA
S IZOLOVANIM GEJTOM (MOSFET)

MOSFET su izumili Mohamed Atala i Davon Kang 1959. godine.

Mohamed Atala (1924–2009) egipatsko-američki inženjer i pronalazač.



Davon Kang (1931–1992), korejsko-američki inženjer elektrotehnike i pronalazač.



6.2.1 Struktura MOSFET-a

U elektronici veliku primjenu imaju *tranzistori s efektom polja sa izolovanim gejtom* (engl. *Insulated Gate Field Effect Transistor – IGFET*). Oni se izrađuju tako što se na podlozi (supstratu) napravljenoj od poluprovodnika jednog tipa, formiraju dvije jače dopirane oblasti suprotnog tipa koje sa svojim metalnim kontaktima predstavljaju sors i drejn. Između njih se formira provodni kanal, koji predstavlja električnu vezu između tih dviju oblasti, odnosno sredinu kroz koju će proticati struja. Takođe, posjeduju upravljačku elektrodu (gejt) koja je, za razliku od spojnog FET-a, od kanala odvojena tankim slojem izolacionog materijala, obično sačinjenog od silicijum dioksida (SiO_2). Zbog toga se ovakvi tranzistori nazivaju i MOSFET (ili samo **MOS tranzistori**), gdje prefiks *MOS* (engl. *Metal Oxid Semiconductor*) upućuje na troslojnu strukturu sačinjenu od **metala, oksida i poluprovodnika**. U praksi se ovaj naziv upotrebljava mnogo češće nego *IGFET*.

Osnova (supstrat) takođe na sebi ima priključnu elektrodu (*bulk*), ali kako se ta elektroda u najvećem broju slučajeva kratko spaja sa sorsom, neće se razmatrati kao zaseban izvod.

Izolovanost gejta čini ulaznu otpornost ove vrste tranzistora izuzetno velikom. Kako je zbog toga struja gejta praktično jednaka nuli, MOSFET se ponaša kao naponom regulisani otpornik u kojem struja teče kroz kanal između drejna i sorsa, čineći je proporcionalnom ulaznom naponu. Slično kao kod FET-a, MOSFET velike ulazne otpornosti lako može akumulirati velike količine statičkog elektriciteta koje ga mogu oštetiti ukoliko se njime ne rukuje pažljivo ili se ne zaštiti.

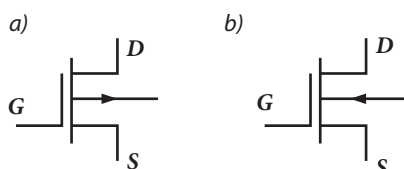
Postoje dvije vrste MOSFET-a: s *ugrađenim* i *indukovanim* kanalom. **MOSFET s ugrađenim kanalom** u sebi posjeduje fizički smješten provodni kanal, dok se kod **MOSFET-a s indukovanim kanalom** provodni kanal obrazuje tek nakon priključivanja odgovarajućeg napona na gejt, pa otuda i njegov naziv. Takođe, kod obje vrste MOSFET-a provodni kanal može biti N-tipa ili P-tipa, pa tranzistori tada mogu imati i oznaku *NMOS* ili *PMOS*, respektivno.

6.2.2 MOSFET s ugrađenim kanalom

Kako je već rečeno, ovaj tip MOSFET-a ima fizički ugrađen provodni kanal. Na slici 6.14 prikazani su simboli MOSFET-a s ugrađenim kanalom N-tipa i P-tipa.

Njegova struktura i princip rada biće objašnjena na primjeru NMOS tranzistora (slika 6.15).

Na osnovi (*supstratu*) P-tipa poluprovodnika formirane su oblasti suprotnog (N^+) tipa s velikom koncentracijom primjesa (*sors* i *drejn*) između kojih se nalazi *provodni kanal*. On je sačinjen od slabije dopiranog poluprovodnika N-tipa, i nalazi se na



Slika 6.14. Simboli MOSFET-a s ugrađenim kanalom:
a) P-kanalni i b) N-kanalni

samoj površini osnove. Kanal je prekriven *izolatorom* (silicijum-dioksid – SiO_2), na koji je postavljena *metalna elektroda*, koja predstavlja *gejt*. Osnova se kratko veže sa sorsom budući da PN-spojevi, koji postoje između osnove i N^+ oblasti, nikada ne smiju biti direktno polarisani.

Jedini uslov da bi struja počela da teče kroz kanal jeste da napon između drejna i sorsa (U_{DS}) bude veći od nule, čime se slobodni nosioci u kanalu (elektroni) usmjeravaju od izvora (sors) ka ponoru (drejn). Prema tome, struja kroz kanal protiče i kada je napon U_{GS} jednak nuli ($U_{GS} = 0$). Napon između gejta i sorsa (U_{GS}) služi za kontrolisanje intenziteta uspostavljene struje.

Kada je $U_{GS} < 0$ (slika 6.16), gejt je elektroda na najnižem potencijalu u kolu. Ona elektrone iz provodnog kanala (kao većinske nosioce) odbija od sebe, dok manjinske šupljine privlači ka sebi. Na taj način ispod izolatorske oblasti stvara se oblast osiromašena elektronima kao većinskim nosiocima. Elektroni, koji se pod uticajem napona U_{DS} kreću od sorsa ka drejnu, „izbjegavaju“ tu oblast i koriste dio kanala koji je udaljeniji od gejta. Dakle, dolazi do sužavanja kanala koje je dominantno izraženo u njegovom središnjem dijelu jer je tu i najjači uticaj negativnog potencijala na kome se gejt nalazi. Što je napon U_{GS} više negativan, to kanal postaje uži a struja kroz njega manja. Tu struju je moguće i potpuno ukinuti pri dovoljno velikim negativnim vrijednostima napona U_{GS} . Smanjenje struje je posljedica manje potencijalne razlike između sorsa i drejna, do koje dolazi usljed prethodno opisane promjene napona U_{GS} .

Uočava se da je opisani princip rada MOSFET-a s ugrađenim kanalom pri negativnom naponu između gejta i sorsa gotovo identičan onom kod spojnog FET-a.

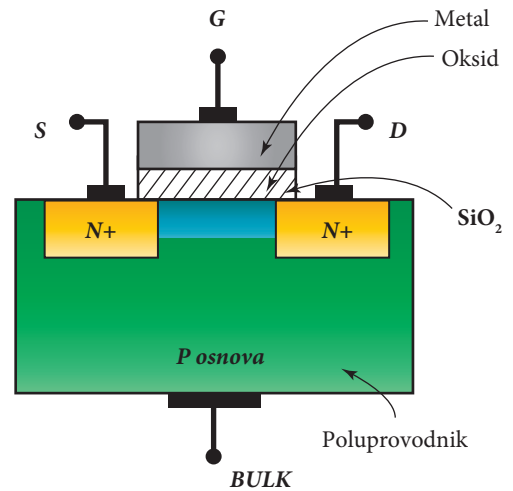


Kontrolno pitanje 6.4 Ustanovi razlog zbog koga šupljine koje su pri $U_{GS} < 0$ privučene ka gejtu ne pređu na tu elektrodu već ostaju unutar kanala.

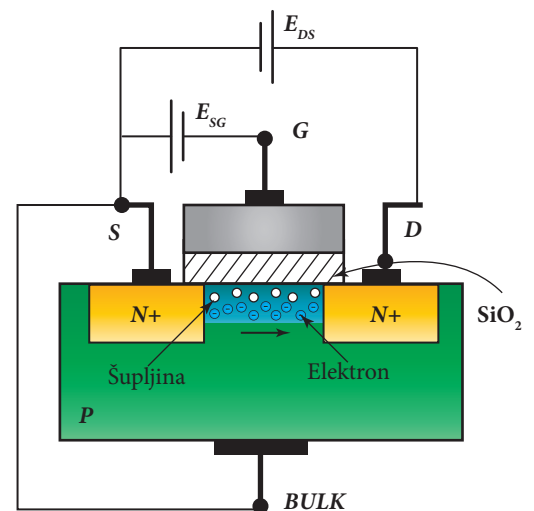
Kada je $U_{GS} > 0$ (slika 6.17), gejt se nalazi na većem potencijalu u odnosu na sors, a time i osnovu (podlogu), jer su elektrode na tim oblastima u kratkom spoju. Usljed toga, manjinski elektroni iz podloge bivaju privučeni ka gejtu, a time i provodnom kanalu, što će usloviti da se taj kanal proširi na račun podloge. Na taj način dolazi do porasta struje kroz kanal.

6.2.2.1 Statičke karakteristike MOSFET-a s ugrađenim kanalom

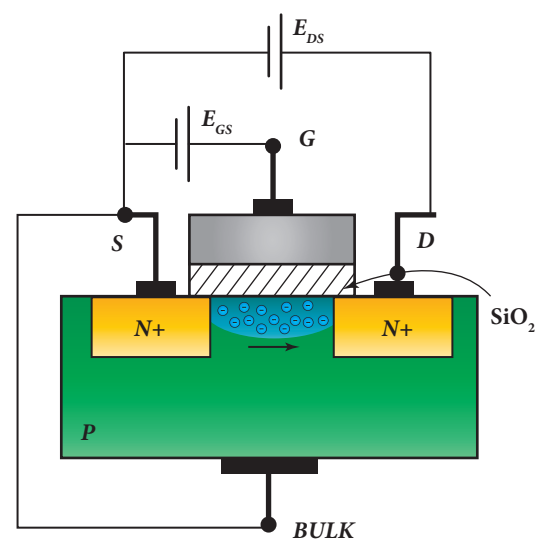
Slično kao kod spojnog FET-a zbog zanemarljivo male struje gejta, pri analizi rada MOSFET-a posmatraju se samo izlazna i prenosna karakteristika.



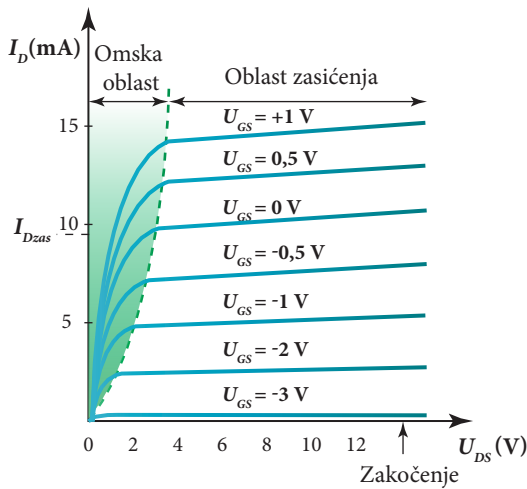
Slika 6.15. Struktura N-kanalnog MOSFET-a s ugrađenim kanalom



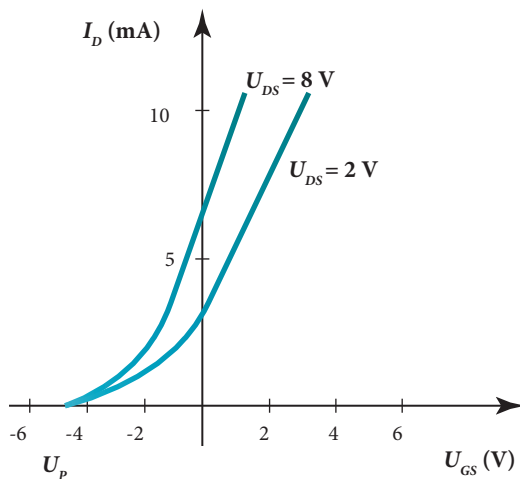
Slika 6.16. Polarizacija MOSFET-a s ugrađenim kanalom N-tipa pri $U_{GS} < 0$



Slika 6.17. Polarizacija MOSFET-a s ugrađenim kanalom N-tipa pri $U_{GS} > 0$



Slika 6.18. Izlazne karakteristike MOSFET-a s ugrađenim kanalom N-tipa



Slika 6.19. Prenosna karakteristika MOSFET-a s ugrađenim kanalom N-tipa

Izlazna karakteristika MOSFET-a s ugrađenim kanalom

Na slici 6.18 date su **izlazne karakteristike** MOSFET-a s ugrađenim kanalom N-tipa za nekoliko vrijednosti napona U_{GS} . Odmah se vidi da su gotovo identične onima kod spojnog FET-a istog tipa. Novina je jedino to što su ovdje date i karakteristike za pozitivne vrijednosti napona između gejta i sorsa. Razlog je jednostavan: kod MOSFET-a struja protiče kroz kanal i kada je napon U_{GS} pozitivan.

U početku, za niže vrijednosti napona U_{DS} , izlazna struja raste proporcionalno s porastom ovog napona. MOSFET tada radi u **omskom režimu**. Što je napon U_{DS} veći, struja počinje sve sporije da se mijenja, i nakon neke granične vrijednosti (U_{DSzas}) postaje približno konstantna. MOSFET tada ulazi u **zasićenje**. Na slici je sa I_{Dzas} označena vrijednost struje zasićenja. Slično kao kod spojnog tranzistora, prekomjerno povećanje napona između drejna i sorsa može izazvati **proboj** tranzistora, pri čemu bi struja naglo počela da raste a tranzistor bi bio uništen.

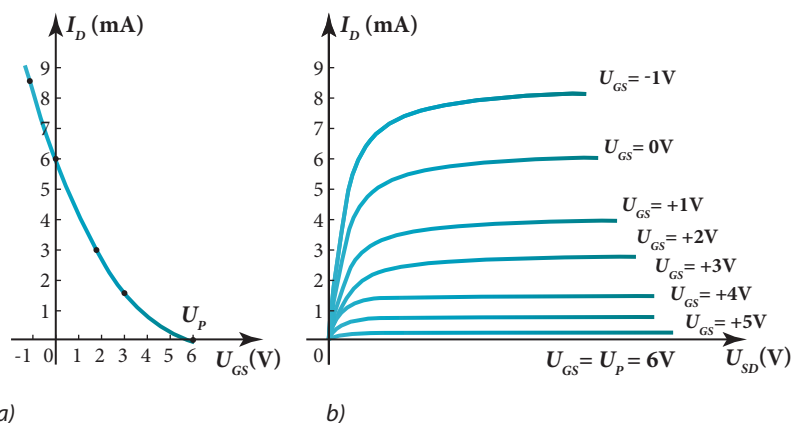
Posmatranjem karakteristika može se, takođe, uočiti da nižem naponu U_{GS} odgovara slabija izlazna struja i obrnuto. To svakako odgovara prethodno opisanom načinu rada N-kanalnog MOSFET-a. Kada napon U_{GS} dostigne određenu negativnu vrijednost (prekidni napon U_p), struja kroz tranzistor prestaje da teče, tj. tranzistor se nalazi u **zakočenju**.

Prenosna karakteristika MOSFET-a s ugrađenim kanalom

Prenosne karakteristike za različite vrijednosti napona U_{DS} kod N-kanalnog MOSFET-a s ugrađenim kanalom date su na slici 6.19. Za razliku od onih kod spojnog FET-a, one postoje i za $U_{GS} > 0$, iz razloga koji je naveden kod izlazne karakteristike.

Prethodno date karakteristike odnose se na N-kanalni MOSFET.

Kod MOSFET-a s kanalom P-tipa, svi naponi i struje suprotnog su smjera, pa se karakteristike crtaju u skladu s tim. Na slici 6.20 prikazane su prenosna i izlazne karakteristike MOSFET-a s ugrađenim kanalom P-tipa.



Slika 6.20. Karakteristike MOSFET-a s ugrađenim kanalom P-tipa: a) prenosna i b) izlazna

Pregled režima rada kod N-kanalnog MOSFET-a s ugrađenim kanalom prikazan je u tabeli 6.2. Za P-kanalni MOSFET tabelarni pregled svih režima rada, u zavisnosti od karakterističnih veličina, izvodi se na sličan način. Pri tome svi naponi imaju suprotan polaritet.

Tabela 6.2. Tabelarni pregled režima rada N-kanalnog MOSFET-a s ugrađenim kanalom

Režim rada	U_{GS}	U_{DS}	I_D
zakočenje	$U_{GS} \leq U_P$	-	$I_D = 0$
omski režim	$U_{GS} > U_P$	$U_{DS} < U_{DSzas}$	I_D raste s porastom napona U_{DS}
zasićenje	$U_{GS} > U_P$	$U_{DS} \geq U_{DSzas}$	$I_D \approx \text{const.}$

6.2.3 MOSFET s indukovanim kanalom

U praksi se mnogo češće koristi MOSFET s indukovanim kanalom. Za razliku od MOSFET-a s ugrađenim kanalom, kod ovog tipa tranzistora sa izolovanim gejtom ne postoji ugrađen kanal između sorsa i drejna, već se on formira dovođenjem adekvatnog napona između gejta i sorsa. Struktura MOSFET-a s indukovanim kanalom N-tipa prikazana je na slici 6.21.

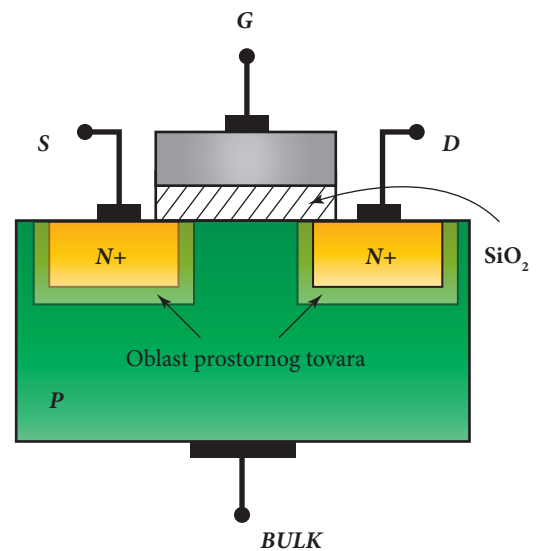
Slično kao kod MOSFET-a s ugrađenim kanalom, podloga (osnova) izrađena je od poluprovodnika P-tipa. Na njoj se nalaze dvije mnogo jače dopirane oblasti suprotnog tipa (N^+), koje zajedno s metalnim elektrodama na sebi predstavljaju sors i drejn. Na površinu osnove se, u dijelu između sorsa i drejna, nanosi sloj silicijum-dioksida (izolator), na koji je postavljena upravljačka elektroda (gejt). Gejt djelimično zahvata sors i drejn kako bi se obezbijedilo da kanal nakon formiranja dopre do ovih dviju oblasti.

Kada između elektroda MOSFET-a nijesu priključeni naponi, u okolini spojeva između osnove i N^+ oblasti se usljed difuzije formiraju oblasti prostornog tovara (slika 6.21). To je sada već dobro poznati proces koji se uvijek odvija pri obrazovanju PN-spoja.

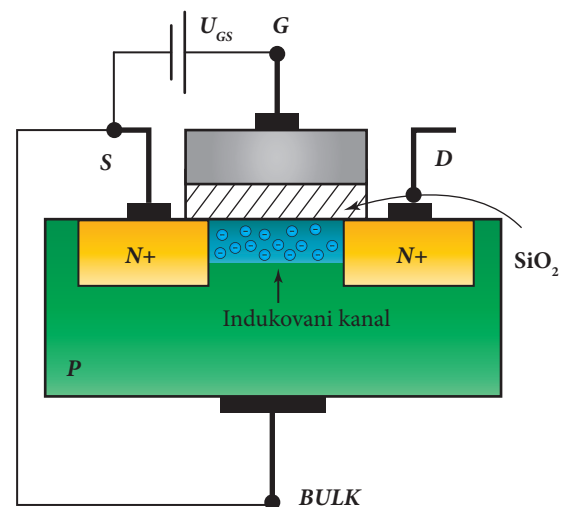
Kada je napon između gejta i sorsa (U_{GS}) jednak nuli, bez obzira na vrijednost napona između drejna i sorsa, kroz kanal neće proticati struja. Razlog je taj što se, za razliku od MOSFET-a s ugrađenim kanalom, između ovih dviju oblasti nalazi P-oblast (osnova), sa šupljinama kao većinskim nosiocima naelektrisanja. Kroz tu oblast ne može se ostvariti stalno kretanje elektrona.

Priključenjem napona U_{GS} kao na slici 6.22 stvara se električno polje, koje privlači manjinska negativna naelektrisanja iz osnove ka gejtu, i ta naelektrisanja (elektroni) akumuliraju se ispod izolatorske oblasti. U nekom trenutku, pri dovoljno visokom naponu U_{GS} , broj indukovanih negativnih naelektrisanja biće dovoljan da se između sorsa i drejna formira provodni kanal (slika 6.22).

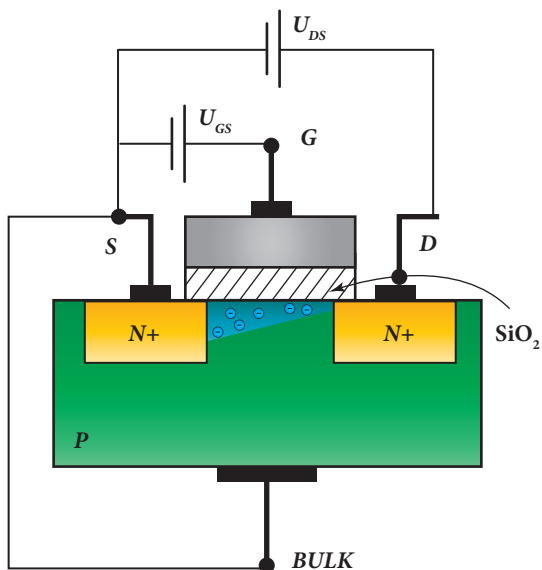
Minimalni napon između gejta i sorsa usljed koga dolazi do formiranja provodnog kanala naziva se **napon praga** (U_T).



Slika 6.21. Struktura MOSFET-a s indukovanim kanalom N-tipa



Slika 6.22. Formiranje kanala kod MOSFET-a s indukovanim kanalom N-tipa



Slika 6.23. Uticaj napona U_{DS} na provodni kanal

Uslov da struja počne da teče kroz kanal jeste priključenje jednosmjernog napona U_{DS} između drejna i sorsa (slika 6.23).

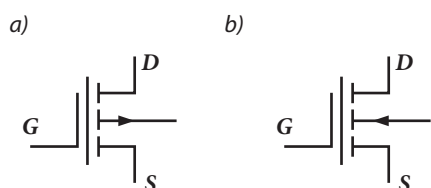
Kako bi se razmotrio uticaj napona U_{DS} na intenzitet struje koja protiče kroz kanal, potrebno je napon između gejta i sorsa održavati većim od napona praga i pritom konstantnim. Pri nižim vrijednostima napona U_{DS} , struja koja protiče kroz kanal prati promjenu ovog napona (raste). Čitav tranzistor tada se ponaša kao otpornik, odnosno radi u **omskom režimu**.

Sa daljim porastom napona U_{DS} , raste i napon inverzne polarizacije kod PN-spoja između osnove i oblasti drejna, što utiče na širenje oblasti prostornog tovara u tom dijelu. To će uticati na suženje provodnog kanala u blizini drejna, što se može vidjeti i na slici 6.23. Usljed toga, struja koja protiče kroz kanal sve sporije raste, da bi u nekom trenutku postala približno konstantna. MOSFET tada radi u **oblasti zasićenja**. Vrijednost napona U_{DS} pri kojoj tranzistor ulazi u zasićenje može se opisati izrazom:

$$U_{DSzas} = U_{GS} - U_T.$$

Simboli MOSFET-a s indukovanim kanalima N-tipa i P-tipa dati su na slici 6.24.

Kod P-kanalnog MOSFET-a s indukovanim kanalom sve važi obrnuto. Stvaranje kanala uslovljeno je dovođenjem negativnog napona na gejt. Uslov da bi se šupljine podstakle da iz oblasti sorsa kroz kanal prelaze na drejn, jeste da sors bude na većem potencijalu u odnosu na drejn. Pri tome je izlazna struja suprotnog smjera u odnosu na onu kod N-kanalnog MOSFET-a.

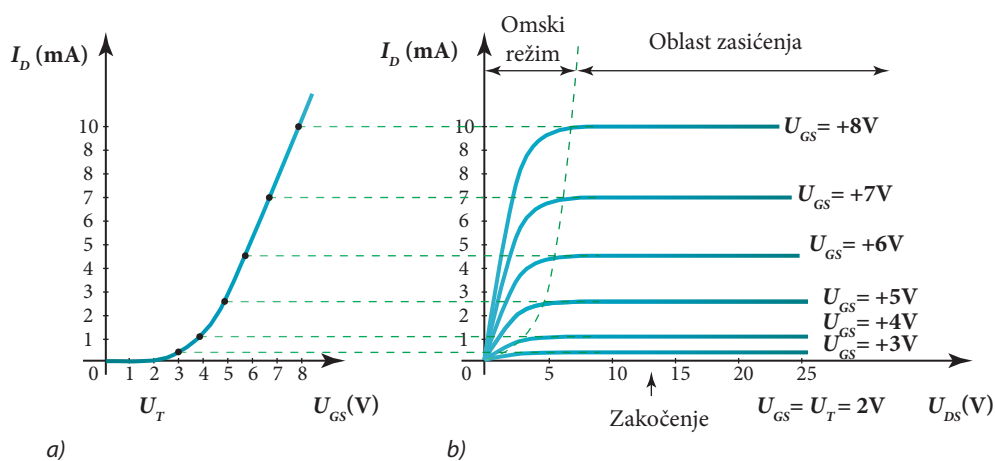


Slika 6.24. Simboli MOSFET-a s indukovanim kanalom: a) P-tipa i b) N-tipa

6.2.3.1 Statičke karakteristike MOSFET-a s indukovanim kanalom

Izlazna karakteristika MOSFET-a s indukovanim kanalom

Izlazna karakteristika MOSFET-a s indukovanim kanalom N-tipa data je na slici 6.25b.



Slika 6.25. Karakteristike MOSFET-a s indukovanim kanalom N-tipa: a) prenosna i b) izlazna

Data karakteristika veoma je slična prethodno opisanim izlaznim karakteristikama kod drugih tipova tranzistora s efektom polja.

Uočavaju se tri oblasti:

- *Oblast zakočenja* nastaje kada je napon između gejta i sorsa manji ili jednak naponu praga ($U_{GS} \leq U_T$). Kanal tada nije indukovan, i struja kroz tranzistor približno je jednaka nuli.
- *Omska oblast* nastaje pri $U_{GS} > U_T$. Tranzistor u ovoj oblasti ima konstantnu otpornost, i ponaša se kao naponom kontrolisani otpornik, čija je otpornost određena vrijednošću napona U_{GS} .
- *Oblast zasićenja* nastaje kada napon U_{DS} dostigne neku određenu vrijednost (U_{DSzds}). U tom režimu, bez obzira na dalji porast napona U_{DS} , struja drejna ostaje približno konstantna.

Ukoliko bi se napon U_{DS} prekomjerno povećao, došlo bi do naglog povećanja struje drejna i proboja tranzistora. Dio karakteristike koji se odnosi na taj režim izostavljen je.

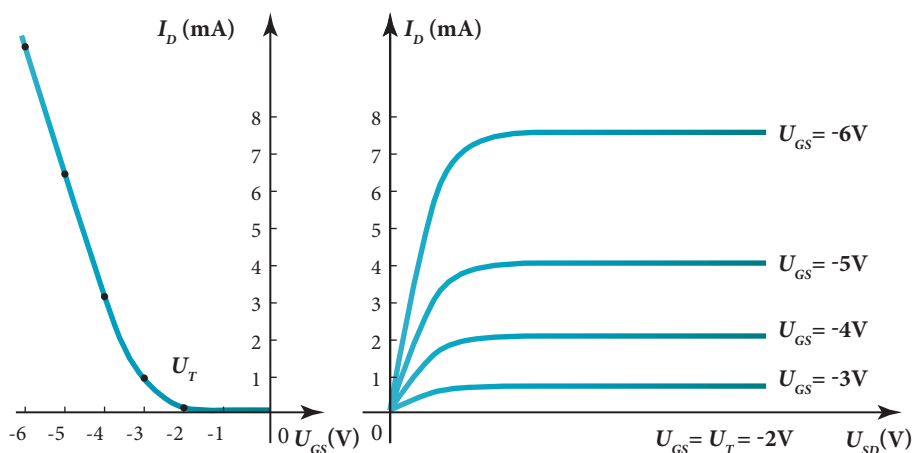
Prenosna karakteristika za MOSFET s indukovanim kanalom N-tipa data je na slici 6.25a. Veoma je slična onoj kod spojnog FET-a istog tipa, s razlikom što ovdje ona postoji za pozitivne vrijednosti napona U_{GS} , dok je tamo postojala za negativne. Zanimljiva je i sličnost između praga provođenja (U_T) kod MOSFET-a s indukovanim kanalom i prekidnog napona (U_p) kod spojnog FET-a, koja se može uočiti sa karakteristike.

Prenosna i izlazna karakteristika MOSFET-a s indukovanim kanalom P-tipa crtaju se na sličan način, pri čemu treba voditi računa o smjerovima struja i napona (slika 6.26).



Realizacija MOSFET-a

Pojačavači sa MOSFET-om rijetko se realizuju kao diskretne komponente zbog toga što MOSFET ne nudi veliko pojačanje, a istovremeno je kao diskretna komponenta skup. Međutim, njihova izrada u integrisanim kolima je jednostavna jer se, zahvaljujući MOSFET-u s indukovanim kanalom, tranzistori formiraju kao mala dopirana ostrvca na podlozi. Zbog veoma malih dimenzija, moguće je upakovati ogroman broj komponenti po jedinici površine. Na 1 cm² moguće je ugraditi nekoliko stotina miliona tranzistora, pri čemu taj broj stalno raste.



Slika 6.26. Karakteristike MOSFET-a s indukovanim kanalom P-tipa: a) prenosna i b) izlazne

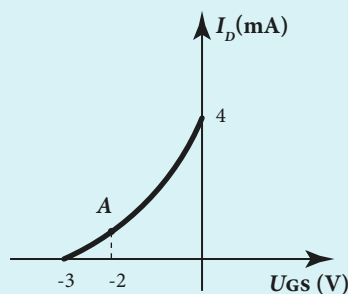
Pregled režima rada kod N-kanalnog MOSFET-a s indukovanim kanalom dat je u tabeli 6.3. Za P-kanalni MOSFET svi režimi rada, u zavisnosti od karakterističnih veličina, izvode se na sličan način. Pri tome svi naponi imaju suprotan polaritet.

Tabela 6.3. Tabelarni pregled režima rada N-kanalnog MOSFET-a s indukovanim kanalom

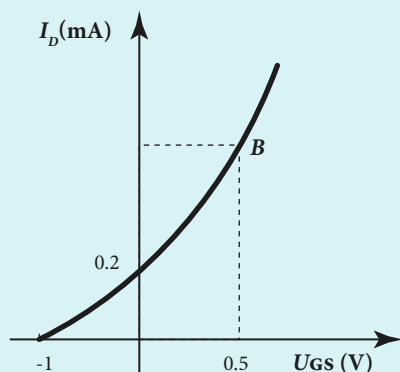
Režim rada	U_{GS}	U_{DS}	I_D
zakočenje	$U_{GS} \leq U_T$	-	$I_D = 0$
omski režim	$U_{GS} > U_T$	$U_{DS} < U_{GS} - U_T$	I_D raste s porastom napona U_{DS}
zasićenje	$U_{GS} > U_T$	$U_{DS} \geq U_{GS} - U_T$	$I_D \approx \text{const.}$



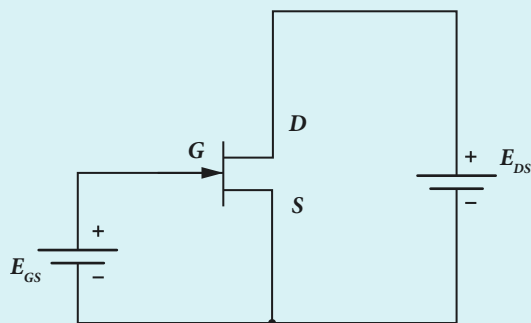
RAČUNSKE VJEŽBE



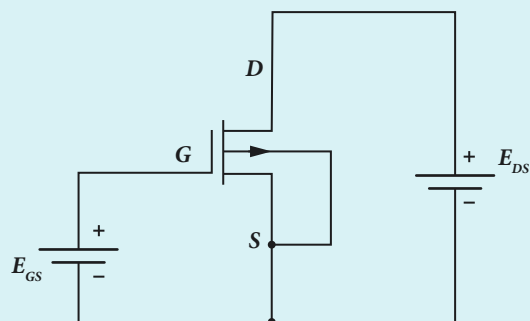
Slika 6.27



Slika 6.28



Slika 6.29



Slika 6.30

Primjer 6.1 Prenosna karakteristika FET-a u području zasićenja prikazana je na slici 6.27. Odredi tip FET-a.

Rješenje: Sa slike se vidi da je $U_p = -3$ V, $I_{DSS} = 4$ mA. Pošto je $U_p < 0$, onda se radi o N-kanalnom FET-u.

Primjer 6.2 Na slici 6.28 prikazana je prenosna karakteristika MOSFET-a u režimu zasićenja. Odrediti tip MOSFET-a.

Rješenje: S grafika se vidi da porastom U_{GS} raste i struja drejna, pa zaključujemo da se radi o N-kanalnom MOSFET-u. Kako kanal postoji i bez dovođenja napona na gejta, zaključujemo da se radi o MOSFET-u s ugrađenim kanalom.

Primjer 6.3 Odredi režim rada za N-kanalni FET sa slike 6.29 ako je poznato:

- $E_{GS} = -1$ V, $E_{DS} = 10$ V, $U_p = -3$ V i
- $E_{GS} = -5$ V, $E_{DS} = 1$ V, $U_p = -3$ V.

Rješenje:

a) Kako je napon između gejta i sorsa veći od prekidnog napona, zaključujemo da FET nije u zakočenju. Vrijednost napona U_{DS} veća je od vrijednosti napona između drejna i sorsa pri kojoj FET ulazi u zasićenje ($U_{DS} > U_{DSzas}$), pa se izvodi zaključak da se FET nalazi u zasićenju.

b) Napon između gejta i sorsa je manji od prekidnog napona, što upućuje na zaključak da je FET zakočen.

Primjer 6.4 Odredi režim rada za MOSFET sa slike 6.30 ako je poznato:

- $E_{GS} = -1$ V, $E_{DS} = -10$ V, $U_p = 6$ V i
- $E_{GS} = 1$ V, $E_{DS} = -1$ V, $U_p = 6$ V.

Rješenje:

a) Na osnovu simbola, jasno je da se radi o P-kanalnom MOSFET-u s ugrađenim kanalom. Kod P-kanalnog MOSFET-a s ugrađenim kanalom, pri $U_{GS} < 0$ tranzistor provodi struju. Ako se upoređi vrijednost napona U_{GD} sa U_p , izvodi se zaključak da se MOSFET nalazi u zasićenju.

b) Kako je napon između gejta i sorsa manji od prekidnog napona, zaključujemo da FET nije u zakočenju. Vrijednost napona U_{GD} veća je od vrijednosti napona stiskanja kanala pri kojoj MOSFET ulazi u zasićenje ($U_{GD} > U_p$), pa se izvodi zaključak da MOSFET radi u omskom režimu. Treba obratiti pažnju na oznake u indeksima karakterističnih napona, kao i na činjenicu da se radi o P-kanalnom MOSFET-u.

Primjer 6.5 Odredi u kom režimu rada radi tranzistorsko kolo sa slike 6.31. Podaci: $R_1 = 1$ M Ω , $R_2 = 470$ K Ω , napon praga $U_T = 5$ V, $E_{DD} = 10$ V.

Rješenje: MOSFET se polariše posredstvom naponskog razdjelnika koji čine otpornici R_1 i R_2 . Kako je $I_G = 0$, onda kroz otpornike R_1 i R_2 teče ista struja, i ona iznosi:

$$I_1 = \frac{E_{DD}}{R_1 + R_2} = \frac{10 \text{ V}}{14,7 \text{ M}\Omega} = 0,68 \text{ }\mu\text{A}.$$

S obzirom na to da je otpornik R_2 vezan između gejta i sorsa, zaključujemo da je $U_{GS} = R_2 I_1$, pa je:

$$U_{GS} = 0,68 \cdot 10^{-6} \text{ A} \cdot 4,7 \cdot 10^6 \text{ }\Omega = 3,197 \text{ V}.$$

Kako je dobijeni napon U_{GS} manji od praga $U_T = 5 \text{ V}$, zaključujemo da je MOSFET zakočen.

Primjer 6.6 Odredi režim rada tranzistorskog kola sa slike 6.32. Napon praga ovog tranzistora iznosi $U_T = 3 \text{ V}$. Mjerenjem je utvrđeno da je napon $E_{GS} = 8,5 \text{ V}$. Poznati podaci: $E_{DD} = 15 \text{ V}$, $R_1 = 10 \text{ M}\Omega$, $R_D = 4,7 \text{ k}\Omega$.

Rješenje: Struja gejta jednaka je nuli, pa kroz otpornik R_1 ne protiče struja. Potencijali gejta i drejna izjednačeni su, pa onda važi $U_{GD} = 0 \text{ V}$. Ova vrijednost napona U_{GD} je manja od U_T , što znači da je kanal između gejta i drejna stisnut, odnosno da tranzistor provodi u zasićenju.

Primjer 6.7 Odredi režim rada tranzistorskog kola sa slike 6.33. Napon praga ovog tranzistora iznosi $U_T = 4 \text{ V}$. Mjerenjem je utvrđeno da je napon $E_{GS} = 5 \text{ V}$. Poznati podaci: $E_{DD} = 12 \text{ V}$, $E_2 = 8 \text{ V}$, $R_S = 3 \text{ k}\Omega$, $R_D = 2 \text{ k}\Omega$, $R_1 = 3,5 \text{ k}\Omega$.

Rješenje: Struja gejta je jednaka nuli, pa je i pad napona na otporniku R_1 takođe jednak nuli. U tom slučaju, jednačina po II Kirhofovom pravilu za konturu I (slika 6.34) glasi:

$$E_2 - E_{GS} - R_S I_D = 0.$$

Sređivanjem prethodnog izraza i zamjenom poznatih vrijednosti, za struju I_D dobija se:

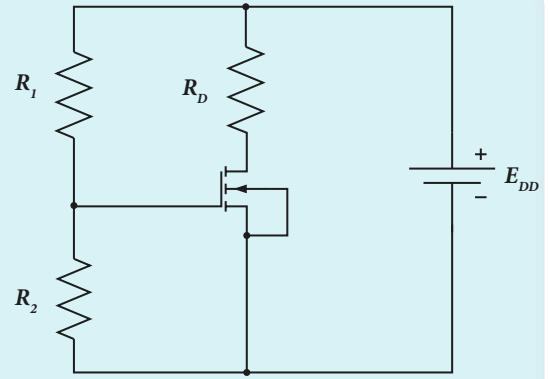
$$I_D = \frac{E_2 - E_{GS}}{R_S} = \frac{8 \text{ V} - 5 \text{ V}}{3 \text{ k}\Omega} = 1 \text{ mA}.$$

Ukoliko se napiše jednačina po II Kirhofovom pravilu za konturu II dobija se:

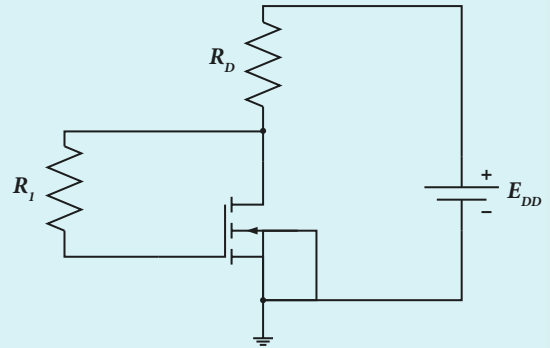
$$E_{DD} - R_D I_D - U_{DS} - R_S I_D = 0.$$

Sređivanjem prethodnog izraza i zamjenom poznatih vrijednosti, za napon U_{DS} dobija se:

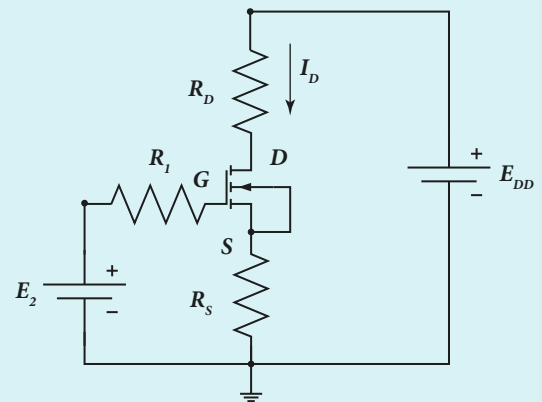
$$U_{DS} = E_{DD} - I_D (R_D + R_S) = 7 \text{ V}.$$



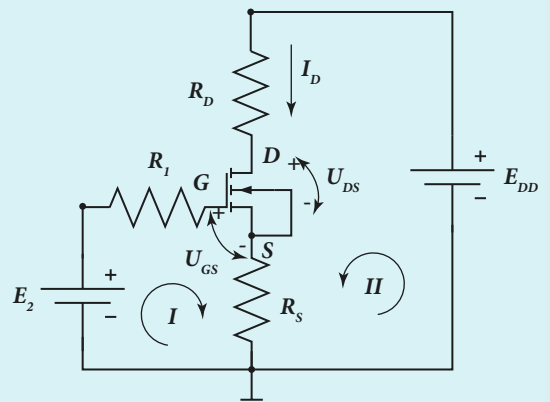
Slika 6.31



Slika 6.32



Slika 6.33



Slika 6.34

Poznato je da se vrijednost napona između drejna i sorsa pri kojoj tranzistor ulazi u zasićenje može opisati izrazom:

$$U_{DSzas} = U_{GS} - U_T.$$

Zamjenom poznatih vrijednosti dobija se:

$$U_{DSzas} = 1 \text{ V}.$$

Vrijednost napona U_{DS} do koje smo došli ($U_{DS} = 7 \text{ V}$) veća je od U_{DSzas} , pa zaključujemo da MOSFET u kolu sa slike 6.33 radi u režimu zasićenja.



REZIME

- Kod unipolarnih tranzistora struju čine samo glavni nosioci naelektrisanja, pa otuda i njihov naziv. Od bipolarnih tranzistora razlikuju se još po tome što se proticanje struje ne bazira na savladavanju polja potencijalne barijere i prelasku slobodnih nosilaca s jedne na drugu stranu PN-spoja, već se proticanje struje odvija kroz provodni kanal koji je izrađen kao P-oblast ili N-oblast.
- Unipolarni tranzistori imaju tri elektrode: gejt (G), sors (S) i drejn (D). Postoje dvije različite strukture unipolarnih tranzistora: *spojni* tranzistori s efektom polja (FET), i tranzistori s efektom polja sa izolovanim gejtom (MOSFET). U zavisnosti od toga od kog je tipa poluprovodnika izrađen provodni kanal, razlikuju se N-kanalni i P-kanalni tranzistori s efektom polja.
- Kod unipolarnih tranzistora postoje dvije vrste statičkih karakteristika: izlazna (koja predstavlja zavisnost struje drejna od napona između drejna i sorsa) i prenosna (koja predstavlja zavisnost struje drejna od napona između gejta i sorsa). Izlazne karakteristike svih tipova unipolarnih tranzistora veoma su slične, i na njima se uočavaju tri oblasti rada: omska oblast (u kojoj se tranzistor ponašaju kao promjenljivi otpornik), oblast zasićenja (u kojoj tranzistor radi kao pojačavač) i oblast proboja.

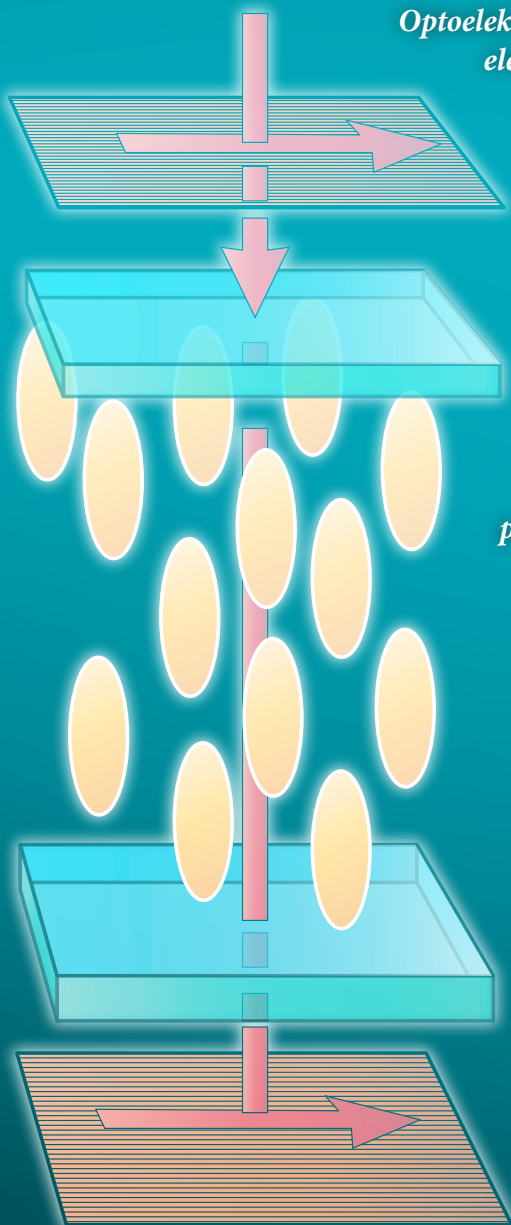


1. Navedi elektrode kod tranzistora s efektom polja i objasni ulogu svake od njih.
2. Objasni ulogu kanala kod tranzistora s efektom polja.
3. Ustanovi razliku između N-kanalnog i P-kanalnog FET-a.
4. Objasni značenje riječi 'spojni' u nazivu ove vrste tranzistora.
5. Argumentuj potrebu da PN-spoj između kanala i upravljačke oblasti kod FET-a bude inverzno polarisan.

6. Objasni što utiče na to da struja počne da protiče kroz kanal kod FET-a.
7. Utvrdi uzrok sužavanja kanala kod FET-a.
8. Razmotri uticaj sužavanja provodnog kanala na intenzitet struje koja kroz njega protiče.
9. Opiši okolnosti usljed kojih dolazi do prekida kanala kod N-kanalnog FET-a.
10. Identifikuj uzrok dominantnog prostiranja oblasti prostornog tovara na strani drejna kod FET-a.
11. Navedi uslove pod kojima FET radi u: a) aktivnom režimu, b) oblasti zasićenja i c) zakočenju.
12. Nacrtaj izlaznu karakteristiku N-kanalnog FET-a i na njoj izdvoj oblasti rada tog tranzistora.
13. Na osnovu izlazne karakteristike, analiziraj uticaj promjene napona U_{GS} na izlaznu struju kod N-kanalnog i P-kanalnog FET-a.
14. Na osnovu prenosne karakteristike, analiziraj uticaj promjene napona U_{DS} na izlaznu struju kod FET-a.
15. Opravdaj činjenicu da se izlazna i prenosna karakteristika kod FET-a ne daju za $U_{GS} > 0$.
16. Objasni u čemu je razlika u strukturi FET-a i MOSFET-a.
17. Izvrši podjelu tranzistora sa izolovanim gejtom (MOSFET) i objasni suštinsku razliku među njima.
18. Navedi uslove pod kojima MOSFET radi u: a) aktivnom režimu, b) oblasti zasićenja i c) zakočenju.
19. Opiši uticaj napona U_{GS} na rad MOSFET-a s ugrađenim kanalom.
20. Opiši uticaj napona U_{DS} na rad MOSFET-a s ugrađenim kanalom.
21. Navedi koja se od dvije vrste tranzistora s efektom polja više koristi pri proizvodnji integrisanih kola. Obrazloži odgovor.

7

Optoelektronske komponente



Optoelektronika je dio elektronike koji se bavi izučavanjem i primjenama elektronskih uređaja i sistema koji generišu svjetlost, sistema koji detektuju tu svjetlost, kao i uređaja koji upravljaju svjetlosnim zracima. Pod svjetlošću se obično podrazumijeva vidljiva svjetlost, koju čovjek zapaža. Međutim, svjetlost obuhvata i zračenje nevidljivo ljudskom oku, kao što su infracrveni i ultraljubičasti zraci.

U ovom poglavlju biće obrađene najvažnije optoelektronske komponente, principi njihovog rada i njihova primjena. Prateći dio ovog poglavlja jesu praktične vježbe 21–23 koje se nalaze na kraju udžbenika, u okviru glave VIII. Njihovom realizacijom učenici će se osposobiti za analizu načina rada i primjenu optoelektronskih komponenti.

7.1

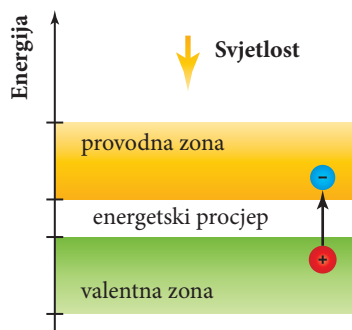
NAČIN RADA I PRIMJENA OPTOELEKTRONSKIH KOMPONENTI

Rad optoelektronskih uređaja zasnovan je na fizičkim dejstvima svjetlosti na elektronske materijale, posebno na poluprovodnike, koji se u elektronici dominantno koriste. Od fizičkih efekata najznačajniji su **fotoelektrični efekat** (na kojem je zasnovan rad *fotodioda* i *fototranzistora*) i **fotoprovodnost** (na čijem je efektu zasnovan rad *fotootpornika*).

Fotoelektrični efekat je pojava izbijanja elektrona iz nekog materijala pod uticajem svjetlosti.

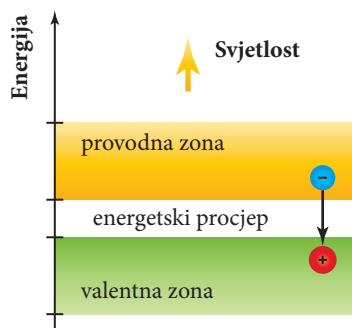
Prilikom osvjetljavanja poluprovodnika u njemu se povećava koncentracija i manjinskih i većinskih nosilaca naelektrisanja. To je takozvani *unutrašnji fotoelektrični efekat*. Ovaj efekat se javlja kada usljed energije fotona elektroni prelaze iz valentne zone u provodnu zonu (slika 7.1).

Usljed osvjetljavanja poluprovodnika povećava se i njegova provodnost. Ova pojava naziva se **fotoprovodnost**, i na njoj je zasnovana izrada fotootpornika.



Slika 7.1. Fotoelektrični efekat

Postoji i obrnuti proces, kada prilikom proticanja struje kroz poluprovodnik, usljed rekombinacije nosilaca, može biti emitovana svjetlost (slika 7.2). Ovakva komponenta predstavlja *izvor svjetlosti*.



Slika 7.2. Emisija svjetlosti

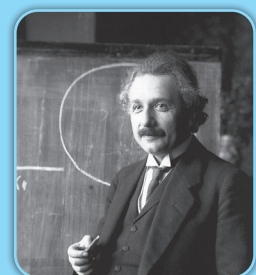


Ajnštajn je prvi došao do saznanja da svjetlost predstavlja skup elementarnih čestica, koje su kasnije nazvani fotoni. Fotoni se kreću brzinom svjetlosti, i ne postoje u stanju mirovanja. Svaki foton ima određenu energiju, koja je nedjeljiva, pa samim tim predstavlja i najmanju količinu energije. Ta energija naziva se kvant energije. Fotoni predstavljaju kvante svjetlosti, odnosno najmanje iznose energije koji se mogu prenijeti elektromagnetnim zračenjem.



Albert Ajnštajn (1872–1955), genijalni fizičar, jedan od najvećih umova i najznačajnijih ličnosti u istoriji čovječanstva.

Formulisao je specijalnu i opštu teoriju relativnosti, koja je dovela do revolucionarne promjene u modernoj fizici. Iako je najpoznatiji po teoriji relativnosti (posebno po jednačini koja izjednačava masu i energiju, $E = mc^2$), Nobelova nagrada za fiziku dodijeljena mu je za objašnjenje fotoelektričnog efekta.





Svjetlost

Svjetlost je vrsta elektromagnetnog zračenja koja je vidljiva ljudskom oku. Svjetlost se od svog izvora širi u formi talasa. Pravac prostiranja svjetlosti naziva se svjetlosni zrak. Uski valjkasti kanal unutar kojeg se prostire svjetlost naziva se svjetlosni snop. Dio fizike koja se bavi mjerenjem energije koju prenose talasi svjetlosti, kao i mjerenjem veličina koje su povezane s tom energijom, naziva se fotometrija.

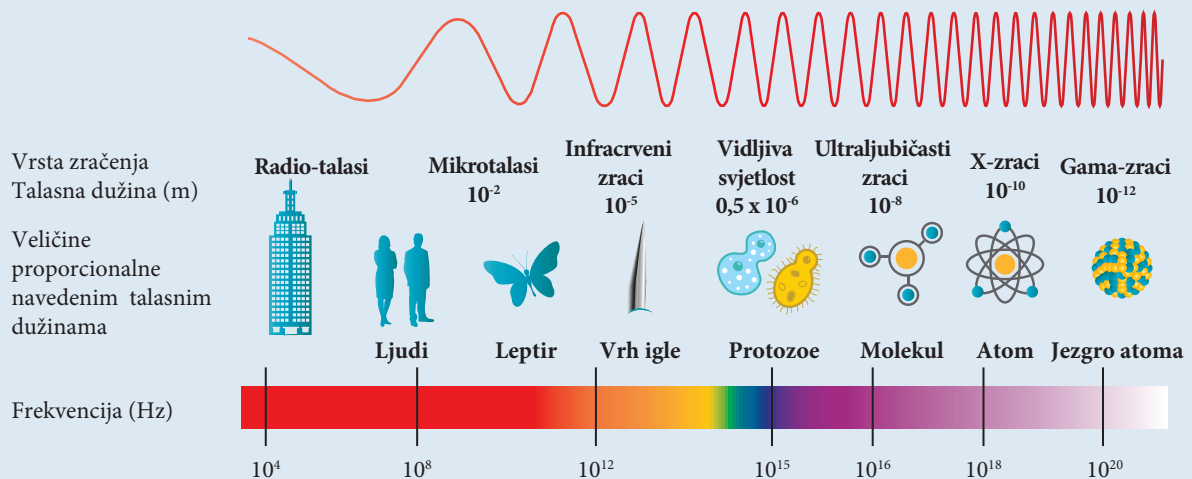
Skup svjetlosnih zraka koji prolaze kroz neku površinu čini svjetlosni fluks kroz tu površinu. Svjetlosni fluks označava se sa Φ . Jedinica svjetlosnog fluksa je lumen (lm). Ako snop svjetlosti prolazi kroz veću površinu, svjetlosni fluks ne mijenja mu se, ali mu se smanjuje gustina svjetlosnog fluksa. Gustina svjetlosnog fluksa, ili osvjetljenost, označava se sa E , i njena jedinica je luks (lx), $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2$. Osvjetljenost je jednaka količniku svjetlosnog fluksa i jedinice površine kroz koju svjetlost prolazi: $E = \Phi/S$.

Osnovna veličina u fotometriji, koja je istovremeno i osnovna jedinica u fizici, jeste jačina svjetlosnog izvora. Jedinica joj je kandela (cd). Jačina svjetlosti jedne svijeće iznosi oko 1 cd.

Elektromagnetni talasi

Elektroni u izvoru zračenja osciluju oko svojih ravnotežnih položaja i emituju energiju u obliku fotona, koji se šire u prostoru, stvarajući elektromagnetni talas.

Elektromagnetni talasi opisuju se talasnom dužinom, energijom i frekvencijom. Sve tri ove veličine međusobno su matematički povezane. Elektromagnetni talasi, poređani po svojim talasnim dužinama, čine elektromagnetni spektar. Elektromagnetni spektar uključuje sve elektromagnetne talase od najduže talasne dužine do najkraće: radio-talase, mikrotalase, infracrveno zračenje, vidljivu svjetlost, ultraljubičasto zračenje, x-zrake i gama zrake (slika 7.3).



Slika 7.3. Spektar elektromagnetnih talasa

Namjena elektromagnetnih talasa:

- radio-talasi – prenos informacija bežičnim putem, medicina i dr.
- mikrotalasi – mobilna telefonija, komunikacioni sateliti, radari, mikrotalase peći i dr.
- infracrveni zraci – industrija, nauka, medicina i dr.
- vidljiva svjetlost – elektronika, telekomunikacije i dr.
- ultraljubičasti zraci – elektronski uređaji, bar-kod čitači, forenzika, medicina i dr.
- x-zraci (rendgen) – medicina
- gama zraci – medicina, prehrambena industrija i dr.



elektromagnetni talas – međusobno spregnuto promjenljivo električno i promjenljivo magnetno polje koje se u obliku talasa širi od izvora u okolni prostor.

talasna dužina – najkraće rastojanje između dvije čestice, na pravcu prostiranja talasa, koje osciluju u istoj fazi.

7.1.1 Fotodioda

Poseban tip PN-spoja koji generiše struju kada se izloži dejstvu svjetlosti naziva se **fotodioda**. Fotodiode se nazivaju i *fotodetektor* ili *fotosenzori*. Rade u inverznom režimu, i pretvaraju svjetlosnu energiju u električnu.

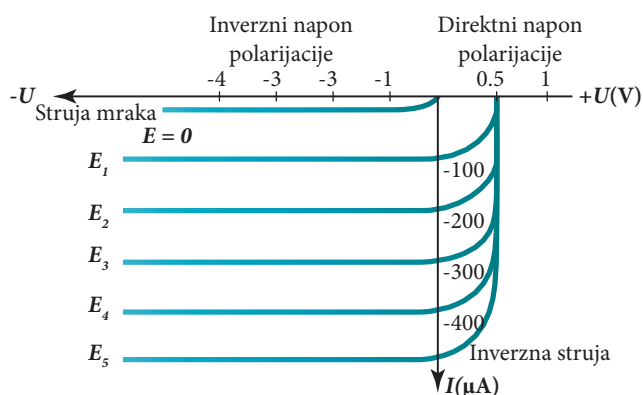
Fizički izgled i simbol fotodiode prikazani su na slici 7.4.

Fotodioda je optoelektronska komponenta čija je osnovna karakteristika da se inverzna struja zasićenja kroz nju mijenja s promjenom intenziteta svjetlosti koja pada na nju. Dakle, fotodioda predstavlja inverzno polarisan PN-spoj. U slučaju kada dioda nije osvijetljena, struju kroz spoj čini veoma mala inverzna struja zasićenja. Ova struja naziva se i *struja mraka*.

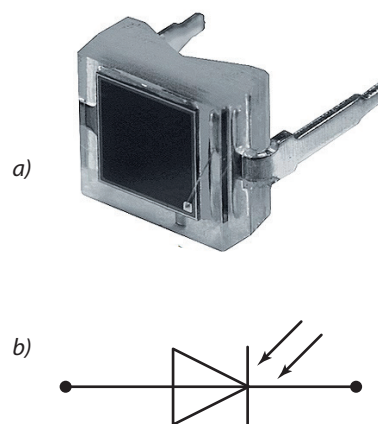
Nakon osvetljavanja diode (slika 7.5), fotoni svjetlosti izbijaju elektrone iz njihovih orbita u matičnim atomima, što prouzrokuje stvaranje parova elektron–šupljina. Proces izbijanja elektrona pod dejstvom fotona uglavnom se odvija u oblasti prostornog tovara inverzno polarisanog PN-spoja. Parovi elektron–šupljina nastali pod uticajem svjetlosti u oblasti prostornog tovara se razdvajaju i formiraju struju koju čine manjinski nosioci naelektrisanja. Ta struja naziva se *fotostruja*, i njena tipična vrijednost je reda mikroampera.

Porastom intenziteta svjetlosti stvara se sve više slobodnih nosilaca naelektrisanja koji se kreću kroz diodu, čime se povećava jačina struje. Dakle, intenzitet svjetlosne energije direktno je proporcionalan jačini struje kroz fotodiodu. Direktna polarizacija fotodiode prouzrokuje prestanak toka struje kroz tu diodu.

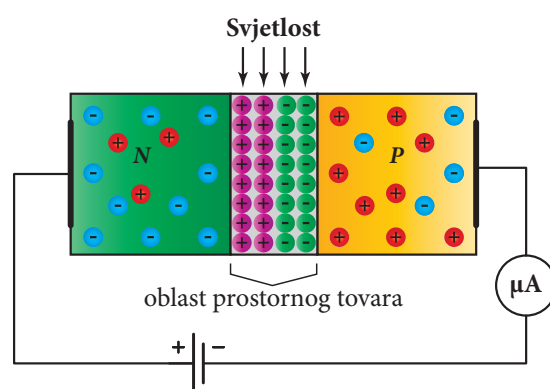
Na slici 7.6 prikazana je strujno-naponska karakteristika fotodiode.



Slika 7.6. Strujno-naponska karakteristika fotodiode



7.4. Fotodioda: a) fizički izgled i b) simbol



Slika 7.5. Struktura i polarizacija fotodiode

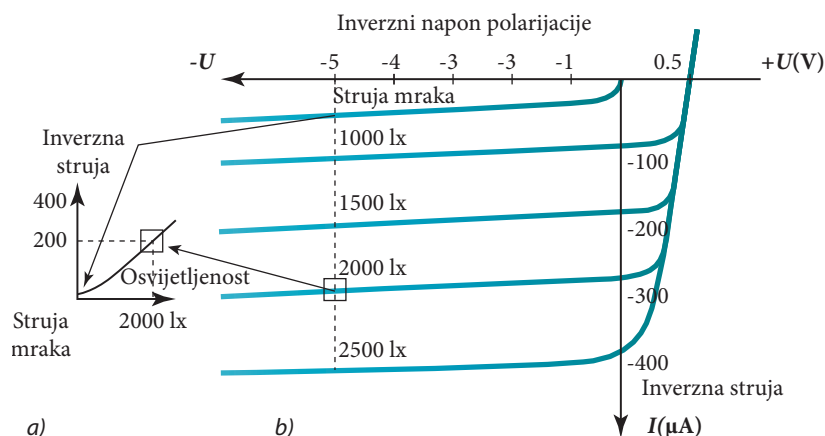
Na grafiku, na y -osu nanese su vrijednosti inverzne struje fotodiode, dok je na x -osi predstavljen inverzni napon polarizacije. Prva kriva na grafiku jeste struja mraka, koju generišu manjinski nosioci naelektrisanja u odsustvu svjetlosti. Sljedeće krive predstavljaju strujno-naponsku karakteristiku fotodiode pri većim fluksima svjetlosti koje padaju na diodu. Dakle, važi da je $E_1 < E_2 < E_3 < E_4 < E_5$. Kao što se vidi s grafika, sve krive su približno na međusobno istom rastojanju. To je zbog toga što se struja fotodiode povećava proporcionalno osvjetljenosti kojoj je izložena:

$$I_{\phi} = kE.$$

U ovoj formuli E predstavlja *osvjetljenost*. *Konstanta proporcionalnosti* (k) predstavlja *osjetljivost fotodiode*, i ona za tipičnu fotodiodu iznosi:

$$k = 100 \frac{\text{nA}}{\text{lux}}.$$

Na slici 7.7 zajedno sa strujno-naponskom karakteristikom fotodiode prikazan je i grafik zavisnosti struje fotodiode od osvjetljenosti. Sa slike se vidi da je zavisnost struje fotodiode od osvjetljenosti linearna.

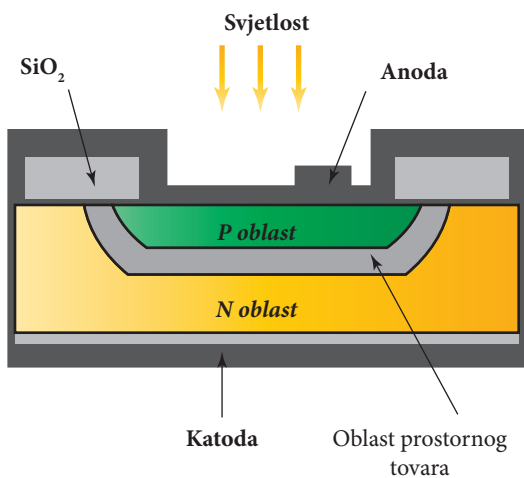


Slika 7.7. Zavisnost struje fotodiode od: a) osvjetljenosti i b) napona polarizacije

Na slici 7.8 prikazan je poprečni presjek fotodiode.

PN-spoj smješten je unutar materijala od stakla. To je urađeno kako bi se svjetlosnim zracima omogućilo da mogu da padaju na PN-spoj. Pošto je potrebno da samo PN-spoj bude izložen svjetlosti, ostali dijelovi staklenog materijala farbaju se u crno ili se preko njih nanosi tanak metalni sloj. Čitava konstrukcija fotodiode veličine je oko 2,5 mm.

U osnovi fotodiode može da radi u dva režima: *fotonaponski* i *fotoprovodljivi* režim. U **fotonaponskom režimu** diodu nije potrebno priključivati na bateriju za napajanje koja bi ju inverzno polarisala. Međutim, kada se dioda izloži svjetlosti, diodom će proteći struja koja će poticati od manjinskih nosilaca naelektrisanja.



Slika 7.8. Poprečni presjek fotodiode

U **fotoprovodljivom režimu** dioda se priključuje na bateriju koja ju inverzno polarizuje. Inverzni napon baterije za polarizaciju mijenja širinu oblasti prostornog tovara, čime se mijenja provodnost spoja.

Fotodiode imaju veliku primjenu u elektronici i telekomunikacijama. U elektronici se koriste za *izradu prekidačkih i logičkih kola*. Posebnu primjenu imaju u telekomunikacijama, gdje se koriste u *optičkim komunikacionim sistemima*. U optičkim komunikacijama bitovi podataka se kroz optička vlakna prenose u obliku svjetlosnih impulsa. Impulsi svjetlosti se u optičko vlakno unose laserom. Na izlaz optičkog kabla postavlja se fotodioda, koja svjetlosne impulse pretvara u električne. Dalje, fotodiode imaju masovnu primjenu u *izradi alarmnih uređaja*. U uređaju za dojavu provale, dok je fotodioda izložena zračenju svjetlosti, struja teče. Ako se, usljed neovlašćenog upada u zaštićen prostor, prekine snop svjetlosti koji pada na fotodiodu, aktivira se alarm.

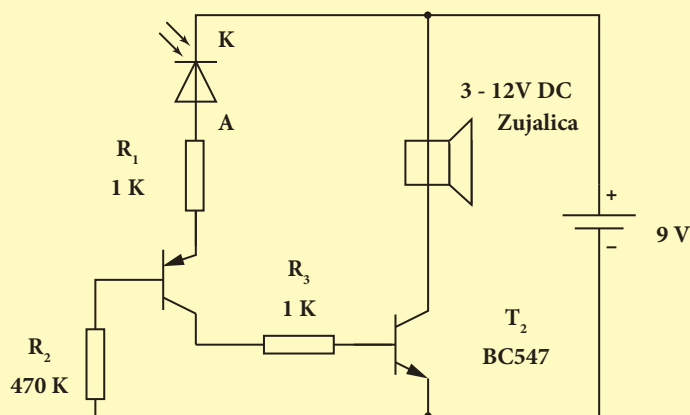


Fotodioda može da radi i pri direktnoj polarizaciji. Tada se ponaša kao izvor struje. Ovakve fotodiode primjenjuju se u izgradnji fotopanela kod solarnih izvora struje (slika 7.9).

Laser (engl. **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation – pojačavanje svjetlosti stimulisanom emisijom zračenja) naziv je za optički uređaj koji emituje koherentni snop nosilaca svjetlosti – fotona. Snop je koherentan, što znači da su elektromagnetni talasi koje laser emituje međusobno u istoj fazi, i prostiru se u istom smjeru. Za razliku od svjetlosti koju emituju uobičajeni izvori, kao što su npr. sijalice, laserska svjetlost uvijek je iste talasne dužine, i usmjerena je u uskom snopu.

Detektor plamena

Na slici 7.9 prikazana je električna šema jednostavnog detektora plamena, u kojem se kao senzor plamena koristi fotodioda. Fotodioda je inverzno polarisana, priključivanjem katode na pozitivni pol baterije za napajanje. Kada nije osvijetljena, fotodioda ne provodi, pa njome ne teče struja. Samim tim, nema ni kolektorske struje tranzistora T_1 . U ovom slučaju T_2 je zakočen, jer ne dobija nikakvu baznu struju iz kolektora tranzistora T_1 .



Slika 7.11. Električna šema detektora plamena



Slika 7.9. Solarni paneli



Slika 7.10. Laser



Slika 7.12. Detektor plamena

Kada fotodioda dobije svjetlost od plamena, počne da provodi, i kroz tranzistor T_1 proteče struja. Kolektorska struja tranzistora T_1 predstavlja baznu struju tranzistora T_2 , koji počne da provodi. Kroz zujalicu priključenu na kolektor tranzistora T_2 protiče struja, i zujalica se oglašava zvučnim signalom. Izgled detektora plamena dat je na slici 7.12.



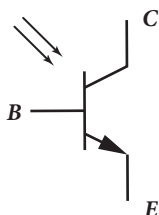
Slika 7.13. Fototranzistor

7.1.2 Fototranzistori

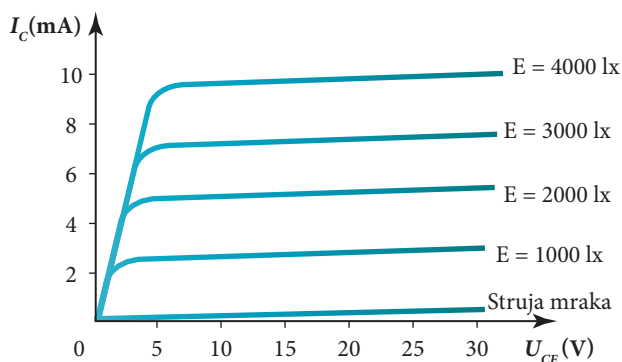
Fototranzistor (slika 7.13) troslojni je poluprovodnički uređaj čije je područje baze osjetljivo na svjetlost. Struja koja teče između kolektorskog i emitorskog područja posljedica je djelovanja svjetlosti na područje baze.

Kod fototranzistora poluprovodnik je otkriven, pa na njega može da pada svjetlost. Izrada fototranzistora slična je izradi običnog tranzistora, i razlikuju se u izradi baznog priključka. U fototranzistoru, baza se ne priključuje na napon baterije za napajanje, već se na ulaz dovodi svjetlosna energija. Simbol fototranzistora prikazan je na slici 7.14.

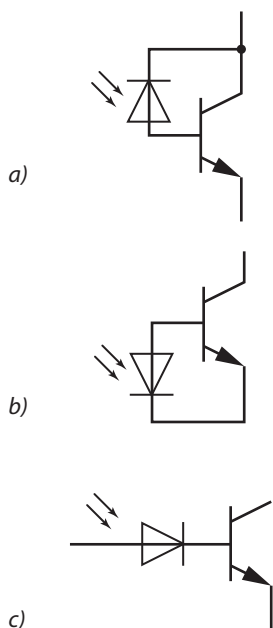
Na slici 7.15 prikazana je strujno-naponska karakteristika fototranzistora. Kao što se vidi s grafika, struja kolektora zavisi od osvijetljenosti fototranzistora.



Slika 7.14. Simbol fototranzistora



Slika 7.15. Strujno-naponska karakteristika fototranzistora



Slika 7.16

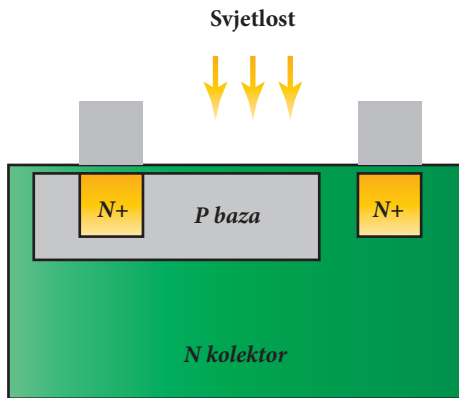


Kontrolno pitanje 7.1 Protumači koja od šema prikazanih na slici 7.16 predstavlja ekvivalentnu šemu fototranzistora. Objasni!

Izrada fototranzistora slična je izradi običnih tranzistora, osim što se fototranzistori postavljaju u providno kućište kako bi svjetlost mogla prodrijeti do tranzistorske strukture (slika 7.17). Ranije su se za izradu fototranzistora koristili germanijum i silicijum. Danas se tranzistori izrađuju od materijala koji su osjetljiviji na svjetlost, kao što

su galijum i arsen. Na površini spoja kolektor–baza pravljene su mali otvori, u koje su se umetala sočiva za usmjeravanje svjetlosnih zraka.

Fototranzistori su u širokoj upotrebi u elektronskim uređajima koji služe za detekciju svjetlosti, kao što su detektori dima. Koriste se i u uređajima kao što su CD plejeri i laseri.



Slika 7.17. Struktura fototranzistora



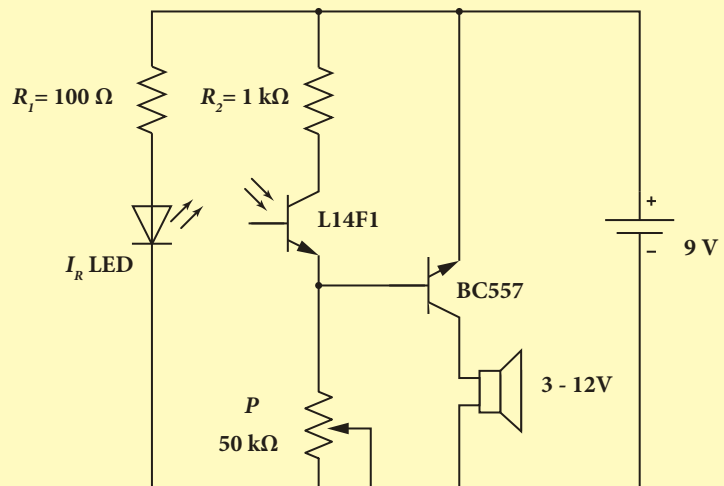
Alarm za detekciju provale

Na slici 7.18 prikazana je električna šema jednostavnog detektora provale, korišćenjem IC LED diode i fototranzistora. Ako se IC LED dioda i fototranzistor zatvore u crne cijevi i savršeno se poravnaju, dioda i fototranzistor mogu biti udaljeni i metar.

IR LED dioda (o njoj će kasnije detaljnije biti riječi) služi kao izvor infracrvenih (IR) zraka. Kada na putu infracrvenih zraka koje emituje LED dioda nema prepreka, zujalica će mirovati. Kada se IR zrak prekine, zujalica će se oglašiti.

Kada IR snop padne na osjetljivi fototranzistor L14F1 on počinje da provodi. Time se inverzno polariše PNP tranzistor BC557, koji pri tome postaje zakočen. Zujalica se u ovom slučaju ne oglašava. Kad se IR snop prekine, fototranzistor se isključuje, pa se niskim naponom na bazi PNP tranzistora on direktno polariše i počinje da provodi. Tada kroz zujalicu proteče struja, i ona generiše zvučni alarm.

Promjenljivim otpornikom (potenciometrom) podešava se polarizacija PNP tranzistora.



Slika 7.18. Električna šema detektora provale

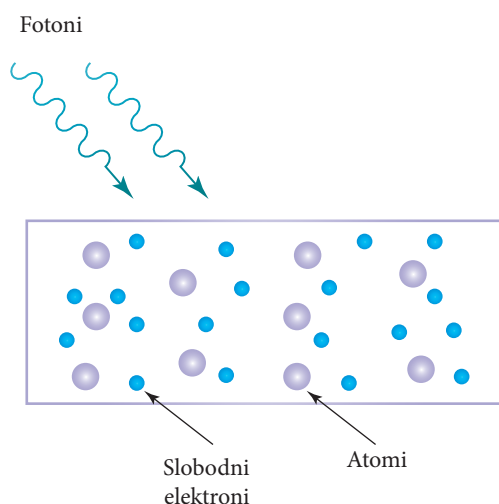


Slika 7.19. Detektor pokreta

I fotodiode i fototranzistori pretvaraju svjetlosnu energiju u električnu. Ali fototranzistori imaju veću primjenu, jer su osjetljiviji na svjetlost od fotodioda. Dalje, pogodniji su za korišćenje u električnim kolima, jer im je izlazna struja reda miliampera, dok je kod fotodioda reda mikroampera. Na drugoj strani, fotodiode brže reaguju na svjetlost od fototranzistora. Brzina uključenja/isključenja fotodiode je reda nanosekunde, dok je kod fototranzistora reda mikrosekunde.



Pronađi na internetu jednostavan projekat s fotodiodama i fototranzistorima. Nacrtaj električnu šemu i napravi popis elektronskih komponenti potrebnih za realizaciju tog projekta. Nabavi te komponente u prodavnici elektronskih komponenti u svom gradu ili poručivanjem putem interneta. U terminu koji je dogovoren s nastavnikom/nastavnicom, koristeći laboratorijske uređaje i eksperimentalnu pločicu prezentuj svoj projekat.



Slika 7.20. Generisanje slobodnih elektrona u fotootporniku

7.1.3 Fotootpornici

Električna provodljivost nekih poluprovodnika se povećava djelovanjem svjetlosti. Promjena električne provodljivosti poluprovodnika pod uticajem svjetlosti naziva se *fotoprovodljivost*.

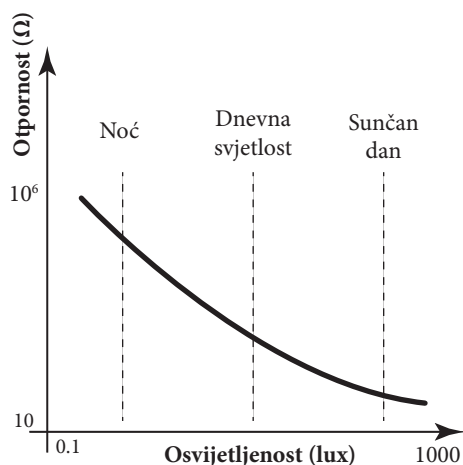
Fotootpornik je tip otpornika čija otpornost opada pri povećanju intenziteta svjetlosti. Drugim riječima, intenzitet struje kroz fotootpornik povećava se s povećanjem intenziteta svjetlosti koja na njega pada. Fotootpornik mijenja svoju otpornost samo kada se izloži svjetlosti.

Kada na fotootpornik padne svjetlost, neki valentni elektroni apsorbuju energiju svjetlosti i kidaju svoje veze s matičnim atomima, te postaju slobodni elektroni (slika 7.20).

Kada se energija svjetlosti kojoj je izložen fotootpornik poveća, velik broj valentnih elektrona dobije dovoljno energije od fotona i kida veze s matičnim atomima. Valentni elektroni koji prekinu veze s matičnim atomima, kao slobodni elektroni preći će u provodnu zonu, ostavljajući iza sebe slobodno mjesto – šupljinu. Slobodni elektroni koji se kreću, čine električnu struju. Na sličan način, šupljine koje se kreću u valentnoj zoni takođe predstavljaju struju. Količina električne struje koja teče kroz fotootpornik zavisi od broja generisanih nosilaca naelektrisanja, elektrona i šupljina.

Kada se poveća energija svjetlosti kojom je izložen fotootpornik, broj nosilaca naelektrisanja u fotootporniku takođe se povećava. Zbog toga se povećava i struja u fotootporniku. Povećanje struje znači smanjenje otpornosti. Dakle, otpornost fotootpornika opada kada se poveća intenzitet svjetlosti (slika 7.21).

U odsustvu svjetlosti, fotootpornici se ponašaju kao materijali velike otpornosti, dok se u prisustvu svjetlosti ponašaju kao materijali male otpornosti.



Slika 7.21. Zavisnost otpornosti fotootpornika od osvjetljenosti

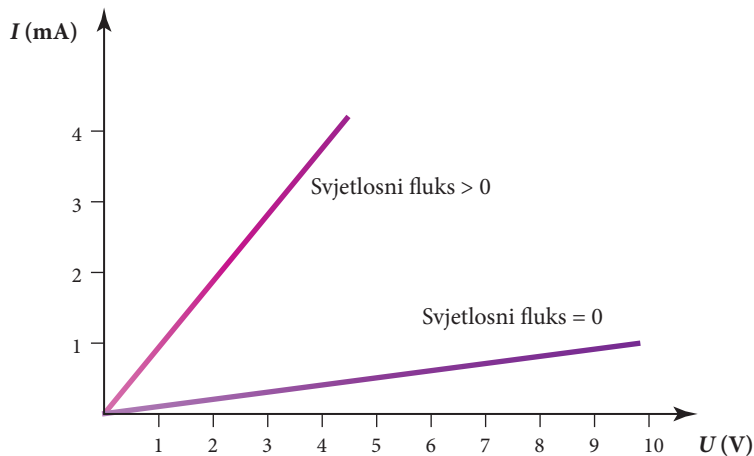
Na slici 7.22 prikazan je električni simbol fotootpornika.

Na slici 7.23 prikazana je strujno-naponska karakteristika jednog fotootpornika, prije i nakon osvjtljavanja. Očitavanjem vrijednosti napona i struje za svaku tačku na karakteristici, može se odrediti otpornost fotootpornika.

Fotootpornici se prave od visokootpornih poluprovodnika, najčešće silicijuma i germanijuma. Rjeđe se prave i od drugih materijala, kao što su kadmijum i selen.



Slika 7.22. Električni simbol fotootpornika



Slika 7.23. Strujno-naponska karakteristika fotootpornika

Fotootpornici se primjenjuju kod uličnih svjetiljki, za kontrolu njihovog uključivanja i isključivanja. Kada na fotootpornik pada dnevna svjetlost, to prouzrokuje isključivanje svjetiljki. U uslovima slabe osvjetljenosti, npr. u sumrak, fotootpornici aktiviraju ulične svjetiljke. Fotootpornici se takođe koriste u alarmnim uređajima, solarnim uličnim lampama i sl.

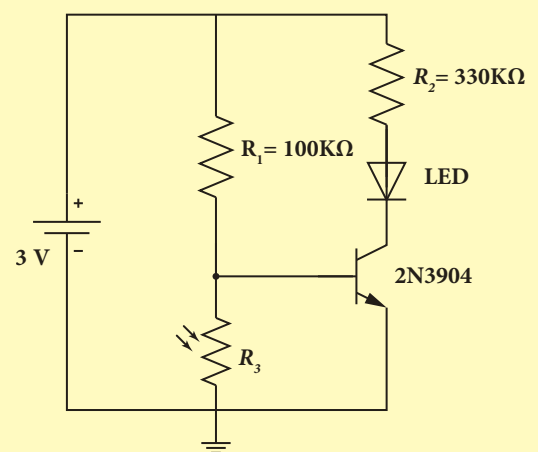


Uređaj za aktiviranje svjetiljki

Na slici 7.24 prikazana je električna šema jednostavnog uređaja za aktiviranje uličnih svjetiljki kad padne mrak.

Struja iz izvora teče kroz otpornik od $100\text{ k}\Omega$, a zatim može teći kroz bazu tranzistora ili kroz fotootpornik. Kada je fotootpornik izložen jakoj svjetlosti, njegov otpor je znatno manji od otpora na ulazu u tranzistor. Zbog toga će većina struje teći kroz fotootpornik, a vrlo malo će teći bazom tranzistora. Tranzistor je pri tome zakočen, odnosno ne daje dovoljno struje za uključenje i napajanje LED diode. LED se isključuje kada u okruženju ima mnogo svijetla.

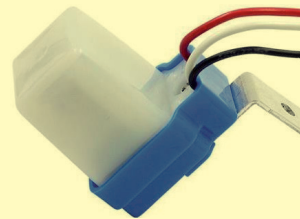
Međutim, kada počne da pada mrak, otpor fotootpornika postaje vrlo visok, i preko $2\text{ M}\Omega$. Budući da je to znatno veća otpornost od otpora na bazi tranzistora, većina struje sada će teći kroz bazu tranzistora. Tranzistor počinje da provodi, čime se uključuje LED dioda spojena na kolektorski priključak tranzistora.



Slika 7.24. Električna šema uređaja za aktivaciju svjetiljki



Na ovom principu zasnovani su uređaji za automatsko aktiviranje sijalica u sumrak. Umjesto da se koristi LED, koristi se sijalica. U tom slučaju samo treba podesiti vrijednosti napona i struje u električnom kolu.



Slika 7.25. Senzor dan-noć

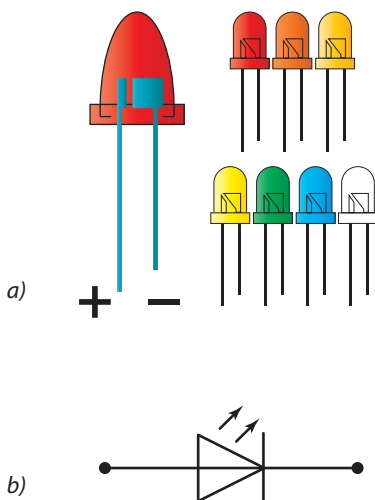


Kontrolno pitanje 7.2 Objasni na koji se način mijenja otpornost fotootpornika u zavisnosti od intenziteta upadne svjetlosti.

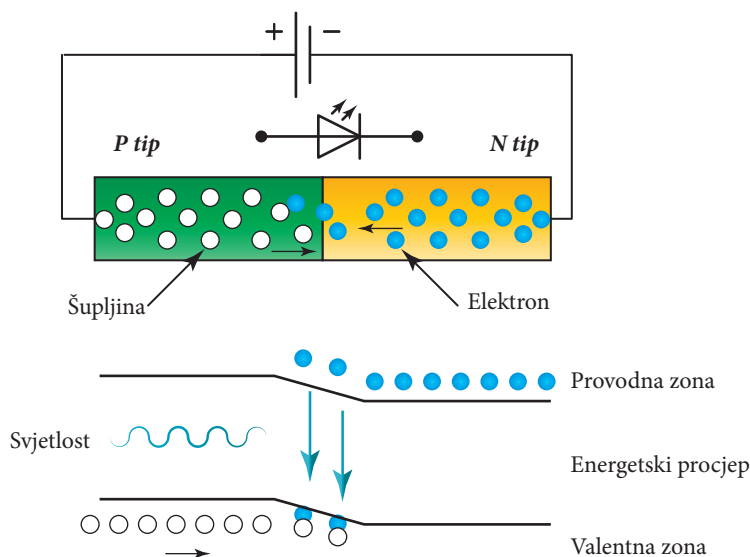
7.1.4 Svjetleća (LED) dioda

Do sada su analizirane poluprovodničke komponente koje svjetlosni signal ili svjetlosnu energiju pretvaraju u električni signal, odnosno u električnu energiju. Svjetleća dioda, ili **LED** (engl. **Light Emitting Diode** – dioda koja emituje svjetlost), vrši obrnuti proces: električnu energiju, odnosno električni signal, pretvara u svjetlosnu energiju. Kada se direktno polariše jednosmjernim naponom, kroz LED diodu proteći će struja, i ona će svijetljeti. Jačina svijetla zavisice od jačine struje koja protiče kroz diodu. Radi lakšeg raspoznavanja, anodni priključak uvijek je duži od katodnog (slika 7.26a). LED dioda se u električnim kolima predstavlja simbolom kao na slici 7.26b.

Princip rada svjetlećih dioda zasnovan je na kvantnoj teoriji. Prema toj teoriji, kada se elektron spušta s višeg energetskeg nivoa na niži energetskeg nivo, on otpušta energiju, pri čemu emituje foton svjetlosti (slika 7.27). Naime, elektron u valentnoj zoni ima manju energiju od elektrona u provodnoj zoni za onoliko koliko iznosi širina energetskeg procjepa. Svjetleće diode izrađuju se od poluprovodničkih materijala kod kojih se rekombinacija odvija direktnim prelaskom elektrona iz provodne u valentnu zonu, pri čemu se oslobađa energija. Ova energija pretvara se u foton svjetlosti. Energija emitovanog fotona jednaka je energetskeg procjepu između nižeg i višeg energetskeg nivoa.



Slika 7.26. Svjetleće (LED) diode:
a) grafički prikaz i b) simbol



Slika 7.27. Princip rada svjetleće (LED) diode

Na slici 7.27 prikazan je i proces emitovanja svjetlosti. Da bi poluprovodnik emitovao svjetlost, neophodno je da postoji velik broj pobuđenih elektrona. Pobuđivanje elektrona s nižeg na viši energetski nivo najbolje se postiže direktnom polarizacijom PN-spoja. Usljed direktne polarizacije, elektroni (na slici označeno kao crveni kružići) prelaze iz N-oblasti u P-oblast, gdje se rekombinuju sa šupljinama (bijeli kružići). Pri rekombinaciji elektrona i šupljina, emituju se fotoni svjetlosti, tj. dioda svijetli.

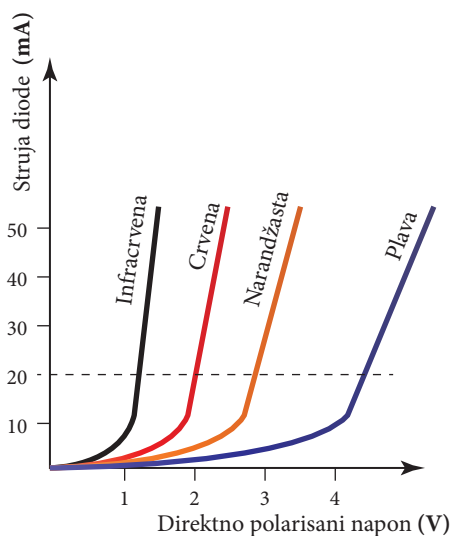
Od širine zabranjene zone zavisi energija fotona, odnosno talasna dužina svetlosti. Izborom poluprovodnika možemo dobiti željenu talasnu dužinu svjetlosti, odnosno njenu boju. Boja emitovane svjetlosti zavisi od vrste materijala od kojih je sagrađena LED dioda. Tako npr. spoj aluminijuma, galijuma i fosfora daje zelenu boju, spoj cinka i selena plavu, a spoj galijuma i fosfora žutu boju svjetlosti. Neki materijali emituju i nevidljive zrake. Na primjer, spoj galijuma i arsena daje infracrveno zračenje, pa se taj tip LED diode koristi kod daljinskih upravljača.

Napon provođenja kod svjetlećih dioda veći je od napona silicijumskih. Napon svjetleće diode zavisi od talasne dužine svjetlosti koju dioda emituje, i nalazi se u rasponu od 1,2 V za crvenu, do 2,4 V za ljubičastu boju.

Na tržištu postoje svjetleće diode s različitim karakteristikama, koje uključuju boju emitovane svjetlosti, talasnu dužinu zračenja, intenzitet svjetlosti i sl. Važna karakteristika svjetlećih dioda jeste boja. U početku su se koristile samo crvene LED diode. Kako je upotreba LED dioda rasla, vršena su istraživanja s različitim poluprovodnim materijalima i metalima, čijim su se kombinovanjem dobijale različite boje (slika 7.28).



Slika 7.28. LED trake koje emituju svjetlost različitih boja



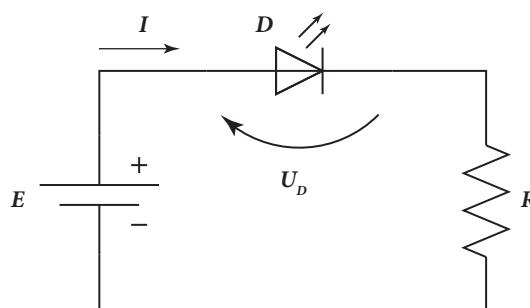
Slika 7.29. Krive zavisnosti struje LED dioda od napona direktne polarizacije

Grafik na slici 7.29 prikazuje krive zavisnosti struje LED dioda od napona direktne polarizacije. Svaka kriva na grafiku prikazuje različitu boju.

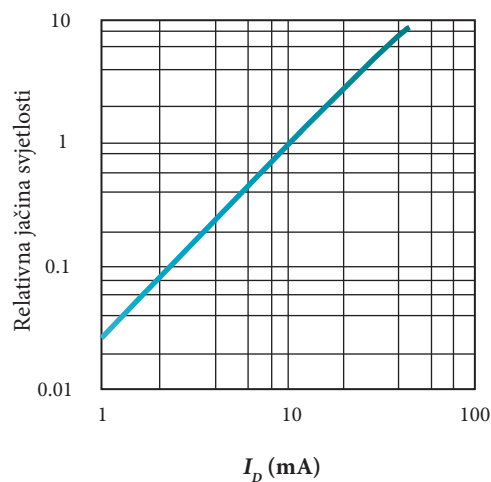
Na slici 7.30a prikazan je način vezivanja svjetleće diode u kolo električne struje. Struja diode je:

$$I = \frac{U - U_D}{R}$$

Ukoliko se struja diode poveća, povećava se i relativna jačina svjetlosti (slika 7.30b).



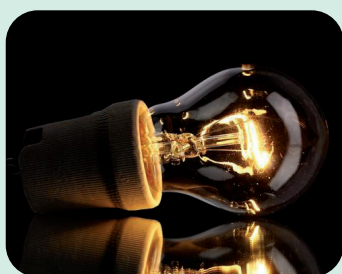
a)



b)

Slika 7.30. a) Vezivanje svjetleće diode u kolo; b) Zavisnost relativne jačine svjetlosti od struje direktno polarisane diode

LED sijalice (slika 7.31b) traju 25 puta duže nego klasične sijalice sa užarenim vlaknom. Pri tome troše i do 80 odsto manje električne energije, što ih čini dominantnim sa stanovišta energetske efikasnosti. U trenutku pisanja ovog udžbenika, prodaja i proizvodnja klasičnih sijalica sa užarenim vlaknom zabranjena je u većini evropskih zemalja. I u pogledu ekologije, LED sijalice dominantne su u odnosu na sve ostale tipove osvetljenja.



a)



b)

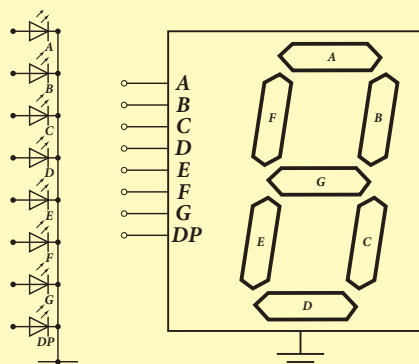
Slika 7.31. Sijalica: a) sa užarenim vlaknom i b) LED

Relativna jačina svjetlosti neke talasne dužine definiše se kao količnik jačine svjetlosti na toj talasnoj dužini i jačine svjetlosti na talasnoj dužini pri kojoj je emitovana svjetlost najjača.

Svjetleće diode se, zbog mnogo manje potrošnje u odnosu na klasične sijalice sa užarenim vlaknom, danas dominantno koriste za osvetljenje u domaćinstvima i industriji. Takođe imaju primjenu u automobilskoj industriji za izradu svjetala automobila, u industriji zabave, za izradu uređaja za svjetlosnu signalizaciju, kao pozadinsko osvetljenje kod LED ekrana, te u mnogim drugim oblastima.



Veliku primjenu LED diode imaju u izradi sedmosegmentnih indikatora (slika 7.32). Svaki od sedam segmenata jeste dioda izduženog oblika, koja svijetli kada se kroz nju propusti struja.



Slika 7.32. Sedmosegmentni indikator od LED dioda



Slika 7.33. Prikazivanje vremena na displeju pomoću sedmosegmentnih indikatora

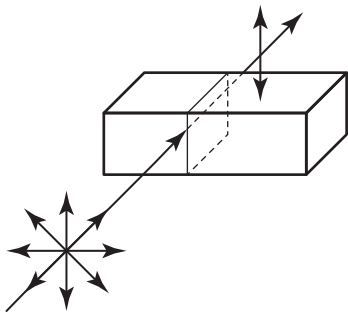
7.2

ZNAČAJ I PRIMJENA TEČNIH KRISTALA

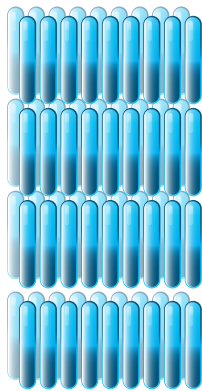
Već je rečeno da je vidljiva svjetlost jedna vrsta elektromagnetskog zračenja. Talasne dužine vidljive svjetlosti su od 420 nm (ljubičasta) do 750 nm (crvena). Ispod 400 nm su ultraljubičasti (ultravioletni), a iznad 700 nm infracrveni zraci, koji su nevidljivi ljudskom oku. U području vidljive svjetlosti (420–750 nm) razlike u talasnim dužinama, odnosno frekvencijama, opažamo kao različite boje. Sve boje imaju svoju frekvenciju i talasnu dužinu. Svaka nijansa plave, zelene, crvene ili žute boje ima svoju jedinstvenu talasnu dužinu, odnosno jedinstvenu frekvenciju.

Svjetlosni izvori zrače svjetlosne talase kod kojih se ravni oscilovanja stalno mijenjaju. Međutim, svjetlosne talase je moguće „natjerati“ da osciluju u samo jednoj ravni. Ovaj proces naziva se *linearna polarizacija*. Linearna polarizacija je pretvaranje prostornog u ravanski talas.

Jedan od načina dobijanja polarizovanog talasa jeste propuštanje talasa kroz odgovarajuće **filtre**, koji propuštaju čestice koje osciluju u jednom pravcu, dok sve ostale čestice koje osciluju u drugim pravcima bivaju apsorbovane (slika 7.34). Filtar u kojemu se vrši polarizacija naziva se *polarizator*. Filtri se najčešće izrađuju od prirodnih kristala.



Slika 7.34. Polarizacija svjetlosti



Slika 7.35. Raspored molekula tečnih kristala



Slika 7.36. LCD ekran



LCD ekran je 60-ih godina XX vijeka počeo primjenjivati američki fizičar Džejms Fergason. LCD ekrani zasnovani su na interakciji tečnih kristala s polarizovanim svjetlosnim talasima i električnim poljem.

Poznato je da postoje tri osnovna stanja u kojima se materija može naći: čvrsto, tečno i gasovito. Međutim, neki materijali se ne pokoravaju uobičajenim optičkim svojstvima bilo kog od ova tri agregatna stanja. Primjer je gel, koji nije u potpunosti čvrst a nije ni tečan.

Istraživanja njemačkog fizičara Ota Lemana dovela su do toga da se prihvati novi oblik materije, poznat pod imenom **tečni kristal**. Kao što mu ime kaže, tečni kristal pokazuje karakteristike i čvrstog i tečnog stanja. Tečni kristali posjeduju neke osobine tečnosti, tečni su i na sobnoj temperaturi zauzimaju oblik suda u kome se nalaze, ali i kristala, kao što je uređen položaj molekula u prostoru.

Materija se može prevesti u oblik tečnog kristala na dva načina. Prvi je povećanjem temperature određenih čvrstih tijela ili snižavanjem temperature nekih tečnosti. Većina poznatih tečnih kristala nastaje na ovaj način, i ovakvi tečni kristali nazivaju se *termotropskim*. Drugi način da neka supstanca pređe u tečni kristal jeste njenim rastvaranjem u odgovarajućim rastvaračima. Ovako proizvedeni kristali nazivaju se *liotropni*.

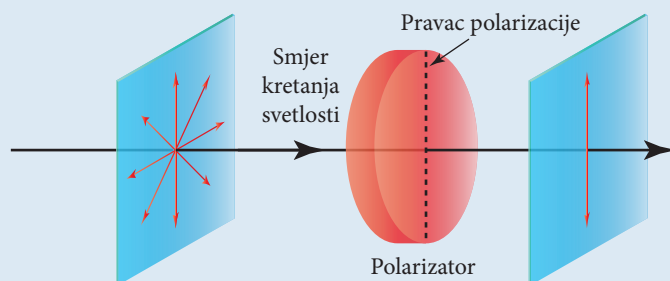
Molekuli tečnih kristala su izduženi, u obliku zaobljenog štapića kristala. Najčešće su organizovani u slojevima, koji lako klizaju jedni preko drugih, pri čemu su njihove duže ose paralelne u odnosu na ravan tih slojeva (slika 7.35).

Jedan kraj molekula je pozitivan a drugi negativan, dok je molekul ukupno električno neutralan. Ako se molekuli izlože dejstvu električnog polja, mogu se usmjeriti u njegovom smjeru. Dakle, električno polje utiče na tečne kristale, jer se pod njihovim uticajem može kontrolisati orijentacija molekula, a samim tim i njihova optička svojstva. Ako se tečni kristali izlože malim naponima, od 3 do 5 V, promijenice se pravac orijentacije molekula, usljed čega se mijenja indeks prelamanja, odnosno boja. Zbog ove osobine, tečni kristali se koristi u mnogim uređajima, a najpoznatija primjena tečnih kristala jeste **ekran od tečnih kristala (LCD – Liquid Crystal Display)**.



Polarizacija svjetlosti u tečnom kristalu

Princip rada ekrana s tečnim kristalom zasnovan je na polarizaciji svjetlosti. Pri polarizaciji se koriste filtri s ugrađenim skupom paralelnih linija. Kako su talasi prirodne svjetlosti orijentisani pod slučajnim uglovima, te linije propuštaju samo one zrake svjetlosti koje su orijentisane paralelno tim linijama. Dodavanjem drugog filtra, s linijama raspoređenim normalno u odnosu na linije prvog filtra, svjetlost bi bila potpuno zaustavljena. Svjetlost bi prošla kroz drugi polarizator jedino u slučaju ako bi njegove linije bile paralelne s linijama prvog filtra, ili ako bi se svjetlost u međuprostoru polarizovala tako da odgovara drugom polarizatoru. Baš na ovom principu, s obrtanjem svjetlosti, zasnovan je rad tipičnog LCD ekrana. Uređaj se sastoji od dva međusobno ukrštena polarizujuća filtra, između kojih se nalazi tečni kristal (slika 7.37).



Slika 7.37. Polarizacija svjetlosti u tečnom kristalu

Polarizatori su izgrađeni sa linijama, koje su međusobno raspoređene pod uglom od 90 stepeni. Na ovaj način bi, kao što je opisano, zaustavili svu svjetlost koja bi pokušala da prođe kroz njih. Međutim, između ovih polarizatora postavlja se tečni kristal, debljine nekoliko mikrona, s molekulima orijentisanim tako da obrću svjetlost koja kroz njih prolazi za ugao od 90 stepeni, čime omogućuju prolaz svjetlosti kroz drugi filter.

Tečni kristal postavlja se između elektroda, napravljenih od providnog električnog provodnika, koje su priključene na električni napon. Promjenom napona na elektrodama, podešava se i smjer orijentacije molekula tečnog kristala. Naponom na elektrodama upravlja se orijentacijom svjetlosti, odnosno kontroliše se njen prolazak kroz drugi filter (slika 7.38).

Jedna od elektroda može se izgraditi u obliku znaka od sedam segmenata (slika 7.39), što omogućava izradu numeričkog displeja koji se koristi kod kalkulatora, ručnih satova itd.

LCD ekrani TV prijemnika, računara i sličnih uređaja imaju malu količinu zračenja, svjetliju sliku i malu potrošnu struje.

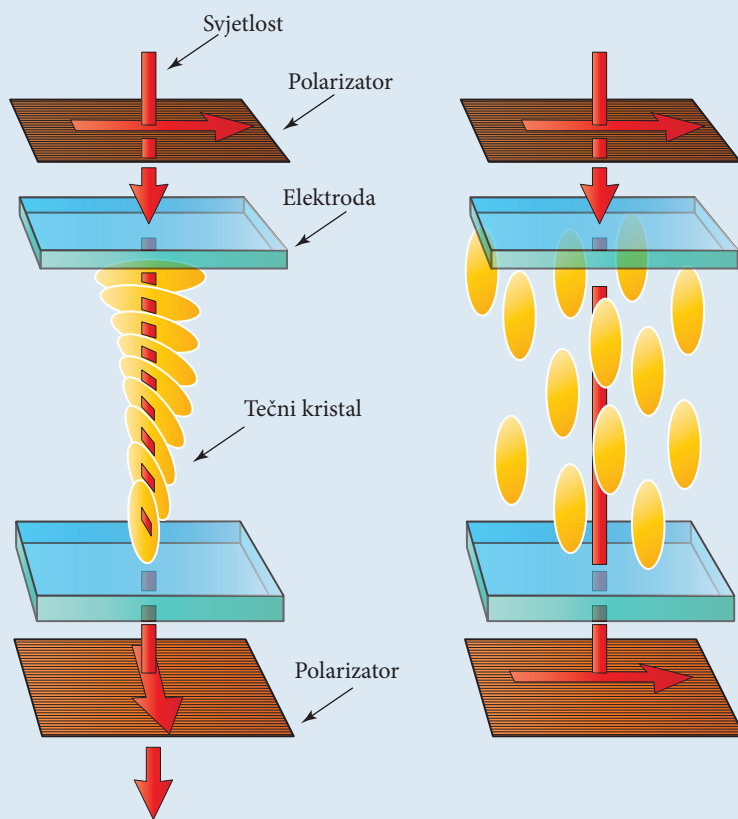
Da bi LCD ekran mogao pokazivati boje, mora imati tri elementa sa crvenim (**R**ed), zelenim (**G**reen) i plavim (**B**lue) filtrima, koji propuštaju samo svjetlost određene talasne dužine, odnosno boje. **RGB filtri** koriste se pri formiranju osnovnog elementa slike na ekranu koji se naziva **piksel**. Ostale boje nastaju miješanjem osnovnih boja (crvene, zelene i plave), kao što je prikazano na slici 7.40.



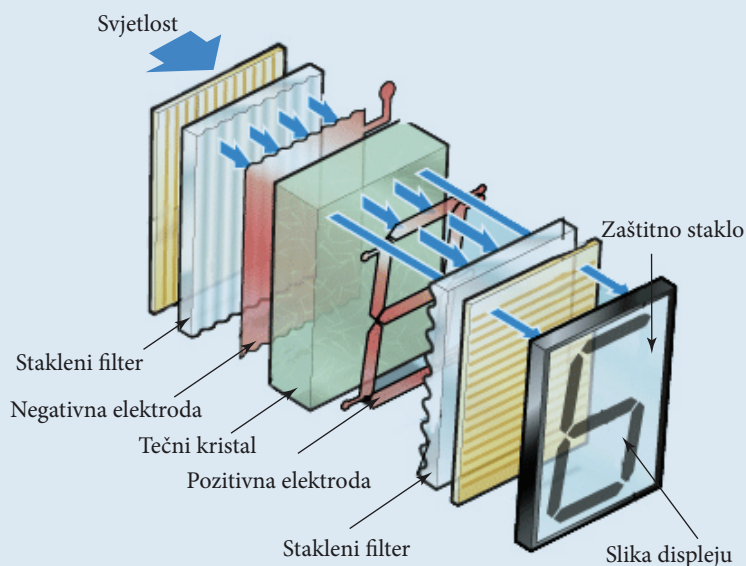
Slika 7.40. Aditivno miješanje boja

Odabirom napona koji upravljaju filtrima, svaki element može imati 256 nijansi boje. Množenjem 256 nijansi za crvenu, zelenu i plavu boju, moguće je dobiti paletu od 16,8 miliona različitih boja, koje je svaki piksel u stanju da prikaže.

Dimenzije slike izražene brojem piksela po širini i brojem piksela po visini, predstavljaju rezoluciju slike. Ako je, na primjer, rezolucija ekrana 1024×768 , slika na ekranu formira se od 1.310.720 piksela. Očigledno je da povećanjem rezolucije slika dobija više detalja i postaje oštija.



Slika 7.38. Princip rada LCD ekrana



Slika 7.39. Princip rada numeričkog LCD displeja



Holografija je metoda stvaranja i reprodukcije trodimenzionalnih slika primjenom svjetlosti, koju najčešće generiše laser. Holografija ima veliku primjenu u medicini i tehnici. Tehnike holografije koriste se pri izradi novčanica radi njihove zaštite od falsifikovanja.

Nanotehnologija je nauka koja uključuje fiziku, hemiju, biologiju i inženjerske tehnologije, a bavi se materijalima manjim od 100 nanometara. Nanotehnologija primjenjuje istraživanja iz navedenih nauka za proizvodnju materijala s posebnim osobinama. Procjenjuje se da će biti osnovna nauka budućeg razvoja elektronike, medicine, poljoprivrede i građevinarstva.

Osim LCD-a, postoji velik broj drugih primjena tečnih kristala. Na primjer, optička svojstva tečnih kristala čine ih veoma upotrebljivim kod termometara koji mijenjaju boju pri promjeni temperature. Koriste se za izradu sedmosegmentnih indikatora, kao i kod **holografije**. Daljim razvojem nanotehnologije, vjerovatno će njihov značaj biti još veći.

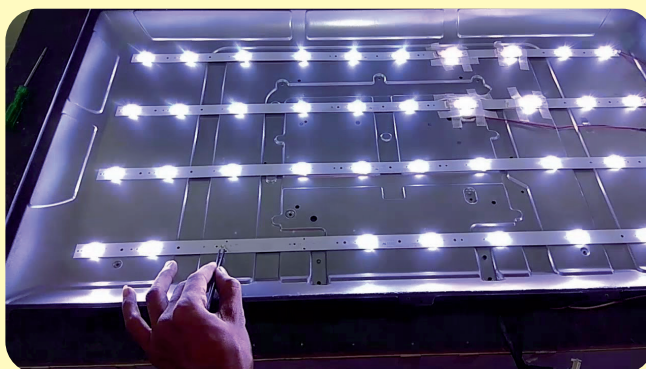


Osmisli, uz pomoć interneta, projekat s optoelektronskim komponentama. Nacrtaj električnu šemu i napravi popis elektronskih komponenti potrebnih za realizaciju tog projekta. Nabavi te komponente u prodavnici elektronskih komponenti u svom gradu ili poručivanjem putem interneta. U terminu koji je dogovoren s nastavnikom/nastavnicom, koristeći laboratorijske uređaje i eksperimentalnu pločicu prezentuj svoj projekat.



LED ekrani

U današnje vrijeme najviše korišćena vrsta televizijskih ekrana i računarskih monitora jesu LED ekrani. LED ekrani u stvari su jedna vrsta ekrana s tečnim kristalima. Svi ekrani s tečnim kristalima zahtijevaju pozadinsko osvjetljenje. Kada se kaže LCD ekran, onda se misli na vrstu ekrana s tečnim kristalima koja kao pozadinsko osvjetljenje koristi fluorescentne lampe. U novije vrijeme mnogo se više koriste ekrani koji kao pozadinsko osvjetljenje koriste LED diode, i takvi ekrani nazivaju se LED ekrani (slika 7.41). Prednost LED dioda u odnosu na klasične lampe u tome je što postižu pravilno i ujednačeno osvjetljenje cijelog ekrana, kao i bolji kontrast. Prikaz slike kod LED ekrana znatno je ljepši, uz manju potrošnju energije.



Slika 7.41. Pozadinsko osvjetljenje kod LED ekrana



REZIME

- Optoelektronika je dio elektronike koji se bavi izučavanjem i primjenama elektronskih uređaja i sistema koji generišu i detektuju svjetlost, te vrše upravljanje svjetlosnim zracima. Rad optoelektronskih uređaja zasnovan je na fizičkim dejstvima svjetlosti na elektronske materijale. Od fizičkih efekata najznačajniji su fotoelektrični efekat (na kojem je zasnovan rad fotodioda i fototranzistora) i fotoprovodnost (na čijem je efektu zasnovan rad fotootpornika). Fotoelektrični efekat je pojava izbijanja elektrona iz nekog materijala pomoću svjetlosti.
- Tip PN-spoja koji generiše struju kada se izloži svjetlosti, naziva se fotodioda. Radi u inverznom režimu i pretvara svjetlosnu energiju u električnu. Intenzitet svjetlosne energije direktno je proporcionalan jačini struje fotodiode.
- Fototranzistor je troslojni poluprovodnički uređaj, koji ima područje baze osjetljivo na svjetlost. Struja koja teče između kolektorskog i emitorskog područja, posljedica je djelovanja svjetlosti na područje baze.
- Fotootpornik je tip otpornika čija otpornost opada pri povećanju intenziteta svjetlosti. Fotootpornik mijenja svoju otpornost samo kada se izloži svjetlosti.
- Svetleća (LED) dioda pretvara električni signal u svetlosnu energiju. Kada se direktno polarise jednosmjernim naponom, kroz LED diodu će proteći struja, i ona će svijetliti. Izborom poluprovodnika možemo dobiti željenu talasnu dužinu svjetlosti, odnosno boju kojom će LED dioda svijetliti. Jačina svijetla zavisi od jačine struje koja protiče kroz diodu.
- Tečni kristal pokazuje karakteristike tečnosti: tečni su, na sobnoj temperaturi zauzimaju oblik suda u kome se nalaze, ali i i čvrstog stanja: imaju uređen položaj molekula u prostoru.
- Ako se molekuli tečnog kristala izlože dejstvu električnog polja, mogu se usmjeriti u njegovom smjeru. Pod uticajem električnog polja može se kontrolisati orijentacija molekula, a samim tim i njihova optička svojstva. Zbog ove osobine tečni kristali koriste se u mnogim uređajima, a najpoznatija je primjena za izradu ekrana od tečnih kristala (LCD – *Liquid Crystal Display*).



1. Definiši fotoelektrični efekat i fotoprovodnost.
2. Grupiši optoelektronske uređaje na one koji svoj rad zasnivaju na fotoelektričnom efektu i one koji svoj rad zasnivaju na fotoprovodljivosti.
3. Opiši proces pretvaranja svjetlosti u struju pomoću fotodiode.
4. Navedi oblasti primjene fotodiode.
5. Opiši na koji se način fototranzistor konstrukcijski razlikuje od klasičnog tranzistora.
6. Navedi oblasti primjene fototranzistora.
7. Opiši proces pretvaranja svjetlosti u struju pomoću fotootpornika.
8. Objasni sposobnost LED dioda da emituju svjetlost različitih boja.
9. Opiši značaj i primjenu tečnih kristala.
10. Istraži, uz pomoć interneta, razvoj tečnih kristala kroz istoriju.

8

PRAKTIKUM

U uvodnom dijelu ovog poglavlja ukratko će biti opisani laboratorijski uređaji i oprema koja se koristiti tokom izrade praktičnih vežbi iz Osnova elektronike u laboratoriji za elektroniku. Na internetu se mogu pronaći sve informacije u vezi s ovim uređajima i opremom, kao i uputstva za rad propisana od strane proizvođača. Uputstva su obimna, obično nekoliko stotina stranica, pa se ne očekuje njihovo detaljno čitanje, ali predstavljaju izvor iz koga će ponekad biti potrebno uzeti neki podatak.



Slika 8.1. Laboratorija za elektroniku

Laboratorijski uređaji koji će se najviše koristiti jesu: izvor jednosmjernog napona, generator funkcija, osciloskop, multimetar i dr. Takođe, u uvodnom dijelu opisani su osnovni elementi radnog okruženja u softveru TINA i njihova namjena.

U okviru poglavlja 8.7 nalaze se 22 praktične vježbe, grupisane prema glavama na koje se odnose.

OBRATI PAŽNJU

Prije početka rada s električnim uređajima važno je da uvijek imaš na umu: **električna struja je opasna**. Ona može da izazove ozbiljne povrede, a može čak i da ubije. Pri izvođenju praktičnih vježbi obično ćeš koristiti baterije niskog napona kako bi se ove opasnosti ograničile. Ipak, svaki put kad radiš s elektronikom, moraš biti oprezan/oprezn.

Čovjek može stradati od električne struje ako njegovo tijelo dođe u dodir s električnim provodnikom koji je pod naponom, tako da se strujni krug zatvori kroz njegovo tijelo. Struja iznad određene jačine opasna je za čovjeka. Struja od 10-ak miliampera već izaziva grčenje mišića, a ako struja iznosi 25 mA grč je toliko velik da se provodnik više ne može ispustiti iz ruke. Jače struje prouzrokuju teške opekotine, pa i smrt. Pri dodiru provodnika pod naponom, veoma je važan otpor tijela pri proticanju struje. Ovaj otpor varira za različite vrijednosti napona, i kreće se od 2Ω do $10 \text{ k}\Omega$. Ako su ruke vlažne, otpor može pasti i do 100Ω . Zbog toga nikada s električnim uređajima nemoj raditi vlažnih ili znojavih ruku. Osim otpora tijela, važan je i otpor podloge na kojoj čovjek stoji.

Iz ovoga možemo zaključiti da je po čovjeka opasna struja, a ne napon. Ipak, pošto viši napon izaziva jaču struju, opasnost je uz iste okolnosti veća ako je napon viši. Opasnost je veća ako čovjek ima vlažne ruke, te ukoliko je dodir tijela pod naponom na većoj površini. Najveća je opasnost ako se dio pod naponom obuhvati rukom. Takođe, opasnost je veća ako je podloga na kojoj čovjek stoji provodna.

Baterije AA ne daju visok napona, ali mogu biti i neugodne. Ako ju kratko spojiš, na provodniku će se razviti visoka temperatura, koja će bateriju uništiti, a tebe može opeći. Ako pri spajanju električnih kola, osjetiš da je neka od komponenti suviše topla, možda je ta komponenta spojena u kolu na pogrešan način. U tom slučaju, kolo isključi, ostavi da se komponenta ohladi, a zatim provjeri što uzrokuje problem.

Čak i kada se izvor napajanja isključi, nešto električne energije može ostati u kolu (obično u kondenzatorima). Da bi se bilo sigurno, prije nego se bilo što dotirne, prethodno provjeriti kolo multimetrom.

Pri radu sa osjetljivim elektronskim komponentama, imaj na umu da ih statički elektricitet može oštetiti. Statički elektricitet je nagomilano električno naelektrisanje u mirovanju koje nastaje zbog neravnoteže elektrona na površini materijala. Statičko naelektrisanje obično nastaje trenjem. Na statički elektricitet posebno su osjetljivi MOS tranzistori, odnosno integrisana kola koja ih sadrže. Da bi se riješio statičkog pražnjenja pri radu sa osjetljivim elektronskim komponentama, obično se nosi antistatička narukvica.

Narukvica se sastoji od dijela koji se veže oko zgloba ruke i kaiša s metalnim krajem koji se veže na uzemljeni provodnik. Statički elektricitet će linijom manjeg otpora oteći u zemlju, i neće se nagomilavati na ruci.

8.1

IZVOR JEDNOSMJERNOG NAPONA

Većina električnih kola čiji rad će biti analiziran kroz laboratorijske vježbe koje slijede, za svoj rad zahtijevaju nepromjenljiv jednosmjerni napon. Uređaj koji će obezbijediti taj stabilni jednosmjerni napon naziva se izvor jednosmjernog napona. Zadatak tog izvora jeste da nazmjenični napon iz električne mreže pretvori u jednosmjerni napon. Izvori jednosmjernog napona koji se koriste u laboratorijama, moraju da ispune i sljedeće uslove:

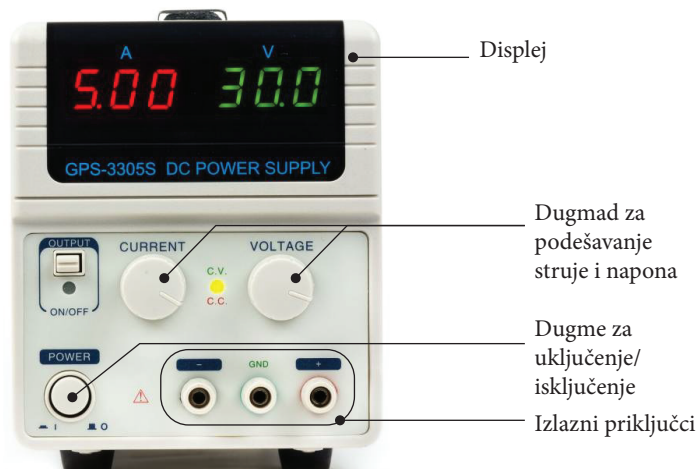
- Treba da imaju mogućnost podešavanja vrijednosti jednosmjernog napona na željenu vrijednost
- Jednosmjerni napon mora biti dovoljno stabilan, tako da na njega ne utiču promjene vrijednosti mrežnog napona
- Mora da obezbijedi odličnu električnu izolaciju između ulaza, na koji se dovodi mrežni napon, i izlaza uređaja, na kojem se dobija jednosmjerni napon
- Uređaj mora da obezbijedi zaštitu od preopterećenja, odnosno od pojave visokih vrijednosti struje na izlazu uređaja.

Postoje analogni (slika 8.2) i digitalni izvori (slika 8.3) jednosmjernog napona. Danas se uglavnom koriste digitalni izvori.

Ovi uređaji na sebi imaju rotirajuću dugmad (potencijometre), pomoću kojih se vrši izbor željene vrijednosti izlaznog napona. Izabrana vrijednost može se očitati pomoću kazaljke s odgovarajuće skale (analogni izvor) ili direktno s ekrana (digitalni izvor). Uređaj takođe sadrži izlazne priključke, odakle se pomoću sonde (provodnika) željeni jednosmjerni napon vodi do električnog kola ili uređaja koji se napaja.



Slika 8.2. Analogni izvor jednosmjernog napona

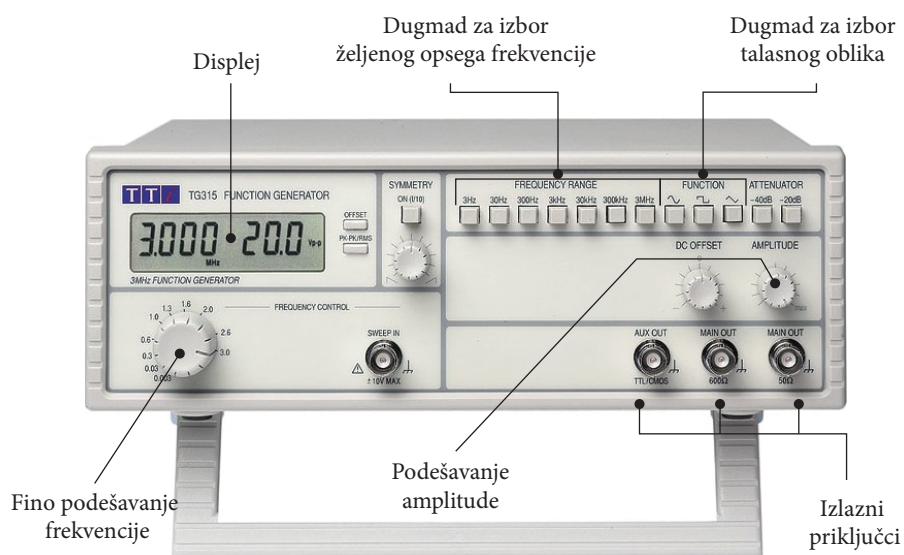


Slika 8.3. Digitalni izvor jednosmjernog napona

8.2

GENERATOR FUNKCIJA

Generator funkcija (slika 8.4) jeste uređaj koji na svom izlazu stvara električne napone različitih vrijednosti, talasnih oblika i frekvencija. Talasni oblici generisanih napona najčešće mogu biti u obliku sinusoide, povorke pravougaonih impulsa ili trouglastog napona, mada je kod nekih generatora moguće generisati i složenije naponske oblike.



Slika 8.4. Generator funkcija

Frekvencije se kreću u rasponu od 0 Hz do nekoliko stotina MHz, a izbor željenog opsega frekvencija se – kao i kod izbora naponskog oblika – vrši pritiskom na odgovarajuće dugme. Fino podešavanje frekvencije, kao i maksimalne vrijednosti (amplitude) generisanog signala, vrši se pomoću odgovarajućih rotirajućih dugmadi, a sve promjene očitavaju se na ekranu. Na rubovima ekrana ispisane su jedinice mjere za frekvenciju i napon (Hz, kHz, MHz, V i mV), a pored svake od njih postoji svjetlosni indikator kojim se signalizira u kojoj se od tih jedinica prikazuje rezultat. Pored jedinica za napon postoji i oznaka *p-p*, što označava da se na ekranu ispisuje razlika između maksimalne i minimalne vrijednosti signala koji se generiše. Na primjer, ako želimo da generišemo signal čija je amplituda 5 V, onda je potrebno da na ekranu bude ispisano 10 *V_{p-p}*.

Izlazni kontakti realizovani su u vidu BNC konektora (slika 8.5), tako da je potrebno koristiti sonde sa završecima istog tipa. Ovo su neke od osnovnih mogućnosti generatora funkcija, mada u zavisnosti od karakteristika i namjene mogu imati i mnogo više mogućnosti.



Slika 8.5. BNC konektor

8.3

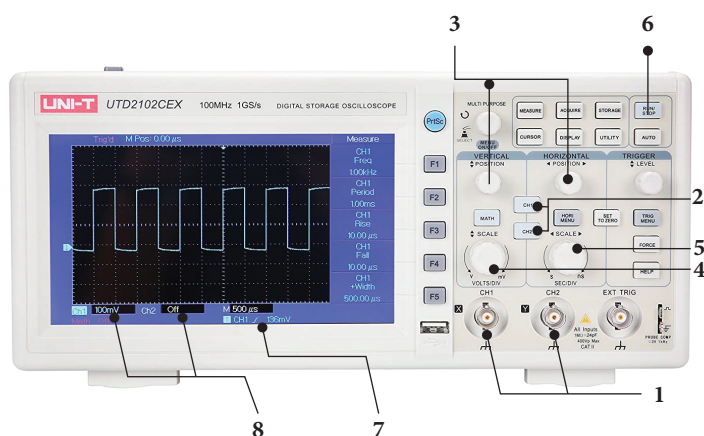
OSCILOSKOP

Osciloskop (slika 8.6), uz univerzalni mjerni instrument, najčešće je korišćen mjerni instrument u elektronici. Osnovna namjena mu je prikazivanje talasnih (vremenskih) oblika naponskih signala dovedenih na njegov ulaz. Uz korišćenje odgovarajućih strujnih sondi koje konvertuju strujne signale u naponske, moguće je prikazivanje i vremenskih oblika strujnih signala. Takođe, uz primjenu odgovarajućih senzora koji konvertuju neelektrične fizičke veličine u električni napon, moguće je vršiti posmatranja i mjerenja na neelektričnim signalima.

Osciloskopom se može izmjeriti vrijednost napona, perioda i frekvencija periodičnog signala. Takođe, njihovim istovremenim prikazom na ekranu osciloskopa, moguće je i upoređivanje različitih signala.

Postoje razne vrste osciloskopa, s različitim brojem mjernih kanala i namjenama. Najčešće se susrijeću osciloskopi s dva mjerna kanala, pomoću kojih je moguće vršiti mjerenje i upoređivanje dva ulazna signala. Broj dugmadi pomoću kojih se kontroliše rad osciloskopa varira u zavisnosti od vrste osciloskopa i samog proizvođača. U nastavku će biti opisana namjena samo nekih od tih dugmadi koja ćete tokom ovih vježbi imati priliku da koristite.

Najčešće se prekidač ON/OFF ili dugme POWER, kojim se uključuje/isključuje osciloskop, nalazi s gornje strane instrumenta. Na prednjoj strani lako se uočavaju ulazni priključci sa BNC konektorima (X i Y kanali – slika 8.6, oznaka 1), na koje se dovode naponi koji se žele prikazati i mjeriti. Zatim su tu dugmad pomoću kojih se vrši izbor nekog od ulaznih signala, čime se omogućava ili onemogućava njegov prikaz na ekranu (slika 8.6, oznaka 2).



Slika 8.6. Osciloskop

Odabrani signal se, radi lakšeg očitavanja željenih veličina, može pomjerati po horizontalnoj (X) i vertikalnoj (Y) osi pomoću odgovarajućih rotirajućih dugmadi

(slika 8.6, oznaka 3). Takođe je moguće vršiti podešavanje vremenske baze (veličine horizontalnog podjeljka – slika 8.6, oznaka 5) i naponske rezolucije (veličine vertikalnog podjeljka – slika 8.6, oznaka 4). Na taj način veličina jednog podjeljka po horizontalnoj ili vertikalnoj osi prilagođava se signalu koji se mjeri, čime se omogućava optimalno očitavanje. Često se događa da se signal koji se prikazuje kreće, pa se za njegovo zaustavljanje koristi dugme RUN/STOP (slika 8.6, oznaka 6). Signali su označeni i iscrtavaju se različitim bojama, pa je prikaz na ekranu veoma pregledan. Na dnu ekrana moguće je očitati koliko iznosi veličina horizontalnog podjeljka (slika 8.6, oznaka 7), kao i vertikalnog podjeljka – posebno za kanale 1 i 2 (slika 8.6, oznaka 8).

Svaki osciloskop pruža mnogo više mogućnosti od ovih koje su opisane. Svakako da je za rad s njim potrebno mnogo više znanja od navedenog, ali je ovo dovoljno za početak bavljenja elektronikom i izradu predstojećih vježbi.

8.4

MULTIMETAR

Pri radu u laboratoriji za elektroniku često imamo potrebu da izmjerimo vrijednost nekog napona, struje, otpora i sl. Za to postoje instrumenti za mjerenje napona (voltmetri), struje (ampermetri), otpornosti (ommetri) i dr. U većini slučajeva, sva ta mjerenja moguće je izvršiti pomoću samo jednog mjernog instrumenta – *multimetra*.

Multimetri su univerzalni mjerni uređaji koji se koriste za mjerenje jednosmjernih i naizmjeničnih napona i struja, kao i električnog otpora. Često multimetri imaju i dodatne mogućnosti, poput zvučne indikacije postojanja kratkog spoja između dva provodnika ili metalna kontakta, mjerenja napona na direktno polarisanom PN-spoju, mjerenja kapacitivnosti, mjerenja strujnog pojačanja kod bipolarnog tranzistora, pa čak i mjerenja temperature. Danas se najviše koriste *digitalni multimetri* (slika 8.7) kod kojih se rezultat mjerenja ispisuje na ekranu (slika 8.7 – 1). Često se umjesto termina multimetar koristi i naziv *unimjer*.

Upotreba multimetra veoma je jednostavna. U centralnom dijelu instrumenta nalazi se višepoložajni prekidač – preklonik (slika 8.7, oznaka 3), čijim se pomjeranjem bira veličina koja se želi mjeriti i opseg u kome će biti prikazani rezultati mjerenja. Pored svakog opsega ispisana je jedinica mjere (V, A, Ω , F i sl.), pa se lako zaključuje koja se veličina mjeri u kom opsegu. Svaki od ovih opsega posebno je označen na slici 8.8, a njihova namjena data je u tabeli 8.1. Kada se pored jedinica za napon i struju nalazi horizontalna crtica, onda se taj op-



Slika 8.7. Digitalni multimetar



Slika 8.8. Digitalni multimetar – mjerni opsezi

seg koristi za mjerenje jednosmjernog napona ili struje, dok se opsezi namijenjeni mjerenju naizmjeničnih veličina označavaju malom sinusoidom („talasom“). Kada se mjere naizmjenične veličine, multimetar pokazuje njihovu efektivnu vrijednost.

Tabela 8.1. Namjena mjernih opsega kod multimetra

Oznaka	Namjena
1	Isključen instrument
2	Mjerenje jednosmjernog napona
3	Mjerenje naizmjeničnog napona
4	Mjerenje struje
5	Ispitivanje ispravnosti diode i kratkog spoja – „zujalica“
6	Mjerenje otpornosti

Multimetar na sebi ima tri ili četiri priključka, na koje se povezuju mjerni kablovi. Jedan mjerni priključak zajednički je za sva mjerenja (COM), i predstavlja minus-priključak (slika 8.7, oznaka 4). Na njega se kači mjerni kabl sa izolacijom crne boje. Drugi mjerni kabl (crveni) priključuje se na jedan od preostala dva (u nekim slučajevima i tri) priključka, u zavisnosti od toga koju veličinu želimo da mjerimo. Na slici 8.7 razlikuju se priključak za mjerenje napona, struje reda mA i μA , otpora i kratkog spoja (slika 8.7, oznaka 5), kao i priključak za mjerenje jačih struja, najčešće do 10 A ili 20 A (slika 8.7, oznaka 6). Na slici 8.7 sa 2 je označeno dugme kojim se uključuje/isključuje pozadinsko osvjetljenje ekrana.

Ranije su uglavnom u upotrebi bili *analogni multimetri* (slika 8.9). Njihovo korišćenje donekle je slično upotrebi digitalnog multimetra. Prva asocijacija na analogni multimetar jeste očitavanje rezultata pomoću analogne kazaljke s različitih skala za svaku mjernu veličinu.

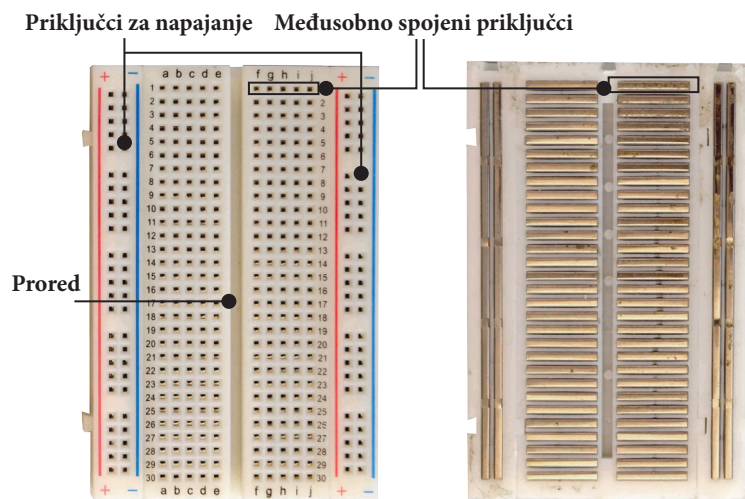


Slika 8.9. Analogni multimetar

8.5

EKSPERIMENTALNA PLOČICA ZA MONTIRANJE ELEKTRONSKIH KOMPONENTI

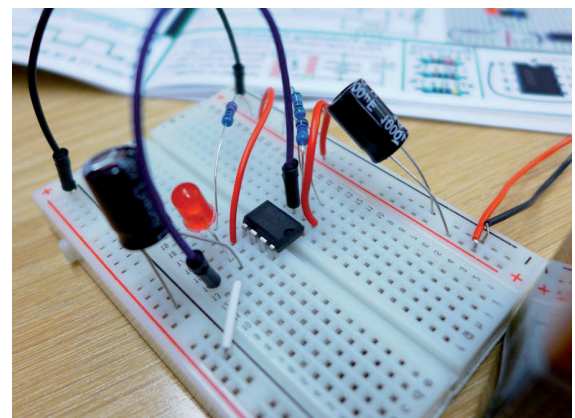
Eksperimentalna pločica (engl. *solderless breadboard*) koristi se za jednostavno povezivanje elektronskih komponenti bez njihovog lemljenja. U plastično kućište ugrađen je velik broj malih elastičnih metalnih djelova u koje je moguće utisnuti nožice elektronskih komponenti. Međusobni razmaci između priključaka (rupica) standardizovani su i usklađeni s razmakom među nožicama većine integrisanih kola i elektronskih komponenti.



Slika 8.10. Eksperimentalna pločica s gornje i donje strane

Priključci su u unutrašnjosti pločice međusobno povezani prema određenom pravilu. Tako je svih pet priključaka koji se nalaze u jednom redu s lijeve ili desne strane proreda, međusobno spojeno (slika 8.10). Prored služi da odvoji nožice integrisanog čipa kako one ne bi bile na istom potencijalu. Svi priključci za napajanje koji se nalaze u jednoj koloni međusobno su spojeni. Pozitivan pol izvora za napajanje dovodi se na neki od priključaka označenih sa +, dok se negativan pol dovodi na jedan od priključaka označenih sa -. Time se olakšava rad s pločicom kada imamo potrebu da više puta koristimo jedan isti izvor napajanja.

Korišćenjem opisanih ugrađenih veza između samih priključaka i uz upotrebu kratkospojnika, na eksperimentalnoj pločici moguće je povezati komponente prema zadatoj električnoj šemi, a zatim i izmjeriti željene veličine i analizirati rad kola. Kratkospojnici su bakarni provodnici koji dolaze u kompletu s eksperimentalnom pločom, i služe za povezivanje dva priključka na ploči.



Slika 8.11. Primjer spajanja električnog kola na eksperimentalnoj pločici

8.6

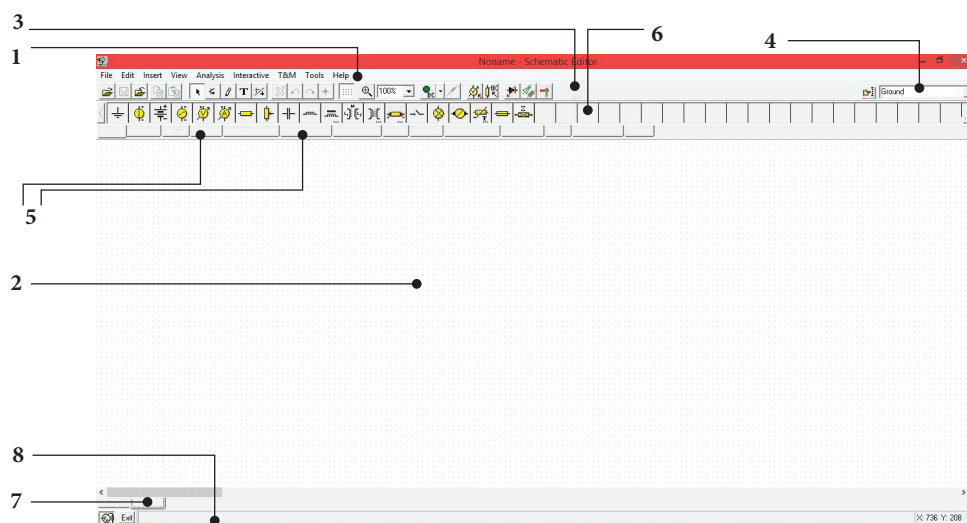
SOFTVERI ZA SIMULACIJU RADA ELEKTRIČNIH KOLA (TINA)

Razumijevanje rada neke elektronske komponente ili električnog kola u cjelini, često zavisi od toga da li ste bili u prilici da praktično utvrdite kako oni funkcionišu u stvarnosti. To je moguće u laboratoriji, kroz neposredan rad s laboratorijskim uređajima i samim komponentama, što najčešće zahtijeva znatna materijalna sredstva. U nedostatku tih sredstava, dobra alternativa jeste rad uz pomoć namjenskih softvera za simulaciju rada električnih kola.

Postoji velik broj tih softvera, više ili manje kvalitetnih, besplatnih ili licenciranih, kao što su: *TINA*, *Electronics Workbench*, *PSpice*, *OrCAD* i mnogi drugi. Za realizaciju praktičnih vježbi iz modula Osnove elektronike preporučuje se softver TINA zbog njegove jednostavne upotrebe i visokih performansi. Njegove mogućnosti višestruko su veće od onog što će kroz ove vježbe biti zahtijevano.

TINA je program za projektovanje, simulaciju i analizu rada električnih i elektronskih kola koji korisnicima omogućava da prije nego što se upuste u osmišljavanje nekog uređaja, izvrše kompjutersku analizu tog uređaja, provjere kako on radi, da li su njegove karakteristike onakve kakve se očekuju na osnovu prethodnih teorijskih razmatranja i proračuna i, ako je potrebno, izvrše korekcije. Softver omogućava crtanje svih vrsta električnih kola zahvaljujući bibliotekama u kojima su sadržane sve elektronske komponente potrebne da se nacrtaju električna šema nekog uređaja i na njoj obave potrebna mjerenja i testiranja. Rezultate svih mjerenja moguće je očitati s virtuelnih instrumenata ili preuzeti u vidu grafikona.

Na slici 8.12 prikazan je izgled radne površine u softveru TINA koji se dobija po njegovoj instalaciji i pokretanju na personalnom računaru.



Slika 8.12. Izgled radne površine u softveru TINA

Osnovni elementi te radne površine su:

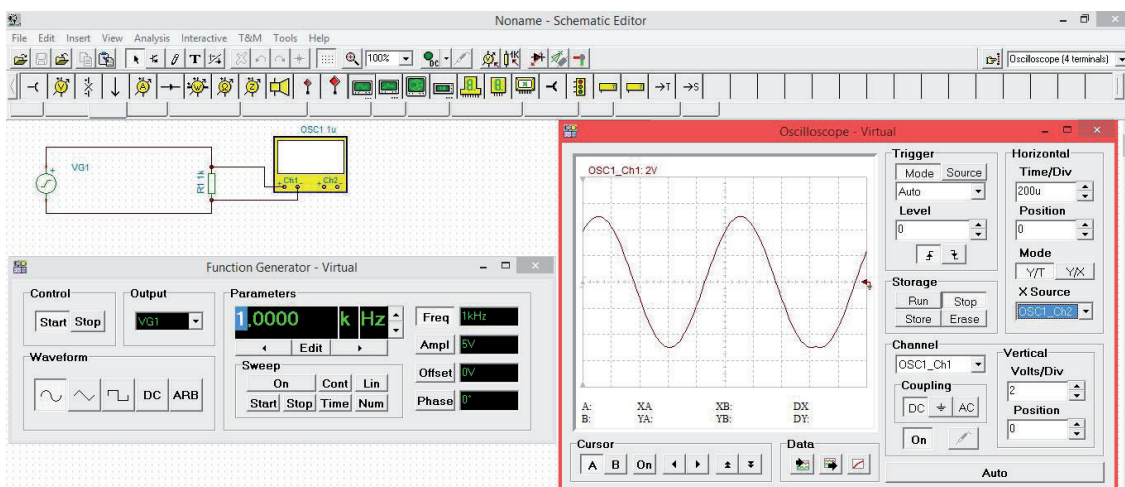
- Linija menija (označeno sa 1 na slici 8.12)
- Površina na koju se nanose komponente – *schematic editor* (označeno sa 2 na slici 8.12)
- Traka s alatima (označeno sa 3 na slici 8.12)
- Alat za pretraživanje komponenti (označeno sa 4 na slici 8.12)
- Kartice srodnih komponenti (označeno sa 5 na slici 8.12)
- Traka s komponentama (označeno sa 6 na slici 8.12)
- Kartice otvorenih fajlova (označeno sa 7 na slici 8.12)
- Traka za pomoć (označeno sa 8 na slici 8.12).

Snalaženje u radnom okruženju kod softvera TINA, uz elementarno poznavanje engleskog jezika i stručne terminologije, veoma je jednostavno. Na samom vrhu imamo **liniju menija** (označeno sa 1 na slici 8.12) koja je veoma slična s onom u Word-u. Od ostalih menija treba izdvojiti *Analysis*, *Interactive* i *T&M*. Oni će djelimično biti korišćeni u vježbama koje slijede. Kada se izvrši spajanje neke električne šeme, ti meniji služe za pokretanje mjerenja i analize karakterističnih veličina, kao i podešavanje laboratorijskih uređaja.

U okviru menija *Analysis* pomoću komande ERC (engl. *Electric Rules Check*) možemo izvršiti provjeru ispravnosti povezane šeme tako što će nam u novom prozoru biti ispisane eventualne greške i upozorenja. Od ostalih mogućnosti izdvojićemo *DC Analysis*, što nam omogućava izvršavanje raznih analiza u jednosmjernom domenu. Pomoću ovog menija moguće je izračunati potencijal bilo koje tačke u kolu, dobiti tabelarni prikaz svih jednosmjernih napona i struja u kolu, dobiti grafički prikaz za razne prenosne karakteristike itd.

Pokretanje interaktivnog režima u kome će se izvršiti potrebna mjerenja i rezultati ispisati na instrumentima, vrši se pomoću menija *Interactive*. U okviru tog menija postoji više mogućnosti u zavisnosti od toga kakva mjerenja želimo da vršimo. Na traci s alatima postoji dugme koje ima istu namjenu i praktičnije je za upotrebu.

Nakon što se laboratorijski uređaji (kao što su generator funkcija, multimetar, osciloskop, analizator spektra i sl.) povežu u električnu šemu, potrebno ih je pokrenuti i podesiti. To se može učiniti u meniju *T&M*. Jednostavnim klikom na naziv uređaja koji se želi pokrenuti, otvara se dodatni prozor u kome je moguće izvršiti željena podešavanja, slično kao kod realnih uređaja. Izgled radne površine pri podešavanju generatora funkcija i osciloskopa dat je na slici 8.13. Sve realizovane šeme i grafičke prikaze sa osciloskopa i drugih uređaja moguće je preuzeti u slikovnom formatu.



Slika 8.13. Podešavanje generator funkcija i osciloskopa u softveru TINA

Kada se pokazivač dovede na bilo koji od alata s **trake alata** (slika 8.12, oznaka 3) gdje se oni nalaze, odmah se ispisuje njegov naziv ili namjena. Neki od tih alata takođe su slični s onima u Word-u i drugim grafičkim editorima koje svakodnevno koristite. Tu se nalaze alati za kopiranje, selekciju, odabir posljednje korišćene komponente, međusobno povezivanje komponenti, ispisivanje teksta, brisanje, rotiranje itd.

Sve elektronske komponente i laboratorijski uređaji organizovani su u srodne grupe, koje se nalaze na posebnim **karticama** (5). Klikom na svaku od tih kartica, na **traci s komponentama** (6) prikazuju se one komponente koje pripadaju toj kartici. Kartica *Basic* sadrži najosnovnije elektronske komponente sa svih drugih kartica: izvore, voltmetar, ampermetar, otpornik, kalem, kondenzator i dr. Kartica *Meters* na sebi sadrži mjerne instrumente, dok se razne vrste izvora nalaze na kartici *Sources*. Za realizaciju predstojećih vježbi značajne su i kartice *Semiconductors* i *Optoelectronic* na kojima se nalaze poluprovodničke i optoelektronske komponente, respektivno. Na svakoj od tih kartica postoji mnogo veći broj komponenti od pomenutog, i njima ćete se baviti u okviru nekih drugih modula. Komponente sa ostalih kartica takođe nemaju značaj za predstojeće vježbe.

Ukoliko ne znate na kojoj se od kartica nalazi neka elektronska komponenta, njeno pretraživanje možete izvršiti i pomoću **alata za pretraživanje komponenti** (4).

Pozicioniranje, pomjeranje ili rotiranje odabrane komponente vrši se jednostavno pomoću miša. Na **traci za pomoć** (8) daju se instrukcije, opisuju komponente do kojih ste došli s pokazivačem ili koje ste odabrali. Dvostrukim klikom na neku od elektronskih komponenti koju ste dodali na šemu, moguće je izvršiti njeno podešavanje.

U radnom prozoru moguće je istovremeno otvoriti i koristiti više fajlova (projekata). Moguće je kopirati djelove ili kompletne šeme iz jednog u drugi projekat.

Rad s laboratorijskim uređajima: Korišćenje digitalnog multimetra

Cilj vježbe: Osposobljavanje za rad s multimetrom.

Potrebni laboratorijski uređaji, oprema i elektronske komponente: Multimetar, jednosmjerne baterije različitih naponskih nivoa, mrežni transformator (transformatori) s naponima sekundara do 24 V, otpornici različitih otpornosti, djelovi provodnika, osigurači, prekidač, kliješta za sječenje provodnika – sječice.

Radni zadaci:

1. *Mjerenje napona jednosmjerne baterije.* Poveži mjerne kablove tako da se može vršiti mjerenje napona – crni provodnik postavi u priključak COM, a crveni u priključak iznad koga postoji oznaka mjerne jedinice za napon (V). Uključi multimetar, a zatim preklopnik postavi u položaj za mjerenje jednosmjernog napona. Pravilo je da se preklopnik postavlja u položaj za mjerenje maksimalnog napona ako ne znamo vrijednost izvora čiji napon mjerimo. Crni mjerni kabl postavi na minus-pol baterije, a crveni na plus-pol (slika 1). Na displeju će se ispisati izmjerena vrijednost u skladu s odabranim opsegom. Dalje je potrebno smanjivati mjerni opseg sve dok on ne bude odgovarao vrijednosti mjenog napona, čime se obezbjeđuje veća preciznost mjerenja. Uporedi rezultate mjerenja s vrijednošću datoj na samoj bateriji.



Slika 1. Mjerenje jednosmjernog napona

Objasni što se događa kada se zamijene mjesta crvenom i crnom mjernom kablju. Komentariši razliku u rezultatima mjerenja u ova dva slučaja.

Ponovi postupak s različitim jednosmjernim baterijama.

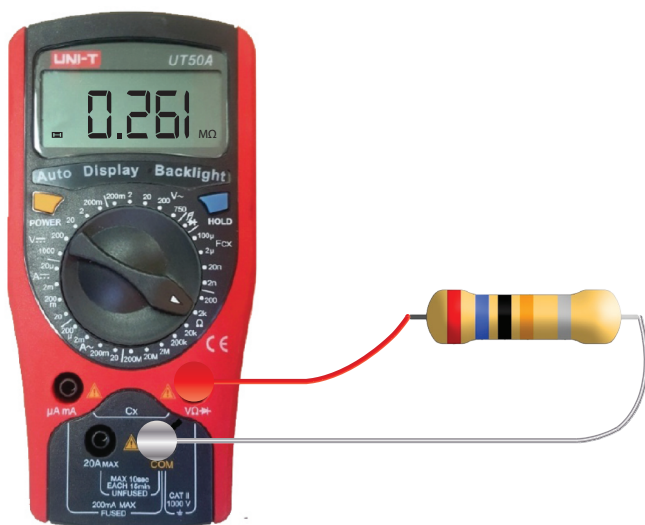
2. *Mjerenje naizmjeničnog napona na izlazu mrežnog transformatora.* Ponovi postupak kao pri mjerenju jednosmjernog napona, s tim što je preklopnik potrebno postaviti u položaj za mjerenje naizmjeničnog napona. Mjerne kablove postavi na izlazne priključke transformatora (sekundar), koji su jasno označeni na samom transformatoru. Rezultat mjerenja uporedi s vrijednošću napona sekundara koja je data na transformatoru.



Slika 2. Mjerenje naizmjeničnog napona

Ponovi postupak s nekim drugim malim mrežnim transformatorom ili (još bolje) koristi transformator s dva sekundara i više izlaznih naponskih nivoa. Tokom izvođenja vježbe nastavnik može demonstrirati i mjerenje naizmjeničnog napona mreže, što se iz bezbjednosnih razloga ne preporučuje učenicima.

Pri mjerenju naizmjeničnog napona nije potrebno voditi računa o tome gdje će se priključiti crni a gdje crveni mjerni kabl. Rezultat mjerenja uvijek će biti pozitivan.



Slika 3. Mjerenje otpornosti

3. *Mjerenje otpornosti.* Mjerne kablove postavi u odgovarajući položaj (crni na COM, crveni na priključak s oznakom Ω) i izaberi neki od opsega namijenjenih za mjerenje otpornosti. Mjerne kablove postavi na krajeve otpornika, i na ekranu će biti ispisani rezultati mjerenja. Da bi se obezbijedio optimalan prikaz mjerene veličine, slično kao u prethodnim slučajevima, možda će preklopnik biti potrebno pomjeriti u neki drugi položaj.

Za domaći zadatak, na internetu pronađi vrijednosti otpornosti za svaki od korišćenih otpornika (prema bojama) i uporedi rezultate s onim koji su dobijeni neposrednim mjerenjem.

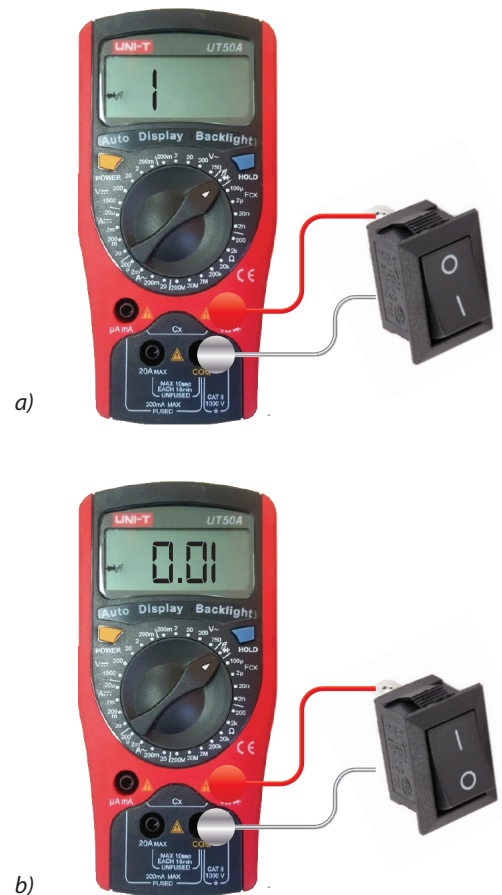
Kada mjerni kablovi nijesu priključeni, instrument u lijevom dijelu ekrana ispisuje jedinicu ili *OL* (engl. *out of limits*). Na taj način signalizira da se između mjernih kablova nalazi beskonačna otpornost, što je i logično

ako se ima u vidu da je u tom trenutku između tih kablova vazduh (izolator). Ukoliko bi se dva mjerna kabla spojila, instrument bi pokazivao nultu otpornost.

4. *Ispitivanje kratkog spoja.* Jedna od najčešćih primjena multimetra jeste za ispitivanje postojanja fizičke veze između dva metalna kontakta ili provodnika. Postavi mjerne kablove u odgovarajuće priključke, a preklopnik na tzv. zujalicu. Kada se krajevi dva mjerna kabla dodirnu, instrument počinje da proizvodi zvuk i na ekranu se ispisuje nula. Na taj način signalizira se da između njih postoji fizički kontakt (veza), odnosno da su oni u kratkom spoju. Kada bi se mjerni kablovi multimetra, podešenog na ispitivanje kratkog spoja, postavili na dva kraja nekog provodnika, instrument bi takođe detektovao kratak spoj (čuje se zujanje). Pri tome bi instrument pokazivao neku manju otpornost. Ako bismo taj isti provodnik prethodno prekinuli i ponovili ovaj postupak, ne bi došlo do zujanja jer sada dva ispitivana kontakta nijesu u direktnoj vezi. Opisanim postupkom moguće je utvrditi i ispravnost osigurača. Ako se nakon spajanja mjernih kablova na kontakte osigurača čuje zujanje, onda postoji fizička veza između ta dva kontakta (osigurač je ispravan). U suprotnom, osigurač je pregorio.

Na ovaj način može se ispitati i neki prekidač. Kada je u nultom položaju, njegovi kontakti nijesu povezani i instrument se ne čuje. Pri tome se u lijevom dijelu ekrana ispisuje 1 ili OL (zavisi od unimjera), što odgovara beskonačnom otporu (slika 4a). Kada se prekidač prebaci u drugi položaj, njegovi kontakti se spoje, što se registruje zujanjem instrumenta. U tom slučaju instrument prikazuje neku malu otpornost, što znači da je prekidač ispravan (slika 4 b).

Pokušaj da praktično izvedeš svaki od opisanih slučajeva.



Slika 4. Ispitivanje prekidača kada je: a) isključen i b) uključen

PRAKTIČNA VJEŽBA BR. 2

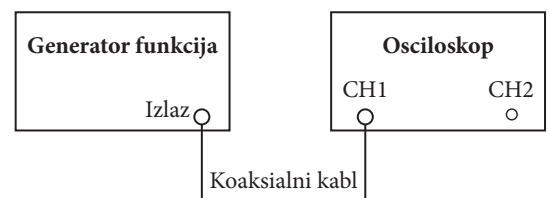
Rad s laboratorijskim uređajima: Korišćenje generatora funkcija i osciloskopa

Cilj vježbe: Osposobljavanje za rad s generatorom funkcija i osciloskopom.

Potrebni laboratorijski uređaji, oprema i elektronske komponente: Generator funkcija, osciloskop, koaksijalni kablovi (sonde).

Radni zadaci:

1. Uključi generator funkcija i generiši sinusni signal učestanosti 50 Hz i amplitude 5 V (10 V_{p-p}). Uključi osciloskop i poveži izlaz generatora funkcija s jednim od kanala na osciloskopu (slika 1). Najprije podеси vremenske baze i naponske rezolucije tako da su prilagođeni za optimalan prikaz generisanog signala. Uz odgovarajuće pozicioniranje signala, izmjeri njegovu amplitudu i periodu, a zatim izračunaj njegovu učestanost.

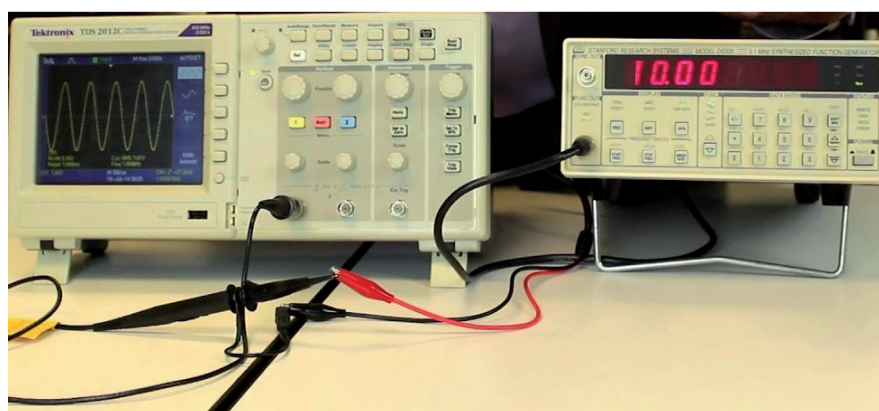


Slika 1. Blok-šema za povezivanje generatora funkcija i osciloskopa

Isti postupak sprovedi i za signale pravougaonog i testerastog oblika s nekim drugim vrijednostima učestanosti i amplitude. Rezultate mjerenja upiši u tabelu 1.

Tabela 1

Talasni oblik	VOLTS/ DIV	DIV	Amplituda (V)	TIME/DIV	DIV	Perioda (T)	Učestanost (f)
Sinusoida							
Pravougaoni							
Testerasti							



Slika 2. Prikazivanje signala s generatora funkcija na osciloskopu

2. Pomoću jednog generatora funkcija generiši sinusni signal učestanosti 100 kHz i amplitude 5 V. Zatim pomoću drugog generatora generiši testerasti napon učestanosti 20 kHz i amplitude 20 V. Generisane signale dovedi na ulaze osciloskopa i prikaži istovremeno na ekranu. Izmjeri amplitudu i periodu ovih signala, te rezultate mjerenja upiši u tabelu 2. Izračunaj frekvencije ova dva signala, kao i međusobni odnos njihovih amplituda, perioda i frekvencija.

Analiziraj rezultate mjerenja.

Tabela 2

Talasni oblik	VOLTS/ DIV	DIV	Amplituda (V)	TIME/DIV	DIV	Perioda (T)	Učestanost (f)
Sinusoida							
Testerasti							

Mjerenje jednosmjernih napona i struja pomoću digitalnog multimetra i primjenom softvera TINA

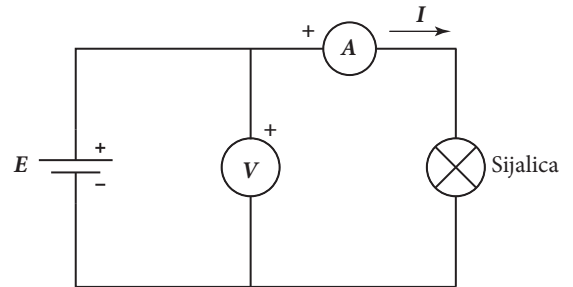
Cilj vježbe: Osposobljavanje za rad sa izvorom jednosmjernog napona i softverom TINA. Razvijanje preciznosti u radu i digitalnih kompetencija.

Potrebni laboratorijski uređaji, oprema i elektronske komponente: Izvor jednosmjernog napona, multimetri, namjenska maketa, računar s instaliranim softverom TINA.

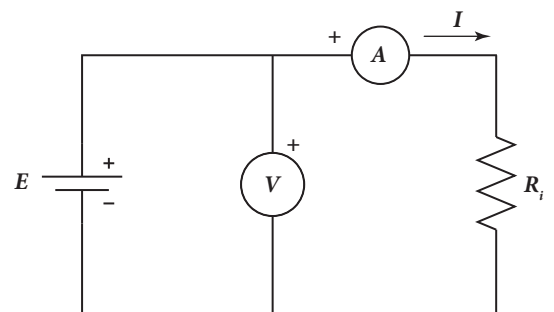
Radni zadaci:

1. *Mjerenje jednosmjernog napona i struje.* Električna šema prema kojoj je realizovana maketa za ovu vježbu, data je na slici 1. Podesi napon na izlazu izvora na 12 V, i to u slučaju kada nije priključen potrošač. Poveži izvor jednosmjernog napona i instrumente za mjerenje napona i struje na odgovarajuća mjesta na maketi. Vodi računa o polaritetu! Jedan multimetar podesi u odgovarajući položaj za mjerenje jednosmjernog napona a drugi za mjerenje struje. Pri mjerenju struje crni mjerni kabl postavlja se u priključak COM, dok se crveni postavlja u jedan od priključaka sa oznakom A ili mA, u zavisnosti od intenziteta struje koja se mjeri. U ovom mjerenju očekivana je struja reda mA, pa biramo odgovarajući priključak. Nakon uključivanja instrumenta potrebno je odabrati da li se želi mjeriti jednosmjerna ili naizmjenična struja. Očitane rezultate mjerenja za napon i struju zabilježi u svesku, a zatim na osnovu tih rezultata, primjenom Omovog zakona ($U = IR$), izračunaj otpornost potrošača (sijalice). Opiši što se događa kada se ampermetar ukloni iz kola. Objasni zašto se to događa.

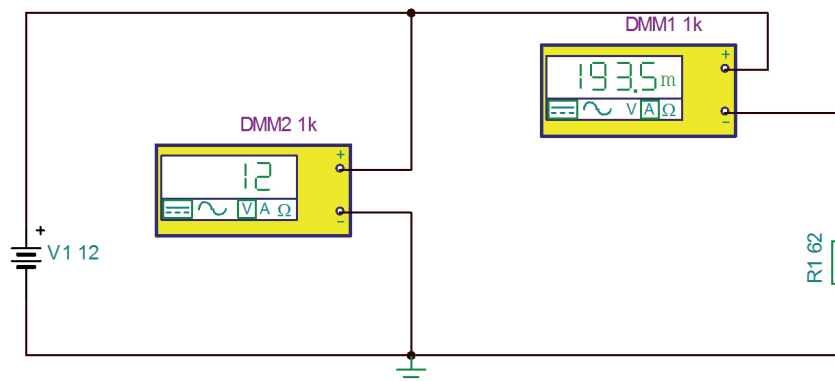
2. *Mjerenje jednosmjernog napona i struje u softveru TINA.* U softveru TINA spoj električnu šemu prema slici 2. Sve komponente koje ćeš koristiti nalaze se na kartici *Basic*. Dvostrukim klikom na naponski izvor podesi vrijednost tog izvora na 12 V. S palete *Source* izaberi dva multimetra, od kojih ćeš jedan koristiti kao voltmetar a drugi kao ampermetar. Da bi to bilo moguće, potrebno je da dvostrukim klikom na te mjerne uređaje u meniju *Mode* izabereš *DC voltage* za mjerenje napona i *DC current* za mjerenje struje (to je moguće izmjeriti i izborom voltmetra i ampermetra s palete *Basic*, ali je ovaj način izabran zbog ljepšeg prikaza rezultata). Na mjesto predviđeno za potrošač najprije postavi otpornik od 62 Ω . Tačku s najnižim potencijalom u kolu (minus-priključak izvora i voltmetra), potrebno je spojiti na masu kako bi je softver u proračunima prepoznao kao takvu. Kada je šema spojena, pokreni interaktivni režim u jednosmjernom domenu. Izgled električne šeme nakon njenog spajanja i pokrenute simulacije u softveru TINA prikazan je na slici 3. Sa instrumenata očitaj napon na izlazu izvora i struju kroz potrošač, te rezultate mjerenja upiši u tabelu 1. Ponovi postupak za različite vrijednosti otpornosti potrošača: 130 Ω , 250 Ω , 560 Ω , 750 Ω i 1 k Ω . Na osnovu dobijenih rezultata grafički (u vidu dijagrama na milimetarskom papiru) predstavi zavisnost struje od otpornosti, uzimajući razmjernu 1 cm = 50 Ω i 1 cm = 20 mA.



Slika 1. Šema povezivanja potrošača (sijalica) na izvor jednosmjernog napona



Slika 2. Šema povezivanja potrošača na izvor jednosmjernog napona



Slika 3. Realizacija električne šeme sa slike 2 u softveru TINA

Tabela 1. Rezultati mjerenja napona i struje potrošača

i	$R_i (\Omega)$	$U_i (V)$	$I_i (mA)$	$R_i (\Omega)$ – računaska provjera
1.				
2.				
3.				
4.				
5.				
6.				

PRAKTIČNA VJEŽBA BR. 4

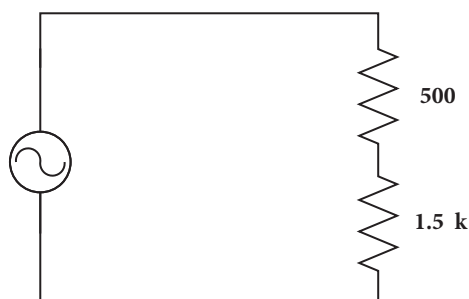
Upotreba mjernih uređaja u softveru TINA

Cilj vježbe: Osposobljavanje za rad sa softverom TINA. Razvijanje preciznosti u radu i digitalnih kompetencija.

Potrebni laboratorijski uređaji, oprema i elektronske komponente: Računar s instaliranim softverom TINA.

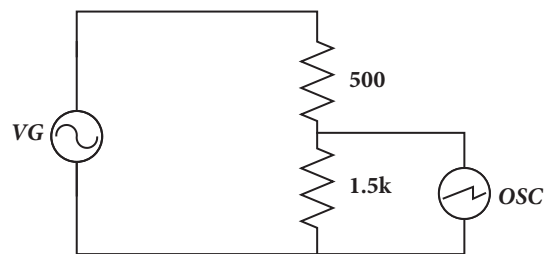
Radni zadaci:

1. Snimanje jednosmjernog napona u softveru TINA pomoću osciloskopa. Realizuj kolo sa slike 1 u softveru TINA.

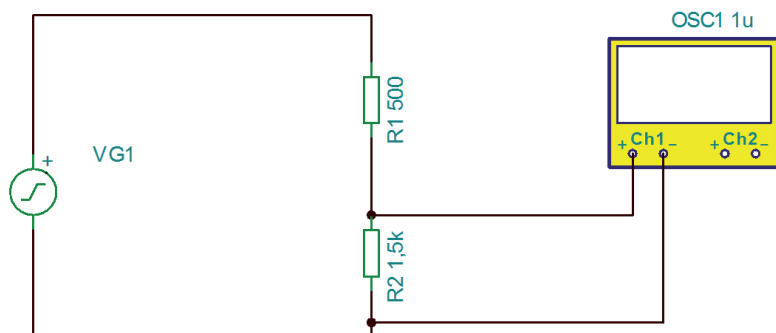


Slika 1

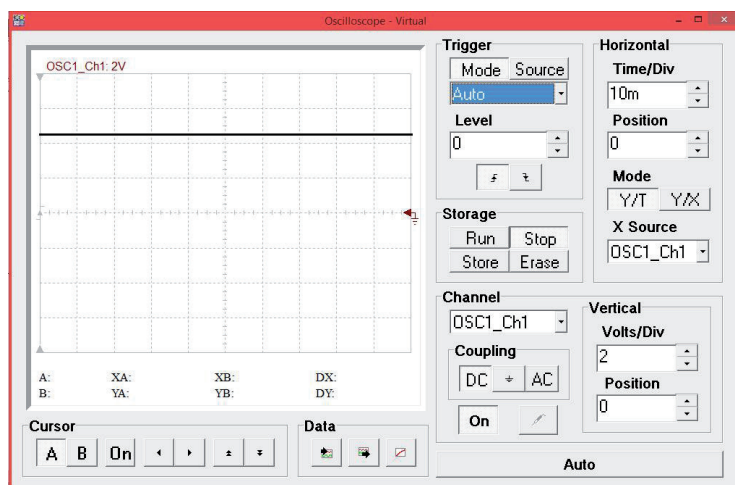
Na krajeve otpornika od $1,5\text{ k}\Omega$ veži osciloskop tako što ćeš njegov plus-priključak vezati između dva otpornika, dok ćeš minus-priključak vezati u tački s najnižim potencijalom (slika 2). Električna šema realizovana u softveru TINA prikazana je na slici 3. Podеси naponski generator (dvostruki klik) tako da na svom izlazu daje 5 V jednosmjernog napona ($DC\ Level = 5$, $Signal = Unit\ step$), a potom ga pokreni. Zatim je potrebno podесiti osciloskop (meni $T\&M$, opcija $Oscilloscope$) – slika 4. Pokreni osciloskop (sekcija $Storage$, dugme Run) kako bi se signal koji se snima prikazao na ekranu osciloskopa. Nakon toga podеси vertikalne skale (sekcija $Vertical$, polje $Volts/Div$). Klikom na strelicu gore ili dolje, odaberi vrijednost vertikalnog podjeljka koja omogućuje optimalan prikaz signala koji se snima. Ovdje nije potrebno podešavati horizontalnu skalu jer se radi o jednosmjernom signalu. Pomoću dugmeta $Export\ Curves$ iz sekcije $Data$ preuzmi prikazivanje osciloskopa u vidu grafika, a zatim taj grafik precrtaj na milimetarski papir. Da bi ova mogućnost bila dostupna, prethodno je potrebno zaustaviti iscrtavanje signala na ekranu osciloskopa (sekcija $Storage$, dugme $Stop$). Odredi vrijednost jednosmjernog napona na osnovu pokazivanja osciloskopa, a zatim računski izračunaj taj napon primjenom II Kirhofovog zakona. Uporedi rezultate. Objasni zašto je dobijeni grafik u obliku horizontalne prave linije.



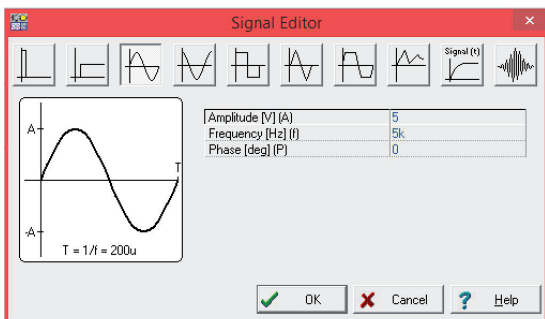
Slika 2



Slika 3. Realizacija električne šeme sa slike 2 u softveru TINA



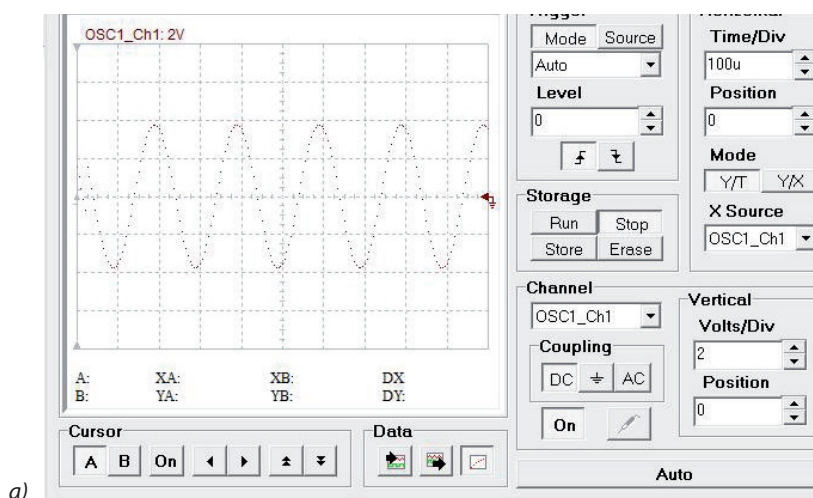
Slika 4. Pokazivanje osciloskopa nakon podešavanja



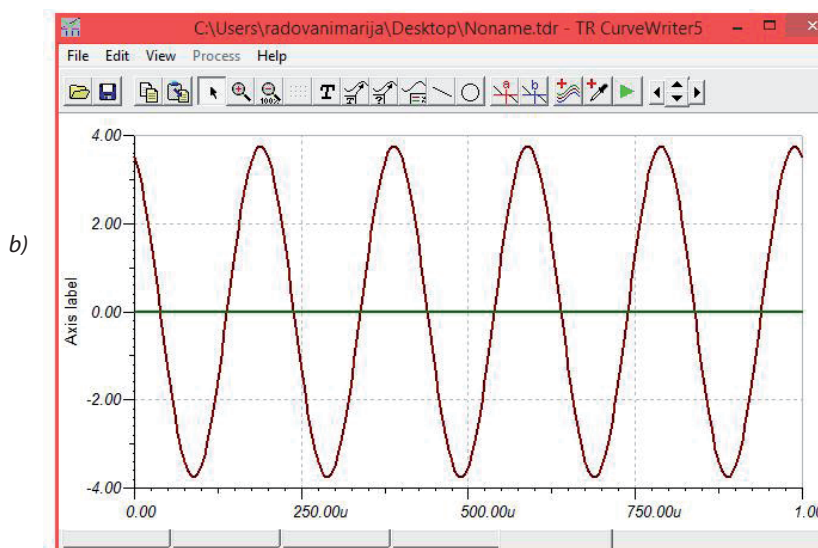
Slika 5. Podešavanje naponskog generatora

2. Snimanje naizmjeničnog napona pomoću osciloskopa. Izvrši novo podešavanje naponskog generatora iz prethodnog zadatka tako što će on sada služiti za generisanje sinusnog signala (*Sine wave*) učestnosti 5 kHz i amplitude 5 V (slika 5). Pri tome *DC Level* podesi na nulu.

Pokreni osciloskop (sekcija *Storage*, dugme *Run*) a zatim podesi vremensku bazu (*Time/Div*). Klikom na strelicu gore ili dolje, odaberi vrijednost koja odgovara datom signalu. Potrebno je takođe, u sekciji *Vertical*, vertikalnu skalu (*Volts/Div*) podesiti tako da odgovara signalu koji se prikazuje (slika 6a). Preuzmi grafički prikaz (slika 6b) pokazivanja osciloskopa (sekcija *Data*, dugme *Export curves*), a zatim ga precrtaj na milimetarski papir. Na osnovu pokazivanja osciloskopa odredi amplitudu i periodu napona na otporniku od 1,5 kΩ, a zatim izračunaj njegovu učestanost. Uporedi rezultate mjerenja s naponom na generatoru funkcija. Nakon toga, umjesto sinusnog napona, generiši povorku pravougaonih impulsa duplo veće učestnosti, te ponovi postupak. Uporedi periodu ovog signala s onom iz prethodnog primjera.



a)



b)

Slika 6. a) Pokazivanje osciloskopa nakon podešavanja; b) grafik snimljenog signala

Ispitivanje diode pomoću multimetra

Cilj vježbe: Osposobljavanje za ispitivanje ispravnosti diode i određivanje njenih izvoda. Razvijanje preciznosti i logičkog rasuđivanja.

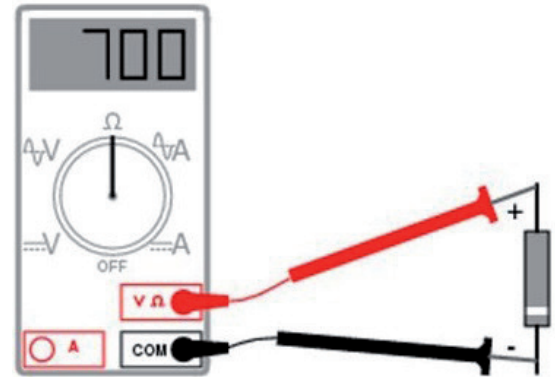
Potrebni laboratorijski uređaji, oprema i elektronske komponente: Multimetar, više dioda (ispravnih i neispravnih)

Ponavljanje gradiva: Definiši diodu. Definiši prag provođenja diode. Navedi njene elektrode i odredi uslov provođenja struje. Objasni kakvu otpornost dioda ima u provodnom a kakvu u neprovodnom smjeru.

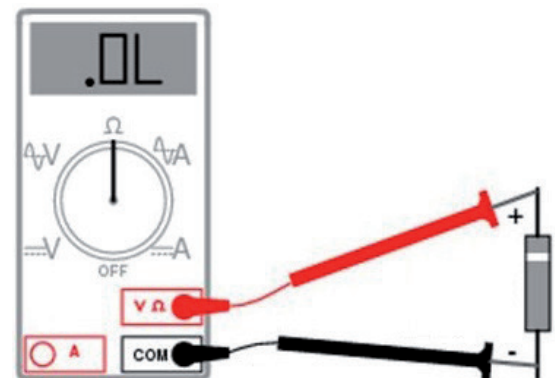
Radni zadaci:

1. *Ispitivanje ispravnosti diode mjerenjem otpornosti.* Pomoću preklopnika podesi multimetar na mjerenje otpora (omsko područje). Mjerne sonde multimetra postavi proizvoljno na izvode diode. Diodu je potrebno prethodno ukloniti iz složenog kola u kome se nalazila, jer se u suprotnom može dobiti pogrešan rezultat. Vodi računa da prstima ne dodiruješ metalne kontakte na mjernim sondama i kontakte diode, jer na taj način možeš da utičeš na rezultat mjerenja! Rezultat mjerenja upiši u tabelu 1. Zatim zamijeni mjesta mjernim sondama i rezultat takođe zabilježi u tabelu. Ukoliko je pri jednom od ova dva mjerenja instrument pokazao konačnu vrijednost otpornosti (tipično više stotina Ω ili reda $k\Omega$ – slika 1a), a u drugom beskonačnu otpornost (slika 1b), dioda je ispravna.

Ukoliko se pri oba mjerenja na istoj diodi dobiju vrijednosti sličnog reda veličine, dioda je neispravna. Ako je prilikom ova dva mjerenja dobijen nulti otpor, dioda je u proboju (kratak spoj). Ukoliko bi u oba smjera otpor bio beskonačan, onda je dioda pregorjela (u prekidu).



a)



b)

Slika 1. Ispitivanje diode mjerenjem otpornosti pri: a) direktnoj polarizaciji i b) inverznoj polarizaciji

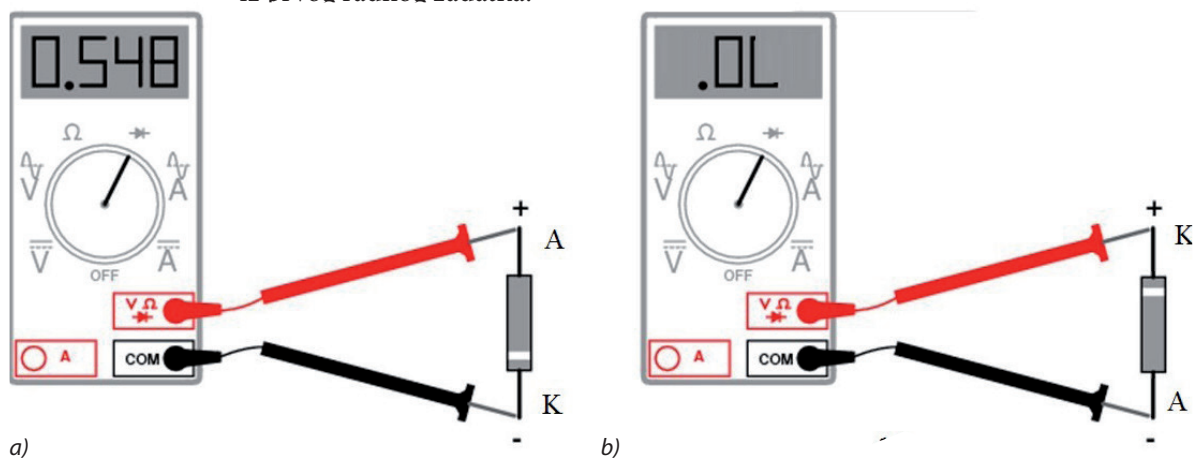
Tabela 1

Red. br. diode	Oznaka diode	Otpornost pri I mjerenju ($k\Omega$)	Otpornost pri II mjerenju ($k\Omega$)	Stanje diode
1.				
2.				
3.				
4.				
5.				

2. *Određivanje izvoda kod diode mjerenjem otpornosti.* Iako su izvodi kod većine dioda na neki način označeni, često ih je veoma teško razlikovati samo na osnovu vizuelnog pregleda. Međutim, određivanje anode i katode moguće je izvršiti i mjerenjem otpora između ovih izvoda. Kada se kao rezultat mjerenja dobije konačna otpornost, onda izvod na kome se nalazila crvena mjerna sonda predstavlja anodu, dok izvod na koji je bila priključena crna sonda predstavlja katodu. Slično tome, ukoliko instrument pokaže beskonačnu otpornost, onda izvod na kome se nalazi crvena sonda jeste katoda, dok izvod na kome je

crna sonda predstavlja anodu. Navedena tvrđenja primijeni za određivanje elektroda kod dioda korišćenih u prethodnom zadatku. Na osnovu oznaka na samoj diodi provjeri uz pomoć interneta da li si dobro odredio/odredila njene izvode.

3. *Ispitivanje diode pomoću „zujalice“.* Dioda se može ispitati i pomoću odgovarajućeg režima za ispitivanje diode na multimetru („zujalice“). Postavi crvenu sondu na jedan izvod diode a crnu na drugi. Ako instrument pokazuje vrijednosti između 0,2 i 0,7 volti (napon potencijalne barijere), elektroda na kojoj se nalazi crvena sonda predstavlja anodu, a elektroda na kojoj se nalazi crna mjerna sonda predstavlja katodu (slika 2a). Zamijeni mjesta mjernim sondama. Ukoliko u ovom slučaju ne dođe do promjene pokazivanja instrumenta tj. mjerena vrijednost je izvan mjernog opsega instrumenta, dioda je ispravna. Pri tome crna mjerna sonda označava anodu a crvena katodu. Svaki drugi rezultat u ova dva mjerenja jeste znak da dioda nije ispravna. Odredi kontakte i ispitaj ispravnost svih dioda iz prethodnih radnih zadataka pomoću ove metode. Dobijene rezultate uporedi s onim iz prvog radnog zadatka.



Slika 2. Ispitivanje diode pomoću „zujalice“ pri: a) direktnoj i b) inverznoj polarizaciji

PRAKTIČNA VJEŽBA BR. 6

Snimanje strujno-naponskih karakteristika diode

Cilj vježbe: Osposobljavanje za snimanje strujno-naponske karakteristike diode. Razvijanje preciznosti i logičkog rasuđivanja.

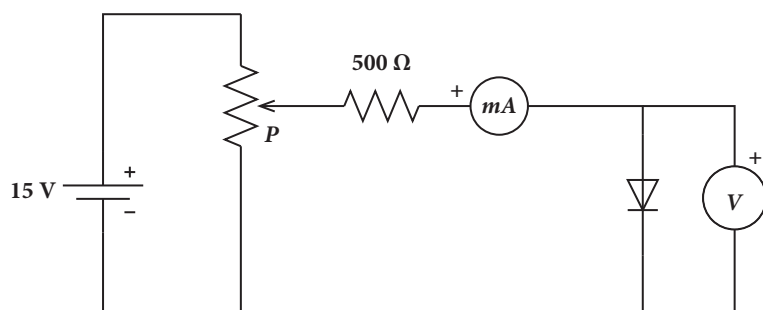
Potrebni laboratorijski uređaji, oprema i elektronske komponente: Izvor jednosmjernog napona, multimetri, namjenska maketa za snimanje strujno-naponskih karakteristika diode.

Ponavljanje gradiva: Definiši prag provođenja diode. Navedi uslove pri kojima se javlja proboj diode.

Radni zadaci:

1. *Snimanje strujno-naponskih karakteristika silicijumske diode.* Komponente na maketi povezane su prema šemi za snimanje karakteristika diode pri direktnoj polarizaciji (slika 1). Prikluči izvor jednosmjernog napona na za to predviđeno mjesto i podesi na vrijednost 15 V. Jedan multimetar podesi na opseg za mjerenje jednosmjerne struje reda mA i postavi na mjesto predviđeno za miliampermetar.

Preklopnik na drugom multimetru podesi u položaj za mjerenje jednosmjernog napona i postavi na za to predviđeno mjesto. Vodi računa o polaritetu! Diodu postavi kao na slici, tako da bude direktno polarisana. Napon polarizacije mijenja se pomoću potenciometra P. U početku potenciometar podesi tako da voltmetar pokazuje nulu, a zatim ga postepeno pomjeraj tako da pokazivanja instrumenta prate vrijednosti napona iz tabele 1. Za svaku od tih vrijednosti prati promjenu struje i očitavanja unosi u datu tabelu.



Slika 1. Šema za snimanje strujno-naponskih karakteristika silicijumske diode pri direktnoj polarizaciji

Tabela 1

Silicijumska									
U_D (V)	0	0,2	0,4	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75
I_D (mA)									

Dobijene rezultate iskoristi da na milimetarskom papiru nacrtáš zavisnost struje od napona pri direktnoj polarizaciji kod silicijumske diode (razmjera: 1 cm = 1 mA, 1 cm = 0,1 V). Uporedi i komentariši sličnost dobijene karakteristike s onom koja ti je prezentovana pri teorijskim razmatranjima dioda.

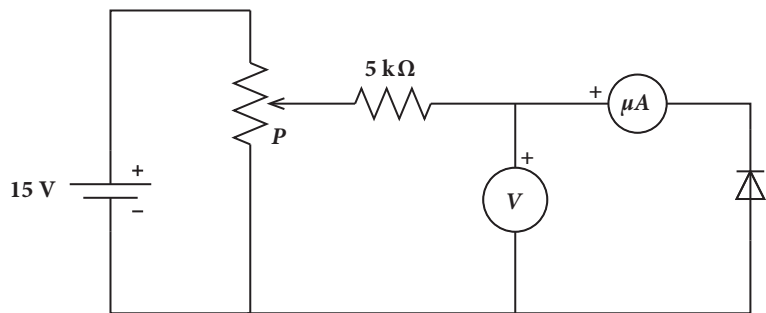
Snimanje karakteristike silicijumske diode pri inverznoj polarizaciji ne izvodi se zbog veoma male struje, pa takvo mjerenje zahtijeva specijalne instrumente.

2. Snimanje strujno-naponskih karakteristika germanijumske diode. Umjesto silicijumske diode staviti germanijumsku i ponoviti opisani postupak pri direktnoj polarizaciji. Rezultate upiši u tabelu 2.

Tabela 2

Germanijumska									
U_D (V)	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5
I_D (mA)									

Nakon što si popunio/popunila tabelu, okreni diodu tako da anoda i katoda zamijene mjesta (slika 2). Sada je ona inverzno polarisana. Multimetar namijenjen za mjerenje struje prebaci u opseg za μA . Takođe, voltmetar postavi prije mikroampermetra (kao na slici 2) kako se ne bi mjerila i struja koja protiče kroz voltmetar. Napon inverzne polarizacije pomoću potenciometra mijenjaj u koracima koji su definisani u tabeli 3, i pritom bilježi očitavanja s mikroampermetra.



Slika 2. Šema za snimanje strujno-naponskih karakteristika germanijumske diode pri inverznoj polarizaciji

Tabela 3

Germanijumska							
U (V)	0	-2	-4	-6	-8	-10	-15
I (μ A)							

Dobijene rezultate iskoristi da na milimetarskom papiru, u razmjeri 1 cm = 1 mA i 1 cm = 0,1 V pri direktnoj, 1 cm = 1 μ A i 1 cm = 5 V pri inverznoj polarizaciji, nacrtáš zavisnost direktne i inverzne struje od napona kod germanijumske diode. Objasni zašto je potreban veći napon direktne polarizacije da bi silicijumska dioda provela u odnosu na germanijumsku.

PRAKTIČNA VJEŽBA BR. 7

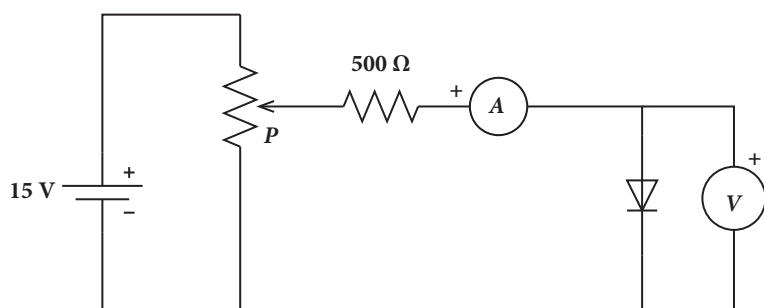
Snimanje strujno-naponskih karakteristika diode primjenom softvera TINA

Cilj vježbe: Osposobljavanje za ispitivanje rada diode primjenom softvera TINA. Razvijanje preciznosti, logičkog rasuđivanja i digitalnih kompetencija.

Potrebni laboratorijski uređaji, oprema i elektronske komponente: Računar s instaliranim softverom TINA.

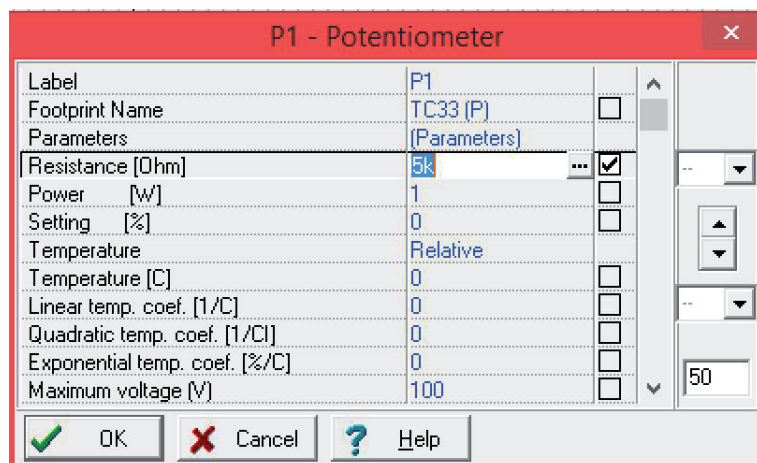
Radni zadaci:

1. Snimanje strujno-naponskih karakteristika silicijumske diode sa oznakom 1N4007. Realizuj električno kolo sa slike 1 u softveru TINA.



Slika 1. Šema za snimanje strujno-naponskih karakteristika silicijumske diode pri direktnoj polarizaciji

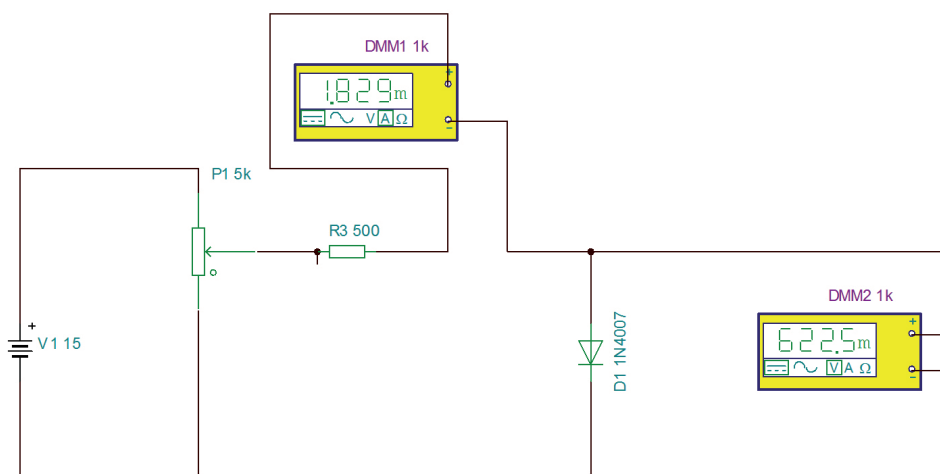
Dvostrukim klikom na diodu u podešavanjima, odaberi diodu sa oznakom 1N4007. Podеси otpornost potenciometra na 5 k Ω , a zatim u polju *Setting* podеси na 0 (slika 2). Promjenom ove vrijednosti kontroliše se vrijednost napona kojom se polariše dioda, slično kao kod prethodne vježbe, u laboratorijskim uslovima. Postepenim povećavanjem vrijednosti u polju *Setting*, raste i napon polarizacije. Pokreni interaktivni režim, očitaj vrijednosti s instrumenata i upiši ih u tabelu 1. Električna šema ovog kola realizovana u softveru TINA nakon pokretanja interaktivnog režima, prikazana je na slici 3. Ponovi postupak za različite vrijednosti napona polarizacije. Vrijednosti napona na diodi nijesu unaprijed definisane u tabeli 1, već ih, zbog specifičnosti rada s potenciometrom u softveru TINA, treba uzeti po uzoru na prethodnu vježbu. Utvrdi prag provođenja diode i nacrtaj karakteristiku diode pri direktnoj polarizaciji.



Slika 2. Podešavanje potenciometra

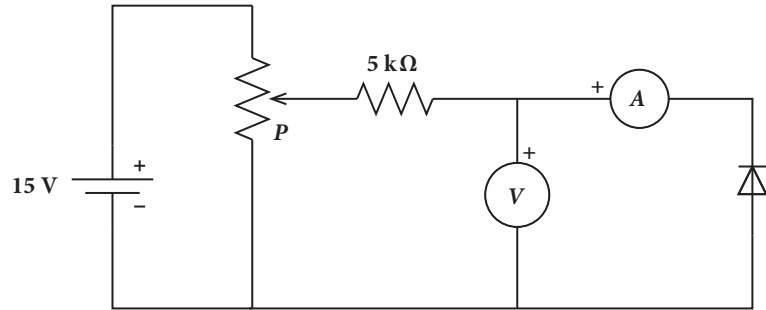
Tabela 1

1N4007									
U_D (V)									
I_D (mA)									



Slika 3. Realizacija električne šeme sa slike 1 u softveru TINA

2. Ponovi postupak za inverzno polarisanu diodu prema šemi sa slike 4 i rezultate upiši u tabelu br. 2. Grafički predstavi zavisnost mjerene struje od napona.



Slika 4. Šema za snimanje strujno-naponskih karakteristika silicijumske diode pri inverznoj polarizaciji

Tabela 2

1N4007							
U (V)							
I (μ A)							

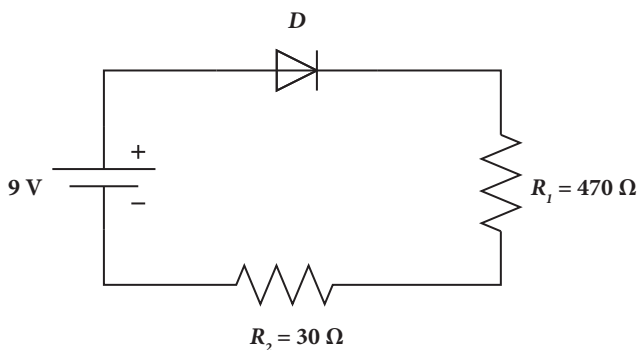
GLAVA III

PRAKTIČNA VJEŽBA BR. 8

Spajanje elemenata zadatog električnog kola s diodom na eksperimentalnoj pločici. Mjerenje električnih veličina u kolu pomoću multimetra

Cilj vježbe: Osposobljavanje za korišćenje eksperimentalne pločice. Razvijanje preciznosti, logičkog rasuđivanja i interesovanja za elektroniku.

Potrebni laboratorijski uređaji, oprema i elektronske komponente: Izvor jednosmjernog napona, eksperimentalna pločica, kratkospojnici, diode, otpornici, multimetri.

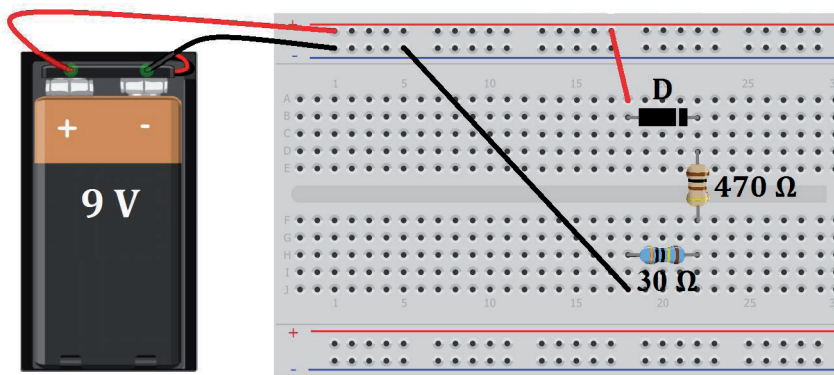


Slika 1. Kolo s diodom

Ponavljanje gradiva: Pokaži na eksperimentalnoj pločici tačke na istom potencijalu. Objasni na koji je način polarisana dioda sa slike 1.

Radni zadaci:

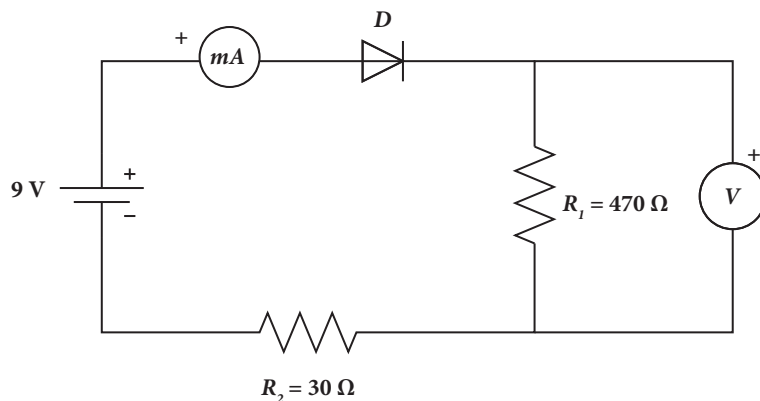
1. *Spajanje elemenata kola na pločici.* Na eksperimentalnoj pločici izvrši spajanje elemenata električnog kola s diodom čija je šema data na slici 1. Pri tome se pridržavaj pravila koja važe za međusobnu vezu između priključaka na pločici, i po potrebi, koristi kratkospojnike.



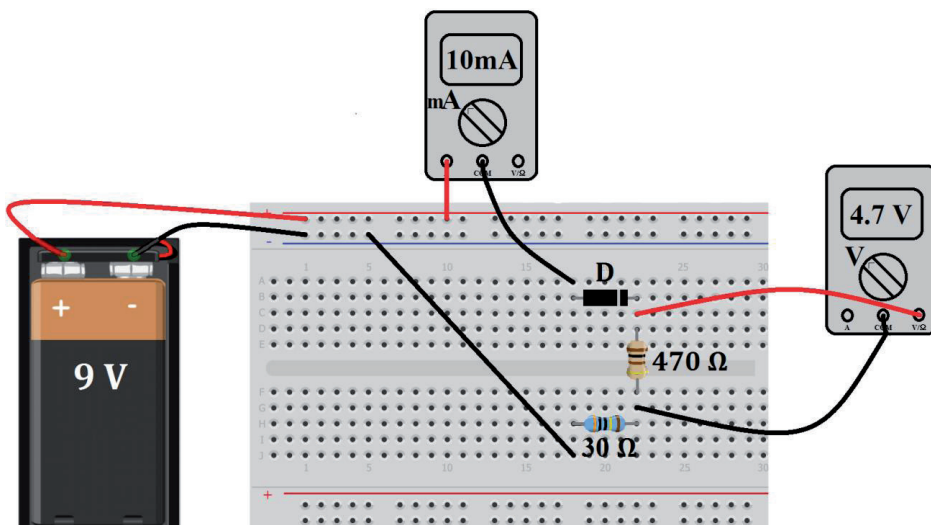
Slika 2. Skica realizacije električne šeme sa slike 1 na eksperimentalnoj pločici

2. Mjerenje električnih veličina u kolu. Nakon spajanja, uz pomoć nastavnika/nastavnice provjeri realizovanu šemu. Multimetar podešen za mjerenje jednosmjerne struje reda mA veži na red s diodom; a drugi multimetar, koji je podešen za mjerenje napona, veži paralelno s otpornikom R_1 (slika 3). Na osnovu rezultata mjerenja, primjenom II Kirhofovog zakona, izračunaj vrijednost napona na diodi. Tačnost dobijenog rezultata provjeri neposrednim mjerenjem u kolu.

Razmisli o tome da li je moguće opisani postupak izvesti upotrebom samo jednog multimetra. Ako jeste, demonstriraj to.



Slika 3. Veživanje mjernih instrumenata



Slika 4. Skica realizacije električne šeme sa slike 3 na eksperimentalnoj pločici

3. Realizuj na eksperimentalnoj pločici neko od električnih kola s diodom koje ste obradili u okviru računskih vježbi. Tačnost rezultata dobijenih na tim vježbama, provjeri neposrednim mjerenjima u kolu.

PRAKTIČNA VJEŽBA BR. 9

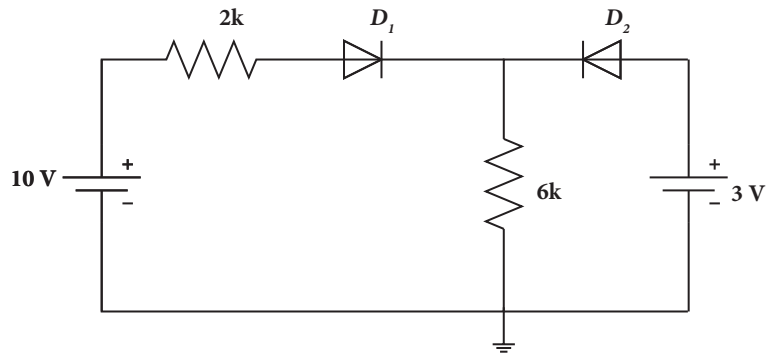
Mjerenje električnih veličina u kolu s diodom u softveru TINA

Cilj vježbe: Osposobljavanje za rad u softveru TINA i njegovu upotrebu pri analizi rada kola s diodama. Razvijanje preciznosti, logičkog rasuđivanja i digitalnih kompetencija.

Potrebni laboratorijski uređaji, oprema i elektronske komponente: Računar s instaliranim softverom TINA.

Radni zadaci:

1. Spoji strujno kolo sa slike 1 u softveru TINA. Kao diode D_1 i D_2 koristi diodu sa oznakom *1N1183*. Preuzmi tabelu sa svim jednosmjernim naponima i strujama u kolu (slika 2a) i precrtaj je u radnu svesku. Tabelu možeš pronaći u meniju *Analysis – DC, Analysis – Table of DC results*. Na osnovu dobijenih rezultata, odredi režime rada za diode D_1 i D_2 . Ponovi postupak kada umjesto izvora od 10 V postaviš izvor od 20 V.

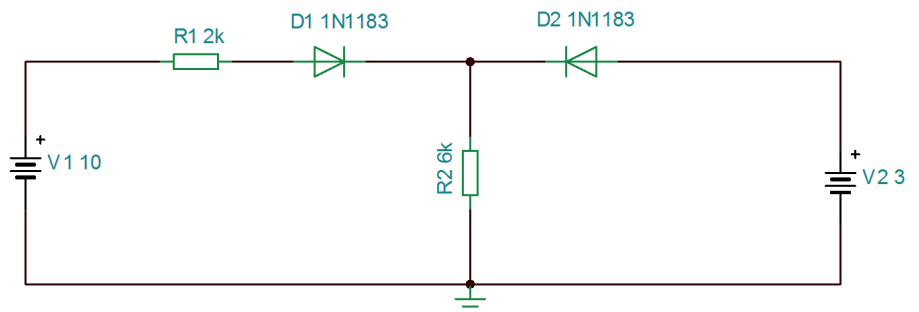


Slika 1. Kolo s diodama

L_R1[1,4]	1,2mA
L_R2[0,2]	-1,2mA
V_D1[4,2]	430,84mV
V_D2[3,2]	-4,18V
V_R1[1,4]	2,38V
V_R2[0,2]	-7,18V
V_V1[1,0]	10V
V_V2[3,0]	3V
VP_1	10V
VP_2	7,18V
VP_3	3V
VP_4	7,61V

Nodal Voltages Currents
 Other Voltages Outputs

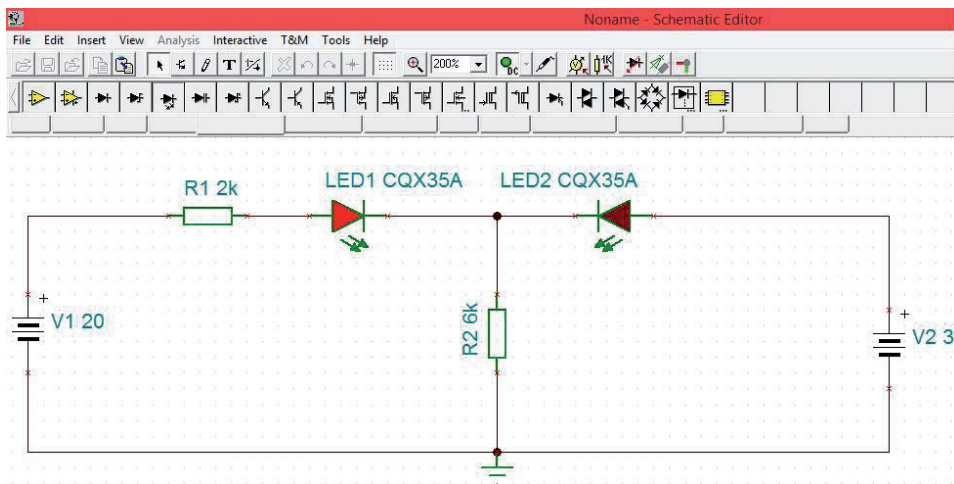
a)



b)

Slika 2. a) Tabela s vrijednostima jednosmjernih veličina; b) Realizacija električne šeme sa slike 1 u softveru TINA

2. Spoj strujno kolo sa slike 1 u softveru TINA tako što ćeš koristiti LED diode sa oznakom CQX35A. Provjeri da li neka od dioda svijetli nakon pokretanja interaktivnog režima. U radnoj svesci napravi tabelu s vrijednostima karakterističnih jednosmjernih napona i struja u kolu. Ponovi postupak kada umjesto izvora od 10 V koristiš izvor od 20 V. U radnoj svesci napravi tabelu s vrijednostima karakterističnih jednosmjernih napona i struja u kolu, i na osnovu nje utvrdi režime rada dioda. Koristeći specifikacije s interneta za upotrijebljenu diodu, pokušaj da objasniš zašto je LED dioda D_1 tek sada provela struju (slika 3). Na osnovu vrijednosti struje kroz diodu D_2 i napona na njoj, odredi njen režim rada. Uporedi rezultat s vrijednošću probojnog napona koji možeš naći u specifikacijama (dvostruki klik na diodu).



Slika 3. Izgled dijela radnog prozora nakon pokretanja interaktivnog režima pri $V_1 = 20\text{ V}$

GLAVA IV

PRAKTIČNA VJEŽBA BR. 10

Mjerenja u kolu stabilizatora napona sa Zenerovom diodom

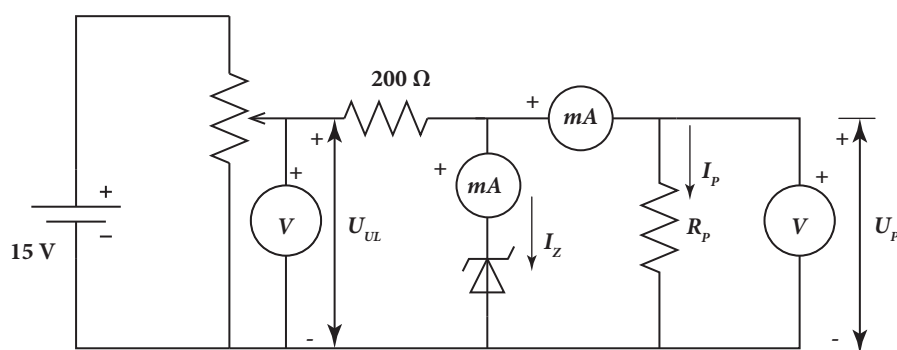
Cilj vježbe: Osposobljavanje za analizu rada stabilizatorskog kola sa Zenerovom diodom. Razvijanje preciznosti u radu i logičkog rasuđivanja.

Potrebni laboratorijski uređaji, oprema i elektronske komponente: Izvor jednosmjernog napona, multimetri (4), namjenska maketa stabilizatora napona sa Zenerovom diodom (BZX55C5V6), Zenerova dioda, otpornici od 200 Ω , 400 Ω , 600 Ω , 1 k Ω , 5 k Ω i 10 k Ω .

Ponavljanje gradiva: Opiši na koji se način Zenerova dioda ponaša kada je inverzno polarisana. Objasni na koji se način napon na Zenerovoj diodi mijenja u zavisnosti od porasta struje kroz nju pri inverznoj polarizaciji. Opiši kako promjena otpornosti potrošača utiče na promjenu napona na njemu kod stabilizatora napona sa Zenerovom diodom.

Radni zadaci:

1. Maketa stabilizatora sa Zenerovom diodom napravljena je prema električnoj šemi sa slike 1. Prikluči izvor jednosmjernog napona, potrošač od $1\text{ k}\Omega$ i multimetre podešene na odgovarajuće mjerne opsege, na za to predviđena mjesta. Vodi računa o polaritetu! U početnom trenutku Zenerova dioda nije priključena u kolo! Pomoću potencijometra mijenjaj ulazni napon U_{ul} prema vrijednostima definisanim u tabeli 1 i pritom prati promjenu napona na potrošaču, kao i struje kroz potrošač i Zenerovu diodu. Rezultate upisuj u tabelu 1. Nacrtaj zavisnost napona i struje na potrošaču od ulaznog napona, kao i struje kroz Zenerovu diodu, takođe od ulaznog napona, na milimetarskom papiru (razmjera: horizontalna osa $1\text{ cm} = 1\text{ V}$, vertikalna osa $1\text{ cm} = 1\text{ V}$ i $1\text{ cm} = 2\text{ mA}$).



Slika 1. Stabilizator napona sa Zenerovom diodom

Tabela 1

U_{ul} (V)	8	9	10	11	12	13	14
U_p (V)							
I_z (mA)							
I_p (mA)							

2. Nakon izvršenih mjerenja, ponovi postupak s uključenom Zenerovom diodom. Rezultate upiši u tabelu 2. Nacrtaj odgovarajuće grafike zavisnosti (razmjera: horizontalna osa $1\text{ cm} = 1\text{ V}$, vertikalna osa $1\text{ cm} = 1\text{ V}$ i $1\text{ cm} = 2\text{ mA}$).

Tabela 2

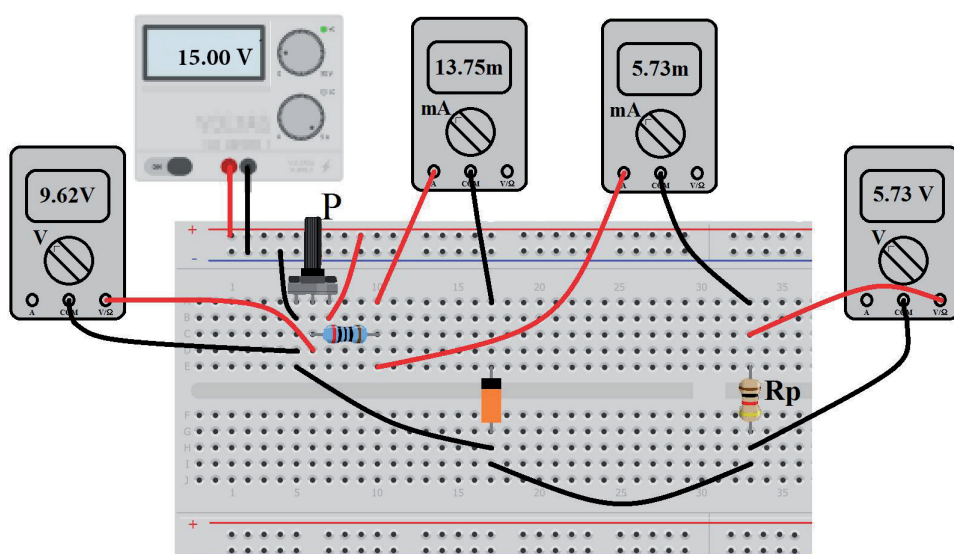
U_{ul} (V)	8	9	10	11	12	13	14
U_p (V)							
I_z (mA)							
I_p (mA)							

3. Pri ulaznom naponu od 14 V mijenjaj otpornost potrošača prema tabeli 3. Izmjeri veličine navedene u tabeli i nacrtaj na milimetarskom papiru grafike zavisnosti tih veličina od promjene otpornosti potrošača (razmjera horizontalna osa: $1\text{ cm} = 1\text{ k}\Omega$, vertikalna osa $1\text{ cm} = 1\text{ V}$ i $1\text{ cm} = 2\text{ mA}$).

Tabela 3

R_p (k Ω)	0,2	0,4	0,6	1	5	10
U_p (V)						
I_z (mA)						
I_p (mA)						

Napomena: Vježbu je moguće realizovati i spajanjem komponenti na eksperimentalnoj pločici (slika 2).



Slika 2. Skica realizacije stabilizatora napona sa Zenerovom diodom na eksperimentalnoj pločici

PRAKTIČNA VJEŽBA BR. 11

Analiza rada polutalasnog usmjerača pomoću laboratorijskih uređaja

Cilj vježbe: Osposobljavanje za analizu rada polutalasnog usmjerača s diodama pomoću laboratorijskih uređaja. Razvijanje preciznosti u radu i logičkog rasuđivanja.

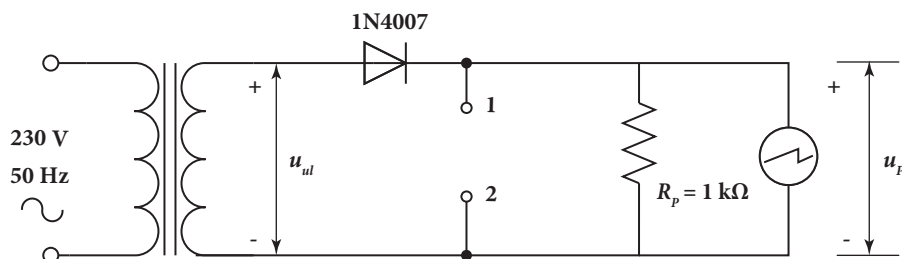
Potrebni laboratorijski uređaji, oprema i elektronske komponente: Maketa polutalasnog usmjerača, dvokanalni osciloskop i kondenzator kapacitivnosti 220 μ F.

Ponavljanje gradiva: Objasni ulogu usmjeračkih kola. Objasni namjenu transformatora. Navedi razliku između primara i sekundara kod transformatora. Navedi uslov da dioda provodi. Navedi razliku između polutalasnog i punotalasnog usmjerača. Opiši ulogu kondenzatora u usmjeračkim kolima.

Radni zadaci:

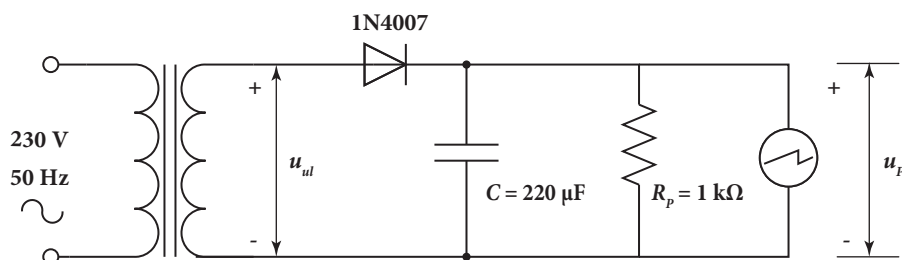
1. Komponente na maketi spojene su prema električnoj šemi sa slike 1. Potrebno je izvršiti istovremeno snimanje vremenskih oblika naizmjeničnog napona u_{ul} sa

sekundara transformatora i napona na potrošaču u_p . Prema tome, jedan kanal osciloskopa priključi na sekundar transformatora a drugi na izlaz kola. Priključi maketu na električnu mrežu i pokreni osciloskop. Podеси horizontalnu i vertikalnu vremensku bazu kako bi optimizovao/optimizovala prikaz na ekranu osciloskopa. Dobijene vremenske oblike ovih napona precrtaj na milimetarski papir u razmjeri 1 cm = 3 V i 1 perioda = 4 cm.



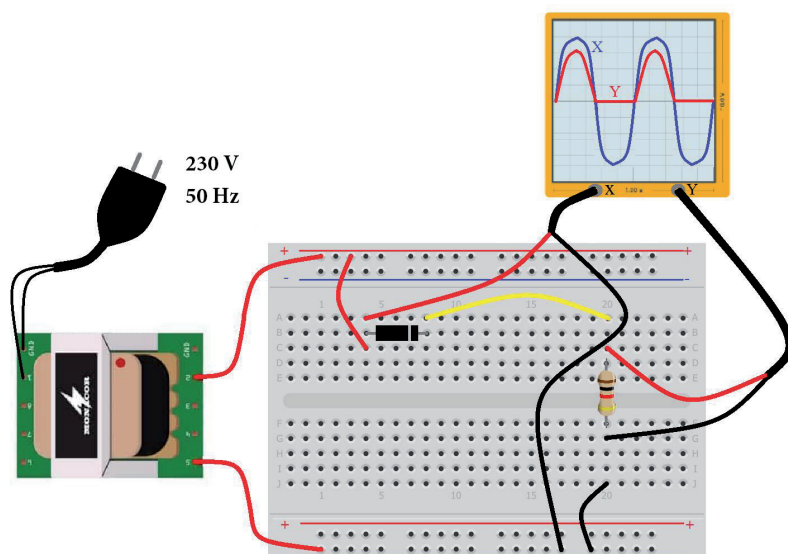
Slika 1. Električna šema polutalasnog usmjerača bez filtarskog kondenzatora

2. Dodaj filtarski kondenzator kapacitivnosti 220 μF na odgovarajuće mjesto na maketi, između tačaka 1 i 2. Ekvivalentna električna šema izgleda kao na slici 2. Ponovi cjelokupan postupak iz prethodnog radnog zadatka. Uporedi dobijene grafike s onim kod teorijskih razmatranja.

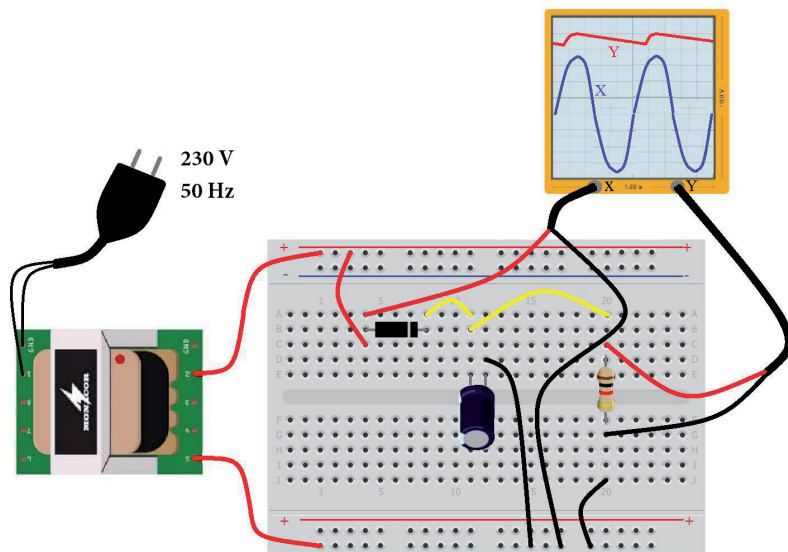


Slika 2. Električna šema polutalasnog usmjerača s filtarskim kondenzatorom

Napomena: Vježbu je moguće realizovati i spajanjem komponenti na eksperimentalnoj pločici (slike 3 i 4).



Slika 3. Skica realizacije polutalasnog usmjerača bez filtarskog kondenzatora na eksperimentalnoj pločici



Slika 4. Skica realizacije polutalasnog usmjerača s filterskim kondenzatorom na eksperimentalnoj pločici

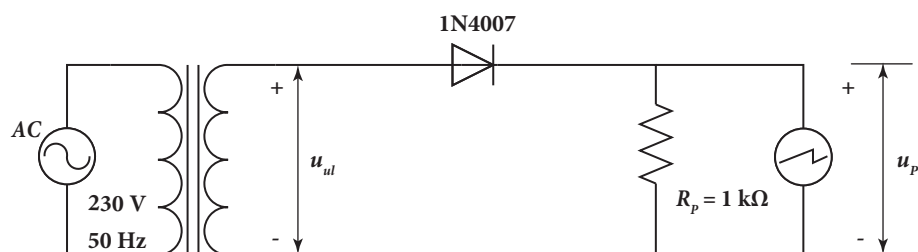
Analiza rada polutalasnog usmjerača primjenom softvera TINA

Cilj vježbe: Osposobljavanje za analizu rada polutalasnog usmjerača s dioda-
ma primjenom softvera TINA. Razvijanje preciznosti u radu, logičkog rasuđivanja
i digitalnih kompetencija.

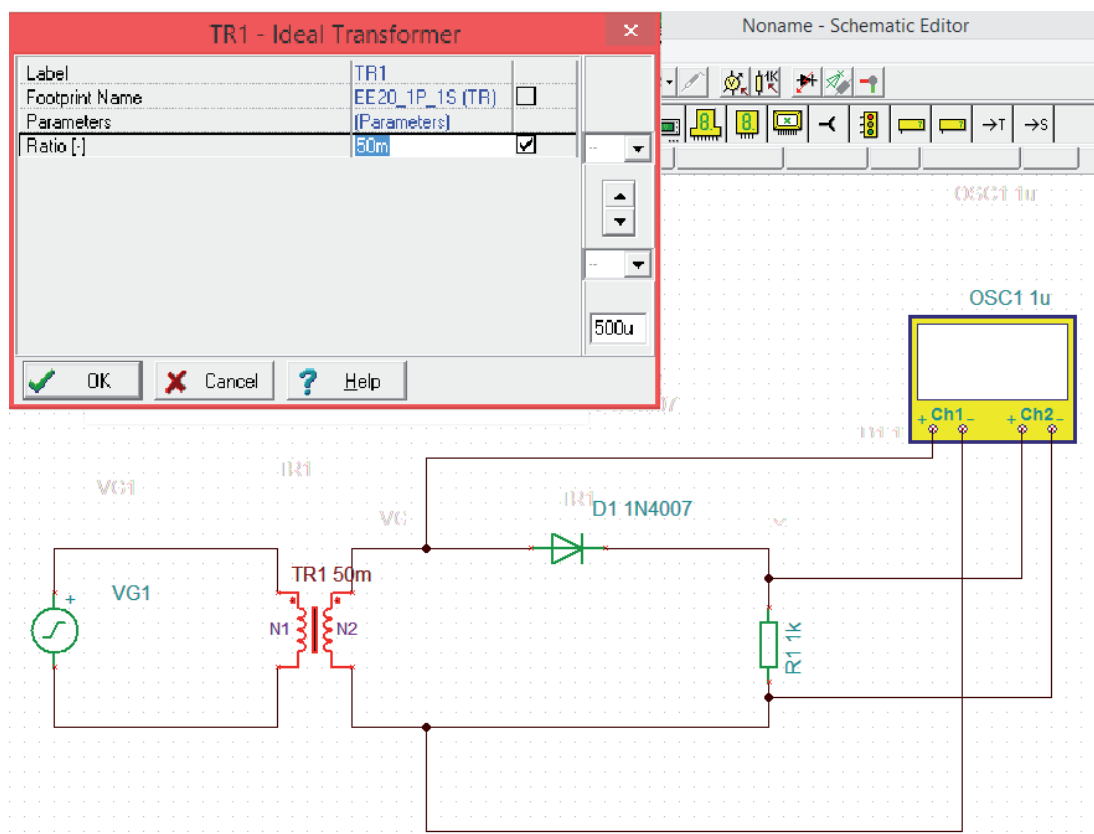
Potrebni laboratorijski uređaji, oprema i elektronske komponente: Računar
s instaliranim softverom TINA.

Radni zadaci:

1. Spoji elektronske komponente prema električnoj šemi sa slike 1. Naponski
generator nalazi se na kartici *Sources*, i dvostrukim klikom na njega moguće ga
je podesiti. U meniju *Signal* izaberi sinusoidu amplitude 325 V i učestanosti 50
Hz. To su vrijednosti koje odgovaraju naponu mreže, jer je $U_m = U_{eff} \sqrt{2}$ ($325 \approx 230$
 $\cdot 1,41$). Transformator se nalazi na kartici *Basic*. Klikom na ovu komponentu nudi
se meni iz koga je potrebno izabrati opciju *Ideal Transformer*. Nakon dvostrukog
klika na odabranu komponentu, u meniju *Ratio* podesi odnos primara i sekundara
na vrijednost 0,05 (slika 2). Time se postiže da efektivna vrijednost naizmjeničnog
napona na sekundaru (U_{uleff}) bude približno 11,5 V.



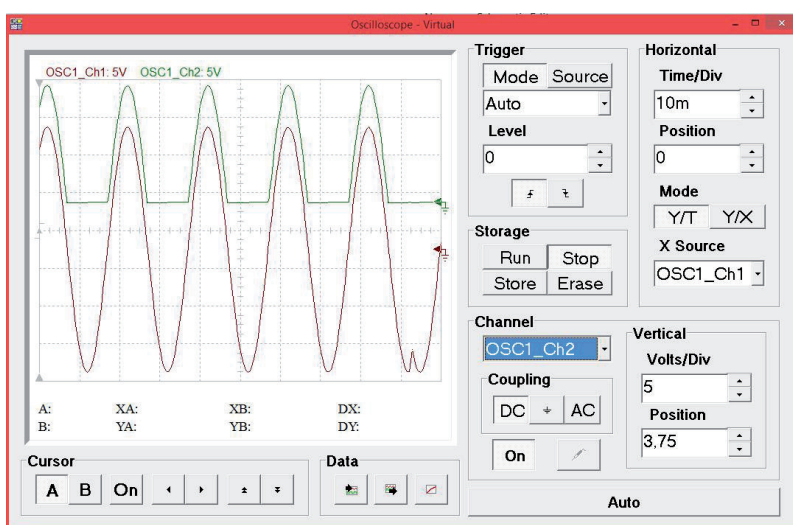
Slika 1. Električna šema polutalasnog usmjerača bez filterskog kondenzatora



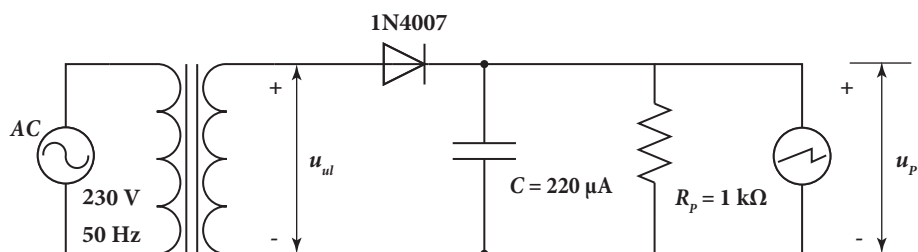
Slika 2. Izgled dijela radnog prozora nakon spajanja električne šeme sa slike 1 i podešavanja transformatora

Jedan kanal osciloskopa priključi na sekundar transformatora, a drugi na izlaz kola kako bi se moglo vršiti istovremeno snimanje vremenskih oblika naizmjeničnog napona u_{ul} sa sekundara transformatora i napona na potrošaču u_p . U podešavanjima osciloskopa (meni *T&M*, opcija *Oscilloscope*) pokreni osciloskop i podеси horizontalnu i vertikalnu skalu kako bi se dobio optimalan prikaz na ekranu osciloskopa (slika 3). Podešavanje vertikalne skale vrši se posebno i za jedan i za drugi kanal kako bi se oba signala prikazala na ekranu (sekcija *Channel*). Nakon izvršenog podešavanja, zaustavi prikaz na osciloskopu (dugme *Stop*) i pozicioniraj posmatrane signale jedan ispod drugog. Preuzmi snimljene signale u vidu grafika (*Export Curve*) i precrtaj ih na milimetarski papir u odgovarajućoj razmjeri. Opiši razlike između ovih signala.

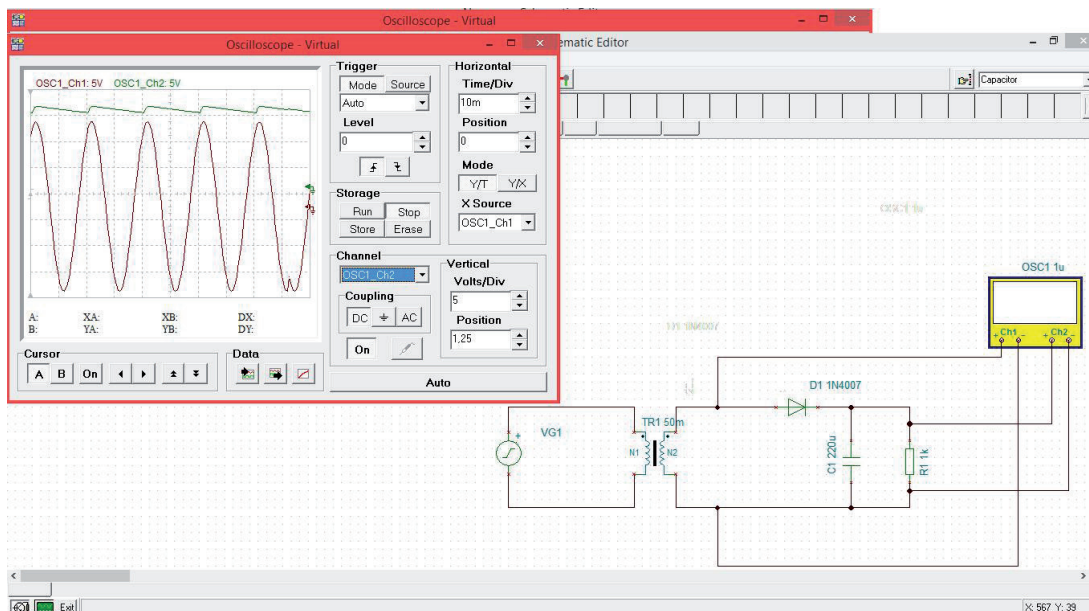
2. Modifikuj prethodno povezanu šemu tako što ćeš dodati filterski kondenzator (slika 4). Ponovi cjelokupan postupak iz prethodnog radnog zadatka. Uporedi napone na potrošaču u kolima s filterskim kondenzatorom i bez njega.



Slika 3. Pokazivanje osciloskopa nakon podešavanja



Slika 4. Električna šema polutalasnog usmjerača s filtarskim kondenzatorom



Slika 5. Izgled radnog prozora nakon dodavanja filtarskog kondenzatora

3. Podеси kapacitivnost kondenzatora najprije na 100 μF , a zatim i na 20 μF . Pokreni osciloskop i snimi talasne oblike izlaznog napona u oba slučaja. Opiši na koji se način, sa smanjenjem kapacitivnosti kondenzatora, promijenio izlazni napon.

Analiza rada punotalasnog usmjerača pomoću laboratorijskih uređaja

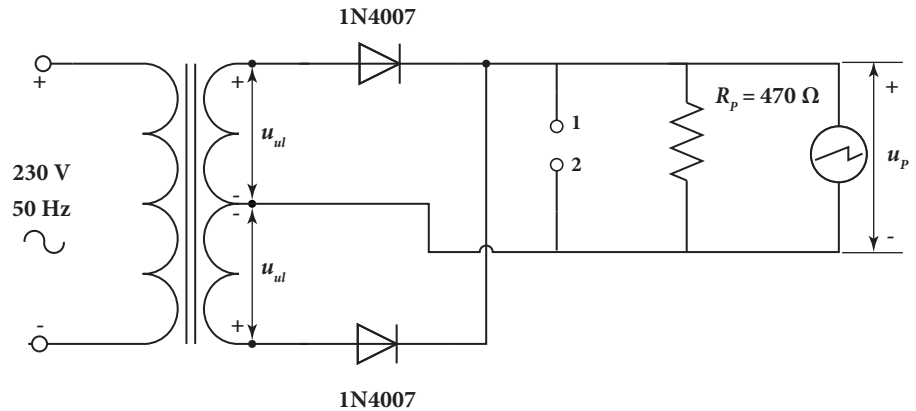
Cilj vježbe: Osposobljavanje za analizu rada punotalasnog usmjerača s diodama pomoću laboratorijskih uređaja. Razvijanje preciznosti u radu i logičkog rasuđivanja.

Potrebni laboratorijski uređaji, oprema i elektronske komponente: Maketa punotalasnog usmjerača s dvije diode, dvokanalni osciloskop i kondenzator kapacitivnosti 100 μF .

Ponavljanje gradiva: Navedi na koji je način moguće realizovati punotalasni usmjerač. Opiši na koji se način obezbjeđuje ispravljanje ulaznog napona u toku obje poluperiode kod usmjerača s dvije diode.

Radni zadaci:

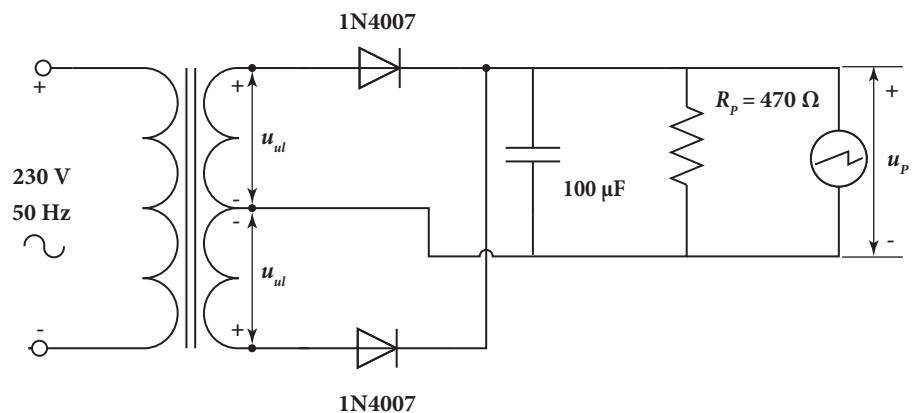
1. Komponente na maketi spojene su prema električnoj šemi sa slike 1.



Slika 1. Električna šema punotalasnog usmjerača s dvije diode bez filtarskog kondenzatora

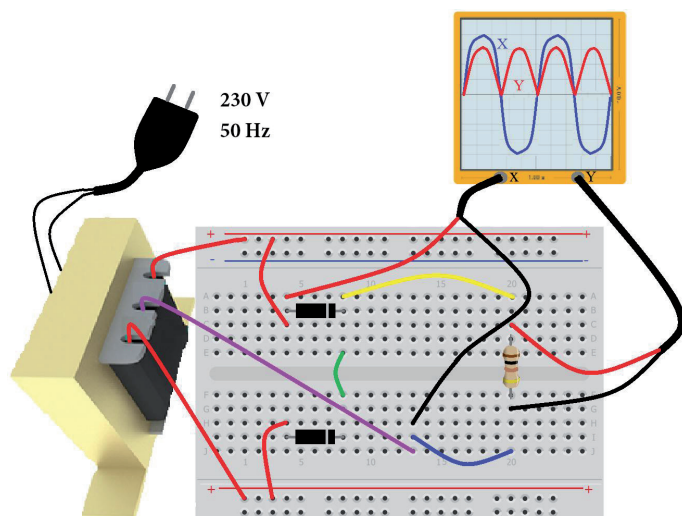
Priključi maketu na električnu mrežu i pomoću osciloskopa snimi vremenski oblik ulaznog napona sa sekundara transformatora i izlazni napon na potrošaču. Dobijene vremenske oblike precrtaj na milimetarski papir u razmjeri $1 \text{ cm} = 3 \text{ V}$ i $1 \text{ perioda} = 4 \text{ cm}$. Komentariši u čemu se razlikuje napon na potrošaču u odnosu na onaj kod polutalasnog usmjerača bez kondenzatora.

2. Dodaj filtarski kondenzator kapacitivnosti $100 \mu\text{F}$ na odgovarajuće mjesto na maketi (između tačaka 1 i 2). Ekvivalentna električna šema prikazana je na slici 2. Za razliku od polutalasnog usmjerača, upotrijebljen je filtarski kondenzator od $100 \mu\text{F}$ kako bi se što bolje uočila prednost punotalasnog ispravljanja. Ponovi cjelokupan postupak iz prethodnog radnog zadatka. Komentariši u čemu se razlikuje napon na potrošaču u odnosu na onaj kod polutalasnog usmjerača s filtarskim kondenzatorom. Poređaj sve obrađene usmjerače, od najlošijeg ka najboljem, prema usmjeračkim svojstvima. Na osnovu stečenog iskustva, predvidi na koji bi se način promijenio izlazni napon kada bi se koristio kondenzator duplo veće kapacitivnosti.

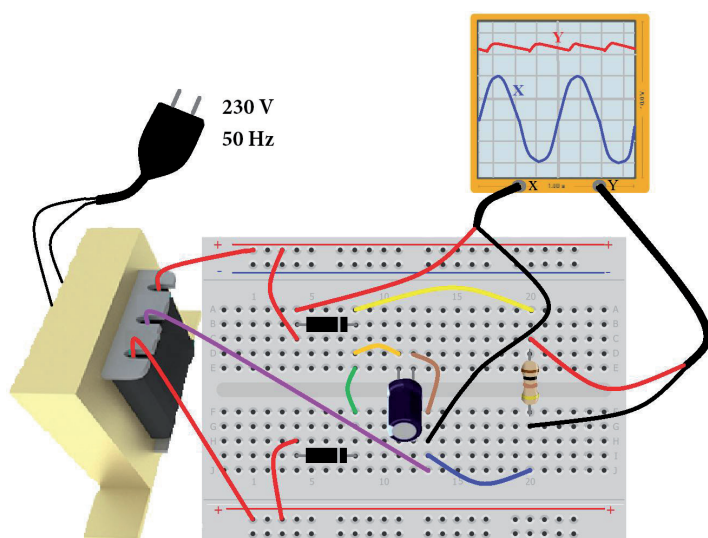


Slika 2. Električna šema punotalasnog usmjerača s filtarskim kondenzatorom

Napomena: Vježbu je moguće realizovati i spajanjem komponenti na eksperimentalnoj pločici (slike 3 i 4).



Slika 3. Skica realizacije punotalasnog usmjerača bez filternog kondenzatora na eksperimentalnoj pločici



Slika 4. Skica realizacije punotalasnog usmjerača s filternim kondenzatorom na eksperimentalnoj pločici

PRAKTIČNA VJEŽBA BR. 14

Analiza rada Grecovog punotalasnog usmjerača primjenom softvera TINA

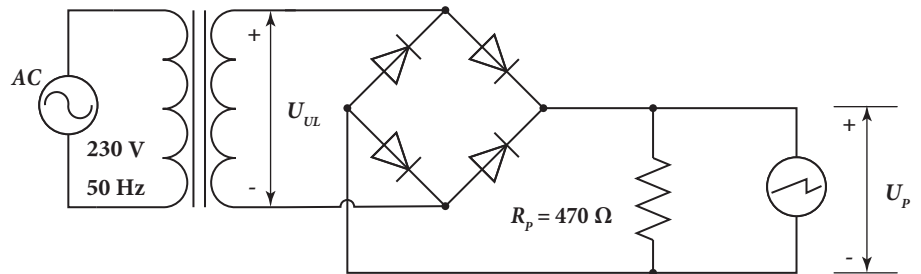
Cilj vježbe: Osposobljavanje za analizu rada punotalasnog usmjerača s dioda-
ma primjenom softvera TINA. Razvijanje preciznosti u radu, logičkog rasuđivanja
i digitalnih kompetencija.

Potrebni laboratorijski uređaji, oprema i elektronske komponente: Računar
sa instaliranim softverom TINA.

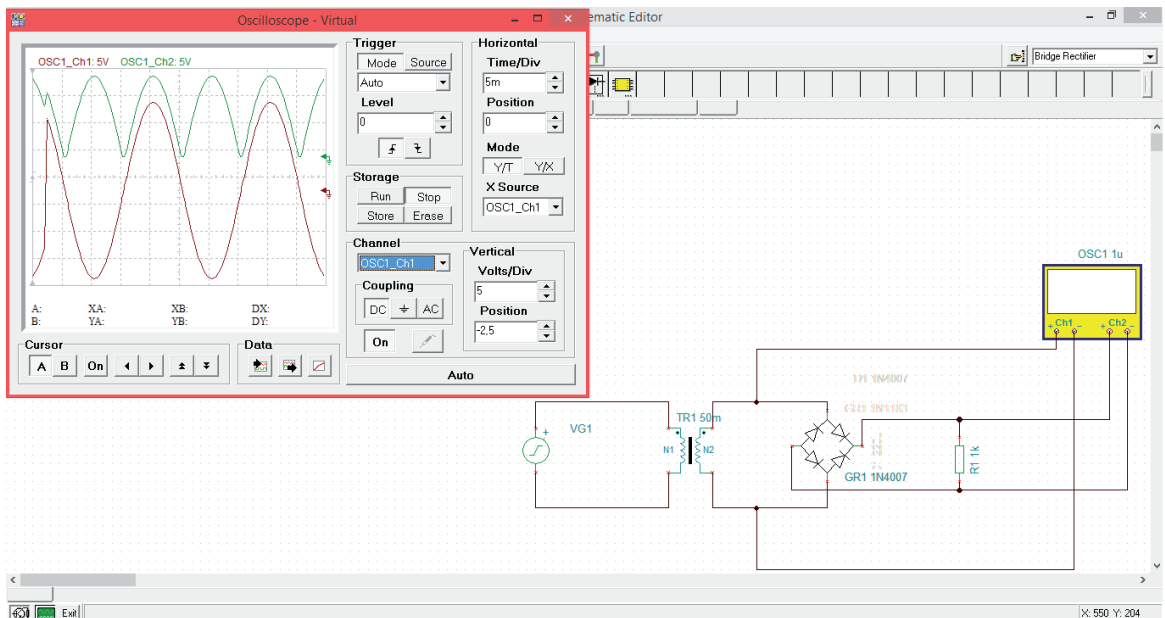
Ponavljanje gradiva: Opiši na koji se način obezbjeđuje ispravljanje ulaznog
napona u toku obje poluperiode kod Grecovog usmjerača.

Radni zadaci:

1. Spoji elektronske komponente i mjerni uređaj na radnoj površini prema električnoj šemi sa slike 1. Potrebno je podesiti upotrijebljene komponente i izvore, prema analogiji s vježbom br. 12. Grecov spoj postoji realizovan kao jedinstvena komponenta na paleti *Semiconductors*. Dobijene vremenske oblike precrtaj na milimetarski papir u odgovarajućoj razmjeri.

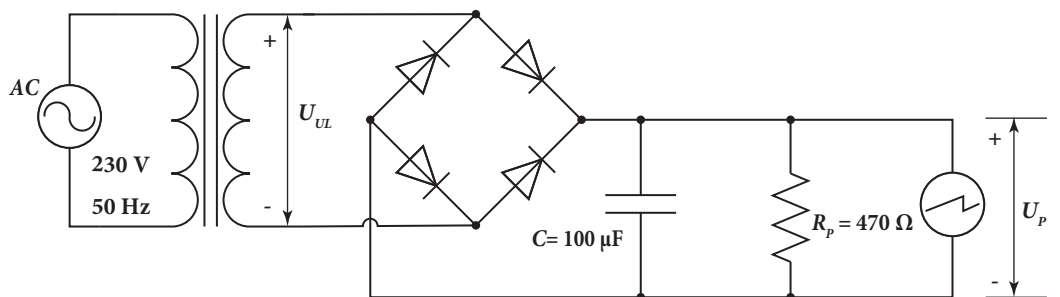


Slika 1. Električna šema Grecovog usmjerača bez filtarskog kondenzatora

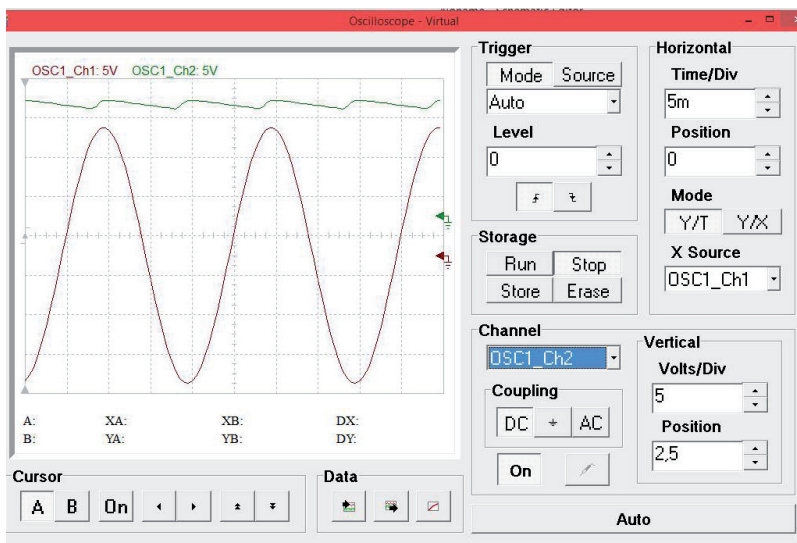


Slika 2. Izgled radnog prozora za kolo bez filtarskog kondenzatora

2. Dodaj filtarski kondenzator na odgovarajuće mjesto u kolu. Ekvivalentna električna šema sada odgovara onoj sa slike 3. Ponovi cjelokupan postupak iz prethodnog radnog zadatka.



Slika 3. Električna šema Grecovog usmjerača s filtarskim kondenzatorom



Slika 4. Pokazivanje osciloskopa u kolu s filtarskim kondenzatorom

GLAVA V

PRAKTIČNA VJEŽBA BR. 15

Ispitivanje bipolarnog tranzistora pomoću multimetra

Cilj vježbe: Osposobljavanje za ispitivanje ispravnosti bipolarnog tranzistora i određivanje njegovih izvoda. Razvijanje preciznosti i logičkog rasuđivanja.

Potrebni laboratorijski uređaji, oprema i elektronske komponente: Multimetar, više bipolarnih tranzistora (ispravnih i neispravnih).

Ponavljanje gradiva: Navedi elektrode kod bipolarnog tranzistora. Navedi vrste bipolarnih tranzistora. Navedi koliko iznosi otpornost inverzno polarisanog PN-spoja.

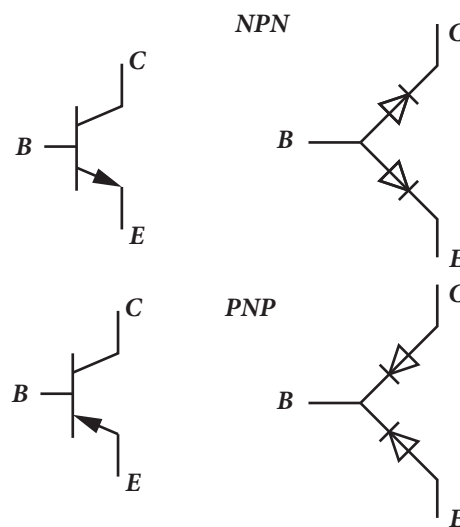
Radni zadaci:

Poznato je da bipolarni tranzistor praktično predstavlja dva PN-spoja, odnosno dvije diode. Prvu diodu čini spoj baza–emiter dok drugu diodu čini spoj baza–kolektor (slika 1). Imajući u vidu ovu činjenicu, provjera ispravnosti bipolarnog tranzistora svodi se u stvari na provjeru ispravnosti ovih PN-spojeva. Tranzistor je ispravan samo ako su ispravna oba PN-spoja od kojih se sastoji.

Bipolarni tranzistor je najbolje prethodno ukloniti iz složenog kola, jer je za njegovo ispitivanje dok je u kolu potrebno određeno iskustvo.

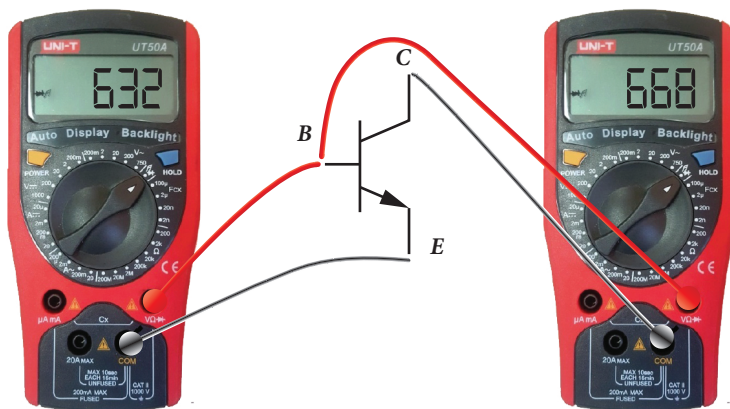
Korak 1: Ispitivanje tipa tranzistora i određivanje baze

Podesi preklopnik multimetra na položaj za ispitivanje diode („zujalica“). Najprije je potrebno utvrditi tip tranzistora. Pretpostavi tip tranzistora, npr. NPN. U tom slučaju, crveni mjerni kabl postavi



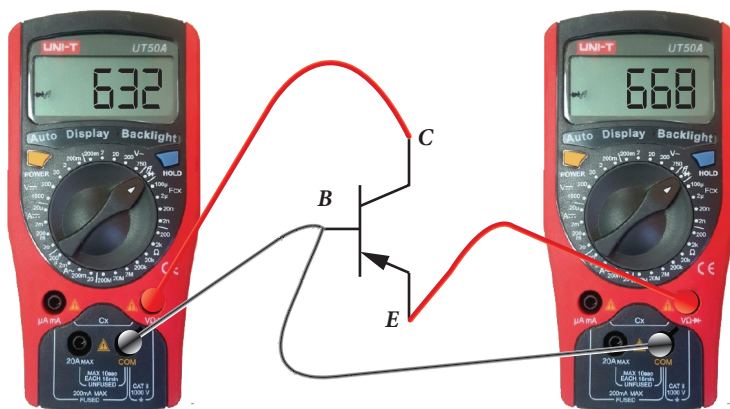
Slika 1

na onu elektrodu za koju pretpostavljaš da je baza. Ukoliko postavljanjem crnog kabla na preostale dvije elektrode instrument u oba slučaja pokaže napon koji odgovara pragu provođenja diode (0,6–0,7 V), tvoja pretpostavka je tačna. To zaista jeste NPN tranzistor, i elektroda na kojoj se nalazi crveni mjerni kabl zaista jeste baza (slika 2). U suprotnom, ponovi postupak s preostale dvije elektrode kako bi utvrdio/utvrdila koja od njih je baza.



Slika 2. Određivanje baze NPN tranzistora

Ukoliko ni u jednom od prethodnih mjerenja ne dobiješ željeni rezultat, polazna pretpostavka je pogrešna, i radi se o PNP tranzistoru. Postavi sada crni mjerni kabl na elektrodu za koju pretpostavljaš da je baza. Postavljanjem crvenog kabla na preostale dvije elektrode, instrument treba da pokaže napon koji odgovara pragu provođenja diode (slika 3). Ponavlja postupak dok ne utvrdiš koja je od elektroda baza.



Slika 3. Određivanje baze kod PNP tranzistora

Na kraju, ako ni u jednom od ova dva slučaja instrument ne pokaže očekivani rezultat, tj. mjerena vrijednost je izvan mjernog opsega instrumenta, znači da je tranzistor neispravan.

Korak 2: Određivanje kolektora i emitera

Sada je potrebno odrediti kolektor i emiter. Postavi odgovarajući mjerni kabl na bazu (crveni kod NPN-a, crni kod PNP-a) i ponovi prethodno opisani postupak. Elektroda koja sa bazom daje veći pad napona predstavlja emiter, dok ona s manjim padom napona jeste kolektor (slike 2 i 3). Analiziraj zbog čega je to tako. Pročitaj oznaku s kućišta bipolarnog tranzistora koji si ispitivao/ispitivala i na internetu pronađi podatke o njemu (*Datasheet*). Uporedi rezultate i provjeri da li si ispravno odredio/odredila tip tranzistora i njegove elektrode.

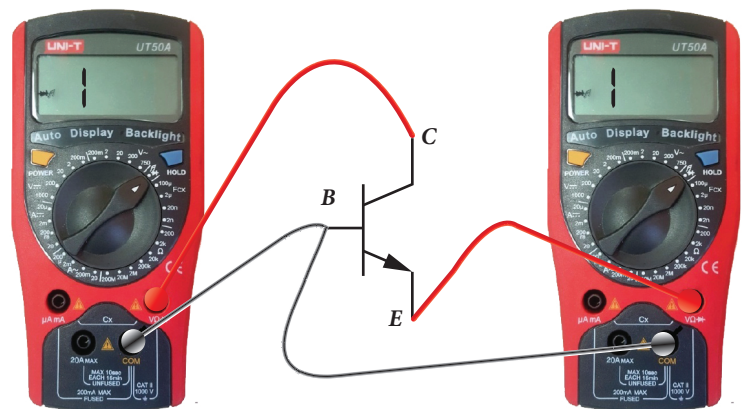
Korak 3: Ispitivanje ispravnosti

Nakon što si utvrdio/utvrdila elektrode tranzistora, potrebno je ispitati i njegovu ispravnost. Ispravnost PN-spojeva pri direktnoj polarizaciji utvrdio/utvrdila si kroz prethodno opisani postupak određivanja njegovih elektroda. Potrebno je ispitati te spojeve i u suprotnom smjeru, kao i odnos između emitera i kolektora.

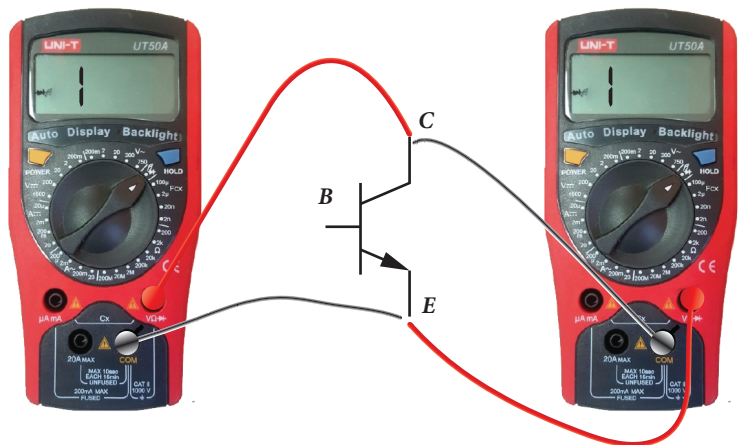
NPN tranzistor. Postavi crni mjerni kabl na bazu i ispitaj bazu u odnosu na preostala dva kontakta. Ukoliko u oba slučaja ne dođe do promjene pokazivanja instrumenta (tj. mjerena vrijednost je izvan mjernog opsega instrumenta), ti spojevi su ispravni (slika 4). Nakon toga treba provjeriti i međusobni odnos između emitera i kolektora. Postavi crveni mjerni kabl na jednu od tih elektroda a crni na drugu. Očitaj pokazivanje instrumenta a zatim zamijeni mjesta mjernim kablovima. Ako u oba slučaja instrument bude pokazivao da je mjerna vrijednost izvan mjernog opsega instrumenta, tranzistor je ispravan (slika 5). Komentariši zašto je otpornost između ovih dviju elektroda veoma velika.

PNP tranzistor. Postavi crveni mjerni kabl na bazu i izvrši ispitivanje baze u odnosu na preostala dva kontakta. Ukoliko u oba slučaja ne dođe do promjene pokazivanja instrumenta (tj. mjerena vrijednost je izvan mjernog opsega instrumenta), tranzistor je ispravan. Takođe je potrebno provjeriti i odnos između kolektora i emitera.

Ponovi postupak s drugim tranzistorima koji su ti na raspolaganju. Ako ti preostane vremena, ponovi postupak metodom mjerenja otpora.



Slika 4. Ispitivanje ispravnosti spojeva baze s kolektorom i emiterom



Slika 5. Ispitivanje provodnosti između kolektora i emitora

Snimanje statičkih karakteristika bipolarnog tranzistora

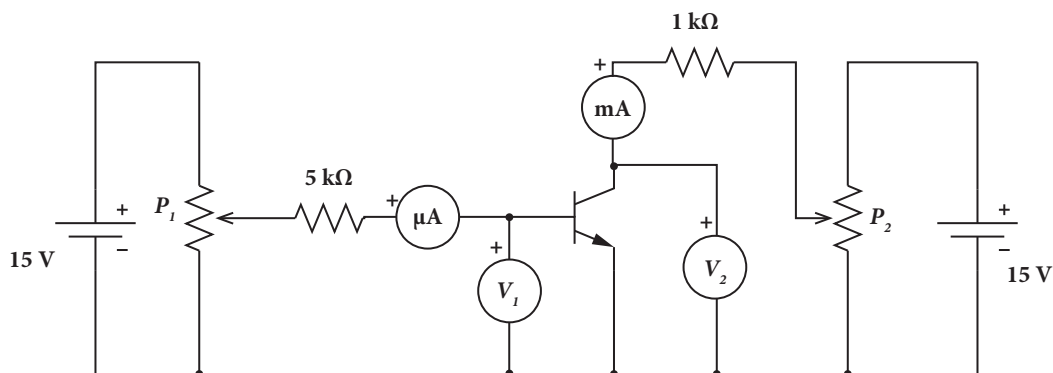
Cilj vježbe: Osposobljavanje za ispitivanje rada bipolarnog tranzistora snimanjem njegovih statičkih karakteristika. Razvijanje preciznosti i logičkog rasuđivanja.

Potrebni laboratorijski uređaji, oprema i elektronske komponente: Izvori jednosmjernog napona (2), multimetri (4), namjenska maketa za snimanje statičkih karakteristika bipolarnog tranzistora.

Ponavljanje gradiva: Navedi statičke karakteristike kod bipolarnog tranzistora. Definiši svaku od njih. Navedi načine vezivanja bipolarnih tranzistora. Opiši način vezivanja bipolarnog tranzistora u spoju sa zajedničkim emiterom.

Radni zadaci:

1. *Snimanje ulazne karakteristike.* Komponente na maketi povezane su prema električnoj šemi prikazanoj na slici 1. Prikluči izvore jednosmernog napona na za to predviđena mjesta i podesi ih na vrijednost 15 V. Multimetre namijenjene za mjerenje napona U_{BE} i U_{CE} postavi na za to predviđena mjesta i podesi preklopnike na njima u položaj za mjerenje jednosmjernih napona. Treći multimeter podesi na opseg za mjerenje jednosmjerne struje reda mA i postavi na mjesto predviđeno za mjerenje kolektorske struje (na šemi označeno kao miliampermetar). Preklopnik na četvrtom multimetru podesi u položaj za mjerenje jednosmjerne struje reda mi-



kroampera i postavi tako da mjeri struju baze. Vodi računa o polaritetu!

Slika 1. Šema za snimanje statičkih karakteristika NPN bipolarnog tranzistora

Potenciometar P_1 postavi tako da instrument koji mjeri napon U_{BE} pokazuje 0 V. Potenciometar P_2 postavi u takav položaj da instrument koji mjeri napon U_{CE} pokazuje 3 V. Pomoću potenciometra P_1 mijenjaj napon U_{BE} tako da odgovara vrijednostima definisanim u tabeli 1. Za svaku od tih vrijednosti očitaj struju baze, te očitane vrijednosti upiši u tabelu 1. Ponovi postupak pri naponu $U_{CE} = 8$ V.

Na osnovu rezultata mjerenja, na milimetarskom papiru nacrtaj zavisnost ulazne struje I_B od ulaznog napona U_{BE} (ulazna karakteristika) u oba slučaja. Obje karakteristike nacrtaj na zajedničkom dijagramu radi lakšeg poređenja. Razmjera: 1 cm = 0,2 V i 1 cm = 10 μA .

Uporedi dobijene ulazne karakteristike s onim kod teorijskih razmatranja!

Komentariši da li je ovaj radni zadatak moguće realizovati pomoću tri multimetra. Navedi na koji je način u tom slučaju potrebno modifikovati šemu i što ti je još od pribora potrebno.

Tabela 1

	U_{BE} (V)	0	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75
$U_{CE} = 3$ V	I_B (μA)									
$U_{CE} = 8$ V	I_B (μA)									

2. *Snimanje izlazne karakteristike.* Pomoću potenciometra P_1 podesi struju baze na 10 μA . Pomoću potenciometra P_2 mijenjaj napon U_{CE} u skladu s vrijednostima definisanim u tabeli 2. Za svaku od tih vrijednosti izlaznog napona očitaj vrijednost struje I_C , te rezultat upiši u tabelu. Ponovi postupak za $I_B = 25 \mu A$ i $I_B = 50 \mu A$.

Na osnovu dobijenih rezultata nacrtaj na milimetarskom papiru zavisnost izlazne struje I_C od izlaznog napona U_{CE} (izlazna karakteristika) za sve tri vrijednosti ulazne struje. Sve karakteristike nacrtaj na zajedničkom dijagramu radi lakšeg poređenja. Razmjera: 1 cm = 0,5 V i 1 cm = 2 mA.

Uporedi dobijene izlazne karakteristike s onim kod teorijskih razmatranja.

Tabela 2

	U_{CE} (V)	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	2	4	6	8
$I_B = 10 \mu A$	I_C (mA)										
$I_B = 15 \mu A$	I_C (mA)										
$I_B = 30 \mu A$	I_C (mA)										

3. *Snimanje direktne prenosne karakteristike.* Pomoću potenciometra P_2 podesi napon U_{CE} na vrijednost 3 V. Za vrijednosti ulazne struje date u tabeli 3 očitaj vrijednosti izlazne struje i rezultate upiši u tabelu. Ponovi postupak za $U_{CE} = 8$ V. Na osnovu dobijenih rezultata, na milimetarskom papiru nacrtaj zavisnost izlazne struje I_C od ulazne I_B u oba slučaja. Karakteristike nacrtaj na zajedničkom dijagramu radi lakšeg poređenja. Razmjera: horizontalno 1 cm = 5 μA , vertikalno 1 cm = 2 mA.

Uporedi dobijene karakteristike s onim kod teorijske analize.

Tabela 3

	I_B (μA)	0	5	10	20	30	40	50
$U_{CE} = 3$ V	I_C (mA)							
$U_{CE} = 8$ V	I_C (mA)							

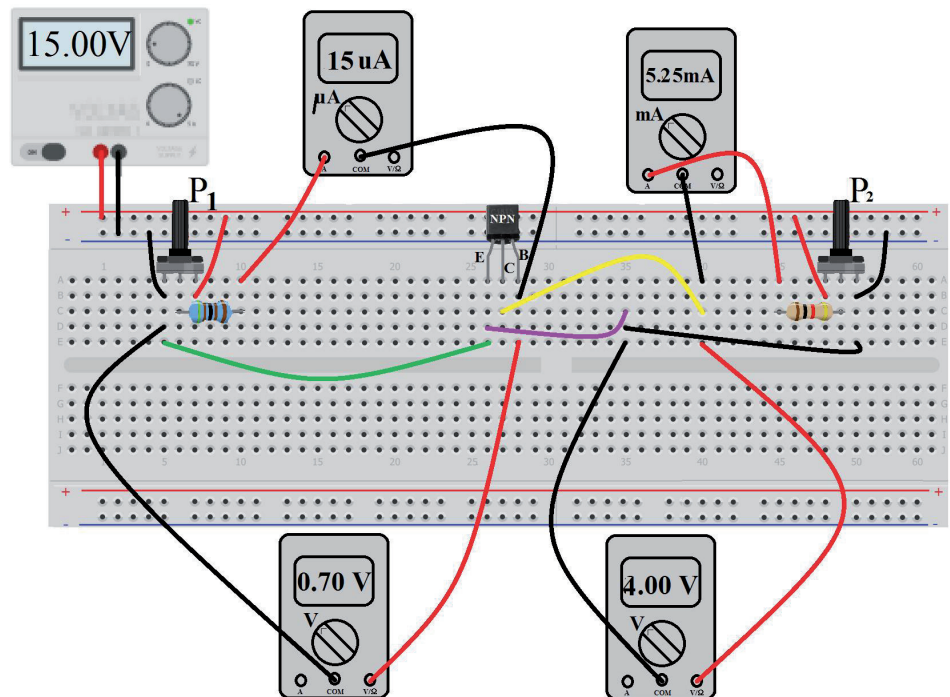
4. *Snimanje povratne prenosne karakteristike.* Pomoću potenciometra P_2 podesi napon U_{CE} na vrijednost 3 V. Za vrijednosti ulaznog napona date u tabeli 4 očitaj vrijednosti izlazne struje, te rezultate upiši u tabelu. Ponovi postupak za $U_{CE} = 8$ V. Na osnovu dobijenih rezultata, na milimetarskom papiru nacrtaj zavisnost izlazne struje I_C od ulaznog napona U_{BE} u oba slučaja. Karakteristike nacrtaj na zajedničkom dijagramu radi lakšeg poređenja. Razmjera: 1 cm = 0,2 V i 1 cm = 2 mA.

Uporedi dobijene karakteristike s onim kod teorijskih razmatranja.

Tabela 4

	U_{BE} (V)	0	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75
$U_{CE} = 3$ V	I_C (mA)									
$U_{CE} = 8$ V	I_C (mA)									

Napomena: Vježbu je moguće realizovati i spajanjem komponenti na eksperimentalnoj pločici (slika 2).



Slika 2. Skica realizacije električne šeme za snimanje statičkih karakteristika NPN bipolarnog tranzistora na eksperimentalnoj pločici

PRAKTIČNA VJEŽBA BR. 17

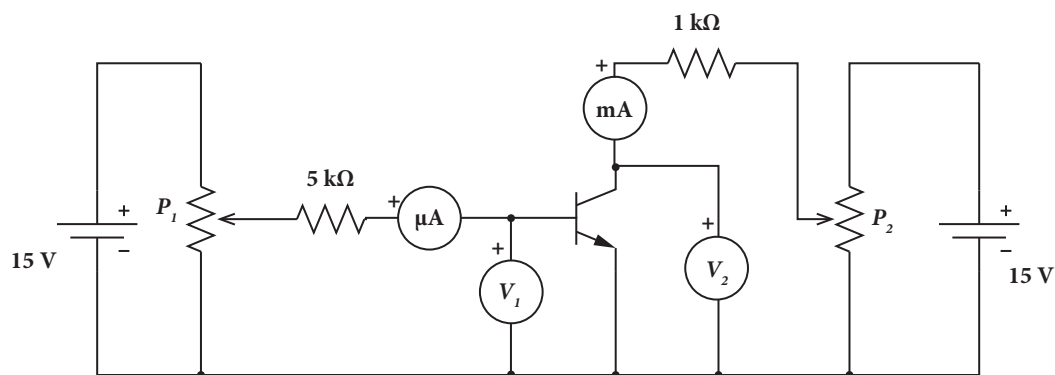
Snimanje statičkih karakteristika bipolarnog tranzistora primjenom softvera TINA

Cilj vježbe: Osposobljavanje za ispitivanje rada bipolarnog tranzistora snimanjem njegovih statičkih karakteristika pomoću softvera TINA. Razvijanje preciznosti, logičkog rasuđivanja i digitalnih kompetencija.

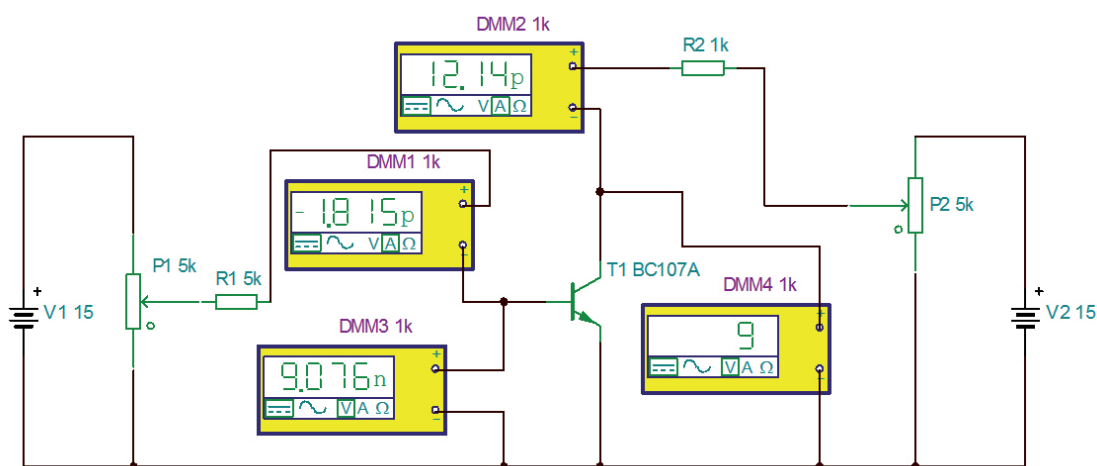
Potrebni laboratorijski uređaji, oprema i elektronske komponente: Računar s instaliranim softverom TINA.

Radni zadaci:

1. *Snimanje ulazne karakteristike bipolarnog tranzistora.* Realizuj električno kolo sa slike 1 u softveru TINA. Vrijednosti naponskih izvora i otpornika podesi na vrijednosti definisane na slici. Dvostrukim klikom na tranzistor, u podešavanjima, odaberi onaj sa oznakom BC107A. Podesi vrijednosti oba potencijometra na 5 k Ω . U polju *Setting* za potencijometar P_1 podesi na 0, a za potencijometar P_2 na 60. Pokreni interaktivni režim, očitaj vrijednost s instrumenta koji mjeri struju baze i upiši je u tabelu 1 (slika 2). Ponovi postupak za različite vrijednosti napona U_{BE} . Vrijednosti ovog napona nijesu unaprijed definisane u tabeli 1, već ih – zbog specifičnosti rada s potencijetrom u softveru TINA – treba uzeti po uzoru na prethodnu vježbu. Na osnovu dobijenih rezultata mjerenja, na milimetarskom papiru nacrtaj ulaznu karakteristiku bipolarnog tranzistora.



Slika 1. Šema za snimanje statičkih karakteristika NPN bipolarnog tranzistora



Slika 2. Realizacija električne šeme sa slike 1 u softveru TINA

Tabela 1

	U_{BE} (V)								
$U_{CE} = 6$ V	I_B (μ A)								

2. Snimanje izlazne karakteristike. Podеси parametre potencijometara tako da struja baze bude u opsegu 10 do 20 μ A, a izlazni napon 0 V. Očitaj vrijednost izlazne struje i upiši u tabelu 2. Ponovi postupak za različite vrijednosti napona U_{CE} . Vrijednosti ovog napona nijesu unaprijed definisane u tabeli 2, već ih – zbog specifičnosti rada s potencijometrom u softveru TINA – treba uzeti po uzoru na prethodnu vježbu. Na osnovu dobijenih rezultata mjerenja, na milimetarskom papiru nacrtaj izlaznu karakteristiku bipolarnog tranzistora.

Tabela 2

	U_{CE} (V)								
$I_B \approx 15$ μ A	I_C (mA)								

3. *Snimanje direktne prenosne karakteristike.* Prilagodi parametre komponenti u kolu tako da izvršiš mjerenja prema tabeli 3. Unesi rezultate mjerenja u tabelu 3 i na milimetarskom papiru nacrtaj direktnu prenosnu karakteristiku.

Tabela 3

	I_B (μA)	0	5	10	20	30	40	50
$U_{CE} = 3 \text{ V}$	I_C (mA)							

4. *Snimanje povratne prenosne karakteristike.* Podesi parametre komponenti u kolu tako da izvršiš mjerenja prema tabeli 4. Unesi rezultate mjerenja u tabelu 4 i na milimetarskom papiru nacrtaj povratnu prenosnu karakteristiku.

Tabela 4

	U_{BE} (V)	0	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75
$U_{CE} = 3 \text{ V}$	I_C (mA)									

GLAVA VI

PRAKTIČNA VJEŽBA BR. 18

Ispitivanje unipolarnog tranzistora pomoću multimetra

Cilj vježbe: Osposobljavanje za ispitivanje ispravnosti unipolarnog tranzistora i određivanje njegovih izvoda. Razvijanje preciznosti i logičkog rasuđivanja.

Potrebni laboratorijski uređaji, oprema i elektronske komponente: Multimetar, više unipolarnih tranzistora (ispravnih i neispravnih).

Ponavljanje gradiva: Navedi elektrode kod unipolarnog tranzistora. Navedi vrste unipolarnih tranzistora.

Radni zadaci:

Pročitaj oznaku unipolarnog tranzistora koji ispituješ i o njemu pronadi podatke (*Datasheets*) na internetu. Na osnovu tih podataka odredi vrstu unipolarnog tranzistora, tip kanala i njegove elektrode. Prije bilo kakvog ispitivanja potrebno je isprazniti akumulirano naelektrisanje unutar tranzistora. To je moguće uraditi istovremenim uranjanjem svih nožica u za to namijenjen materijal, ili jednostavno: istovremenim dodiranjem svih elektroda nekim metalnim kontaktom (odvijač, mjerna sonda). Nakon toga vodi računa da ne dodiruješ elektrode rukom kako ne bi uticao/uticala na rezultate mjerenja!

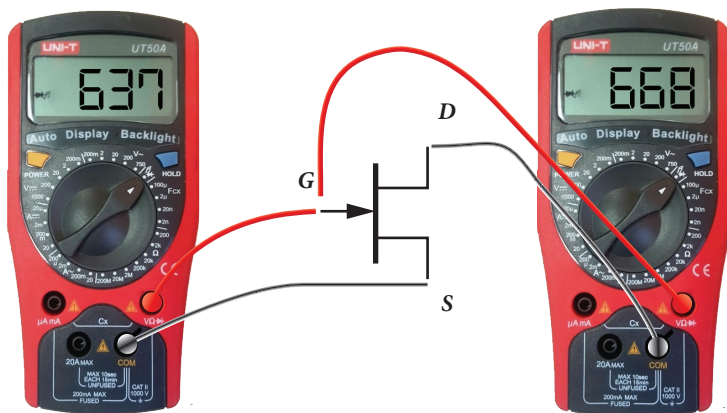
Ispitivanje FET-a

Ispitivanje FET-a multimetrom može se jednim dijelom svesti na ispitivanje PN-spoja. Za razliku od bipolarnih tranzistora, kod ovog tipa unipolarnih postoji samo jedan PN-spoj – spoj između upravljačke oblasti i kanala. Međutim, potreb-

no je ispitati taj spoj i na strani sorsa i na strani drejna. PN-spoj kod N-kanalnog i P-kanalnog FET-a predstavljen pomoću dioda, prikazan je na slici 1.

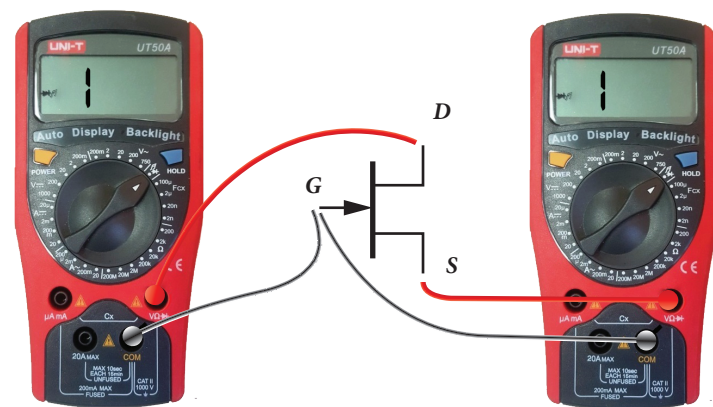
Ispitivanje N-kanalnog FET-a

Podesi preklopnik na multimetru na opseg za ispitivanje diode. Crveni mjerni priključak postavi na gejt. Ukoliko postavljanjem crnog priključka na preostale dvije elektrode instrument u oba slučaja pokaže napon koji odgovara pragu provođenja diode, FET je u tom smjeru ispravan (slika 2). Takođe, ovo je potvrda da elektroda na kojoj se nalazi crveni priključak multimetra predstavlja gejt N-kanalnog FET-a.



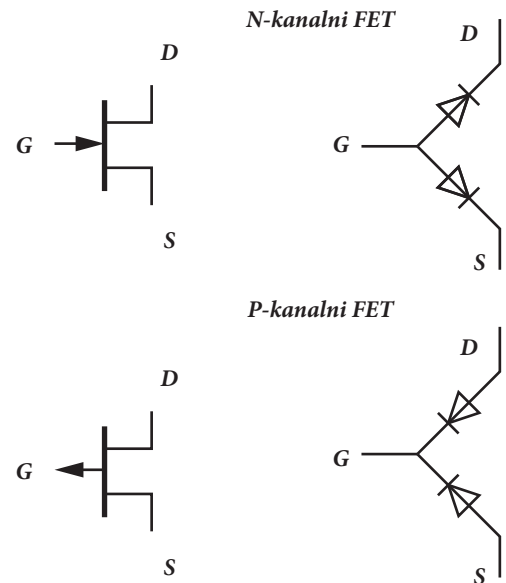
Slika 2. Ispitivanje N-kanalnog FET-a

Sada negativni priključak multimetra dovedi na gejt, a pozitivni prvo na drejn a zatim i sors. U oba slučaja multimetar treba da pokaže prekid kanala, odnosno beskonačnu otpornost (slika 3).



Slika 3. Ispitivanje N-kanalnog FET-a

Radi konačne potvrde ispravnosti tranzistora neophodno je ispitati i odnos između sorsa i drejna. Nakon prespajanja svih nožica, otpornost između drejna i sorsa trebalo bi da u oba pravca bude relativno mala (nekoliko stotina oma). Kada se nakon toga djeluje inverznim naponom na spoj između gejta i sorsa, kanal će se suziti, što će dalje imati za posljedicu povećanje otpora.



Slika 1

Bilo kakvo drugačije pokazivanje instrumenta znači da ispitivani FET nije ispravan. Postupak ispitivanja P-kanalnog FET-a je identičan, s tim što je potrebno zamijeniti mjesta mjernim priključcima multimetra.

Ponovi postupak s drugim tranzistorima koji su ti na raspolaganju. Pokušaj da na osnovu prethodno iznesenih tvrđenja samostalno odrediš vrstu, tip i elektrode tih tranzistora. Dobijene rezultate provjeri upoređivanjem s onim u *Datasheets*.

Ispitivanje N-kanalnog MOSFET-a

Korak 1: Postavi tranzistor na izolatorsku podlogu (drveni sto, guma) i dodirni sve tri elektrode istovremeno metalnim priključkom multimetra kako bi se ispraznila unutrašnja kapacitivnost tranzistora.

Korak 2: Postavi crveni mjerni priključak na drejn a crni na sors. Instrument bi trebalo da pokazuje beskonačnu otpornost.

Korak 3: Držeći crni mjerni priključak na sorsu, crvenim priključkom dodirni na kratko gejt a zatim ga vrati na drejn. Multimetar bi sada trebalo da pokaže neku naponsku vrijednost, što je znak da postoji neprekidnost kanala.

U svim drugim ispitivanjima između elektroda multimetar bi trebalo da daje beskonačnu otpornost. Na ovaj način utvrđena je ispravnost MOSFET-a.

Svako pokazivanje multimetra koje odstupa od opisanog, znak je da je tranzistor neispravan.

Ako bi se opet izvršilo prespajanje gejta i drejna, MOSFET bi bio zakočen (beskonačna otpornost). Ponovnim dovođenjem pozitivnog priključka multimetra, tranzistor bi opet proveo. Objasni koja je osobina MOSFET-a potvrđena na ovaj način.

Ispitivanje P-kanalnog MOSFET-a vrši se na identičan način, s tim što se pri svim koracima zamijene mjesta crvenom i crnom mjernom priključku.

Ponovi postupak s drugim tranzistorima koji su ti na raspolaganju. Pokušaj da na osnovu prethodno iznesenih tvrđenja samostalno odrediš vrstu, tip i elektrode tih tranzistora. Dobijene rezultate provjeri upoređivanjem s onim u *Datasheets*.

PRAKTIČNA VJEŽBA BR. 19

Snimanje statičkih karakteristika unipolarnog tranzistora

Cilj vježbe: Osposobljavanje za ispitivanje rada unipolarnog tranzistora snimanjem njegovih statičkih karakteristika. Razvijanje preciznosti i logičkog rasuđivanja.

Potrebni laboratorijski uređaji, oprema i elektronske komponente: Izvori jednosmjernog napona (2), multimetri (3), namjenska maketa za snimanje statičkih karakteristika FET-a.

Ponavljanje gradiva: Navedi statičke karakteristike od značaja za ispitivanje rada unipolarnog tranzistora. Definiši svaku od njih. Navedi vrste unipolarnih tranzistora.

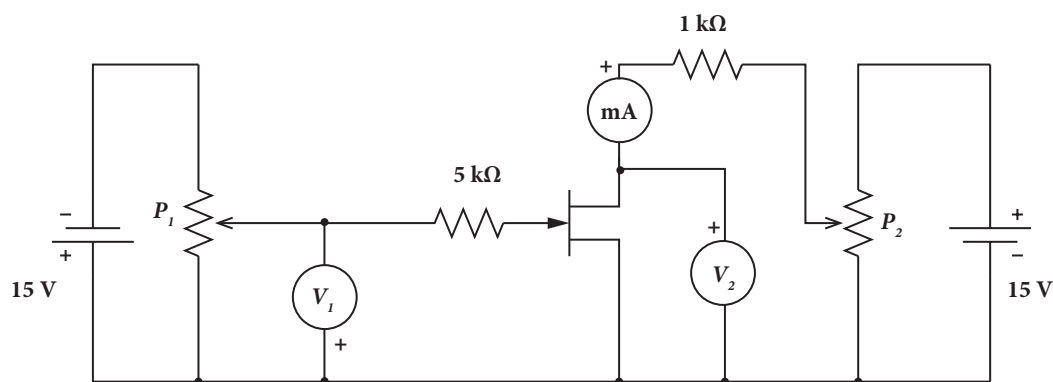
Radni zadaci:

1. *Snimanje izlazne karakteristike.* Komponente na maketi povezane su prema električnoj šemi prikazanoj na slici 1. Priključi izvore jednosmjernog napona na za to predviđena mjesta i podesi ih na vrijednost 15 V. Multimetre namijenjene mjerenju napona U_{GS} i U_{DS} postavi na za to predviđena mjesta, te preklopnike na njima podesi u položaj za mjerenje jednosmjernih napona. Treći multimetar podesi na opseg za mjerenje jednosmjerne struje reda mA i postavi na mjesto predviđeno

za mjerenje izlazne struje (na šemi označeno kao miliampermetar). Vodi računa o polaritetu! Postavi potenciometar P_1 u položaj pri kom multimeter koji mjeri napon U_{GS} pokazuje 0 V. Pomoću potenciometra P_2 mijenjaj napon U_{DS} tako da odgovara vrijednostima definisanim u tabeli 1. Za svaku od tih vrijednosti očitaj vrijednost izlazne struje (I_D) i očitanu vrijednost upiši u tabelu 1. Ponovi postupak pri naponu $U_{GS} = -2$ V. Vodi računa da u tom trenutku multimeter koji mjeri napon kojim se vrši polarizacija ovih dviju elektroda (na slici označen sa V_1), treba da pokaže 2 V. Oznaka U_{GS} zadržana je zbog analogije s onom kod teorijskih razmatranja.

Na osnovu rezultata mjerenja, na milimetarskom papiru nacrtaj zavisnost izlazne struje I_D od izlaznog napona U_{DS} (izlazna karakteristika) u oba slučaja. Objе karakteristike nacrtaj na zajedničkom dijagramu radi lakšeg poređenja. Razmjera: 1 cm = 2 mA i 1 cm = 1 V.

Uporedi dobijene karakteristike s onim kod teorijskih razmatranja.



Slika 1. Šema za snimanje statičkih karakteristika N-kanalnog FET-a

Tabela 1

	U_{DS} (V)	0	0,5	1	1,5	2	4	6	8	10
$U_{GS} = 0$ V	I_D (mA)									
$U_{GS} = -2$ V	I_D (mA)									

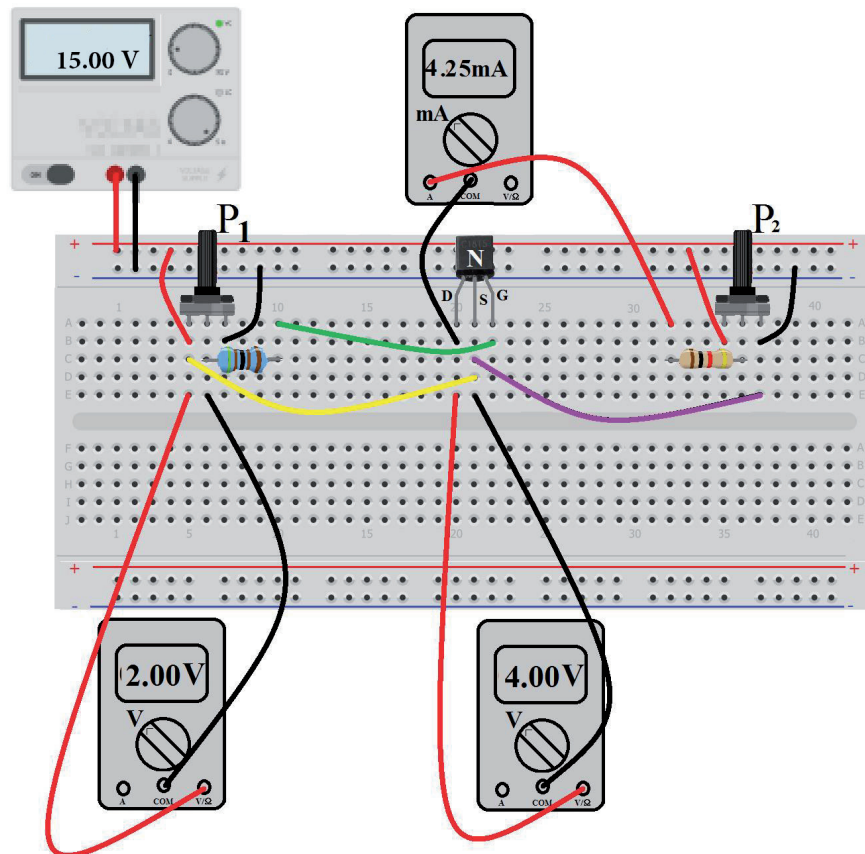
2. Snimanje prenosne karakteristike. Pomoću potenciometra P_1 podеси napon U_{GS} na vrijednost 0 V. Pomoću potenciometra P_2 podеси izlazni napon U_{DS} na vrijednost 3 V. Mijenjaj vrijednosti ulaznog napona prema tabeli 2. Za svaku od tih vrijednosti očitaj vrijednost izlazne struje I_D , te rezultat upiši u tabelu. Ponovi postupak za $U_{DS} = 10$ V. Na osnovu dobijenih rezultata nacrtaj zavisnost izlazne struje I_D od ulaznog napona U_{GS} na milimetarskom papiru u oba slučaja. Karakteristike nacrtaj na zajedničkom dijagramu radi lakšeg poređenja. Razmjera: 1 cm = 2 mA i 1 cm = 0,5 V.

Uporedi dobijene karakteristike s onim kod teorijskih razmatranja.

Tabela 2

	U_{GS} (V)	0	-0,5	-1	-1,5	-2	-2,5	-3	-4	-5
$U_{DS} = 3$ V	I_D (mA)									
$U_{DS} = 10$ V	I_D (mA)									

Napomena: Vježbu je moguće realizovati i spajanjem komponenti na eksperimentalnoj pločici (slika 2).



Slika 2. Skica realizacije električne šeme za snimanje statičkih karakteristika N-kanalnog FET-a na eksperimentalnoj pločici

PRAKTIČNA VJEŽBA BR. 20

Snimanje statičkih karakteristika unipolarnog tranzistora primjenom softvera TINA

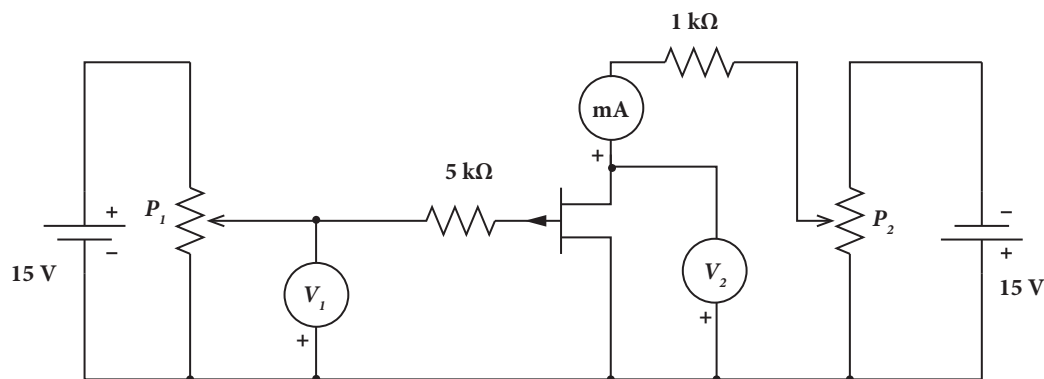
Cilj vježbe: Osposobljavanje za ispitivanje rada unipolarnog tranzistora snimanjem njegovih statičkih karakteristika pomoću softvera TINA. Razvijanje preciznosti, logičkog rasuđivanja i digitalnih kompetencija.

Potrebni laboratorijski uređaji, oprema i elektronske komponente: Računar sa instaliranim softverom TINA.

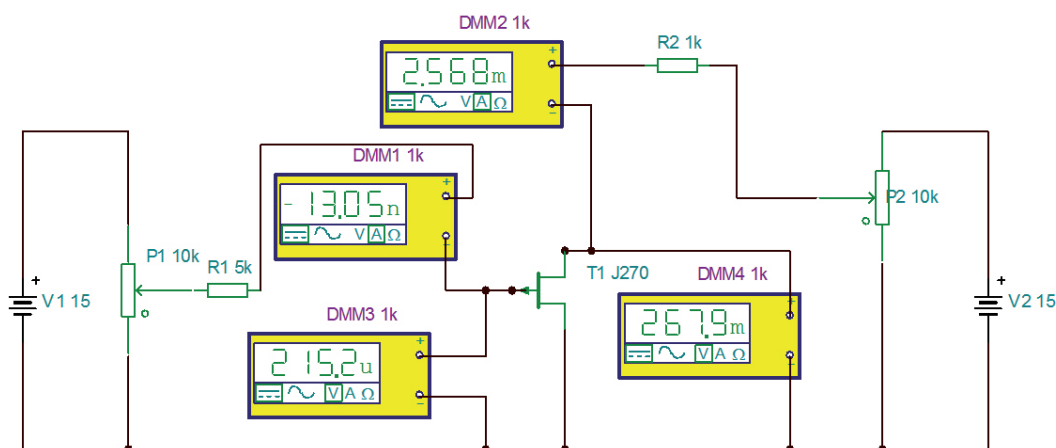
Radni zadaci:

1. *Snimanje izlazne karakteristike unipolarnog tranzistora.* Realizuj električno kolo sa slike 1 u softveru TINA. Vrijednosti naponskih izvora i otpornika podesi na vrijednosti definisane na slici. Iz linije alata s kartice *Semiconductors* izaberi P-kanalni *JFET* a zatim dvostrukim klikom na njega, u podešavanjima odaberi onaj sa oznakom J270. Podesi vrijednosti oba potencijometra na 10 k Ω . Odaberi vrijednost u polju *Setting* za potencijometar P_1 tako da multimetar koji mjeri napon

U_{GS} pokazuje približno 0 V. Pomoću potenciometra P_2 mijenjaj napon U_{SD} tako da on približno odgovara vrijednostima definisanim u tabeli 1. Za svaku od tih vrijednosti očitaj vrijednost izlazne struje (I_D). Očitane vrijednosti upiši u tabelu 1, uz korekciju datih vrijednosti za napon U_{SD} , ako je to potrebno. Ponovi postupak pri naponu $U_{GS} = 2$ V. Na osnovu dobijenih rezultata mjerenja, na milimetarskom papiru nacrtaj izlaznu karakteristiku P-kanalnog FET-a.



Slika 1. Šema za snimanje statičkih karakteristika P-kanalnog FET-a



Slika 2. Realizacija električne šeme sa slike 1 u softveru TINA

Tabela 1

	U_{SD} (V)	0	0,5	1	1,5	2	4	6	8	10
$U_{GS} = 0$ V	I_D (mA)									
$U_{GS} = 2$ V	I_D (mA)									

2. *Snimanje prenosne karakteristike.* Pomoću potenciometra P_1 podеси napon U_{GS} na vrijednost 0 V. Pomoću potenciometra P_2 podеси izlazni napon U_{SD} na vrijednost 3 V. Mijenjaj vrijednosti ulaznog napona prema tabeli 2. Za svaku od tih vrijednosti očitaj vrijednost izlazne struje I_D i rezultat upiši u tabelu. Ponovi postupak za $U_{SD} = 10$ V. Na osnovu dobijenih rezultata, nacrtaj zavisnost izlazne struje I_D od ulaznog napona U_{GS} na milimetarskom papiru u oba slučaja. Karakteristike nacrtaj na zajedničkom dijagramu radi lakšeg poređenja.

Tabela 2

	U_{GS} (V)	0	-0,5	-1	-1,5	-2	-2,5	-3	-4	-5
$U_{SD} = 3$ V	I_D (mA)									
$U_{SD} = 10$ V	I_D (mA)									

GLAVA VII

PRAKTIČNA VJEŽBA BR. 21

Analiza načina rada svjetleće diode

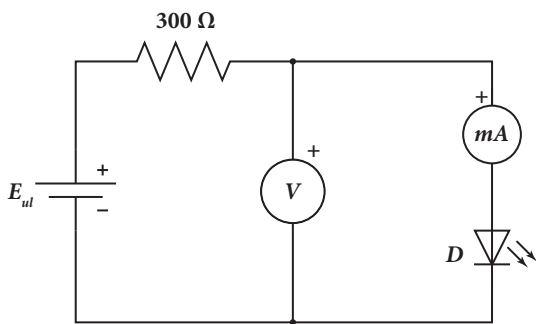
Cilj vježbe: Osposobljavanje za ispitivanje načina rada svjetleće diode u zavisnosti od napona i struje na njoj. Razvijanje preciznosti i logičkog rasuđivanja.

Potrebni laboratorijski uređaji, oprema i elektronske komponente: Izvor jednosmjernog napona, multimetri (2), eksperimentalna pločica, LED dioda, otpornik od 300Ω .

Ponavljanje gradiva: Objasni kako se vrši polarizacija LED diode. Navedi boje koje ona može da emituje. Objasni od čega zavisi intenzitet svjetla LED diode.

Radni zadaci:

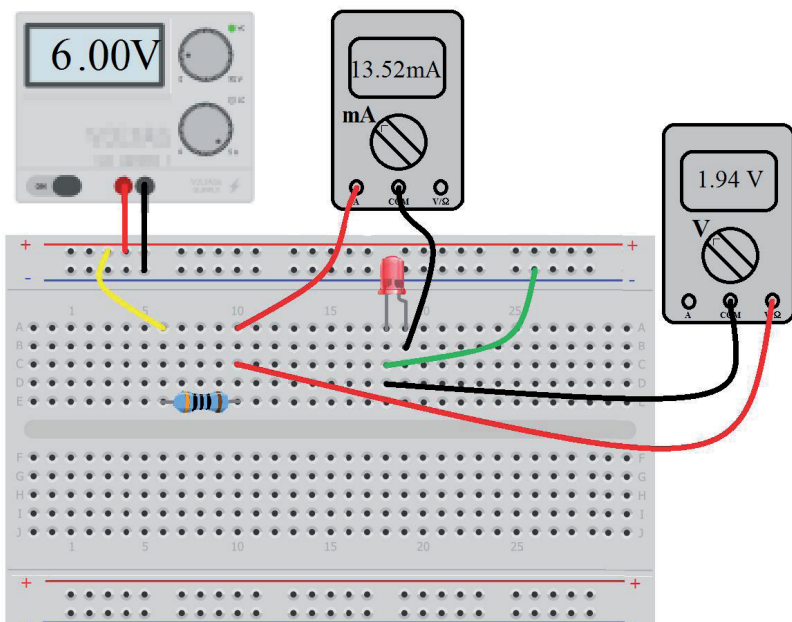
1. Spoj električno kolo sa slike 1 na eksperimentalnoj pločici. Mjerne sonde multimetara podešenih na odgovarajuće mjerne opsege poveži na označena mjesta. Mijenjaj vrijednosti jednosmjernog napona s ulaza kola prema tabeli 1. Za svaku od tih vrijednosti izmjeri napon na diodi i struju koja kroz nju teče, te rezultate upiši u tabelu 1. Takođe, u tabelu unesi i opis intenziteta svjetla koje zrači LED dioda (nema zračenja, slabo svjetlo, srednje jako svjetlo, jako svjetlo). Skica električnog kola sa slike 1, realizovanog na eksperimentalnoj pločici, prikazana je na slici 2.



Slika 1. Kolo sa svjetlećom diodom

Tabela 1

E_{ul} (V)	U_D	I_D (mA)	Jačina svjetla
1			
2			
3			
4			
6			
8			



Slika 2. Skica realizacije električnog kola sa slike 1 na eksperimentalnoj pločici

2. Promijeni polaritet izvora kojim se vrši polarizacija svjetleće diode. Pri promjeni ulaznog napona prema prethodnoj tabeli, posmatraj zračenje svjetlosti diode.

PRAKTIČNA VJEŽBA BR. 22

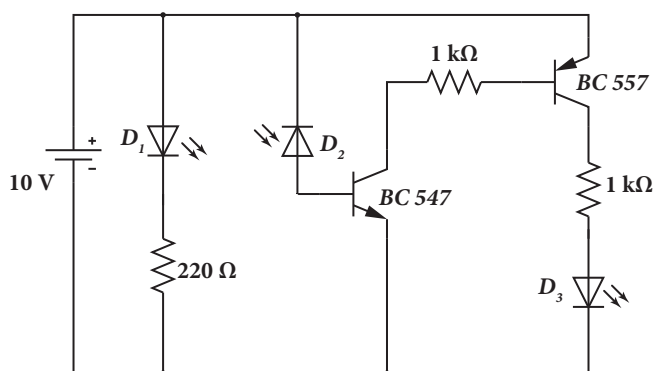
Primjena LED i fotodiode

Cilj vježbe: Osposobljavanje za primjenu opto-elektronskih komponenti. Razvijanje preciznosti i interesovanja za elektroniku.

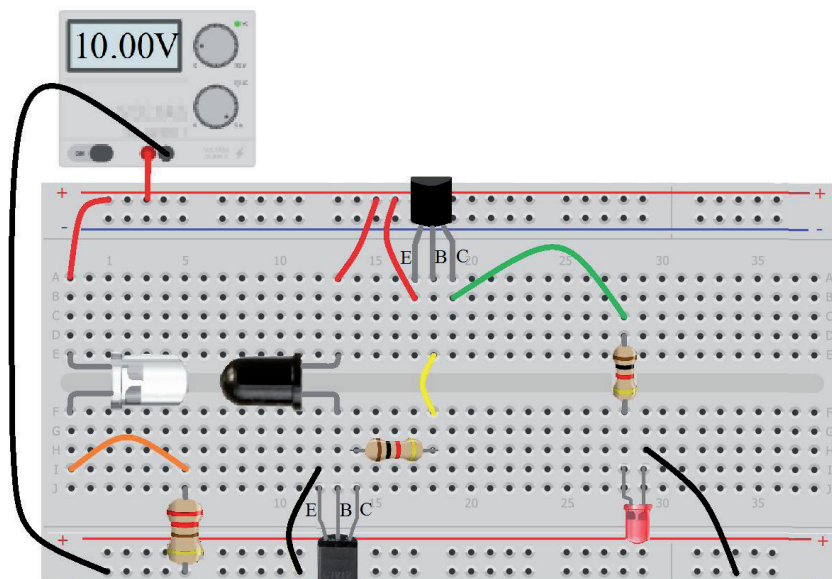
Potrebni laboratorijski uređaji, oprema i elektronske komponente: Izvor jednosmjernog napona, eksperimentalna pločica, kratkospojnici, IR emitujuća dioda (D_1), IR fotoosjetljiva dioda (D_2), LED dioda (D_3), tranzistori BC 547 i BC 557, otpornici od 220Ω i $1 \text{ k}\Omega$ (2).

Radni zadaci:

Na osnovu oznaka uz pomoć interneta ili ispitivanjem pomoću multimetra, odredi elektrode kod korišćenih elektronskih komponenti. Spoji električno kolo sa slike 1 na eksperimentalnoj pločici. Emitujuću i fotoosjetljivu diodu usmjeri jednu ka drugoj. Priključi spojeno kolo na izvor jednosmjernog napona. Opiši što se događa u kolu. Opiši na koji se način ponaša LED dioda kada se između emitujuće i fotoosjetljive diode postavi fizička barijera. Skica realizacije ovog električnog kola na eksperimentalnoj pločici prikazana je na slici 2.



Slika 1. Kolo s optoelektronskim komponentama



Slika 2. Skica realizacije električnog kola sa slike 1 na eksperimentalnoj pločici

PRAKTIČNA VJEŽBA BR. 23

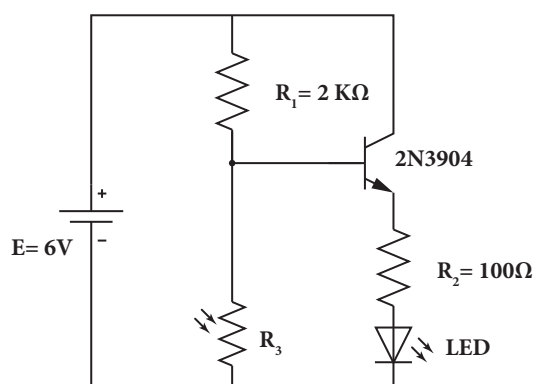
Primjena fotootpornika

Cilj vježbe: Osposobljavanje za ispitivanje rada fotootpornika. Razvijanje preciznosti i interesovanja za elektroniku.

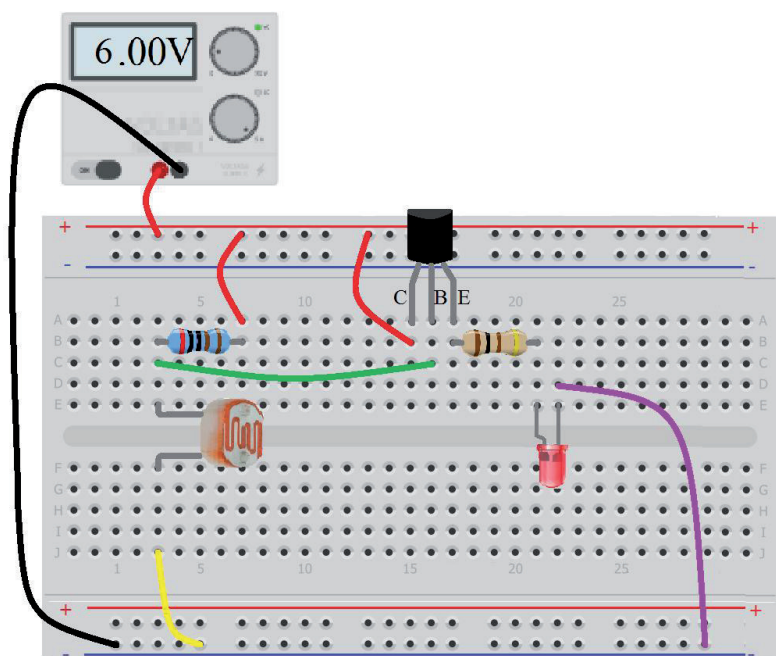
Potrebni laboratorijski uređaji, oprema i elektronske komponente: Izvor jednosmjernog napona, eksperimentalna pločica, kratkospojnici, LED dioda, fotootpornik, NPN tranzistor 2N3904, otpornici od $2\text{ k}\Omega$ i $100\ \Omega$ (2).

Radni zadaci:

Poveži komponente na eksperimentalnoj pločici prema električnoj šemi sa slike 1. Prikluči spojeno kolo na izvor jednosmjernog napona. Opiši što se događa kada se površina fotootpornika prekrije prstom. Koristeći prethodna teorijska znanja, objasni proces koji se odvija u kolu kada se površina fotootpornika prekrije. Skica realizacije električnog kola sa slike 1 na eksperimentalnoj pločici prikazana je na slici 2.

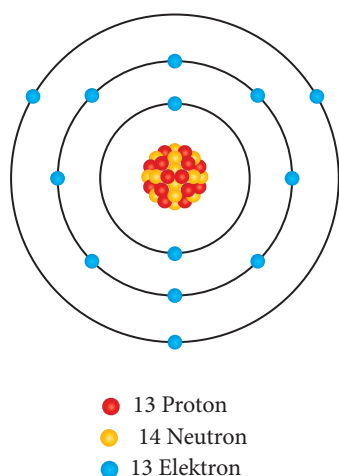


Slika 1



Slika 2. Skica realizacije električnog kola sa slike 1 na eksperimentalnoj pločici

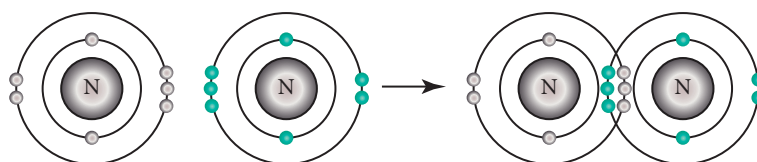
ODGOVORI NA KONTROLNA PITANJA



Slika 1. Atom aluminijuma nacrtan u jednoj ravni

Kontrolno pitanje 1.1 Atom aluminijuma predstavljen je na slici 1. Njegov atomski broj je 13. Prema tome, atom ima 13 protona u jezgru i isto toliko elektrona raspoređenih u tri orbite (2 + 8 + 3). Pošto je njegov maseni broj 27, zaključujemo da ima 14 neutrona skoncentrisanih takođe u jezgru.

Kontrolno pitanje 1.2 Atom azota ima pet valentnih elektrona; i da bi bio stabilan, nedostaju mu tri elektrona. Dva atoma azota udružuju po tri elektrona, tako da nastaju tri zajednička elektronska para, gradeći na taj način trostruku kovalentnu vezu (slika 2).



Slika 2. Građenje trostruke kovalentne veze između dva atoma azota (N)

Kontrolno pitanje 1.3

a) Jedinjenje ugljen-dioksid (CO_2) sastoji se od jednog atoma ugljenika (C) i dva atoma kiseonika (O). Oba elementa su nemetali, i prilikom formiranja ovog jedinjenja grade dvije dvostruke kovalentne veze.

b) Jedinjenje magnezijum-oksida (MgO) sastoji se od po jednog atoma magnezijuma (metal) i kiseonika (nemetala). Dva valentna elektrona iz posljednje ljuske magnezijuma prelaze na atom kiseonika, obrazujući pritom pozitivni (Mg^+) i negativni (O^-) jon. Dakle, radi se o jonskoj vezi.

Kontrolno pitanje 1.4 Svaki oslobođeni elektron za sobom ostavlja prazninu (šupljinu) pa je, prema tome, broj tih elektrona i šupljina jednak

Kontrolno pitanje 2.1 U P-oblasti poluprovodnika manjinski nosioci su elektroni, i njih će, za razliku od većinskih šupljina, pozitivan pol unutrašnjeg polja privlačiti ka N-oblasti. Takođe, negativan pol unutrašnjeg polja privlačiće manjinske šupljine iz N-oblasti ka P-oblasti. Dakle, unutrašnje polje je takvog smjera da pospešuje prelazak manjinskih nosilaca iz jedne u drugu oblast. Međutim, broj tih manjinskih nosilaca zanemarljivo je mali da bi se uspostavilo stalno proticanje struje.

Kontrolno pitanje 2.2 Napon spoljašnjeg izvora manji od napona potencijalne barijere, neće biti dovoljan da bi pomogao većinskim elektronima i šupljinama da savladaju potencijalnu barijeru i pređu u drugu oblast. Kada ovaj napon postane veći od napona potencijalne barijere, dolazi do usmjerenog kretanja elektrona i šupljina iz jedne u drugu oblast, odnosno kroz PN-spoj protiče struja.

Kontrolno pitanje 2.3 U primjeru pod *a*, anoda je na nižem potencijalu od katode, dioda je inverzno polarisana i neće provoditi struju. Za primjer polarizacije pod *b*, očigledno je da se radi o direktnoj polarizaciji. Razlika potencijala između anode i katode iznosi 1 V, pa o bilo kom tipu diode da je riječ ona provodi struju.

Kontrolno pitanje 3.1 Radna prava određena je tačkama $U_D = E$ i $I_D = \frac{E}{R}$.

Prva tačka neće mijenjati svoju poziciju, jer ne zavisi od otpornosti *R*. Vrijednost struje I_D obrnuto je proporcionalna otpornosti *R*, pa će povećanjem te otpornosti struja da se smanjuje, pri čemu će radna prava imati manji nagib. Obrnuto: smanjenjem otpornosti, struja će da se povećava i pri tome radna prava postaje strmija.

Kontrolno pitanje 3.2 Podsjećanja radi, statička otpornost definisana je kao količnik napona i struje u radnoj tački, dok je dinamička otpornost količnik promjene napona i struje. Vrijednost struje ili napona u nekom trenutku je znatno veća od promjene te iste struje ili napona u nekom vremenskom intervalu. Na osnovu toga izvodi se logičan zaključak da je statička otpornost znatno veća od dinamičke.

Kontrolno pitanje 4.1 Što je kapacitivnost spoja manja, brzina uspostavljanja i prekidanja struje kroz diodu je veća, i obrnuto.

Kontrolno pitanje 4.2 Vrijeme uključivanja i isključivanja kod Šotkijeve diode mnogo je kraće nego kod PIN diode. Razlog za to jeste mala kapacitivnost Šotkijeve diode, dok kod PIN diode imamo dodatnu I-oblast kroz koju treba da prođu slobodni nosioci.

Kontrolno pitanje 4.3 Kao što je već izloženo u trećem poglavlju, dioda se na izvor napajanja priključuje preko otpornika kako bi se na taj način mogla kontrolisati (ograničiti) struja kroz tu diodu.

Kontrolno pitanje 4.4 Povećanjem otpornosti *R*, struja kroz taj otpornik se smanjuje, pa se smanjuje i struja kroz potrošač. Kako je snaga na potrošaču direktno proporcionalna struji, onda se sa smanjenjem struje smanjuje i snaga.

Kontrolno pitanje 4.5 Tvrdjenje je tačno izuzev u slučaju kada su trenutne vrijednosti ulaznog napona približno jednake nuli, tj. kada je razlika potencijala između anode i katode manja od praga provođenja realne diode.

Kontrolno pitanje 4.6 Kondenzator je vezan paralelno s potrošačem, pa je pad napona na njima jednak, a ta vrijednost ista je kao i potencijal katode.

Kontrolno pitanje 5.1

U bazi postoji mala količina primjesa (šupljina) jer je potrebno da što manji broj elektrona iz emitera bude rekombinovan. Tu se misli na rekombinaciju u samoj oblasti baze gdje elektroni iz emitera dopijevaju pod uticajem spoljašnjeg polja, kao i na rekombinaciju u emitterskoj oblasti gdje dopijevaju šupljine iz baze.

Oblast baze je uža od ostalih kako bi elektroni na putu od emitera ka kolektoru imali što kraći put i kako bi se smanjila vjerovatnoća njihovog susreta s nekom šupljinom.

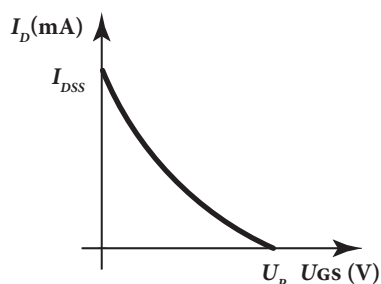
Kontrolno pitanje 5.2 Ne. Dati napon manji je od napona potencijalne barijere kod silicijumskog PN-spoja, pa samim tim nije dovoljan da bi se on savladao. Kada bi se radilo o germanijumskom tranzistoru, bio bi ispunjen uslov provodjenja, i on bi počeo da vodi.

Kontrolno pitanje 5.3 Sa grafika se može uočiti da struja baze uzima vrijednosti koje su reda nekoliko desetina ili čak stotina mikroampera, što je i očekivano kada se u obzir uzme relativno mali broj šupljina koje učestvuju u njenom obrazovanju.

Kontrolno pitanje 5.4 Prenosnom karakteristikom opisuje se zavisnost izlazne struje (I_C) od jedne od ulaznih veličina. Ako se radi o zavisnosti izlazne struje od ulazne (I_B), onda govorimo o direktnoj prenosnoj karakteristici, dok zavisnost izlazne struje od ulaznog napona (U_{BE}) predstavlja povratnu prenosnu karakteristiku.

Kontrolno pitanje 6.1 Da bi se obezbijedilo da PN-spojevi budu inverzno polarisani, kod N-kanalnog FET-a priključci na krajevima provodnog kanala (sors i drejn) moraju biti na većem potencijalu u odnosu na gejt. Zbog toga se pozitivan pol baterije za polarizaciju priključuje na sors a negativan na gejt, pa je $U_{GS} = -E_{SG}$.

Kontrolno pitanje 6.2 Kod P-kanalnog FET-a napon U_{GS} mijenja se od nule i uzima pozitivne vrijednosti. Potpuni prekid kanala nastupiće kada ovaj napon dosegne vrijednost prekidnog napona U_p , pa struja prestaje da teče. Pri nižim vrijednostima napona U_{GS} struja drejna se povećava, i za vrijednost $U_{GS} = 0$ dostiže maksimalni iznos I_{DSS} . Prenosna karakteristika P-kanalnog FET-a prikazana je na slici 3.



Slika 3. Prenosna karakteristika P-kanalnog FET-a

























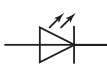
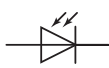
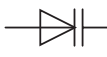









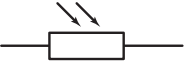
Kontrolno pitanje 6.3 Kod spojnog FET-a bi pri $U_{GS} > 0$ došlo do direktne polarizacije spoja između upravljačke oblasti i kanala, što bi izazvalo prelazak slobodnih naelektrisanja na upravljačku oblast umjesto da se kreću kroz kanal.

Kontrolno pitanje 6.4 Između gejta i kanala nalazi se neprovodna (izolatorska) oblast, koja sprečava da do toga dođe.

Kontrolno pitanje 7.1 Prva, jer se spoj baza–kolektor ponaša kao fotodiode.

Kontrolno pitanje 7.2 Jači intenzitet svjetlosti koja djeluje na fotootpornik ima za posljedicu oslobađanje većeg broja slobodnih nosilaca naelektrisanja. Usljed toga dolazi do porasta struje fotootpornika, što odgovara smanjenju otpornosti. Dakle, otpornost fotootpornika opada kada se poveća intenzitet svjetlosti.

GRAFIČKI SIMBOLI

SIMBOL	ZNAČENJE	SIMBOL	ZNAČENJE
	POTENCIJAL		PROVODNIK
	PLUS POTENCIJAL		MINUS POTENCIJAL
	BATERIJA		NAIZMJENIČNI IZVOR
	OTPORNIK		POTENCIOMETAR
	KONDEZATOR		KALEM
	TRANSFORMATOR		UZEMLJENJE
	AMPERMETAR		VOLTMETAR
	MILIAMPERMETAR		MIKROAMPERMETAR
	OSCILOSKOP		OMMETAR
	ZVUČNIK		SIJALICA
	DIODA		ZENER DIODA
	ŠOTKIJEVA DIODA		TUNEL DIODA
	LED DIODA		FOTODIODA
	VARIKAP DIODA		FOTOTRANZISTOR
	NPN BIPOLARNI TRANZISTOR		PNP BIPOLARNI TRANZISTOR
	N KANALNI FET		P KANALNI FET
	N KANALNI MOSFET SA UGRAĐENIM KANALOM		P KANALNI MOSFET SA UGRAĐENIM KANALOM
	N KANALNI MOSFET SA INDUKOVANIM KANALOM		P KANALNI MOSFET SA INDUKOVANIM KANALOM
	FOTOOTPORNIK		

RJEČNIK POJMOVA IZ ELEKTRONIKE

A

amper (A) – jedinica za mjerenje jačine električne struje.

ampermetar – instrument za mjerenje jačine električne struje.

amplituda – maksimalna vrijednost pomjeraja iz ravnotežnog položaja pri periodičnom kretanju.

atom – najsitnija čestica elementa koja ima karakteristike tog elementa.

Č

čvor električnog kola – mjesto spajanja električnih provodnika.

D

dioda – poluprovodnička komponenta s dva poluprovodnička sloja P-tipa i N-tipa:

- *fotodioda* – dioda koja provodi struju kada se izloži dejstvu svjetlosti
- *LED dioda* – dioda koja emituje svjetlost
- *PIN dioda* – dioda kod koje je između P-spoja i N-spoja oblast koja je čist poluprovodnik
- *Šotkijeva dioda* – vrsta prekidačkih dioda koja ima najveću brzinu isključivanja
- *tunel dioda* – jako dopirana dioda s veoma uzanim spojem između P-oblasti i N-oblasti
- *varikap dioda* – dioda čija se kapacitivnost mijenja promjenom vrijednosti inverznog napona koji je priključen na nju
- *Zenerova dioda* – dioda koja je tehnološki prilagođena da radi u oblasti inverznih probojnih napona.

disipacija – rasipanje energije, pri čemu se ona pretvara u toplotu (**snaga disipacije** jeste količina energije koja je usljed kretanja elektrona pretvorena u toplotu).

diskretna komponenta – elektronska komponenta napravljena zasebno (otpornik, kalem, kondenzator, dioda, tranzistor i sl.).

dopiranje – proces dodavanja primjesa poluprovodniku.

E

efektivni napon (struja) naizmjenične struje – vrijednost jednosmjernog napona (struje) pri kojem se za isto vrijeme na istom otporniku proizvede ista toplota kao pri tom naizmjeničnom naponu (struji).

električna provodnost – recipročna vrijednost električne otpornosti nekog materijala.

električna struja – usmjereno kretanje slobodnih elektrona kroz provodnik.

električni otpor – veličina kojom se mjeri stepen suprotstavljanja nekog materijala prolasku električne struje.

električno kolo – međusobno povezani provodnici koji omogućuju da se elektroni, pošavši iz jedne tačke kola te obiđavši cijelo kolo, vrate na polazni položaj.

električno polje – fizička pojava u okolini naelektrisanog tijela koja se manifestuje pojavom mehaničke sile između naelektrisanja.

elektrolit – vodeni rastvor neke kiseline ili baze.

elektromagnetni talas – međusobno spregnuto promjenljivo električno i promjenljivo magnetno polje koje se u obliku talasa širi od izvora u okolni prostor.

elektromotorna sila (EMS) – količnik rada što ga izvrši izvor struje kada kroz njega proteče neka količina naelektrisanja, i samog tog naelektrisanja.

elektron – negativno naelektrisana čestica u atomu.

energetski procjep – razlika energija između pojedinih energetskih zona u atomu.

energetska zona – zona u kojoj elektroni imaju tačno određene vrijednosti energije.

energija disipacije – količina toplote koja se, usljed proticanja električne struje, oslobodi na nekom otporniku.

F

fotoelektrični efekat – pojava izbijanja elektrona iz nekog materijala pomoću svjetlosti.

fotootpornik – tip otpornika čija otpornost opada pri povećanju intenziteta svjetlosti.

fototranzistor – troslojni poluprovodnički uređaj čije je područje baze osjetljivo na svjetlost.

frekvencija – broj oscilacija u jedinici vremena.

G

galvanski element – hemijski izvor električne struje, sačinjen od dva različita metala uronjena u elektrolit.

grana električnog kola – redna veza komponenti koje povezuju dva čvora električnog kola.

H

henri (H) – jedinica za mjerenje induktivnosti.

I

induktivna otpornost – otpornost koja se javlja u kalemu pri promjeni jačine naimprijenične struje.

integrisano kolo (čip) – mnoštvo elektronskih komponenti objedinjenih na jednom parčetu poluprovodnika gradeći složena elektronska kola.

J

jon – atom s viškom ili manjkom elektrona.

jonska veza – hemijska veza koju izraziti metali grade sa izrazitim nemetalima.

K

kapacitivna otpornost – otpornost kondenzatora u kolu naizmjenične struje.

kovalentna veza – veza koja nastaje između dva atoma nemetala.

M

metalna veza – tip hemijske veze koja se obrazuje između atoma metala.

molekul – najsitnija čestica jedinjenja koja ima osobine tog jedinjenja.

N

naelektrisanje:

- *slobodno* – naelektrisanje koje se pod dejstvom spoljašnje sile može lako pomjeriti na rastojanja koja su velika u odnosu na dimenzije atoma i molekula
- *vezano* – naelektrisanje koje se nalazi unutar atoma ili molekula. U odsustvu spoljnih snažnih sila, ne mogu da se kreću slobodno i nezavisno, nego ostaju dio atoma ili molekula.

naizmjenična struja – električna struja koja periodično mijenja smjer i jačinu.

neutron – čestica u jezgru atoma koja nema naelektrisanje.

O

oblast prostornog tovara – oblast u neposrednoj okolini dodira poluprovodnika P-tipa i N-tipa u kojoj nema slobodnih nosilaca naelektrisanja.

om (Ω) – jedinica za mjerenje električnog otpora.

orbita – putanja sfernog oblika oko jezgra kojom kruže elektroni.

oscilatorno kretanje – periodično kretanje tijela istom putanjom pri kojem tijelo prolazi kroz ravnotežni položaj čas u jednom, čas u drugom smjeru.

P

perioda (T) – najmanji vremenski interval nakon kojeg naizmjenična veličina uzima iste trenutne vrijednosti.

periodično kretanje – kretanje koje se ponavlja u jednakim vremenskim intervalima.

polarizacija PN-spoja – priključenje PN-spoja u električno kolo s jednosmjernim izvorom napajanja:

- *direktno polarisan PN-spoj* – spoj kod koga je P-oblast priključena na pozitivan pol spoljašnjeg izvora (baterije), a N-oblast priključena na negativan pol
- *inverzno polarisan PN-spoj* – spoj kod koga je P-oblast priključena na negativan pol spoljašnjeg izvora (baterije), a P-oblast priključena na pozitivan pol.

poluprovodnik – materijal koji pokazuje osobine i provodnika i izolatora:

- *N* tipa (u kojem su glavni nosioci naelektrisanja elektroni)
- *P* tipa (u kojem su glavni nosioci naelektrisanja šupljine).

primjesa – hemijski element koji se dodaje poluprovodnicima.

proboj PN-spoja – pojava naglog povećanja struje inverzno polarisanog PN-spoja:

- *lavinski proboj* – odvija se pod dejstvom snažnog električnog polja, kada ubrzani elektroni u oblasti prostornog tovara udaraju u atome oslobađajući pri tome nove elektrone i šupljine
- *Zenerov proboj* – kada se u oblasti prostornog tovara, pri niskim naponima inverzne polarizacije i u uslovima velike koncentracije primjesa, stvara jako lokalno električno polje koje dovodi do razgradnje valentnih veza atoma i generisanja novih slobodnih elektrona i šupljina.

proton – pozitivno naelektrisana čestica u atomu.

R

radna prava diode – prava koja u električnom kolu sa izvorom napajanja, diodom i otpornikom predstavlja zavisnost struje kroz diodu od napona na diodi, pri stalnim vrijednostima napona izvora i otpornosti otpornika.

radna tačka diode – tačka u kojoj se presijecaju radna prava diode s njenom strujno-naponskom karakteristikom.

rekombinacija – proces popunjavanja šupljina.

S

slobodan elektron – elektron koji je napustio atom i postao slobodan.

statičke karakteristike bipolarnih tranzistora – grafički prikazi odnosa struja i napona tranzistora:

- *ulazna karakteristika tranzistora* – međusobna zavisnost ulaznih veličina tranzistora, najčešće ulazne struje od ulaznog napona, pri čemu se ostale karakteristične veličine tranzistora održavaju konstantnim
- *izlazna karakteristika tranzistora* – međusobna zavisnost izlaznih veličina tranzistora, najčešće zavisnost izlazne struje od izlaznog napona, pri čemu se ostale karakteristične veličine tranzistora održavaju konstantnim.
- *prenosne karakteristike tranzistora* – zavisnost izlazne struje od jedne od ulaznih veličina, napona ili struje, pri čemu je izlazni napon konstantan.

struja difuzije – kretanje elektrona iz oblasti veće ka oblasti manje koncentracije.

strujno-naponska karakteristika – zavisnost struje od napona.

superprovodnost – pojava da otpornost provodnika nestaje pri ekstremno niskim temperaturama, bliskim apsolutnoj nuli.

Š

šupljina – nepopunjena veza na mjestu gdje je bio elektron.

T

talasna dužina – najkraće rastojanje između dvije čestice, na pravcu prostiranja talasa, koje osciluju u istoj fazi.

transformator – uređaj zasnovan na principu elektromagnetne indukcije koji se koristi za promjenu jačine struja i napona naizmjenične struje.

tranzistor – elektronska komponenta sastavljena od tri poluprovodnička elementa, spojena u poretku PNP (PNP tranzistor) ili NPN (NPN tranzistor)

- *bipolarni tranzistor* – tranzistori kod kojeg u provođenju struje učestvuju istovremeno obje vrste slobodnih nosilaca naelektrisanja (i elektroni i šupljine)
- *unipolarni tranzistor* – tranzistor kod kojeg u provođenju struje učestvuje samo jedna vrsta slobodnih nosilaca naelektrisanja (ili elektroni ili šupljine)
- *elektroda bipolarnih tranzistora* – metalni kontakt za tri oblasti (emiter, baza i kolektor) pomoću kojeg se bipolarni tranzistor priključuje u električno kolo.
- *FET* – tip tranzistora kod kojeg se za upravljanje strujom tranzistora koristi električno polje
- *MOSFET* – tranzistor s efektom polja, realizovan kao spoj metal-oksid poluprovodnik, kod kojeg se provodnost upravlja naponom
- *elektrode unipolarnih tranzistora* – metalni kontakti za tri oblasti sors, gejt i drejn, pomoću kojih se unipolarni tranzistor priključuje u električno kolo.

U

ultraljubičasto zračenje (ultravioletno, UV zračenje) – elektromagnetno zračenje čija se frekvencija nalazi odmah iznad frekvencije vidljivog dijela spektra s najvećom talasnom dužinom – ljubičastog zračenja svjetlosti.

usmjerač (ispravljač) – uređaj koji naizmjenični napon pretvara u jednosmjerni:

- *polutaladni usmjerač* – usmjerač kod koga napon na potrošaču postoji samo za vrijeme pozitivne poluperiode ulaznog napona
- *punotaladni (dvostrani) usmjerač* – usmjerač kod koga napon na potrošaču postoji za vrijeme čitave periode ulaznog napona
- *Grecov usmjerač* – punotaladni usmjerač sa četiri diode.

V

valenca – broj elektrona koji učestvuju u stvaranju hemijske veze.

valentni elektron – elektron iz posljednje orbite u omotaču atoma.

voltmetar – instrument za mjerenje električnog napona.

LITERATURA

1. M. Popović, Osnovi elektronike, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2006.
2. R. Opačić, Elektronika I za II razred elektrotehničke škole, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 2002.
3. S. Stanković, R. Laković, Elektronika, Elektrotehnički fakultet, Podgorica, 1997.
4. Halliday and Resnick, Fundamentals of Physics, Jearl Walker, John Wiley and Sons Inc., Hoboken, 2013.
5. Bernard Grob, Basic Electronics, Mc Graw Hill, Njujork, 1997.
6. Jing Bai, Introduction to Optoelectronic Devices, Univeristy of Minnesota, 2012.
7. S. Ristić, Elektronske komponente, Elektronski fakultet, Niš, 2011.
8. R. Đurić, M. Poljarić, Laboratorijske vežbe iz osnova elektronike, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2015.
9. I. Prša, Praktikum laboratorijskih vježbi za II razred elektrotehničke škole, interna skripta, Bihać, 2011.
10. Materijal sa sajta:
www.tesla-institute.com

