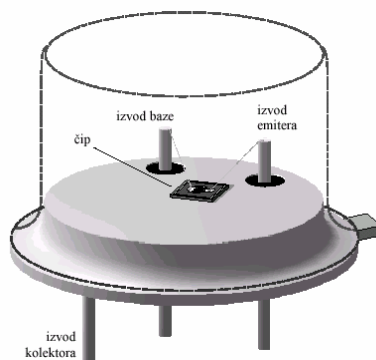


TONKO KOVAČEVIĆ



ELEKTRONIČKI ELEMENTI
Repetitorij s laboratorijskim vježbama



SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI STUDIJSKI CENTAR
ZA STRUČNE STUDIJE
Split, 2007

PREDGOVOR

Repetitorij s laboratorijskim vježbama iz područja Elektroničkih elemenata napisan je za studente Elektrotehnike i Informatičke tehnologije Sveučilišnog studijskog centra za stručne studije Sveučilišta u Splitu. Vježbama je obuhvaćen veći dio tematskih cjelina potrebnih za savladavanje gradiva iz predmeta Elektronički elementi. Također repetitorij obuhvaća i veći dio gradiva potreban za praćenje teoretskog dijela nastave.

Vježbe se izvode na didaktičkim modelima s kojima su studenti upoznati radeći vježbe iz predmeta Elektrotehnika I i Elektrotehnika II.

Zahvaljujem se kolegama dipl. inž. Vatavuku i Krčumu za tehničku pomoć pri realizaciji laboratorijskih vježbi.

Split, veljača 2007

Autor

SADRŽAJ

1 Poluvodiči	1
1.1 Čvrsta tijela	1
1.2 Intrinzični i ekstrinzični poluvodiči	4
1.3 P-N spoj	8
2 ELEKTRONIČKI ELEMENTI	13
2.1 POLUVODIČKA DIODA.....	13
2.1.1 Poluvalni ispravljač	14
2.1.2 Punovalni ispravljač.....	16
2.1.2 Diodni ograničavači.....	17
2.1.3 VJEŽBA 1. POLUVODIČKA DIODA	19
2.2 ZENER DIODA	27
2.2.1 VJEŽBA 2. ZENER DIODA	31
2.3 LED dioda.....	40
2.3.1 Ostali optoelektronički elementi	40
2.3.2 VJEŽBA 3. LED DIODA	41
2.4 Kapacitivna dioda.....	44
2.4.1 VJEŽBA 4. KAPACITIVNA DIODA	46
2.5 BIPOLARNI TRANZISTOR	50
2.5.1 Ograničenja u radu tranzistora	55
Ebers-Mollov model.....	58
Tranzistor kao sklopka	62
2.5.3 VJEŽBA 5. BIPOLARNI TRANZISTOR.....	63
2.6 UNIPOLARNI TRANZISTOR	69
2.6.1 JFET.....	69
2.6.2 MOSFET.....	71
2.6.3 VFET i VMOS	73
2.6.4 CMOS	74
2.6.5 Nadomjesni modeli unipolarnih tranzistora.....	78
2.6.7 Budući razvoj i druge tehnologije	79
2.6.8 VJEŽBA 6. UNIPOLARNI TRANZISTOR.....	81
2.7. JEDNOSPOJNI TRANZISTOR	87
2.7.1 VJEŽBA 7. JEDNOSPOJNI TRANZISTOR	88
2.8 Tiristori	91
2.8.1 VJEŽBA 8. TIRISTOR.....	95

UVOD

Laboratorijske vježbe iz područja Elektroničkih elemenata obuhvaćaju onaj dio gradiva koji se odnosi na većinu tipova elektroničkih komponenti koje se danas primjenjuju u realizaciji elektroničkih sklopova. Vježbe se ne izmjenjuju ciklički, nego iste grupe vježbi rade svi studenti istovremeno. Cilj vježbi je što lakše i temeljitije savladavanje gradiva iznesenog na predavanjima. Svaka je vježba podijeljena na dva temeljna poglavlja:

- Teoretski uvod koji sadržava opis građe bitne za razumijevanje pojedine vježbe, kao i prikaz mogućnosti primjene korištenih elemenata u realnim elektrotehničkim uređajima i elektroničkim sklopovima.
- Eksperimentalni dio koji sadržava zadatak što ga treba riješiti i odnosni mjerni postupak. Tablice i dijagrami potrebni za uspješno rješavanje eksperimentalnih zadataka su sastavni dio ovoga poglavlja. Kroz postavljena pitanja provjerava se usvajanje stečenih znanja.

U tijeku izvođenja studenti popunjavaju priložene tablice izmjerenim podacima. Vježba se upotpunjava crtanjem krivulja, odgovorima na pitanja koje studenti unose u skripta na za to predviđenim mjestima, kao i komentarom vježbe. Prije izvođenja svakog ciklusa vježbi voditelj provjerava da li su vježbe iz prethodnog ciklusa kompletirane.

Pokuse studenti obavljaju samostalno. Tijekom odvijanja vježbi pozornost treba obratiti na:

- Prije izvođenja vježbe detaljno proučiti upute i prethodno izvršiti potrebne proračune.
- Pažljivo razgledati mjerne uređaje, instrumente i pomoćni pribor. Voditi računa o oznakama i mjernim područjima instrumenata.
- Nakon spajanja odgovarajućega električnog kruga, provjeru vrši voditelj vježbi. Napajanje se smije uključiti samo po odobrenju voditelja vježbi (asistenta, demonstratora).
- Sva spajanja i odspajanja treba izvoditi u beznaponskom stanju.
- Uočene kvarove, greške na instrumentima i opremi treba prijaviti voditelju vježbi.
- S opremom i instrumentima postupati pažljivo, čuvati ih od mehaničkih i električnih udara.
- Po završetku rada u laboratoriju odspojiti sve elemente i spremiti ih na odgovarajuće mjesto na ploči s priborom.
- Prije odlaska provjerite da li je isključeno napajanje električnih izvora i upotpunjen komplet s priborom.
- Za neprijavljene kvarove i otuđenje instrumenata i/ili pribora studenti sami snose potpunu odgovornost.

1 Poluvodiči

1.1 Čvrsta tijela

Materijali u čvrstom stanju mogu biti *amorfni ili kristalni*. Nepravilan raspored atoma ili grupa atoma karakterizira amorfna čvrsta tijela. Karakteristika kristaličnih čvrstih tijela je pravilan raspored atoma ili molekula od kojih su sačinjena. Nadalje kristalična čvrsta tijela možemo podijeliti na *polikristale i monokristale*. Kod polikristala pravilan poredak se proteže na manje dijelove čvrstog tijela. Monokristali su karakterizirani pravilnim ponavljanjem osnovne geometrijske forme (**jedinične ćelije**). Postoji više mogućnosti promatranja i klasifikacije kristaličnih čvrstih tijela. Ona se mogu promatrati sa stanovišta geometrijskog oblika osnovnih ćelija od kojih je čvrsto tijelo nastalo, moguće ih je klasificirati prema njihovom fizikalnim svojstvima, kao što su temperaturna, optička, magnetska, električna i druga. Elektroni u vanjskoj ljusci atoma (**valentni elektroni**) su bitni za sva ova svojstva kao i za karakter sila koje drže atome kristala na okupu. Prema karakteru sila koje drže atome kristala na okupu (sile kristalnih veza) moguće je čvrsta tijela podijeliti na *ionske, metalne, kovalentne i molekularne kristale*.

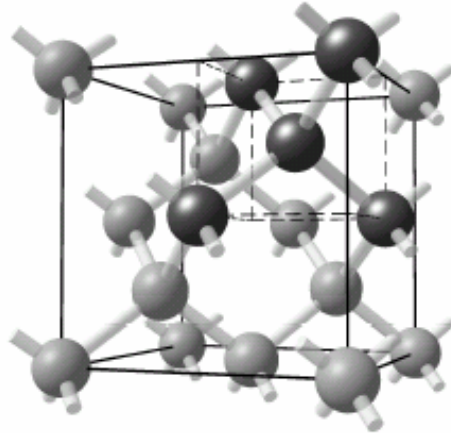
Kod **ionskih kristala** pojedini elektroni vanjske ljuske jednog elementa prelaze na atome drugog elementa, na taj način da oba tvore zatvorene ljuske. Primjer takvog kristala je NaCl (natrijev-klorid). Natrij, koji ima jedan valentni elektron predaje ga kloru, što znači da svaki atom ima za sebe popunjene ljuske i oba atoma se ioniziraju (Na^+Cl^-). Sila kristalne veze je elektrostatske prirode i rezultat je ionizacije. Ovi kristali vrlo slabo vode struju pogotovo na nižim temperaturama. Za **metalne kristale** karakteristično je to što su ioni kristalne rešetke nastali otpuštanjem valentnih elektrona. Ti elektroni nisu vezani za svoje matične atome i kreću se slobodno kroz čitav kristal. Slobodni elektroni su uzrok velike specifične vodljivosti metalnih kristala. Sile kristalnih veza između iona kristalne rešetke su elektrostatske prirode i ostvaruju ih slobodni elektroni.

Kod **molekularnih kristala** postoje prepoznatljive molekule u kristalnoj strukturi. Sile kristalnih veza mogu se objasniti pomoću van der Waals-ove sile (nisu kovalentne interakcije). Kao primjer ovakvih kristala mogao bi poslužiti *šećer* koji ima nisko talište.

Kod **kovalentnih kristala** sile kristalne veze se ostvaruju dijeljenjem valentnih elektrona između susjednih atoma. Kao primjer takve veze je dijamantna struktura. Dijamant (ugljik) je četverovalentan, slika 1.1. Svaki atom dijeli svoja četiri valentna elektrona s četiri susjedna atoma, udružujući ih u parove. Privlačnu silu između dva susjedna atoma ostvaruje par elektrona smješten duž pravca koji simboliziraju vezu između susjednih atoma, što znači da se oko svakog atoma formiraju četiri valentne veze. Na isti se način kristaliziraju četverovalentni elementi **silicij (Si)** i **germanij (Ge)**, koji su od najvećeg interesa u poluvodičkoj elektronici.

Ovaj način veze se ostvaruje također i kod nekih kristala složenih od dva elementa, od kojih je jedan trovalentan, a drugi peterovalentan. Takvi kristali su **galijev-arsenid (GaAs)** i **indijev-antimonid (In-Sb)**. Sile kristalnih veza su opet elektrostatske prirode, ali se ne mogu objasniti klasičnom Coulombovom silom, već valnom prirodom elektrona. Udruživanje valentnih elektrona u kovalentne veze ima za posljedicu da kovalentni kristali slabo vode struju, a na temperaturi apsolutne nule uopće ne vode.

Od fizikalnih svojstava čvrstih tijela u elektrotehnici su najvažnija njihova električna svojstva. Prema iznosu specifičnog otpora čvrsta tijela se dijele na *vodiče, poluvodiče i izolatore*, tablica 1.1.



Slika 1.1 Kristalna rešetka dijamanta

Čvrsta tijela	Specifični otpor ρ [Ωcm]
Vodiči	$\rho < 10^{-3}$
Poluvodiči	$10^{-3} < \rho < 10^6$
Izolatori	$\rho > 10^6$

Tablica 1.1 Podjela čvrstih tijela prema specifičnom otporu

Specifičan otpor poluvodiča opada s porastom temperature, ali može unutar određenog intervala temperature skale i rasti. Navedene vrijednosti specifičnog otpora odnose se na sobnu temperaturu. Granice su u izvjesnoj mjeri proizvoljne, time da je mnogo jača indikacija o vrsti čvrstog tijela temperaturna ovisnost specifičnog otpora, iako ni ona nije jednoznačna.

Podjelu čvrstih tijela na vodiče, poluvodiče i izolatore moguće je uglavnom izvršiti na osnovu vrste sila kristalne veze. Za najveći broj vodiča tipični su metalni kristali, a za poluvodiče i izolatore ionski i kovalentni kristali. U ionskim kristalima vodljivost, naročito na višim temperaturama, može biti izazvana i gibanjem iona kroz kristal.

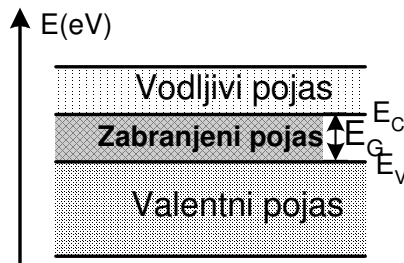
Kao što je iz fizike poznato *diskretni energetske nivoe* (koji karakteriziraju atome) određuju dozvoljene energije elektrona u atomu. Oni prerastaju u *pojase energija* kada se atomi pojedinog elementa udruže u kristal. U pravilu iz svakog diskretnog energetskog nivoa pojedinačnog atoma nastaje jedan pojas energija kristala. Pojasi dozvoljenih energija obično su međusobno odijeljeni intervalima ili pojasima energija koje elektroni ne mogu imati, tzv. *pojasima zabranjenih energija*. Najviši energetske pojasi mogu se, međutim, i preklapati.

O obliku energetskih pojasa kristala koji potječu od valentnih elektrona ovisit će da li je pojedino čvrsto tijelo metal, poluvodič ili izolator. Niži energetske pojasi nastali iz diskretnih nivoa elektrona koji tvore popunjene ljuske bez značenja su za električka svojstva čvrstih tijela, pa se ovdje neće niti razmatrati.

Za poluvodiče i izolatore, kad nemaju primjesa i kad je čitav kristal bez strukturnih defekata, *dijagram energetskih pojasa* poprima oblik prikazan na slici 1.2. Energetske pojasi koji pripadaju elektronima popunjenih ljusaka nisu prikazani. *Valentni pojas* je na apsolutnoj nuli kompletno popunjen, a odijeljen je od *vodljivog pojasa*, koji je na apsolutnoj nuli prazan, *pojasom zabranjenih energija* širine E_G , unutar kojega elektroni ne mogu egzistirati.

Postojanje pojasa zabranjenih energija između jednog, na apsolutnoj nuli popunjenog, i drugog koji je dozvoljen, ali na apsolutnoj nuli prazan, ima za posljedicu da kroz takav kristal na apsolutnoj nuli uopće ne može teći struja. To je posljedica *Paulijevog principa*. Taj osnovni princip izriče tvrdnju da u jednom kristalu isto stanje gibanja koje je karakterizirano trima komponentama brzina elektrona može imati samo jedan elektron, odnosno dva elektrona ukoliko se uzme u obzir i njihov spin. U

popunjenom pojasu su sva dozvoljena energetska stanja stvarno i zastupljena. Prema tome gibanje elektrona kroz kristal, odnosno prijelaz iz jednog energetskog stanja u drugo ima za posljednicu suprotno gibanje drugog elektrona, tj. moguća je samo zamjena stanja. U tom slučaju ne postoji usmjereno gibanje elektrona pod utjecajem električkog polja, što u stvari predstavlja električnu struju.



Slika 1.2 Dijagram energetskih pojasa poluvodiča ili izolatora

Da bi kroz takav kristal mogla teći struja, morali bi se elektroni iz popunjenog valentnog pojasa prebaciti u prazan vodljivi pojas, ali za to im je potrebno predati iznos energije $E > E_G$. Električko polje, čak kad je i vrlo jako, može elektronima predati samo male dodatne iznose energija, koji su puno manji od E_G , a unutar zabranjenog pojasa ne mogu elektroni egzistirati. Kod porasta temperature, uslijed vibracija atoma kristalne rešetke, elektronima se predaju u prosjeku iznosi energije reda kT . Taj iznos izražen u elektron-voltima daje:

$$E_T = \frac{k \cdot T}{q} = \frac{T}{11605} \text{ (eV)} \quad (1.1)$$

gdje je:

T apsolutna temperatura,

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K Boltzmannova konstanta,

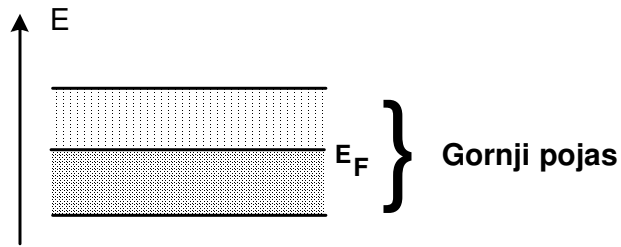
$q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C iznos naboja elektrona.

Na sobnoj temperaturi $T = 290$ K a $E_T = 0,025$ eV. To je puno manje od širine zabranjenog pojasa E_G , koja je reda veličine eV. Treba međutim voditi računa o činjenici koja rezultira iz statističke fizike, na osnovu koje će biti moguće određenom vrlo malom broju elektrona dati iznose energija veće od E_G i omogućiti im prijelaze u vodljivi pojas, ali je vjerojatnost f za to vrlo mala i proporcionalna:

$$f \sim e^{-\frac{E_G}{E_T}} \quad (1.2)$$

Vjerojatnost prijelaza elektrona u vodljivi pojas na danoj temperaturi eksponencijalno opada sa širinom zabranjenog pojasa. Kako vodljivost kristala ovisi o broju elektrona u vodljivom pojasu, kristali s manjom širinom zabranjenog pojasa bolje će voditi struju. Na osnovu te čisto kvantitativne razlike dijele se spomenuta čvrsta tijela na poluvodiče i izolatore. Ukoliko je E_G manji od približno 2 eV, govori se o poluvodičima. Među poluvodiče spadaju germanij, čiji je $E_G = 0,78$ eV, i silicij, koji ima $E_G = 1,2$ eV, na temperaturi apsolutne nule. Širina zabranjenog pojasa polako opada kod porasta temperature, tako da je na sobnoj temperaturi $E_G = 0,72$ eV kod germanija, a za silicij je $E_G = 1,1$ eV.

Vodiči, jedan mogući oblik dijagrama energetske pojasa metala (vodiča) prikazan je na slici 1.3. Gornji pojas je samo djelomično popunjen na apsolutnoj nuli do točno određenog nivoa, tzv. *Fermijevog nivoa*.

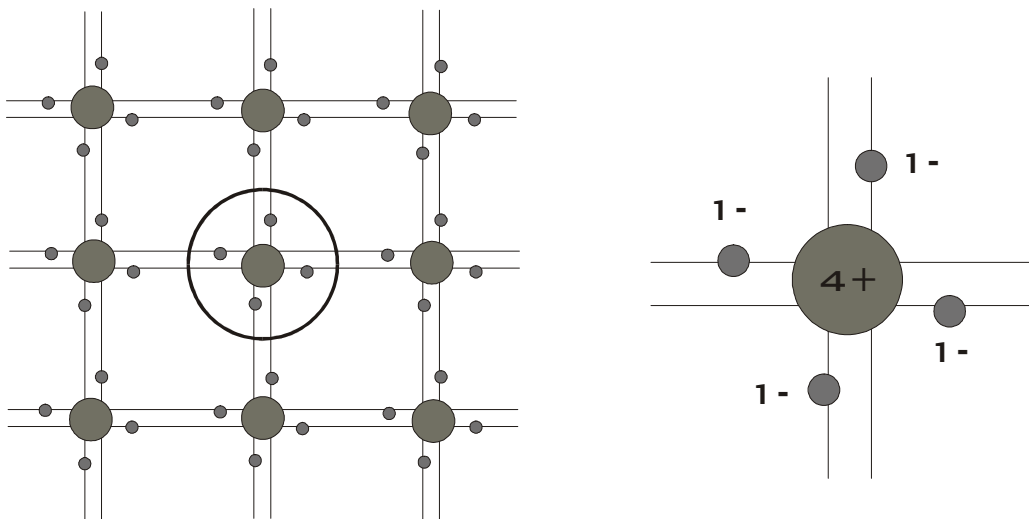


Slika 1.3 Energetski pojasi metala

Budući da se iznad najvišeg zaposjednutog nivoa nalazi obilje dozvoljenih energetske nivoa, elektroni će se pod djelovanjem električnog polja slobodno kretati kroz kristal i struja će moći teći. Energetski pojasi elektrona popunjenih ljusaka leže ispod prikazanog pojasa energija i odvojeni su od njega pojasi zabranjenih energija, ali kao što je već rečeno o njima ne ovise električna svojstva kristala.

1.2 Intrinzični i ekstrinzični poluvodiči

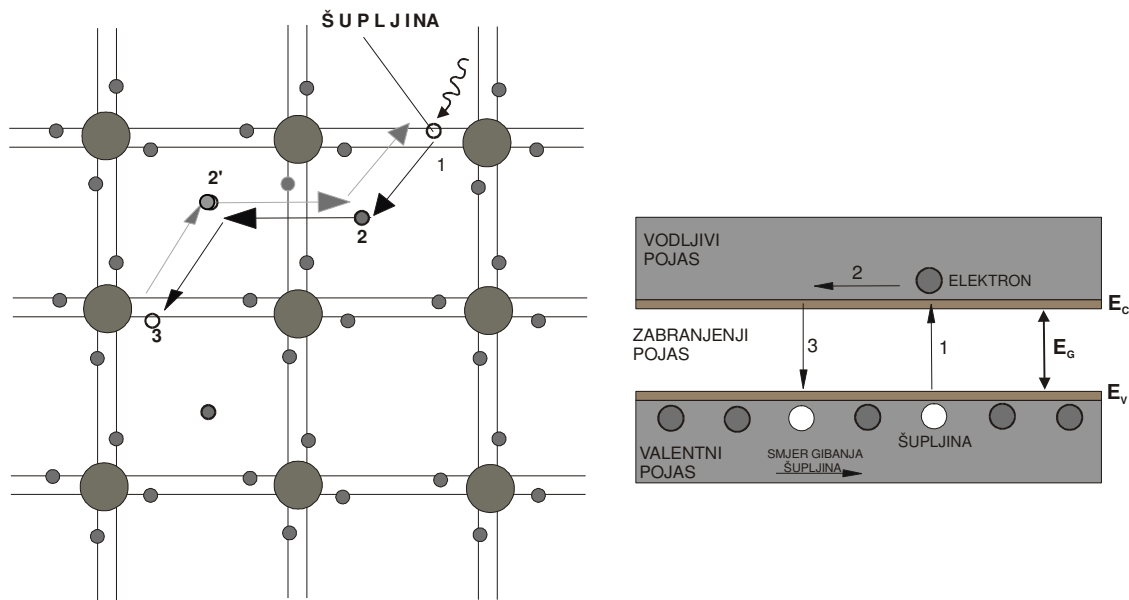
Na slici 1.4 prikazana je kristalna rešetka silicija. Kao što se vidi sa slike jedan atom dijeli svoja četiri valentna elektrona s četiri susjedna atoma i na taj način tvori sile kristalne veze.



Slika 1.4 Dvodimenzionalni prikaz kristalne rešetke silicija

Na temperaturama različitim od temperature apsolutne nule termička titranja kristalne rešetke dovoljna su da se neke veze među atomima razbiju. Razbijanjem veze elektron se oslobađa od matičnog atoma, što će omogućiti protok električne struje. Istovremeno, prekinutoj kovalentnoj vezi nedostaje elektron što se simbolizira šupljinom, nositeljem pozitivnog jediničnog naboja. Valentni

elektroni iz susjednih kovalentnih veza mogu uskočiti na mjesto šupljine, dodatno doprinoseći električnoj vodljivosti poluvodiča. Opisani proces nastanka elektrona i šupljina naziva se **generacija nositelja** (1). S porastom temperature, raste energija termičkih titraja kristalne rešetke, pa raste i broj termički generiranih parova elektron-šupljina, a time i električna vodljivost poluvodiča. Tijekom gibanja kroz kristalnu rešetku (2) oslobođeni elektron će negdje u kristalnoj rešetki naletjeti na prethodno razbijenu valentnu vezu koju će dopuniti. Time će poništiti šupljinu koja je na tom mjestu u tom trenutku postojala. Taj proces se naziva **rekombinacija nositelja**(3).



Slika 1.5 Generacija parova elektron-šupljina

Uvođenje šupljine kao pozitivno nabijene čestice omogućava da se umjesto gibanja velikog broja elektrona u valentnom pojasu, prati gibanje relativno malog broja šupljina u suprotnom smjeru.

U energetsom dijagramu, oslobađanje elektrona od matičnog atoma predočava se preskocom elektrona iz valentnog pojasa u vodljivi pojas. Elektron pri dnu vodljivog pojasa ima samo potencijalnu energiju. Pod djelovanjem električnog polja on će dobiti određeni iznos kinetičke energije, što će omogućiti protok električne struje. Porast kinetičke energije elektrona u energetsom dijagramu odgovara udaljavanju elektrona od dna vodljivog pojasa prema gore, dok porast kinetičke energije šupljina odgovara udaljavanju od vrha valentnog pojasa prema dolje.

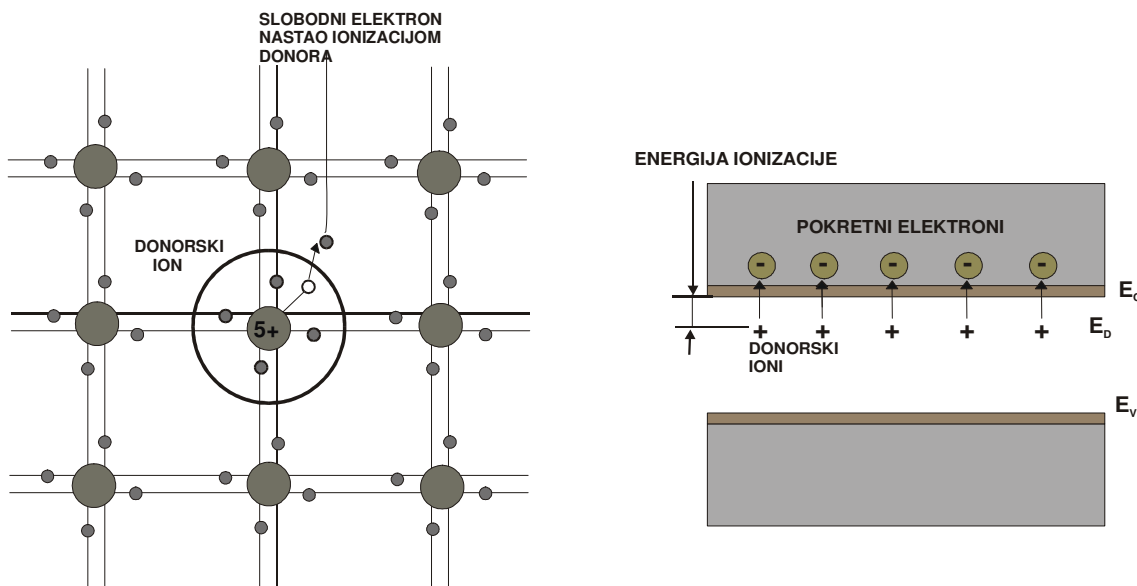
Ako je poluvodič potpuno čist, tj. ako je koncentracija drugih atoma u kristalu poluvodiča zanemariva, tada slobodni elektron i šupljine nastaju isključivo opisanim postupkom generacije parova elektron-šupljina. Zbog toga su ravnotežne koncentracije elektrona i šupljina u takvom poluvodiču međusobno jednake, a takav poluvodič zovemo intrinzičnim (čistim) poluvodičem.

Prema zakonu termodinamičke ravnoteže, umnožak ravnotežnih koncentracija elektrona i šupljina u poluvodiču na nekoj temperaturi je konstantan: $n_0 \cdot p_0 = n_i^2$ gdje su n_0 i p_0 ravnotežne koncentracije slobodnih elektrona, odnosno šupljina, a n_i je intrinzična koncentracija nositelja. Koncentracije elektrona i šupljina u čistom (intrinzičnom) poluvodiču međusobno su jednake i jednake intrinzičnoj koncentraciji zato što u takvom poluvodiču slobodni nositelji postoje isključivo zbog termičke generacije parova elektron-šupljina. Intrinzična koncentracija ovisi o temperaturi na kojoj se poluvodič nalazi i o širini njegovog zabranjenog pojasa:

$$n_i = \sqrt{N_V \cdot N_C} \cdot e^{-\frac{E_G}{2 \cdot E_T}}, \quad (1.3)$$

gdje su N_V i N_C efektivne gustoće kvantnih stanja u valentnom i vodljivom pojasu.

Dodavanjem određenih primjesa u kristalnu rešetku poluvodiča, mijenjaju se i njegova električna svojstva. Ako te primjese povećavaju koncentraciju slobodnih elektrona, onda govorimo o donorskim primjesama, a za poluvodič u kojem je koncentracija elektrona veća od koncentracije šupljina kažemo da je ekstrinzični poluvodič n-tipa. U siliciju i germaniju, koji su četverovalentni elementi (imaju četiri elektrona u valentnoj ljusci), koncentraciju elektrona povećavaju peterovalentni elementi, npr. fosfor ili arsen. Budući da oni u valentnoj ljusci imaju pet elektrona, a četiri su im dovoljna za formiranje kovalentne veze sa susjednim atomima poluvodiča, peti elektron će biti vrlo slabo vezan za matični atom, te će biti dovoljno vrlo mala energija ionizacije da se on oslobodi. Naravno, kada elektron napusti primjesni atom on će postati pozitivni (donorski) ion. On je na sobnoj temperaturi "zamrznut" u kristalnoj rešetki silicija, pa ne doprinosi vodljivosti poluvodiča.

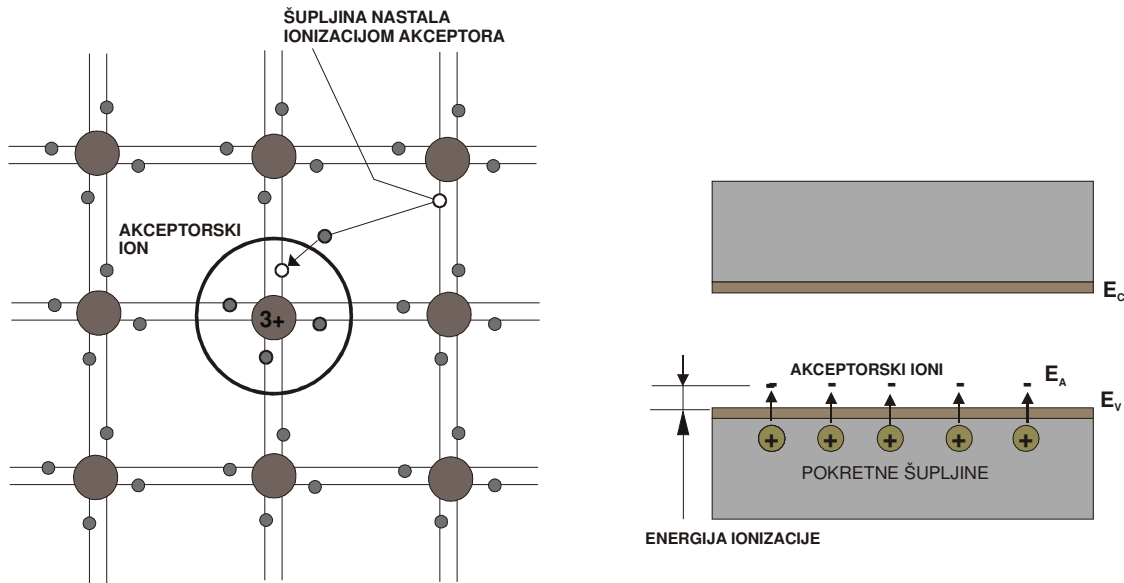


Slika 1.6 Poluvodič n-tipa

Prisutnost donorskog atoma u poluvodiču predočava se u energetsom dijagramu diskretnim stanjima unutar zabranjenog pojasa poluvodiča, vrlo blizu vrhu zabranjenog pojasa. Budući da je za tipične donorske primjese energija ionizacije neophodna da bi elektroni uskočili u vodljivi pojas vrlo mala (10 do 50 meV), na sobnoj temperaturi ($T=300$ K) su gotovo svi primjesni atomi ionizirani.

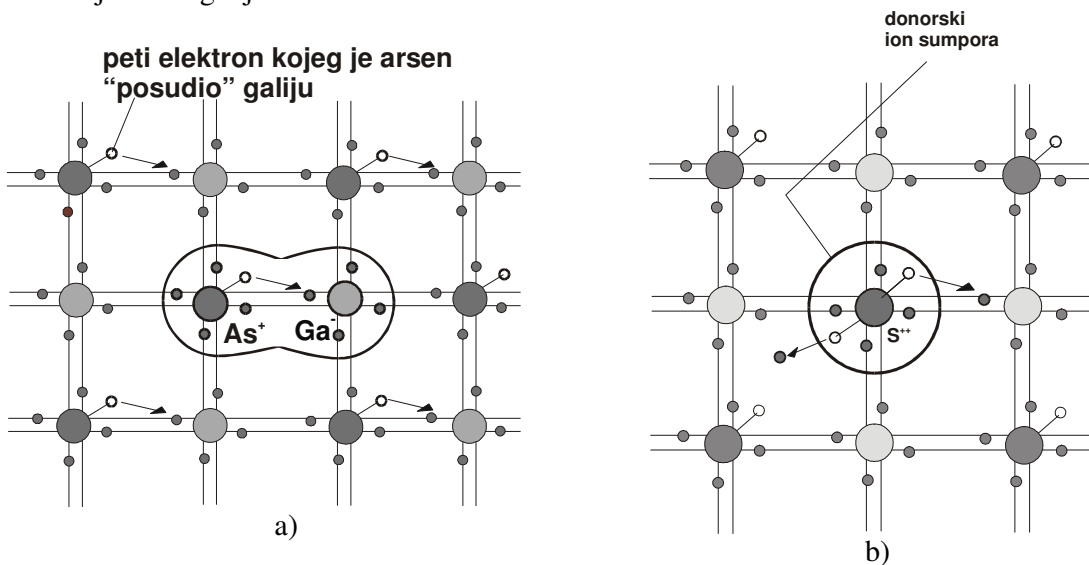
Poluvodič p-tipa, u kojem je koncentracija šupljina veća od koncentracije elektrona, dobiva se dodavanjem akceptorskih primjesa. U siliciju i germaniju akceptorske primjese su uglavnom trovalentni elementi, npr. bor, galij. Kako ti elementi imaju samo tri elektrona u valentnoj ljusci, za ostvarivanje čvrste kovalentne veze sa susjednim atomima poluvodiča nedostaje jedan elektron. Takav atom će stoga vezati za sebe jedan od elektrona koji bi inače preskočio iz valentnog u vodljivi pojas, odnosno onemogućit će generiranje slobodnog elektrona u paru elektron-šupljina. Prihvatanjem slobodnog elektrona, akceptorski atom postaje negativni ion. Za tipične akceptorske

primjese energija ionizacije je vrlo mala (10 do 50 meV), pa su na sobnim temperaturama gotovo svi akceptori ionizirani. U energetskom dijagramu poluvodiča akceptori unose stanja u zabranjeni pojas, vrlo blizu dna zabranjenog pojasa.



Slika 1.7 Poluvodič p-tipa

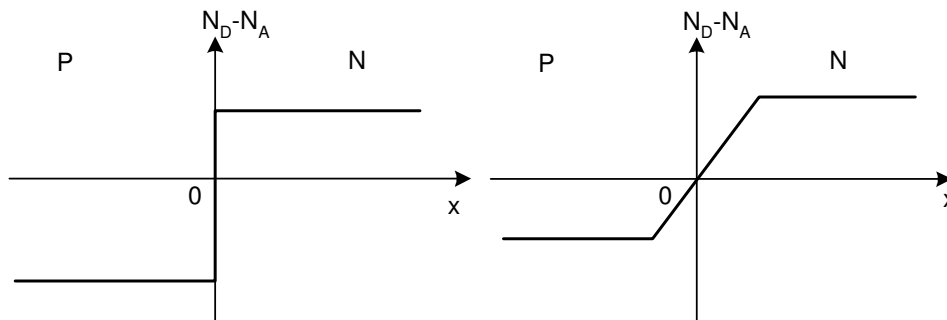
Složeni poluvodiči (*compound semiconductors*) se sastoje od spojeva tro- i peterovalentnog elementa (III-V poluvodiči, GaAs galij-arsenid, GaP galij-fosfid), odnosno dvo- i šesterovalentnih elemenata (II-VI poluvodiči, ZnS cink-sulfid), kovalentna veza se ostvaruje tako da atom koji ima veći broj elektrona u valentnoj ljusci ustupa višak elektrona atomu s nižom valentnošću. Donorske primjese su elementi koji imaju višu valentnost od komponente koju nadomještaju u kristalnoj rešetki, a akceptorske primjese imaju nižu valentnost od komponente koju nadomještaju. Na slici 1.8 je prikazan donorski atom šesterovalentnog sumpora koji je nadomjestio peterovalentni arsen u kristalnoj rešetki galij-arsenida.



Slika 1.8 a) intrinzični poluvodič b) poluvodič n-tipa

1.3 P-N spoj

Prijelaz iz P-tipa u N-tip može biti skokovit ili postepeni. Pod metalurškom ili P-N graničnom ravninom podrazumijeva se ona ravnina u kojoj su koncentracije donora i akceptora međusobno jednake, a to je u oba slučaja ravnina $x = 0$. *Osnovno svojstvo P-N spoja je njegovo ispravljačko djelovanje i zbog toga efekta imamo usko područje konačne širine koje se proteže na obje strane metalurške granice.* To prijelazno područje se naziva sloj prostornog naboja, P-N barijera ili prijelazni sloj. Pod P-N spojem se podrazumijeva cjelina poluvodiča P i N-tipa, i on je u tom smislu praktički ekvivalentan P-N diodi.



Slika 1.9 Postupci legiranja i izvlačenja

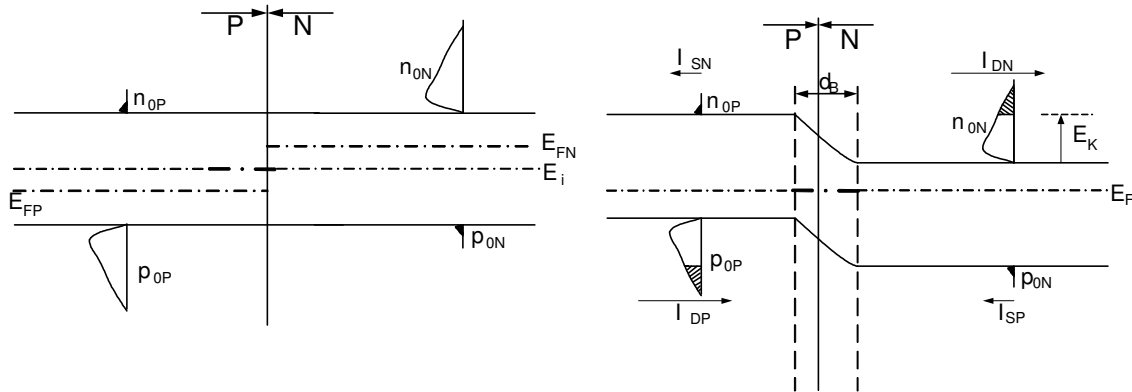
Ispravljačkim svojstvom raspolažu i kontakti mnogih metala s poluvodičima. Ako je spoj ostvaren duž neke relativno veće plohe, kao i u slučaju P-N spoja, onda se takvi ispravljači nazivaju *slojni* ili *spojni ispravljači*; to su uz P-N diode, npr. selenski ispravljači. Moguće je također ispravljačko djelovanje postići kontaktom tankih metalnih šiljaka i poluvodiča. Tada se govori o *točkastim* diodama, odnosno ispravljačima. Među njima su najvažniji silicijevi i germanijevi ispravljački elementi.

Budući da kod P-N spoja monokristalna struktura ostaje sačuvana, teoretska analiza takvog spoja se daje razmjerno jednostavno provesti. Važnu ulogu kod spojeva metal-poluvodič imaju i svojstva površine poluvodiča duž koje se ostvaruje spoj. Ovdje će se najveća pažnja posvetiti P-N spoju, jer je on tehnički najvažniji.

Svojstva P-N spoja mogu se najlakše objasniti ukoliko se zamisli da su oba poluvodiča najprije bila razmaknuta, a zatim dovedena u kontakt uz sačuvanje monokristalne strukture. Za P-tip i za N-tip uzet će se da su homogeni, a prijelaz iz jednog tipa u drugi skokovit. Koncentracije akceptorskih nečistoća prikazanih kao negativnih iona i donorskih nečistoća prikazanih kao pozitivnih iona redovito nisu iste. One se obično razlikuju za nekoliko redova veličina. Treba napomenuti da se takav tip prijelaza stvarno i praktički realizira jednim tehnološkim postupkom nazvanim *legiranje*. Rezultati do kojih će se doći analizom skokovitog prijelaza vrijede u biti i za ostale tipove prijelaza.

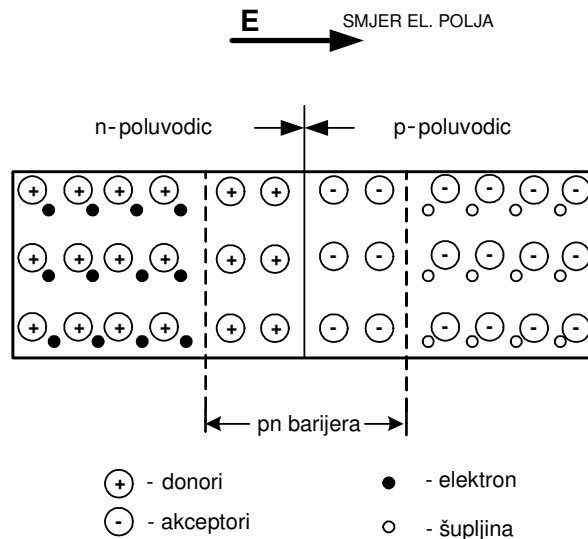
Kada na P-N spoj nije priključen napon, kada se on nalazi na konstantnoj temperaturi i nije izložen djelovanju dodatne radijacije, tada kroz spoj ne može teći struja, pa se on nalazi u ravnoteži. Ravnotežne koncentracije nositelja na P-strani su p_{0P} i n_{0P} , a na N-strani n_{0N} i p_{0N} . Lako je zaključiti da stanje ostvareno neposredno nakon uspostavljanja kontakta i prikazano na slici 1.10 lijevo ne može predstavljati ravnotežno stanje. Postoji velika razlika u koncentracijama istog tipa nositelja na lijevoj i desnoj strani od granične ravnine, pa je u času zamišljenog uspostavljanja kontakta gradijent koncentracije beskonačno velik. Posljedica toga je *difuzijsko* gibanje nositelja s mjesta više koncentracije prema mjestu niže koncentracije, i to elektrona na P-stranu i šupljina na N-stranu. N-strana gubi elektrone s jedne strane i dobiva šupljine s druge strane, pa postaje *pozitivnija*, a P-

strana postaje *negativnija*. Zbog toga se prolaz difuzijske struje sve više otežava, jer se većinski elektroni na N-strani moraju gibati prema P-strani, koja postaje sve negativnija, a isto tako šupljine sa P-strane sve teže prelaze na N-stranu, koja postaje sve pozitivnija. *Ravnotežno stanje* se uspostavlja kada je neto struja kako elektrona tako i šupljina jednaka nuli. To će nastupiti onda kada *Fermijev nivo* u P i N dijelu spoja bude jedan te isti. *Energetski dijagram P-N spoja* u ravnoteži prikazan je na slici 1.10 desno.



Slika 1.10 P-N spoj neposredno nakon uspostavljanja kontakta i P-N spoj u ravnoteži

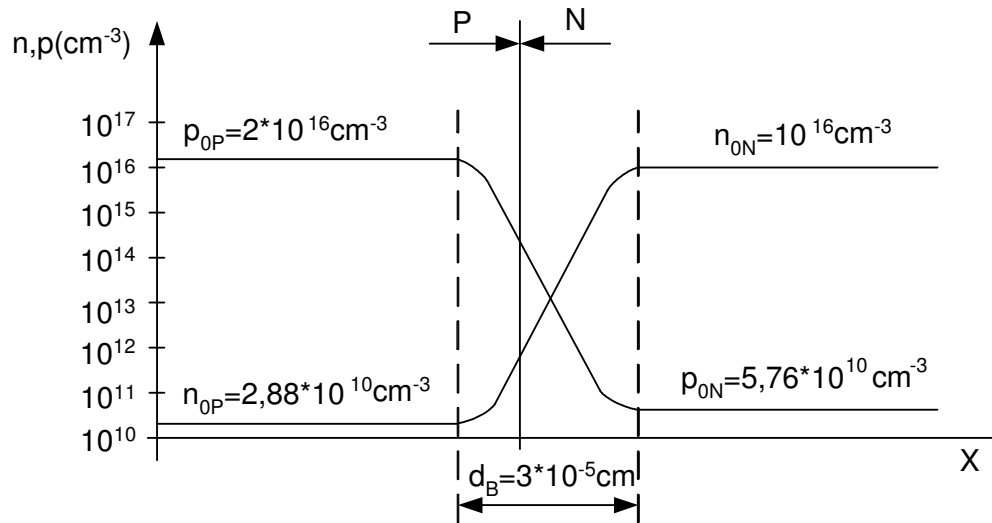
Većinski elektroni sprečavani su u svom prijelazu na P-stranu *barijerom* potencijalne energije ili *kontaktnom potencijalnom energijom* E_K , a isto su tako sprečavane i većinske šupljine u svom prijelazu na N-stranu. Područje u kojem se mijenjaju potencijalne energije elektrona i šupljina je vrlo usko, i označeno je na slici 1.10 s d_B . Ono zadire kako na P- tako i na N-stranu i naziva se *P-N barijera*, *prijelazni sloj* ili *sloj prostornog naboja*.



Slika 1.11 Presjek pn spoja u ravnoteži

Na P-strani barijere postoji *negativni prostorni naboj akceptora*, a na N-strani *pozitivni prostorni naboj donora*. Ti naboji su apsolutnim iznosom jednaki, jer je čitav P-N spoj kao cjelina električki neutralan. Negativan naboj akceptorskih iona na P-strani barijere nastaje zbog toga što su se većinski elektroni, prelazeći na P-stranu tokom vremena u kojem se je uspostavljala ravnoteža, rekombinirali u blizini prijelaza sa šupljinama pa je ostao negativni naboj akceptora nekompenziran pozitivnim nabojem šupljina, slika 1.11. Isto vrijedi i za pozitivni naboj donorskih iona na N-strani. Prostorni naboj u P-N

barijeri ima prema *Poissonovoj* jednadžbi za posljedicu da u barijeri postoji električno polje, odnosno razlika potencijala između P- i N-strane.



Slika 1.12 Raspodjela koncentracije nositelja u P-N spoju

Na slici 1.12 prikazana je raspodjela koncentracije nositelja u ravnoteži na sobnoj temperaturi. Gustoća struje šupljina u našem slučaju iznosi:

$$J_p = -qD_p(dp/dx) = 1,6 * 10^{-19} * 45 * (2 * 10^{16} / 3 * 10^{-5}) = 4800 A / cm^2, \quad (1.4)$$

gdje je D_p (cm²/s) difuzijska konstanta za šupljine.

Gustoća struje elektrona je istog reda veličine i ove dvije struje se zbrajaju! Potencijalna barijera ove velike tendencije difuzijskih struja eliminira. Mogu difundirati samo oni većinski nositelji čija je kinetička energija veća od E_K .

Kontaktni potencijal može se izraziti relacijom:

$$U_K = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_i^2}{p_{0P} * n_{0N}} \approx \frac{kT}{q} \ln \frac{n_i^2}{N_A * N_D}, \quad (1.5)$$

gdje su N_A i N_D koncentracije atoma akceptora i donora. Za germanij U_K kreće se u granicama od 0,2 do 0,6V a za silicij od 0,4 do 0,9V.

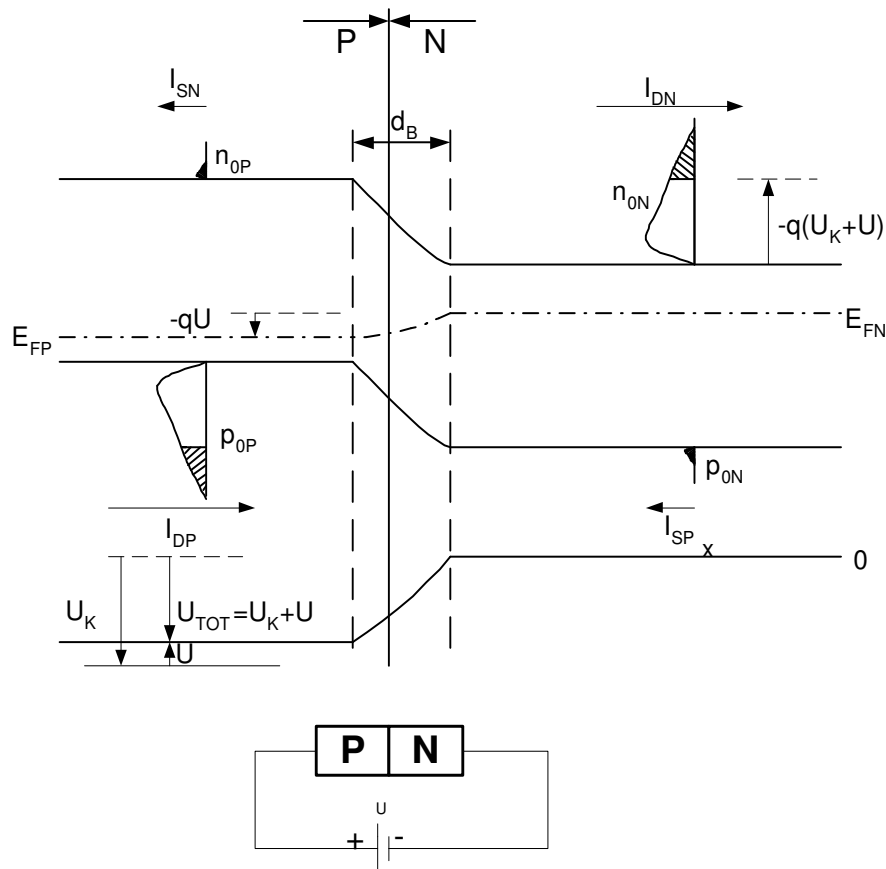
1.3.1 P-N spoj pod djelovanjem napona

Na slici 1.13 je prikaza propusno polariziran pn spoj gdje dolazi do smanjivanja potencijalne barijere u odnosu na ravnotežno stanje. Zbog toga se u slučaju kad je plus pol vanjskog napona priključen na P-tip difuzija većinskih nositelja olakšava, pa će doći do pojačane injekcije elektrona na P-stranu i šupljina na N-stranu. To će imati za posljedicu znatan porast difuzijskih struja I_{DN} i I_{DP} , koje se međusobno potpomažu. Većinski nositelji koji mogu difundirati preko barijere označeni su šrafiranim površinama. Za struje manjinskih nositelja I_{SN} i I_{SP} se nije ništa promijenilo u odnosu na ravnotežno stanje, jer za njih barijera ne postoji. Struje I_{DN} i I_{DP} će prevladati struje I_{SN} i I_{SP} i struja kroz P-N spoj će teći. Lako je zaključiti da će struja biti to veća što je potencijalna barijera manja. Ukupni napon na P-N barijeri je U_{TOT} i on je jednak sumi kontaktnog potencijala i vanjskog napona:

$$U_{TOT} = U_K + U. \quad (1.6)$$

N-strana je uzeta za referentnu, pa U_{TOT} znači ukupni napon P-strane prema N-strani. Kontaktne potencijale je negativan, pa napon U_{TOT} postaje iznosom manji ukoliko je vanjski napon U pozitivan, tj. ako je plus pol napona U priključen na P-stranu. Budući da je uz takvu polarizaciju barijera smanjena, naziva se ta polarizacija *propusna polarizacija P-N spoja*. Općenito se za struju propusne polarizacije može pisati:

$$I = I_{DN} + I_{DP} - I_{SN} - I_{SP} = I_D - I_S. \quad (1.7)$$

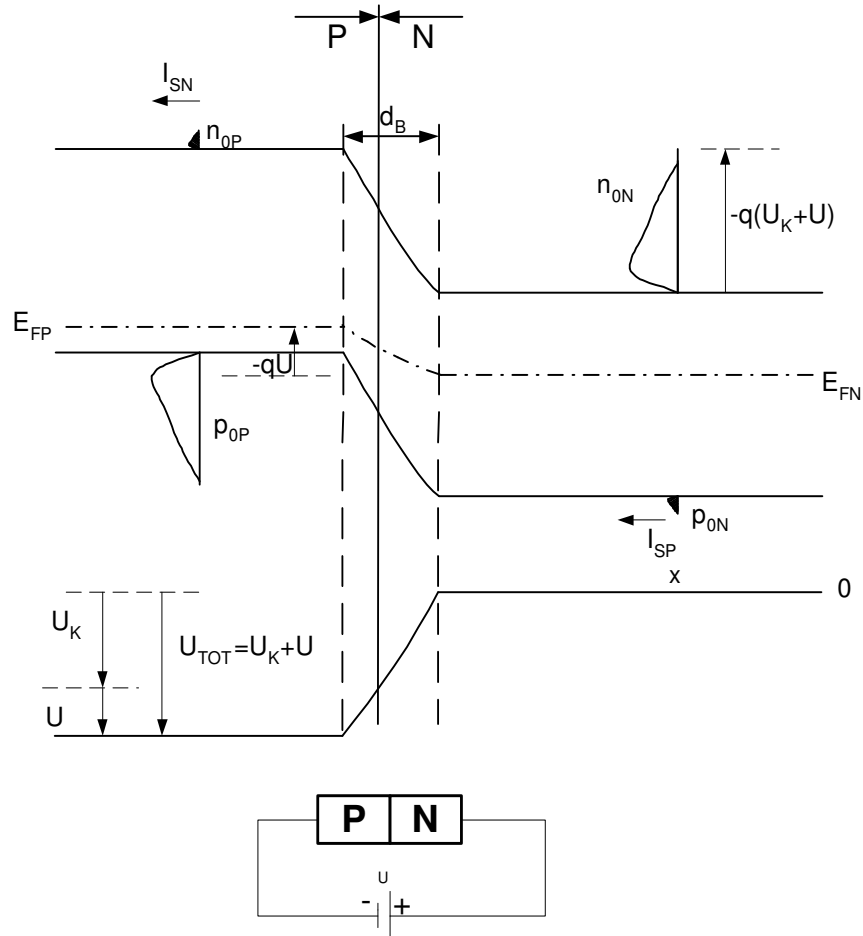


Slika 1.13 Propusna polarizacija pn spoja

Za sada se još ne može reći kakva će biti ovisnost struje o priključenom naponu, ali je očito da će ona biti to veća što je napon propusne polarizacije viši. U dijagramu energetske pojase se priključak vanjskog napona U manifestira kao dislokacija energetske nivoa P-strane za iznos koji je jednak $-qU$. Prema tome, Fermijevi nivoi P i N-strane nisu više isti, nego međusobno pomaknuti za spomenuti iznos. U slučaju da je minus pol vanjskog napona priključen na P-stranu, potencijalna barijera bit će veća, tj. napon U_{TOT} postaje iznosom viši, slika 1.14. Za U_{TOT} , naravno, opet vrijedi relacija (1.6). Iz dijagrama energetske pojase je očito da će zbog visine potencijalne barijere difuzija većinskih nositelja preko barijere biti praktički onemogućena. Postojat će samo struja manjinskih nositelja, koja je vrlo mala i koja ne ovisi o naponu. Budući da uz takvu polarizaciju postoji samo mala struja manjinskih nositelja, naziva se ta polarizacija *reverzna* ili *nepropusna polarizacija P-N spoja*. Za struju P-N spoja vrijedi sada relacija:

$$I = -I_{SN} - I_{SP} = -I_S. \quad (1.8)$$

Budući da struja reverzne polarizacije ne ovisi o naponu, naziva se *reverzna struja zasićenja*.



Slika 1.14 Nepropusno polarizirani pn spoj

U danom prikazu pretpostavljeno je da se sav pad napona odigrava na P-N barijeri, tj. da nema pada napona duž električki neutralnih dijelova poluvodiča P- i N-tipa koji se nadovezuju na barijeru. U prikazu energetskih pojasa to se očituje na taj način da su pojasi P- i N-područja van barijere horizontalni. U slučaju nepropusne polarizacije zbog vrlo male struje ta je tvrdnja praktički sasvim točna.

Za pronalaženje strujno-naponske ovisnosti P-N spoja treba riješiti **jednadžbu kontinuiteta** (za manjinske šupljine na N strani):

$$\frac{d^2 p_N}{dx^2} + \frac{p_{0N} - p_N}{\tau_p * D_p} = 0. \quad (1.9)$$

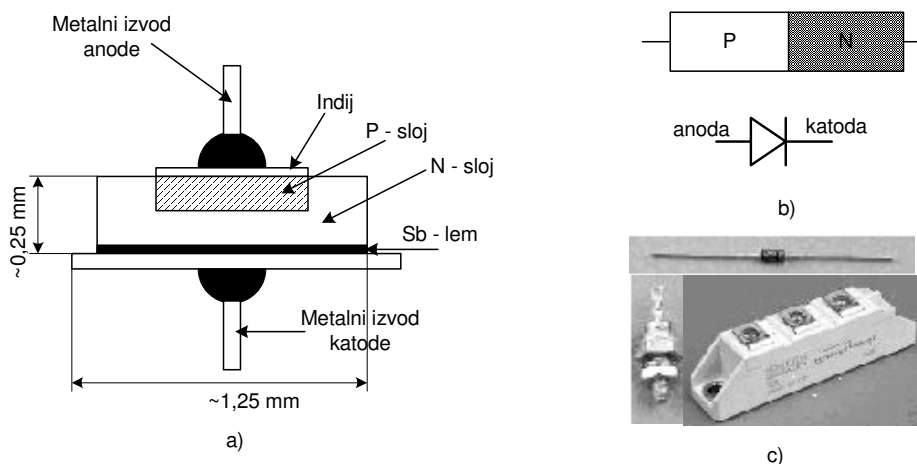
Jednadžba kontinuiteta za manjinske elektrone na P-strani je analogna pa se izostavlja. Ovdje se neće rješavati ova diferencijalna jednadžba nego će strujno-naponska karakteristika biti prikazana slijedećom jednadžbom (Shockley):

$$I = I_S (e^{\frac{qU}{kT}} - 1) = I_S (e^{\frac{U}{U_T}} - 1). \quad (1.10)$$

2 ELEKTRONIČKI ELEMENTI

2.1 POLUVODIČKA DIODA

Poluvodičke diode su elektronički elementi s dvije elektrode, različitih izvedbi, svojstava i namjene. Dioda predstavlja kombinaciju n i p tipa poluvodiča. Kada se ova dva tipa poluvodiča spoje zbog toplinske energije dolazi do difuzije, zbog čega se slobodni nositelji naboja nastoje proširiti preko cijelog kristala. Elektroni prelaze s n strane (gdje su većinski nositelji naboja) na p stranu poluvodiča (gdje su manjinski nositelji naboja), i obratno, šupljine s p strane prelaze na n stranu. Ovaj proces se naziva injekcija (ubacivanje) manjinskih nositelja, zbog toga što većinski nositelji dolaze na onu stranu pn spoja gdje predstavljaju manjinske nositelje. Na slici 2.1 prikazan je tehnološki postupak izrade pn diode (difuzijski postupak) kao i simbol diode te primjeri izvedbe. Prvo se na metalnu podlogu nanosi n sloj poluvodiča, te se elektrolitički ili premazom nanose primjese indija ili drugog trovalentnog elementa (bor, galij i sl.) Nakon toga se kontrolirano ugrijava taj premaz, pri čemu se vrši proces difuzije indija u n sloj. Na tako formiran p sloj s graničnim prelazom pričvršćuju se još metalni izvodi, te se cijeli element hermetički inkapsulira u inertoj atmosferi.



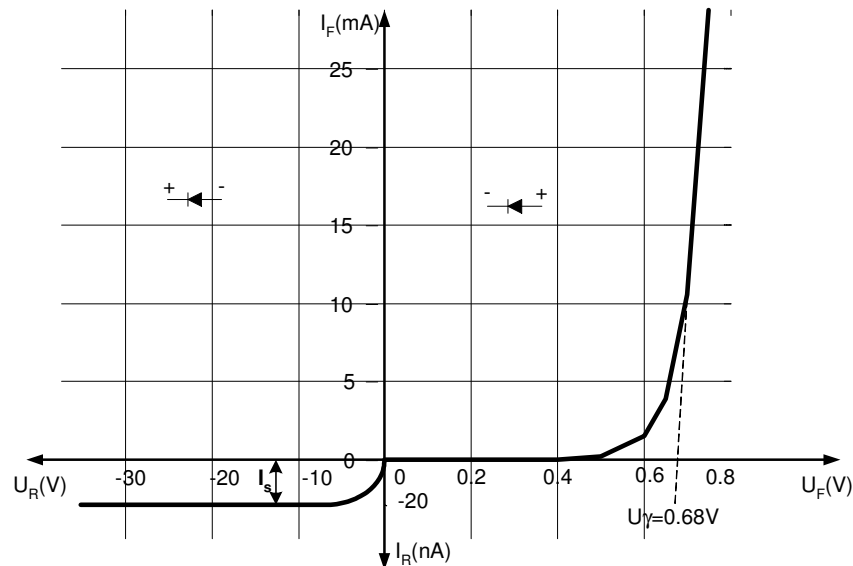
Slika 2.1 a) Izvedba pn diode difuzijskim postupkom b) simbol c) primjeri izvedbe

Shockley-eva jednadžba predstavlja strujno-naponsku karakteristiku poluvodičke diode. Najvažnije karakteristike pn diode su:

- Dopuštena vrijednost napona zaporne polarizacije U_R koja se smije priključiti na diodu a da ne dođe do njezina izgaranja. Ovaj napon se za silicijske diode kreće od nekoliko desetaka pa do tisuću volta.
- Probojni napon U_{BR} (breakdown reverse voltage).
- Dopuštena jakost struje I_F (forward current) koja smije teći kroz diodu pri propusnoj polarizaciji a da ne dođe do njenog oštećenja. Vrijednosti ove struje se kreću u granicama od nekoliko miliampera do nekoliko kiloampera.
- Dopušteni utrošak snage P_{tot} .
- Temperaturno područje rada. U podacima proizvođača karakteristične veličine dioda se uvijek daju za određeno područje temperatura.
- Izvedba kućišta.

Na slici 2.2 prikazana je strujno-naponska karakteristika pn diode. U području propusne polarizacije struja u početku polagano raste do tzv. napona koljena U_γ (threshold voltage), a zatim naglo raste

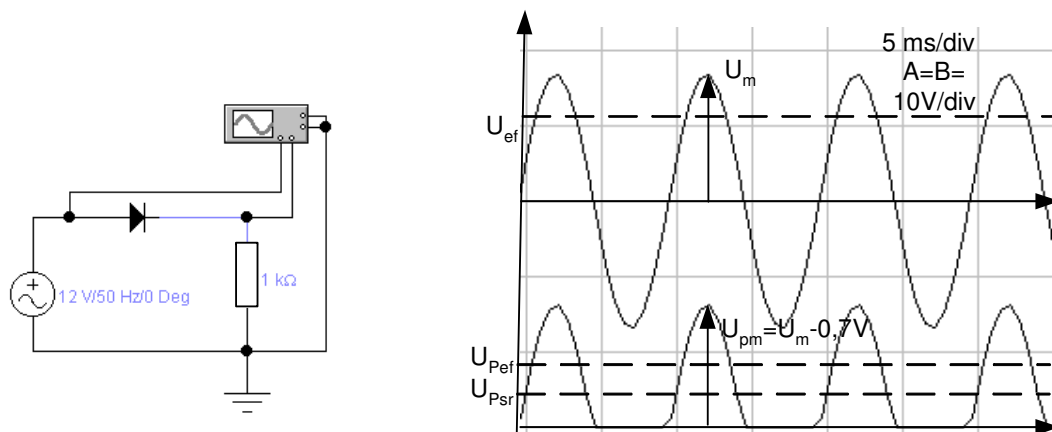
poprimajući sve veće vrijednosti. U području nepropusne polarizacije kroz diodu teče vrlo mala struja (reda nA).



Slika 2.2 Strujno-naponska karakteristika poluvodičke diode

2.1.1 Poluvalni ispravljač

Osnovna karakteristika pn spoja je njegovo ispravljačko djelovanje. Bit ispravljačkog djelovanja pn spoja sastoji se u tome što je struja kroz diodu kod promjene polariteta različita. Kada je dioda uključena u strujni krug koji je napajan izmjeničnim naponom, struja će teći samo za trajanja poluperiode koja diodu polarizira propusno. Za vrijeme trajanja druge poluperiode struja kroz diodu neće teći jer je dioda polarizirana nepropusno. Ovakav strujni krug u koji je uključena dioda struja praktički teče samo u jednom smjeru i dioda u tom slučaju služi kao poluvalni ispravljač napona (halfwave rectifier).



Slika 2.3 Poluvalni ispravljač

Zbog lakšeg proračuna pretpostavit će se da je dioda idealna (nema pada napona na diodi), što znači da je $U_m = U_{pm}$. Kod praktičnih realizacija ovaj pad napona na diodi je oko 0.7 V (vidi sliku

2.3). Također dopuštena vrijednost napona zaporne polarizacije diode mora biti veća od U_m . Napon na potrošaču je:

$$u_p(t) = \begin{cases} U_m \cdot \sin(\omega \cdot t), & 0 \leq \omega \cdot t \leq \pi \\ 0, & \pi < \omega \cdot t \leq 2\pi \end{cases} \quad \text{gdje je } \omega = \frac{2 \cdot \pi}{T}. \quad (2.1)$$

Srednja vrijednost ispravljenog napona (istosmjerna komponenta) dana je izrazom:

$$U_{Psr} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^{\frac{T}{2}} U_m \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot dt = \frac{U_m}{\pi} = 0,45 \cdot U_{ef} = U_{DC}. \quad (2.2)$$

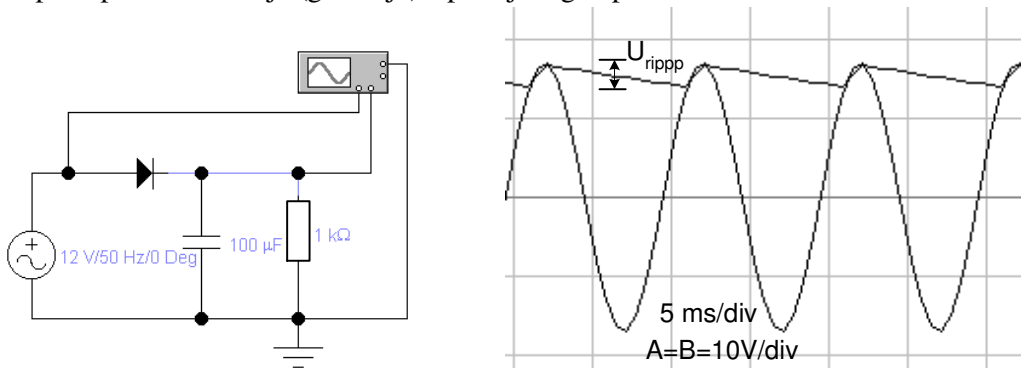
Efektivna vrijednost napona na potrošaču je dana izrazom:

$$U_{Pef} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^{\frac{T}{2}} [U_m \cdot \sin(\omega \cdot t)]^2 \cdot dt} = \frac{U_m}{2}. \quad (2.3)$$

Kod ispravljača napona kvaliteta istosmjernog napona se mjeri faktorom valovanja ili brujanja (ripple factor) koji je dan izrazom:

$$r = \frac{(u_p - U_{Psr})_{ef}}{U_{Psr}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^{\frac{T}{2}} (u_p - U_{Psr})^2 \cdot dt}}{U_{Psr}} = 1,211. \quad (2.4)$$

Poboljšanje oblika izlaznog napona, povećanje istosmjerne komponente uz smanjenje valovitosti, postiže se postupkom filtriranja (glađenja) ispravljenog napona.



Slika 2.4 Poluvalni ispravljač s niskopropusnim filterom

Iznos napona brujanja U_{rippp} možemo očitati na osciloskopu (mjereno od vrha do vrha) ili izračunati prema izrazu:

$$U_{rippp} = \frac{U_m}{f_{rip} \cdot R \cdot C} = 3,38 \text{ V}, \quad (2.5)$$

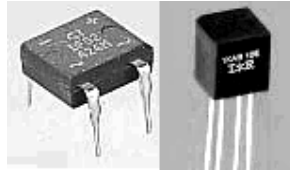
gdje je f_{rip} frekvencija napona brujanja koja za poluvalni ispravljač iznosi 50 Hz. U tablici 2.1 prikazane su karakteristične veličine za poluvalne ispravljače prikazane na slikama 2.3 i 2.4.

C(µF)	bez	100
U_{ef} (V)	12	
U_{DC} (V)	5,4	14,5
U_{DC}/U_{ef}	0,45	1,21
U_{rippp} (V)	16,22	3,38
f_{rip} (Hz)	50	

Tablica 2.1 Karakteristične veličine poluvalnog ispravljača

2.1.2 Punovalni ispravljač

Punovalni ispravljač (fullwave rectifier) pokazuje znatno bolja svojstva od poluvalnog ispravljača. To su spojevi s dvije diode i mosni ili Graetzov spoj.



Slika 2.5 Izvedbe mosnih ispravljača

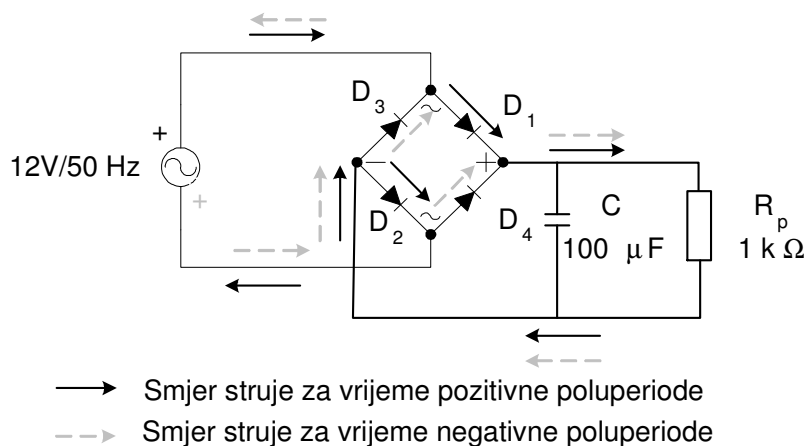
Srednja komponenta ispravljenog napona (istosmjerna komponenta), uz zanemariv pad napona na diodama iznosi:

$$U_{Psr} = 2U_m / \pi = 0,9U_{ef} \quad \text{gdje je } U_m = \sqrt{2}U_{ef}. \quad (2.6)$$

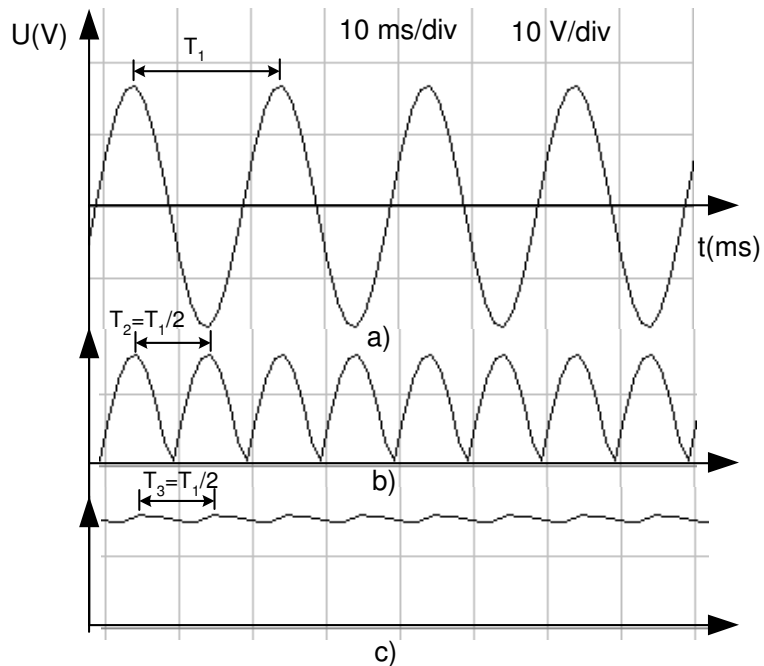
Faktor valovanja za punovalni ispravljač iznosi 0.483 (relacija (2.4)) i vidimo da je skoro tri puta poboljšan u odnosu na poluvalni ispravljač. Na slici 2.6 prikazan je ispravljač s diodnim mostom. Kada je na ulazu pozitivna poluperioda napona vode diode D_1 i D_2 , dok za negativnu poluperiodu vode diode D_3 i D_4 , tako da u obje poluperiode kroz potrošač teče struja u istom smjeru. Sreću potrošaču daje nabijeni kondenzator pa se na njemu smanjuje napon. Što je potrošač veći bit će znatnije smanjenje izlaznog napona i da bi to spriječili potrebno je primjeniti kondenzatore velikog kapaciteta. Iznos napona valovanja može se izračunati pomoću relacije (2.5) ali mora se voditi računa da je sada frekvencija f_{rip} jednaka 100 Hz.

$C(\mu F)$	bez	100
$U_{ef}(V)$	12	
$U_{DC}(V)$	10,8	14,6
U_{DC}/U_{ef}	0,9	1,22
$U_{rippp}(V)$	15,52	1,552
$f_{rip}(Hz)$	100	

Tablica 2.2 Karakteristične veličine punovalnog ispravljača



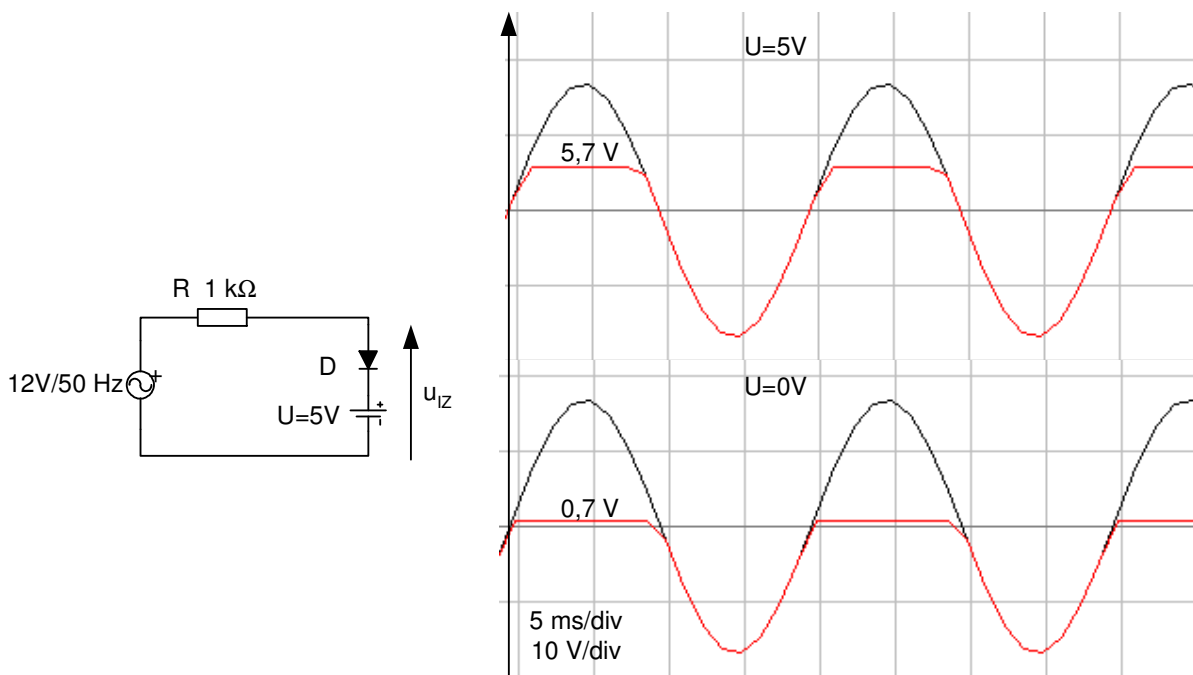
Slika 2.6 Punovalni ispravljač



Slika 2.7 Valni oblici: a) ulazni napon b) ispravljeni napon bez C
 c) ispravljeni napon s C

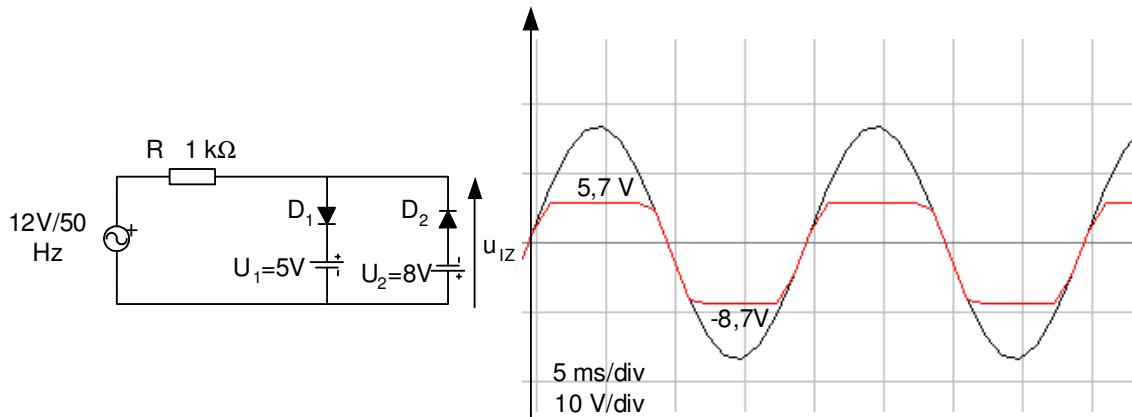
2.1.2 Diodni ograničavači

U mnogim primjenama često je potrebno ograničiti porast napona iznad određene vrijednosti. Za tu svrhu upotrebljavaju se ograničavači napona (clipping circuits, clippers, limiters).



Slika 2.8 Paralelni diodni ograničavač

Na slici 2.8 prikazan je spoj diode i otpornika koji ograničava porast izlaznog napona za vrijeme pozitivne poluperiode. Kako je dioda spojena paralelno izlazu, ovaj spoj se naziva paralelni ograničavač. Kod ovih ograničavača ulazni napon prenosi se na izlaz kada je dioda nepropusno polarizirana (nije vodljiva). Kada je dioda propusno polarizirana na izlazu je napon $U_{\gamma}=0,7\text{ V}$. Ako se želi porast izlaznog napona ograničiti na neku vrijednost veću od U_{γ} , tada se dodaje u seriju s diodom izvor napona U (u našem slučaju $U=5\text{ V}$).



Slika 2.9 Dvostrani paralelni diodni ograničavač

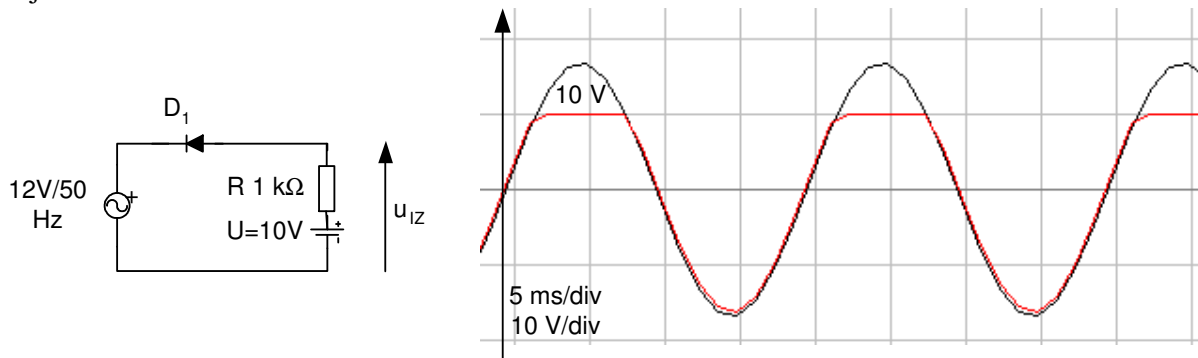
Kada je potrebno ograničiti izlazni napon na dvije razine upotrebljavaju se dvostrani paralelni ograničavači, kao što je prikazano na slici 2.9. Za vrijeme pozitivne poluperiode izlazni napon slijedi ulazni sve dok dioda D_1 ne provede. Kada D_1 provede tada na izlazu imamo:

$$U_{IZ} = U_{\gamma} + U_1 = 0,7\text{V} + 5\text{V} = 5,7\text{V}, \quad 2.7$$

i ova vrijednost je na izlazu sve dok ulazni napon ne padne ispod ove vrijednosti. Kada se ovo dogodi izlazni napon ponovno slijedi ulazni napon. Ovo se nastavlja i za vrijeme negativne poluperiode sve dok D_2 ne provede. Kada D_2 provede na izlazu imamo:

$$U_{IZ} = (-U_{\gamma}) + (-U_2) = -0,7\text{V} - 8\text{V} = -8,7\text{V}, \quad 2.8$$

i kada ulazni napon po svom apsolutnom iznosu padne ispod ove vrijednosti izlazni napon ponovo slijedi ulazni.



Slika 2.10 Serijski diodni ograničavač

Isti učinak se može postići i sa serijskim ograničavačem, kao što je prikazano na slici 2.10. Ulazni napon prenosi se na izlaz kada je dioda vodljiva. Kada dioda nije vodljiva na izlazu je napon U dodanog istosmjernog izvora (u našem slučaju $U=10\text{ V}$).

2.1.3 VJEŽBA 1. POLUVODIČKA DIODA

Pitanaja za provjeru:

- Koje je osnovno svojstvo pn spoja?
- Kako se zove i glasi jednačba koja matematički opisuje to svojstvo?
- O čemu ovisi kvaliteta ispravljača napona?

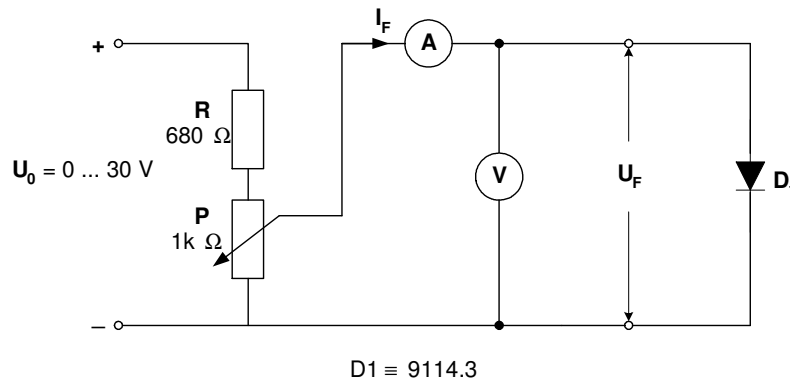
Zadatak 1.1.

Ispitati djelovanje pn spoja na struju koja teče kroz ispravljačku diodu u ovisnosti o iznosu i polarizaciji priključenog napona.

Mjerni postupak:

- ❖ Priključiti na diodu istosmjerni napon propusne polarizacije U_F prema slici V.1.1. Mjeriti struju kroz diodu za napone prema tablici V.1.1.

Napomena: Traženi napon U_F dobije se reguliranjem potencijometra P.

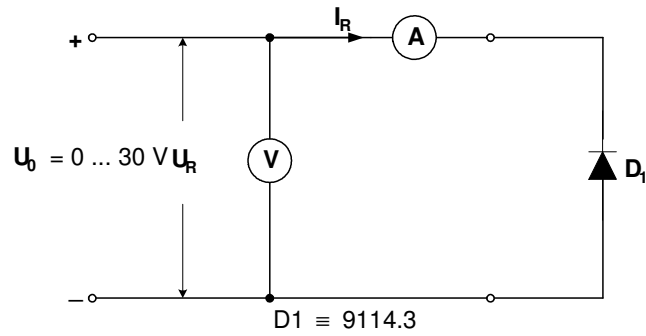


Slika V.1.1.

U_F (V)	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,65	0,7	0,74
I_F (mA)										

Tablica V.1.1.

- ❖ Promijeniti polaritet diode i ostvariti strujni krug prema slici V.1.2. Ponovno mjeriti struju kroz diodu za napone nepropusne polarizacije U_R prema tablici V.1.2. Za mjerenje struje nepropusne polarizacije I_R potreban je vrlo osjetljivi ampermetar.

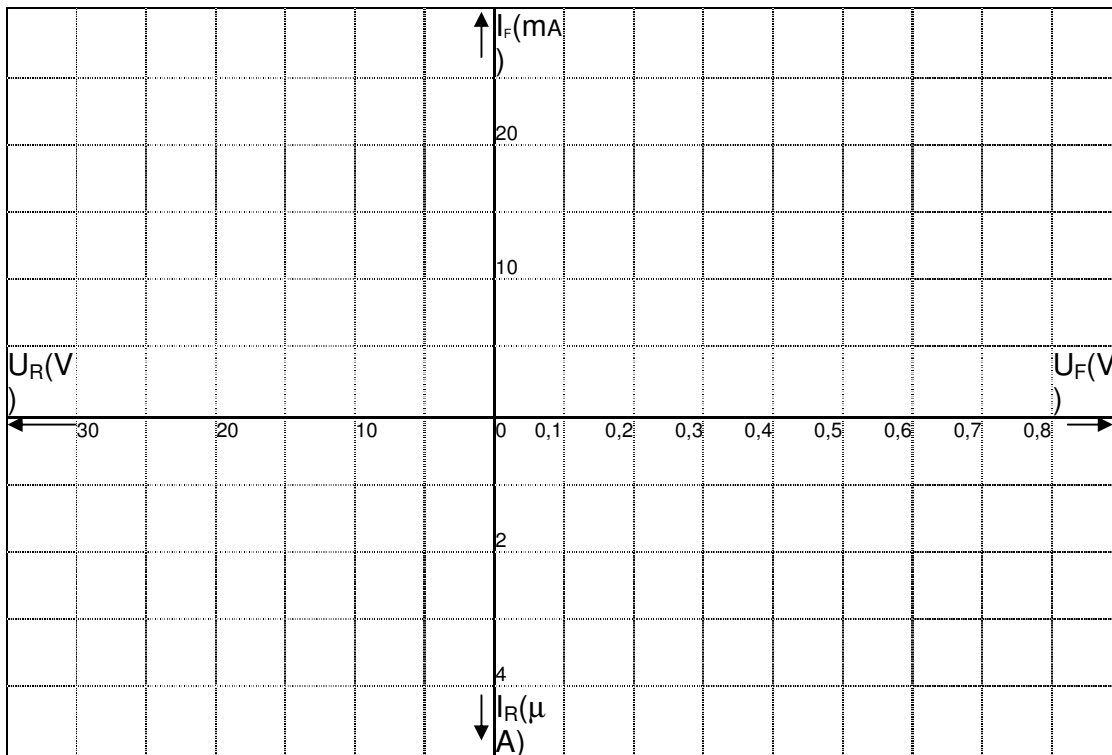


Slika V.1.2.

U_R (V)	0	2,5	5	10	15	20	25	30
I_R (μ A)								

Tablica V.1.2.

- ❖ Vrijednosti struje i napona iz tablica V.1.1. i V.1.2. prenijeti u dijagram na slici V.1.3. i nacrtati strujno-naponsku karakteristiku poluvodičke diode.



Slika V.1.3.

? Pitanje:

1. Kako se naziva napon pri kojem dioda provede i koliki je njegov iznos za upotrebenu Si diodu?

Odgovor:

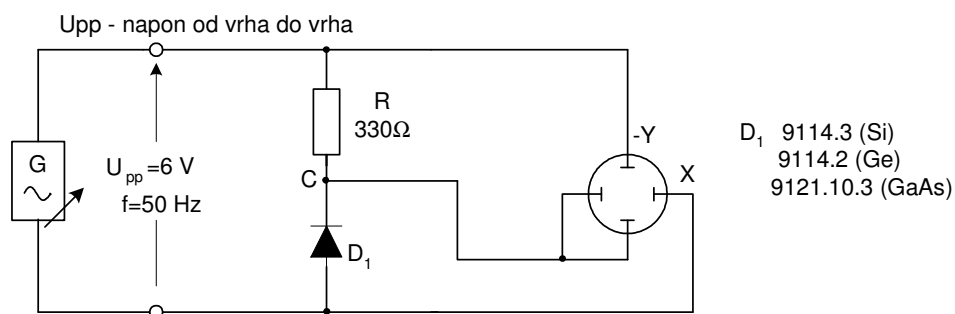
Zadatak 1.2.

Pomoću osciloskopa snimiti karakteristike silicijske, germanijske i GaAs diode.

Mjerni postupak:

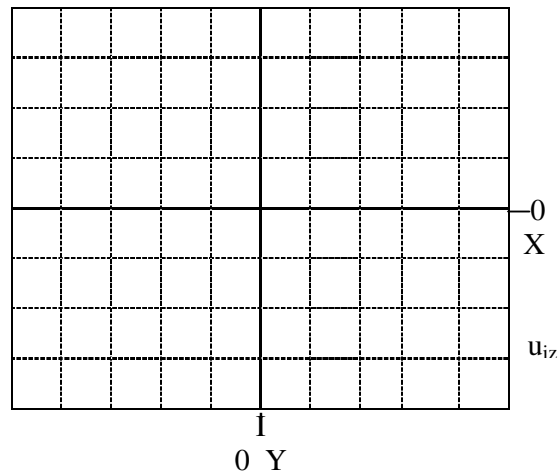
- ❖ Spojiti strujni krug prema slici V.1.4. i snimiti valni oblik napona na Si, Ge i GaAs diodi pomoću osciloskopa u X/Y prikazu (isključiti vremensku bazu).

Napomena: Budući da su naponi koji se dovode na X i Y ulaz osciloskopa u protufazi u odnosu na referentnu točku C, jedan od ulaza osciloskopa, npr. Y ulaz, mora biti invertiran. Ako se koriste osciloskopi koji nemaju mogućnost invertiranja ulaznog signala, slika dobivena na zaslonu bit će zrcalna. Za razliku od zadatka 1.1., gdje je snimljena statička karakteristika diode (samo istosmjerni signal se dovodio na ulaz sklopa) u ovom zadatku će se snimiti dinamička karakteristika diode (dovodi se izmjenični napon). Prednost ove metode je ta što se strujno-naponska karakteristika diode može snimiti s pomoću osciloskopa. Ovo proizlazi iz toga što smo na X ulaz doveli napon na diodi a na invertirani Y ulaz napon na otporniku R. Ovaj napon na otporniku R je direktno proporcionalan struji koja teče kroz diodu.



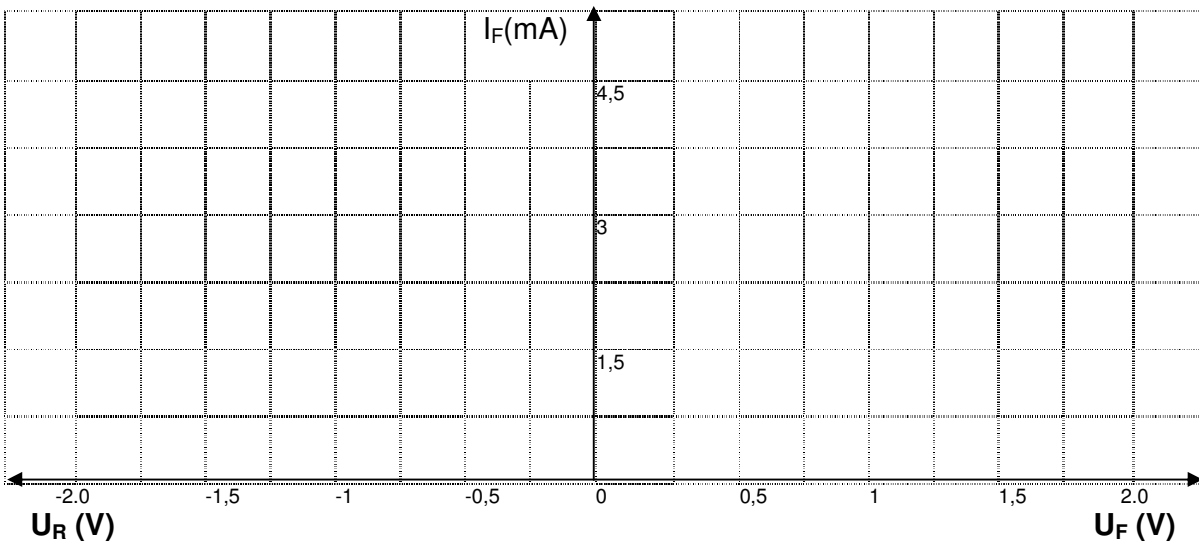
Slika V.1.4.

- ❖ Ucrtati krivulje dobivene na zaslonu osciloskopa u dijagram na slici V.1.5.
- ❖ Na osciloskopu namjestiti vrijednosti:
 - Kanal X 0,5 V/podjeli
 - Kanal Y 2 V/podjeli



Slika V.1.5.

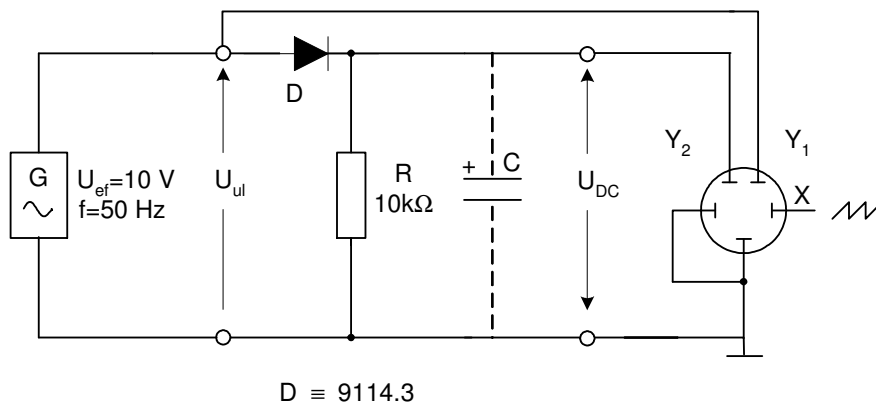
- ❖ Pomoću slike napona na otporniku R dobivene na zaslonu osciloskopa proračunati vrijednost struje koja teče kroz taj otpor i dobivenu strujno-naponsku karakteristiku poluvodičke diode ucrtati u dijagram na slici V.1.6.



Slika V.1.6.

? Pitanja:

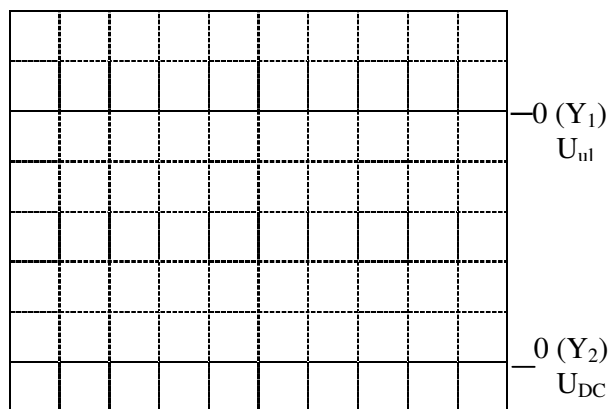
2. Koja je bitna razlika između karakteristika dioda?
3. Koji su naponi koljena za pojedine diode (Si, Ge i GaAs)?
4. Grafičkim postupkom odrediti približan iznos dinamičkog otpora korištenih dioda ako se struja promijeni za 3 mA u intervalu od 1,5 - 4,5 mA?
5. Koja je prednost snimanja karakteristika dinamičkom metodom u odnosu na statičku metodu?



Slika V.1.7.

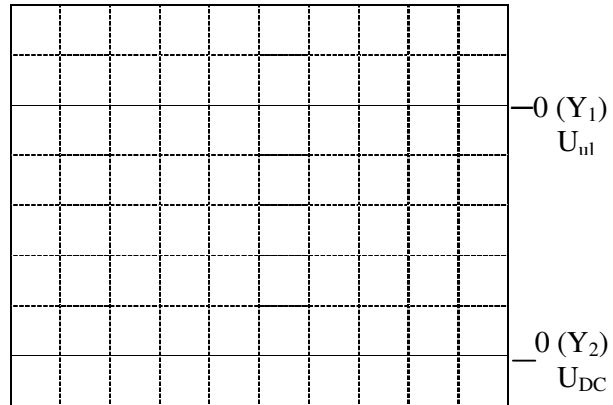
Napomena: Uključiti vremensku bazu na X osi (oznaka \sim na slici V.1.7.).

- ❖ Valne oblike dobivene na zaslonu osciloskopa ucrtati u dijagram na slici V.1.8. Očitati maksimalnu vrijednost istosmjernog napona U_{rippp} i njegovu frekvenciju te unijeti vrijednosti u tablicu V.1.3.



Slika V.1.8.

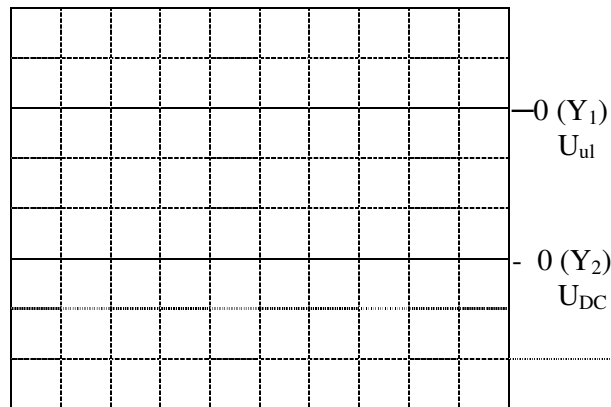
- ❖ Na osciloskopu namjestiti vrijednosti:
 - Vremeska baza X 5 ms/podjeli
 - Kanal Y₁ 5 V/podjeli
 - Kanal Y₂ 10 V/podjeli
- ❖ Ponoviti mjerenja mijenjajući kondenzator C prema vrijednostima iz tablice V.1.3. na slici V.1.7. Rezultate mjerenja unijeti u tablicu V.1.3. te valne oblike nacrtati u dijagram na slici V.1.9.



Slika V.1.9.

- ❖ Na osciloskopu namjestiti vrijednosti:
 - Vremenska baza X 5 ms/podjeli
 - Kanal Y₁ 5 V/podjeli
 - Kanal Y₂ 10 V/podjeli

- ❖ Promijeniti polaritet diode u strujnom krugu na slici V.1.7 (bez kondenzatora C). Snimiti valne oblike napona i struje U_{ul} i U_{DC} pomoću osciloskopa, a dobivene oscilogramе ucrtati u dijagram na slici V.1.10.



Slika V.1.10.

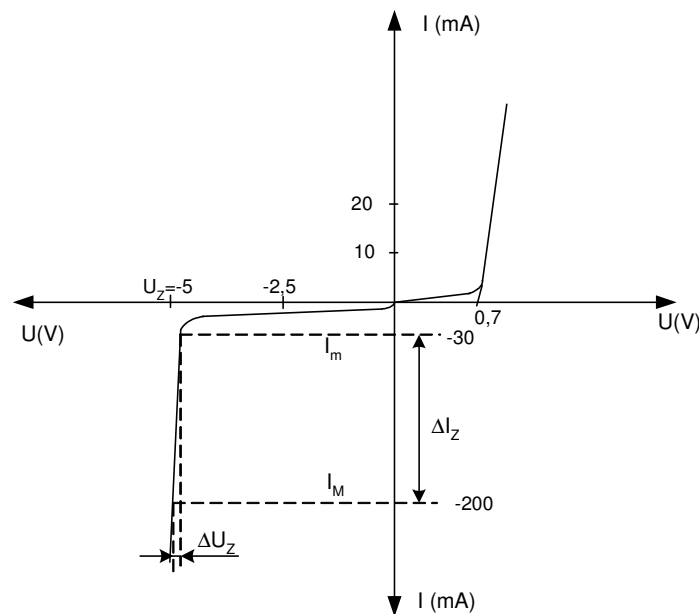
? Pitanje:

6. Kakav utjecaj ima kondenzator C na ispravljeni napon?

Odgovor:

2.2 ZENER DIODA

Kroz nepropusno polarizirani pn spoj teče mala reverzna struja zasićenja konstantnog iznosa I_s . Međutim, kod realnih dioda kad napon nepropusne polarizacije prekorači neku određenu vrijednost, dolazi do naglog skokovitog porasta struje, tako da struja na kraju raste praktički bez daljnjeg porasta napona. Vrijednost napona kod kojeg dolazi do naglog skokovitog porasta struje naziva se probojni ili Zenerov napon U_Z , slika 2.9. Fizikalno postoje *dva uzroka* koja dovode do proboja P-N barijere. Kod vrlo uskih barijera, koje se dobijaju vrlo velikim onečišćenjem poluvodiča p i n tipa, može doći do tuneliranja valentnih elektrona kroz barijeru. Ta pojava se objašnjava valnom prirodom elektrona. Proboj ovoga tipa zove se kod poluvodiča Zenerov proboj, prema istraživaču koji ga je prvi objasnio. Kod širih barijera manjinski nositelji koji slobodno prolaze preko barijere mogu kod većih jakosti polja zadobiti dovoljne brzine da razbijaju valentne veze unutar barijere. Na ovaj način se stvaraju dodatni parovi elektron-šupljina, koji doprinose porastu struje.



Slika 2.9 Strujno-naponska karakteristika Zenerove diode

Strujno-naponska karakteristika Zener diode za područje propusne polarizacije ne razlikuje se od karakteristike obične ispravljačke poluvodičke diode. U području nepropusne polarizacije probojni naponi Zener dioda obično imaju manje vrijednosti u odnosu na probojne napone običnih poluvodičkih dioda i one rade isključivo u području nepropusne polarizacije. Kad jednom dođe do proboja pn spoja struja se može ograničiti na određenu dozvoljenu vrijednost samo pomoću vanjskog otpora, u protivnom dolazi do uništenja diode. Vrijednosti probojnog napona Zenerovih dioda može se kontrolirati u tijeku procesa proizvodnje. To omogućuje da se proizvode diode s probojnim naponom od nekoliko volta do nekoliko stotina volta. Dioda s probojnim naponom manjim od 5 V nemaju jasno izražen probojni napon i imaju negativan temperaturni koeficijent (s porastom temperature smanjuje se Zenerov napon). Dioda s $U_Z > 5$ V imaju pozitivan temperaturni koeficijent (s porastom temperature raste Zenerov napon). Temperaturni koeficijent je definiran s relacijom:

$$\alpha_z = \frac{\Delta U_Z}{U_Z} \cdot \frac{1}{\Delta T} .$$

Tipične vrijednosti za α_Z su reda veličine $10^{-4}/^{\circ}\text{C}$. Omjer između izmjeničnog napona i struje definira se kao dinamički otpor ili Zenerov otpor i dan je relacijom:

$$r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z} \quad 2.10$$

Zenerov otpor ima minimalnu vrijednost za diode s probojnim naponom od 5 do 6 V, a iznosi oko 10Ω . Kod dioda s višim probojnim naponom taj otpor naglo raste.

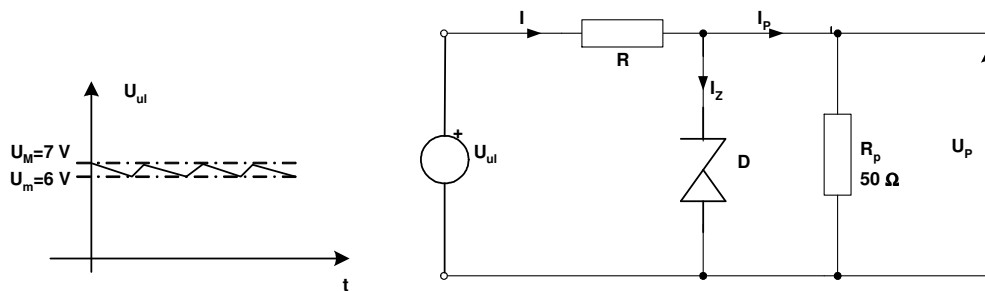


Slika 2.11 Simboli i primjeri izvedbe Zenerovih dioda

Zenerove diode upotrebljavaju se kao stabilizatori i ograničavači napona. Prilikom odabira Zenerove diode treba voditi računa o najvećoj dopuštenoj struji diode u Zenerovu području, I_M na slici 2.10, odnosno o dopuštenu utrošku snage (koji se kreće od nekoliko stotina mW do nekoliko desetaka W).

Zadatak 2.2.

Za stabilizator na slici 2.12 potrebno je dimenzionirati otpornik R. Karakteristika Zenerove diode prikazana je na slici 2.10 ($U_Z = -5 \text{ V}$) a maksimalna disipacija diode je 1W.



Slika 2.12

Rješenje:

- Pod pojmom disipacija podrazumijeva se radna snaga koju u obliku topline element preda okolini. Radna snaga je po definiciji jednaka umnošku efektivne vrijednosti struje i napona na elementu.
- Kako je $P_{\max} = U_Z \cdot I_M = 5 \text{ V} \cdot I_M = 1 \text{ W}$ slijedi da je maksimalno dozvoljena struja jednaka 200 mA, kao što se vidi i s karakteristike (slika 2.10).

$$U_P = \text{konst.} = 5 \text{ V} \Rightarrow I_P = \text{konst.} = \frac{U_P}{R_P} = 100 \text{ mA}$$

Struja kroz otpornik R je $i = \frac{U_{ul} - U_P}{R}$ a kroz Zenerovu diodu $i_Z = i - I_P$.

Kada je na ulazu sklopa $U_{ul} = U_m = 6V$ struja i poprima minimalan iznos kao i struja i_Z . S karakteristike (slika 2.10.) se može očitati minimalna struja kroz diodu da bi ona ispravno regulirala izlazni napon, iz čega slijedi:

$$i_Z = i - I_P = \frac{U_m - U_P}{R} - I_P > I_m \Rightarrow R < \frac{U_m - U_P}{I_m + I_P} = 7,7\Omega.$$

Kada je na ulazu $U_{ul} = U_M = 7V$ struja i poprima maksimalan iznos kao i struja i_Z . S karakteristike vidimo da maksimalna dozvoljena struja kroz diodu iznosi 200 mA, da ne bi došlo do izgaranja diode, iz čega slijedi:

$$i_Z = i - I_P = \frac{U_M - U_P}{R} - I_P < I_M \Rightarrow R > \frac{U_M - U_P}{I_M + I_P} = 6,6\Omega.$$

Iz ovoga slijedi da je $6,6 \Omega < R < 7,7 \Omega$, što znači da je za vrijednost otpornika potrebno izabrati jednu iz ovoga opsega. Također je bolje izabrati otpornik s većim otporom iz danog opsega jer u tom slučaju teče manja struja kroz diodu. Jedna od standardnih vrijednosti koja zadovoljava ovaj uvjet je $7,6 \Omega$. Disipacija na otporniku R za navedeni slučaj iznosi:

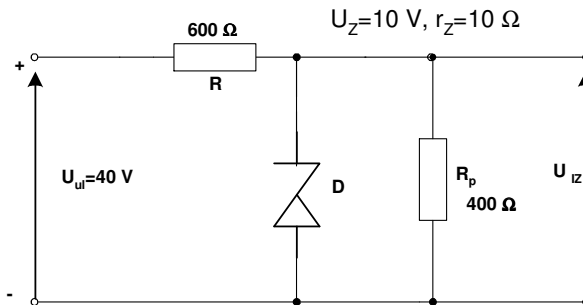
$$P_R = U_{R_{sred}} \cdot I_{R_{sred}} = \frac{U_{RM} + U_{Rm}}{2} \cdot \frac{I_{RM} + I_{Rm}}{2} = \left. \begin{array}{l} I_{RM} = \frac{U_M - U_P}{R} = 263mA \\ I_{Rm} = \frac{U_m - U_P}{R} = 132mA \\ U_{RM} = U_M - U_P = 2V \\ U_{Rm} = U_m - U_P = 1V \end{array} \right| = 296mW.$$

Iz ovoga slijedi da su vrijednosti otpornika R [$7,6 \Omega$, $0,5W$].

Zadatak 2.3.

Za stabilizator s Zenerovom diodom potrebno je odrediti:

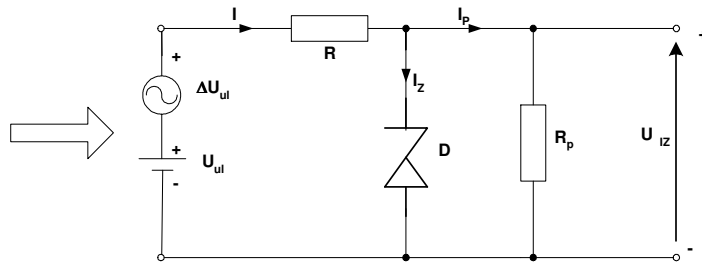
- a) struju diode i potrošača te napon na potrošaču,
- b) izlazni otpor stabilizatora,
- c) promjenu izlaznog napona pri promjeni ulaznog napona za $\pm 10\%$,
- d) faktor stabilnosti S.



Slika 2.13

Rješenje:

Ako promjenu ulaznog napona ΔU_{ul} nadomjestimo s izmjenicnim izvorom tada sklop možemo prikazati kao na slici.

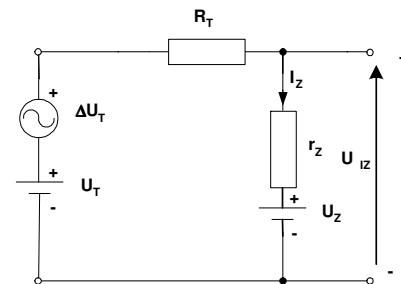


Ako sada ovaj sklop nadomjestimo s Theveninom:

$$R_T = R \parallel R_p = 0,24 \text{ k}\Omega$$

$$U_T = U_{ul} \cdot \frac{R_p}{R_p + R} = 16 \text{ V}$$

$$\Delta U_T = \pm 0,1 \cdot 16 = 1,6 \text{ V}$$


Slika 2.14

a) $\Delta U_{ul} = 0 \text{ V}$

$$I_z = \frac{U_T - U_z}{R_T + r_z} = 24 \text{ mA}$$

$$U_{IZ} = I_z \cdot r_z + U_z = 10,24 \text{ V}$$

$$I_p = \frac{U_{IZ}}{R_p} = 25,6 \text{ mA}$$

b) $R_{IZ} = r_z \parallel R \approx 10 \Omega$

c) $\Delta U_{ul} = \pm 0,1 \cdot 40 = \pm 4 \text{ V}$ $\Delta U_T = \pm 1,6 \text{ V}$

$$\Delta U_{IZ} = \Delta U_T \cdot \frac{r_z}{r_z + R_T} = \pm 0,064 \text{ V}$$

d) Faktor stabilnosti ili koeficijent prigušenja valovitosti, izravno govori o kvaliteti sklopa i dan je izrazom:

$$S = \frac{\Delta U_{IZ}}{\Delta U_{ul}} = 0,016$$

2.2.1 VJEŽBA 2. ZENER DIODA

Pitanaja za provjeru:

- U kojem području polarizacije radi Zener dioda?
- Koje su osnovne primjene Zener diode?
- Kako se ograničava struja kroz Zenerovu diodu?

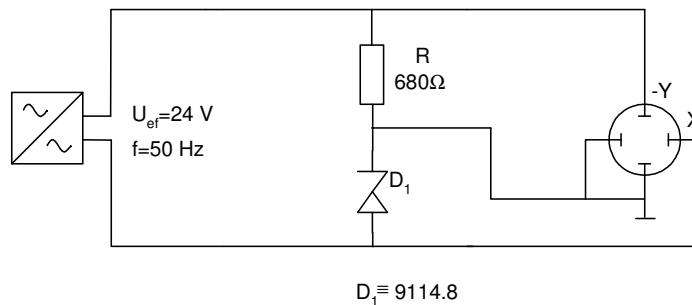
Zadatak 2.1.:

Snimiti karakteristiku Zener diode pomoću osciloskopa i odrediti vrijednost napona U_Z korištene Zener diode.

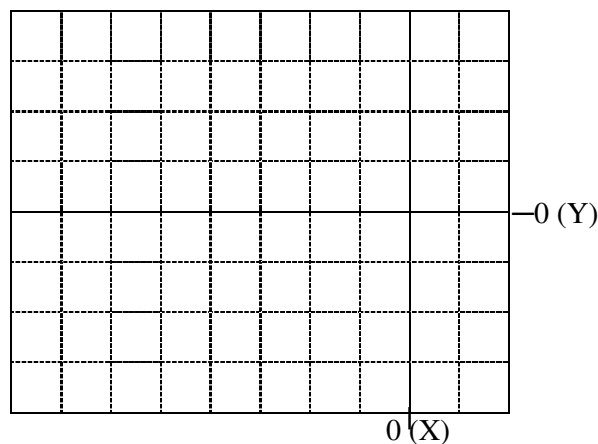
Mjerni postupak:

- ❖ Spojiti strujni krug prema slici V.2.1. i priključiti sinusni napon efektivne vrijednosti 24 V i frekvencije 50 Hz.
- ❖ Osciloskop prebaciti na X/Y prikaz (isključiti vremensku bazu).

Napomena: Budući da su naponi koji se dovode na X i Y ulaz osciloskopa u protufazi u odnosu na referentnu točku, jedan od ulaza osciloskopa mora biti invertiran. Kod osciloskopa koji nemaju mogućnost invertiranja ulaznog signala, dobivena slika je zrcalna.



Slika V.2.1.



Slika V.2.2.

- ❖ Ucertati sliku dobivenu na zaslonu osciloskopa u dijagram na slici V.2.2.

- ❖ Na osciloskopu namjestiti vrijednosti:
 - Kanal X 2 V/podjeli
 - Kanal Y 10 V/podjeli

? Pitanja:

1. Koliki je iznos Zenerovog napona U_Z ?
2. Koliki je iznos maksimalne struje kroz Zener diodu I_{Zmax} ?
3. Koliki je iznos napona koljena U_γ ?

Napomena: Budući da se na Y_2 ulaz osciloskopa dovodi napon sa otpornika R , a taj napon je proporcionalan struji koja teče kroz Zener diodu I_Z , struja I_{Zmax} može se odrediti tako da se sa ekrana osciloskopa očita vrijednost napona na $-Y$ osi (od 0 do maksimalne vrijednosti).

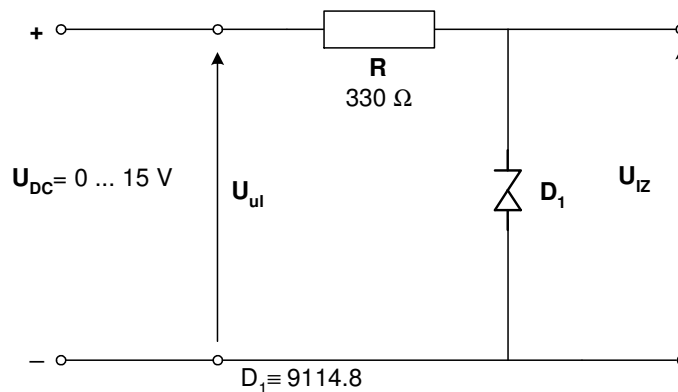
Odgovori i komentari:

■Zadatak 2.2.:

Ispitati ovisnost izlaznog o ulaznom naponu u strujnom krugu za ograničavanje napona realiziranom pomoću Zener diode.

##Mierni postupak:

- ❖ Spojiti strujni krug prema slici V.2.3.
- ❖ Mijenjati iznos ulaznog istosmjernog napona U_{ul} prema vrijednostima u tablici V.2.1. Mjeriti odgovarajuće vrijednosti izlaznog napona U_{iz} i unijeti ih u tablicu V.2.1.

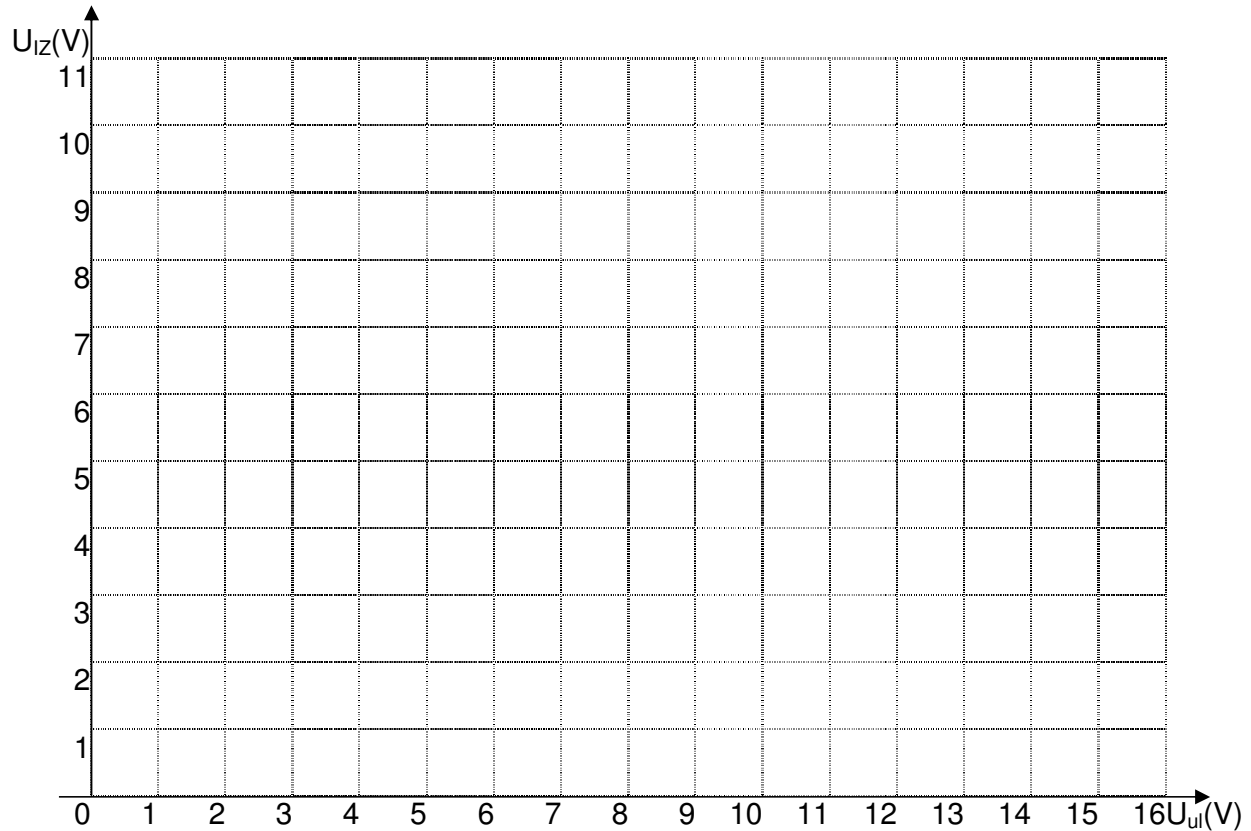


Slika V.2.3.

U_{ul} (V)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
U_{iz} (V)																

Tablica V.2.1.

❖ U dijagram na slici V.2.4. ucrtati ovisnost izlaznog o ulaznom naponu.



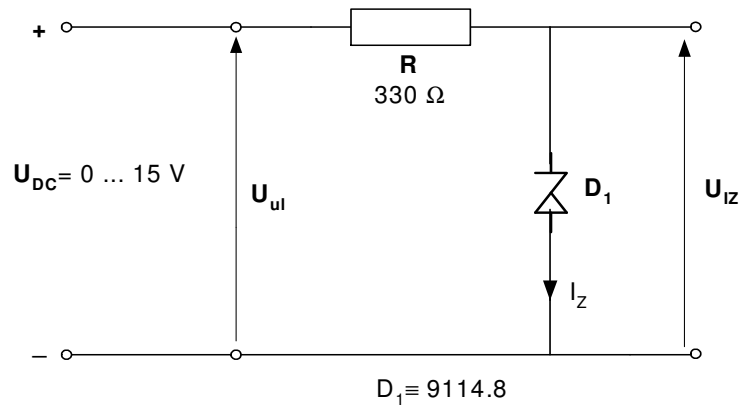
Slika V.2.4.

Zadatak 2.3.:

Ispitati ovisnost struje kroz Zener diodu I_Z o ulaznom naponu sklopa za ograničavanje napona realiziranog pomoću Zener diode.

Mjerni postupak:

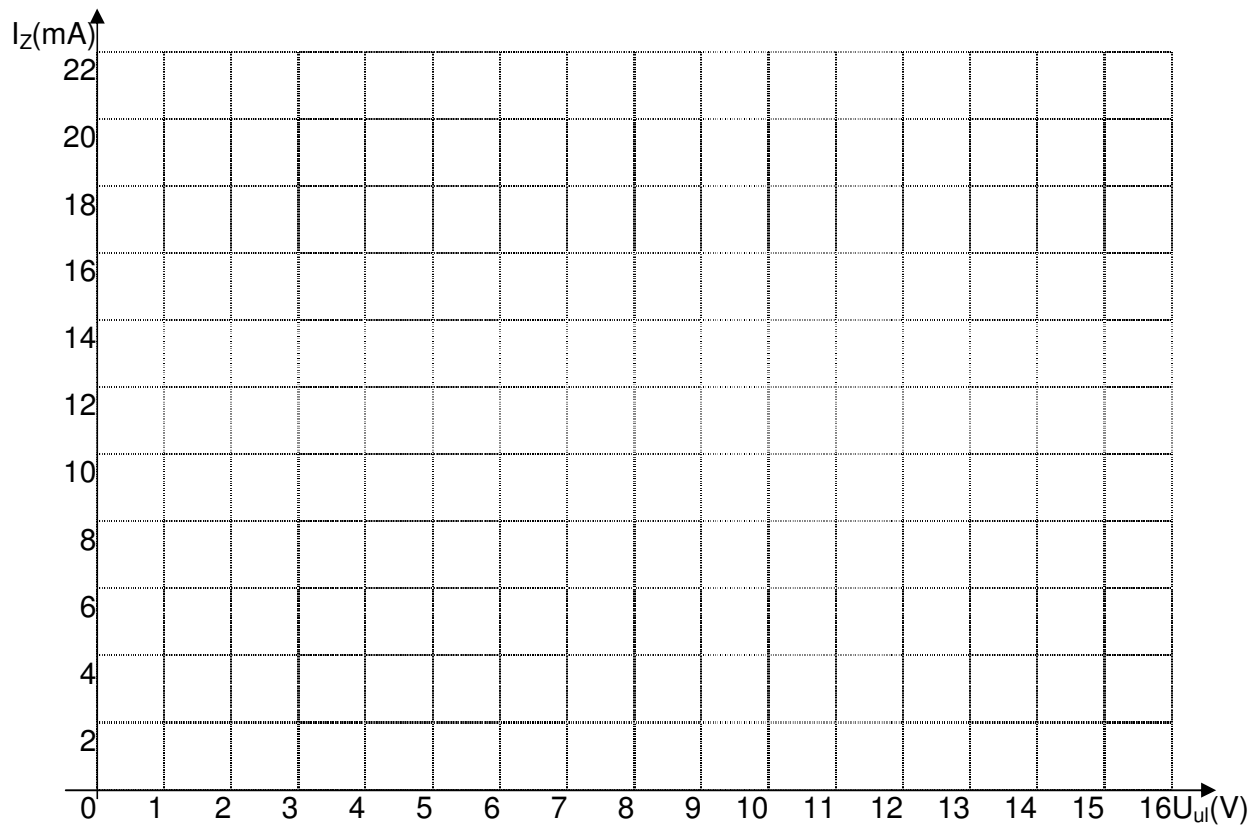
- ❖ Spojiti strujni krug prema slici V.2.5.
- ❖ Mijenjati iznos ulaznog napona U_{ul} prema vrijednostima u tablici V.2.2. Meriti odgovarajuće vrijednosti struje I_Z i unijeti ih u tablicu V.2.2.
- ❖ U dijagram na slici V.2.6. ucrtati graf ovisnosti struje kroz Zener diodu I_Z o ulaznom naponu U_{ul} .



Slika V.2.5.

U_{ul} (V)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
I_z (mA)																

Tablica V.2.2.



Slika V.2.6.

Zadatak 2.4.:

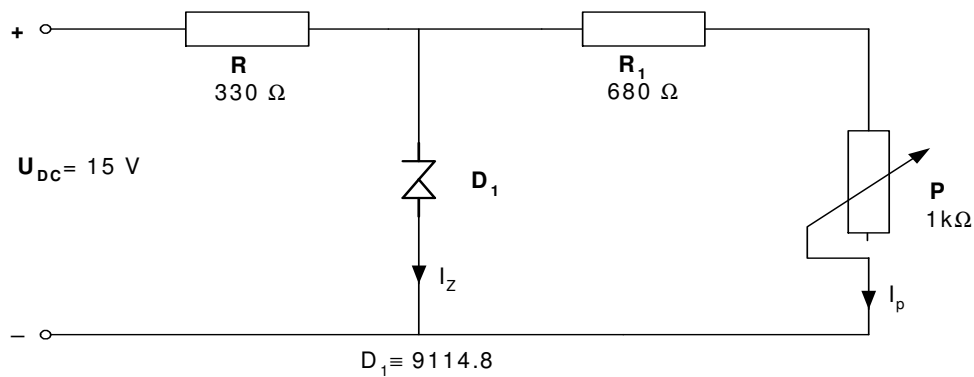
 Ispitati utjecaj promjene struje trošila I_p na promjenu struje kroz Zener diodu I_z .

Mjerni postupak:

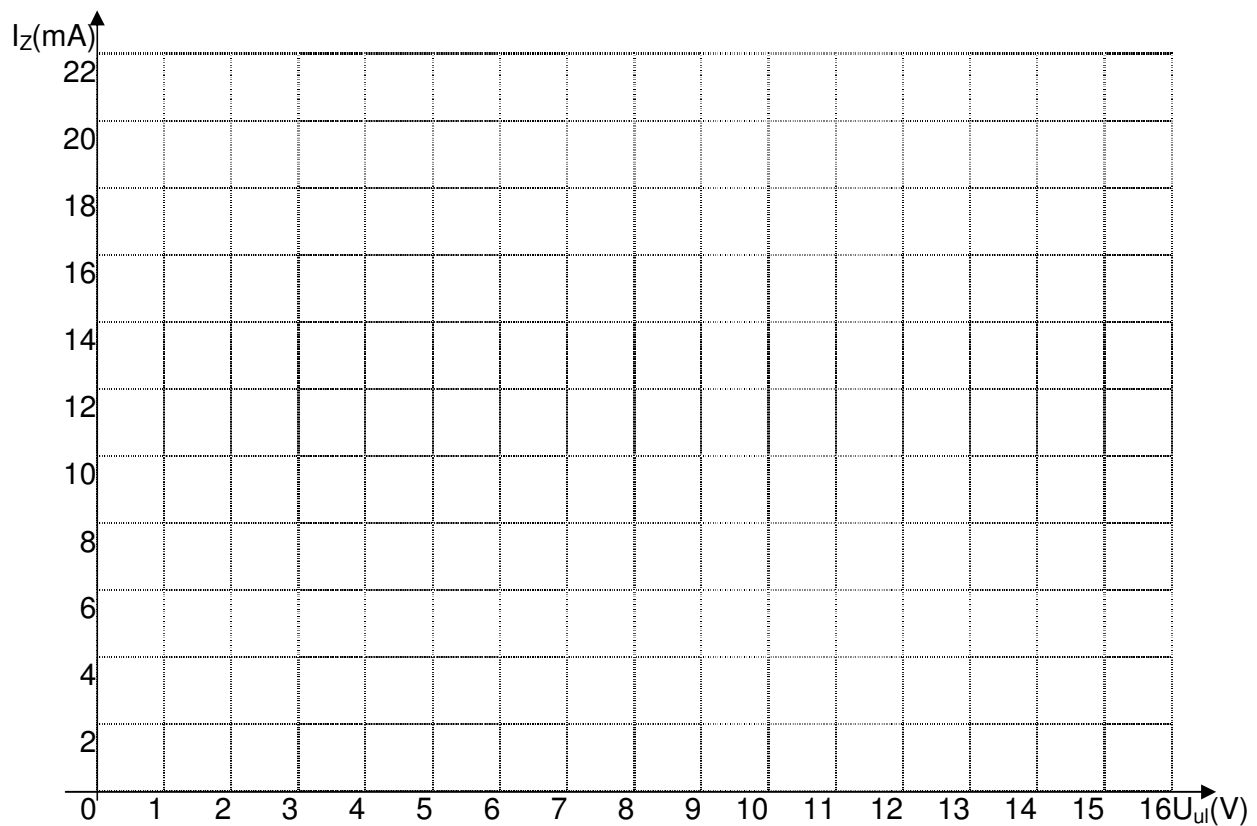
- ❖ Spojiti strujni krug prema slici V.2.7.
- ❖ Pomoću potencijometra P namještati vrijednosti struje I_p prema tablici V.2.3. Mjeriti odgovarajuće vrijednosti struje I_z i unijeti ih u tablicu V.2.3.

Napomena: Vrijednost otpornika R_1 treba povećavati ako se žele postići manji iznosi struje trošila i to na vrijednosti: $1\text{k}\Omega$, $2,2\text{k}\Omega$, $4,7\text{k}\Omega$ i $10\text{k}\Omega$.

- ❖ U dijagram na slici V.2.8. ucrtati graf ovisnosti struje I_z o struji trošila I_p .



Slika V.2.7.



Slika V.2.8.

I_p (mA)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
I_z (mA)																

Tablica V.2.3.

? Pitanja:

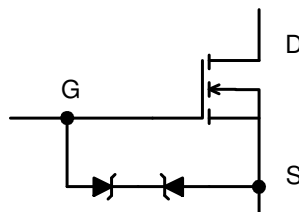
- Pod kojim je uvjetima izlazni napon sklopa za ograničavanje napona realiziranog pomoću Zener diode konstantan?
- Kada počinje teći struja kroz Zener diodu I_z ?
- Pod kojim je uvjetima efekt ograničavanja napona zadržan čak i pod opterećenjem sklopa trošilom R_p ?

✍ Odgovori i komentari:

■ Zadatak 2.5.:

Snimiti karakteristiku $U_{iz}=f(U_{ul})$ dviju nasuprot vezanih Zener dioda (u serijskom protuspoju).

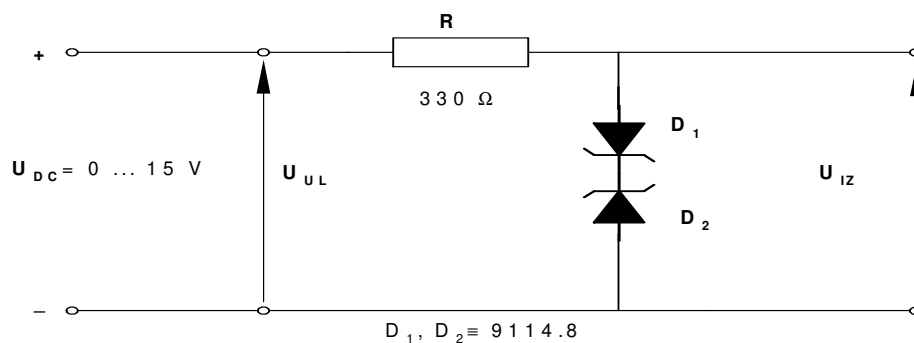
Napomena: Tako dugo dok je napon na Zener diodi manji od iznosa probojnog napona U_Z kroz Zener diodu praktički ne teče nikakva struja. To svojstvo omogućava korištenje Zener diode kao zaštite ostalih komponenti od visokih napona. Npr. MOSFET-i su vrlo osjetljivi na statički naboj, slika V.2.9. Da bi se izbjegao ispravljački efekt Zener diode uzrokovan malim iznosom napona koljena za slučaj propusne polarizacije, dvije Zener diode mogu se vezati serijski jedna nasuprot drugoj. Na taj način moguće je dobiti ograničavač napona neovisan o polaritetu napona na ulazu sklopa.



Slika V.2.9. Zaštita ulaza unipolarnih tranzistora

⚙ Mjerni postupak:

- ❖ Realizirati strujni krug prema slici V.2.10. i podešavati iznose ulaznog napona U_{ul} kako je zadano u tablici V.2.4. Mjeriti odgovarajuće iznose napona na izlazu U_{iz} i unijeti ih u tablicu.
- ❖ Promijeniti polaritet ulaznog napona i ponoviti gornje mjerenje. Vrijednosti izlaznog napona unositi u tablicu V.2.5.
- ❖ Graf ovisnosti izlaznog o ulaznom naponu ucrtati u dijagram na slici V.2.11.



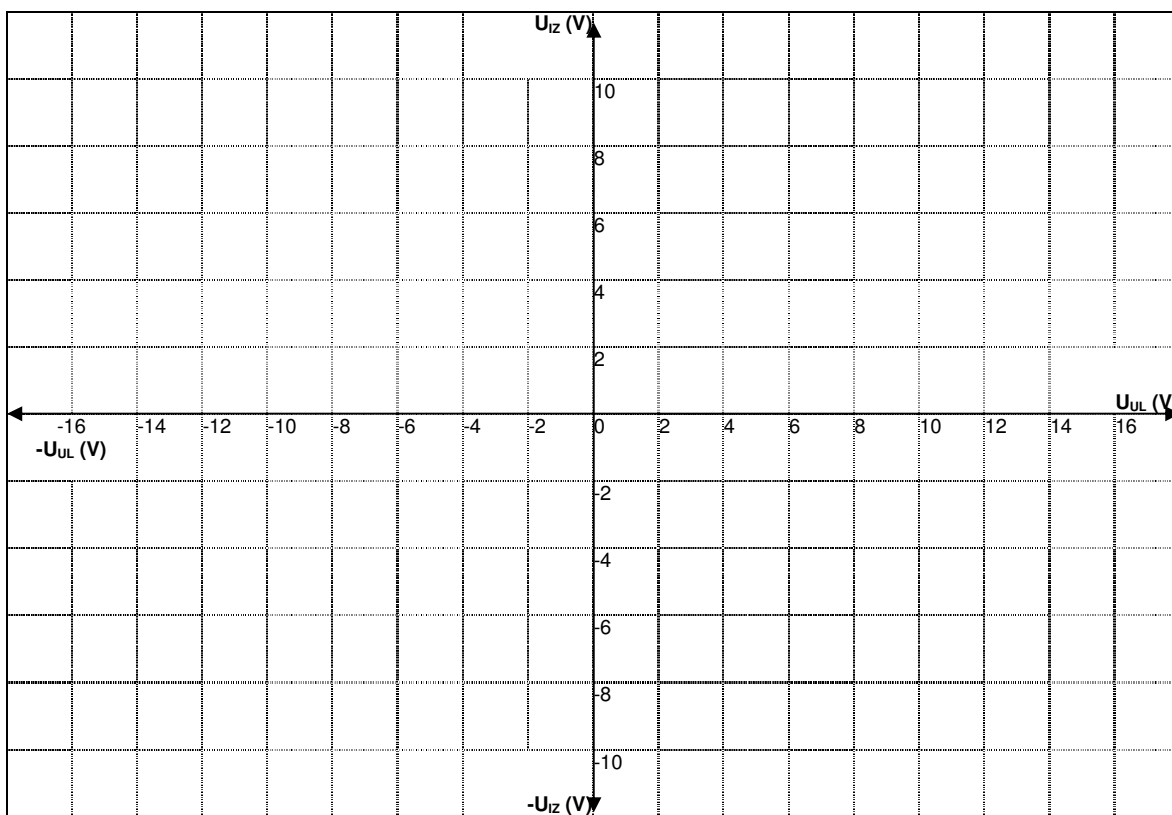
Slika V.2.10.

U_{UL} (V)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
U_{IZ} (V)																

Tablica V.2.4.

$-U_{UL}$ (V)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$-U_{IZ}$ (V)																

Tablica V.2.5.



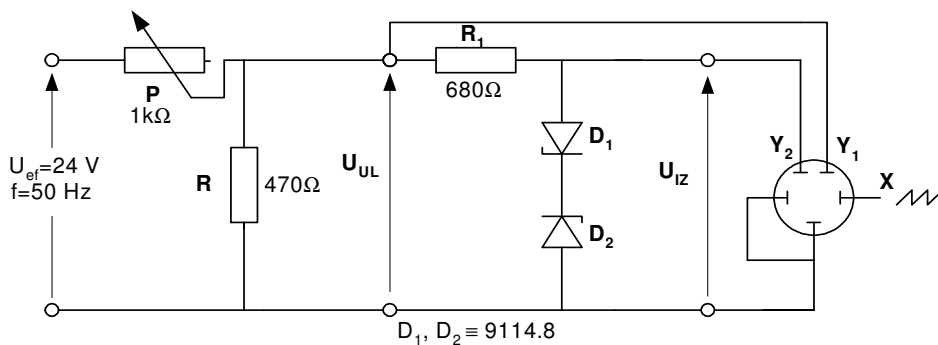
Slika V.2.11.

Zadatak 2.5.:

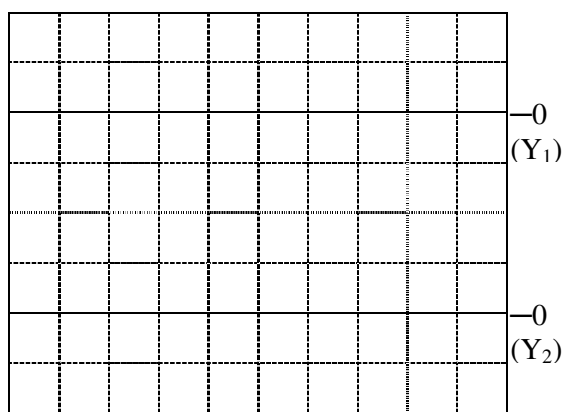
Pomoću osciloskopa ispitati efekt ograničavanja napona dviju Zener dioda u serijskom protuspoju.

Mjerni postupak:

- ❖ Ulaz strujnog kruga na slici V.2.12. priključiti na izmjenični izvor efektivne vrijednosti $U_{ef}=24\text{V}$, $f=50\text{ Hz}$ i podesiti ulazni napon na vrijednost $U_{ulef}=7,1\text{ V}$ pomoću potenciometra P.
- ❖ Valne oblike ulaznog i izlaznog napona snimiti pomoću osciloskopa i ucrtati ih u dijagram na slici V.2.13.

**Slika V.2.12.**

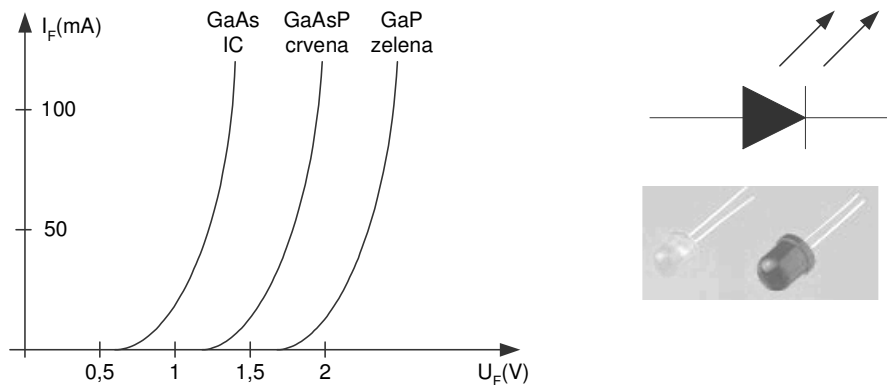
- ❖ Na osciloskopu namjestiti vrijednosti:
 - Vremenska baza X 5 ms/podjeli
 - Kanal Y₁ 10 V/podjeli
 - Kanal Y₂ 10 V/podjeli

**Slika V.2.13.**

- ❖ Povećati iznos ulaznog napona na $U_{ulef}=24\text{ V}$.
- ❖ Ponoviti gornji postupak, a valne oblike ucrtati u dijagram na slici V.2.14.
- ❖ Na osciloskopu namjestiti vrijednosti:
 - Vremenska baza X 5 ms/podjeli
 - Kanal Y₁ 10 V/podjeli
 - Kanal Y₂ 10 V/podjeli

2.3 LED dioda

Svjetleće diode, LED (*light emitting diode*) su poluvodički svjetlosni izvori. Naime, postoji određena vrsta poluvodičkih dioda načinjenih od materijala kao što su galij-arsenid (*GaAs*), galij-arsenid-fosfat (*GaAsP*) ili galij-fosfat (*GaP*) koji uz točno određene koncentracije primjesa i *propusnu polarizaciju* jedan dio električne energije dovedene na diodu ne pretvaraju samo u toplinu, kao ostale poluvodičke komponente, već se određeni dio te energije zrači u prostor u vidu elektromagnetskih valova. Na frekvenciju zračenih elektromagnetskih valova, odnosno na boju emitirane svjetlosti, može se utjecati odabirom odgovarajućeg poluvodičkog materijala, te odabirom i koncentracijom točno određenih primjesa. Osim infracrvenog zračenja u nevidljivom dijelu spektra, LED diode emitiraju svjetlost koja može biti crvene, žute, narančaste, zelene ili plave boje.



Slika 2.15 Strujno-naponske karakteristike, simbol te primjer izvedbi LED dioda

Osnovne karakteristike LED dioda su:

- dopušteni reverzni napon U_R (*reverse voltage*) koji iznosi nekoliko volti,
- dopuštena struja pri propusnoj polarizaciji I_F (*forward DC current*) koja se kreće do nekoliko stotina mA,
- dopušteni utrošak snage P_{tot} (*power disipation*) reda veličine nekoliko stotina mW,
- jakost svjetlosti I_O ili I_V (*axial luminous intensity*) izražena u kandelama (cd) uz određenu struju propusne polarizacije ili svjetlosni tok izražen u mW, odnosno lumenima (lm),
- pad napona na diodi pri propusnoj polarizaciji U_F (*forward voltage*) čije se vrijednosti kreću od 1,3-2 V ovisno o struji kroz diodu i boji svjetlosti,
- valna dužina (*wavelength*) svjetlosti pri najvećoj emisiji λ_{max} ,
- vrijeme uključivanja i isključivanja, od nekoliko desetaka do nekoliko stotina ns.

LED diode upotrebljavaju se kao signalni i kontrolni elementi te izvori svjetlosti u različitim uređajima.

2.3.1 Ostali optoelektronički elementi

Optoelektronički elementi su elektroničke komponente čije je djelovanje povezano sa svjetlosnim efektom. Optoelektroničke elemente moguće je svrstati u tri osnovne skupine:

1. Fotodetektor (*photodetectors*) su elementi koji svjetlosnu energiju pretvaraju u električnu:
 - a. fotootpornik LDR (*photoresistor, light dependent resistor*),
 - b. fotodioda (*photodiode*),

- c. fototranzistor (phototransistor),
 - d. fototiristor LASCR (light activated silicon controlled rectifier),
 - e. fotoelement (solar cell).
2. Svjetlosni izvori (*light sources*) koji električnu energiju pretvaraju u svjetlosnu:
 - a. LED dioda,
 - b. Laserske diode.
 3. Fotovezni ili optovezni elementi (*source-detector combinations, optical coupler, photo-coupled pairs*) su kombinacija svjetlosnog izvora i fotodetektora. Primjenjuju se kada je u nekom uređaju potrebno galvanski odvojiti dva strujna kruga.

2.3.2 VJEŽBA 3. LED DIODA

Pitanaja za provjeru:

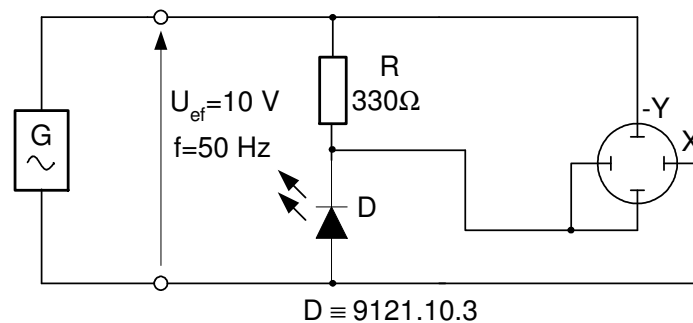
- U kojem području polarizacije radi LED dioda?
- Koje boje može biti emitirano svjetlo?
- Čime se izražava jakost svjetlosti?

Zadatak 3.1.:

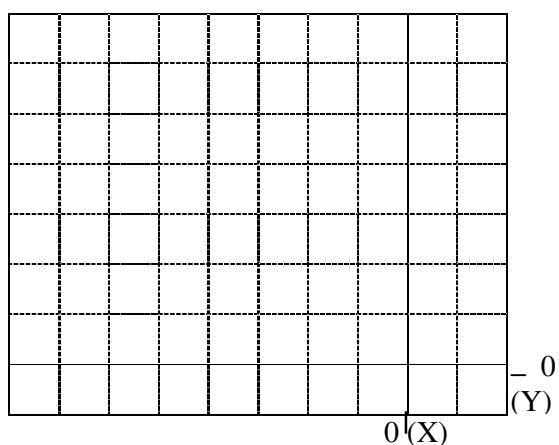
- Osciloskopom snimiti strujno-naponsku karakteristiku LED diode.
-

Mjerni postupak:

- ❖ Priključiti sinusni napon efektivne vrijednosti 10 V, frekvencije 50 Hz na ulaz strujnog kruga prikazanog na slici V.3.1.
- ❖ Na osciloskopu promatrati ovisnost struje kroz diodu o naponu na diodi u X/Y prikazu. Na X ulaz osciloskopa dovesti napon sa diode, a na invertirani Y dovesti napon sa otpornika R.
- ❖ Dobiveni oscilogram ucrtati u dijagram na slici V.3.2.
- ❖ Na osciloskopu namjestiti vrijednosti:
 - Kanal X 2 V/podjeli
 - Kanal Y 2 V/podjeli



Slika V.3.1.



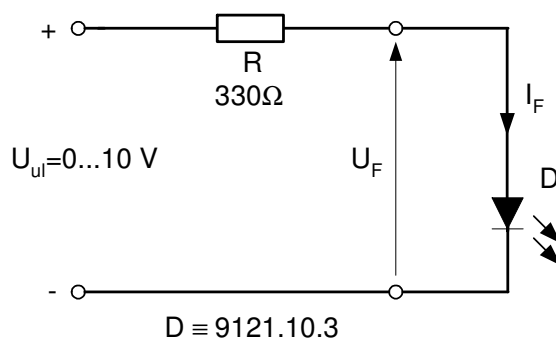
Slika V.3.2.

Zadatak 3.2.:

Promatrati promjenu intenziteta svjetla koje emitira LED dioda ovisno o iznosu i polaritetu napona na diodi U_F i struji koja teče kroz diodu I_F .

Mjerni postupak:

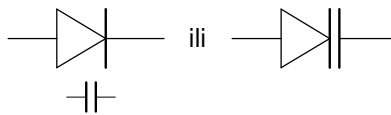
- ❖ Spojiti strujni krug prema slici V.3.3. i podešavati istosmjerni napon u koracima od po 1 V prema tablici V.3.1.
- ❖ Mjeriti napon na diodi U_F i struju koja teče kroz diodu I_F . Osim tih izmjerenih vrijednosti u tablicu V.3.1. upisati i opis intenziteta svjetla koje zrači LED dioda (nema zračenja, slabo svjetlo, srednje jako svjetlo, jako svjetlo).
- ❖ Promijeniti polaritet diode i promatrati zračenje svjetla.



Slika V.3.3.

2.4 Kapacitivna dioda

Svaki pn prijelaz posjeduje izvjesnu kapacitivnost zbog toga što se u ravnotežnom stanju oko granične ravnine formira vrlo usko područje koje se naziva područje prostornog naboja ili područje pn barijere ili osiromašeno područje. Širina ovog područja nije konstantna već ovisi o koncentraciji primjesa na p i n strani poluvodiča. Naime, ona je uža što su koncentracije primjesa na p i n strani veće i dublje prodire u onu stranu koja ima manju koncentraciju primjesa, što znači da nije simetrična. Naime, kapacitivnost se javlja zbog prostornog naboja (zaporna kapacitivnost) i zbog difuzije elektrona i šupljina (difuzijska kapacitivnost), bez obzira na polaritet priključenog napona. Kada je dioda polarizirana nepropusno dominira zaporna kapacitivnost, a kada je polarizirana propusno dominira difuzijska kapacitivnost. Kod kapacitivnih dioda se iskorištava zaporna kapacitivnost. Različiti proizvođači ove diode nazivaju još i *varicap-diode*, *varaktor* i sl. Kod ovih dioda mijenja se kontinuirano kapacitivnost u ovisnosti o narinutom naponu, pa se one upotrebljavaju kao promjenjivi kondenzatori bez pomičnih mehaničkih dijelova.



Slika 2.16 Simboli kapacitivne diode

Područje barijere pn spoja specifično je po tome što oskudijeva slobodnim nositeljima naboja, odnosno njihove koncentracije su zanemarivo malene, a dominiraju nepokretni negativni ioni akceptora na p strani i pozitivni ioni donora na n strani (vidi poglavlje 1). Poznato je da je osnovno svojstvo izolatora to što ne posjeduje slobodne nosioce naboja, pa se može kazati da čitav prostor pn barijere ima karakteristike dielektrika na koji se s obje strane nastavljaju relativno dobro vodljiva neutralna p i n područja. Na ovaj način formirana je struktura sa svojstvom kapacitivnosti analogno onoj kod pločastog kondenzatora.

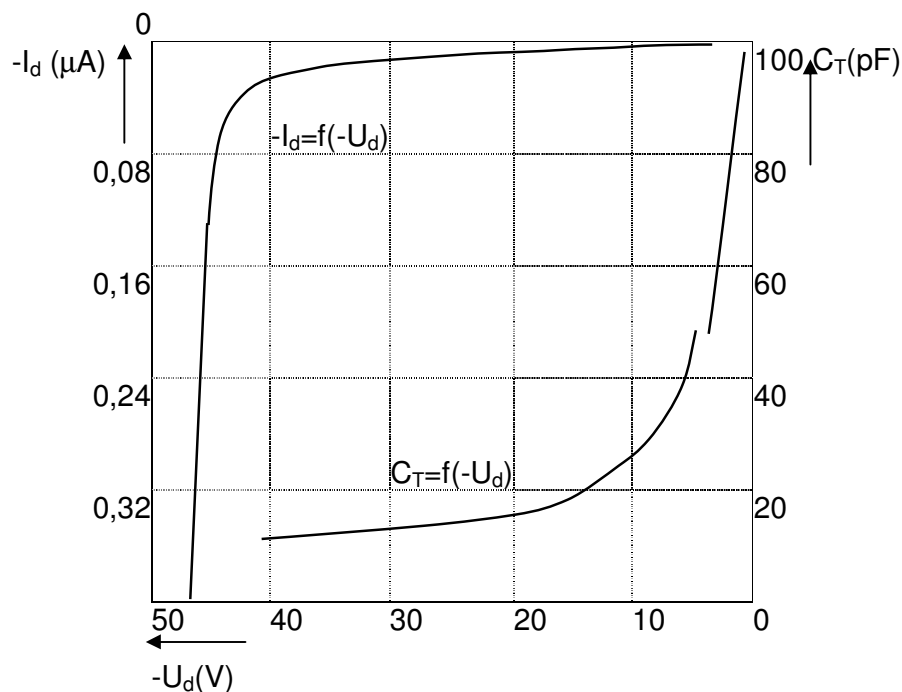
Ako se pn spoj polarizira nepropusno, područje barijere širine d_B se širi, a time se ujedno mijenja i iznos barijernog kapaciteta. Barijerni kapacitet, odnosno kapacitet prijelaznog područja C_T može se općenito izraziti relacijom koja vrijedi za kapacitet pločastog kondenzatora:

$$C_T = \frac{\epsilon S}{d_B}, \quad 2.11$$

gdje je ϵ dielektrična konstanta, S je površina poprečnog presjeka, a d_B je širina pn barijere analogna udaljenosti između pločica kondenzatora. Porastom napona nepropusne polarizacije slobodni nosioci naboja se još više udaljavaju od granične ravnine pn spoja i širina barijere je veća, a kapacitet C_T se smanjuje.

Na slici 2.17 prikazane su karakteristike kapacitivne diode. Vidimo da se s promjenom napona u zapornom području od -35 V do -1 V mijenja i kapacitivnost od 15 pF do 80 pF. Na istom dijagramu prikazana je i strujna karakteristika. To je poznata struja zasićenja, nastala zbog toplinske generacije nositelja naboja (zbog ovoga kondenzator nije idealan već posjeduje stanovitu vodljivost). Smanjenje ove vodljivosti postiže se tako što se kapacitivne diode izrađuju od silicija (veoma mala struja zasićenja). Na slici 2.18. prikazana je nadomjesna shema kapacitivne diode. Na visokim frekvencijama (preko 100 MHz) dolazi do izražaja parazitni induktivitet L_d dovoda (reda veličine nanohenrija). Osim toga, u seriji se nalazi i otpor r_d , koji sačinjavaju otpor dovodnih žica i otpor kristala silicija. Kako je kapacitivna dioda obično spojena u VF titrajnom krugu, vrlo važan je i kut gubitaka kondenzatora, koji je dan s:

$$\text{tg } \delta = r_d \cdot \omega \cdot C_d. \quad 2.12$$

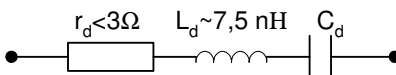


Slika 2.17 Ovisnost struje i kapaciteta o zapornom naponu

Gubici kondenzatora mogu se smanjiti ako se u seriju ili paralelno kapacitivnoj diodi priključi visokokvalitetan kondenzator zanemariva kuta gubitaka. Za paralelan spoj vrijedi:

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{par}} = \frac{C_d}{C_d + C_p} \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad 2.13$$

a zadržava se puna promjena kapacitivnosti ΔC_d .



Slika 2.18 Nadomjesna shema kapacitivne diode za visoke frekvencije

U serijskom spoju imamo:

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{ser}} = \frac{C_s}{C_d + C_s} \cdot \operatorname{tg} \delta \quad \text{dok je promjena kapacitivnosti smanjena } \Delta C_{\text{uk}} = \left(\frac{C_s}{C_d + C_s} \right)^2 \cdot \Delta C_d \quad 2.14$$

Kapacitivnost se znatno mijenja zbog proizvodnih odstupanja i temperaturne ovisnosti kapacitivnih dioda. To ipak ne predstavlja veliki problem jer krivulja $C_d = f(-U_d)$ zadržava logaritamski karakter i potrebno je da se samo jednom "čvrsto" namjesti nominalna vrijednost istosmjernog napona. Glavna područja primjene kapacitivnih dioda su: automatsko ugađanje oštine kod TV prijemnika, generacija frekvencijsko moduliranih signala, u promjenljivim R-C i L-C filtrima, za umnažanje i dijeljenje frekvencije, te u impulsnim krugovima.

2.4.1 VJEŽBA 4. KAPACITIVNA DIODA

Pitanaja za provjeru:

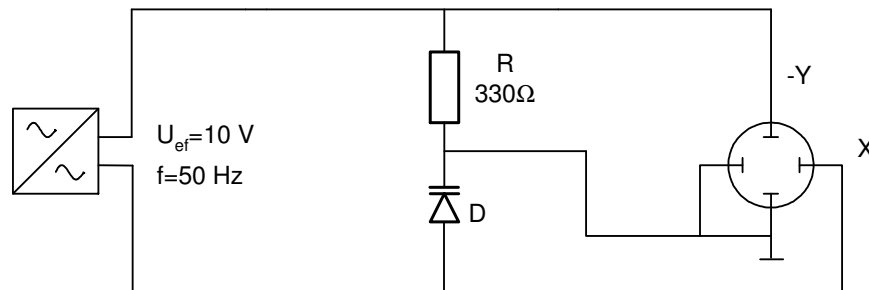
- U kojem području polarizacije radi kapacitivna dioda?
- Kako se ponaša kapacitivnost C_T pri porastu napona nepropusne polarizacije?
- Kako se mogu smanjiti gubici kondenzatora?

Zadatak 4.1.:

Osciloskopom snimiti strujno-naponsku karakteristiku kapacitivne diode.

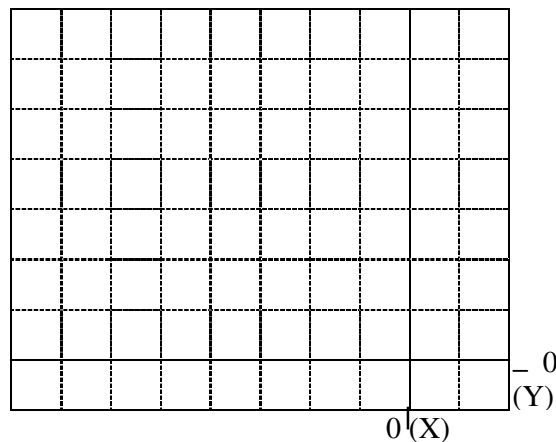
Mierni postupak:

- ❖ Spojiti strujni krug prema slici V.4.1. Priključiti na ulaz sinusni napon efektivne vrijednosti 10 V, frekvencije 50 Hz i na osciloskopu promatrati ovisnost struje kroz diodu o naponu na diodi u X/Y prikazu (isključiti vremensku bazu). Na X ulaz osciloskopa dovesti napon sa diode, a na invertirani Y ulaz dovesti napon sa otpornika R.
- ❖ Dobiveni oscilogram ucrtati u dijagram na slici V.4.2.
- ❖ Na osciloskopu namjestiti vrijednosti:
 - Kanal X 2 V/podjeli
 - Kanal -Y 2 V/podjeli



D ≙ 9114.5

Slika V.4.1.



Slika V.4.2.

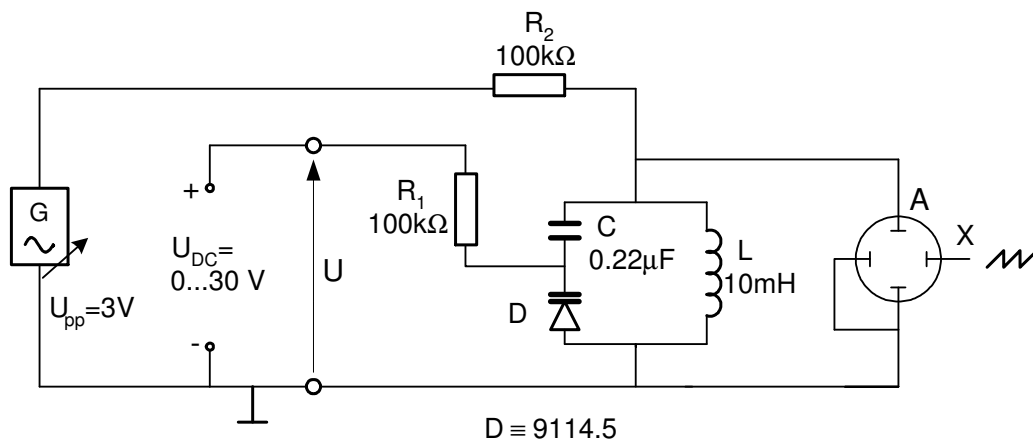
Zadatak 4.2.:

Snimiti ovisnost kapacitivnosti C_T kapacitivne diode o priključenom naponu nepropusne polarizacije U , $C_T = f(U)$.

Mjerni postupak:

- ❖ Kapacitivnu diodu spojiti u paralelni rezonantni titrajni krug prema slici V.4.3.
- ❖ Priključiti sinusni napon $U_{pp} = 3\text{ V}$ (peak to peak).
- ❖ Istosmjerni napon nepropusne polarizacije koji se dovodi na diodu mijenjati u koracima od po 5 V, od 0 V do 30 V, prema tablici V.4.1. Za svaku vrijednost napona odrediti rezonantnu frekvenciju titrajnog kruga promjenom frekvencije sinusnog generatora u intervalu od 50 kHz do 250 kHz.

Napomena: Promjenom napona U mijenja se i kapacitet diode što uvjetuje promjenu rezonantne frekvencije titrajnog kruga. Rezonantna frekvencija paralelnog titrajnog kruga je ona frekvencija kod koje je napon na izlazu A maksimalan.



Slika V.4.3.

- U (V)	f_{rez} (kHz)	L (mH)	C_{tot} (pF)	C_T (pF)
0		10		
2		10		
4		10		
6		10		
8		10		
10		10		
12		10		

Tablica V.4.1.

- ❖ Graf ovisnosti frekvencije o naponu, $f_{rez}=f(U)$, ucrtati u dijagram na slici V.4.4.
- ❖ Proračunati ukupnu kapacitivnost titrajnog kruga C_{tot} prema relaciji:

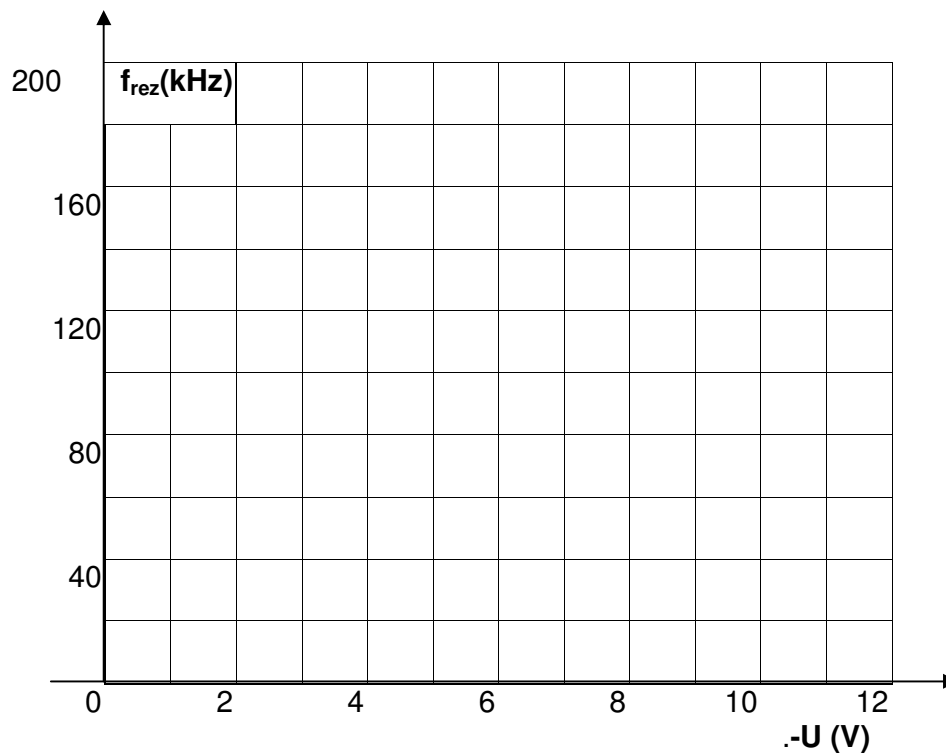
$$C_{tot} = \frac{1}{(2\pi f_{rez})^2 \cdot L},$$

gdje je L induktivitet titrajnog kruga od 10 mH.

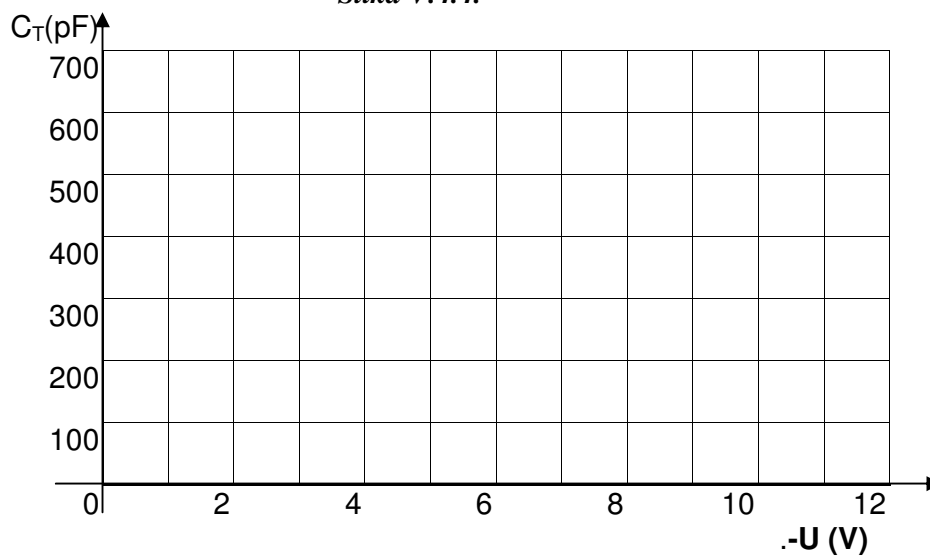
- ❖ Iz strujnog kruga na slici 4.3. ukloniti kondenzator C i diodu te ponovo izmjeriti rezonantnu frekvenciju. Na taj je način moguće odrediti vlastitu kapacitivnost zavojnice C_{zav} :

$$C_{zav} = \frac{1}{(2\pi f_{rez})^2 \cdot 10mH}$$

- ❖ Razlika između ukupne kapacitivnosti titrajnog kruga C_{tot} i kapacitivnosti zavojnice C_{zav} daje traženu kapacitivnost diode C_T :
 $C_T = C_{tot} - C_{zav}$.
- ❖ Izračunate vrijednosti kapacitivnosti C_T unijeti u tablicu V.4.1. Ovisnost kapacitivnosti C_T o narinutom naponu nepropusne polarizacije $C_T = f(-U)$ ucrtati u dijagram na slici 4.5.



Slika V.4.4.

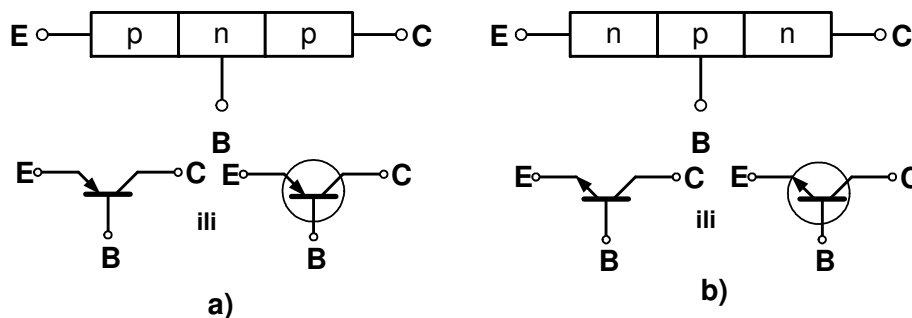


Slika V.4.5.

2.5 BIPOLARNI TRANZISTOR

Tranzistor je poluvodički elektronički element koji se primjenjuje za pojačanje signala i generiranje različitih vremenskih oblika. Prvi tranzistor je konstruiran još 1948. godine (Bardeen i Brattain). To je bio točkasti tranzistor i on je konstrukcijom slijedio točkastu diodu. Zbog čestih nestabilnosti, ograničene snage, teškoća oko dobivanja sličnih karakteristika za različite primjerke istog tipa tranzistora, što je u izvjesnoj mjeri bio i rezultat posljedica nedovoljnog poznavanja njihovog rada, točkasti tranzistori se danas više ne primjenjuju. Stvarni razvoj tranzistora datira iz 1949. godine kada je Shockley iznio princip rada spojnih tranzistora koji mogu biti p-n-p ili n-p-n tipa.

Bipolarni tranzistor je aktivni poluvodički elektronički element s tri elektrode dobiven kombinacijom poluvodiča p i n tipa. U načelu se bipolarni tranzistor može shvatiti kao struktura načinjena od dva pn spoja, odnosno kao poluvodička cjelina pnp ili npn tipa u kojoj se središnji sloj naziva baza (B), a druga dva sloja su emiter (E) i kolektor (C), slika 2.5.1.



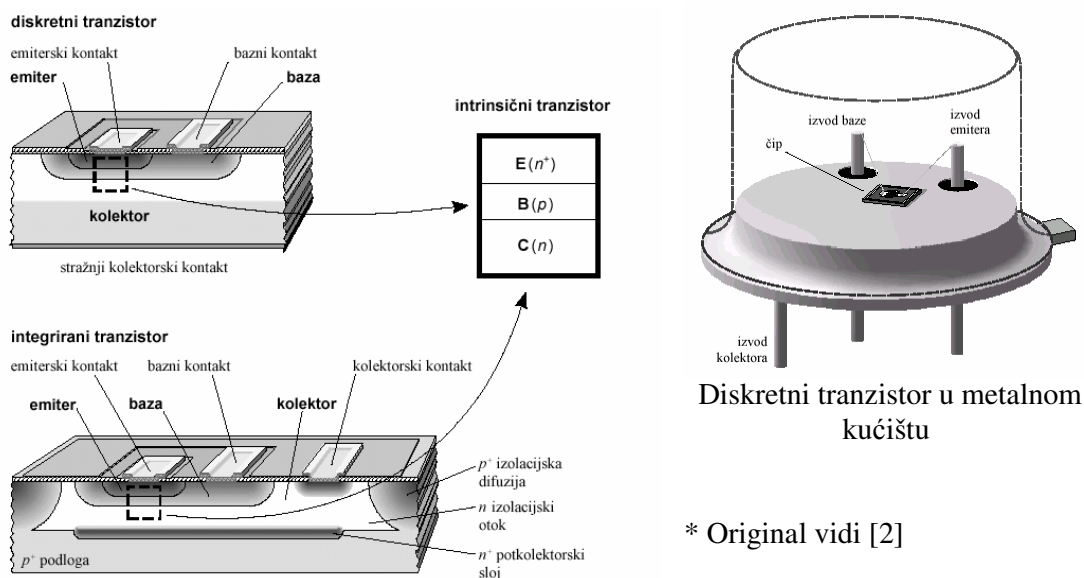
Slika 2.5.1. Shematski prikaz i simbol bipolarnog tranzistora: a) pnp tip b) npn tip

Danas dominira difuzijsko-planarni tehnološki postupak proizvodnje bipolarnih tranzistora, bilo da se radi o komponentama u vlastitom kućištu (diskretni tranzistori) ili komponentama u monolitnim integriranim sklopovima (integrirani tranzistor). Tako za diskretni npn tranzistor, prvo se na jako dopiranu podlogu n-tipa nanese slabo dopirani epitaksijalni sloj n-tipa debljine 5-15 μ m. On će služiti kao kolektor gotovog tranzistora. Zatim slijedi bazna difuzija akceptorskih primjese u epitaksijalni sloj kojom se formira područje baze, odnosno pn-spoj baza kolektor. Zatim se u tu bazu difundiraju donorske primjese u još većoj koncentraciji, tako da se formira područje emitera, odnosno pn-spoj emiter-baza.

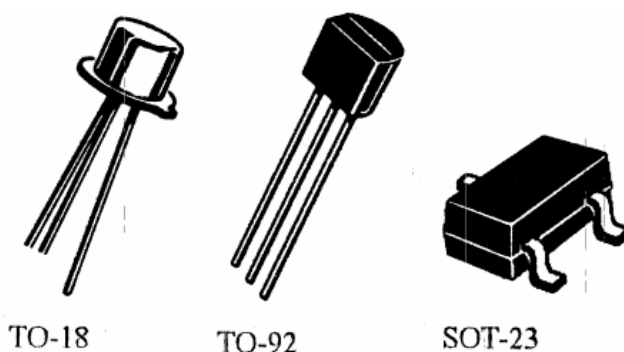
Princip rada bipolarnih tranzistora zasniva se na injekciji slobodnih nosilaca iz emitera u bazu, transportu tih nosilaca kroz vrlo usko područje baze, te njihovom sakupljanju na kolektoru. U radu tranzistora bitno je prisustvo obaju tipova nosilaca, većinskih i manjinskih, pa se zato ovaj tranzistor i naziva bipolarni tranzistor. Upotrebljava se na jedan od dva osnovna načina: kao linearni pojačavački element napona ili struje, ili kao nelinearni prekidački element u funkciji sklopke. Ovisno o polaritetu napona priključenog između emitera i baze, te kolektora i baze moguća su četiri područja rada tranzistora:

1. normalno aktivno područje: spoj emiter-baza je polariziran propusno, a spoj kolektor-baza nepropusno,
2. područje zasićenja: oba spoja su polarizirana propusno,
3. područje zapiranja: oba spoja su polarizirana nepropusno,
4. inverzno aktivno područje: spoj emiter-baza je polariziran nepropusno, a spoj kolektor-baza propusno (kao emiter se upotrebljava elektroda kolektora).

Kada tranzistor radi u sklopu pojačala, radi u normalnom aktivnom području, a kad se koristi kao sklopka prebacuje se iz područja zasićenja u zaporno područje, i obratno.



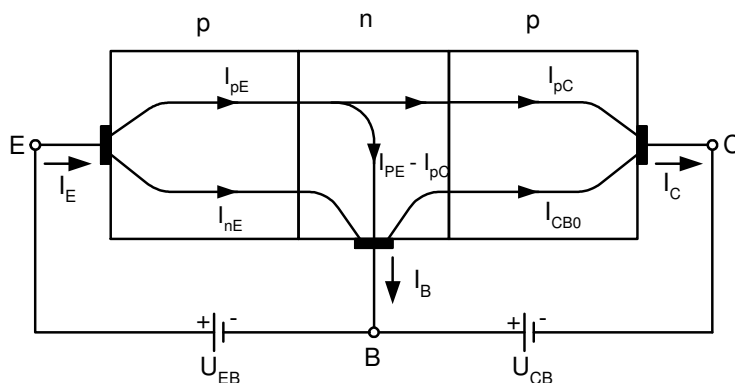
* Original vidi [2]



Slika 2.5.2. Tehnološki presjeci i primjeri izvedbe bipolarnog tranzistora

Tranzistor ima tri elektrode, stoga i tri elektrodne struje: struju emitera, struju baze i struju kolektora. One su sastavljene od pripadajućih struja elektrona i struja šupljina. Za normalno polarizirani pnp tranzistor prikazan na slici 2.5.3. ucrtani su stvarni smjerovi struja koji odgovaraju smjeru gibanja pozitivnog naboja (šupljina).

Struja emitera I_E je struja propusno polariziranog spoja emiter-baza i sastoji se od struje šupljina I_{pE} koje su iz emitera injektirane u bazu te od struje elektrona I_{nE} koji su iz baze injektirani u emiter. Spoj kolektor-baza je polariziran nepropusno pa se struja kolektora sastoji od manjinskih nosilaca i to struje šupljina I_{pC} koje iz baze idu u kolektor i od reverzne struje zasićenja I_{CB0} . Struja šupljina kolektora I_{pC} predstavlja onaj dio struje šupljina emitera I_{pE} koji je od emitera na putu kroz bazu stigao do kolektora, tj. to je struja I_{pE} umanjena za rekombinacijsku struju I_R , $I_R = I_{pE} - I_{pC}$. Struja I_{CB0} se sastoji od elektrona koji predstavljaju manjinske nositelje kolektora i prelaze u bazu.



Slika 2.5.3. Struje normalno polariziranog pnp tranzistora

Struja baze I_B sastoji se od tri komponente: struje elektrona I_{nE} injektiranih iz baze u emiter, rekombinacijske struje I_R koja je posljedica rekombinacije dijela šupljina iz emitera sa elektronima u bazi, $I_R = I_{pE} - I_{pC}$, te reverzne struje zasićenja I_{CB0} nepropusno polariziranog spoja kolektor-baza.

Za normalno polarizirani npn tranzistor sve struje teku u suprotnom smjeru u odnosu prema strujama pnp tranzistora i polariteti istosmjernih izvora su suprotni.

Struja emitera bipolarnog tranzistora jednaka je zbroju struje kolektora i struje baze:

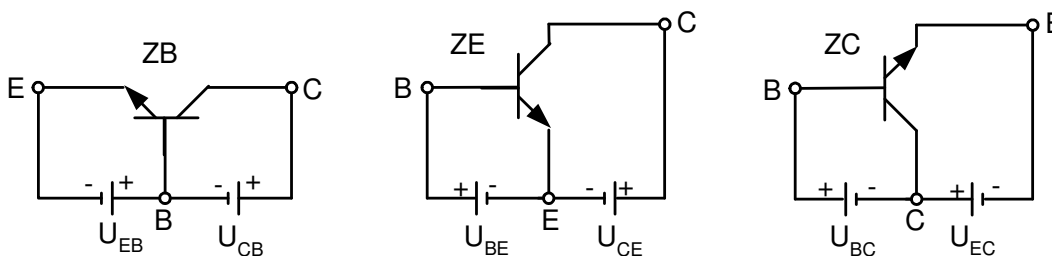
$$I_E = I_C + I_B$$

2.15

S obzirom na broj elektroda bipolarnog tranzistora, on može biti uključen u pojedini elektronički sklop tako da se realizira jedan od tri osnovna spoja tranzistora:

- spoj zajedničke baze (ZB),
- spoj zajedničkog emitera (ZE),
- spoj zajedničkog kolektora (ZC).

Riječ zajednički označava da je dotična elektroda zajednička ulaznom i izlaznom krugu tranzistora. Uvijek drugo slovo u indeksu za napon označava o kojem se spoju radi, tako npr. U_{CE} predstavlja napon između kolektora i emitera u spoju zajedničkog emitera.



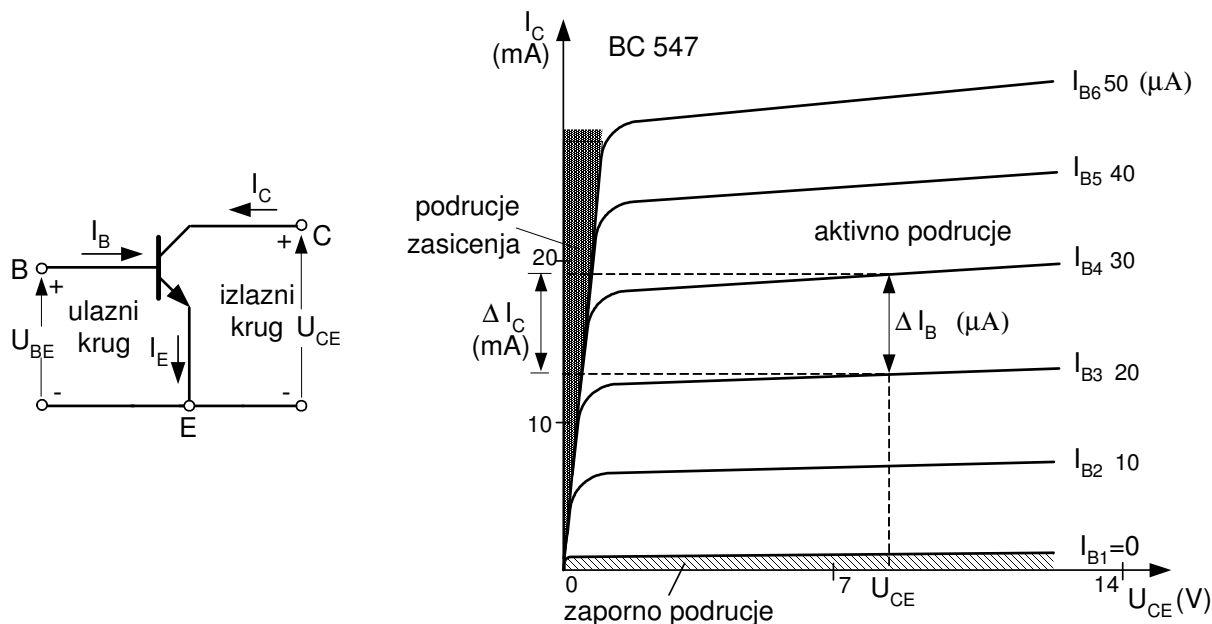
Slika 2.5.4. Spojevi bipolarnog tranzistora

Statičke karakteristike tranzistora daju međusobnu ovisnost određenih struja i napona tranzistora, ovisno o tome o kojem se od navedenih osnovnih spojeva tranzistora radi. Za spoj zajedničkog emitera to su struje I_B i I_C , te naponi U_{BE} i U_{CE} . Od dvanaest mogućih familija statičkih karakteristika tranzistora samo su četiri familije od važnosti, a za spoj ZE to su:

1. $I_B = f(U_{BE}) \mid U_{CE} = \text{konst.}$ - ulazne karakteristike
2. $I_C = f(U_{CE}) \mid I_B = \text{konst.}$ - izlazne karakteristike
3. $I_C = f(I_B) \mid U_{CE} = \text{konst.}$ - prijenosne karakteristike

4. $U_{BE} = f(U_{CE}) |_{I_B = \text{konst.}}$ - karakteristike povratne veze

U katalogima proizvođača tranzistora najčešće se daju ulazne i izlazne karakteristike za spoj ZE, a često i za spoj ZB. S ulaznim i izlaznim karakteristikama statička svojstva tranzistora na danoj temperaturi su kompletno određena. U spoju zajedničkog emitera, emiter je zajednička elektroda ulaznom i izlaznom krugu tranzistora, slika 2.5.5. Struja I_B i napon U_{BE} pripadaju ulaznom krugu, a I_C i U_{CE} izlaznom krugu tranzistora. Izlazne karakteristike tranzistora u spoju ZE dane su kao funkcija $I_C = f(U_{CE})$ pri konstantnoj vrijednosti struje baze I_B za pojedinu karakteristiku, slika 2.5.5.



Slika 2.5.5. Izlazne karakteristike npn tranzistora u ZE spoju

Radna točka tranzistora Q , koja je određena statičkim uvjetima, redovito se crta u izlaznim karakteristikama i o njenom položaju u polju tih karakteristika ovisi u kojem području rada se nalazi dotični tranzistor. Položaj radne točke je određen koordinatama $Q(U_{CE}, I_C, I_B)$. Područje zasićenja karakteriziraju male vrijednosti napona U_{CE} za koje struja I_C naglo raste za svaku promjenu struje I_B (dio između koljena karakteristika i osi ordinata). Područje zapiranja nalazi se ispod karakteristike $I_B=0$. Ako se radna točka nalazi u dijelu polja izlaznih karakteristika između karakteristike za struju $I_B=0$ i koljena krivulja, tranzistor radi u normalnom aktivnom području i za to područje vrijedi relacija:

$$I_C = \beta I_B + (1 + \beta) I_{CB0}, \quad 2.16$$

gdje je β faktor strujnog pojačanja tranzistora za spoj ZE.

Faktor izmjeničnog strujnog pojačanja (small-signal current gain) tranzistora za spoj ZE definiran je za svaku određenu vrijednost napona U_{CE} kao omjer promjene struje kolektora I_C uzrokovane promjenom struje baze I_B :

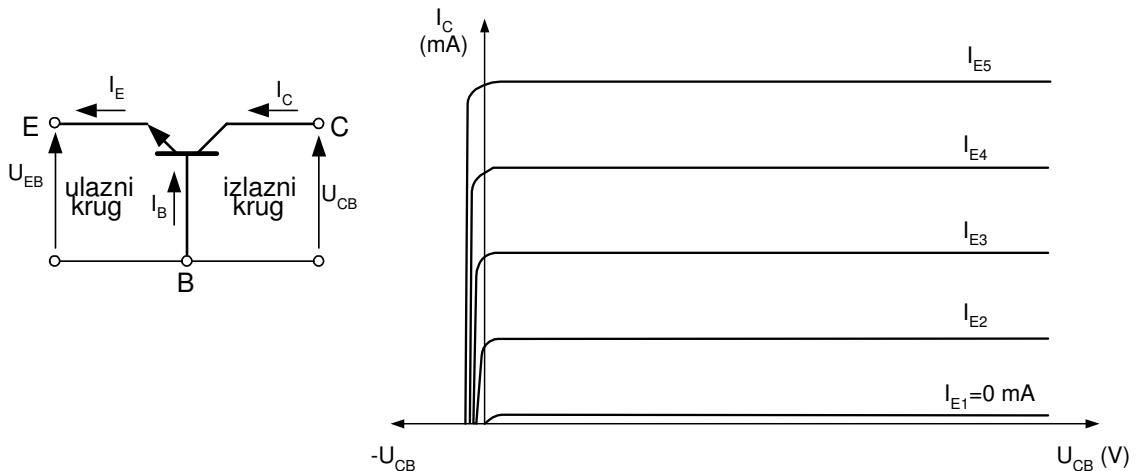
$$\beta = h_{fe} = \left. \frac{dI_C}{dI_B} \right|_{U_{CE} = \text{konst.}} = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right|_{U_{CE} = \text{konst.}} \quad 2.17$$

Omjerom statičkih vrijednosti struje kolektora i struje baze definiran je tzv. istosmjerni faktor strujnog pojačanja β_0 :

$$\beta_0 = h_{FE} = B = \left. \frac{I_c}{I_B} \right|_{U_{CE=konst.}} \quad 2.18$$

Na iznos obaju faktora utječe napon U_{CE} , struja I_C i temperatura. S porastom struje kolektora I_C oba faktora rastu do određenog iznosa, a zatim se smanjuju. Za struje reda veličine nekoliko desetaka do stotinu miliampera faktori h_{FE} i h_{fe} malo se razlikuju i mogu se smatrati jednakima.

Za spoj ZB baza tranzistora je zajednička elektroda ulaznom i izlaznom krugu tranzistora, slika 2.5.6.



Slika 2.5.6. Izlazne karakteristike npn tranzistora u ZB spoju

Izlazne karakteristike dane su kao funkcija $I_C = f(U_{CB})$ pri stalnoj vrijednosti struje I_E za pojedinu karakteristiku. Desno od osi ordinata je $U_{CB} > 0$ i tranzistor radi u normalnom aktivnom području, a lijevo od osi ordinata je $U_{CB} < 0$ i tranzistor je u području zasićenja. Područje zapiranja nalazi se ispod krivulje $I_E = 0$. Za spoj zajedničke baze definira se faktor strujnog pojačanja α kao omjer promjene struje kolektora i struje emitera:

$$\alpha = \left. \frac{dI_c}{dI_E} \right|_{U_{CB=konst.}} = \left. \frac{\Delta I_c}{\Delta I_E} \right|_{U_{CB=konst.}} \quad 2.19$$

Faktor strujnog pojačanja u spoju ZB α uvijek je manji od jedinice, dok se vrijednosti faktora strujnog pojačanja u spoju ZE β kreću približno u granicama od 20-1000. Faktori strujnog pojačanja α i β povezani su relacijama:

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad \alpha = \frac{\beta}{1 + \beta} \quad 2.20$$

Faktor strujnog pojačanja α se može definirati i preko komponenti struja sa slike 2.5.3. Faktor injekcije ili efikasnost emitera definirana je s relacijom:

$$\gamma = \frac{I_{pE}}{I_{pE} + I_{nE}} = \frac{I_{pE}}{I_E} \quad 2.21$$

Transport šupljina kroz bazu bit će to povoljniji što je baza uža. Ako je širina baze W veća od difuzijske dužine šupljina/elektrona u bazi L_p/L_e (one su reda veličine 10^{-2} cm), mali dio šupljina/elektrona će stići u kolektorski krug, a najveći dio će se rekombinirati u području baze. Kad je $W > L_p/L_e$, tranzistor u biti degenerira u dvije nasuprot spojene diode. Uz svojstvo injekcije i kolekcije, bitno svojstvo tranzistora je dakle i transport nositelja kroz bazu. Transport će biti to efikasniji što je baza uža, što znači da treba biti ispunjen uvjet $W \ll L_p/L_e$. Ovim uvjetom je određena

gornja granice širina baze. Kao mjera kvalitete transporta je transportni faktor β^* , koji je definiran kao pozitivna bezdimenzionalna veličina:

$$\beta^* = \frac{I_{pC}}{I_{pE}} = 1 - \frac{I_R}{I_{pE}}. \tag{2.22}$$

Na osnovu ovih definicija moguće je struju baze i kolektora definirati kao:

$$I_C = -\beta^* \cdot \gamma \cdot I_E + I_{CB0}, \tag{2.23}$$

$$I_B = -(1-\gamma) \cdot I_E - \gamma \cdot (1-\beta^*) \cdot I_E - I_{CB0} = -(1-\beta^* \cdot \gamma) \cdot I_E - I_{CB0}.$$

Kao što se vidi, glavna komponenta struje kolektora izazvana je emitorskom strujom i proporcionalna je produktu $\beta^* \cdot \gamma$, pa se taj produkt naziva *faktor strujnog pojačanja tranzistora u spoju zajedničke baze* α . On je prema definiciji jednak:

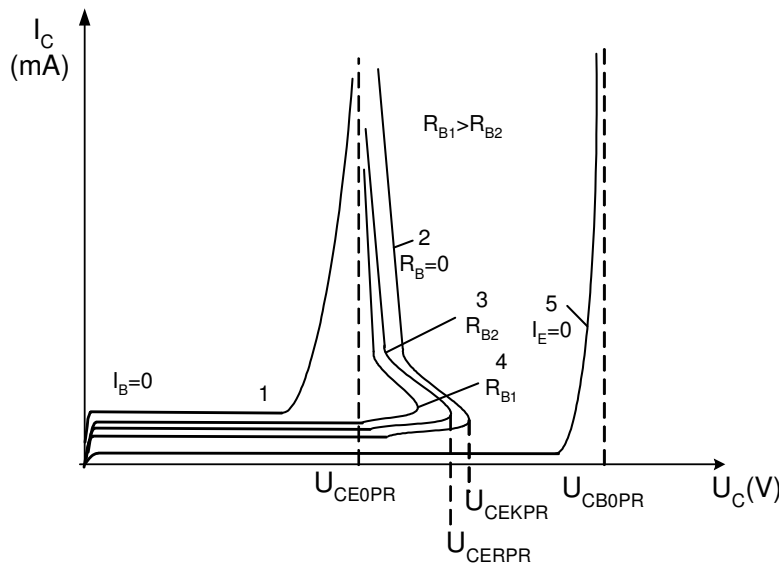
$$\alpha = \beta^* \cdot \gamma. \tag{2.24}$$

Prema tome za struje kolektora i baze vrijedi:

$$I_C = -\alpha \cdot I_E + I_{CB0} \quad I_B = -(1-\alpha) \cdot I_E - I_{CB0}. \tag{2.25}$$

2.5.1 Ograničenja u radu tranzistora

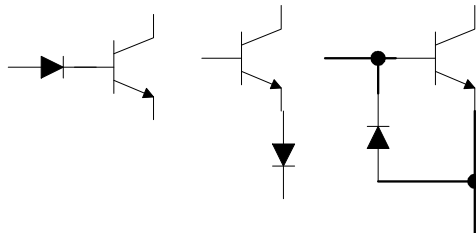
Ograničenja u radu tranzistora mogu se podijeliti na **naponska, strujna i ograničenja snage**. Također postoje i **frekvencijska** ograničenja tranzistora, povezana s postepenim pogoršanjem rada tranzistora na sve višim frekvencijama.



Slika 2.5.7. Ovisnost probojnog napona o veličini otpora R_B

Od strana proizvođača redovito se navode maksimalni iznosi reverznih napona U_{CBM} , U_{CEM} i U_{BEM} koji se u radu ne smiju prekoračiti, jer postoji opasnost proboja s mogućnošću uništenja tranzistora. Naponi U_{CBM} i U_{CEM} se kreću od nekoliko desetaka volta kod tranzistora malih snaga pa do nekoliko stotina i više volta kod tranzistora velikih snaga, posebno napon U_{CBM} kod silicijevih tranzistora. Mehanizam proboja koji te napone ograničuje je lavinski proboj. Ovisnost $I_C=f(U_{CE})$ prikazana je na slici 2.5.7. za dva različita tranzistora. Vidimo da krivulje 2, 3 i 4 posjeduju područje negativnog otpora i ova pojava se dosta često opaža kod silicijevih tranzistora. Uvjet $I_B=0$ ili $I_B=\text{konst.}$ može se ostvariti ako se tranzistor napaja iz strujnog izvora, tj. izvora s beskonačno

velikim unutarnjim otporom. U praktičnim izvedbama je otpor baze uvijek konačan, čak i ako je otpor vanjskog kruga u seriji s bazom jednak nuli, ostaje uvijek omski otpor baze r_B . O veličini tog vanjskog otpora baze R_B ovisi i probojni napon U_{CERPR} kao što je prikazano na slici 2.5.7. Tipična dopuštena vrijednost napona U_{BEM} iznosi oko 5 V. Ako u sklopovima postoji mogućnost pojave većeg napona, potrebno je zaštititi spoj baza-emiter tranzistora kao što je prikazano na slici 2.5.8.



Slika 2.5.8. Zaštita spoja baza-emiter

Osim toga, tvornički podaci sadrže i podatke o uvjetima pod kojima su mjerene pojedine karakteristične veličine. Kako većina podataka za isti tip tranzistora varira u velikom rasponu, u tvorničkim podacima obično se daje tipičan podatak ili najveća i najmanja moguća vrijednost. Naponi za tranzistor u zasićenju:

1. U_{BEzas} (saturation voltage V_{BEsat}) iznosi za silicijske tranzistore 0,7-0,8 V,
2. U_{CEzas} (V_{CEsat}) iznosi 0,1-0,3 V, ali može imati i vrijednosti veće od volta kod tranzistora namijenjenih za veće snage.

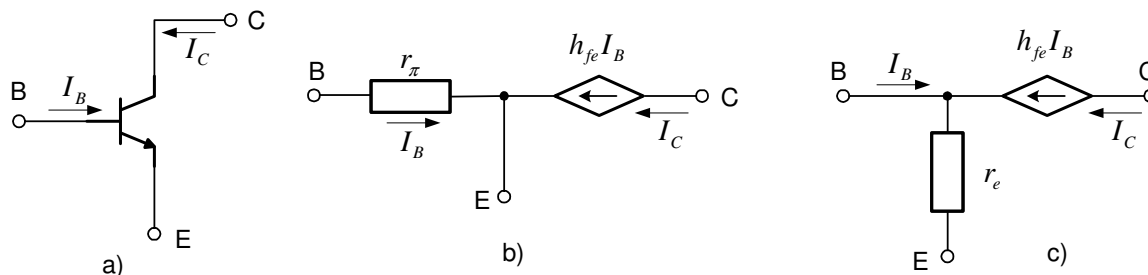
Kao što je poznato iz teorije poluvodiča veoma je bitan utjecaj **temperature** kao i utjecaj raznih zračenja (svjetlost, radioaktivno zračenje).

2.5.2 Nadomjesni modeli bipolarnog tranzistora

Sada će ukratko biti objašnjeni modeli tranzistora koji se koriste u analizi i projektiranju električnih sklopova. Potrebno je na određen način modelirati svojstva tranzistora pomoću električnog ekvivalenta. Ima više različitih metoda, ali je svaka od njih izvedena uz pretpostavku da su izmjenične promjene dovoljno malene, tako da tranzistor uvijek radi u linearnom području i da ne postoje ni neki drugi uzroci izobličenja signala. Tada se svojstva tranzistora mogu prikazati linearnim krugom, a dobivene modele nazivamo modelima za mali izmjenični signal na relativno niskim frekvencijama.

Na Slici 2.5.9.a) prikazan je tranzistor s pripadnim izmjeničnim naponima i strujama, a na Slici 2.5.9.b) i c) su dva njegova linearna modela za male signale.

Napomena: Strujni izvor označen je posebnim simbolom kojim se prikazuje ovisni (zavisni) strujni izvor, čime se želi istaknuti da njegova vrijednost ovisi o nekoj varijabli kruga kojemu izvor pripada.



Slika 2.5.9. Model bipolarnog tranzistora za male izmjenične signale.

Struja I_B predstavlja ulaznu struju tranzistora (pojačala) što znači da je $I_B=I_{ul}$ za ZE spoj. Bazni otpor r_π označava se još i sa h_{ie} (vidi: Model s h parametrima). Može se odrediti uz poznavanje parametra radne točke (I_{BQ} ili I_{CQ}) prema:

$$r_\pi = \frac{kT}{q} \cdot \frac{1}{I_{BQ}} = 0,026 \frac{h_{fe}}{I_{CQ}}$$

gdje je kT/q termički napon, koji na sobnoj temperaturi iznosi $0,026V$.

Strujno ovisni strujni izvor je $h_{fe}I_b$. U modelu na slici c) umjesto baznog otpora r_π koristi se odgovarajući emitterski otpor r_e , pri čemu je:

$$r_\pi = (1+h_{fe})r_e \approx h_{fe}r_e \quad (h_{fe} \gg 1).$$

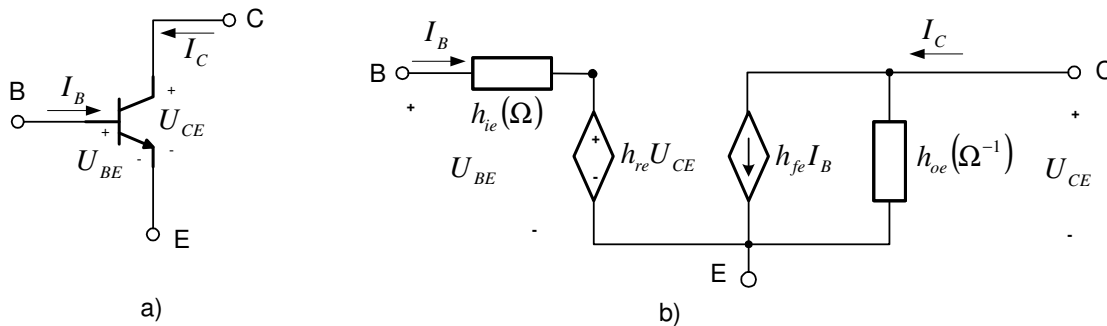
Model s h -parametrima

Slijedeći model, koji omogućuje veću točnost u odnosu na prije opisane modele za mali signal, temelji se na prikazu tranzistora kao sklopa s 4 terminala (četveropol - *four terminal network*). Modelom se povezuju ulazni i izlazni naponi i struje preko odgovarajućih jednadžbi četveropola. Poznato je da je moguće postaviti 6 različitih setova parametara (Y, Z, A, \dots parametri) koji opisuju strukturu četveropola. U analizi tranzistora primjenjuje se model s *hibridnim ili h -parametrima*. Jednadžbe čiji su koeficijenti hibridni parametri općenito su:

$$U_{ul} = h_{11}I_{ul} + h_{12}U_{iz}$$

$$I_{iz} = h_{21}I_{ul} + h_{22}U_{iz}$$

Na *Slici 2.5.10.* prikazan je bipolarni tranzistor i njegov hibridni ekvivalent za ZE spoj, pri čemu je za prikazani model: $U_{ul}=U_{BE}$, $U_{iz}=U_{CE}$, $I_{ul}=I_B$, $I_{iz}=-I_C$, a parametri su: $h_{11}=h_{ie}$, $h_{12}=h_{re}$, $h_{21}=h_{fe}$, $h_{22}=h_{oe}$. Oznaka e u "subscriptu" h parametara ukazuje da se parametri odnose na ZE spoj tranzistora.



Slika 2.5.10. Bipolarni tranzistor i njegov model s h -parametrima

Parametri se definiraju iz pokusa kratkoga spoja ($U_{CE}=0V$) i otvorenoga kruga ($I_B=0A$):

$$h_{ie} = \left. \frac{U_{BE}}{I_B} \right|_{U_{CE}=0} \quad (\Omega) \quad \text{je ulazni otpor kratkoga spoja,}$$

$$h_{re} = \left. \frac{U_{BE}}{U_{CE}} \right|_{I_B=0} \quad \text{je inverzno naponsko pojačanje otvorenoga kruga,}$$

$$h_{fe} = \left. \frac{I_C}{I_B} \right|_{U_{CE}=0} \quad \text{je strujno pojačanje kratkoga spoja,}$$

$$h_{oe} = \left. \frac{I_C}{U_{CE}} \right|_{I_B=0} \quad (\Omega^{-1}) \quad \text{je izlazna vodljivost otvorenoga kruga.}$$

h - parametri su diferencijalni koeficijenti za odabranu radnu točku, a mogu se odrediti iz karakteristika tranzistora ili su navedeni u katalogima za pripadne tranzistore.

Tipične numeričke vrijednosti h parametara su:

$$h_{ie}=1,5K\Omega, \quad h_{re}=10^{-4}, \quad h_{fe}=100, \quad h_{oe}=10^{-5}\Omega^{-1}.$$

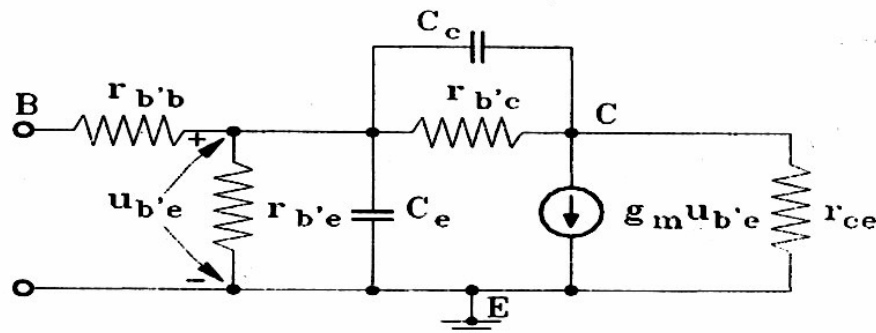
Kada se zanemare h_{re} i h_{oe} čije su vrijednosti obično vrlo male, gornji model s h parametrima svodi se na model za male signale prikazan na Slici 2.5.9.b). Tada postaje jasno zašto se strujno pojačanje za izmjenični signal β označava i sa h_{fe} .

Nadomjesni π -hibridni sklop tranzistora

Pri analizi sklopa na visokim frekvencija često se upotrebljava sljedeći nadomjesni model.

$$g_m = \frac{I_C}{U_T}, \quad r_{b'e} = \frac{h_{fe}}{g_m}, \quad r_{b'b} = h_{ie} - r_{b'e}, \quad r_{b'c} = \frac{r_{b'e}}{h_{re}}$$

$$r_{ce} = \frac{1}{h_{oe} - \frac{(1+h_{fe})}{r_{b'c}}}$$

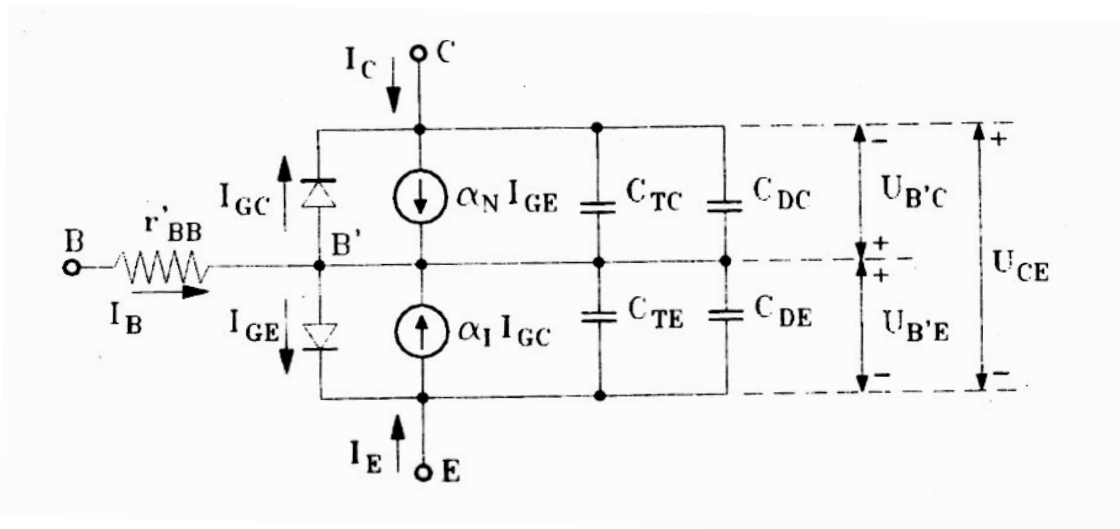


Slika 2.5.11. Nadomjesni π -hibridni sklop tranzistora

Kondenzatori C_e i C_c predstavljaju parazitne kapacitivnosti koje dolaze do izražaja na visokim frekvencijama. Posljedica toga je da će sklop imati gornju graničnu frekvenciju do koje ispravno funkcionira.

Ebers-Mollov model

Za analizu rada tranzistora u svim područjima rada najprikladniji je Ebers_mollov model prikazan na slici.



Slika 2.5.12. Ebers-Mollov model

$$I_B = I_{GE} - \alpha_N I_{GE} = (1 - \alpha_N) I_{GE}.$$

$$I_{GE} = I_{ES} \left(e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1 \right),$$

$$C_{TE} = \frac{C_{TE0}}{\sqrt{1 - \frac{U_{BE}}{U_\phi}}},$$

$$C_{DE} = \tau_N \cdot \alpha_N \cdot \frac{I_{ES}}{U_T} \cdot e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} = \tau_N \cdot \alpha_N \cdot \frac{I_{GE}}{U_T},$$

I_{ES} - struja zasićenja diode B-E,

U_{BE} - napon između baze i emitera,

C_{TE0} - kapacitivnost barijere pri naponu $U_{BE}=0$,

U_ϕ - napon približno jednak 1V,

α_N - faktor strujnog pojačanja,

τ_N - vremenska konstanta diode.

$$I_{GS} = I_{ES} \cdot \left(e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1 \right),$$

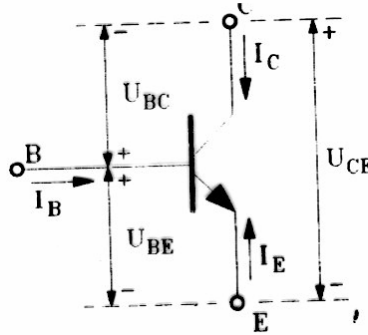
$$C_{TC} = \frac{C_{TC0}}{\sqrt{1 - \frac{U_{BC}}{U_{\Phi}}}}$$

$$C_{DE} = \tau_N \cdot \alpha_N \cdot \frac{I_{ES}}{U_T} \cdot e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} = \tau_N \cdot \alpha_N \cdot \frac{I_{GE}}{U_T},$$

$$C_{DC} = \tau_I \cdot \alpha_I \cdot \frac{I_{CS}}{U_T} \cdot e^{\frac{U_{BC}}{U_T}} = \tau_I \cdot \alpha_I \cdot \frac{I_{GC}}{U_T},$$

$$I_{GC} = I_{CS} \cdot \left(e^{\frac{U_{BC}}{U_T}} - 1 \right),$$

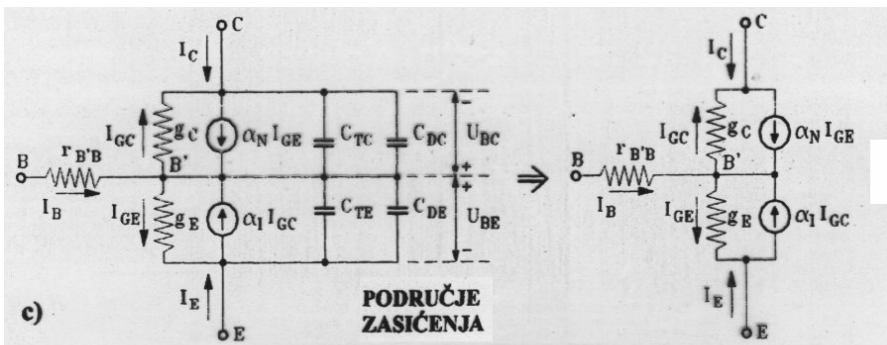
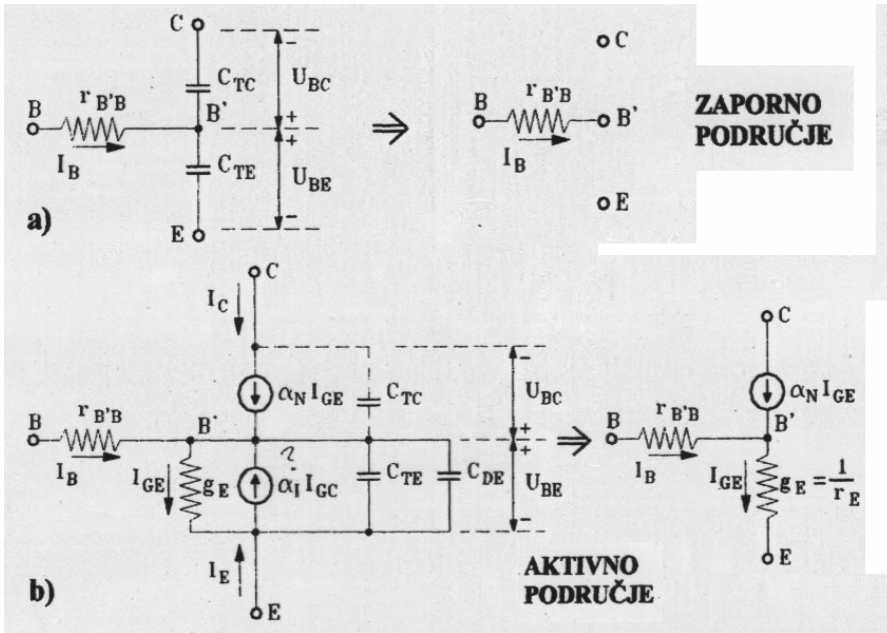
$$C_{TE} = \frac{C_{TE0}}{\sqrt{1 - \frac{U_{BE}}{U_{\Phi}}}}$$



$$U_{BC} \approx U_{B'C},$$

$$U_{BE} \approx U_{B'E},$$

$$\alpha_N I_{ES} = \alpha_I I_{CS}.$$

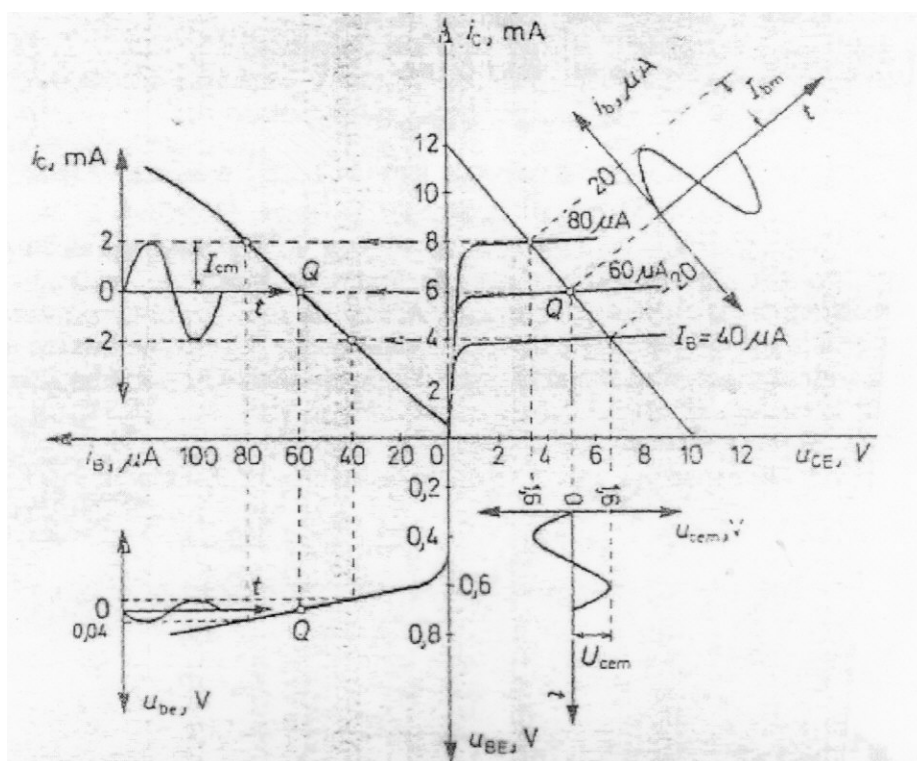


$$g_E = \frac{1}{r_E} = \frac{dI_{GE}}{dU_{BE}} = \frac{I_{ES}}{U_T} e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} \approx 40 I_{GE}.$$

I_{CS} - struja zasićenja diode B-E,
 U_{BC} - napon između baze i kolektora,
 C_{TCO} - kapacitivnost barijere pri naponu $U_{BC}=0$,
 α_1 - inverzni faktor strujnog pojačanja,
 τ_1 - inverzna vremenska konstanta diode B-C.
 $\alpha_N I_{ES} = \alpha_1 I_{CS}$

Tip tranzistora	U_Z [V]	U_γ [V]	U_{BE} [V]	U_{BEzas} [V]	U_{CEzas} [V]
Si	0	0.5	0.6	0.7	0.15
Ge	-0.1	0.1	0.2	0.3	0.1

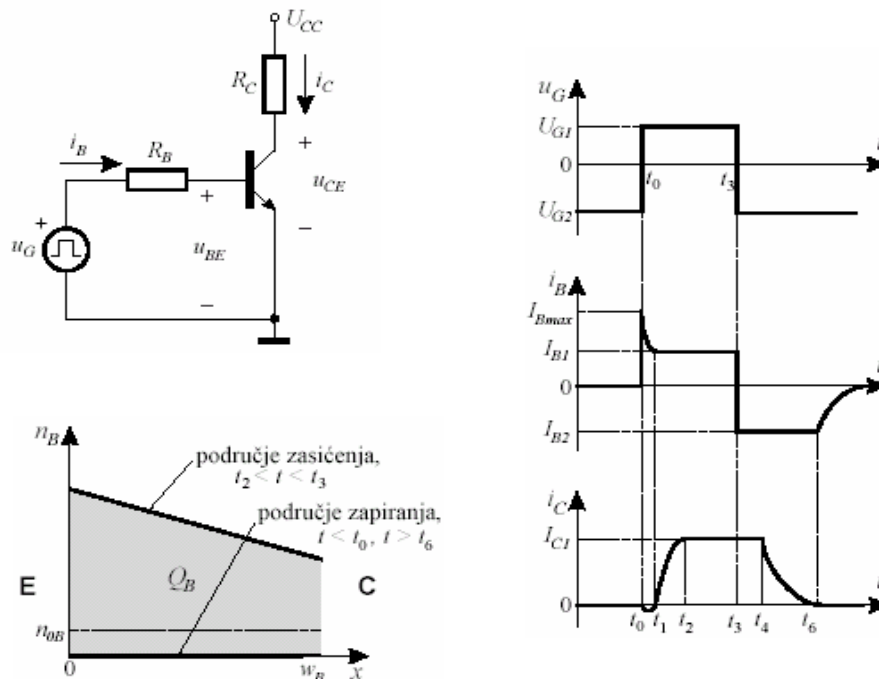
U_Z - zaporni napon U_{BE} pri kojem se tranzistor nalazi u zapornom području
 U_γ - napon koljena U_{BE} pri kojem tranzistor počinje voditi struju;
 U_{BE} - napon U_{BE} pri kojem teče nominalna struja kroz tranzistor;
 U_{BEzas} - napon U_{BE} pri kojem se tranzistor nalazi u zasićenju;
 U_{CEzas} - napon U_{CE} kada se tranzistor nalazi u zasićenju.



Slika 2.5.13. Analiza rada tranzistora u ZE spoju

Tranzistor kao sklopka

Električnim sklopkama uključujemo i isključujemo potrošač iz strujnog kruga. Kada je sklopka uključena, u strujnom krugu teče struja, a pad napona na samoj sklopki je zanemarivi mali. Uz isključenu sklopku strujni krug se prekida (struja ne teče), a sklopka preuzima na sebe sav priključeni napon. U elektroničkim sklopovima se za uključivanje i isključivanje struje kroz potrošač često koristi tranzistor. Pri tome se uključivanje i isključivanje sklopke ne vrši mehanički, već strujnim impulsima. Da bi pad napona na tranzistorskoj sklopki kada vodi bio što manji, očito je da tranzistor mora biti u području zasićenja. Također, da bi struja kroz sklopku kada je ona isključena bila najmanja, tranzistor mora biti u području zapiranja. Prema tome će strujni impulsi koji upravljaju tranzistorom, prebacivati tranzistor iz područja zapiranja (nevođenja) u područje zasićenja (vođenja), i obrnuto. Radi što manjeg opterećenja izvora impulsa potrošnja energije u ulaznom dijelu sklopa mora biti što manja. Stoga se kao najpogodnija konfiguracija nameće spoj zajedničkog emitera. Spoj zajedničkog emitera treba ulaznu baznu struju nekoliko redova veličine manju od izlazne kolektorske struje (za faktor β). Kada bi se koristio spoj zajedničke baze, ulazna emitera struja baze bi bila jednaka izlaznoj kolektorskoj struji, što znači da pobudni impuls mora biti jednake amplitude kao i izlazni. U spoju zajedničkog kolektora ulazni u_{BC} i izlazni napon u_{EC} su međusobno praktički jednaki, što opet znači da je potrebna ulazna pobuda velike amplitude. Ulazni napon u_G upravlja strujom baze i_B i prebacuje tranzistor iz stanja nevođenja u stanje vođenja i obrnuto. Bazna i kolektorska struja ne prate promjenu pobudnog napona, već nastaje kašnjenje u njihovu odzivu. Do tog kašnjenja u odnosu na pobudni napon dolazi zbog konačnog vremena potrebnog za promjenu naboja i uspostavljanja novog stacionarnog stanja.



Slika 2.5.14. Tranzistor kao sklopka, valni oblici i raspored naboja u bazi

U jednom stacionarnom stanju tranzistor ne vodi (zapiranje). Nakon toga prelazi u drugo stacionarno stanje kada vodi i radna točka tranzistora ulazi u područje zasićenja. Ponovnim isključivanjem radna točka tranzistora se vraća u područje zapiranja. Očito je da prijelaz iz jednog stacionarno stanje u drugo iziskuje ukrcavanje određene količine naboja u bazu (sjenčena ploha),

odnosno njezino izvlačenje iz baze, za što je potrebno neko određeno vrijeme. Struje i naponi u stacionarnom stanju mogu se izračunati korištenjem Ebers-Mollovih relacija. Međutim one nisu dovoljne za objašnjene prijelaznih pojava – kašnjenje odziva i postepenog prijelaza iz jednog stacionarnog stanja u drugo. Struje bi trebalo izraziti u ovisnosti o ukupnom akumuliranom naboju u tranzistoru.

2.5.3 VJEŽBA 5. BIPOLARNI TRANZISTOR

Pitanja za provjeru:

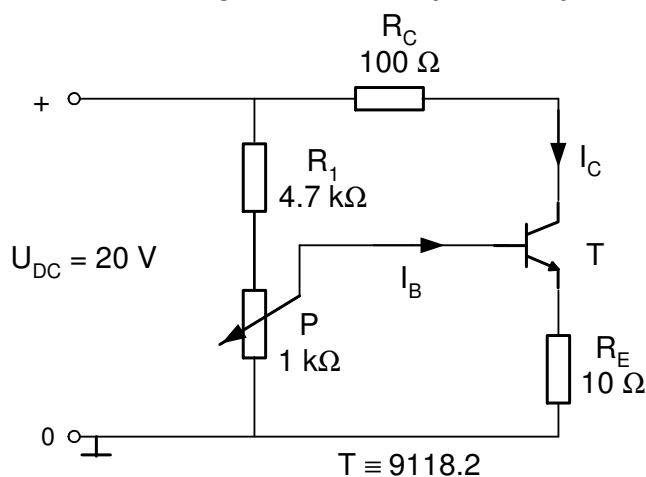
- Nacrtaj simbol bipolarnog npn tranzistora i označi elektrode.
- Objasni princip rada bipolarnih tranzistora.
- Koja su četiri područja rada bipolarnih tranzistora?
- Kako glasi relacija za struju kolektora u ovisnosti o struji baze u normalnom aktivnom području?

Zadatak 5.1.:

Ispitati ovisnost struje kolektora o struji baze, $I_C=f(I_B)$, npn tranzistora u spoju zajedničkog emitera.

Mjerni postupak:

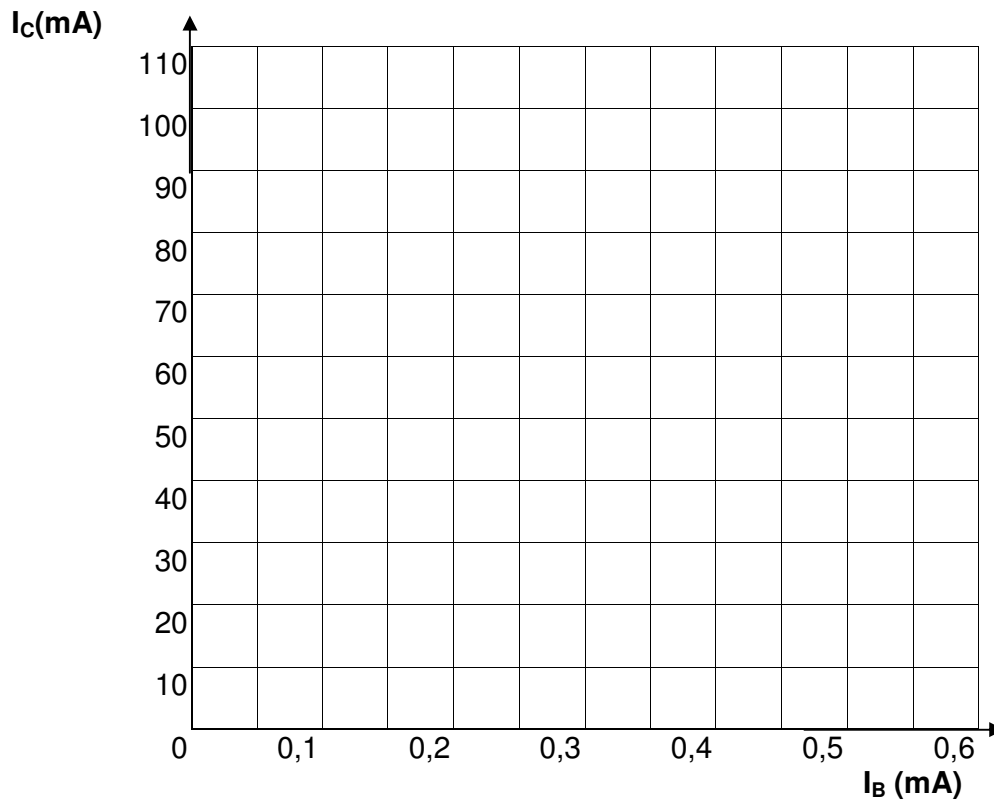
- ❖ Spojiti strujni krug prema slici V.5.1. Pomoću potenciometra P mijenjati iznos struje baze I_B prema vrijednostima u tablici V.5.1. Mjeriti odgovarajuće vrijednosti struje kolektora I_C i unijeti ih u tablicu.
- ❖ U dijagram na slici V.5.2. ucrtati graf ovisnosti struje I_C o struji I_B , $I_C=f(I_B)$.



Slika V.5.1.

I_B (mA)	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
I_C (mA)											

Tablica V.5.1.



Slika V.5.2.

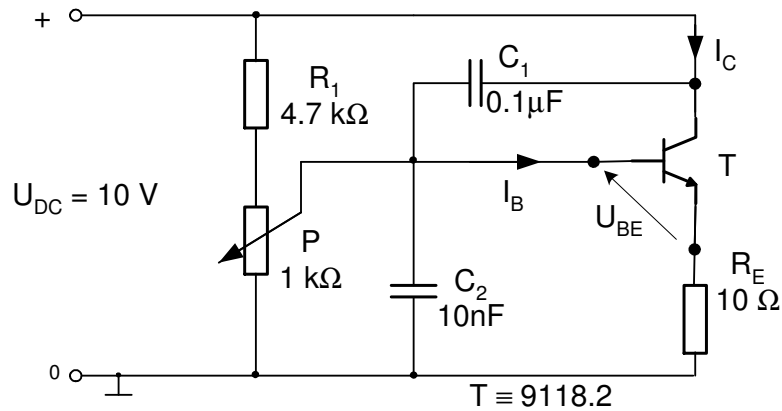
Zadatak 5.2.:

Snimiti statičke karakteristike tranzistora u spoju zajedničkog emitera.

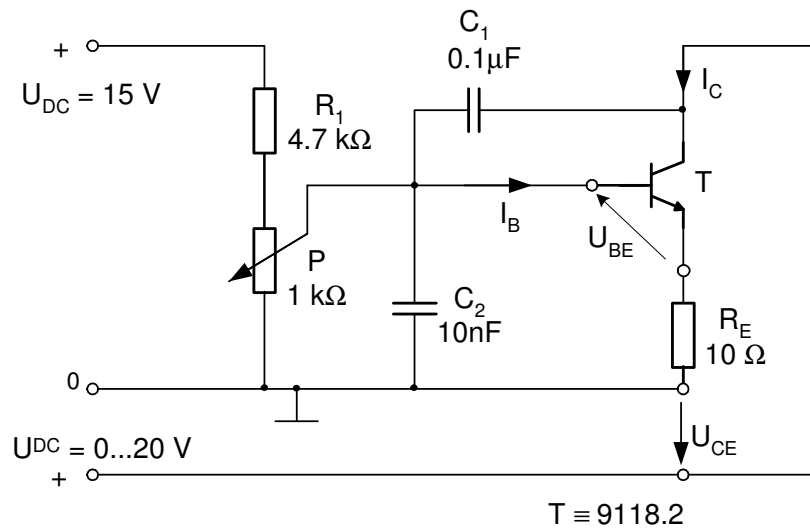
Mierni postupak:

- ❖ Spojiti strujni krug prema slici V.5.3. Pomoću potenciometra P podešavati struju baze I_B na vrijednosti prema tablici V.5.2. i mjeriti odgovarajuće vrijednosti struje kolektora I_C . Nacrtati graf ovisnosti struje kolektora o struji baze $I_C=f(I_B)$ u drugom kvadrantu dijagrama na slici V.5.5. (prijenosna karakteristika).

Napomena: Zbog zagrijavanja tranzistora kod ovog i idućih mjerenja dolazi do izvjesnih odstupanja izmjerenih vrijednosti. Da bi se taj utjecaj zagrijavanja na snimanje karakteristika tranzistora što više umanjio, bilo bi uputno da se prije svakog mjerenja struje reduciraju na nulu na barem 30 sekundi i da se tek tada nastavi s novim mjerenjem, te multimetrom što brže očita odgovarajuća vrijednost.



Slika V.5.3.



Slika V.5.4.

- ❖ Za snimanje ulazne karakteristike tranzistora koristiti shemu mjerenja prikazanu na slici V.5.3. Pomoću potenciometra P podešavati vrijednosti napona U_{BE} prema tablici V.5.3. i mjeriti odgovarajuće vrijednosti struje baze I_B . U trećem kvadrantu dijagrama na slici V.5.5. ucrtati graf ovisnosti struje I_B o naponu U_{BE} , $I_B=f(U_{BE})$.
- ❖ Spojiti strujni krug prema slici V.5.4. Mjeriti struju kolektora I_C za odgovarajuće iznose struje baze I_B i napona U_{CE} prema tablici V.5.4. Grafove ovisnosti struje kolektora I_C o naponu U_{CE} , kojima su definirane izlazne karakteristike tranzistora $I_C=f(U_{CE})$, uz četiri konstantne vrijednosti struje baze I_B , ucrtati u prvi kvadrant dijagrama na slici V.5.5.
- ❖ Strujni krug prikazan na slici V.5.4. koristiti za snimanje karakteristika povratne veze tranzistora, $U_{BE}=f(U_{CE})$. Vrijednosti struje baze I_B i napona U_{CE} podešavati prema tablici V.5.5. i unijeti izmjerene vrijednosti napona U_{BE} . Četiri karakteristike povratne veze za različite vrijednosti struje baze I_B ucrtati u četvrti kvadrant dijagrama na slici V.5.5.
- ❖ Ispitati utjecaj otpornika u krugu emitera R_E na iznose struja baze I_B i kolektora I_C . U strujnom krugu na slici V.5.3. podesiti struju kolektora I_C na vrijednost od 3 mA i na trenutak (približno 2-3 sekunde) premostiti otpornik R_E , a istovremeno promatrati iznose struja na ampermetrima.
- ❖

U _{CE} = 10 V									
I _B (μA)	0	20	40	60	80	100	120	140	160
I _C (mA)									

Tablica V.5.2.

U _{CE} = 10 V										
U _{BE} (V)	0	0,5	0,6	0,65	0,7	~ 0.71	~ 0.71	~ 0.71	~ 0.71	~ 0.71
I _B (μA)										

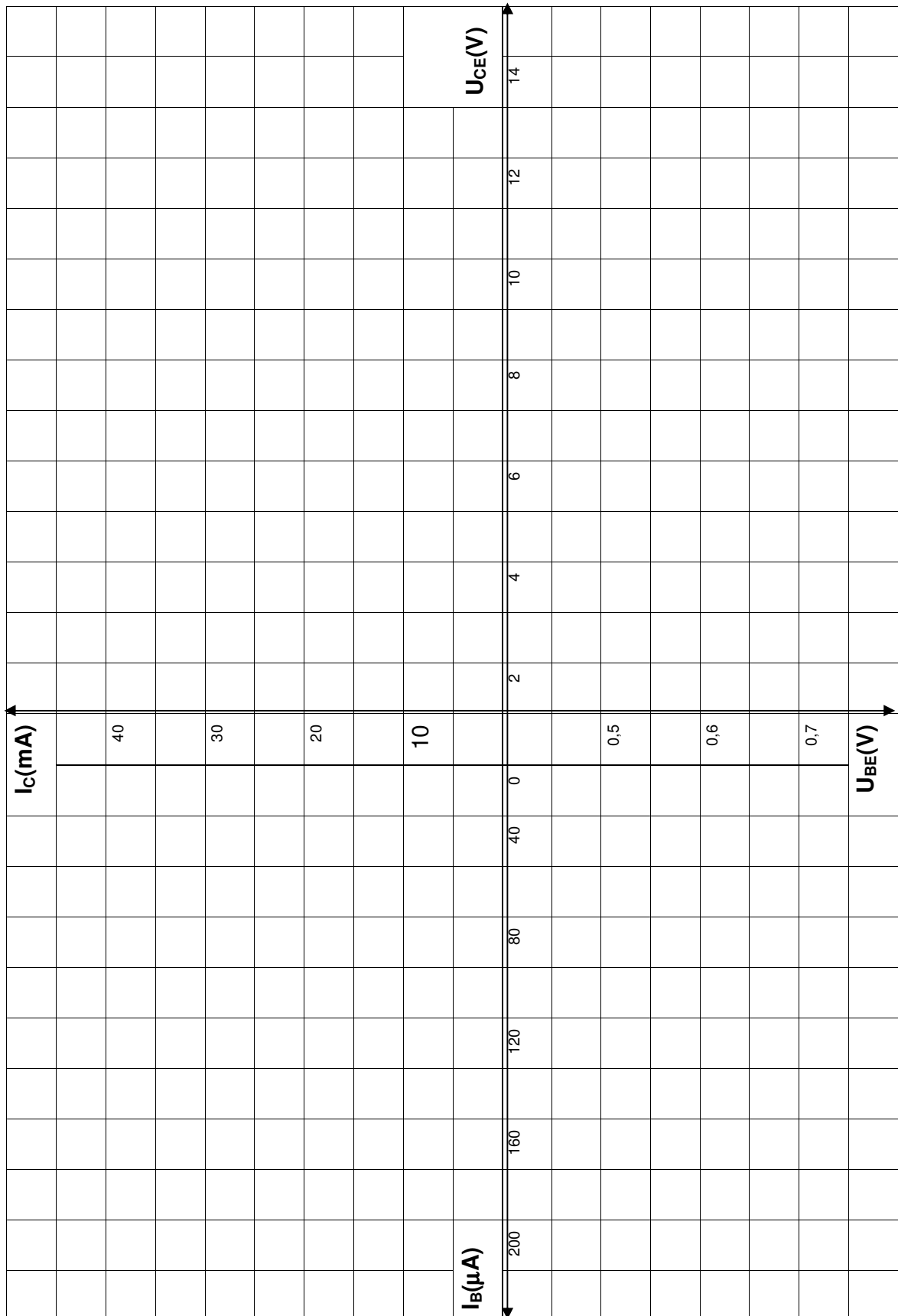
Tablica V.5.3.

U _{CE} (V)	0	0,2	0,5	2	4	6	8	10	12	14
I _C (mA) I _B = 20μA										
I _C (mA) I _B = 40μA										
I _C (mA) I _B = 60μA										
I _C (mA) I _B = 80μA										

Tablica V.5.4.

U _{CE} (V)	2	4	6	8	10	12	14
U _{BE} (V) I _B = 20μA							
U _{BE} (V) I _B = 40μA							
U _{BE} (V) I _B = 60μA							

Tablica V.5.5.



Slika V.5.5.

1.4 2.6 UNIPOLARNI TRANZISTOR

Pokušaji da se pomoću vanjskog električnog polja upravlja prolaz struje kroz poluvodiče i na taj način postigne efekt pojačanja, starijeg su datuma od bipolarnih tranzistora. Ti pokušaji datiraju iz 1934. kada je Heil došao na ideju da pomoću vanjskog polja okomitog na površinu nekog poluvodiča (telur, vanadijev-pentoksid, kadmijev sulfid) upravlja iznosom struje kroz poluvodič. Osnovna ideja tog tranzistora zasniva se na zakonima elektrodinamike, tj. na Gaussovom zakonu:

$$\operatorname{div} \vec{D} = \operatorname{div} \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \vec{E} = \sigma.$$

Vektor jakosti električnog polja u izolatorskom materijalu između pločica kondenzatora je \vec{E} , relativna dielektrična konstanta tog materijala je ε_r , dok je gustoća induciranog površinskog naboja u poluvodiču σ (As/m²). Krajem četrdesetih godina prošlog stoljeća Shockley, Pearson i Bardeen su nastavili s pokusima s germanijskim poluvodičkim materijalom ali su nailazili na poteškoće u vezi s površinom. Da bi izbjegao ove poteškoće Shockley je 1952. godine dao ideju i razradio osnovnu teoriju tranzistora s efektom polja, spojni tranzistor s efektom polja, JFET (junction field-effect transistor).

Općenito, postoje dva tipa FET-a:

1. JFET – spojni tranzistor s efektom polja,
2. MOSFET – tranzistor s efektom polja s izoliranim vratima (Metal-Oxide-Semiconductor field-effect transistor).

2.6.1 JFET

Unipolarni tranzistor je aktivni poluvodički elektronički element s tri elektrode kod kojeg u vođenju struje sudjeluju samo većinski nositelji naboja (ili samo elektroni ili samo šupljine), a protjecanjem te struje upravlja se promjenom vanjskog napona. Posljedica priključivanja tog napona na poluvodič je postojanje poprečnog električnog polja koje utječe na vodljivost poluvodiča, pa se uz naziv unipolarni tranzistor obično upotrebljava i naziv tranzistor s efektom polja ili kraće FET (Field Effect Transistor). Za razliku od bipolarnog tranzistora kod FET-a nositelji naboja koji čine struju ne prelaze preko odgovarajuće polariziranih pn spojeva među pojedinim elektrodama već teku kroz dio poluvodiča koji se naziva kanal. Ovisno o tome koji se tip nositelja naboja nalazi u kanalu, unipolarni tranzistori mogu biti p-kanalni ili n-kanalni.

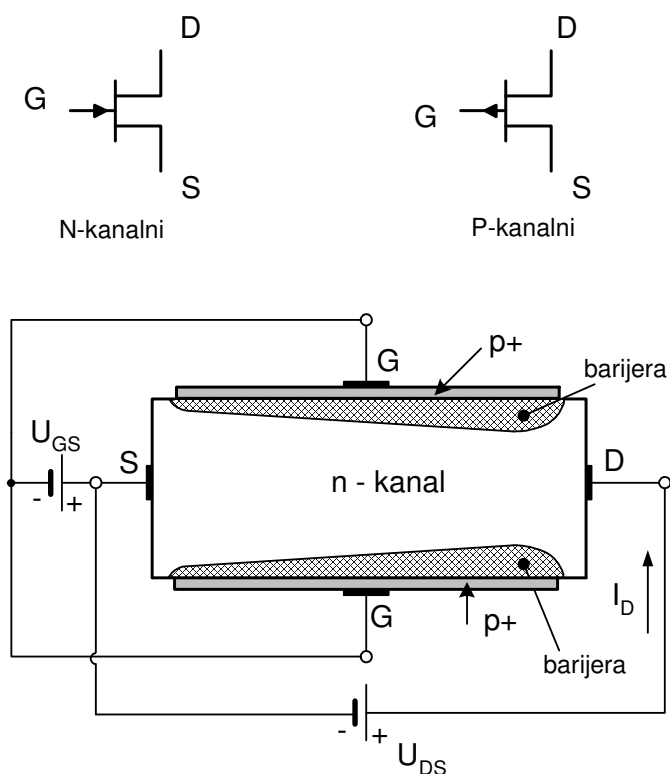
Bipolarni tranzistori su strujno upravljani elementi i s njima je moguće ostvariti veće naponsko pojačanje, te također imaju linearnije područje rada, međutim postoje mnoge prednosti FET-ova u praktičnoj primjeni:

- FET je naponski upravljani elektronički element,
- posjeduje vrlo veliku ulaznu, a nisku izlaznu impedanciju,
- ima veoma malu potrošnju, zbog toga što se kontrola protoka struje kroz kanal vrši samo mijenjanjem potencijala upravljačke elektrode FET-a i u tu svrhu ne troši se gotovo nikakva snaga sve dok su pn spojevi nepropusno polarizirani (u tom slučaju gotovo ne teče struja upravljačke elektrode I_G , u stvari teče struja reda veličine nA),
- generira relativno mali šum,
- temperaturno je stabilniji od bipolarnog tranzistora.

Na slici 2.6.1 prikazan je presjek kroz simetrični n-kanalni spojni FET s označenim elektrodama: uvod S (source), odvod D (drain) i vrata ili upravljačka elektroda G (gate). JFET prikazan na slici 2.6.1 dobiven je tako da je na podlogu od n-tipa poluvodiča difuzijom na dvije suprotne plohe umetnut p-tip poluvodiča s izrazito velikom koncentracijom šupljina, p⁺ područje. Na taj način ostvarena su dva pn spoja i oni se nepropusno polariziraju naponom U_{GS} . Na krajevima podloge n-tipa nanese su dvije metalne elektrode označene sa S i D, a između njih je priključen napon U_{DS} .

Budući da je n-područje slabije vodljivo od p^+ područja, barijere će se na tim pn spojevima širiti praktički isključivo na n-stranu, što je i označeno na slici. Kroz preostali električki neutralni dio poluvodiča n-tipa, nazvan kanal, teći će struja I_D od uvida prema odvodu, a njen iznos ovisi o naponima napajanja U_{DS} i U_{GS} . Za određeni napon U_{DS} struja će biti to manja što je napon nepropusne polarizacije iznosom viši. Naime, uz veći napon nepropusne polarizacije U_{GS} kanal će biti uži, odnosno njegov presjek manji, a otpor veći. Pri naponu $U_{DS}=0$ i $U_{GS}=0$ kanal FET-a ima najveću širinu, dok se pri nekom naponu U_{GS} i naponu $U_{DS}=0$ širina kanala jednako smanji po čitavoj njegovoj dužini. Povećanjem napona nepropusne polarizacije barijere postaju sve šire tako da kod nekog određenog napona dolazi do dodira gornje i donje barijere. **Napon U_{GS} pri kojem širina kanala postaje jednaka nuli naziva se napon dodira i označava se sa U_{GS0} .**

Naponima priključenim između odgovarajućih elektroda određena je radna točka FET-a, a sukladno tim naponima na slici 2.6.1 je označen i smjer struje odvoda I_D koji odgovara smjeru gibanja pozitivnog naboja.



Slika 2.6.1 Simboli i presjek JFET-a

Na slici 2.6.2 prikazane su statičke karakteristike n-kanalnog FET-a. Izlazne karakteristike prikazuju ovisnost struje I_D o naponu U_{DS} uz konstantni napon U_{GS} , $I_D=f(U_{DS})$. Geometrijsko mjesto točaka $U_{DS}=U_{GS}-U_{GS0}$ na izlaznim karakteristikama za pojedini napon U_{GS} predstavlja granicu između dva područja rada FET-a – triodnog područja i područja zasićenja. U triodnom području napon U_{DS} je nizak i spojni FET se ponaša kao linearni otpor čijim se iznosom može upravljati pomoću napona upravljačke elektrode U_{GS} . Područje zasićenja je karakterizirano konstantnom strujom I_D koja u tom dijelu karakteristika praktički ne ovisi o naponu U_{DS} (idealizirano). Kod realnog FET-a postoji vrlo blag porast struje odvoda u području zasićenja. Nagao porast struje odvoda kod viših napona rezultat je proboja pn barijere upravljačka elektroda – kanal u blizini odvoda. Kada se pomoću FET-a želi realizirati pojačalo radnu točku treba postaviti u područje zasićenja. Prijenosna karakteristika definirana je ovisnošću struje I_D o naponu U_{GS} , $I_D=f(U_{GS})$.

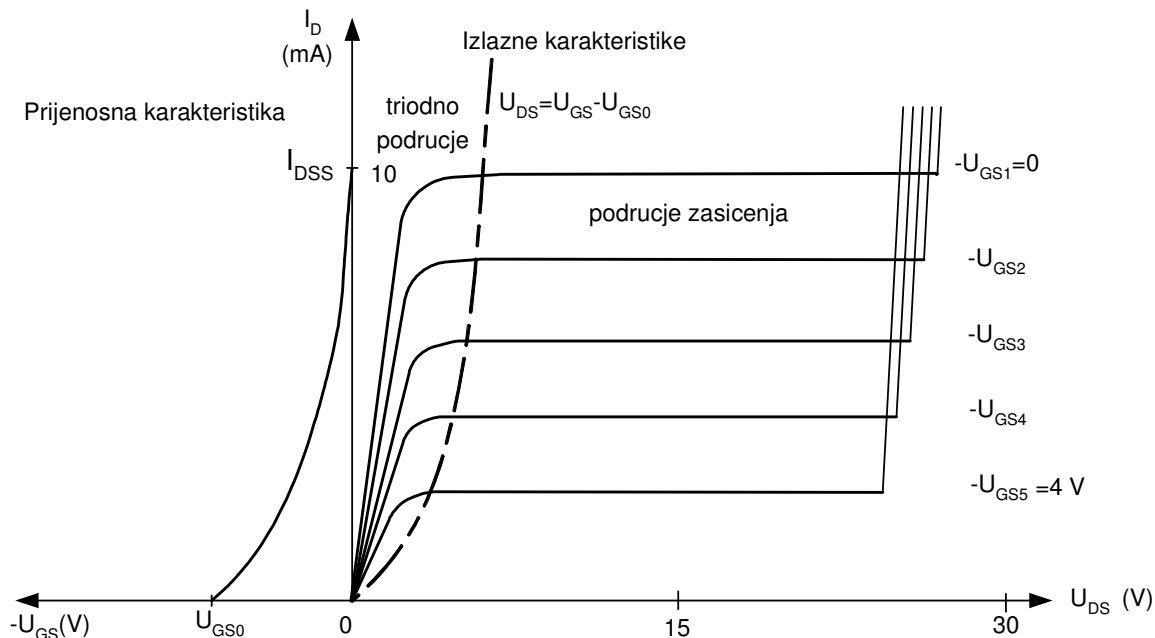
U području zasićenja vrijedi:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}} \right)^2 \quad 2.26$$

Struja $i_D = i_D(u_{DS}, u_{GS})$ te njena parcijalna derivacija po u_{GS} predstavlja vrlo važan parametar FET-a koji se naziva strmina:

$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_{U_{DS} = konst.} = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} \quad 2.27$$

Strmina je vrlo važan parametar FET-a jer je njoj direktno proporcionalno naponsko pojačanje, a može se očitati i iz izlaznih karakteristika kao omjer promjene struje I_D izazvane promjenom napona U_{GS} uz konstantni napon U_{DS} . Ulazni dinamički otpor tranzistora r_{GS} (gate-source resistance) može se smatrati beskonačnim jer je struja upravljačke elektrode praktično zanemariva (reda veličine nanoampera ili manja), budući da se radi o zaporno polariziranom pn-spoju.



Slika 2.6.2 Prijenosna i izlazne karakteristike FET-a

2.6.2 MOSFET

Kod MOSFET-a (Metal-Oxide-Semiconductor field-effect transistor) ili IGFET (insulated gate field-effect transistor) upravljačka elektroda je izolirana od podloge tankim slojem silicijevog dioksida za razliku od JFET-a kojeg je upravljačka elektroda nanosena direktno na podlogu. Rad MOSFET-a ovisi o nastajanju tzv. inverzijskog sloja na podlozi. MOSFET može biti izveden s p-kanalom na podlozi n-tipa ili s n-kanalom na podlozi p-tipa.

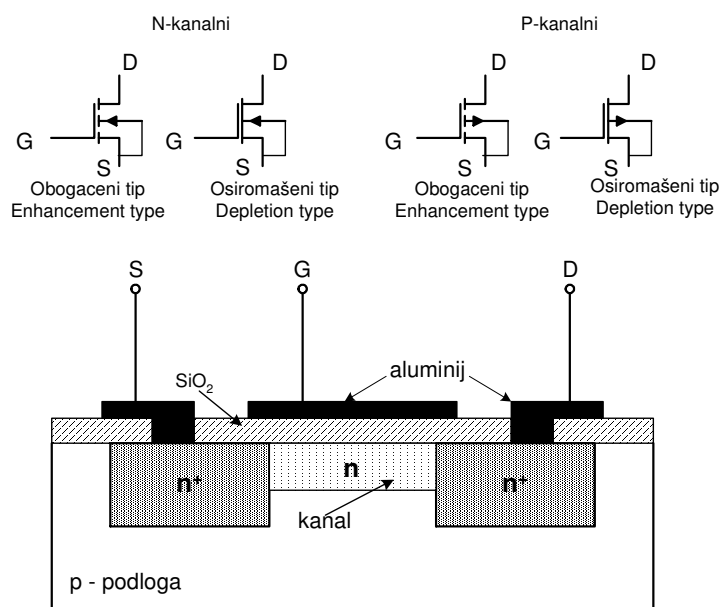
Na slici 2.6.3 prikazan je presjek n-kanalnog MOSFET-a. Podloga je silicij p-tipa s relativno malom koncentracijom primjese na koju se nanosi sloj silicijeva dioksida SiO_2 debljine približno $0,1 \mu m$. Zatim se određenim planarnim postupcima otvaraju tzv. difuzijski prozori u oksidnom sloju kroz koje se unose primjese n-tipa vrlo velike koncentracije (n^+) koje formiraju područja uvoda i odvoda.

Dio poluvodiča između uvoda i odvoda označen je kao kanal, a kroz njega struja može teći jedino ako su u njemu nosioci naboja istog tipa kao i većinski nosioci područja uvoda i odvoda. To znači da je za n-kanalni MOSFET uz površinu između p-podloge i izolatora u kanalu nužno stvoriti višak elektrona, odnosno uspostaviti inverzijski sloj između uvoda i odvoda.

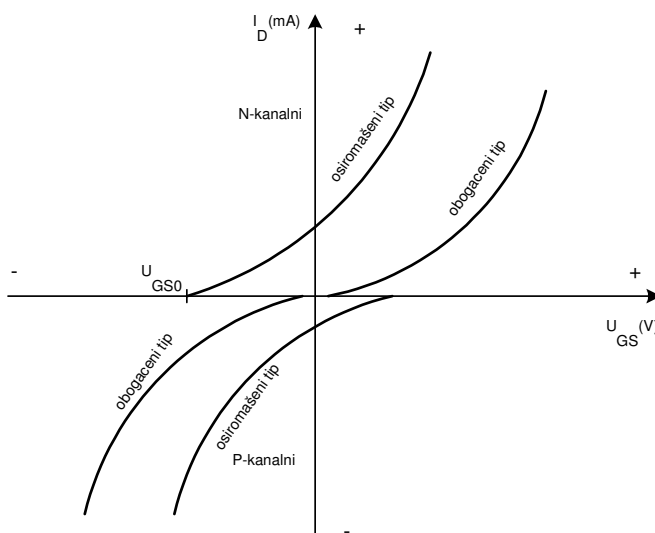
Izlazne karakteristike MOSFET-a su istog oblika kao i za JFET prikazane na slici 2.6.2. U triodnom području vrijedi:

$$I_D = K \left[(U_{GS} - U_{GS0}) U_{DS} - \frac{1}{2} U_{DS}^2 \right] \quad U_{DS} < U_{GS} - U_{GS0}, \quad 2.28$$

gdje je $K = \mu_n \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \cdot \frac{W}{L}$, μ_n površinska pokretljivost slobodnih elektrona u kanalu između uvoda i odvoda, ϵ_{ox} je dielektrična konstanta, t_{ox} je debljina sloja silicij-dioksida iznad područje kanala, W je širina a L duljina kanala.



Slika 2.6.3 Simboli MOSFET-a i presjek nMOS-a



Slika 2.6.4 Prijenosne karakteristike osiromašenog i obogaćenog tipa

U području zasićenja vrijedi:

$$I_D = \frac{K}{2}(U_{GS} - U_{GS0})^2, \quad U_{DS} \geq U_{GS} - U_{GS0}. \quad 2.29$$

Također možemo definirati u područje zasićenja pri $U_{GS}=0$:

$$I_{DSS} = \frac{K}{2}(-U_{GS0})^2 \quad I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}}\right)^2. \quad 2.30$$

Općenito, postoje dva tipa MOSFET-a – obogaćeni i osiromašeni tip. Kod osiromašenog tipa i pri naponu $U_{GS}=0$ postoji formiran inverzijski kanal između uvoda i odvoda. Takav MOSFET može raditi i kad se kanal osiromašuje nositeljima naboja, tj. i za negativne napone U_{GS} ako se radi o n-kanalnom MOSFET-u. **Napon U_{GS} pri kojem kanal prestaje biti vodljiv naziva se napon praga U_{GS0} (threshold voltage).**

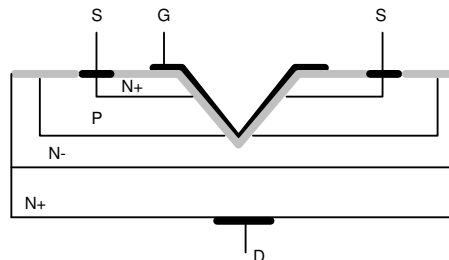
Za n-kanalni MOSFET osiromašenog tipa napon U_{GS0} je negativan, a za obogaćeni tip pozitivan. Značajka n-kanalnog MOSFET-a osiromašenog tipa je u tome što struja I_D može teći i pri negativnim naponima U_{GS} , pri čemu mora biti ispunjeno $U_{GS0} < U_{GS} < 0$, te pri pozitivnim naponima U_{GS} . To znači da n-kanalni MOSFET osiromašenog tipa može raditi u osiromašenom modu (U_{GS} negativan, depletion mode) i u obogaćenom modu (U_{GS} pozitivan, enhancement mode). Za razliku od MOSFET-a osiromašenog tipa, kroz kanal MOSFET-a obogaćenog tipa struja I_D može teći samo uz pozitivne napone U_{GS} , pri čemu treba biti ispunjeno $U_{GS} > U_{GS0}$, što znači da on može raditi samo u obogaćenom modu (enhancement mode).

Kod p-kanalnog MOSFET-a podloga je silicijski poluvodič n-tipa, a područja uvoda i odvoda p⁺-tipa. Napon praga p-kanalnog MOSFET-a obogaćenog tipa je negativan što znači da može raditi samo u obogaćenom modu. Za osiromašeni tip napon praga je pozitivan pa osiromašeni tip može raditi i za pozitivne i negativne napone U_{GS} .

2.6.3 VFET i VMOS

Vertikalni FET (VFET) je unipolarni tranzistor snage posebne izvedbe namijenjen pojačanju snage. Kod ovih tranzistora uvod i odvod nalaze se na suprotnim stranama poluvodiča pa je kanal vertikalan. Kod ovih tranzistora struja upravljačke rešetke I_G nije zanemariva, kreće se u granicama od nekoliko miliampera pa do reda veličine ampera kod tranzistora velikih snaga. Ulazni otpor je reda veličine nekoliko kilooma. Napon U_{DS} može iznositi do nekoliko stotina volta, a struja I_D do nekoliko desetaka ampera uz snage od nekoliko stotina vata.

Isto tako vertikalni MOS (VMOS) je unipolarni tranzistor snage namijenjen pojačanju snage.



Slika 2.6.5 N-kanalni VMOS

Povećanje struje odvoda kod unipolarnog tranzistora može se postići ako se poveća omjer širine i duljine kanala (W/L , relacija). Budući da zbog tehnoloških postupaka proizvodnje unipolarnih tranzistora uz dobar prinos u proizvodnji, nije moguće osigurati duljinu kanala bitno manju od 3 μm , visoki iznos omjera W/L se može postići samo velikom širinom kanala. To je posljedica

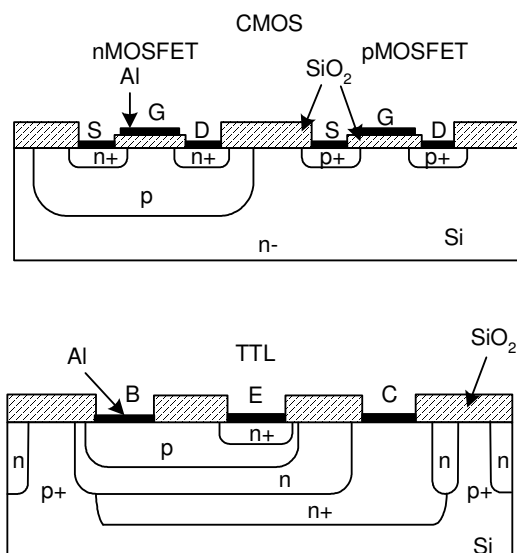
činjenice da je MOSFET površinski, a ne volumeni element kao bipolarni tranzistor. Ovaj problem je riješen u novije vrijeme pojavom VMOS-a. Za dobivanje VMOS-a primjenjuje se tehnika V-žlijeba kao što je prikazano na slici 2.6.5. Radni naponi U_{DS} ovih tranzistora iznose 1000V, struje odvoda i do 500A uz dozvoljeni utrošak snage i do 2500W.

2.6.4 CMOS

Postoji nekoliko tehnoloških procesa proizvodnje MOSFET tranzistora. To su:

- standardni proces (n-kanalni i p-kanalni),
- proces ionskog implementiranja (Ion-Implantation Process),
- Silicon-Gate_Process,
- SOS (Silicon on Sapphire) Process,
- CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) Process.

Slika 2.6.6 prikazuje tehnološki proces za dobivanje CMOS i TTL (tranzistorsko-tranzistorska logika) integriranih krugova.



Slika 2.6.6 CMOS i TTL procesi

Danas je sigurno najinteresantnija CMOS tehnologija koja čini više od 90% ukupne proizvodnje mikroelektroničkih sklopova. Poboljšanje svojstava integriranih CMOS krugova je rezultat skaliranja MOS tranzistora. *Skaliranjem nazivamo smanjivanje dimenzija tranzistora omogućeno napretkom tehnologije što rezultira manjom površinom, tj. većom gustoćom pakiranja komponenata po mikroelektričkom sklopu (čipu), većom brzinom rada i manjom disipacijom snage po tranzistoru.* No sada se sigurno postavlja logičko pitanje: Do kada će se skaliranje nastaviti? Očito taj trend ne može ići u beskonačnost, jer uvijek moramo doći do dimenzija usporedivim s dimenzijama kristalne rešetke materijala u kojem je tranzistor realiziran, te do kvantnih i statističkih efekata koji utječu na fiziku rada tranzistora i njegovu upotrebljivost kao elektroničke sklopke. Današnjom tehnologijom već se mogu realizirati dimenzije od 100 nm, što omogućuje procesiranje integriranih sklopova s više stotina milijuna tranzistora. Litografski postupak je taj koji određuje najmanju dimenziju koja se tehnološki može realizirati, a koja je kod MOS tranzistora dužina upravljačke elektrode (gate). Dužina upravljačke elektrode određuje dužinu kanala tranzistora koja se definira kao razmak između uvoda i odvoda i koja je kontrolirana upravljačkom elektrodom. Dužina kanala je najznačajniji parametar tranzistora i tipično je za faktor 1,5-2 puta manja od minimalne dimenzije litografije. Iz ovoga slijedi da će CMOS generacija procesirana u 100 nm rezoluciji litografije imati efektivnu dužinu kanala oko 50 nm što će rezultirati frekvencijom jediničnog strujnog pojačanja

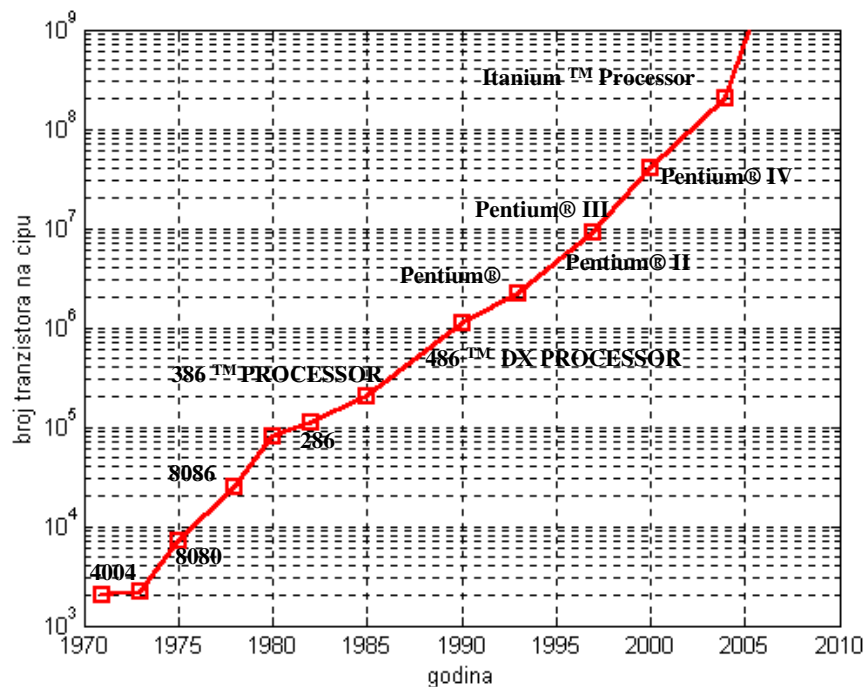
(cut-off frequency) neopterećenog tranzistora iznad 100 GHz i vremenima kašnjenja neopterećenih digitalnih sklopova oko 10 ps. S obzirom da se u tranzistoru moraju sačuvati jednaki relativni odnosi geometrijskih dimenzija kako bi se sačuvao jednak odnos električnog polja, skaliranje dužine kanala povlači i skaliranje tankog oksida (gate oxide) te širina između osiromašenih područja između uvoda i podloge te odvoda i podloge. Ako bi naponi na kojima tranzistor radi ostali nepromijenjeni, električno polje u tankom oksidu i u osiromašenim područjima bi se povećavalo što bi dovelo ili do tuneliranja nositelja kroz ta područja ili do proboja. Također, disipacija snage tranzistora bi se povećala ukoliko bi naponi ostajali isti zbog veće brzine rada pojedinog tranzistora i većeg broja tranzistora u čipu. Stoga, zbog posljedica smanjivanja dimenzija tranzistora potrebno je smanjivati i napone. Također, da bi se efekt kratkog kanala držao pod kontrolom, potrebno je smanjivati debljinu tankog oksida proporcionalno dužini kanala. Debljina oksida mora biti 1/50 do 1/25 dužine kanala da bi upravljačka elektroda zadovoljavajuće kontrolirala naboj u kanalu. Drugim riječima to znači da debljina oksida mora iznositi 1-2 nm za dužinu kanala 50 nm.

2.6.4.1 Projektiranje mikroelektroničkih sklopova

Mikroelektronički sklopovi danas su glavne sastavne komponente elektroničkih uređaja. Razlikuju se po elektroničkim funkcijama, složenosti i po drugim kriterijima. Po načinu projektiranja mogu se podijeliti u dvije grupe:

1. standardne ili potpuno projektirane (custom ili fullcustom),
2. projektirane po narudžbi (semicustom).

Metoda potpunog projektiranja je klasična metoda koja se koristi od početka razvoja mikroelektroničkih sklopova. Pojedina sklopovska svojstva se optimiraju podešavanjem dimenzija praktički svih komponenata. Pristup je vrlo zahtjevan i provode ga tvrtke koje su specijalizirane za proizvodnju mikroelektroničkih sklopova koji su dovoljno univerzalni da se mogu koristiti u velikom broju primjena, te imaju osiguran veliki volumen prodaje.



Slika 2.6.7 Moorov zakon rasta složenosti mikroprocesora

Osim analognih i digitalnih sklopova nižih stupnjeva integracije (pojačala, komparatori, stabilizatori, multivibratori, logički sklopovi) na ovaj se način projektiraju i sklopovi najvišeg stupnja integracije poput mikroprocesora i poluvodičkih memorija. Sklopovi se nazivaju standardnim, proizvode se pod određenim imenom, a na tržištu se prodaju raznim kupcima.

Intenzivan razvoj poluvodičke tehnologije omogućuje udvostručenje broja tranzistora po čipu svake 1,5 do 2 godine. Od svih mikroelektroničkih sklopova najbrže su se razvijali mikroprocesori, slika 2.6.7. U prosjeku se svake dvije godine pojavljuje nova generacija i udvostručuje frekvencija rada. Uz smanjenje dimenzija pojedinih tranzistora na povećavanje složenosti mikroprocesora utječe i porast veličine čipa prosječno 7% godišnje. Trenutno mikroprocesori se izvide u 0,13 μm -skoj tehnologiji s minimalnom dužinom kanala od 60 nm i sadrže više stotina milijuna tranzistora na površini čipa 300–400 mm^2 . Rade s naponom napajanja od 1,3 V na frekvenciji višoj od GHz i disipiraju preko 100 W. Hijerarhijski pristup u modularnoj strukturi primjenjuje se pri projektiranju mikroprocesora. Pri projektiranju optimiraju se parametri poput brzine, snage, površine i sl. U CMOS tehnologiji zadane logičke funkcije mogu se realizirati različitim sklopovskim tehnikama. Najčešće upotrebljavane tehnike su **statički komplementarni i dinamički sklopovi**. U statički komplementarnim sklopovima logički složeni sklopovi se realiziraju s istim brojem nMOS i pMOS tranzistora. Statički sklopovi su stabilni, jer je izlaz izravno vezan na napon napajanja (logička 1) ili na masu (logička 0), te se odlikuju vrlo malom potrošnjom. Nedostatak im je sporiji rad zbog velikog broja pMOS tranzistora. U dinamičkim sklopovima logičku funkciju određuju samo nMOS tranzistori. Rad sklopa upravljaju impulsi ritma preko para nMOS i pMOS tranzistora. U određenim uvjetima izlaz je u stanju visokog otpora i njegov visoki napon podržava isključivo naboj na parazitnom kapacitetu. Zbog toga su dinamički sklopovi osjetljivi na smetnje, ali su brži od statičkih zbog manjeg broja pMOS tranzistora.

Brzinu rada današnjih mikroprocesora bitno određuju prospojne linije. Lokalne linije povezuje susjedne sklopove, a globalne linije pojedine module. Skaliranjem lokalne se linije skraćuju, a globalne se produžuju zbog povećavanja dimenzija čipova. Kašnjenje signala po liniji raste s njezinom RC konstantom. Tehnološki se RC konstante linija smanjuju primjenom vodljivijih materijala, bakar umjesto aluminijska, i dielektrika male dielektrične konstante (low-k materials). Kašnjenje na linijama najkritičnije je u vođenju impulsa ritma. Zbog velikog broja sklopova na koji se razvode impulsi ritma, te su linije opterećene velikim parazitnim kapacitetima. Rezultat je fazni pomak impulsa ritma (clock skew) na različitim dijelovima sklopa koji može prouzročiti pogrešan rad, zbog čega je potrebno pri projektiranju sklopa ovome posvetiti posebnu pažnju.

Disipirana snaga mikroprocesorskog čipa može se izraziti s relacijom:

$$P = C \cdot U_{DD}^2 \cdot f, \quad 2.31$$

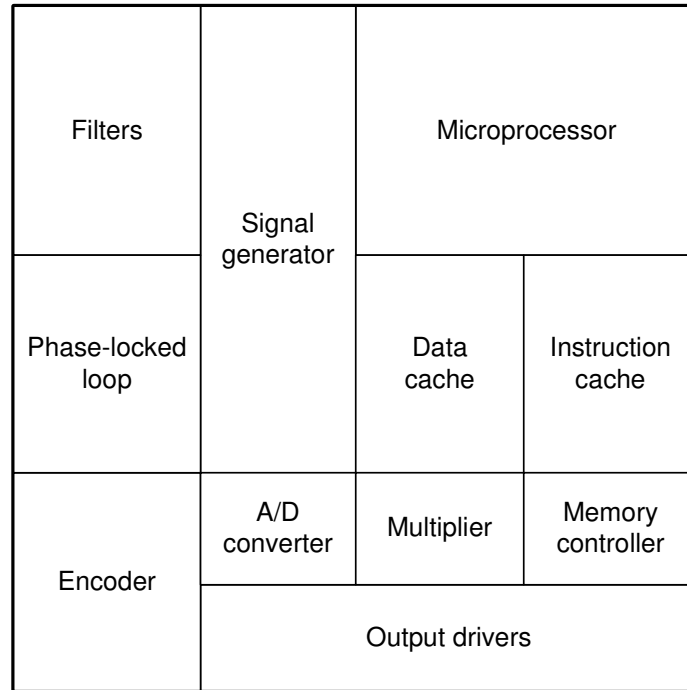
gdje je C parazitni kapacitet, U_{DD} napon napajanja, a f radna frekvencija. S povećavanjem radne frekvencije raste i disipirana snaga. Održavanja disipirane snage u dopuštenim granicama postiže se smanjenjem napona napajanja, ali to predstavlja kompromisno rješenje jer smanjenje napona napajanja negativno utječe na brzinu rada sklopa.

Upotrebom velikog broja tranzistora današnji mikroprocesori osim aritmetičko-logičkih, upravljačkih i ulazno-izlaznih jedinica sadrže sve veće **priručne (cache) memorije**, kojima se postiže veće brzine rada. Kod mikroprocesora upotrebljavaju se upisno-ispisne statičke memorije (**static random-access memory - SRAM**), u kojima je jedinična memorijska ćelija bistabil. Priručne memorije novih mikroprocesora veće su od MB.

Poluvodičke memorije izvide se i kao samostalni standardni mikroelektronički sklopovi. Uz statičke, proizvode se i **dinamičke memorije (DRAM)** u kojima se podatak jedinične ćelije pohranjuje u obliku naboja na kapacitetu. Tehnologije izrade SRAM-ova ista je kao i za mikroprocesore. Pri proizvodnji DRAM-ova upotrebljavaju se specijalni tehnološki postupci koji osiguravaju realizaciju velikog kapaciteta memorije na maloj površini pločice (1 GB memorije). Uz

RAM-ove rade se i **ispisne memorije (read-only memory – ROM)**. Posebnu skupinu čine **programibilni ROM-ovi (EPROM, EEPROM, Flash)**.

Početak osamdesetih godina započelo je projektiranje mikroelektroničkih sklopova po narudžbi za točno određenu primjenu i za određenog korisnika (application specific integrated circuit – ASIC). U njihovom projektiranju upotrebljavaju se jednostavnije automatizirane metode koje uz primjenu specifičnih programskih alata osiguravaju kraće trajanje projektiranja i nižu cijenu sklopa, što je naročito pogodno za projektiranje digitalnih sklopova. U ovu skupinu ubrajaju se programibilni integrirani sklopovi ili električni programibilna logička polja (field-programmable gate array – FPGA).



Slika 2.6.8 Modularna struktura sklopa projektiranog pristupom sustava na čipu

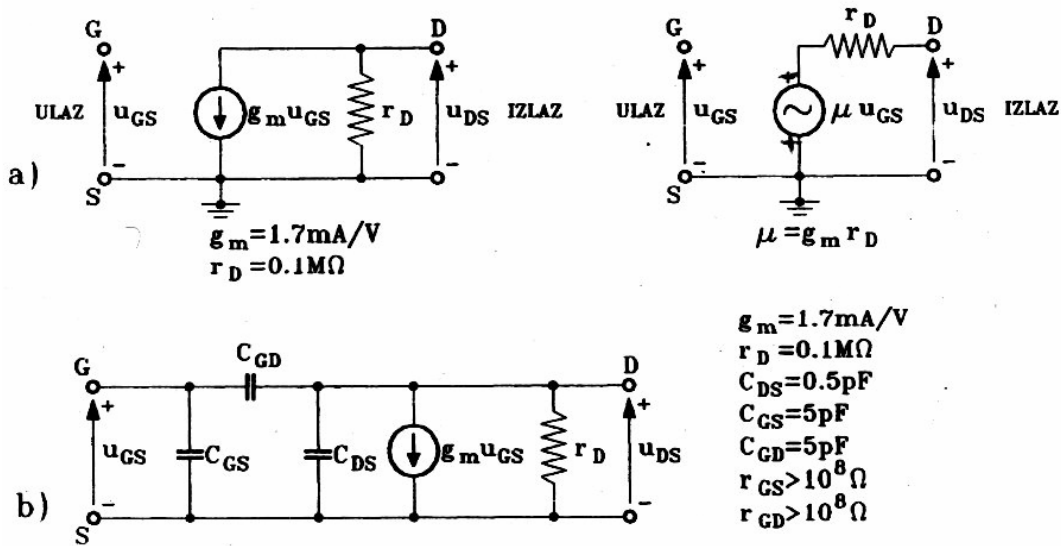
Mikroelektronički sklopovi s više od 100 milijuna tranzistora po čipu preveliki su za klasične ASIC primjene. Za tako složene sklopove uveden je novi pristup projektiranja koji se naziva sustav na čipu (system on chip – SoC). Uz veliki broj tranzistora projektanti se suočavaju s dva problema:

1. kako "zaposliti" sve tranzistore,
2. kako projektirati složeni sklop u relativno kratkom vremenu.

Naime, jedan od glavnih kriterija pri projektiranju mikroelektroničkog sklopa je vrijeme njegove realizacije i pojava na tržištu (time to market). Kod ovoga pristupa složeni sklop ne projektira više jedan tim već se projekti pojedinih modula kupuju od različitih proizvođača i ugrađuju u sustav. Ovaj pristup inicirao je pojavu velikog broja malih projektantskih tvrtki koje su se specijalizirale za razvoj modula predviđenih za ugradnju u mikroelektroničke sustave tipa sustav na čipu. Budući da moduli razvijeni u nekoj tvrtki predstavljaju njihovo **intelektualno vlasništvo (intellectual property – IP)**, ta se kratica pojavljuje u nazivima modula, IP moduli. Ovim pristupom realiziraju se sklopovi složenih sustava u pojedinim elektroničkim primjenama poput *telekomunikacija, obrade signala (DSP)* i sl. Kao što se vidi sa slike 2.6.8, sustavi na čipu sadrže vrlo različite dijelove: digitalne module poput mikroprocesorskih jezgri i ugrađenih memorija, analognih modula poput RF

sklopova, modula s kombiniranim analognim i digitalnim funkcijama (mixed signal). Pojava ovih modula potiče sve više razvoj metodologije projektiranja analognih sklopova.

2.6.5 Nadomjesni modeli unipolarnih tranzistora



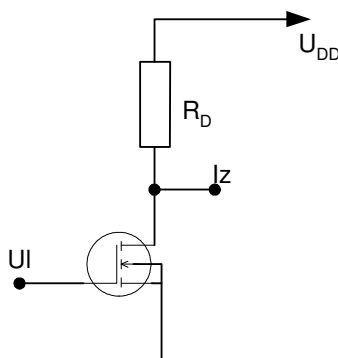
Slika 2.6.9. Nadomjesni modeli unipolarnih tranzistora: a) nadomjesni model pri niskim frekvencijama u režimu malih signala b) nadomjesni model pri visokim frekvencijama

Za nadomjesni model na slici a) vrijedi sljedeći izraz za trenutnu struju odvoda:

$$i_d = g_m u_{gs} + \frac{u_{ds}}{r_D}$$

2.6.6 Unipolarni tranzistor kao sklopka

Sklopka s MOSFET-om

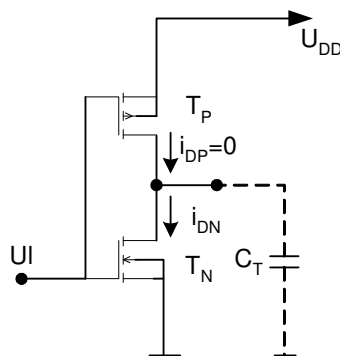


Na slici je prikazana sklopka s n-kanalnim MOSFET-om obogaćenog tipa. Za ulazni napon 0V tranzistor ne vodi (isključena sklopka), te je izlazni napon jednak naponu napajanja U_{DD} . Uz

dovoljno veliki pozitivni ulazni napon (reda veličine U_{DD}) tranzistor postaje vodljiv i izlazni napon se smanjuje na iznos maloga napona U_{DS} . Tranzistor se može smatrati uključenom sklopkom.

CMOS sklopka

U digitalnim sklopovima se umjesto otpora R_D primjenjuje drugi tranzistor. Ako je taj drugi tranzistor T_P p-kanalni MOSFET koji predstavlja komplement tranzistora T_N dobili smo CMOS sklopku.



Ako je ulazni napon $0V$, tranzistor T_N ne vodi a tranzistor T_P vodi, jer je između uvoda i odvoda T_N tranzistora veliki otpor oko $10^{10} \Omega$, a između uvoda i odvoda tranzistora oko $1 k\Omega$. Izlaz je praktički odspojen od zajedničke točke i spojen na napon napajanja U_{DD} te sklop djeluje kao isključena sklopka. Kada je ulazni napon U_{DD} , tada T_P (otpor između uvoda i odvoda je oko $10^{10} \Omega$) a T_N vodi (otpor između uvoda i odvoda je oko $1 k\Omega$) te sklop djeluje kao uključena sklopka. Ovaj sklop predstavlja CMOS inverter i uz kapacitivno opterećenje brži je od obične MOSFET tehnologije. Kod kapacitivnog opterećenja ovoga sklopa postoji samo dinamička disipacija snage. Kapacitet se uvijek nabija ili izbija kroz samo jedan od tranzistora, te je dinamička disipacija sklopa:

$$P_D = f \cdot C \cdot U^2.$$

2.6.7 Budući razvoj i druge tehnologije

CMOS sklopovi približavaju se svojim fizičkim ograničenjima, no zalihosti u današnjim tranzistorima dovoljne su da produlje napredak ovih elemenata za još sigurno nekoliko generacija. Želi li se izvući maksimum iz standardne CMOS tehnologije bit će potrebno upotrijebiti nove složene sheme kao što su: više napona praga na istom čipu, optimiranje nehomogenog profila primjesa u kanalu, kontrola debljine i tankog oksida do razine atoma, kontrola raspodjele primjesa u uvodu i odvodu. Neka ograničenja standardne CMOS tehnologije moguće će biti izbjeći uporabom naprednih MOS koncepta. Upotrebom silicija na izolatoru (silicon on insulator – SOI) mogu se smanjiti parazitski kapaciteti tranzistora što povlači manju disipaciju snage i veću brzinu rada uz istu rezoluciju litografije. Isto tako uporabom silicij-germanijskih (silicon-germanium – SiGe) slojeva može se postići povećavanje pokretljivosti elektrona i šupljina i time veće brzine rada uz tehnologiju koja je kompatibilna silicijskoj tehnologiji. MOS strukture s dvostrukom upravljačkom elektrodom (double gate MOS) mogu potpuno eliminirati efekt kratkog kanala jer se upravljačka elektroda nalazi s obje strane kanala i sprječava djelovanje odvoda na uvod (vertikalna MOS struktura).

Osim CMOS tehnologije koja je danas tehnologija broj jedan u svijetu s par riječi dat će se kratak osvrt na neke od tehnologija koje su izuzetno bitne u telekomunikacijskim i informatičkim

sustavima. **Tehnologija tekućih kristala (LC)**, koja se temelji na apsorpciji ili refleksiji svjetlosti određene polarizacije. Kada se napon narine na LC uređaj pojedini kristali usmjeravaju se pod djelovanjem električnog polja. Ako su kristali ortogonalni s polarizacijom optičkog nosioca, svjetlo će se reflektirati, inače prolazi kroz tekuće kristale. **Elektroholografška tehnologija**, koja se temelji na uporabi preklapajuće matrice koju čine redovi i stupci feroelektričkih kristala, kao što su *litij niobat* (lithium niobate) ili *potassium lithium tantalate niobate*. U kristale su utisnuti hologrami koji mijenjaju optička svojstva kristala kada se narine električno polje.

Također u novije vrijeme su sve brojnija istraživanja bazirana na **molekulama (molekularne memorije)** i neki znanstvenici smatraju da će to biti "*tehnologija budućnosti*".

"A molecular computer will enable us to do things we cannot even imagine now."
James Heath, UCLA.

2.6.8 VJEŽBA 6. UNIPOLARNI TRANZISTOR

Pitanja za provjeru:

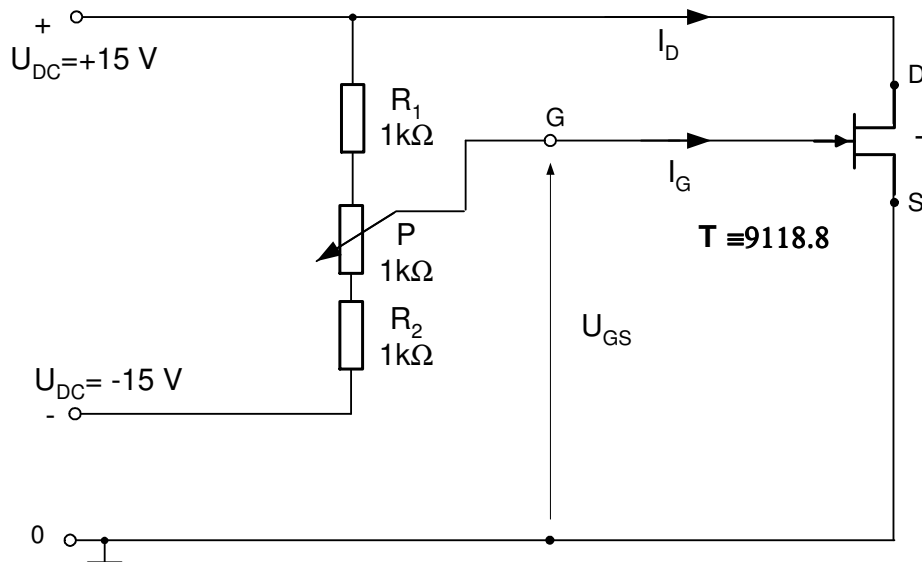
- Nacrtaj simbol n-kanalnog FET, te označi elektrode?
- Što je to napon dodira kod JFET-a?
- Koji je tip i u kojem modu može raditi n-kanalni MOSFET ako ima napon praga $U_{GS0}=-4V$?
- Definiraj strminu g_m .

Zadatak 6.1.:

Ispitati utjecaj napona U_{GS} na struju upravljačke elektrode I_G i struju odvoda I_D . Nacrtati graf ovisnosti $I_G=f(U_{GS})$ i prijenosnu karakteristiku $I_D=f(U_{GS})$.

Mjerni postupak:

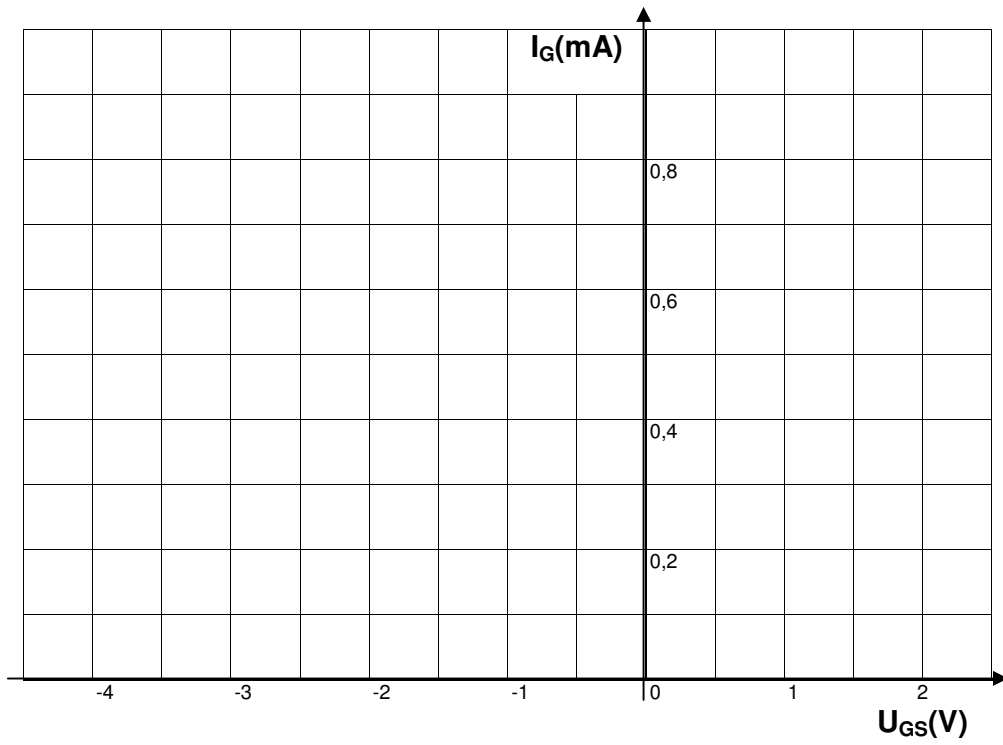
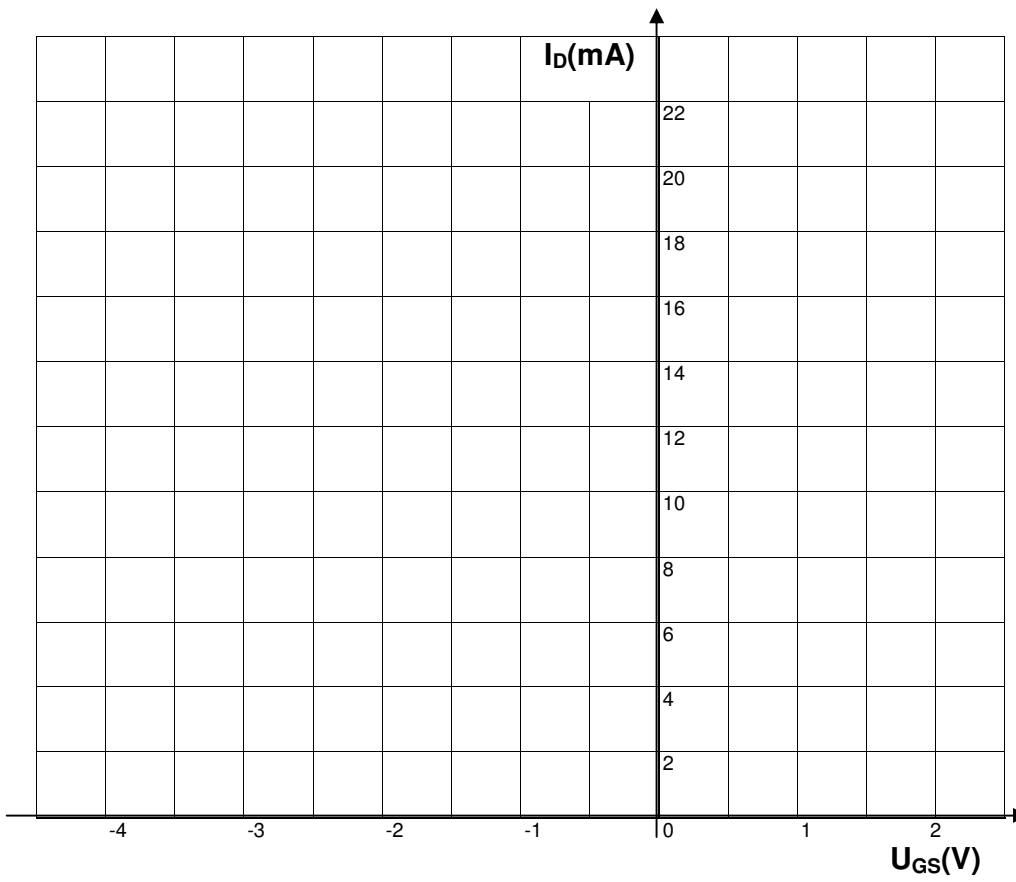
- ❖ Realizirati sklop prema slici V.6.1. i podesiti napon U_{DS} na vrijednost 15 V.
- ❖ Podešavati napon između upravljačke elektrode i uvoda U_{GS} prema vrijednostima u tablici V.6.1. Mjeriti odgovarajuće iznose struja I_G i I_D i unijeti ih u tablicu V.6.1.
- ❖ U dijagram na slici V.6.2. ucrtati ovisnost struje I_G o naponu U_{GS} , $I_G=f(U_{GS})$.
- ❖ U dijagram na slici V.6.3. ucrtati prijenosnu karakteristiku n-kanalnog FET-a, $I_D=f(U_{GS})$.



Slika V.6.1.

U_{GS} (V)	-4	-3	-2	-1	0	0,5	0,6	0,7	0,75
I_G (mA)									
I_D (mA)									

Tablica V.6.1.

*Slika V.6.2.**Slika V.6.3.*

Zadatak 6.2.:

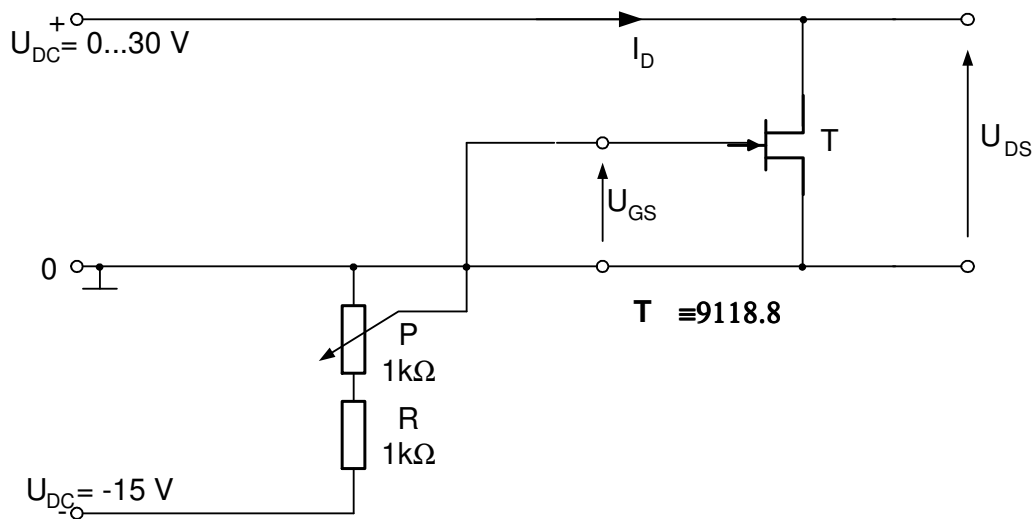
Snimiti izlazne karakteristike FET-a definirane ovisnošću struje odvoda I_D o naponu između uvoda i odvoda U_{DS} , $I_D=f(U_{DS})$, za četiri različite vrijednosti napona upravljačke elektrode U_{GS} .

Mjerni postupak:

- ❖ Spojiti sklop prema slici V.6.4. Vrijednosti napona U_{GS} i U_{DS} podesiti prema tablici V.6.3.
- ❖ Multimetrom mjeriti odgovarajuće vrijednosti struje I_D i unijeti ih u tablicu V.6.3.

Napomena: Da bi se mogle podesiti vrijednosti napona U_{DS} prema tablici za slučaj kad je napon $U_{GS}=0,5$ V potrebno je obrnuti polaritet napona napajanja (15 V).

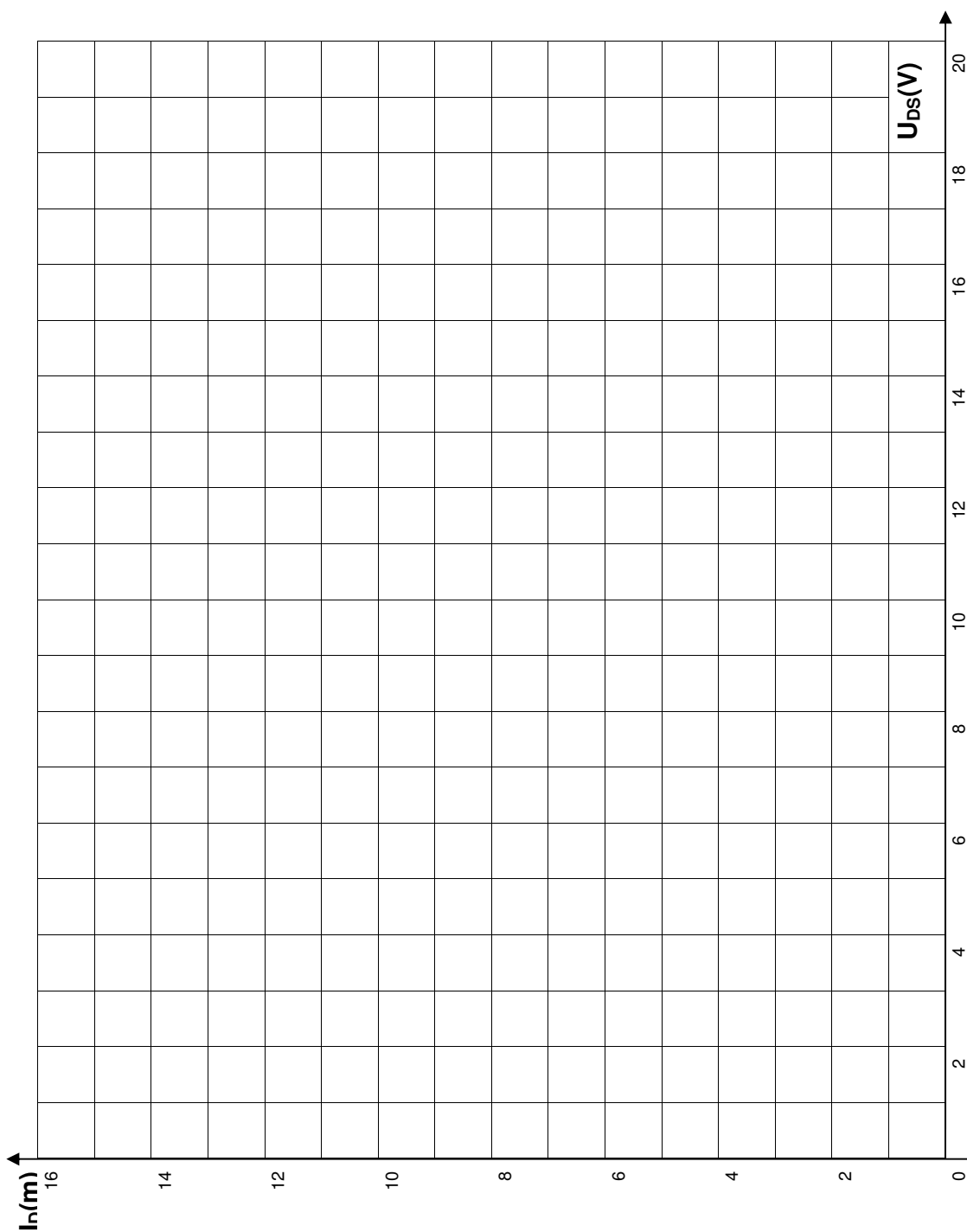
- ❖ U dijagram na slici V.6.5. ucrtati graf ovisnosti struje odvoda I_D o naponu U_{DS} za različite vrijednosti napona U_{GS} .



Slika V.6.4.

U_{DS} (V)	0	0,5	1	1,5	2	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20
I_D (mA) $U_{GS} = -2V$															
I_D (mA) $U_{GS} = -1V$															
I_D (mA) $U_{GS} = 0V$															
I_D (mA) $U_{GS} = 0.5V$															

Tablica V.6.3.



Slika V.6.5.

? Pitanja:

1. Odrediti iznos strmine g_m ako promjena napona U_{GS} od 1,5 V izazove promjenu struje I_D od 4,5 mA.

$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} =$$

2. Pod kojim uvjetima se može upravljati radom FET-a, a da se pri tome ne troši nikakva snaga?

✍️ Odgovori i komentari:

Zadatak 6.3.:

Ispitati utjecaj promjene otpora opterećenja na MOSFET.

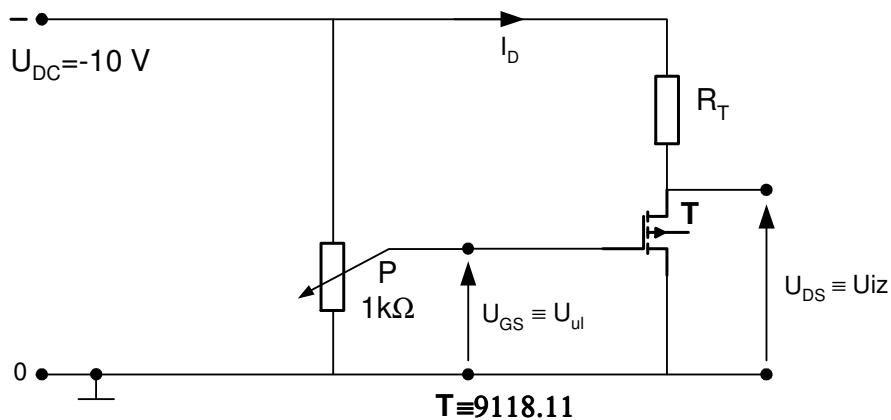
Mjerni postupak:

- ❖ Spojiti sklop prema slici V.6.5.
- ❖ Mijenjati vrijednosti opteretnog otpora i ulaznog napona prema tablici V.6.4., te multimetrom mjeriti izlazne napone i unijeti ih u tablicu.
- ❖ Upotrijebiti slijedeću formulu za računanje pojačanja za različite vrijednosti otpora R_T :

$$A_v = \frac{\Delta U_{iz}}{\Delta U_{ul}}$$

$$\Delta U_{iz} = U_{iz1} - U_{iz2}$$

$$\Delta U_{ul} = U_{ul1} - U_{ul2}$$

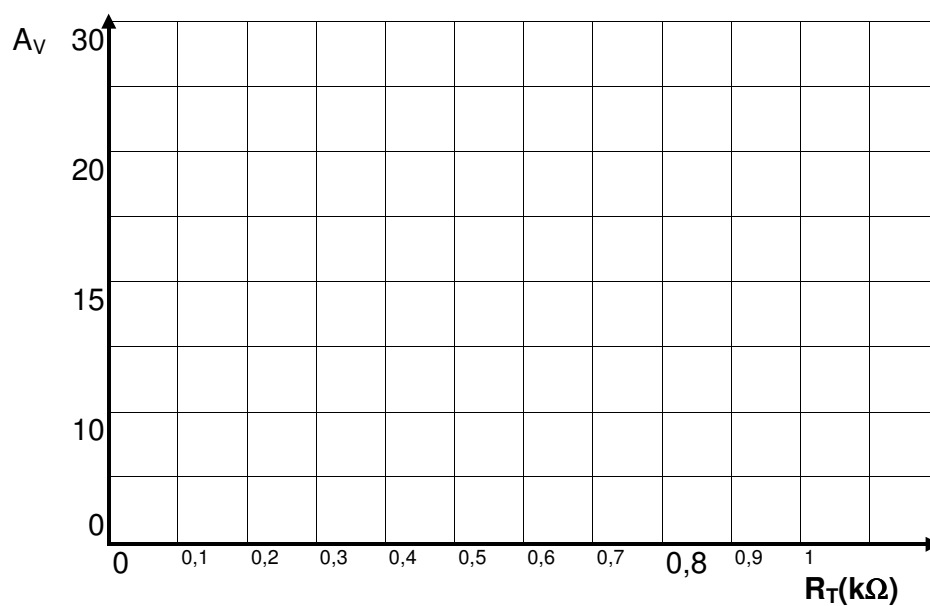


Slika V.6.5.

- ❖ U dijagram na slici V.6.6. ucrtati ovisnost naponskog pojačanja o promjeni otpora R_T , $A_v = f(R_T)$.

R_T (k Ω)	0,33	0,68	1
$-U_{ul1}$ (V)	2,7	2,7	2,6
$-U_{ul2}$ (V)	3,1	3,1	2,8
$-U_{iz1}$ (V)			
$-U_{iz2}$ (V)			
ΔU_{ul} (V)			
ΔU_{iz} (V)			
A_V			

Tablica V.6.4.



Slika V.6.6.

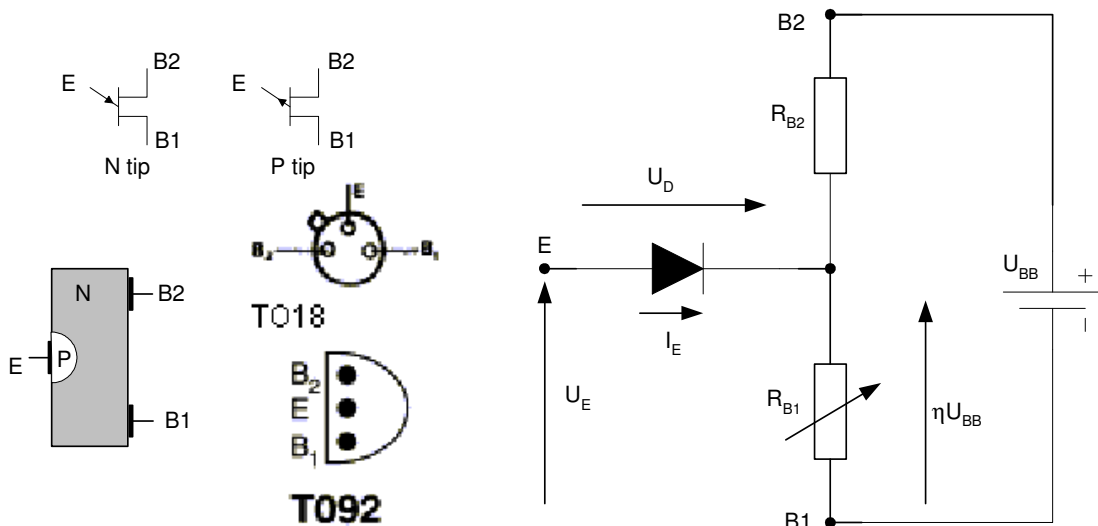
? Pitanja:

3. Kako se mijenja naponsko pojačanje s porastom otpora R_T ?
4. Koliko iznosi naponsko pojačanje za $R_T = 1$ k Ω ?

Odgovori i komentari:

2.7. JEDNOSPOJNI TRANZISTOR

Jednospojni tranzistor, UJT (unijunction tranzistor) ima tri elektrode, od koji se dvije nazivaju bazama B1 i B2 (pa zbog ovoga još se upotrebljava naziv tranzistor s dvije baze), a treća se zove emiter E. Jednospojni tranzistor se može prikazati kao spoj dvaju otpora između koji je spojena dioda. Kada se između baza priključi napon U_{BB} , kao na slici 2.7.1, a napon emitera $U_E=0$, dioda je nepropusno polarizirana. Struja emitera I_E je vrlo malog iznosa i negativnog predznaka i predstavlja reverznu struju zasićenja I_{E0} (reda veličine desetak μA). Tada tranzistor predstavlja omski otpor reda veličine desetak kilooma. Na dijelu otpora R_{B1} postoji pad napona ηU_{BB} . Faktor η naziva se unutarnji omjer (*intrinsic stand-off ratio*) i kreće se u granicama od 0,5 do 0,8. Zbog ovoga struja emitera I_E ostaje vrlo mala (približno nula) i kod priključenog napona U_E sve dok taj napon ne poprimi vrijednost $\eta U_{BB} + U_D$, ulazna dioda postaje propusno polarizirana i tada teče znatna struja emitera I_E . Pri tome dolazi do smanjenja otpora R_{B1} i zbog toga se smanjuje i napon U_E (svojstvo negativnog otpora) uz porast struje emitera. Kod iznosa struje dna I_V (*valley point current*), napon U_E ima najmanju vrijednost U_V (*valley point voltage*). Uz porast struje iznad I_V jednospojni tranzistor prelazi iz područja negativnog otpora u područje zasićenja, a napon U_E lagano raste. Napon emitera kod kojega je jednospojni tranzistor proveo naziva se napon vrha U_P (*peak point voltage*) kojemu odgovara struja vrha I_P .



Slika 2.7.1 Simboli, presjek, primjer izvedbi i nadomjesni spoj jednospojnog tranzistora

Struja I_P je reda veličine mikroampera. Vrijednost napona vrha ovisi o naponu napajanja spojenom između baza i dana je relacijom:

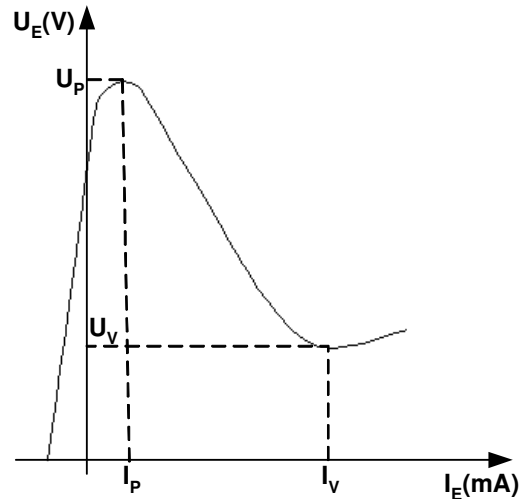
$$U_P = \eta \cdot U_{BB} + U_D. \quad 2.32$$

Naponi napajanja iznose do 30 V, a istog reda veličine iznose i dopušteni naponi emitera. Dopuštena struja emitera iznosi tipično oko 50 mA.

Jednospojni tranzistori se primjenjuju prvenstveno kao prekidački elementi ali i u vremenskim sklopovima i sklopovima za generiranje impulsa i kao takav ima niz prednosti u odnosu na ostale poluvodičke elemente:

- napon okidanja jednospojnog tranzistora (napon pri kojem prelazi iz stanja nevođenja u stanje vođenja) predstavlja određeni dio napona napajanja,
- jednospojni tranzistor posjeduje stabilno područje negativnog otpora što mu daje prednost kod realizacije sklopova oscilatora i multivibratora,

- uporabom jenospojnog tranzistora u određenim sklopovima broj potrebnih elemenata se smanjuje za više od pola u usporedbi s istim sklopovima realiziranim bipolarnim tranzistorima,
- unutarnji otpor bipolarnog tranzistora u stanju nevođenja je relativno velik ($>30 \text{ k}\Omega$).



Slika 2.7.2 Ulazna strujno-naponska karakteristika jenospojnog tranzistora

Kao što je vidljivo s karakteristike prikazane na slici 2.7.2 rad jenospojnog tranzistora karakteriziran je s dva područja:

1. područje nevođenja – $U_{EB1} < U_P$ emitorska dioda je nepropusno polarizirana, teče vrlo mala reverzna struja zasićenja I_{E0} i UJT ne vodi,
2. područje negativnog otpora - $U_{EB1} > U_P$ emitorska dioda je propusno polarizirana, struja I_E raste i UJT vodi.

2.7.1 VJEŽBA 7. JEDNOSPOJNI TRANZISTOR

Pitanaja za provjeru:

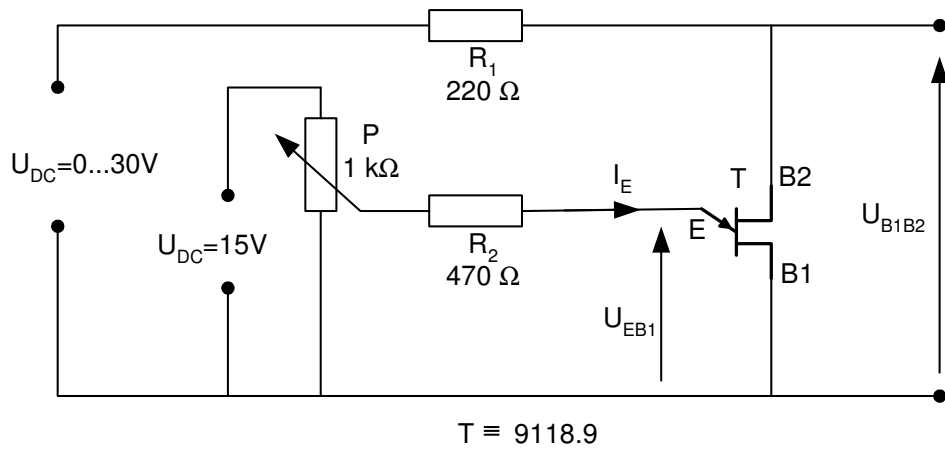
- Koliko ima elektroda UJT i kako se one nazivaju?
- Što je to napon vrha U_P ?
- Navedi dvije primjene jenospojnih tranzistora.

Zadatak 4.1.:

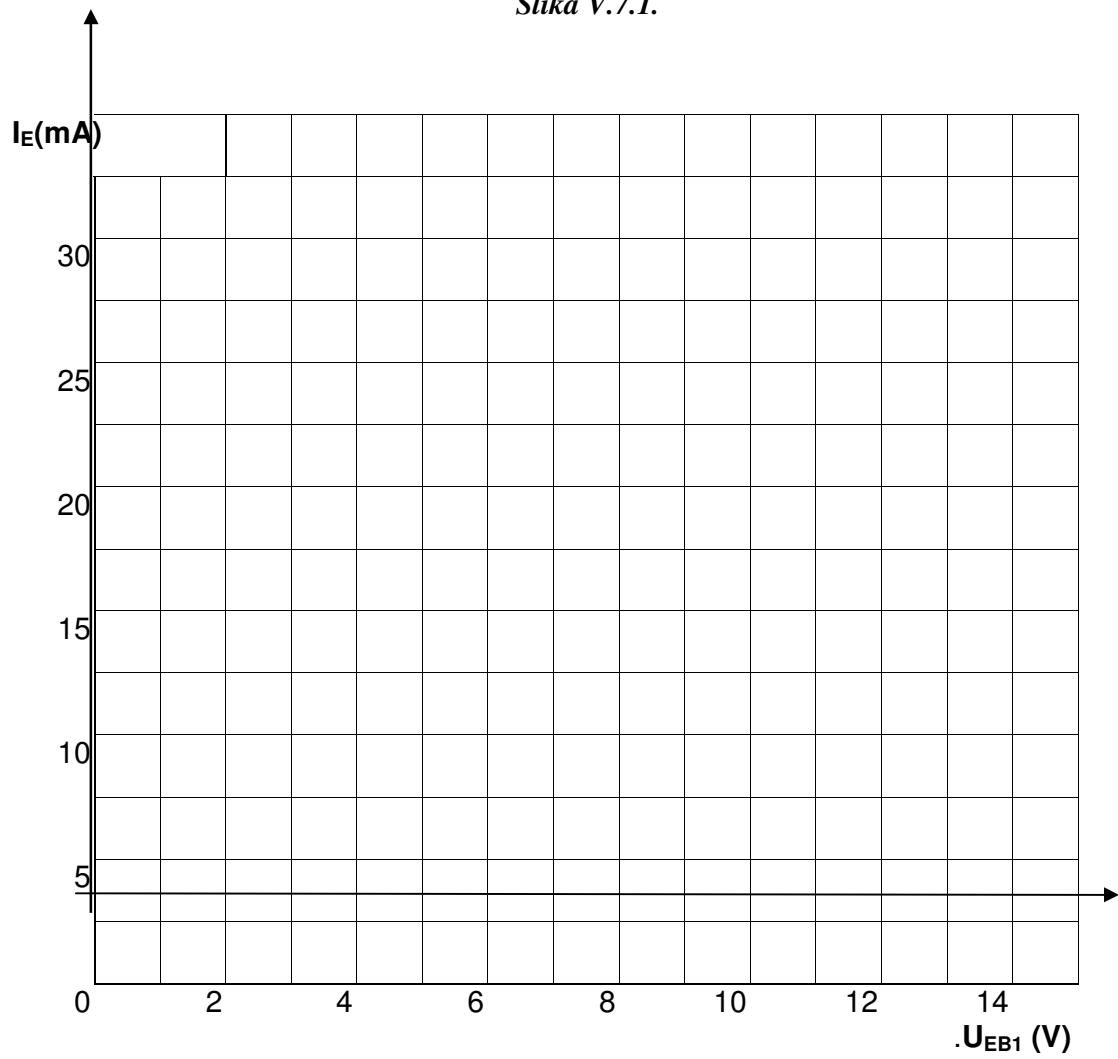
- Snimiti prekidačke karakteristike jenospojnog tranzistora, $I_E = f(U_{EB1})$.
-

Mjerni postupak:

- ❖ Spojiti strujni krug prema slici V.7.1. Za različite vrijednosti napona U_{B1B2} mijenjati napon U_{EB1} prema vrijednostima u tablicama V.7.1.-V.7.3. i mjeriti odgovarajuće struje I_E .
- ❖ U dijagram na slici V.7.2. ucrtati grafove ovisnosti struje I_E o naponu U_{EB1} .



Slika V.7.1.



Slika V.7.2.

2.8 Tiristori

Tiristori (thyristors) su četveroslojni p-n-p-n poluvodički elementi. Osnovni princip rada tiristora zasniva se na regenerativnosti, tj. oni vode struju dok su ispunjeni određeni uvjeti, a zatim naglo prestaju voditi, što je opet rezultat ispunjenja određenih uvjeta. Kao i pn dioda tiristor ima dva različita stanja, stanje vođenja i stanje nevođenja, te naglo prelaze iz jednog stanja u drugo. Osnovnu teoriju rada četveroslojne diode (four-layer diode) razvio je Shockley. Postoje različite izvedbe koje se razlikuju po broju elektroda pomoću kojih se tiristori priključuju na vanjski električni krug, te prema vođenju struje (vode u jednom ili oba smjera):

- jednosmjerni diodni thyristor,
- dvosmjerni diodni thyristor (DIAC),
- jednosmjerni triodni thyristor (SCR),
- dvosmjerni triodni thyristor (TRIAC).

Tiristori u prvom redu služe kao ispravljači i kao prekidački elementi (pretvorba i upravljanje električnom energijom), a najveća prednost u odnosu na ostale poluvodičke elemente je iskazana u njihovoj sposobnosti upravljanja signalima velikih iznosa snage uz istovremeno malu potrošnju, odnosno izrazito malu snagu potrebnu za upravljanje radom tiristora.



Slika 2.8.1 Primjeri izvedbe thyristora

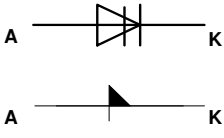
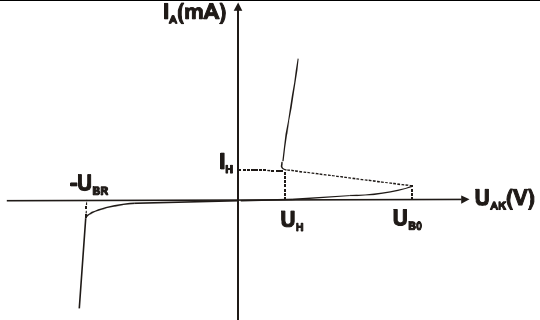
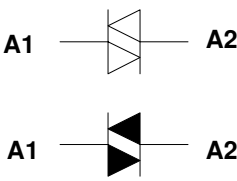
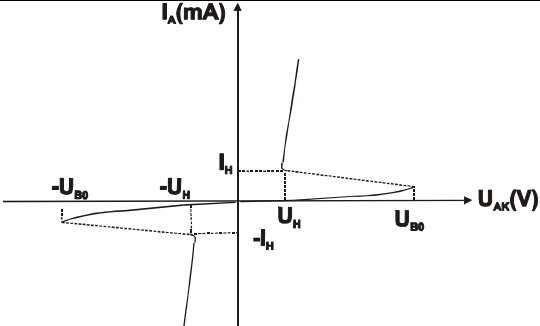
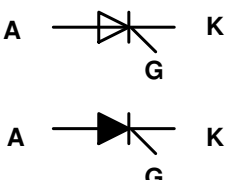
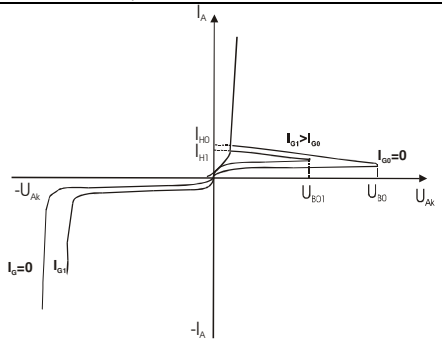
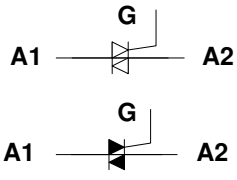
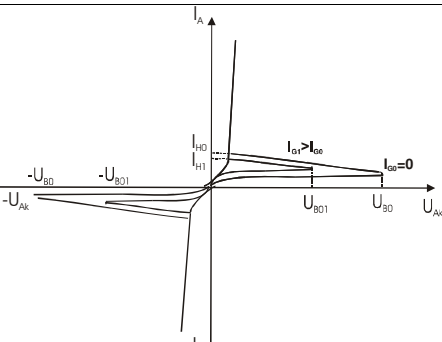
Strujno-naponske karakteristike tiristora prikazane su u tablici 2.8.1. Kod jednosmjernog diodnog tiristora, uz pozitivni napon na anodi, struja kroz tiristor bit će vrlo mala dok anodni napon ne prekorači određenu vrijednost koja se naziva prijelomni napon U_{B0} (*breakover voltage*). Iznos ovog napona ovisi o konstrukciji tiristora i može se kretati u granicama od nekoliko volti do nekoliko tisuća volti. Nakon uključivanja napon na tiristoru pada na vrlo mali iznos od 1-2 V. Struja može doseći vrlo velike iznose (preko 1000 A) koji se ograničavaju pomoću otpora u anodnom krugu. Područje rada u kojem je anodni napon pozitivan naziva se propusno područje (prvi kvadrant). S karakteristike je vidljivo da postoje dva stabilna stanja:

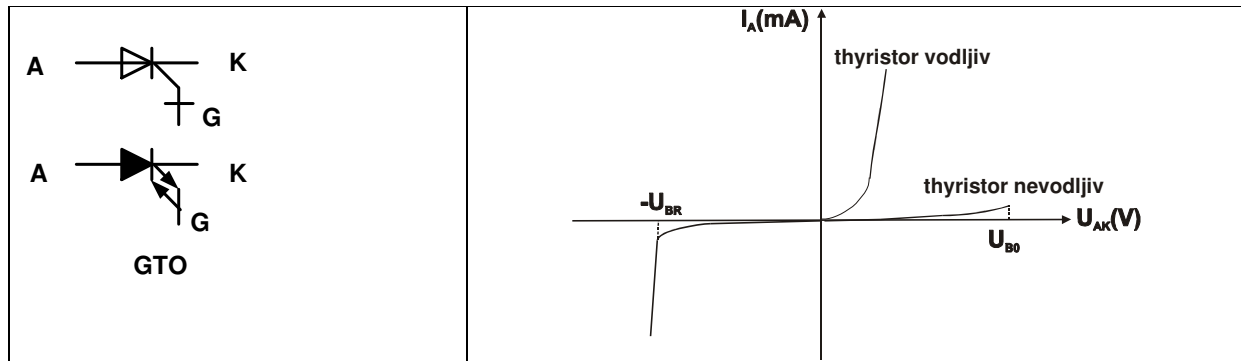
1. nevodljivo ili isključeno stanje, vrlo mala anodna struja uz veliki anodni napon,
2. vodljivo ili uključeno stanje, velika anodna struja i mali anodni napon.

Dioda ostaje u vodljivu stanju sve dok se struja kroz nju ne smanji ispod određene vrijednosti I_H koja se naziva struja držanja (*holding current*). Vrijednosti ove struje se kreću u granicama od nekoliko mA do nekoliko desetaka mA a naponi držanja između 0,5 i 1 V.

Prijelaz iz jednog stanja u drugo je vrlo brz i ide preko područje negativnog otpora. Kada je na anodi negativan napon tiristor se nalazi u nepropusnom ili reverznom području. Anodna je struja vrlo mala i istog reda veličine kao i anodna struja u propusnom neuključenom stanju. Kad anodni napon dosegne vrijednost probojnog napona U_{BR} , struja počinje naglo rasti. Ovdje se uočava isto

ponašanje kao i kod obične pn diode. Praktične izvedbe tiristora su obično takve da su naponi U_{BR} i U_{B0} približno jednaki.

 <p>Cetveroslojna (Shockleyjeva) dioda</p>	
 <p>DIAC</p>	
 <p>SCR</p>	
 <p>TRIAC</p>	



Tablica 2.8.1 Simboli i strujno-naponske karakteristike tiristora

U nepropusnom području ne postoji uključeno stanje koje je karakterizirano malim padom napona i velikom anodnom strujom, zbog čega se prikazani thyristor ne ponaša kao sklopka u nepropusnom području. Svi thyristori (diodni ili triodni) koji mogu biti u isključenom stanju samo uz pozitivan anodni napon nazivaju se *jednosmjerni thyristori*. Četveroslojna dioda se može upotrijebiti za generiranje impulsa.

Postoje također i diodni ili triodni thyristori, koji u oba kvadranta mogu biti u uključenom i isključenom stanju. Ovi thyristori se nazivaju *dvosmjerni*. U tablici 2.8.1 prikazana je karakteristika dvosmjernog diodnog thyristora DIAC-a (diode alternating current switch) za koji se još upotrebljava skraćenica SSS (*silicon symetric switch*). Princip rada ovog thyristora može se objasniti pomoću dva paralelna nasuprot spojena jednosmjerna thyristora.

U praksi su najviše u upotrebi jednosmjerni triodni thyristor, koji se često označava sa SCR (silicon controlled rectifier), te dvosmjerni triodni thyristor TRIAC (triode alternating current switch). Njihova velika primjena je u uređajima za regulirano pretvaranje energije iz jednog oblika u drugi, odnosno za ispravljanje i pretvaranje izmjenične struje u izmjeničnu struju druge frekvencije ili efektivne vrijednosti. Za razliku od diodnih thyristora kod ovih thyristora postoji i treća elektroda koja se naziva upravljačka elektroda (gate). Prebacivanje SCR-a iz isključenog u uključeno stanje vrši se pomoću pozitivnog napona (odnosno struje) na upravljačkoj elektrodi. Na ovaj način se postiže sniženje prijelomnog napona, kao što se vidi sa slike. Što je iznos struje upravljačke elektrode I_G veći prijelomni napon će biti manji. Za vrijednost struje $I_G=0$ prijelomni napon je U_{B0} i naziva se prijelomni napon praznog hoda. U ovom slučaju triodni thyristor se reducira u diodni. SCR će prijeći iz uključenog stanja u isključeno ako se anodni napon snizi na tako nisku vrijednost da anodna struja padne na iznos koji je manji od struje pridržavanja I_H , ili ako se promijeni polaritet anodnog napona. Kada je thyristor priključen u izmjenični krug do uključivanja (paljenja) i isključivanja (gašenja) thyristora dolazi svaki put kad izmjenični signal prolazi kroz nulu jer tada anodna struja padne na iznos manji od iznosa struje pridržavanja I_H .

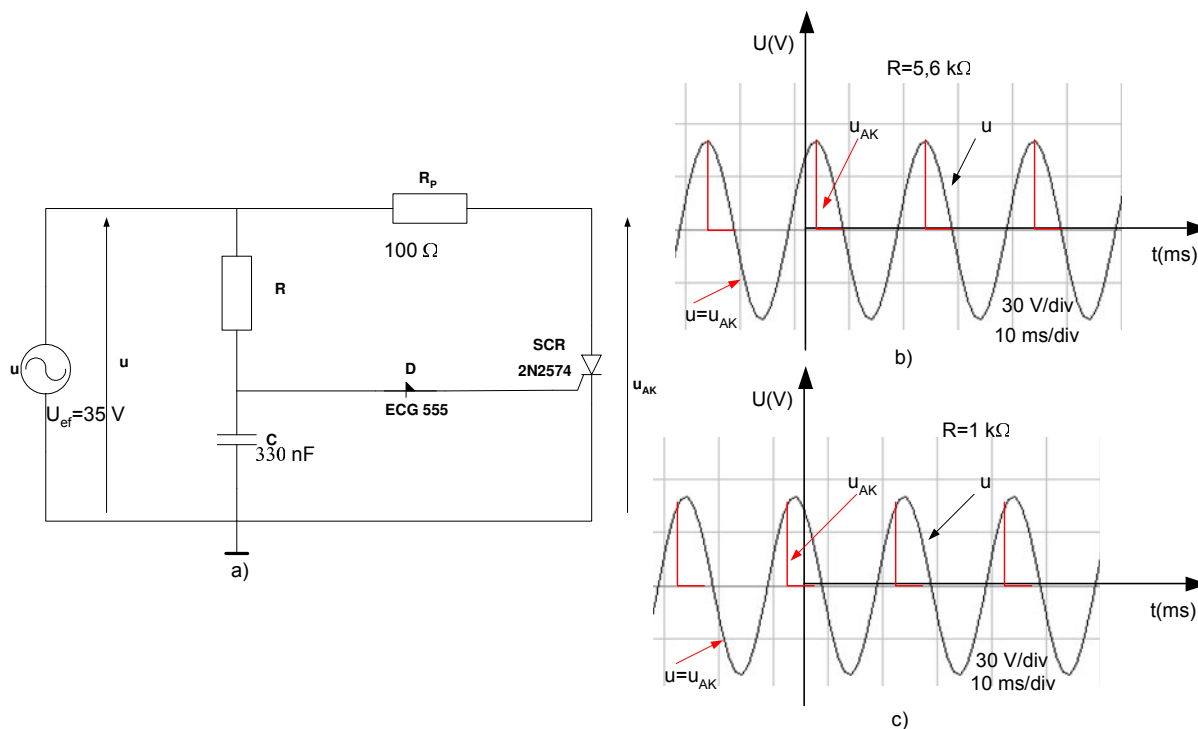
Kod TRIAC-a napon upravljačke elektrode kojim se postiže uključivanje može biti bilo pozitivan bilo negativan, bez obzira na polaritet anodnog napona. Kad se thyristor nađe u stanju vođenja, struja I_G može se po volji smanjiti ili se izvor napona U_G može u potpunosti isključiti iz strujnog kruga, a da to ne poremeti stanje vođenja thyristora.

Thyristori za manje snage (maksimalna struja do 10 A) mogu se iz uključenog stanja prebaciti u isključeno i pomoću negativne struje upravljačke elektrode. Ovi thyristori se nazivaju thyristori s isključivanjem na upravljačkoj elektrodi, GTO (*gate turn-off thyristor*). Isklopivi thyristori upotrebljavaju se osobito u sklopovima energetske elektronike za pretvorbu istosmjernog napona u izmjenični.

Primjer regulacije struje pomoću SCR-a

Sa SCR-ima može se regulirati trenutak početka vođenja (vrijeme vođenja), a to znači i jakost struje, oni se često primjenjuju u sklopovima za regulaciju struje u različitim uređajima. Za regulaciju struje trošilo i SCR se spajaju serijski kao što je prikazano na Slici 2.8.2 a). SCR se odabire tako da provede tek dovođenjem okidnog impulsa na upravljačku elektrodu. Jakost struje trošila regulira se pomjenom vremena okidanja. Struja kroz trošilo je veća ako se okidni impuls dovede prije. Padom napona na vrijednost 0 V tiristor se gasi. Ulazni izmjenični napon kojim se napaja trošilo dovodi se preko RC-mrteže na četveroslojnu diodu. Fazni pomak i veličina napona na kondenzatoru, tj. četveroslojnoj diodi ovisi o veličini otpora R. Promijenom vrijednosti ovoga otpora također se mijenja i trenutak vođenja četveroslojne diode koja okida SCR. S većim otporom R dolazi do kasnijeg vođenja četveroslojne diode, a time i SCR-a (slika 2.8.2 b)). Manji otpor omogućava ranije vođenje SCR-a (slika 2.8.2 c)).

Impulsi potrebni za okidanje SCR-a u spojevima za regulaciju struje mogu se dobiti iz posebnih izvora okidnih impulsa (npr. primjenom jednospojnog tranzistora) ili iz istog izvora kojim se napaja trošilo kojemu se regulira struja. U sklopu prikazanom na slici, SCR se okida s pomoću četveroslojne diode iz istog izvora kojim se napaja trošilo.



Slika 2.8.2 Sklop za regulaciju struje primjenom četveroslojne diode i SCR-a

2.8.1 VJEŽBA 8. TIRISTOR

Pitanaja za provjeru:

- Koje vrste tiristora poznaješ?
- Nabroj moguće primjene tiristora?
- Što predstavlja prijelomni napon a što struja pridržavanja?

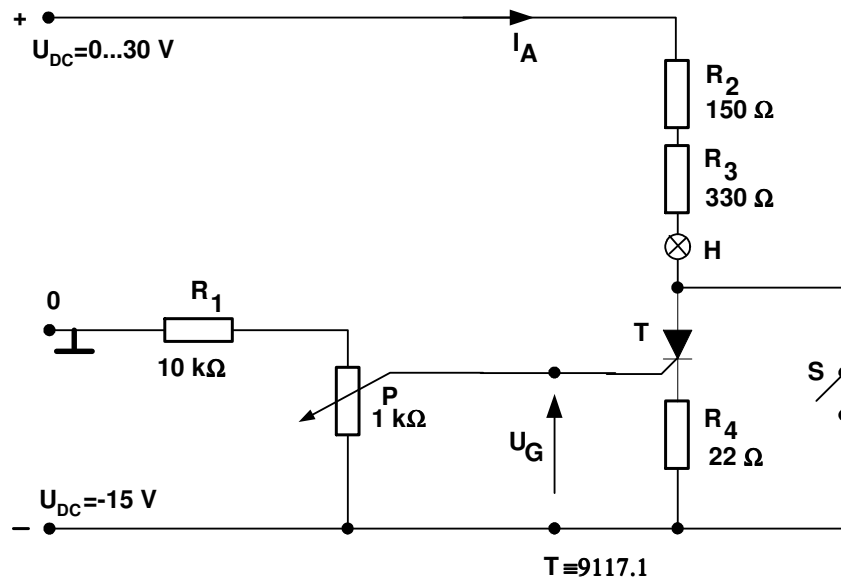
Zadatak 8.1.:

Snimiti ovisnost anodne struje I_A o naponu upravljačke elektrode U_G za jednosmjerni triodni tiristor.

Mierni postupak:

- ❖ Spojiti krug prema slici V.8.1. i mijenjati napon U_G prema vrijednostima u tablici V.8.1.
- ❖ Mjeriti odgovarajuće iznose anodne struje I_A i unijeti ih u tablicu V.8.1.
- ❖ U dijagram na slici V.8.3. ucrtati graf ovisnosti anodne struje o naponu upravljačke elektrode.

Napomena: Sklopka S služi za gašenje tiristora, promatrati žarulju H.



Slika V.8.1.

U_G (V)	prije paljenja tiristora								nakon paljenja tiristora								
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
I_A (mA)																	
I_K (mA)																	

Tablica V.8.1.

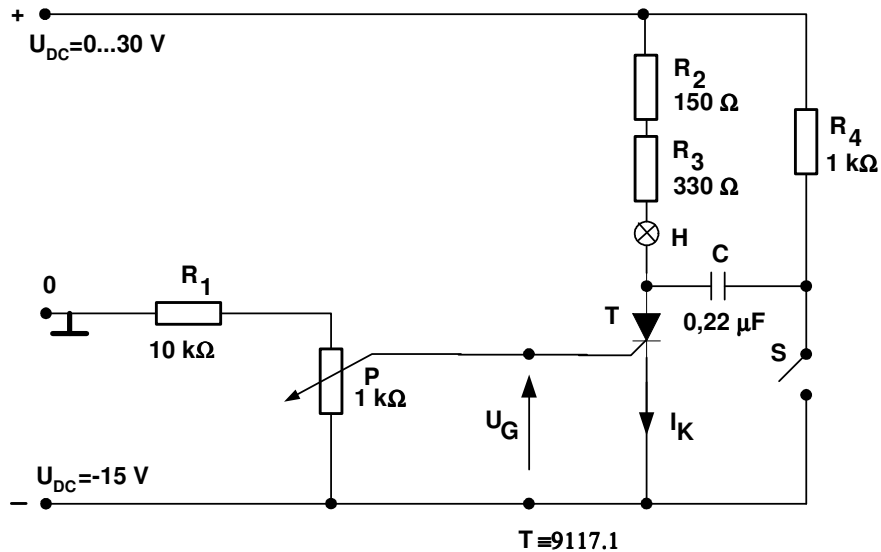
Zadatak 8.2.:

Snimiti ovisnost katodne struje I_K o naponu upravljačke elektrode U_G za jednosmjerni triodni tiristor.

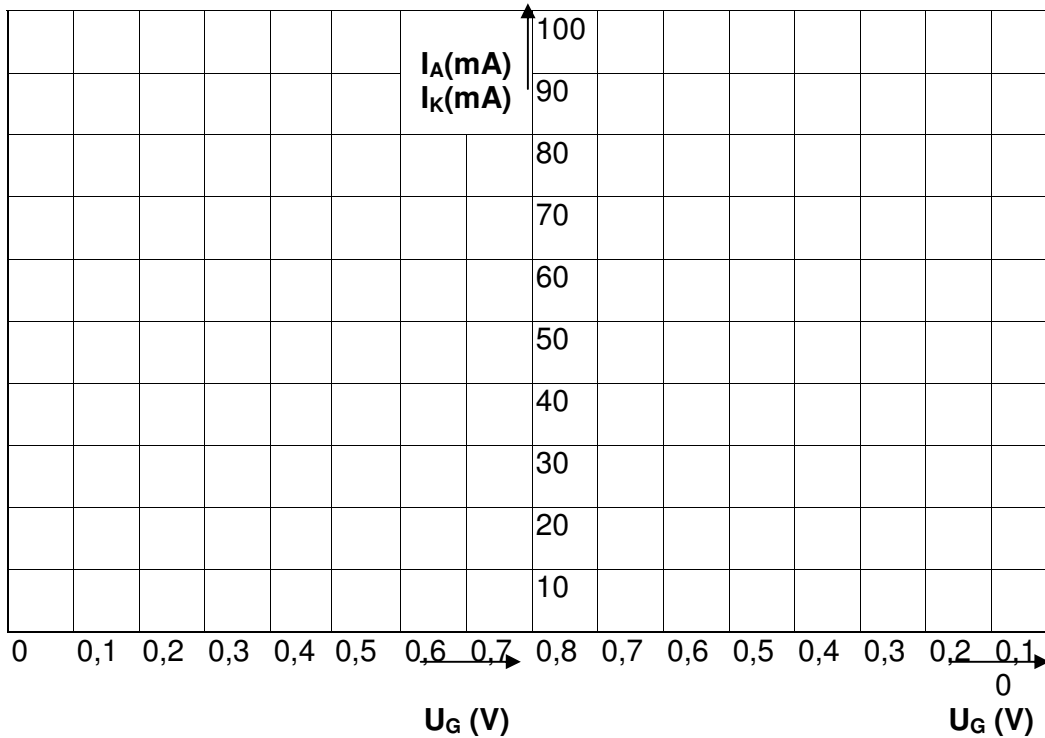
Mjerni postupak:

- ❖ Spojiti krug prema slici V.8.2. i mijenjati napon U_G prema vrijednostima u tablici V.8.1.
- ❖ Mjeriti odgovarajuće iznose katodne struje I_K i unijeti ih u tablicu V.8.1.
- ❖ U dijagram na slici V.8.3. ucrtati graf ovisnosti katodne struje o naponu upravljačke elektrode.

Napomena: Sklopka S služi za gašenje tiristora, promatrati žarulju H.



Slika V.8.2.



Slika V.8.3.

LITERATURA

- [1] hps SystemTechnik: Semiconductor Components, 3. Edition
- [2] S. Bovan: Elektronički elementi, laboratorijske vježbe, Split, 2001
- [3] T. Kovačević: Elektronički elementi, Repetitorij s laboratorijskim vježbama, Split, veljača 2004
- [4] P. Slapničar, S. Gotovac: Elektronički sklopovi, Split, veljača 2000
- [5] I. Zulim, P. Biljanović: Elektronički sklopovi, Zagreb, 1994
- [6] B. Juzbašić: Elektronički elementi, Zagreb, 1994
- [7] J. Štribar, J. Divković-Pukšec: Elektronički elementi, zbirka riješenih zadataka i izvoda I dio, Zagreb, 1996
- [8] J. Štribar, J. Divković-Pukšec: Elektronički elementi, zbirka riješenih zadataka i izvoda II dio, Zagreb, 1996
- [9] Ž. Butković, T. Suligoj: Mikroelektronika, Automatika 43, 2002