

1. UVOD

1.1.Šta je to elektronika?

Oblast elektronike se bavi proučavanjem i konstrukcijem elektronskih elemenata kojima se kontroliše tok struje i povezivanjem takvih elemenata u složena kola koja obavljaju željenu funkciju. Osnovni elementi savremene elektronike su diode i tranzistori koji se povezuju u diskretna ili integrisana kola. Pored toga, elektronika se bavi i projektovanjem elektronskih kola za određene namene, razvojem algoritama za projektovanje, razvojem i primenom računarske podrške procesu projektovanja, implementacijom elektronskih kola koja realizuju razne metode potrebne u ostalim oblastima elektrotehnike, itd.

Mada je oblast elektronike stara već oko 100 godina, ona je u toku svoje istorije imala izuzetno dinamičan razvoj, a takva je i danas. Usled razvoja tehnologije stalno se pronalaze novi materijali i konstruišu nove komponente, što u velikoj meri utiče na promenu postupaka projektovanja. Već dvadesetak godina XX veka je prisutan trend minijaturizacije komponenata i trend integracije velikog broja komponenata u jedno integrisano kolo. To je omogućilo drastično smanjenje dimenzija elektronskih uređaja, smanjenje njihove potrošnje, povećanje brzine rada i povećanje pouzdanosti uređaja. Na primer, jedan od prvih elektronskih računara ENIAC iz 1947. godine koji je imao oko 17000 elektronskih cevi i memoriju od svega nekoliko kB, bio je smešten u prostoriju veličine sportske sale, a njegova potrošnja se merila desetinama kW. Današnji računari imaju sve važne performanse najmanje 1000 do 10000 puta bolje. Drugi karakterističan primer je mobilni telefon koji je pre samo dvadesetak godina, za neuporedivo lošije performanse, imao veličinu koja je jedva mogla da stane u automobil.

Grane elektronike su:

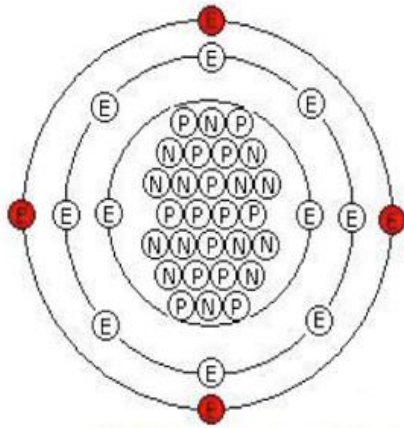
- [računarstvo](#) - razvoj hardvera računara
- [automatika](#) - elektronski uređaji za kontrolu procesa, robotika itd
- [telekomunikacije](#) - Telekomunikacioni uređaji
- [mikroelektronika](#) - razvoj integrisanih kola i drugih poluprovodničkih komponenti.
- [energetska elektronika](#) - razvoj elektronskih komponenti za velike snage.

Postoje još neke podvrste kao što su [optička elektronika](#) ili [optoelektronika](#), [mikrotalasna elektronika](#) itd.

1.2. Poluprovodnici

Poluprovodnicisu po svojim osobinama negde između provodnika i izolatora i umereno se suprostavljaju kretanju nosilaca elektriciteta. Najvažniji poluprovodnici su silicijum, germanijum, galijum arsenid, itd. Poluprovodnički materijali su osnov savremene elektronike.

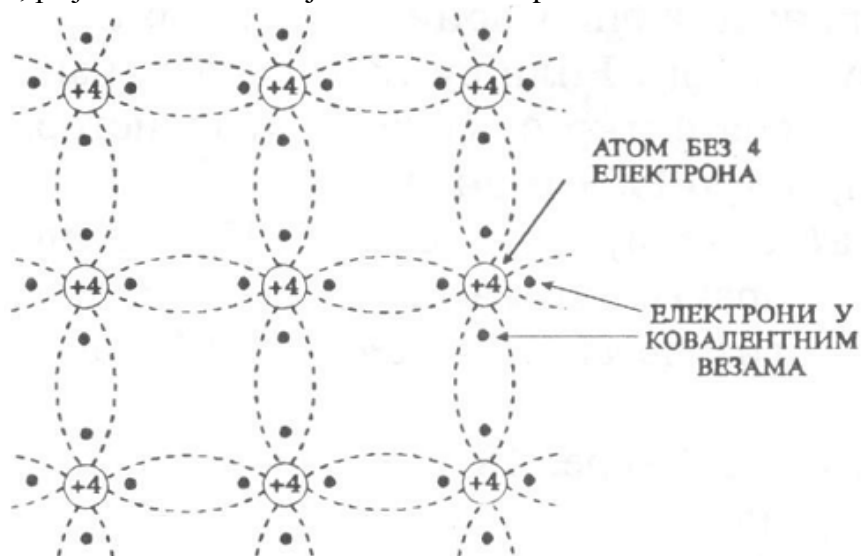
Ranijih godina iz predmeta hemije i osnova elektrotehnike saznali smo da su atomi nasitniji delovi materijala. Atomi su sastavljeni od još sitnijih čestica koje su raspoređene u jezgru i omotaču. U jezgru se nalaze protoni i neutroni, a oko njega kruže elektroni. Protoni su pozitivno naelektrisani, elektroni negativno, dok su neutroni neutralni.



Elektroni se kreću oko jezgra po putanjama koje se nalaze na određenim ljuskama. Ljuska, inače, obuhvata površinu neke lopte. Radi bolje preglednosti na slici 1.1. su sve ljuske nacrtane u jednoj ravni. Poslednja, najudaljenija, ljuska naziva se valentna i ona određuje dali je neki element provodnik, poluprovodnik ili izolator. Provodnici u valentnoj ljusci imaju dva elektrona, poluprovodnici od tri do pet (najčešće se upotebljavaju poluprovodnici sa četiri valentna elektrona), dok izolatori imaju sedam i više.

Slika 1.1. Atom Silicijuma

Atomi poluprovodnika su raspoređeni u obliku kristalne rešetke. Na slici 1.2. vidi se da je svaki atom silicijuma vezan za četiri susedna atoma. Veza između atoma se ostvaruje tako što dva susedna atoma daju po jedan elektron iz spoljašnje ljuske i čine kovalentnu vezu. Svaki atom je sa četiri kovalentne veze povezan sa četiri susedna atoma, atom ima višak od četiri pozitivna elementarna naelektrisanja. Elektroni u kovalentnoj vezi su dosta čvrsto vezani za atom, pa je čist kristal silicijuma veoma slab provodnik.

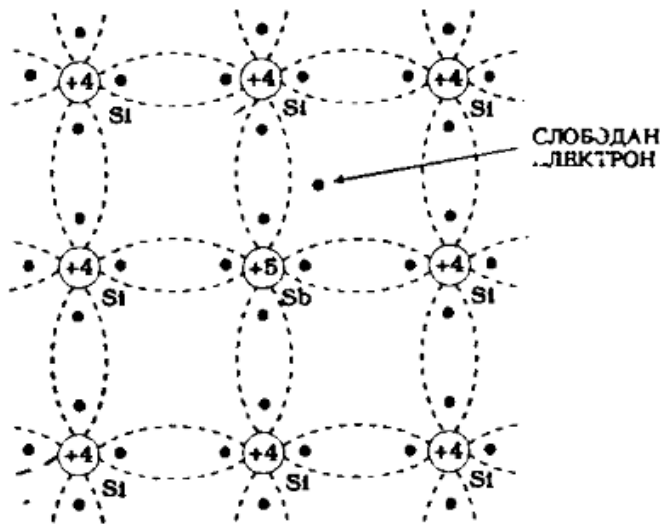


Slika 1.2. Kristalna rešetka silicijuma prikazana u jednoj ravni

1.2.1. Poluprovodnici N i P tipa

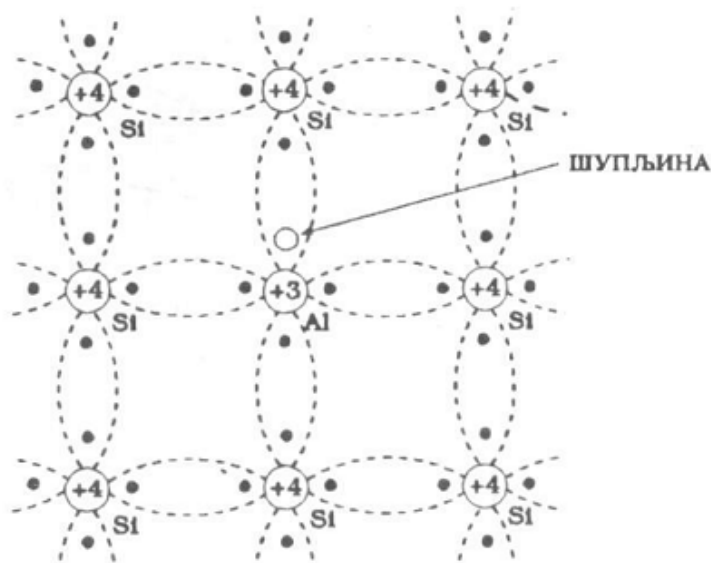
U kristalnu strukturu čistog poluprovodnika se mogu određenim tehnološkim postupcima uneti primese. Ove primese utiču na kristalnu strukturu poluprovodnika.

Primese, koje se često nazivaju nečistoće, jesu elementi koji imaju u spoljašnjoj ljusci tri ili pet valantnih elektrona. Ako se čistom kristalu silicijuma doda petovalentna primesa (npr. antimon), kristalna struktura poluprovodnika se menja. Na mesto jednog atoma poluprovodnika u kristalnoj strukturi smešta se jedan atom petovalentne primese (slika 1.3.). Četiri elektrona antimonovog atoma su vezana za susedne atome silicijuma.



Slika 1.3. Kristalna rešetka Si, gde je jedan atom zamenjen sa petovalantnom primesom

Kao petovalentna primesa, pored antimona, mogu se još upotrebiti fosfor, arsen itd. Primesa koja daje peti element naziva se donor; poluprovodnik ima više slobodnih nehativnih nosilaca elektriciteta pa se nazivaju poluprovodnici N-tipa.



Slika 1.4. Kristalna rešetka Si, gde je jedan atom zamenjen sa trovalantnom primesom

Kretanja ove šupljine predstavlja posredno kretanje elektriciteta jer se u jednom smeru kreću elektroni a u suprotnom šupljine.

Trovalentna primesa prima elektron iz susedna kovalentne veze i naziva se akceptor. U ovakvom poluprovodniku šupljine čine većinske pokretače elektriciteta, one su pozitivne pa se ovakav poluprovodnik naziva poluprovodnik P-tipa.

Peti elektron antimona se ne može uklopiti u kristalnu strukturu silicijuma i postaje slobodan. Preciznije rečeno: potrebna je mala energija da oslobodi peti elektron iz vezanog atoma primese (antimona).

Dodavanjem primesa čistom poluprovodniku povećava se njgova provodnost. Slobodni elektroni mogu da se kreću haotično (u svim smerovima); mogu, takođe, da se kreću usmereno iz oblasti veće koncentracije ka manjoj, zatim pod dejstvom električnog polja.

U kristalnu strukturu poluprovodnika može se takođe uneti neka trovalentna primesa, naprimer atomi aluminijuma. Način vezivanja atoma aluminijuma u kristalnu strukturu silicijuma prikazan je na slici 1.4. atom aluminijuma stvara tri kovalentne veze i jednu nekompletnu, jer u njoj nedostaje jedan elektron. Mesto ovog elektrona u kristalnoj strukturi naziva se šupljina. Ov šupljina se može popuniti ako se iz susedne veze iščupa jedan elektron, tako da se prva nekompletna veza popuni. Na mesto novostvorene šupljine može da dođe novi elektron itd.

1.3. PN spoj

Poluprovodnik može da bude obrađen tako da mu jedan deo bude P-tipa a drugi N-tipa (slika 1.5.). Ovako se dobija PN spoj.



Slika 1.5. Presek PN spoja

Pokretni nosioci elektriciteta se mogu kretati ka dodiru P i N-vrste poluprovodnika, koje je označeno isprekidanom linijom a-a na slici 1.5. Šupline iz P-oblasti se difuzno kreću ka N-oblasti. Posle ulaska u N-oblast, šupljine se rekombinuju sa slobodnim elektronima, pa se od njih dobiju neutralni atomi.

Isovremeno se slično dešava i sa elektronima iz N-oblasti koji prelaze u P-oblast.

Nekompezovani pozitivni joni, neposredno desno od spoja a-a i nekompezovani negativni joni, neposredno levo od spoja a-a, nazivaju se prostorno naelektrisanje ili prostorni tovar. Prostorno naelektrisanje se nalazi u neposrednoj blizini dodira P i N-oblasti.

Kao rezultat svega prethodna navedenog stvara se električno polje koje je usmereno od N ka P-oblasti.

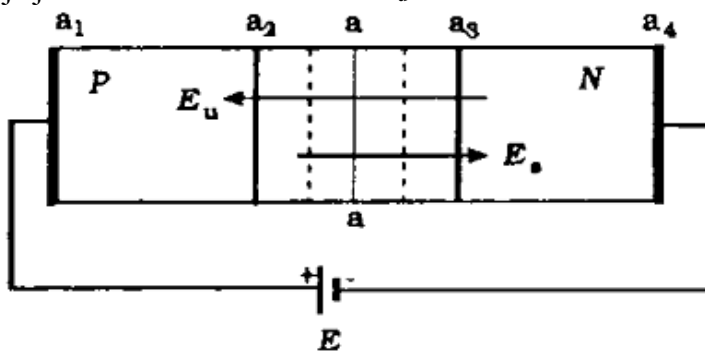
Razlika potencijala od $-V$ do $+V$ se naziva konaktna razlika pontencijala ili potencionalna barijera U_k . Ova razlika potencijala, odnosno napon, ponaša se kao ugrađen izvor čiji je plus kraj u N-oblasti, a minus u P-oblasti.

Da bi slobodna šuplina prešla iz P u N-oblast mora da savlada potencijalnu barijeru koja gura šupline ulevo. Slično se dešava i sa slobodnim elektronima iz N-oblasti.

1.3.1. Direktna polarizacija PN spoja

Kod direktne polarizacije koristi se spoljni izvor, čiji je pozitivan pol priključen na P, a negativan na N-oblast (slika 1.6.).

Kao što smo ranije videli, u oblasti dodira P i N-oblasti formirano je unutrašnje električno polje, koje je na slici 1.6 označeno sa E_u .



Slika 1.6. Unutrašnje (E_u) i spoljno (E_s) električno polje kod direktne polarizacije PN spoja

Spolja priključeni izvor E stvara spoljno električno polje E_s , koje je suprotnog smera od unutrašnjeg električnog polja E_u . Ukoliko je spolja priključeni napon manji od napona potencijalne barijere, električno polje E_s se oduzima od električnog polja E_u . Ukupno električno polje ima smer kao i polje E_u samo je manjeg intenziteta. Ovo smanjeno polje manje potiskuje elektrone u N-oblast i šupljine u P-oblast, pa je oblast prostornog naelektrisanja sužena, ali struja ne teče.

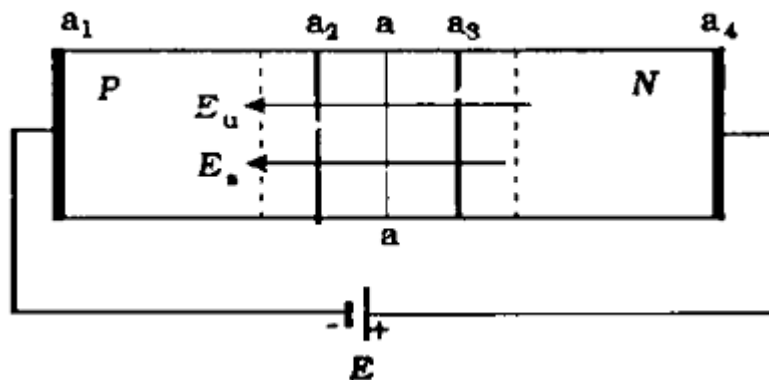
Ukoliko je spoljne naelektrisanje veće od potencijalne barijere, rezultantno električno polje je sada istog smera kao i spoljno polje E_s . Ovo polje potiskuje šupljine u N-oblast i elektrone u P-oblast. Šupljine koje dolaze u N-oblast se rekombinuju sa elektronima, koji se tu normalno nalaze; na mesto rekombinovanih šupljina stalno dolaze nove iz P-oblasti, a na mesto rekombinovanih elektrona stalno dolaze novi iz metalnog priključaka.

Slično se dešava i sa elektronima koji dolaze u P-oblast, koji se stalno rekombinuju sa šupljinama. Na ovaj način dolazi do kretanja šupljina i elektrona, odnosno do proticanja struje kroz PN spoj.

Povičenjem spoljnog napona struja naglo raste i reda je mA ili A, mada može imati i druge vrednosti. U suštini, najpre treba spoljni izvor da navlada potencijalnu barijeru u PN-spoju i tek tada počinje da protiče struja. Napon potencijalne barijere U_p naziva se prag provođenja PN-spoja i kod silicijuma je oko 0,6V a germanijuma 0,2V.

1.3.2. Inverzna polarizacija PN-spoja

Kod inverzne polarizacije pozitivan pol spoljnog izvora priključen je na N, a negativan na P-oblast (slika 1.7.). Sada spoljno i unutrašnje električno polje imaju isti smer i sabiraju se. Ovo pojačano polje još više potiskuje šupljine u P-oblast a elektrone u N-oblast. Oblast prostornog naelektrisanja se širi i onemogućava rekombinaciju elektrona i šupljina. Struja praktično neteče kroz PN-spoj.



Slika 1.7. Proširenje prostornog tovara kod inverzne polarizacije PN-spoja

Parovi elektron-šupljina mogu da nastanu i u čistom poluprovodniku. Ovi parovi mogu da nastanu zbog zagrevanja poluprovodnika, što se dešava već na sobnoj temperaturi. Ovako dobijene šupljine u N-oblasti se pod dejstvom električnog polja kreću ka P-oblasti. Isto tako oslobođeni elektroni iz P-oblasti se kreću ka N-oblasti. Tada dolazi do njihove rekombinacije. Ovakvih slučajeva je relativno malo i struja koja teče je relativno mala (npr. 1nA kod silicijuma). Ova struja se naziva inverzna struja PN-spoja i nepovećava se sa povećanjem inverznog napona.

1.3.3. Proboj PN-spoja

PN-spoj može biti probijen pri direktnoj i inverznoj polarizaciji. Postoje više vrsta proboja, kao što su: toplinski, lavinski i cenerov proboj.

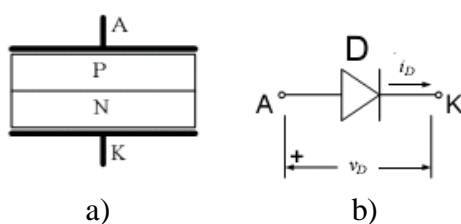
Toplotni proboj: Neka je inverzni napon PN-spoja izuzetno veliki. Usled velikog napona teče velika struja koja zagrejava poluprovodnik. Usled zagrevanja poluprovodnika dolazi do nastajanja novih parova elektron-šupljina koji dovode do novog porasta struje. Ove pojave se međusobno potpomažu pa stalno raste struja PN-spoja. Kada temperatura pređe dozvoljenu granicu dolazi do razaranja PN-spoja. Ova pojava je izražajnije kod germanijumskih dioda, jer kod silicijumskih inverzna struja znatno mala.

Lavinski proboj: Nastaje kod inverzne polarizacije PN-spoja. Na sobnoj temperaturi u poluprovodniku postoje slobodni elektroni. Kod povišenog napona ovi elektroni se ubrzavaju i sudaraju sa atomima i predaju im energiju. Primljena energija u atomu izaziva oslobađanja više novih elektrona koji se kreću, pod dejstvom električnog polja. Ovi elektroni se ubrzavaju i sudaraju sa novim atomima koji oslobađaju još više elektrona. Povećan broj elektrona, koji se kreću pod dejstvom električnog polja, povećava inverznu struju. Povećana struja može dovesti do razaranja PN-spoja.

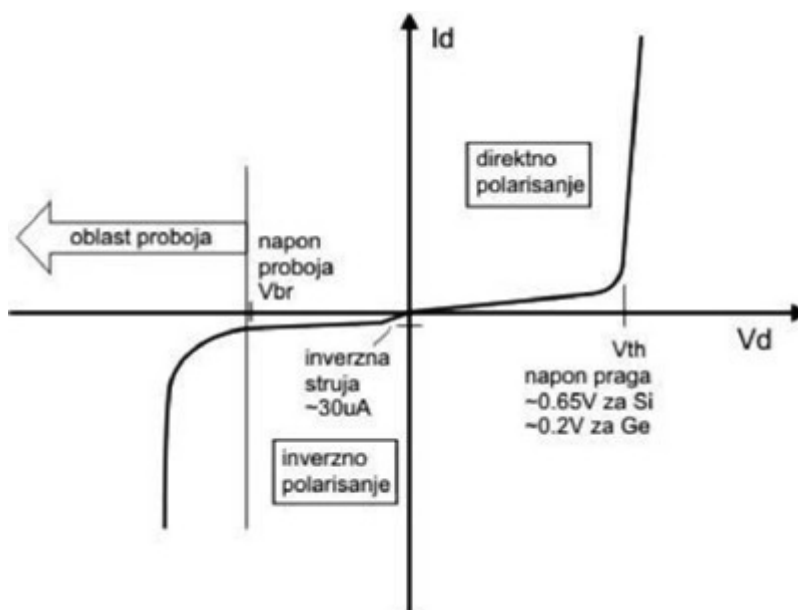
Cenerov proboj: Dešava se kod poluprovodnika sa velikom koncentracijom primesa. Zbog velike koncentracije primesa kristalna struktura nije ravnomerna, pa električno polje lako izvlači elektrone iz atoma. Suviše visok inverzni napon stvara unutar poluprovodnika jako električno polje. Ovo polje nasilno izvlači elektroni i dovodi do naglog porasta struje. Za izvlačenje elektrona iz poluprovodnika potrebno je određeno električno polje. Za poluprovodnike sa više primesa potrebno je manje električno polje.

2. DIODA

Poluprovodnički PN-spoj sa metalnim priključcima predstavlja poluprovodnički element – diodu. Struktura i simbol diode prikazan je na slici 2.1. Priključak P-oblasti naziva se anoda i obeležava se sa A, a priključak n-oblasti se naziva katoda i obeležava se sa K. Na simbolu diode se odmah vidi u kom smeru teče struja – od P ka N-oblasti odnosno od anode do katode.



Slika 2.1. a) Struktura poluprovodničke diode b) grafički simbol diode



Slika 2.2. Strujno naponska karakteristika silicijumske diode

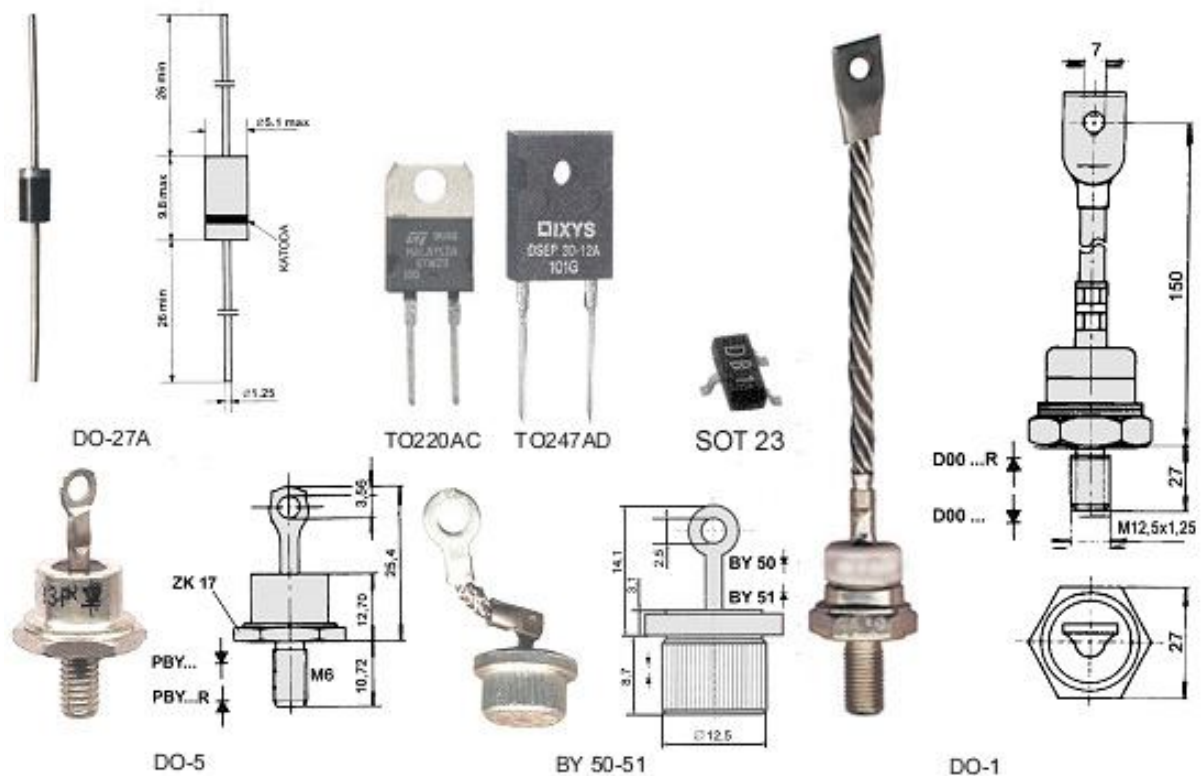
Za korisnika je veoma važno da poznaje strujno-naponsku karakteristiku nekog poluprovodničkog elementa (zavisnost struje od napona na poluprovodničkom elementu). Na slici 2.2. prikazana je strujno-naponska karakteristika jedne diode. Pošto je dioda PN-spoja i ovde imamo direktnu i inverznu polarizaciju (pozitivan napon se uzima od anode ka katodi). U direktnoj polarizaciji struja gotovo i ne teče dok napon diode ne dostigne napon praga provođenja V_{th} , ova oblast se naziva oblast veoma velike otpornosti. Daljim povećanjem napona struja naglo raste i ovu oblast nazivamo oblast male otpornosti.

Kod inverzne polarizacije struja je gotovo jednaka nuli (reda je μA). Pri inverznoj polarizaciji je veoma važno da se ne prekorači napon proboja V_{br} posle koga dolazi do proboja diode a neretko i do samog uništenja diode.

Osnovni tehnički podaci za diode su:

- Radna struja (strednja vrednost - I_{FAV} , ili efektivna vrednost - I_{FRMS}) je ona vrednost struje koju dioda može trajno da izdrži pri izvesnoj temperaturi kućišta.
- Dioda se može kratkotrajno opteretiti sa vršnom strujom koja je obično za deseti do pedeset puta veća od radne struje. Detaljni katalogi daju ponavljajuću (I_{FRM}) i jednostruku vršnu vrednost struje (I_{FSM}).
- Probojni napon (V_{BR}) je najveći napon do koje dioda može da se primenjuje.
- Pri naglom prelasku iz direktnog smera u inverzni, kroz diodu može u kratkom vremenu da prođe značajna struja dok se ne isprazne svi nosioci naelektrisanja iz okoline PN spoja. To kratkotrajno vreme je vreme oporavka diode (t_{rr}). Po ovom kriterijumu diode delimo na obične, brze i ultrabrze.

U zavisnosti od struje, napona i oblasti primene poluprovodničke diode se ugrađuju u razna kućišta (plastična, metalna), od kojih je nekoliko prikazano na slici 2.3.



Slika 2.3. Karakteristična kućišta poluprovodničkih dioda

Poluprovodničke diode pre svega delimo na osnovu materijala od kog su izrađene i to na: silicijumske i germanijske poluprovodničke diode. Najčešća podela se zasniva na primeni poluprovodničkih dioda, na osnovu čega ih delimo na: prekidačke diode, usmeračke diode, prenaponske zaštitne diode, visokonaponske diode, specijalne diode, grec ispravljačke itd.

2.1. Usmeračke diode

Ispravljanje naizmjeničnog napona je važna primena diode. Naizmjenični napon se primenom diode pretvara u jednosmerni pulsirajući napon. Na izlazu kola se dodaje filter da bi umanjio AC komponente u talasnom opsegu i da bi stvorio skoro konstantan oblik DC napona na izlazu iz kola. Ispravljačka kola se široko koriste u pretvaranju 220V AC, 50Hz mrežnog napona u DC napon za napajanje raznih elektronskih uređaja kao što su radio prijemnici, stereo uređaji kompjuteri i dr.

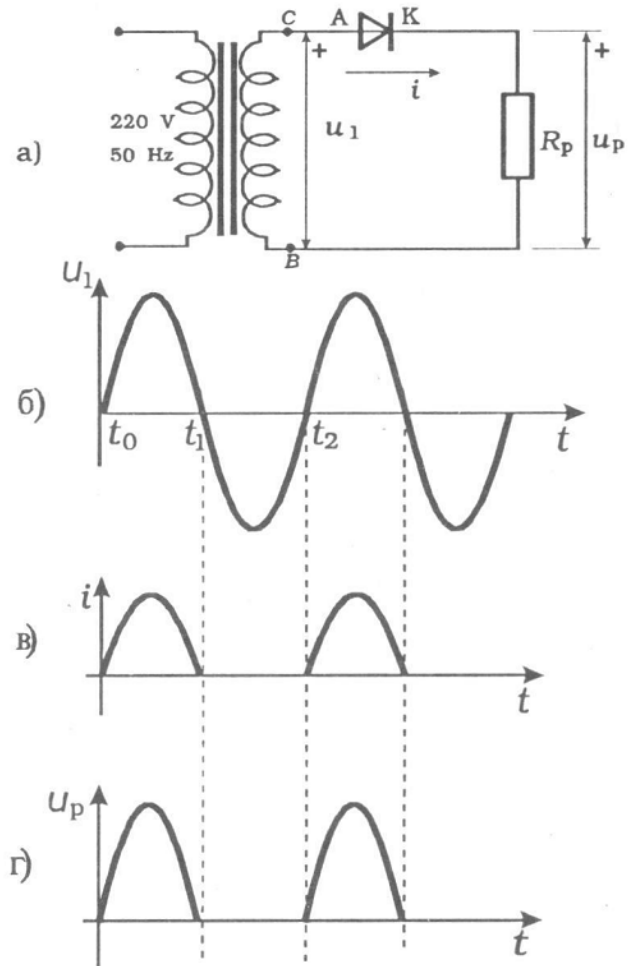
Iz gore navedenih razloga silicijumske usmeračke diode su verovatno najkorišćenije diode. Prave se za razne vrednosti struja i napona. Delimo ih na: obične ispravljačke diode, brze ispravljačke diode i ultra brze ispravljačke diode.

Najjednostavniju usmerač se može izvesti pomoću jedne diode. Prikazan je na slici 2.4. Na primar transformatora se dovodi naizmjenični napon 220 V iz gradske mreže, a na sekundaru se dobija sniženi naizmjenični napon, koji je prikazan na slici 2.4.b.

U pozitivnoj poluperiodi, od t_0 do t_1 , dioda je direktno polarisana i struja može nesmetano da teče ka potrošaču R_p . Napon na potrošaču je isti kao i na sekundaru transformatora. U negativnoj poluperiodi, od t_1 do t_2 , dioda je inverzno polarisana i struja ne teče pa je napon na potrošaču jednak nuli. Dobijeni napon na potrošaču je jednosmeran i pulsirajući. Talasni oblici struje diode i napon potrošača imaju isti oblik i prikazani su na slici 2.4 pod v i g.

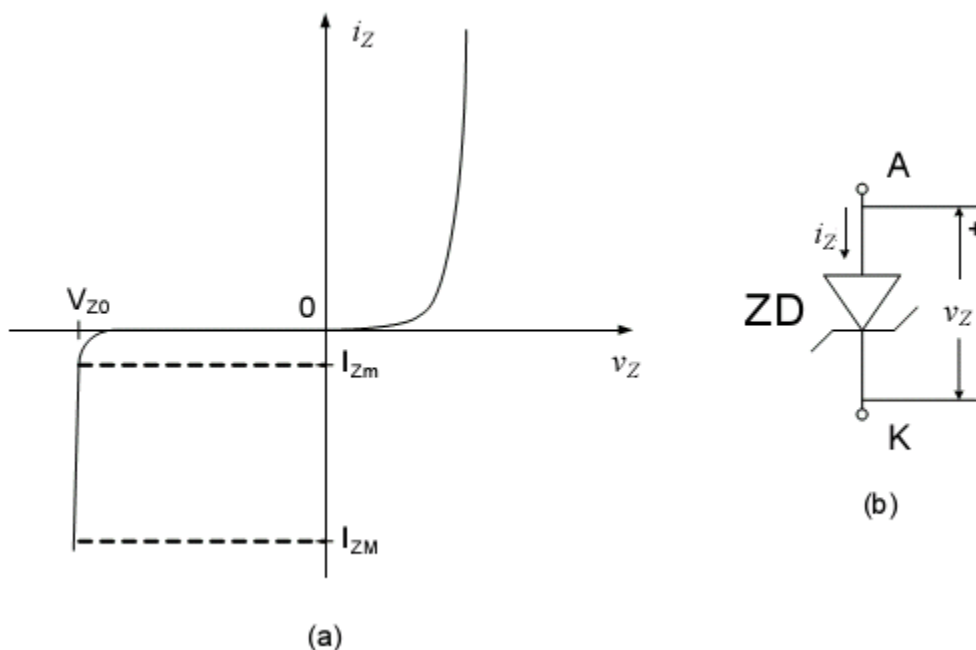
Da bi se na potrošaču dobio znatno bolji jednosmerni napon paralelno sa potrošačem se dodaje elektronski kondenzator, ali ovo će biti tema nekog kasnijeg gradiva.

Slika 2.4. Jednostrani usmerač



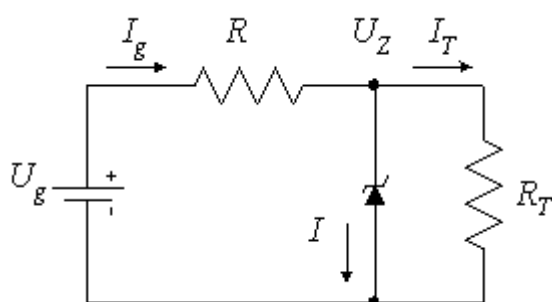
2.2. Stabilizatorska – Cener dioda

Cenerova (Zener) dioda se formira kao PN sloj jako dopiran nečistoćama. Kao posledicaa takve konstrukcije dobija se mali probojni napon, mala inverzna struja i povećana kapacitivnost prostornog tovara diode koja usporava nje prekidački režim rada. Simbol i statička karakteristika Cenerove diode prikazane su na slici 2.5. Probojni napon diode naziva se Cenerov napon V_{ZO} , slika 2.5. Radna tačka Cenerove diode se najčešće postavlja u oblast proboja definisanu opsegom struja $I_{Zm} < i_Z < I_{ZM}$. Time se dobija približno konstantan napon na diodi pri promeni vrednosti struje. Donja granica strujnog opsega je određena oblikom statičke karakteristike diode, odnosno njenom nelinearnošću, slika 2.5., a gornja dozvoljenom disipacijom $P_D = V_Z I_Z$ na diodi.



Slika 2.5. Cenerova dioda a) statička karakteristika, b) grafički simbol

Pošto je probojni napon relativno stabilne vrednosti, Cenerove diode su pogodne za formiranje izvora referentnog napona ali mogu da se koriste i za ograničenje napona (zaštita od prenapona). Primer jednostavnog stabilizatora napona sa cenerovom diodom prikazan je na slici 2.6.



napon na potrošaču malo menja.

Slika 2.6. Stabilizator napona

Stabilizacija napona se izvodi na sledeći način: povećanjem ulaznog napona U_g povećava se struja I_g kroz otpornik R . Napon na cenerovoj diodi je približno konstantan, pa se struja kroz potrošač praktično ne povećava.

Povećanje struje I_g izaziva povećanje struje I kroz cener diodu na kojoj se napon malo povećava (vidi sliku 2.5.). Vidi se da se kod velike promene ulaznog napona U_g



Slika 2.7. Cenerova dioda a) kućište DO-41 b) kućište DO-4b

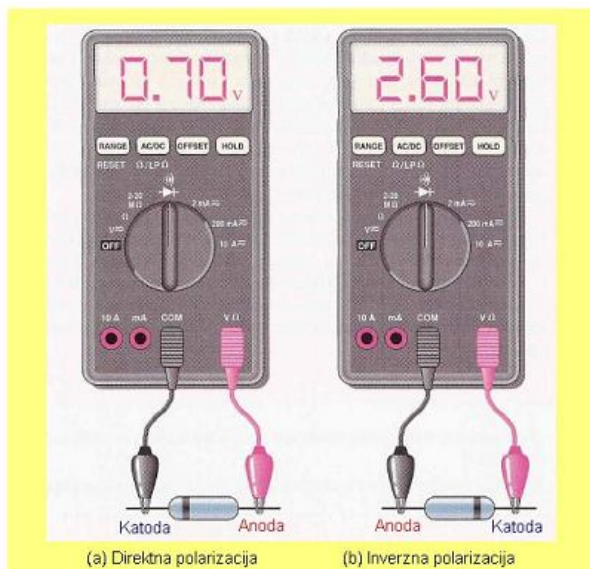
2.3. Testiranje ispravnosti dioda

Korišćenjem univerzalnih mernih instrumenata (multimetara), bilo digitalnih, bilo analognih, moguće je veoma brzo i efikasno ustanoviti da li je dioda ispravna ili ne. Naime,

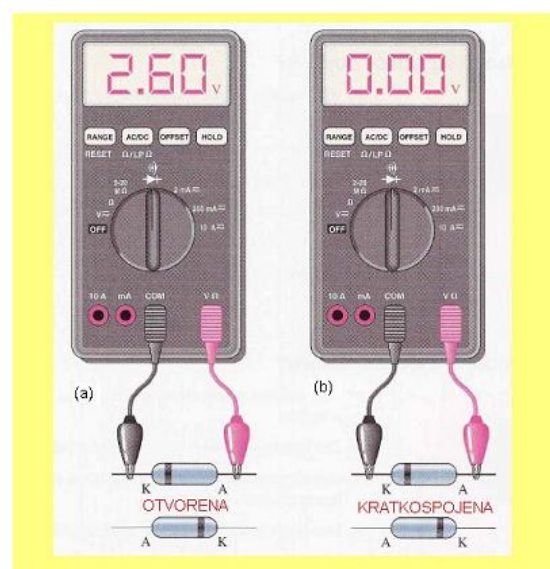
većina digitalnih multimetara ima mogućnost direktnog testiranja ispravnosti dioda. Tipičan takav multimeter, kao što se vidi na slici 2.8., ima oznaku diode ka kojoj treba usmeriti funkcionalni preklopnik. Svi multimetri poseduju baterije kojima se napajaju. U primeru na slici 2.8. prikazani merni instrument se napaja sa $V_{bat} = 2,6 \text{ V}$.

Ispravna dioda. Priključivanjem pozitivnog pola baterije digitalnog multimetra (crvena žica na sl. 2.8a) na anodu i negativnog pola (crna žica na sl. 2.8a) na katodu, na displeju se očitava vrednost napona na diodi koja može biti od 0,5 V do 0,9 V, sa tipičnom vrednošću oko 0,7 V (kao na sl. 2.8a). Vrlo često takvi multimetri poseduju i zvučni signal koji se u tom trenutku oglašava. Da bi bili sigurni da je dioda stvarno (ta nije: najverovatnije) ispravna, okreću se izvodi diode (dioda se fizi ki okrene za 180° , sl. 2.8b); tada se ista testira pod uslovima inverzne polarizacije. U tom slučaju se na displeju očitava napon napajanja instrumenta (2,6 V na primeru na sl. 2.8b). Kada se merenje ispravnosti diode vrši analognim multimetrom, preklopnik se postavi u položaj kojim se izabira merenje otpornosti. Napominje se da je kod takvih instrumenata u odnosu na digitalne multimetre izmenjen polaritet napona napajanja samog instrumenta: oznaka uzemljenja (obično iz nje izlazi crna žica) je na pozitivnom, a oznaka koja označava merenje otpornosti (trebalo bi po pravilu da bude crvena žica) je na negativnom polu baterije kojom se napaja multimeter. Stoga će kod ispravne diode igla multimetra skrenuti krajnje desno. Kada se dioda okrene (anoda i katoda izmene prethodni položaja), merna igla multimetra se ne pomera (u zavisnosti koji merni opseg otpornosti je izabran može se desiti da se igla malo i pomeri u desno).

Neispravna dioda. Neispravna dioda može biti kada se dioda ponaša kao prekid u kolu (tkzv. „otvorena“ dioda) ili kada je kratkospojena. U testu u kojem se koristi digitalni multimeter na displeju se kod otvorene diode i pri direktnoj i pri inverznoj polarizaciji očitava ista identifikacija, tj. napon baterije u instrumentu, sl. 2.9a. (kod nekih multimetara piše „OL“). Sa druge strane, kod kratkospojene diode i pri direktnoj i pri inverznoj polarizaciji na displeju piše takođe ista cifra, ali je to ili „0“ (kao na sl. 2.9b) ili napon znatno manji od napona baterije u instrumentu. Kada se koristi analogni instrument, skretanje merne igle je isto i pri direktnoj i pri inverznoj polarizaciji diode, s tim što je kod otvorene diode skretanje igle znatno veće nego kod kratkospojene diode.



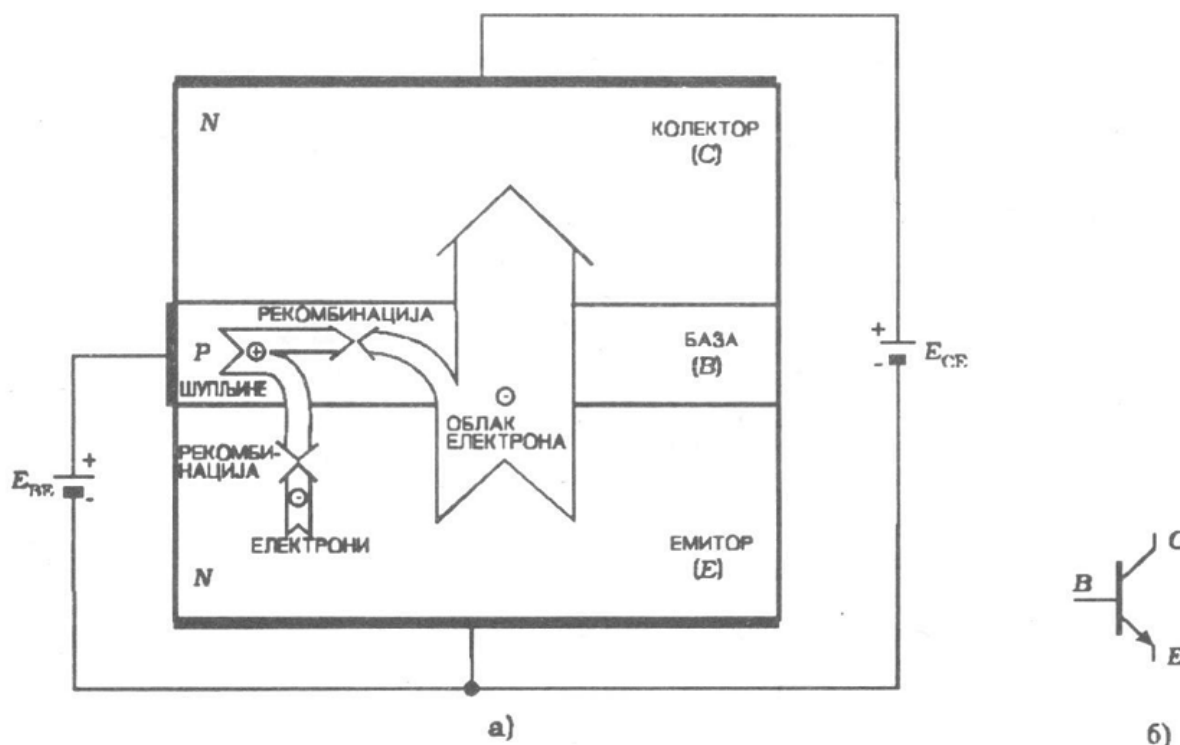
Slika 2.8. Test kojim se pokazuje da je dioda ispravna



Slika 2.9. Test koji pokazuje da je dioda neispravna.

3. BIPOLARNI TRANZISTOR

Tranzistor je najvažniji poluprovodnički elemenat. Služi kao osnova za izgradnju pojačavača, digitalnih kola, oscilatora itd. Naziv tranzistor je nastao skraćanjem engleske reči TRANSfer reSISTOT, koje u prevodu znače prenosni otpornik. Ima tri priključka Emitter (E), Bazu (B) i Kolektor (C). Ako se sagleda unutrašnja struktura tranzistora, uočava se da sadrži dva PN spoja (slika 3.1.). Oblast baze je mnogo uža od oblasti emitora i kolektora.



Slika 3.1. NPN tranzistor: a) Struktura sa komponentama struja, b) simbol

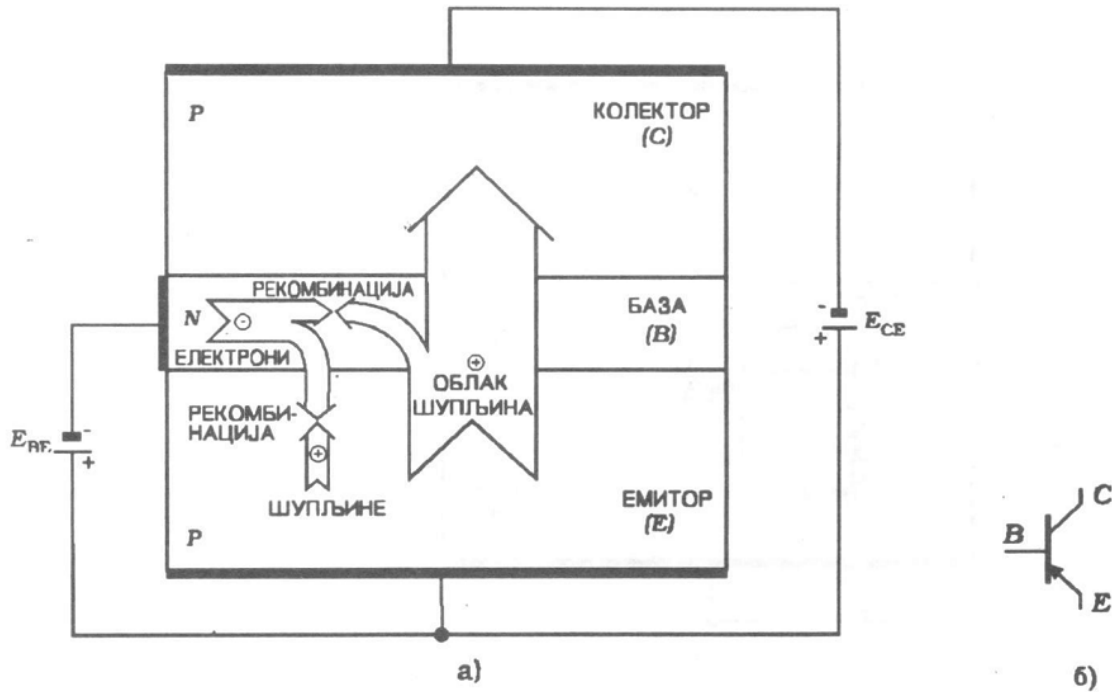
Između emitora i baze je jedan PN-spoj, dok je drugi između baze i kolektora. PN-spoj emitor-baza je direktno polarisan a PN-spoj baza-kolektor inverzno.

Na kretanje elektrona najviše utiče prvi izvor (E_{BE}) i od njega najviše zavisi koliko će elektrona da krene iz emitora. Drugi izvor (U_{CB}) služi za njihovo priključivanje u području baze i malo utiče na ukupan broj elektrona koji se kreću kroz tranzistor.

U emitoru su elektroni glavni nosioci elektriciteta, a u bazi su to šupljine. Kada se PN-spoj između emitora i baze propusno polariše, kroz njega protiče struja. Elektroni iz emitora se kreću ka bazi a šupljine iz baze ka emitoru. Šupljine koje iz baze prelaze u emitor rekombinuju se sa elektronima iz emitora. Zbog male koncentracije primesa u području baze ova struja je mala.

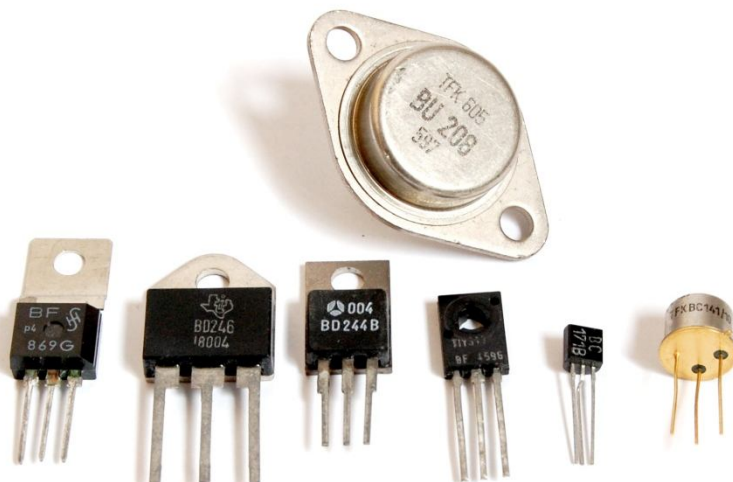
Glavni deo struje čine elektroni koji kreću iz emitora ka bazi. Mali deo ovih elektrona se rekombinuje sa šuplinama u bazi, a veći deo nastavlja da se difuzno kreće ka drugom PN-spoju. Izvor U_{CE} stvaraelektrično polje koje je usmereno od kolektora ka bazi. Ovo polje zahvata elektrone iz baze i usmerava ih ka kolektoru. Elektroni nastavljaju da se kreću ka metalnim priključcima i zatim se kreću provodnikom ka izvoru E_{CE} .

Pored NPN tranzistora postoji i PNP tranzistor koji se formira tako da su mu emitor i kolektor P-tipa, a baza N-tipa. I ovaj tranzistor se polarise sa dva izvora, samo što su ovi izvori suprotnog polariteta u odnosu na one kod NPN-tranzistora. Kod PNP tranzistora glavnu struju čine šupljine, što je prikazano na slici 3.2., koje se na sličan način kreću kroz tranzistor kao elektroni kod NPN tranzistora.



Slika 3.2. PNP tranzistor: a) Struktura sa komponentama struja, b) simbol

Osim na NPN i PNP tranzistore delimo na: pojačavačke i prekidačke. Unutar svake grupe postoje i interne podele u zavisnosti od osnovnih karakteristika tranzistora. Tako imamo tranzistore za male snage i snažne tranzistore; tranzistore za niske frekvencije (NF) i visoke frekvencije (VF); prekidačke tranzistore za impulsna kola i snage, itd. U zavisnosti od snage za koju su predviđene, bipolarni tranzistori se ugrađuju u različita kućišta. Nekoliko izvedbi je prikazano na slici 3.3.

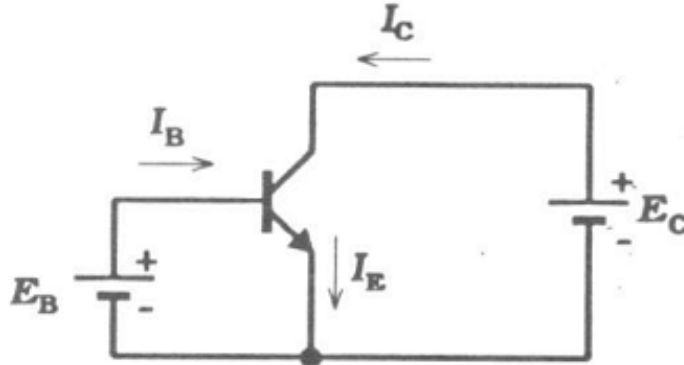


Slika 3.3. Neka od karakterističnih kućišta tranzistora.

3.1. Zavisnost struja kroz tranzistor. Strujno pojačanje

Sa slike 3.4. vidi se da struja emitora I_E izlazi a struje baze I_B i kolektora I_C ulaze u tranzistor. Ako bi tranzistor posmatrali kao jedna tačka, na osnovu prvog Kirhokovog zakona, možemo pisati:

$$I_E = I_C + I_B \quad [3.1]$$



Slika 3.4. Šema NPN tranzistora sa izvorima napajanja

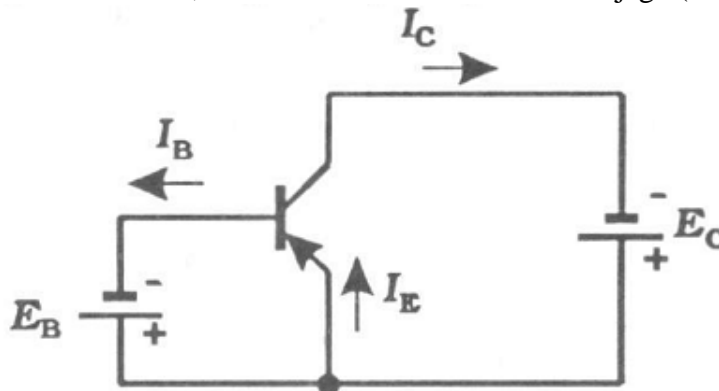
Odnos struje kolektora i baze naziva se strujno pojačanje i po definiciji je jednako količniku struje kolektora i baze.

$$h_{21e} = \frac{I_C}{I_B} \quad [3.2]$$

Tipična vrednost za strujno pojačanje h_{21e} je 100, a može da bude od 20 do 800. Pošto je struja baze mnogo manja od struje kolektora možemo je zanemariti, pa za struju emitora kažemo da je približno jednaka struji kolektora.

$$I_E \approx I_C \quad [3.3]$$

Za PNP tranzistor važi isti odnos struja, samo što su struje suprotnog smera, odnosno emitorska struja ulazi u tranzistor, a kolektorska i bazna izlaze iz njega (slika 3.5.).

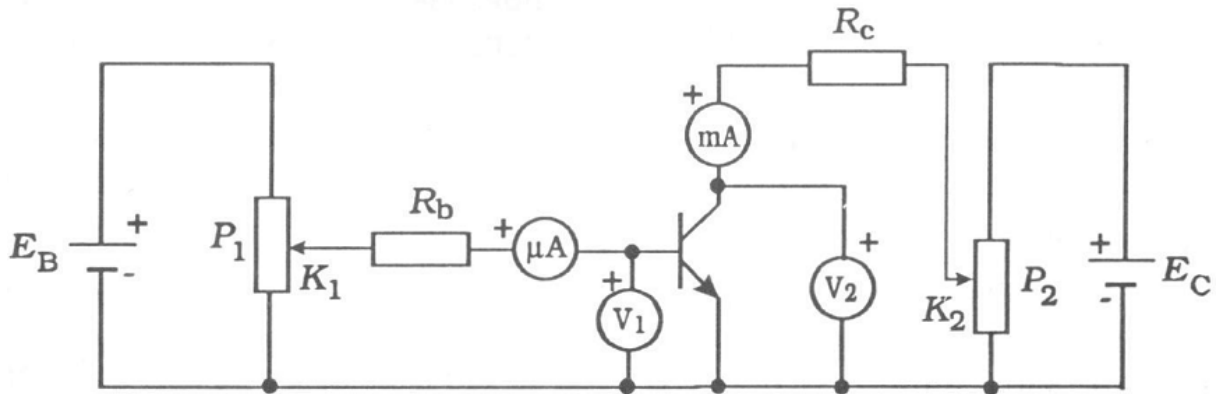


Slika 3.5. Šema PNP tranzistora sa izvorima napajanja

3.2. Karakteristike tranzistora

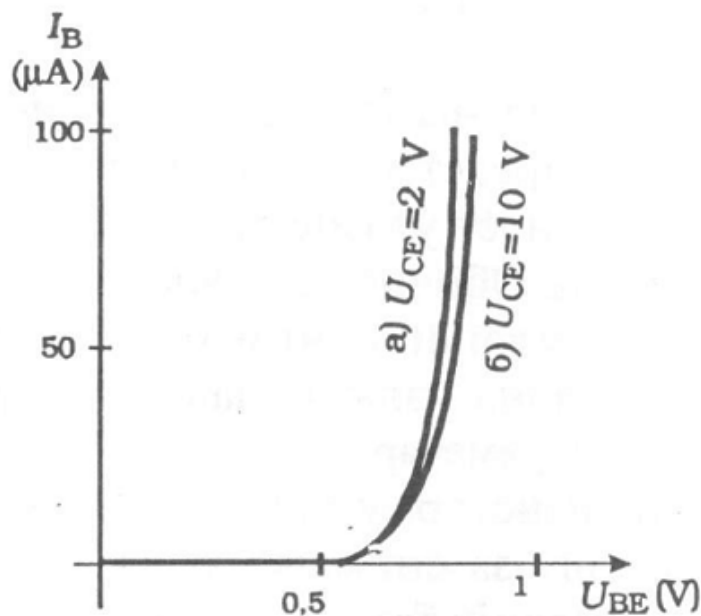
Tranzistor je nelinearni elemenat, čije se karakteristike ne mogu verno izraziti jednačinama, mada se pomoću njih rešavaju mnoga tranzistorska kola. Osobine tranzistora se znatno vernije mogu sagledati iz njegovih grafičkih karakteristika, koje se dobijaju merenjem.

Kod tranzistora je u praksi potrebno poznavati ulazne, prensne i izlazne karakteristike. Ove karakteristike se mogu snimiti uz pomoć kola sa slike 3.6.



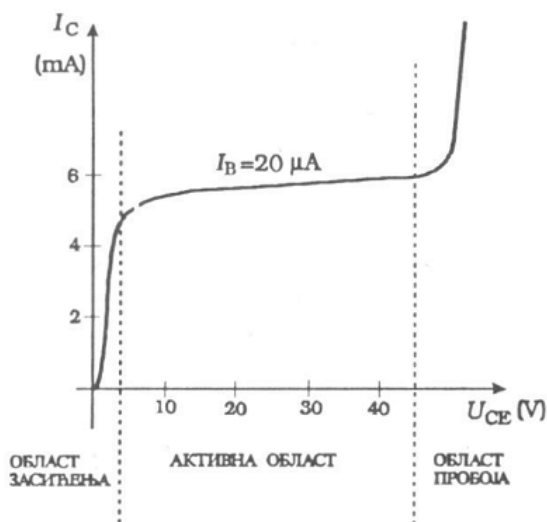
Slika 3.6. Kolo za snimanje karakteristika tranzistora

Ulazna karakteristika predstavlja međusobnu zavisnost ulaznih veličina (ulazne struje I_B od ulaznog napona U_{BE}), uz uticaj ostalih veličina tranzistora. Ulazna karakteristika tranzistora data je na slici 3.7.

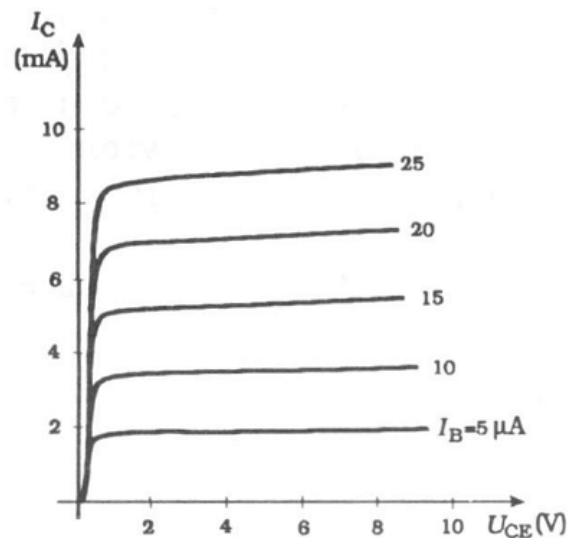


Slika 3.7. Ulazna karakteristika tranzistora za dve vrednosti napona U_{CE}

Izlazne karakteristike $I_C = f(U_{CE})$ za struju baze I_B kao parametar se vrši za razne vrednosti struje baze, počevši od $I_B = 0$. Jedna snimljena karakteristika ima oblik kao na slici 3.8. i podeljena je na tri oblasti: oblast zasićenja, aktivna oblast i oblast proboja.



Slika 3.7. Izlazna karakteristika tranzistora



Slika 3.8. Familija izlaznih karakteristika Tr

3.3. Ograničenja u radu tranzistora

Da nebi došlo do proboja tranzistora moraju se ograničiti vrednost napona između kolektora i emitora U_{CE} . Maksimalnu vrednost ovog napona se može naći u podacima o tranzistoru koje daje proizvođač (U_{CEM}).

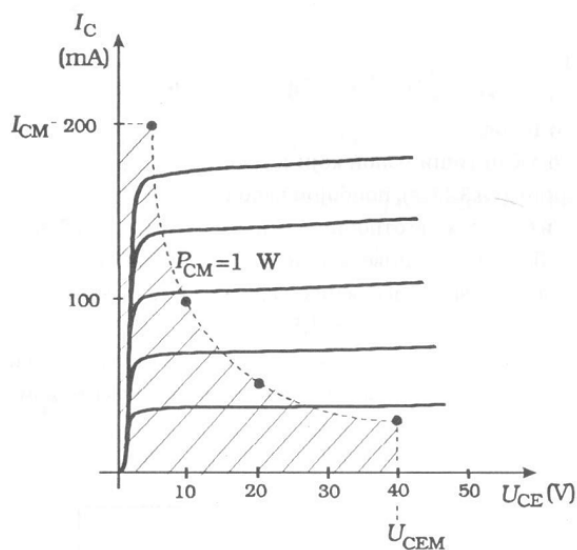
Isto tako proizvođač daje i maksimalnu vrednost struje I_{CM} .

Kada se pomnože napon U_{CE} tranzistora i struja I_C kroz njega dobija se snaga na tranzistoru P_C .

$$P_C = U_{CE} I_C \quad [3.4]$$

Snaga na tranzistoru je takođe ograničena i njenu maksimalnu vrednost P_{CM} takođe daje proizvođač, uz odgovarajuće hlađenje. Na osnovu nje možemo izabrati struju koja je dozvoljena pri određenom naponu.

$$I_C = \frac{P_{PM}}{U_{CE}} \quad [3.5]$$



Slika 3.9 Oblas dozvoljene upotrebe tranzistora.

3.4. Parametri tranzistora

Bipolarni tranzistori su možda i najupotrebnija aktivna komponenta, koja se karakteriše sa više parametara. Sa obzirom na te činjenice komercijalni katalozi daju samo osnovne podatke o tranzistoru kao što su: tip tranzistora (NPN ili PNP); opšta namena; maksimalni radni napon između kolektora i emitera; maksimalnu trajnu struju kolektora; maksimalnu radnu snagu; strujno pojačanje; maksimalnu radnu frekvenciju; kućište unutar koga je smešteno; itd.

Kad se izabere odgovarajući tranzistor korisnik na osnovu oznake može da pronade detaljnije karakteristike koje daje proizvođač u svom katalogu ili preko interneta. Neke od osnovnih karakteristika biće objašnjene u daljem tekstu:

V_{CEO} trajni napon kolektor – emiter: predstavlja maksimalni dozvoljni napon između kolektora i emitera kada je baza priključena na masu.

I_C trajna kolektorska struja: predstavlja maksimalnu dozvoljenu kolektorsku struju u trajnom opterećenju.

I_{CM} kolektorska struja pika: predstavlja maksimalno dozvoljenu kolektorsku struju u kratkom vremenskom intervalu.

P_{tot} radna snaga: predstavlja maksimalnu dozvoljenu snagu opterećenja pri temperaturi ambijenta $25^\circ C$.

h_{21e} (β) – strujno pojačanje: predstavlja pojačanje bazne struje (I_C/I_B)

V_{BE} prag provođenja baza – emiter: najčešće je 0,7V za silicijumske tranzistore.

$V_{BE(sat)}$ napon saturacije baza – emiter: predstavlja vrednost napona baza – emiter kad tranzistor radi u prekidačkom režimu.

$V_{CE(sat)}$ napon saturacije kolektor- emiter: predstavlja vrednost napona kolektor – emiter kad tranzistor radi u prekidačkom režimu.

f_T frekvencija tranzistora: maksimalna frekvencija do koje tranzistor radi sa karakteristikama koje daje proizvođač.

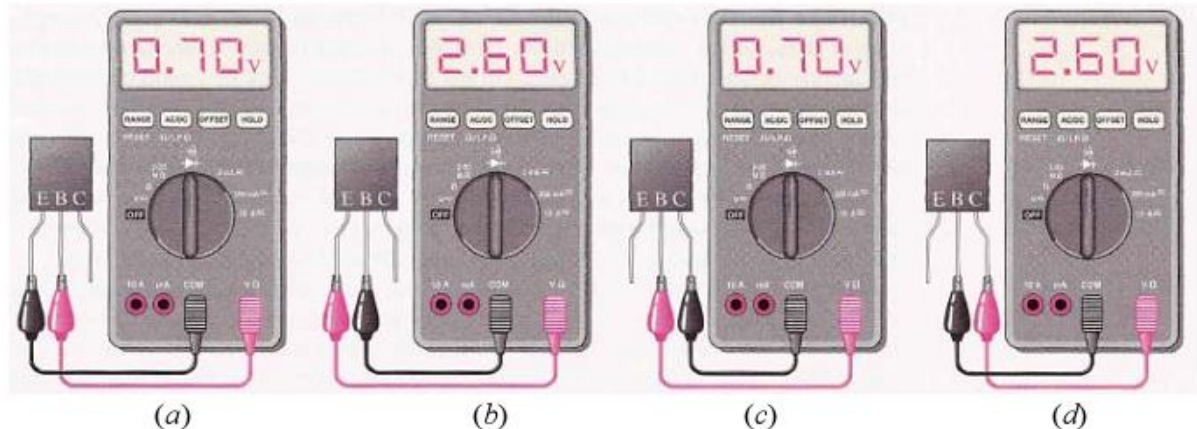
T_{amb} temperatura ambijenta: predstavlja granice dozvoljene temperaturu okoline pri radu tranzistora.

T_{stg} temperatura skladištenja: predstavlja granice temperature u skladištu gde se čuvaju ili transportuju tranzistori.

$R_{th(JA)}$ termička otpornost kristal – ambijent: predstavlja toplotnu otpornost između kristala i okoline (važno kod većih snaga, više u poglavlju 3.7).

3.5. Testiranje ispravnosti bipolarnih tranzistora

S obzirom da se tranzistor, praktično, sastoji od dva p-n spoja, testiranje njegove ispravnosti je slično testiranju ispravnosti dioda (odjeljak 2.3 i slike 2.8. i 2.9.). Stoga je na slici 3.10. prikazan samo jedan od načina ispitivanja emitorskog i kolektorskog spoja digitalnim multimetrom (sa napomenom da preklopnik treba prebaciti u položaj koji označava merenje dioda).



Slika 3.10 Testiranje ispravnosti NPN bipolarnih tranzistora:

- (a) direktno polarisan emitor-bazni spoj;
- (b) inverzno polarisan emitor-bazni spoj;
- (c) direktno polarisan kolektor-bazni spoj;
- (d) inverzno polarisan kolektor-bazni spoj.

3.6. Obeležavanje poluprovodnika

Prilikom razvoja poluprovodnika odvojile su se četiri grupacije koje su ustanovile svoje načine obeležavanja poluprovodnika, tako da sada imamo četiri načina obeležavanja poluprovodnika i to: evropski način, američki način, japanski način i ruski način.

EVROPSKI NAČIN OBELEŽAVANJA POLUPROVODNIKA

Sastoki se od dva slova i broječne oznake

Prvo slovo označava osnovni materijal:

A – Ge (germanijum)

B – Si (silicijum)

C – GaSa (galijum-arsenid)

D – InAn (indijum antimonid)

R – halgeneratori i foto-provodnici

Drugo slovo označava primenu:

A – dioda-detektor

B – dioda sa promenljivi kapacitetom, varikap ili Si dioda,

C – niskofrekventni tranzistor male snage

D – niskofrekventni tranzistor velike snage
E – tunel dioda
F – visokofrekvencijski tranzistor
H – sonda za magnetno polje
K – halgenerator u otvorenom polju
L – visokofrekvencijski tranzistor snage
M – halgenerator u zatvorenom polju
P – poluprovodnik za rendgenska zračenja
Q – poluprovodnici koji svetle (foto-diode i tranzistori, LE diode)
R – poluprovodnici za elektronsko upravljanje
S – tranzistor prekidač za impulsna kola
U – tranzistor prekidač snage
T – tiristor
X – dioda za umnožavanje frekvencija
Y – dioda za ispravljanje naizmjeničnog napona
Z – cener dioda

Broj iza slova označava seriju, P ili N tip, a slovo iza broja podgrupu.

Primer:

AA 130 germanijum tačkasta dioda
BA 101 Si tačkasta dioda – varikap
AC 105 Ge slojni tranzistor male snage
BC 107 Si tranzistor male snage

AMERIČKI NAČIN OBELEŽAVANJA POLUPROVODNIKA

Sastoji se od jedne cifre, jednog slova, nekoliko brojeva i eventualno, slovo

Prva cifra:

„1“ (jedan) – dioda
„2“ (dva) – sve vrste tranzistora, dijaka, trijaka i tiristora (sem mosfeta)
„3“ (tri) – sve vrste MOSFET poluprovodnika

Broj iza slova označava redni broj konstrukcije
Slovo iza brojeva označava podgrupu u istoj seriji.

Primer:

1N64 Ge detektorska dioda – u Evropi AA117
2N450 Ge tranzistor snage – u Evropi BD245

JAPANSKI NAČIN OBELEŽAVANJA POLUPROVODNIKA

Sastoji se od jedne cifre, dva slova i broja

Prva cifra:

„1“ (jedan) – dioda

„2“ (dva) – sve vrste tranzistora

Prvo slovo iza broja uvek je „S“ (Semiconductor)

Drugo slovo

A – PNP VF tranzistor

B – PNP NF tranzistor

C – NPN VF tranzistor

D – NPN NF tranzistor

Redni broj posle slova određuje poluprovodnik

Primer:

2SA75 je PNP VF tranzistor – u Evropi AF117

RUSKI NAČIN OBELEŽAVANJA POLUPROVODNIKA

Sastoji se od dva znaka, tri brojke i na kraju jedno slovo koje označava podgrupu

Prvi znak

G ili 1 – Ge i njegova jedinjenja

K ili 2 – Si i njegova jedinjenja

A ili 3 – Ga i njegova jedinjenja

Drugi znak

D – ispravljačke diode

T – tranzistori izuzev FET-a

P – FE tranzistori

V – varikap diode

A – mikrotalasne diode

X – diaci

J – trijaci

I – tunel diode

C – cener diode

L – LE diode

G – generator šuma

K – strujni stabilizator

Primer: KT104G – u Evropi BC178A, BSZ10

Zbog raznovrsne oznake u praksi se koriste tablice sa odgovarajućim zamenama pojedinih komponenti.

2.7. Hlađenje poluprovodničkih elemenata

Svi se poluprovodnički elementi bez razlike zagrevaju u pugonu, a osobito je to izraženo kod onih koji rade sa velikim strujama. Zagreva se u stvari kristal, ali tu toplotu osećamo preko kućišta. Da se kristal nebi pregrejao iznad dopuštene temperature, potrebno je preuzeti mere za hlađenje.

Gde god postoje dve tačke različite temperature, među njima postoji i neki toplotni otpor. Najtopliji je poluprovodnički kristal sa temperaturom T_J . Nešto nižu temperaturu ima kućište poluprovodničkog elementa T_C . Površina hladnjaka se zagreva na temperaturu T_S i predaje je okolini, čiju temperaturu obeležavamo sa T_A .

Vrednost za T_J i T_C kao i toplotni otpor između kristala i kućišta poluprovodnika R_{thJC} , mogu se naći u podacima o poluprovodnicima koje objavljuju njihovi proizvođači. T_A se zna s obzirom na uslove pogona, a T_S može se po potrebi izračunati ili izmeriti.

Toplotni otpor hladnjak moguće je izračunati preko formule:

$$R_{thSA} = \frac{T_S - T_A}{Pd}, \quad [3.6]$$

izražen je u °C/W. Što je taj broj manji hladnjak je bolji
Generalna formula koja opisuje toplotni proces hlađenja je:

$$T_J = T_A + Pd \cdot (R_{thJC} + R_{thCS} + R_{thSA}), \quad [3.7]$$

Odavde je moguće izvršiti izbor hladnjaka koristeći formulu:

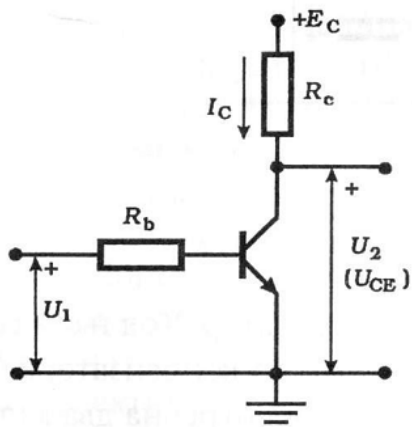
$$R_{thCS} + R_{thSA} = \frac{T_J - T_A}{Pd} - R_{thJC} \quad [3.9]$$

gde je :

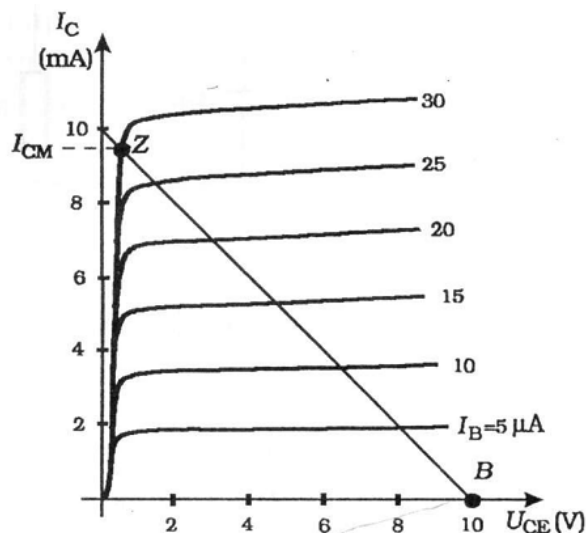
- Pd – gubici u poluprovodniku,
- R_{thJC} – toplotni otpor kristal-kućište (fabrički definisano)
- R_{thCS} – toplotni otpor kućište-hladnjak (zavisi od montaže)
- R_{thSA} – toplotni otpor hladnjaka.

3.8. Tranzistor kao prekidač

U elektronskim kolima često je potrebno da se tranzistor upotrebi kao prekidač, tj. da preko njega neki potrošač bude uključen ili isključen. Tranzistor se može koristiti kao elektronski prekidač tako, da se naponom između baze i emitora kontroliše rad tranzistora u zasićenju (prekidač uključen) ili u zakočenju (prekidač isključen). Primer jednog takvog kola prikazano je na slici 3.11. U ovom kolu otpornik R_c je potrošač kroz koji se primenom tranzistora može propustiti (ili ne propustiti) struja I_c . Otpornik R_b služi za ograničenje struje baze.



Slika 3.11. Tranzistor kao prekidač



Slika 3.12. Određivanje napona i struje tranzistora

Primenom drugog kirhokovog zakona za kolo sa slike 3.11. možemo pisati:

$$E_C - R_C I_C - U_{CE} = 0 \quad [3.10]$$

Tranzistor ne provodi kada je njegova struja baze jednaka nuli (kada je napon U_1 jednak nuli); tada je i njegova kolektorska struja jednaka nuli, tranzistor je u zakočenju. Napona na tranzistoru je jednak naponu napajanja E_C , tačka B na slici 3.12.

Ako struja baze I_B počne da raste, takođe raste i kolektorska struja I_C , a napon U_{CE} prema jednačini 3.10 opada. Kolektorska struja može da raste samo do vrednosti I_{CM} kada tranzistor prelazi u stanje pune provodnosti odnosno zasićenja, tačka Z na slici 3.12.

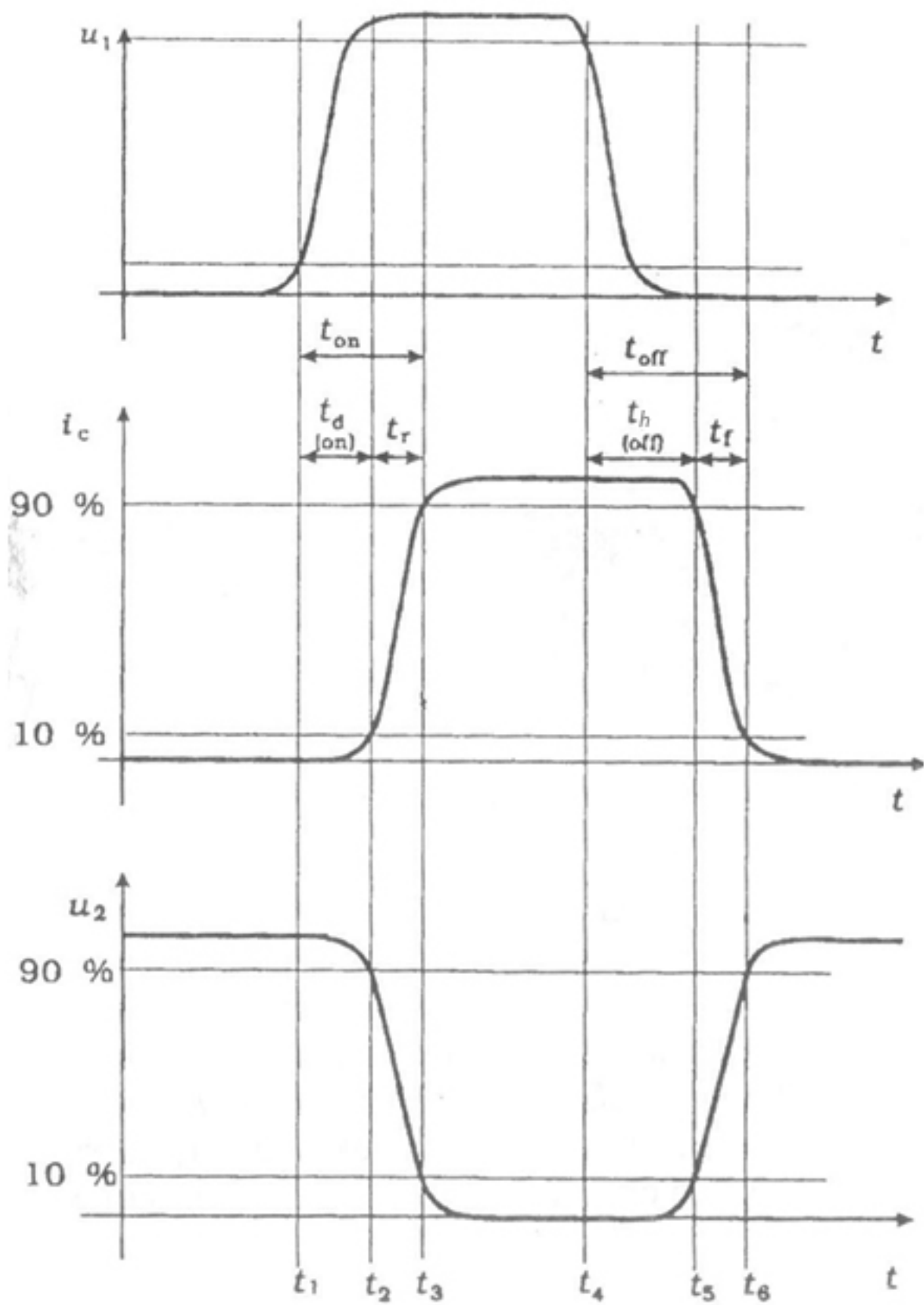
Smatra se da je tranzistor male snage u zasićenju ako je struja baze deset puta manja od struje kolektora. U stanju zasićenja struja baze je znatno veća od normalne, koja se dobija kada se kolektorska struja подели koeficijentom h_{21e} . Napon između kolektora i emitora nije jednak nuli, naziva se napon zasićenja i obeležava se sa U_{CEsat} . Napon zasićenja se obično daje za odnos struja kolektora i baze $I_C/I_B=10$, i tipična vrednost je 0,2V. Zbog niskog napona zasićenja U_{CEsat} snaga na tranzistoru je obično znatno manja od maksimalne pa nije uvek potrebno stavljati tranzistor na hladnjak.

Uslud velike struje baze povećava se i napon između baze i emitora, koji se obeležava sa U_{BEsat} . Njegova tipična vrednost je od 0,8 do 1V.

Prilikom prelaska iz stanja provođenja u stanje neprovođenja, tranzistor prolazi kroz prelazno stanje. Tada se radna tačka premešta iz tačke Z u B. U prelaznom stanju se može dogoditi da snaga na tranzistoru bude velika, pa je zato važno vreme prelaska iz stanja provođenja u stanje neprovođenja i obrnuto.

Vremenski dijagrami koji opisuju prelazne procese koji se dešavaju u kolu sa slike 3.11. dati su na slici 3.13. Sa slike se vidi da struja ne počinje odmah da raste nego posle vremena t_d koje se naziva vreme kašnjenja. Vreme kašnjenja postoji zbog uticaja parazitnih kapacitivnosti. Posle vremena kašnjenja t_d kolektorska struja počinje da raste, ali taj porast nije trenutni. Sa slike 2.13. vidimo da je potrebno dodatno vreme t_r da struja kolektora poraste. Ovo vreme nazivamo vreme porasta i računa se od trenutka kada kolektorska struja raste sa 10% na 90% svoje maksimalne vrednosti.

Posle završetka ulaznog impulsa kolektorska struja nastaje da teče dok se sporedni nosioci elektriciteta nevrata iz baze u emitor. Ovo vreme sa naziva vreme zadržavanja i obeležava se sa t_h . Posle ovog vremena kolektorska struja počinje da opada. Vreme njenog označava se sa t_f i definiše se kao vreme opadanja sa 90% na 10% maksimalne vrednosti.



Slika 3.13. Definisane vremenskih pojava kod impulsa