

1. Poluvodička dioda

1.1 Poluvodiči

1.2 Poluvodička PN-dioda

1.3 Sklopovi s diodama





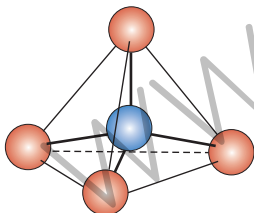
Slika 1.1-1

Silicij



Slika 1.1-2

Germanij



Slika 1.1-3

Tetraedarska prostorna veza među atomima

1.1 POLUVODIČI

1.1.1 Svojstva poluvodiča

Poluvodiči su materijali čija je električna provodnost izrazito manja od provodnosti vodiča, a veća od provodnosti izolatora, te ovisi o namjerno dodanim primjesama.

U elektronici i mikroelektronici poluvodiči se upotrebljavaju kao:

- **elementarni poluvodiči:** silicij (Si, slika 1.1.-1) i germanij (Ge, slika 1.1-2);
- **složeni poluvodiči:** galijev arsenid (GaAs), galijev nitrid (GaN), indijev fosid (InP), indijev antimonid (InSb), cinkov sulfid (ZnS) i dr.

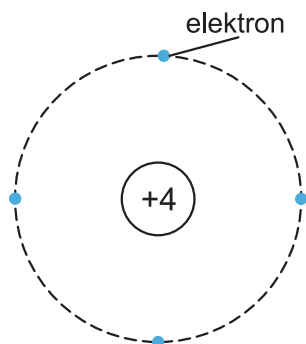
Elementarni poluvodiči koriste se za izradu poluvodičkih dioda, tranzistora, integriranih sklopova, tiristora, elektroničkih sklopova te infracrvenih detektora, a složeni poluvodiči za izradu svjetlećih dioda, poluvodičkih lasera, detektora svjetlosti, fluorescentnih materijala (zaslon TV ekrana) i dr.

Elementarni poluvodiči silicij i germanij su četverovalentni elementi koji imaju kristalnu strukturu tetraedra, dijamantnog tipa, kao što je prikazano na slici 1.1-3. Svaki atom dijeli svoja četiri valentna elektrona s četiri susjedna atoma, udružujući ih u parove. Atomi se nalaze u vrhovima tetraedra.

Atome silicija i germanija prikazujemo pojednostavljenim modelom atoma s elektronima valentne ljuske i onoliko protona koliko ima valentnih elektrona koji su s njima u ravnoteži, prema slici 1.1-4.

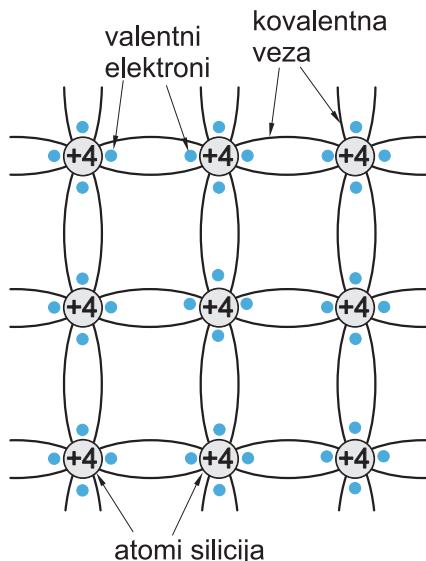
Ako poluvodič nema primjesa drugih elemenata, naziva se **čisti** ili **intrinzični poluvodič**.

Na temperaturama blizu apsolutne nule ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$) čisti poluvodič nema slobodnih nosilaca naboja jer su svi valentni elektroni čvrsto vezani u kovalentnu vezu. Struja kroz poluvodič ne teče, pa se on ponaša kao izolator (slika 1.1-5).



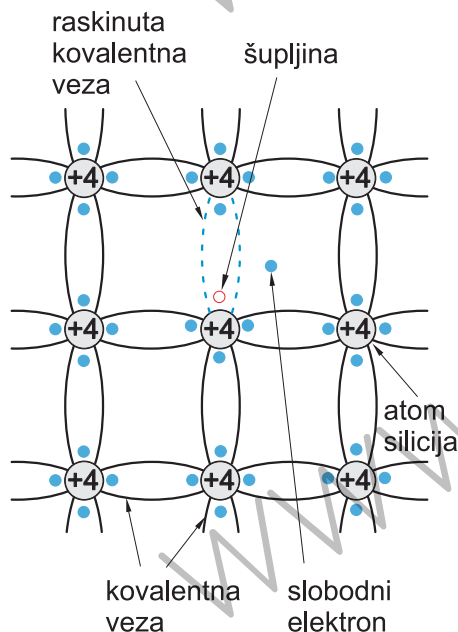
Slika 1.1-4

Pojednostavljeni model atoma poluvodiča silicija i germanija



Slika 1.1-5

Poluvodič blizu temperature $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$
(dvodimenzionalni prikaz)



Slika 1.1-6

Poluvodič na sobnoj temperaturi
(dvodimenzionalni prikaz)

Na određenoj temperaturi neki valentni elektron dobije dovoljno energije te može napustiti kovalentnu vezu i postati **slobodni elektron**. Gubitkom elektrona u atomu ostaje jedan pozitivni naboj više i taj atom postaje pozitivan ion. Nastalo prazno mjesto nazivamo **šupljinom**, kako je prikazano na slici 1.1-6. Dakle, šuplinu smatramo nosiocima pozitivnog naboja. Ona ima jednaku vrijednost naboja kao elektron, ali suprotnog predznaka.

Proces kidanja kovalentne veze i stvaranja parova elektron-šupljina naziva se **generiranje nosilaca naboja**. Stvoreni slobodni elektroni i šupljine gibaju se kroz poluvodič kaotično i u određenom se vremenu ponište s nosiocem suprotnog naboja. Taj proces naziva se **rekombinacija**.

U čistom poluvodiču procesi generacije i rekombinacije su u ravnoteži, pa je koncentracija šupljina i elektrona jednaka.

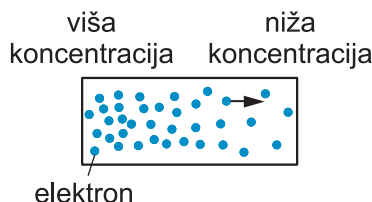
Slobodni elektroni su nosioci negativnog, a **šupljine** pozitivnog naboja, te se mogu kretati kroz poluvodič i voditi struju.

Želimo li povećati vodljivost germanija i silicija, dodajemo im primjese, čime se stvara veći broj šupljina ili slobodnih elektrona, pa nastaju **primjesni** ili **ekstrinzični poluvodiči**. Dodavanjem trovalentnih i peterovalentnih primjesa nastaju dva tipa poluvodiča: N-tip i P-tip.

VODLJIVOST POLUVODIČA

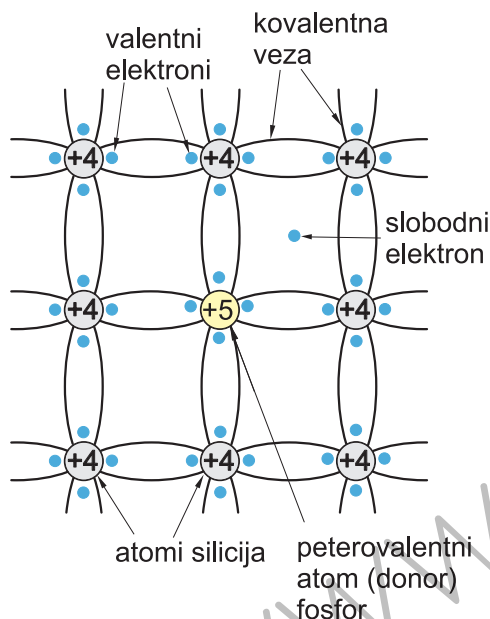
Struju u poluvodiču vode slobodni elektroni i šupljine. Struja kroz poluvodič može nastati zbog neravnotežne koncentracije nosilaca naboja ili zbog unutarnjeg električnog polja.

Ukoliko postoji neravnotežna koncentracija nosilaca naboja, u poluvodiču nastaje **difuzijska struja**. Nosioci naboja gibaju se s mjesta više koncentracije prema mjestu niže koncentracije, s tendencijom da se koncentracije izjednače (slika 1.1-7).

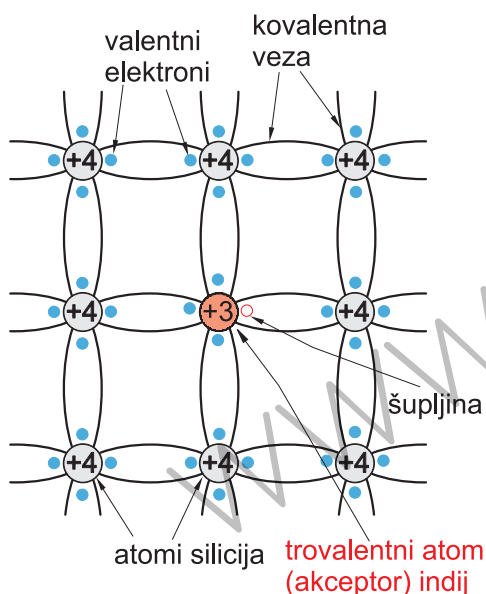


Slika 1.1-7

Poluvodič na sobnoj temperaturi
(dvodimenzionalni prikaz)

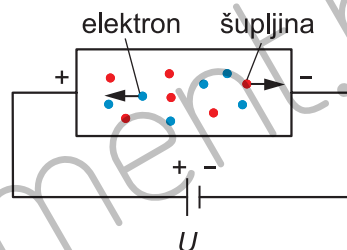


Slika 1.1-9
Poluvodič N-tipa



Slika 1.1-10
Poluvodič P-tipa

Ako se na poluvodič priključi vanjski napon, pod djelovanjem nastalog električnog polja u poluvodiču dolazi do gibanja nosilaca naboja. Kažemo da teče **driftna struja**. Dok se elektroni gibaju prema pozitivnom polu izvora, šupljine se gibaju prema negativnom polu. Jakosti struja tih dvaju tipova vodljivosti se zbrajaju (slika 1.1-8).



Slika 1.1-8
Driftna struja

1.1.2 N-tip i P-tip poluvodiča

a) N-tip poluvodiča

Poluvodič N-tipa je poluvodič u kojem je koncentracija slobodnih elektrona veća od koncentracije šupljina, a nastaje tako da se čistom poluvodiču doda peterovalentni element.

Čistom siliciju (ili germaniju) dodaje se peterovalentni element, najčešće fosfor, arsen ili antimon. Četiri valentna elektrona primjese čine kovalentnu vezu s četiri susjedna atoma silicija, a peti postaje slobodni elektron, kao što je prikazano na slici 1.1-9. Svaki peterovalentni atom daje po jedan slobodni elektron, pa se naziva **donor**. Nakon što otpusti jedan elektron, atom donora postaje **pozitivan ion**.

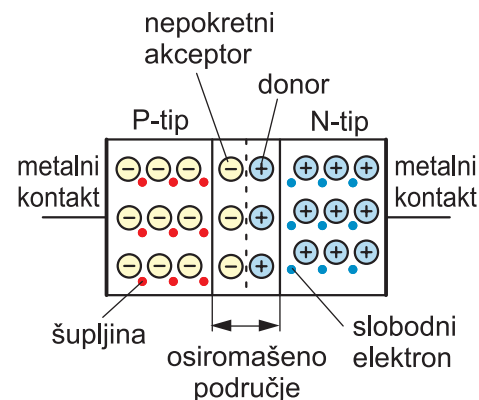
Pored slobodnih elektrona nastalih dodavanjem primjese, postoji i mala koncentracija šupljina nastala stalnim procesom generacije i rekombinacije parova elektron-šupljina.

U poluvodiču N-tipa slobodni elektroni su **većinski**, a šupljine **manjinski nosioci naboja**.

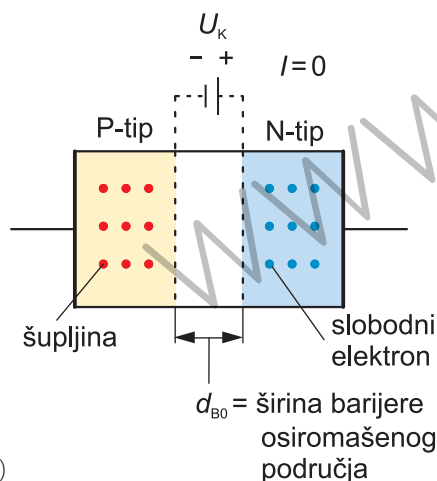
U poluvodiču N-tipa vodljivost je ostvarena slobodnim elektronima, tj. negativnim nabojem.

b) P-tip poluvodiča

Poluvodič P-tipa je poluvodič u kojem je koncentracija šupljina veća od koncentracije slobodnih elektrona, a nastaje tako da se čistom poluvodiču doda trovalentni element.



a)



b)

- šupljina
- elektron
- N-tip
- P-tip
- osiromašeno područje

Slika 1.1-11

PN-spoj u stanju ravnoteže:

- a) s prikazanim većinskim nosiocima naboja, donorima i akceptorima
- b) pojednostavljeni prikaz s većinskim nosiocima naboja

Čistom siliciju (ili germaniju) dodaje se trovalentni element, najčešće bor, indij, galij ili aluminij. Tri valentna elektrona primjese čine kovalentnu vezu s tri susjedna atoma silicija, a na četvrtom mjestu ostaje **šupljina**, kako je prikazano na slici 1.1-10. Na takvo prazno mjesto može doći elektron susjednog atoma, a na tom atomu silicija ostaje šupljina. Dolaskom četvrtog elektrona, atom primjese postaje negativan ion, pa se naziva **akceptor**.

Pored šupljina nastalih dodavanjem primjese, postoji i mala koncentracija slobodnih elektrona nastala stalnim procesom generacije i rekombinacije parova elektron-šupljina.

U poluvodiču P-tipa šupljine su **većinski**, a slobodni elektroni **manjinski nosioci naboja**.

U poluvodiču P-tipa vodljivost je ostvarena šupljinama, tj. pozitivnim nabojem.

1.1.3 PN-spoj u stanju ravnoteže

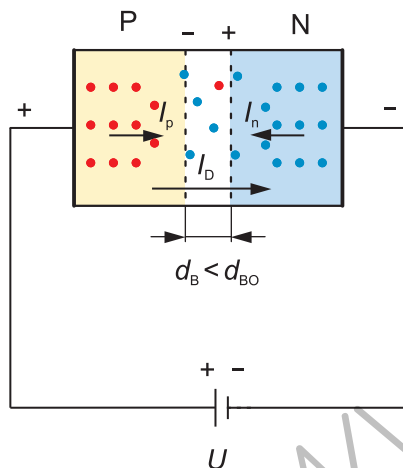
PN-spoj je dvoslojna struktura sastavljena od slojeva P-tipa i N-tipa poluvodiča unutar monokristala poluvodiča, a između slojeva se spontano uspostavlja zaporni sloj bez slobodnih nosilaca naboja.

Zamislamo da P-tip i N-tip poluvodiča dođu u kontakt i u tehnološkom smislu formiraju PN-spoj. Ravnomjerna raspodjela šupljina u P-tipu poluvodiča i slobodnih elektrona u N-tipu narušava se u prijelaznom području, gdje nastaje znatna promjena raspodjele naboja.

Zbog različite koncentracije većinskih nosilaca naboja, tj. elektrona u N-tipu poluvodiča i šupljina u P-tipu poluvodiča, poteku difuzijske struje većinskih nosilaca naboja. Šupljine koje prelaze na N-stranu rekombiniraju se s elektronima, a elektroni koji prelaze na P-stranu rekombiniraju se sa šupljinama.

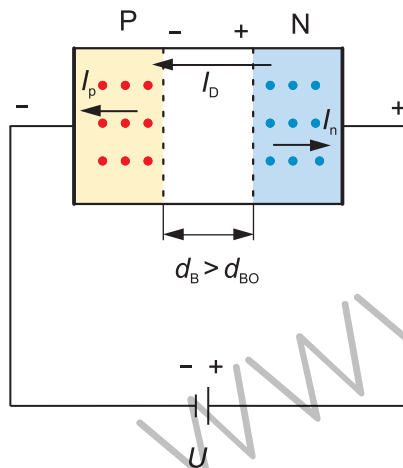
U prijelaznom području nastaje usko područje bez slobodnih nosilaca naboja. Ono se naziva **osiromašeno područje** ili **područje prostornog naboja** ili **barijera**. U tom je području **prostorni naboj**, nepokretni donori i akceptori koji su čvrsto vezani u kristalnu rešetku, što možemo vidjeti na slici 1.1-11. Izvan osiromašenog područja nalazi se neutralno N-područje i P-područje.

Prostorni naboj uspostavlja električno polje koje ima smjer od N-područja prema P-području. Polje uzrokuje driftne struje čiji je smjer suprotan smjeru difuzijskih struja. Ravnoteža se uspostavlja izjednačavanjem difuzijskih i driftnih struja. Pritom manjinski nosioci naboja nesmetano prelaze kroz osiromašeno područje.



Slika 1.1-12

Pojednostavljeni prikaz propusne polarizacije PN-spoja



Slika 1.1-13

Pojednostavljeni prikaz zaporne polarizacije PN-spoja

Posljedica prostornog naboja u osiromašenom području je razlika potencijala između rubova osiromašenog područja, a nazivamo je **potencijalnom barijerom** ili **kontaktnim potencijalom** U_K . Pritom je N-područje uzeto kao referentno, pa je kontaktni potencijal negativan.

Apsolutna vrijednost kontaktnog potencijala za silicij je između 0,4 V i 0,9 V, a za germanij između 0,2 V i 0,5 V.

U stanju ravnoteže PN-spoj je kao cjelina električki neutralan.

Bez priključenog vanjskog napona kroz PN-spoj ne teče struja. Spajanjem vanjskog napona moguće je povećati ili smanjiti potencijalnu barijeru.

1.1.4. Propusna polarizacija PN-spoja

Priključimo PN-spoj na vanjski izvor napona prema slici 1.1-12. Pozitivni pol izvora napona spojen je na P-stranu, a negativni pol na N-stranu.

Vanjski napon je takvog polariteta da se smanjuje potencijalna razlika između P-strane i N-strane. Zbog toga se osiromašeno područje sužava.

Suženjem osiromašenog područja olakšava se difuzija većinskih nosilaca naboja, i to šupljina s P-strane i elektrona s N-strane. Kroz PN-spoj teče **struja propusne polarizacije** ili **propusna struja** I_D . PN-spoj je **propusno polariziran**.

Smjer struje odgovara polaritetu vanjskog napona. U vanjskom krugu teče struja elektrona koja s povećanjem napona naglo raste. Što je priključen napon veći, to je ukupni napon na osiromašenom području niži, pa je struja kroz PN-spoj veća.

1.1.5 Zaporna polarizacija PN-spoja

PN-spoj priključimo na vanjski izvor napona, prema slici 1.1-13. Pozitivni pol izvora napona spojen je na N-stranu, a negativni pol na P-stranu.

Vanjski napon je takvog polariteta da se poveća potencijalna razlika P-strane i N-strane, a osiromašeno područje se proširuje.

Elektroni kao većinski nosioci naboja iz N-strane privučeni su pozitivnom polu izvora. Nasuprot tome, šupljine kao većinski nosioci naboja iz P-strane privučeni su negativnom polu izvora. Zbog povećanja širine osiromašenog područja difuzija većinskih nosilaca naboja preko njega je praktički onemogućena. Postoji samo struja manjinskih nosilaca naboja, i to šupljina s N-strane i elektrona s P-strane, koji nesmetano prelaze osiromašeno područje.

Struja manjinskih nosilaca naboja naziva se **zaporna struja** I_R . Zaporna struja je stalna i ne ovisi o priključenom naponu, pa se zato često naziva **zaporna struja zasićenja** i **označava sa** I_S . Kod tipičnih PN-spojeva

zaporna struja je zanemariva, reda vrijednosti nanoampera za silicij i mikroampera za germanij.

Napon kod kojeg teče zaporna struja naziva se **zaporni napon**, a PN-spoj je **zaporno polariziran**.

PROBOJ

Porastom napona zaporne polarizacije osiromašeno područje se sve više proširuje, uz malu zapornu struju. Kod određenog napona zaporna struja naglo poraste bez daljnjeg porasta napona. Pojava naglog porasta zaporne struje naziva se **proboj PN-spoja**.

Napon zaporne polarizacije kod kojeg nastane proboj naziva se **probojni napon**.

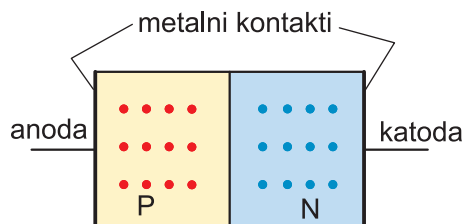
Velika zaporna struja može dovesti do uništenja kristala zbog zagrijavanja.

Razlikujemo lavinski i Zenerov proboj PN-spoja.

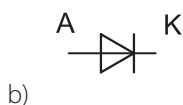
- **Lavinski proboj**

- Porastom zapornog napona raste jakost električnog polja u osiromašenom području. Kod određene jakosti električnog polja elektroni i šupljine se prilikom prolaza preko osiromašenog područja ubrzavaju i dobivaju dovoljnu energiju da mogu raskinuti kovalentne veze unutar osiromašenog područja. Stvaraju se dodatni parovi elektron-šupljina. Količina slobodnih elektrona povećava se poput lavine, što uzrokuje porast struje.

- **Zenerov ili tunelski proboj** nastaje kod PN-spoja uskih osiromašenih područja koji se javljaju kod jako dopiranih P- i N-strana. Pri malom naponu zaporne polarizacije, tj. probojnom naponu manjem od oko 5 V, elektroni tuneliranjem prelaze s P- na N-stranu. Tuneliranje je učinak kod kojeg pri prolazu elektrona kroz osiromašeno područje nije bitna samo energija elektrona, nego i širina osiromašenog područja. Što je osiromašeno područje uže, tuneliranje elektrona je veće.



a)



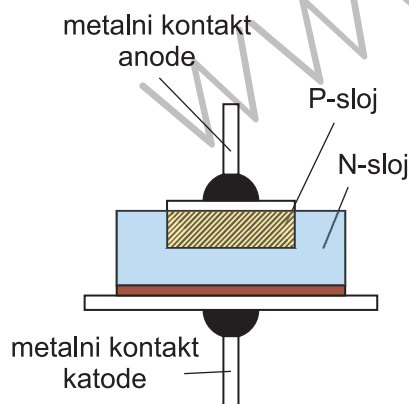
b)

Slika 1.2-1

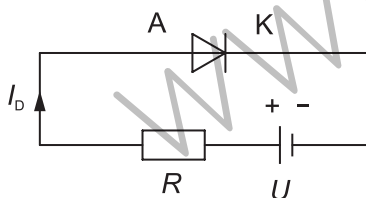
Poluvodička dioda:

a) pojednostavljeni prikaz

b) simbol

**Slika 1.2-2**

Presjek monokristala poluvodičke diode

**Slika 1.2-3**

Propusna polarizacija

1.2 POLUVODIČKA PN-DIODA

1.2.1 Svojstva poluvodičkih PN-dioda

Poluvodička PN-dioda je poluvodička komponenta, a sastoji se od N- i P-tipa poluvodiča koji čine PN-spoj.

Na slici 1.2-1 dan je pojednostavljeni prikaz i simbol poluvodičke PN-diode, a na slici 1.2-2 presjek monokristala poluvodičke diode.

Na površini P-tipa poluvodiča nanesen je metalni kontakt koji predstavlja **anodu (A)**, a na površini N-tipa poluvodiča nanesen je metalni kontakt koji predstavlja **katodu (K)** diode.

Kako poluvodičku PN-diodu čini PN-spoj, sva provedena analiza propusne polarizacije, zaporne polarizacije i proboja PN-spoja može se primijeniti i za PN-diodu.

Glavno svojstvo poluvodičke PN-diode je da pod utjecajem vanjskog napona u jednom smjeru vodi struju, a u drugom ne. Dioda pokazuje ispravljačko svojstvo.

Poluvodičke diode kao elektroničke komponente izrađuju se od monokristala silicija, germanija ili galijevog arsenida. U daljnjem izlaganju sve analize provest ćemo na silicijskim PN-diodama. Primjenom PN-strukture može se ostvariti više različitih vrsta PN-dioda.

Poluvodičke diode koriste se kao električke sklopke, primjerice za ispravljanje i za ograničavanje napona.

1.2.2 Strujno-naponska karakteristika PN-diode

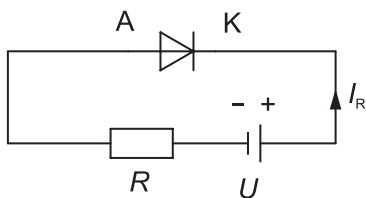
U svrhu primjene diode potrebno je poznavati strujno-naponske prilike pri promjeni napona na diodi u propusnom i u zapornom području.

Strujno-naponska karakteristika PN-diode prikazuje ovisnost struje o naponu na diodi:

$$I_D = f(U_D).$$

U spoju prema slici 1.2-3 dioda je propusno polarizirana. Pri propusnoj polarizaciji struja kroz diodu raste s porastom napona, u početku sporije, dok je pri većim naponima porast puno brži.

U spoju prema slici 1.2-4 dioda je zaporno polarizirana. Pri zapornoj polarizaciji zaporna struja je približno stalna i neovisna o naponu sve dok zaporni napon ne dostigne vrijednost napona proboja. Slika 1.2-5 prikazuje strujno-naponsku karakteristiku diode.



Slika 1.2-4

Zaporna polarizacija

Na karakteristici razlikujemo nekoliko područja:

a) Propusno područje

U spoju prema slici 1.2-3 na diodi je pozitivan napon jer je anoda na većem potencijalu od katode:

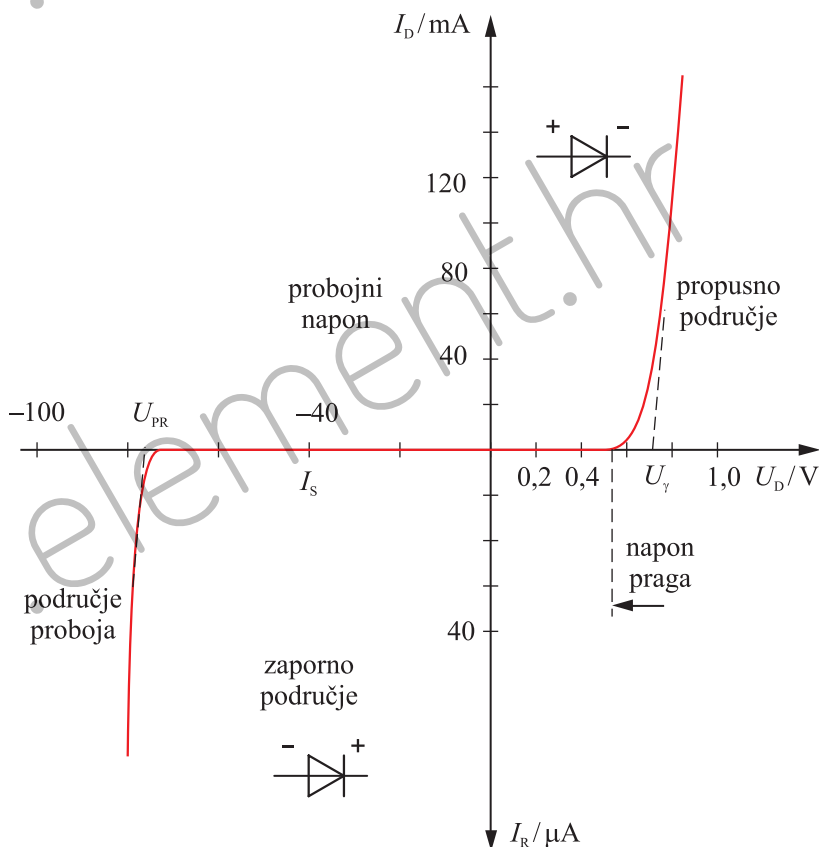
$$U_D = U_{AK} > 0.$$

U području malih pozitivnih napona oko nule, iako je anoda pozitivnija od katode, struja kroz diodu je zanemariva. Struja je zanemariva sve do tzv. **napona praga ili napona koljena** U_V . Daljnje povećanje napona dodatno sužava osiromašeno područje i struja naglo raste. Dioda je **propusno polarizirana** i teče **struja propusne polarizacije** ili **propusna struja** I_D .

Pri propusnoj polarizaciji PN-diode ističe se **napon praga ili napon koljena** U_V . Do tog napona struja je zanemarivo mala i nakon njega znatno raste.

Napomena

Pri crtanju I - U karakteristike diode, zbog različitih vrijednosti napona i struja u propusnom i zapornom području, mjerila za napon i struju nisu jednaka.



Slika 1.2-5

Strujno-naponska karakteristika PN-diode

Napon praga za silicijske PN-diode je oko 0,6 V, dok za diode od drugih poluvodičkih materijala ima druge vrijednosti. Radni napon silicijskih PN-dioda pri propusnoj polarizaciji je približno od 0,6 do 1 V, a ovisi o tipu diode.

Ovisno o namjeni i izvedbi dioda, propusne struje mogu imati veće ili manje vrijednosti nego za prikazanu diodu.

b) Zaporno područje i proboj

U spoju prema slici 1.2-4 napon na diodi je negativan jer je anoda na manjem potencijalu od katode:

$$U_D = U_{AK} < 0.$$

Vanjski napon istog je polariteta kao i kontaktni potencijal, pa se povećava potencijalna razlika između P- i N-strane, tj. širi se osiromašeno područje. Za napone manje od probojnog napona teče vrlo mala, praktički zanemariva **zaporna struja** $I_R = I_S$, koja se gotovo ne mijenja s promjenom napona. Dioda je **zaporno polarizirana**.

Kod određene vrijednosti napona zaporne polarizacije U_{PR} nastaje **proboj** PN-spoja i zaporna struja naglo raste. Većina dioda ne može se primijeniti u tom području, osim Zenerove diode.

U zapornom dijelu karakteristike PN-diode sve do napona proboja struja je jednaka maloj zapornoj struji I_S , a nakon vrijednosti U_{PR} zaporna struja naglo raste.

Zaporna struja je vrlo mala – za silicij reda vrijednosti nanoampera, a za germanij reda vrijednosti mikroampera. Zaporna struja puno je manja od propusne struje i može se zanemariti, pa se najčešće uzima da je jednaka nuli.

Probojni napon ovisi o vrsti diode i može biti od nekoliko desetaka volti do nekoliko stotina volti.

Napomena

Naponski ekvivalent temperature U_T izravno je ovisan o temperaturi kristala i za njega vrijedi:

$$U_T = \frac{kT}{q}, \text{ gdje je } k \text{ Boltzmanova konstanta, } T \text{ apsolutna temperatura i } q \text{ elementarni naboj. Uvrštavanjem}$$

$$\text{konstanti slijedi: } U_T = \frac{T}{11600}, \text{ a iskazuje se u voltima (V), pri čemu je temperatura izražena u kelvinima (K). Na temperaturi } 25^\circ\text{C} \text{ ima vrijednost } 0,025 \text{ V.}$$

1.2.3 Jednadžba strujno-naponske karakteristike diode

Jednadžba strujno-naponske karakteristike diode je Shockleyjeva jednadžba:

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1 \right),$$

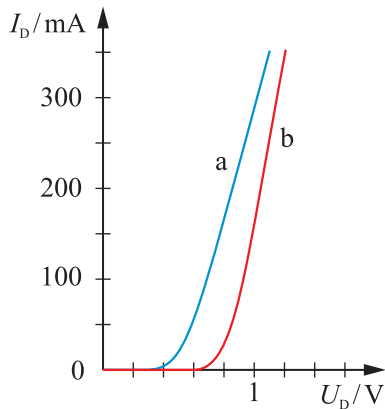
gdje je:

I_D struja kroz diodu

I_S zaporna struja zasićenja

U_D napon na diodi

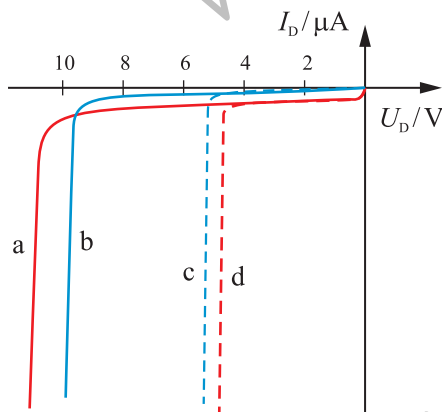
U_T naponski ekvivalent temperature.



Slika 1.2-6

Utjecaj temperature na I - U karakteristiku diode u propusnom području (za diodu 1N914):

- a) pri temperaturi T_1
 b) pri temperaturi $T_2 = 25^\circ\text{C}$; $T_1 > T_2$



Slika 1.2-7

Utjecaj temperature na I - U karakteristiku diode u zapornom području

- 1) krivulja za diode s lavinskim probojem (probojni napon veći od 6 V):
 a) krivulja pri temperaturi T_1
 b) krivulja pri temperaturi $T_2 = 25^\circ\text{C}$; $T_1 > T_2$
 2) krivulja za diode s Zenerovim probojem (probojni napon manji od 5 V):
 c) krivulja pri temperaturi $T_2 = 25^\circ\text{C}$; $T_1 > T_2$
 d) krivulja pri temperaturi T_1

Pri propusnoj polarizaciji diode uz pozitivan napon $U_D \gg U_T$ eksponencijalni član u zagradi znatno je veći od jedinice i struja raste eksponencijalno s porastom napona.

Pri zapornoj polarizaciji uz negativni napon U_D , čija je vrijednost nekoliko puta veća od napona U_T , eksponencijalni član u zagradi puno je manji od jedinice i struja diode jednaka je zapornoj struji zasićenja: $I_D = -I_S$.

Strujno-naponska karakteristika diode je nelinearna, dakle dioda je nelinearna komponenta.

1.2.4 Temperaturna ovisnost strujno-naponske karakteristike PN-diode

Karakteristike PN-dioda uvelike ovise o temperaturi. Pritom se misli na temperaturu kristala koja je u radu uvijek viša od temperature okoline zbog topline koja se razvija u diodi.

Pri propusno polariziranoj diodi porastom temperature povećava se vodljivost kristala zbog generiranja parova elektron-šupljina. Uz stalan napon na diodi, porast temperature izaziva porast struje, kako je prikazano na slici 1.2-6. S porastom temperature mijenja se probojni napon, ovisno o vrsti proboja, prema slici 1.2-7.

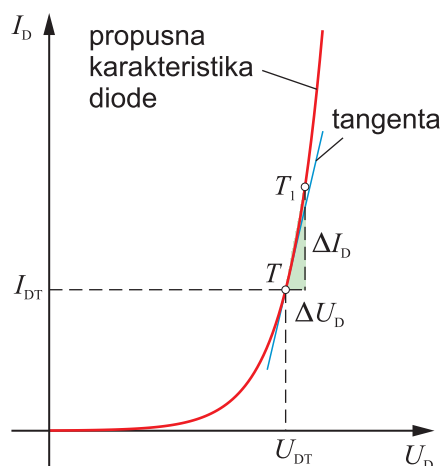
Ako je za probojni napon mjerodavan Zenerov proboj (za napone manje od 5 V), temperaturni koeficijent napona je negativan, pa je s porastom temperature probojni napon nešto niži. Ako je za probojni napon mjerodavan lavinski proboj (za napone veće od 6 V), temperaturni koeficijent napona je pozitivan, pa je s porastom temperature probojni napon nešto veći. Za napone između 5 i 6 V mjerodavan je i lavinski i Zenerov proboj, pa je u tom području temperaturna stabilnost probojnog napona najveća.

1.2.5 Električne karakteristike diode

Za pravilnu primjenu dioda važno je poznavati njihove električne karakteristike. Za svaku diodu proizvođač daje karakteristične vrijednosti.

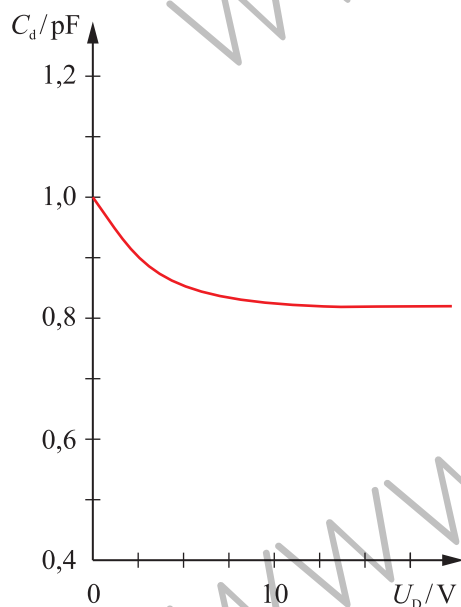
Navest ćemo neke električne karakteristike diode pri temperaturi od 25°C :

- **napon praga ili napon koljena U_T** je propusni napon kod kojeg dioda provede struju;
- **maksimalna propusna struja I_{Dm}** je maksimalna istosmjerna struja u propusnom području pri kojoj neće nastupiti oštećenje diode;
- **probojni napon U_{PR}** je zaporni napon kod kojeg zaporna struja počinje naglo rasti;
- **maksimalna snaga disipacije P_{Dm}** je maksimalna dopuštena snaga koja se razvije na diodi; kod veće snage od dopuštene, zbog prevelikog zagrijavanja PN-spoja, dolazi do uništenja kristala;
- **maksimalna temperatura spoja T_j** je maksimalna dopuštena temperatura



Slika 1.2-8

Dinamički otpor diode



Slika 1.2-9

Ovisnost kapaciteta diode o zapornom naponu (za diodu 1N914)

PN-spoja pri kojoj ne dolazi do trajnog oštećenja PN-spoja kristala.

Proizvođač daje strujno-naponsku karakteristiku diode, karakteristiku ovisnosti struje o temperaturi, karakteristiku ovisnosti snage o temperaturi okoline i dr.

1.2.6 Dinamički otpor i kapacitet PN-diode

a) Dinamički otpor diode

Dioda ima nelinearnu strujno-naponsku karakteristiku. Kod nekog određenog istosmjernog napona U_D teče struja I_D , čime je određena statička radna točka. Ako se u okolini statičke radne točke (slika 1.2-8) promatra mala promjena napona, tada postoji odgovarajuća promjena struje.

Dinamički otpor diode r_d je omjer male promjene napona ΔU_D i male promjene struje ΔI_D oko radne točke.

Računamo ga prema izrazu:

$$r_d = \frac{\Delta U_D}{\Delta I_D}.$$

Dinamički otpor diode može se odrediti grafički kao nagib tangente na I - U karakteristiku diode u statičkoj radnoj točki. Pri većoj istosmjernoj struji nagib tangente je veći, zbog čega dolazi do veće promjene struje za jednaku promjenu napona, a time i do manjeg dinamičkog otpora. Dakle, dinamički otpor ovisi o vrijednosti istosmjerne struje u radnoj točki.

Kod propusne polarizacije, a uz poznavanje naponskog ekvivalenta temperature U_T i istosmjerne struje kroz diodu I_D , dinamički otpor diode r_d je:

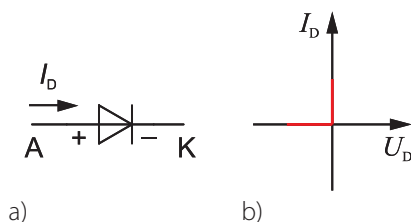
$$r_d = \frac{U_T}{I_D}.$$

na sobnoj temperaturi $U_T = 0,025$ V.

Dinamički otpor zaporno polarizirane diode je praktički beskonačan.

Ako su amplitude izmjeničnih napona i struja na diodi dovoljno male, tj. znatno manje od istosmjernih napona i struja, karakteristika diode oko statičke radne točke može se nadomjestiti pravcem – tangentom na karakteristiku diode u radnoj točki. Kažemo da radimo u **području malih signala**. U području malih signala nema izobličenja napona u odnosu na struju diode.

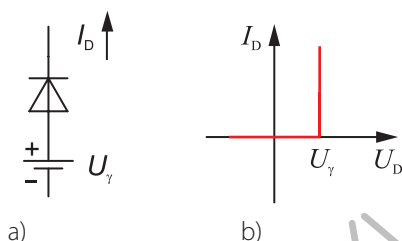
Ako je amplituda izmjeničnih napona i struja na diodi velika, radna točka se pomiče po nelinearnom dijelu karakteristike diode, pa nastaje izobličenje valnog oblika napona u odnosu na struju. Dioda radi u **području velikih signala**.

**Slika 1.2-10**

Idealna dioda:

a) simbol

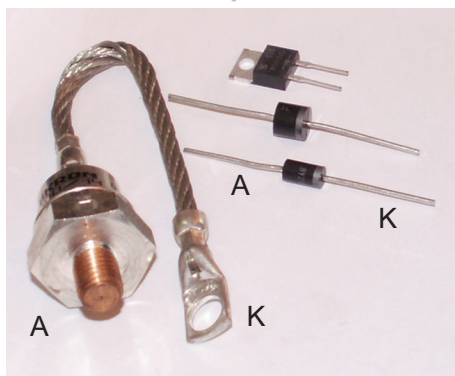
b) strujno-naponska karakteristika

**Slika 1.2-11**

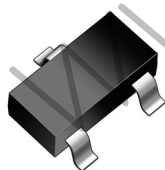
Idealna dioda s unutarnjim naponom:

a) simbol

b) strujno-naponska karakteristika

**Slika 1.2-12**

Razni oblici kućišta dioda

**Slika 1.2-13**

Primjer kućišta za SMT - engl. *surface-mount technology* (komponente za površinsku montažu)

b) Kapacitet diode

Pri zapornoj polarizaciji diode PN-spoj ima **kapacitet osiromašenog područja**. Osiromašeno područje nema pokretnih naboja i predstavlja dielektrik. Promjenom napona mijenja se širina osiromašenog područja, a time i količina ioniziranih atoma primjesa i kapacitet. Kapacitet osiromašenog područja može se svesti na kapacitet pločastog kondenzatora. Slika 1.2-9 prikazuje ovisnost kapaciteta diode o zapornom naponu. To svojstvo se koristi kod kapacitivnih dioda (vidi odjeljak 2.9.2).

Pri propusnoj polarizaciji diode PN-spoj ima **difuzijski kapacitet** koji je posljedica nakupljanja manjinskih nosilaca naboja u neutralnim područjima PN-spoja.

1.2.7 Idealna dioda

U slučaju propusne polarizacije, koji odgovara uključenoj sklopki, idealna dioda ima otpor nula i pad napona nula. U slučaju zaporne polarizacije, koji odgovara stanju isključene sklopke, otpor diode je beskonačan. Slika 1.2-10 prikazuje strujno-naponsku karakteristiku i simbol idealne diode.

Stvarne diode možemo prikazati idealnom diodom i naponskim izvorom, prema slici 1.2-11. Dioda se može propusno polarizirati tek kad je vanjski napon veći od unutarnjeg napona praga U_γ .

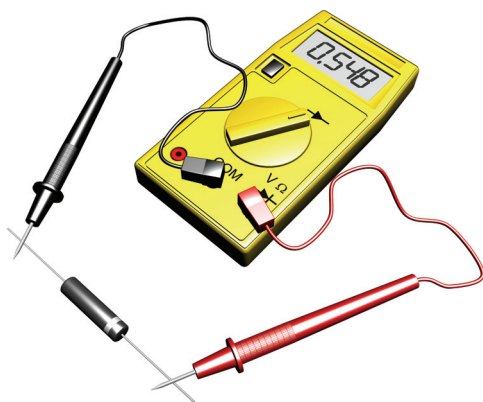
Za odnose u strujnom krugu prihvatljiv je model idealne diode i u propusnom području, ako se napon na vodljivoj diodi može zanemariti prema naponima na ostalim komponentama strujnog kruga.

1.2.8 Kućište i označavanje diode

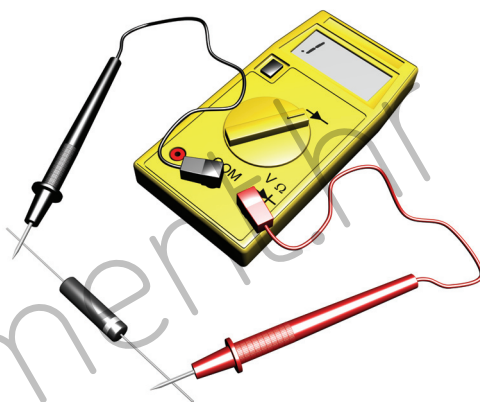
Kućiče diode može biti stakleno, plastično i metalno, ovisno o vrsti i snazi diode, kao što je prikazano na slici 1.2.-12. Na kućištu se kraj na kojem je katoda (K) označava na sljedeće načine:

- oznakom K, cath., itd;
- crtom (trakom) ili točkom u boji;
- posebno profiliranim završetkom;
- kodom u normiziranim bojama koji predstavlja oznaku diode.

Na svakom kućištu nalaze se oznake koje pobliže označavaju diodu. Postoji europski, američki i japanski način označavanja dioda, što se nalazi u dodatku na kraju udžbenika.



a)



b)

Slika 1.2-14

Ispitivanje ispravnosti diode digitalnim univerzalnim instrumentom:

a) propusna polarizacija

b) zaporna polarizacija

1.2.9 Ispitivanje ispravnosti dioda

Ispravnost diode možemo ispitati digitalnim instrumentom koji ima posebno područje za ispitivanje dioda.

Instrument se postavi u položaj ispitivanja dioda (simbol diode, prema slici 1.2-14). U jednom smjeru instrument pokazuje napon propusne polarizacije (slika 1.2-14a), a u drugom smjeru prekid (slika 1.2-14b). U tom smjeru dioda je zaporno polarizirana. Za silicijsku diodu napon propusne polarizacije je oko 0,5 do 0,8 V.

Neki instrumenti u području ispitivanja diode mjere njezin otpor. U jednom smjeru instrument pokazuje mali otpor, do 1 k Ω . To znači da je u tom smjeru dioda propusno polarizirana. U drugom smjeru instrument pokazuje beskonačan otpor – prekid. U tom smjeru dioda je zaporno polarizirana. Ispravnost diode može se na isti način ispitati i ometrom.

Ukoliko se pokazivanje instrumenata razlikuje od navedenog za propusnu, zapornu ili obje polarizacije, dioda je neispravna.

1.2.10 Neke vrste dioda

1.2.10.1 Zenerova dioda

a) Osnovna svojstva Zenerove diode

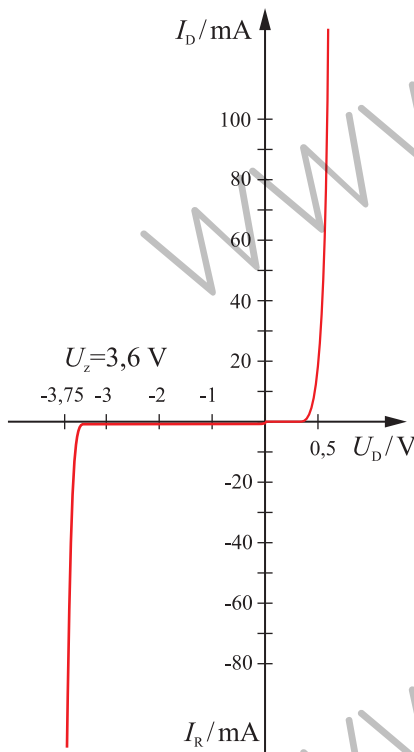
Zenerova dioda je poluvodička dioda izvedena tako da joj se kao normalno radno područje koristi područje proboja.

Bez obzira na mehanizam proboja, lavinski ili Zenerov, te se diode u primjeni nazivaju Zenerovim diodama.



Slika 1.2-15

Simbol Zenerove diode



Slika 1.2-16

Strujno-naponska karakteristika Zenerove diode (BZX55C3V6)

Probojni napon Zenerove diode nazivamo **Zenerovim naponom** i označavamo sa U_Z .

Slika 1.2-15 prikazuje simbol Zenerove diode, a slika 1.2-16 njezinu strujno-naponsku karakteristiku.

Zaporna struja I_s pri naponu manjem od Zenerovog napona (probojnog) vrlo je mala i reda vrijednosti nanoampera.

Da bi Zenerova dioda bila u radnom području, tj. u području proboja, struja ne smije biti ispod neke minimalne vrijednosti, a ne smije prijeći ni neku maksimalnu vrijednost koja je određena konstrukcijom i dopuštenim gubicima.

U zapornome području za napone manje od Zenerovog napona teče vrlo mala zaporna struja I_s , reda vrijednosti nanoampera. Za napone veće od Zenerovog napona, uz male promjene napona nastaju velike promjene zaporne struje. Strujno-naponska karakteristika diode treba u području proboja biti što strmija.

U propusnome području strujno-naponska karakteristika analogna je karakteristici PN-diode.

Važan parametar Zenerove diode je **dinamički otpor** r_z . Dinamički otpor jednak je omjeru promjene napona i promjene struje u području proboja:

$$r_z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}.$$

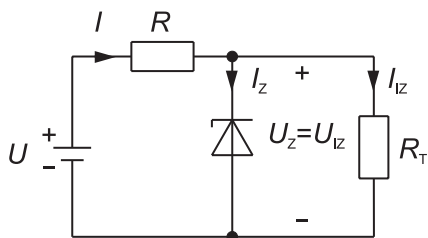
Što je karakteristika diode u području proboja strmija, to je dinamički otpor manji. Najmanji dinamički otpor imaju Zenerove diode s probojnim naponom između 5 i 6 V. Za tipične Zenerove diode taj otpor ima vrijednost od 1 Ω do 100 Ω .

Kao kod PN-dioda, i kod Zenerovih dioda temperatura utječe na I - U karakteristiku. Ako je za probojni napon mjerodavan Zenerov proboj (za napone manje od 5 V), temperaturni koeficijent napona je negativan, pa je s porastom temperature probojni napon nešto niži. Ako je za probojni napon mjerodavan lavinski proboj (za napone veće od 6 V), temperaturni koeficijent napona je pozitivan, pa je s porastom temperature probojni napon nešto veći. Za napone između 5 i 6 V mjerodavan je i lavinski i Zenerov proboj, pa je u tom području temperaturna stabilnost probojnog napona najveća.

Koriste se u stabilizatorima napona, kod diodnih ograničavača napona te u referentnim izvorima napona.

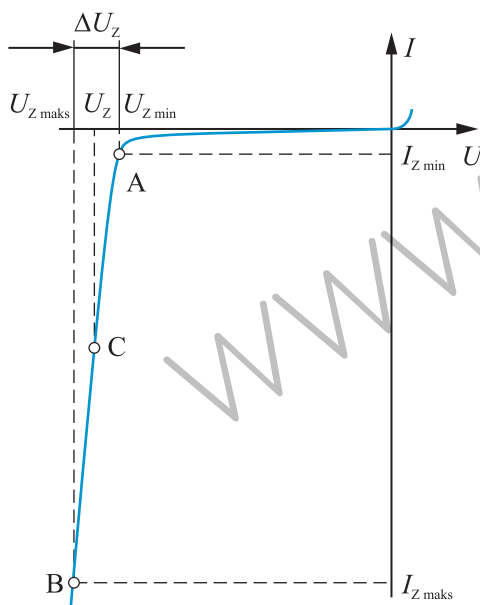
b) Stabilizator napona s Zenerovom diodom

U stabilizatoru napona s Zenerovom diodom koristi se svojstvo da s promjenom struje kroz diodu probojni napon ostaje približno stalan.



Slika 1.2-17

Stabilizator napona s Zenerovom diodom



Slika 1.2-18

Područje rada Zenerove diode

Najjednostavniji stabilizator napona s Zenerovom diodom prikazan je na slici 1.2-17. Napon na trošilu ili izlazni napon jednak je naponu na Zenerovoj diodi, tj. probojnom naponu U_Z :

$$U_{IZ} = U_Z.$$

Pretpostavit ćemo da je otpor trošila stalan. Povećanjem ulaznog napona raste struja iz izvora I . Kako je napon na Zenerovoj diodi stalan, povećanje ulaznog napona utječe na povećanje struje I_Z kroz diodu. Povećanjem ukupne struje raste i pad napona na serijskom otporniku R , napon na trošilu ostaje nepromijenjen, a time i struja trošila.

Promjenom otpora trošila uz stalni napon $U_{IZ} = U_Z$ mijenja se izlazna struja. Kako se nije promijenio pad napona na serijskom otporniku, nije se promijenila ni struja izvora, tako da se izlazna struja mijenja na račun promjene struje Zenerove diode. Struju trošila je:

$$I_Z = \frac{U_{IZ}}{R_T}.$$

Dakle, Zenerova dioda sve promjene ulaznog napona preuzima na sebe promjenom struje, a izlazni napon ostaje stalan.

Zenerova dioda stabilizira napon ako se radna točka nalazi u području između točaka A i B, prema slici 1.2-18. Da bi Zenerova dioda stabilizirala, struja ne smije biti ispod neke minimalne vrijednosti (točka A), a isto tako ne smije prijeći ni neku maksimalnu vrijednost (točka B). Maksimalna vrijednost struje određena je konstrukcijom diode i dopuštenim gubicima. U elektrotehnici te gubitke nazivamo **disipacijom**.

Pad napona na otporniku jednak je razlici ulaznog napona i napona na Zenerovoj diodi. Što je struja veća, i napon na otporniku je veći, a time i gubici u otporniku.

Izlazni napon ovako jednostavnog stabilizatora jednak je naponu na Zenerovoj diodi, bez mogućnosti podešavanja, što mu je nedostatak.

1.2.10.2 Kapacitivna dioda

Kapacitivna dioda (engl. *varicap diode*, *varactor diode*) je dioda u kojoj se koristi promjena kapaciteta PN-spoja s naponom. Izrađuje se od silicija i galijeve arsenida.

Slika 1.2-19 prikazuje simbol i dijagram ovisnosti kapaciteta o zapor-nom naponu.

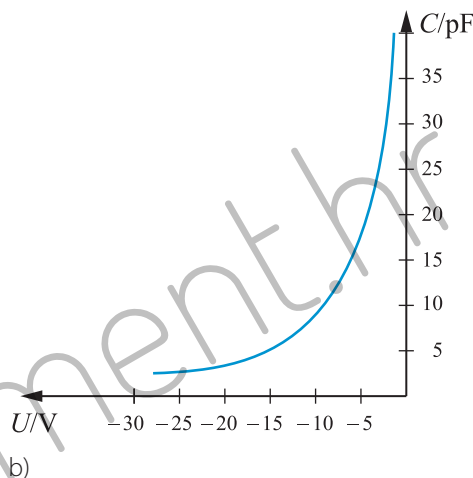
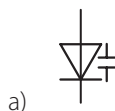
Koristi se, primjerice, u ulaznom krugu radioprijemnika za podešavanje prijemne frekvencije i u oscilatorima s naponskom promjenom frekvencije. Tipične vrijednosti kapaciteta su između 10 i 200 pF, a probojni naponi su oko 40 V.

Slika 1.2-19

Kapacitivna dioda:

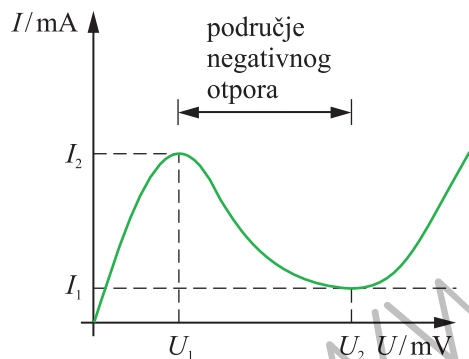
a) simbol

b) karakteristika ovisnosti kapaciteta o zapornom naponu kapacitivne diode (dioda BB664)



Slika 1.2-20

Simbol tunelske diode



Slika 1.2-21

Strujno-naponska karakteristika tunelske diode

1.2.10.3 Tunelska dioda

Tunelska ili Esakijeva dioda predstavlja PN-spoj u kojem je i P- i N-sloj jako dopiran.

Slika 1.2-20 prikazuje simbol tunelske diode.

Leo Esaki je 1958. godine otkrio tunelski učinak, za koji je 1973. dobio Nobelovu nagradu, a dioda je njemu u čast nazvana **tunelska ili Esakijeva dioda**.

Tunelska dioda se po I - U karakteristici bitno razlikuje od ostalih dioda, što je prikazano na slici 1.2-21.

Kod malih pozitivnih napona dolazi do tuneliranja elektrona sa N- na P-stranu, pri čemu smjer struje odgovara propusnom smjeru diode. Porastom napona od nule do U_1 struja raste do vrijednosti I_1 (slika 1.2-21). Porastom napona od U_1 do U_2 smanjuje se struja tuneliranja do I_2 , karakteristika ima negativan nagib, a to područje nazivamo **područjem negativnog otpora**. Daljnjim porastom propusnog napona struja ponovno raste kao kod obične diode.

Probojni napon tunelske diode je $U_{PR} \approx 0$. Porastom zapornog napona raste zaporna struja. Tunelska dioda se u tom području ne koristi.

Tunelske diode se koriste u oscilatorima velikih frekvencija, do 10 GHz.