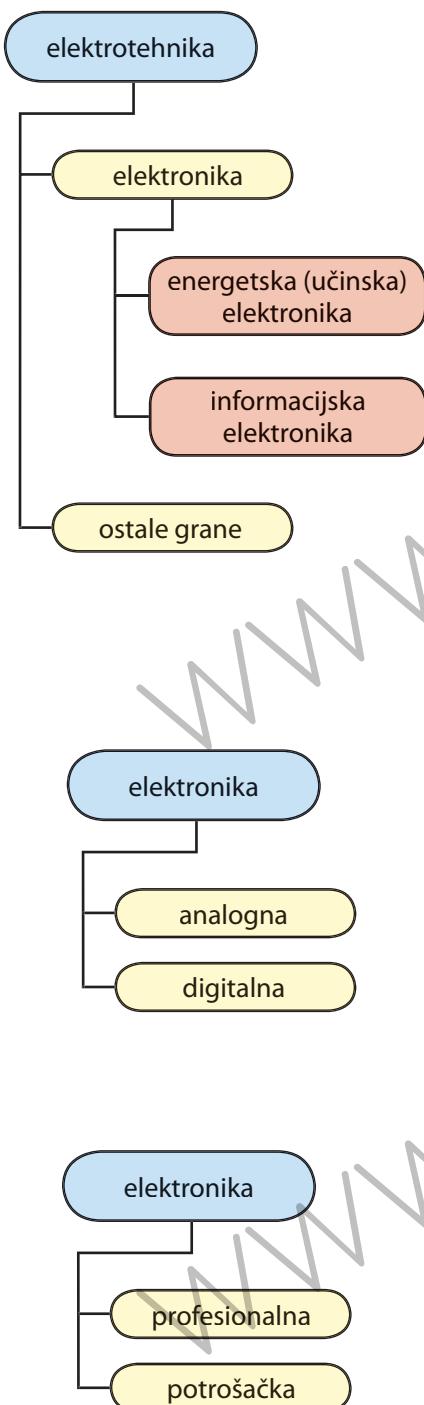


1

• Uvod u elektroniku i njena uloga u ljudskoj djelatnosti





Elektronika je grana tehnike koja proučava i primjenjuje pojave pri gibanju nabijenih čestica kroz vakuum, vodiče i poluvodiče.

Kao dio elektrotehnike, elektronika proučava upravljanje tokom i pretvorbom parametara električne energije (**energetska** ili **učinska elektronika**) te dobivanjem, pretvorbom, prijenosom i obradom elektromagnetskih valova, električnih signala i informacija (**informacijska elektronika**). **Informacijska elektronika** sastoji se od više grana: telekomunikacija, radiokomunikacija, mjerne elektronike, biomedicinske elektronike, optoelektronike itd.

- **Telekomunikacije** se bave prijenosom informacija na daljinu.
- **Radiokomunikacije** se bave prijenosom informacija na daljinu radio-valovima.
- **Mjerna elektronika** se bavi postupcima i metodama mjerjenja mjerenih veličina električkim uređajima.
- **Biomedicinska elektronika** se bavi primjenom električkih uređaja u medicini.
- **Optoelektronika** proučava pretvorbu električnog signala u svjetlosni i obrnuto te prijenos informacija svjetlošću.

Osim podjele elektronike na energetsku i informacijsku, elektronika se prema vrsti signala koji obrađuje može podijeliti na **analognu i digitalnu elektroniku**, a prema frekvenciji signala koji obrađuje na **niskofrekvenčnu i visokofrekvenčnu elektroniku**. Signali u analognoj elektronici mogu poprimiti bilo koju vrijednost između najmanje i najveće vrijednosti. Digitalni signali mogu imati samo jednu od dviju vrijednosti unutar zadanih granica.

Prema namjeni električkih uređaja, elektronika se dijeli na **profesionalnu i potrošačku**. Profesionalni električki uređaju moraju biti precizni, trajni i pouzdani, a za potrošačke električke uređaje važna je zadovoljavajuća kvaliteta, prihvatljiva cijena i izgled uređaja.

Elektronika koja se bavi proizvodnjom električkih uređaja predviđenih za rad u industrijskom okruženju naziva se **industrijskom elektronikom**.

Područja elektronike nisu strogo razdvojena, tako da se često prožimaju. Elektronika se počela razvijati početkom dvadesetog stoljeća izumom vakuumske diode (1904. godine, J. A. Fleming, slika 1.1-1) i triode (1907. godine, L. De Forest, slika 1.1-2). Elektronske su cijevi bile osnova tadašnjih električkih sklopova i uređaja. Naglo su se počele razvijati radiokomunikacije, kao grana elektronike koja proučava širenje radiovalova i prijenos informacija putem njih. Drugi svjetski rat pokrenuo je razvoj električkih uređaja za otkrivanje položaja objekata

**Slika 1.1-1**

John Ambrose Fleming

**Slika 1.1-2**

Lee De Forest

**Slika 1.1-3**

Jack Kilby

(radara) te uređaja za šifriranje i dešifriranje poruka (britanski Colossus) kao preteče digitalnih elektroničkih računala. Izumom tranzistora (J. Bardeen i W. H. Brattain, 1947. godine) razvoj elektronike dodatno je ubrzan. Osnova elektroničkih sklopova i uređaja postaju poluvodičke komponente.

Godine 1958. Jack Kilby (slika 1.1-3) stvara prvi integrirani sklop, što otvara novu fazu razvoja elektronike – integriranu elektroniku.

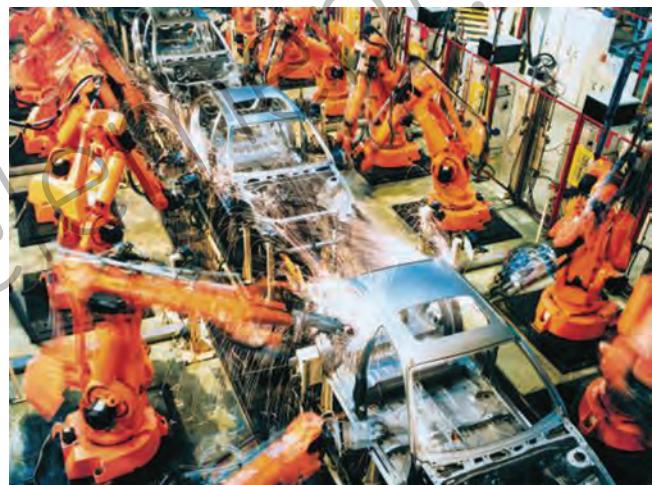
Integrirana elektronika omogućila je nagli razvoj mikroelektronike i računalstva, tako da se elektroničko-računalni uređaji danas primjenjuju u mnogim područjima ljudske djelatnosti.

Elektroničke komponente mogu biti pasivne i aktivne. Pasivne su komponente diode, otpornici, zavojnice i kondenzatori, a aktivne tranzistori, integrirana pojačala, digitalni skloovi itd.

Današnja industrijska proizvodnja nezamisliva je bez elektroničkih i računalnih sustava koji povećavaju produktivnost i kvalitetu, provode nadzor procesa proizvodnje, pamćenje podataka te omogućuju automatsko vodenje procesa. Proizvodnju sve više obavljaju roboti, koji se upravljaju elektroničko-računalnim uređajima (slika 1.1-4).

Mjerenja u industriji, trgovini, geodeziji, prometu, medicini, sportu ili vojsci obavljaju elektronički uređaji, a računalni ih obrađuju.

Financijsko poslovanje nezamislivo je bez elektroničkih uređaja. Sve je više u uporabi internet bankarstvo, a token omogućuje identifikaciju korisnika (slika 1.1-5).

**Slika 1.1-4**

Primjena robota u automobilskoj industriji



Slika 1.1-5

Token

Prometna sredstva koriste razne elektroničke uređaje (slika 1.1-6) za upravljanje i održavanje stabilnosti (segway, ESP, ASR, ABS itd.), za određivanje položaja (GPS, sonari, radari) i ostalo.

Za upravljanje prometom koriste se elektronički mjerni instrumenti za dobivanje podataka, videokamere za nadzor prometa na cestovnim prometnicama, u tunelima itd.

Gotovo svaka obitelj posjeduje glazbene linije, televizore, mobitele, računala i digitalne fotoaparate (slika 1.1-7).

Elektronika je posvuda.



a)



b)



c)

Slika 1.1-6

Elektronika u području prometa
a) GPS navigator
b) radarska antena
c) segway transporter



a)



b)



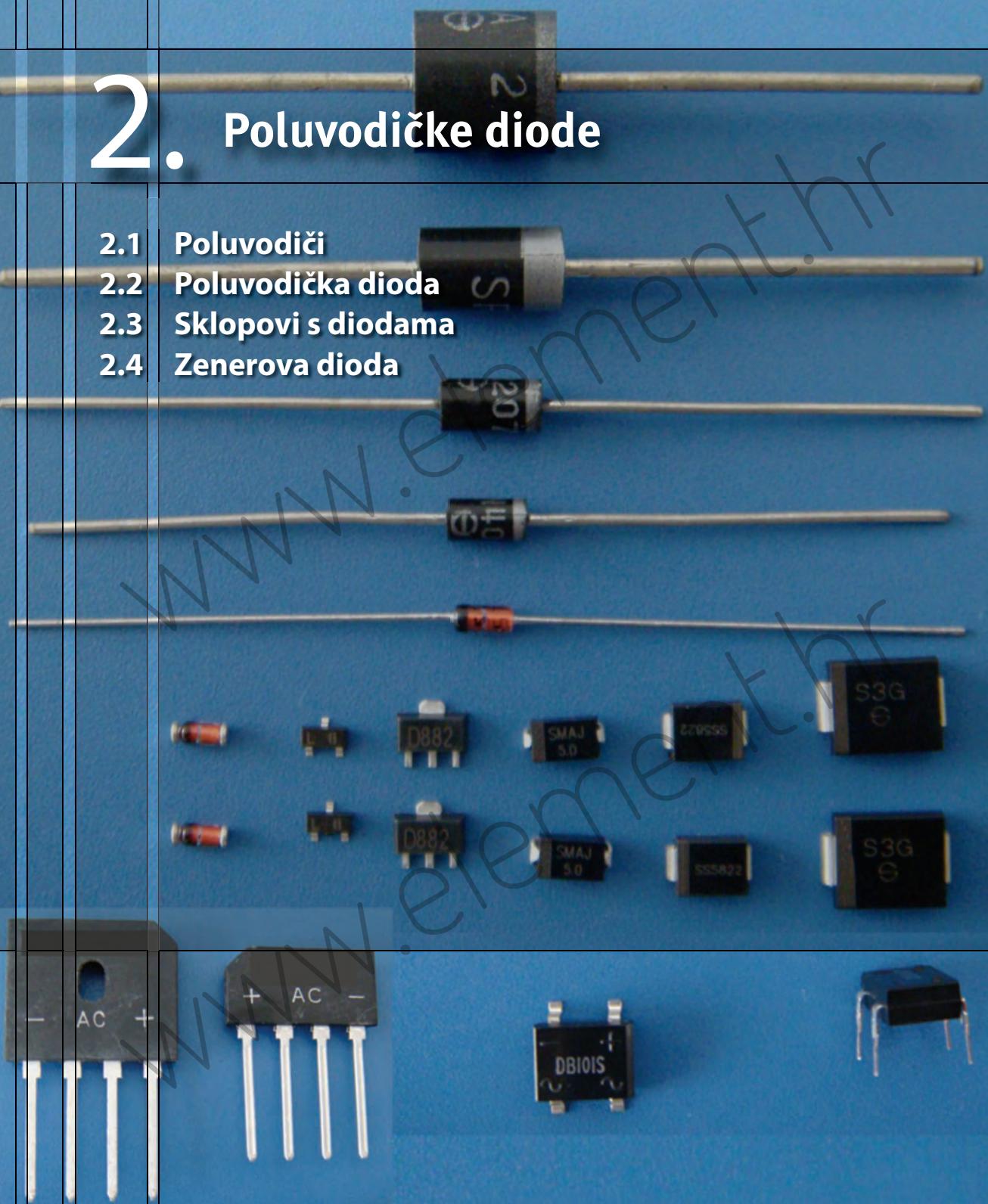
c)

Slika 1.1-7

Elektronika u kućanstvima
a) mobitel
b) LCD televizor
c) digitalni fotoaparat

2. Poluvodičke diode

- 2.1 Poluvodiči
- 2.2 Poluvodička dioda
- 2.3 Sklopovi s diodama
- 2.4 Zenerova dioda



2.1 POLUVODIČI

2.1.1 Svojstva poluvodiča



Slika 2.1-1

Silicij

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 2.1.-1) i germanij (Ge, slika 2.1-2)
- **složeni poluvodiči:** galijev arsenid (GaAs), galijev nitrid (GaN), indijev fosid (InP), indijev antimonid (InSb), cinkov sulfid (ZnS) itd.

Silicij se pretežno koristi 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) itd.

Elementarni poluvodiči silicij i germanij četverovalentni su elementi koji imaju kristalnu strukturu tetraedra dijamantnog tipa, kao što je prikazano na slici 2.1-3. 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 ljsuske i onoliko protona koliko ima valentnih elektrona koji su s njima u ravnoteži, prema slici 2.1-4.

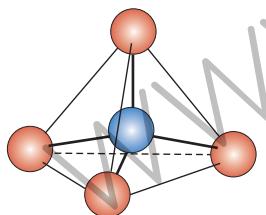
Ako poluvodič nema primjesa drugih elemenata, naziva se **čisti** ili **intrinzični poluvodič**.

Na temperaturama blizu apsolutne ruke ($-273,15^{\circ}\text{C} = 0\text{ K}$) 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 2.1-5).



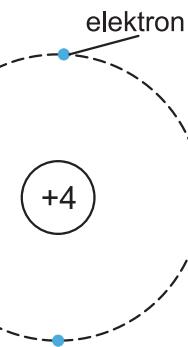
Slika 2.1-2

Germanij



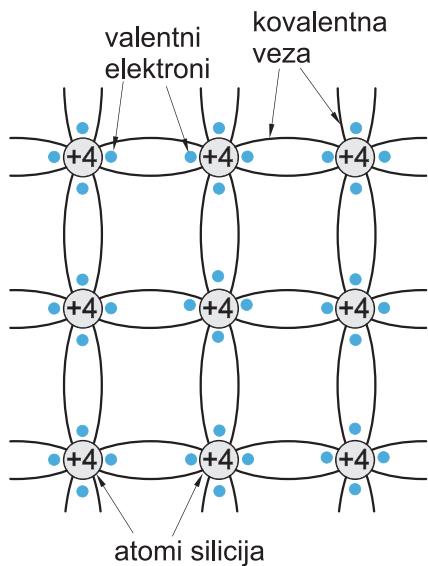
Slika 2.1-3

Tetraedarska prostorna veza među atomima



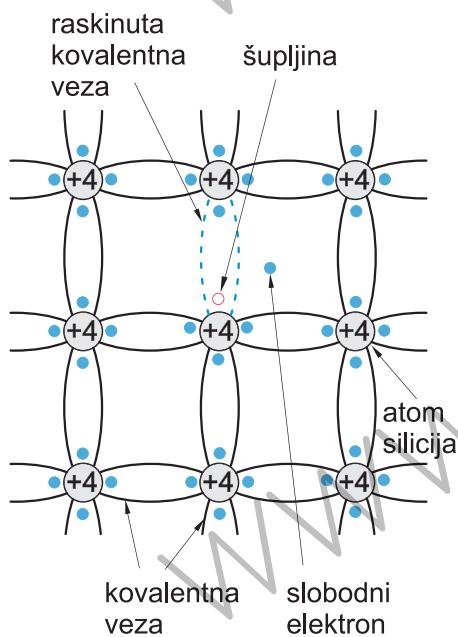
Slika 2.1-4

Pojednostavljeni model atoma poluvodiča silicija i germanija



Slika 2.1-5

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



Slika 2.1-6

Poluvodič na sobnoj temperaturi
(dvodimenzionalni prikaz)

Na određenoj temperaturi pokoji valentni elektron dobije dovoljno energije te može napustiti kovalentnu vezu i postati **slobodni elektron**. Gubitkom elektrona u atomu ostaje jedan pozitivni naboј više i taj atom postaje pozitivan ion. Nastalo prazno mjesto nazivamo **šupljinom**, kako je prikazano na slici 2.1-6. Dakle, šupljinu smatramo nosiocem pozitivnog naboja. Ona ima jednaku vrijednost naboja, 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 se proces naziva **rekombinacija**.

U čistom su poluvodiču koncentracije šupljina i elektrona jednake, jer oslobađanjem elektrona nastaje šupljina.

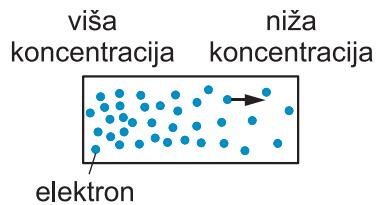
Slobodni elektroni nosioci su negativnog, a **šupljine** pozitivnog naboja te se mogu kretati kroz poluvodič i voditi struju.

Želimo li povećati vodljivost silicija, dodajemo mu 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.

VOĐENJE STRUJE U POLUVODIČIMA

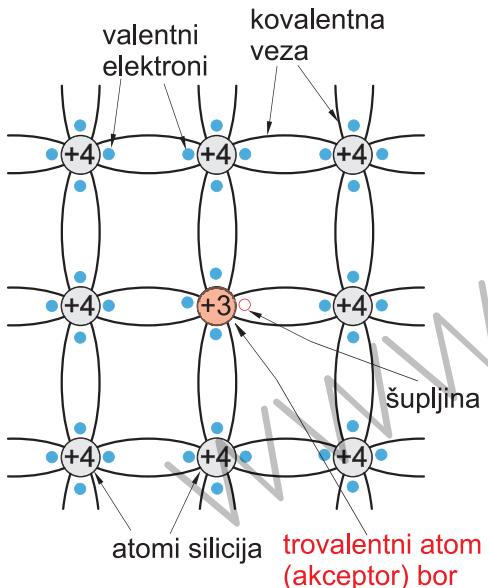
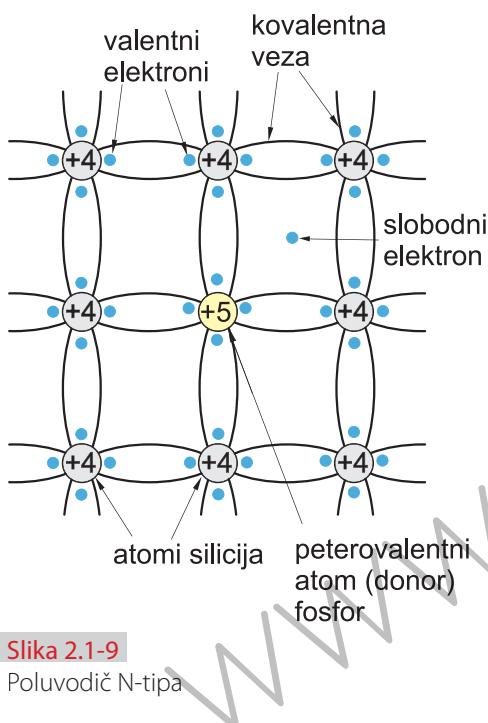
Struju u poluvodiču vode slobodni elektroni i šupljine. Struja kroz poluvodič može nastati zbog nejednolike koncentracije nosilaca naboja ili zbog unutarnjeg električnog polja.

Ukoliko postoji nejednolika koncentracija nosilaca naboja, u poluvodiču nastaje **difuzijska struja**. Nosioci naboja gibaju se s mesta više koncentracije prema mjestu niže koncentracije, s tendencijom da se koncentracije izjednake (slika 2.1-7).

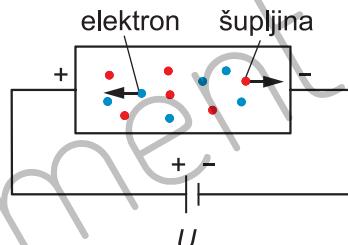


Slika 2.1-7

Difuzijska struja



Ako se na poluvodič priključi vanjski napon, u poluvodiču dolazi do gibanja nosilaca naboja pod djelovanjem nastalog električnog polja. Kazemo 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 2.1-8).



Slika 2.1-8

Driftna struja

2.1.2 N-tip i P-tip poluvodiča

a) N-tip poluvodiča

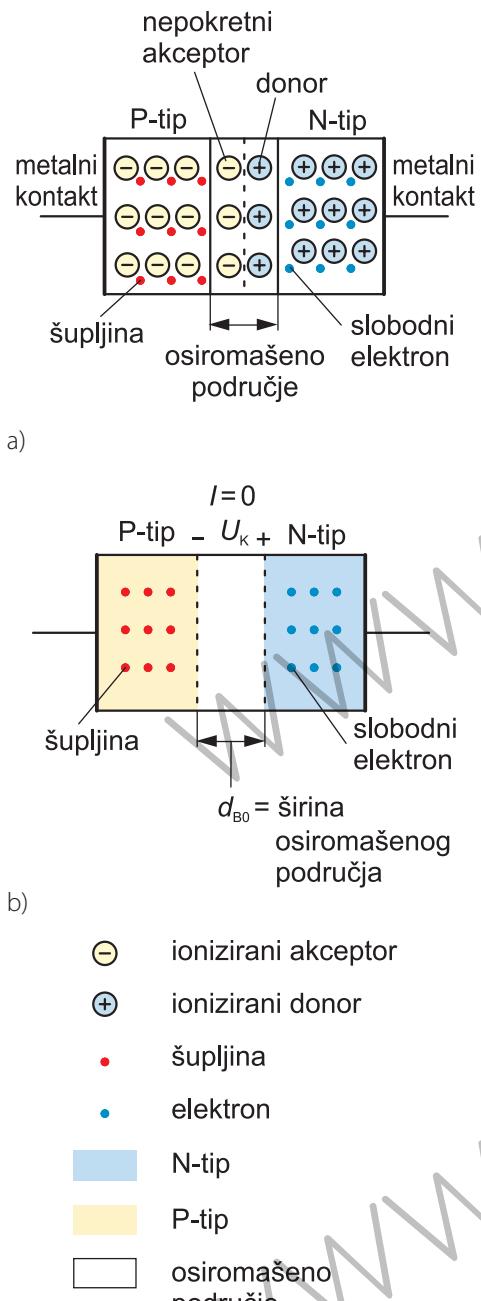
Poluvodič N-tipa je poluvodič u kojem je koncentracija slobodnih elektrona veća od koncentracije šupljina, a nastaje tako da se čistom poluvodiču doda element čija je valencija za jedan veća od valencije atoma poluvodiča.

Cistom siliciju dodaje se peterovalentni element, najčešće fosfor, arsen ili antimon. Četiri valentna elektrona primjese čine kovalentnu vezu s četiri susjedna atoma silicija, a peti je elektron slabije vezan za matični atom i na sobnoj temperaturi postaje slobodni elektron, kao što je prikazano na slici 2.1-9. Svaki peterovalentni atom daje po jedan slobodni elektron pa se naziva **donor**. Nakon što otpusti jedan elektron, atom donora postaje **pozitivan ion**.

- Osim slobodnih elektrona nastalih dodavanjem primjesa, 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, odnosno negativnim naboljem.

**Slika 2.1-11**

PN-spoj u stanju ravnoteže:
 a) s prikazanim većinskim nosiocima naboja, donorima i akceptorima
 b) pojednostavljeni prikaz s većinskim nosiocima naboja

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 element čija je valencija za jedan manja od valencije atoma poluvodiča.

Čistom siliciju dodaje se trovalentni element, najčešće bor. Tri valentna elektrona primjese čine kovalentnu vezu s tri susjedna atoma silicija, a na četvrtom mjestu ostaje **šupljina**, kao što je prikazano na slici 2.1-10. 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**.

Osim šupljina nastalih dodavanjem primjesa, 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 nosioци naboja**.

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

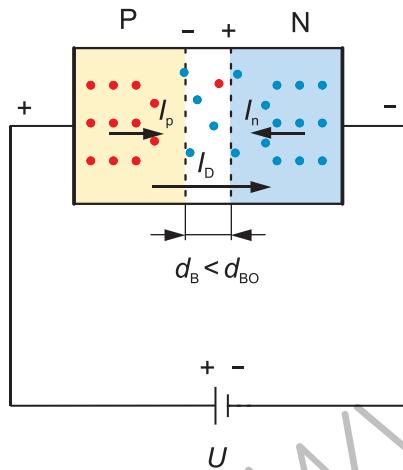
2.1.3 PN-spoj u stanju ravnoteže

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

Zamislimo 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.

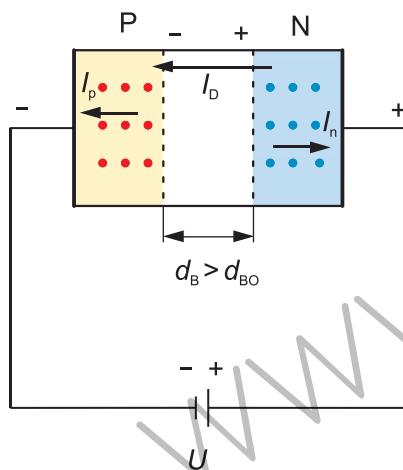
Zbog različite koncentracije većinskih nosilaca naboja, odnosno elektrona u N-tipu poluvodiča i šupljina u P-tipu poluvodiča, poteku difuzijske struje većinskih nosilaca naboja. Šupljine koje prelaze na N-stranu rekombiniraju se s elektronima, a elektroni koji prelaze na P-stranu rekombiniraju se sa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

U prijelaznom području nastaje usko područje bez slobodnih nosilaca naboja. To je **osiromašeno područje ili područje prostornog naboja**. U tom je području **prostorni naboј**, nepokretni donori i akceptori koji su čvrsto vezani u kristalnu rešetku, što možemo vidjeti na slici 2.1-11. Izvan osiromašenog područja nalazi se neutralno N-područje i P-područje.



Slika 2.1-12

Pojednostavljeni prikaz propusne polarizacije PN-spoja



Slika 2.1-13

Pojedostavljeni prikaz zaporne polarizacije PN-spoja

Prostorni naboje uspostavljaju 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.

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 i 0,9 V, a za germanij između 0,2 i 0,5 V.

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

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

2.1.4. Propusna polarizacija PN-spoja

Priklučimo PN-spoj na vanjski izvor napona prema slici 2.1-12. 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.

Smanjenjem potencijalne barijere 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 priključeni napon veći, to je ukupni napon na osiromašenom području niži pa je struja kroz PN-spoj veća.

2.1.5 Zaporna polarizacija PN-spoja

PN-spoj priključimo na vanjski izvor napona, prema slici 2.1-13. Pozitivni pol izvora napona spojen je na N-stranu, a negativni pol na P-stranu.

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

Elektroni kao većinski nosilaci naboja iz N-strane privučeni su pozitivnom polu izvora. Nasuprot tome, šupljine su, kao većinski nosilaci naboja iz P-strane, privučene negativnom polu izvora. Zbog povećanja potencijalne barijere, difuzija većinskih nosilaca naboja preko osiromašenog područja praktički je onemogućena. Postoji samo struja manjinskih nosilaca naboja, i to šupljina s N-strane i elektrona s P-strane, koji

nesmetano prelaze osiromašeno područje. Za njih ne postoji potencijalna barijera. PN-spoj je zaporno polariziran.

Struja manjinskih nosilaca naboja naziva se **zaporna struja I_R** . Zaporna struja je stalna i ne ovisi o priključenom naponu pa se zato često nazi va **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.

Pri **zapornoj polarizaciji** PN-spoja teče zaporna struja i na njemu je **zaporni napon**.

PROBOJ

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

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

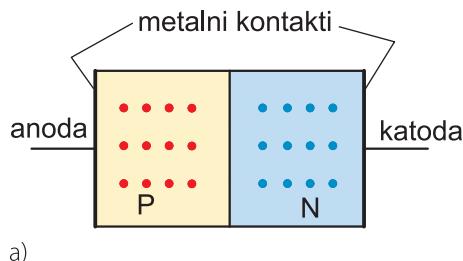
Velika zaporna struja može dovesti do uništenja kristala zbog zagrijavanja.

Razlikujemo lavinski i Zenerov proboj PN-spoja.

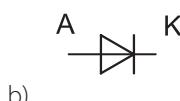
- **Lavinski proboj**

Porastom zapornog napona raste jakost električnog polja u osiromašenom području. Kod određene se jakosti električnog polja elektroni i šupljine 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, odnosno probojnom naponu manjem od oko 5 V, elektroni tuneliranjem prelaze s P na N-stranu. Što je osiromašeno područje uže, tuneliranje elektrona je veće.

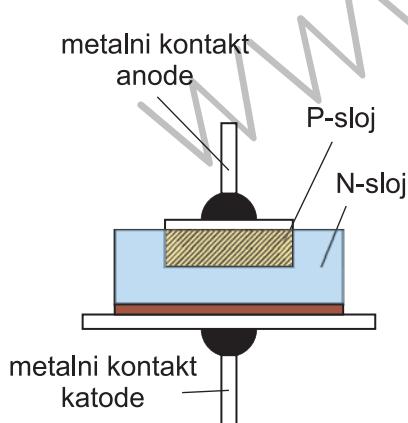


a)



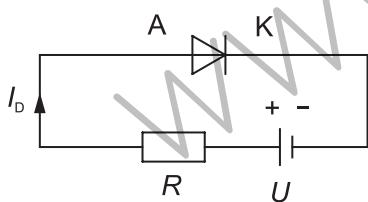
Slika 2.2-1

Poluvodička dioda:
a) pojednostavljeni prikaz
b) simbol



Slika 2.2-2

Presjek monokristala poluvodičke diode



Slika 2.2-3

Propusna polarizacija diode

2.2 POLUVODIČKA PN-DIODA

2.2.1 Svojstva poluvodičkih PN-dioda

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

Na slici 2.2-1 nalazi se pojednostavljeni prikaz i simbol poluvodičke PN-diode, a na slici 2.2-2 presjek monokristala poluvodičke diode.

Priključak **anode (A)** ostvaren je nanošenjem metalnog kontakta na površinu P-tipa poluvodiča. Priključak **katode (K)** ostvaren je nanošenjem metalnog kontakta na površinu N-tipa poluvodiča.

S obzirom na to da poluvodičku PN-diodu čini PN-spoj, sva provedena analiza propusne polarizacije, zaporne polarizacije i proboga PN-spoja može se primijeniti i na 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 dalnjem ćemo izlaganju sve analize provesti 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.

2.2.2 Strujno-naponska karakteristika PN-diode

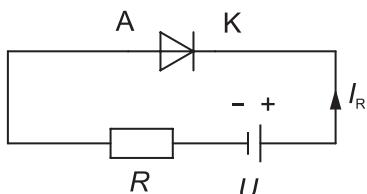
U svrhu primjene diode potrebno je znati što se događa sa strujom pri promjeni napona na diodi u propusnom i u zapornom području.

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

$$I_D = f(U_D)$$

U spoju prema slici 2.2-3 dioda je propusno polarizirana. Pri propusnoj polarizaciji struja kroz diodu raste s porastom napona. U početku raste sporije, a pri većim je naponima porast znatno brži.

U spoju prema slici 2.2-4 dioda je zaporno polarizirana. Pri zapornoj polarizaciji zaporna struja je približno stalna i neovisna o naponu, sve dok zaporni napon ne dostigne vrijednost napona proboga. Slika 2.2-5 prikazuje strujno-naponsku karakteristiku diode.



Slika 2.2-4

Zaporna polarizacija diode

Na karakteristici razlikujemo nekoliko područja:

a) Propusno područje

U spoju prema slici 2.2-3 na diodi je pozitivan napon jer je anoda na većem potencijalu od katode.

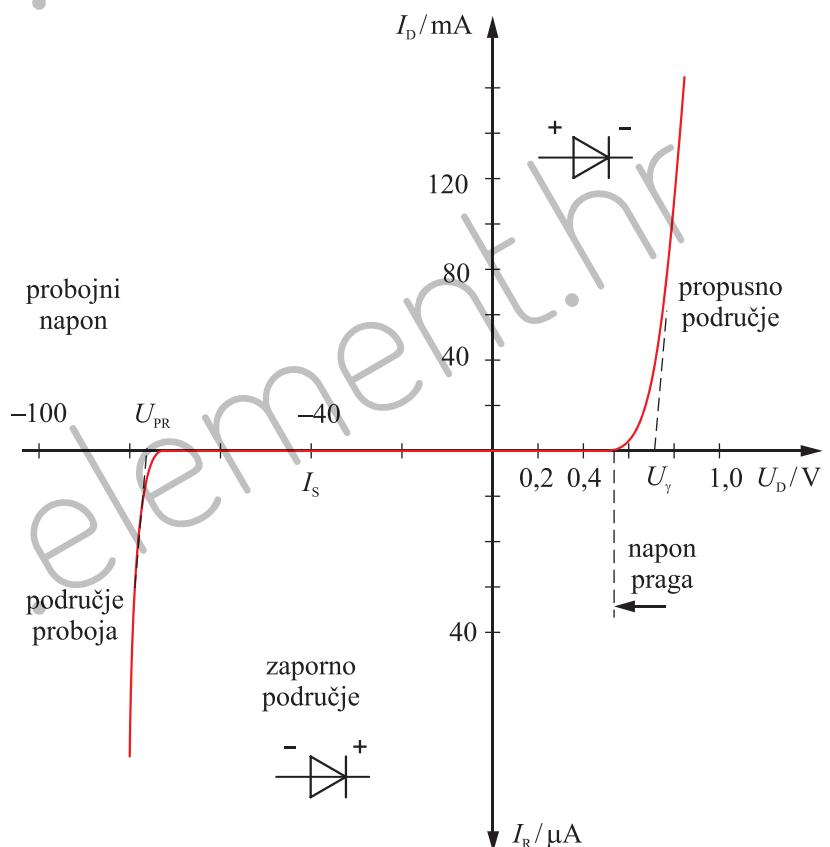
$$U_D = U_{AK} > 0$$

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_γ . Daljnje povećanje napona dodatno sužava potencijalnu barijeru i struja naglo raste. Dioda je **propusno polarizirana** i teče **struja propusne polarizacije ili propusna struja** I_D . Porastom napona, struja raste po eksponencijalnom zakonu.

Pri propusnoj polarizaciji PN-diode ističe se **napon praga ili napon koljena** U_γ . Do tog je napona struja zanemarivo mala, a 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 u oba područja nisu jednaka.



Slika 2.2-5

Strujno-naponska karakteristika PN-diode

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

U spoju prema slici 2.2-4 napon na diodi je negativan jer je anoda na manjem potencijalu od katode.

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

Vanjski napon je istog polariteta kao i kontaktni potencijal pa se povećava potencijalna razlika između P i N-strane, odnosno širi se osiromašeno područje. Za napone manje od probognog 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 odredene vrijednosti napona zaporne polarizacije U_{PR} nastaje **probaj** PN-spoja i zaporna struja naglo raste. Većina dioda se ne primjenjuje u tom području, osim Zenerove diode.

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

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

Probogni napon ovisi o vrsti diode i može biti od nekoliko desetinki volta do nekoliko stotina volta.

c) 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

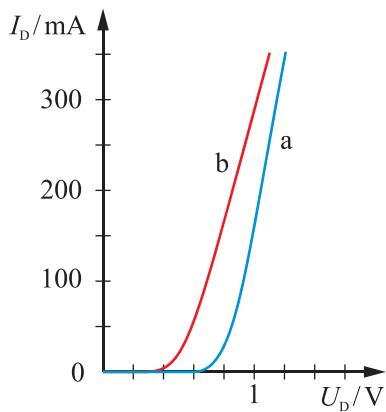
I_S zaporna struja zasićenja

U_D napon na diodi

U_T naponski ekvivalent temperature.

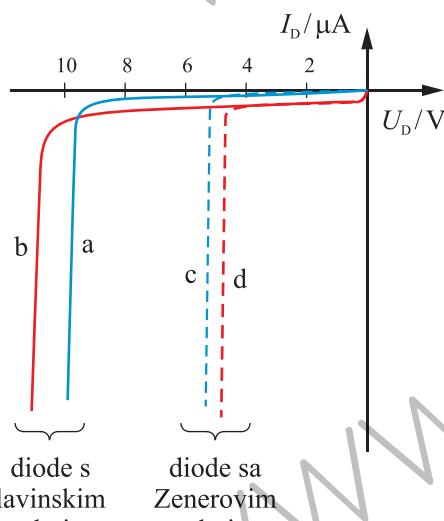
Napomena

Naponski ekvivalent temperature U_T izravno je ovisan o temperaturi kristala i za njega vrijedi: $U_T = \frac{kT}{q}$, gdje je k Boltzmannova konstanta, T apsolutna temperatura i q elementarni naboj. Uvrštavanjem konstanti slijedi: $U_T = \frac{T}{11600}$, a iskazuje se u voltima (V), pri čemu je temperatura izražena u kelvinima (K). Na temperaturi 25°C ima vrijednost 0,025 V.



Slika 2.2-6

Utjecaj temperature na $I-U$ karakteristiku diode u propusnom području (za diodu 1N914):
 a) pri temperaturi $T_1 = 25^\circ\text{C}$
 b) pri temperaturi $T_2; T_2 > T_1$



Slika 2.2-7

Utjecaj temperature na $I-U$ karakteristiku diode u zapornom području:
 a) i c) karakteristike pri temperaturi $T_1 = 25^\circ\text{C}$;
 b) i d) karakteristike pri temperaturi $T_2; T_2 > T_1$

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 znatno je manji od jedinice i struja diode jednaka je zapornoj struci zasićenja: $I_D = -I_s$.

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

2.2.3 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.

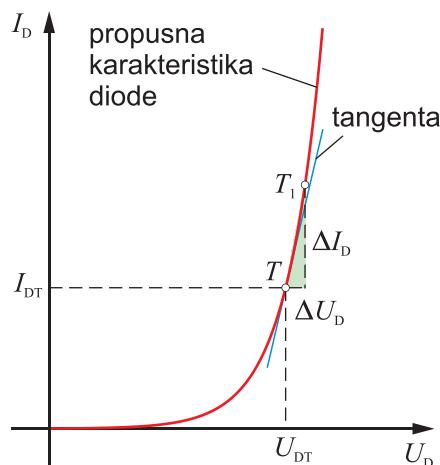
Pri propusno polariziranoj diodi, uz stalan napon na diodi, porast temperature izaziva porast struje, kako je prikazano na slici 2.2-6. S porastom temperature mijenja se probajni napon, ovisno o vrsti probaja, prema slici 2.2-7.

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

2.2.4 Električne karakteristike diode

Za pravilnu primjenu dioda važno je poznavati njihove električne karakteristike. Proizvođač navodi karakteristične vrijednosti za svaku diodu. Navest ćemo neke električne karakteristike diode pri temperaturi od 25°C :

- **napon praga ili napon koljena U_γ** 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
- **probajni napon U_{PR}** je zaporni napon kod kojeg zaporna struja počinje naglo rasti
- **maksimalna disipacija snage P_{Dm}** je maksimalna dopuštena snaga koja se razvije na diodi; kod snage veće od dopuštene dolazi do uništenja kristala zbog prevelikog zagrijavanja PN-spoja



Slika 2.2-8

Dinamički otpor diode

- maksimalna temperatura spoja T_j je maksimalna dopuštena temperatura PN-spoja pri kojoj ne dolazi do trajnog oštećenja PN-spoja kristala. Proizvođač navodi strujno-naponsku karakteristiku diode, karakteristiku ovisnosti struje o temperaturi, karakteristiku ovisnosti snage o temperaturi okoline itd.

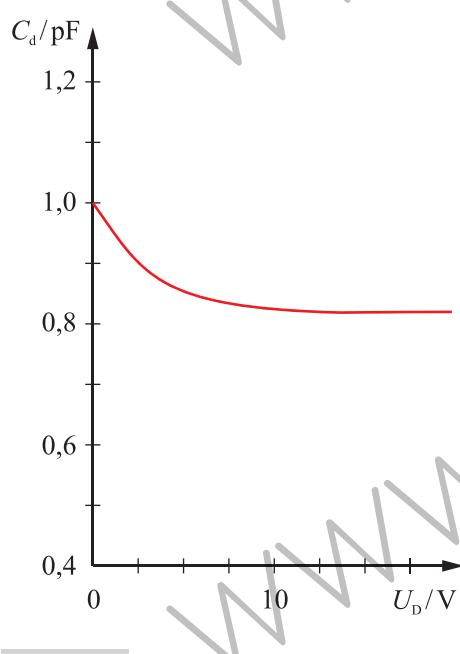
2.2.5 Dinamički otpor i kapacitet PN-diode

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 2.2-8) 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:

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



Slika 2.2-9

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

Dinamički otpor diode može se grafički odrediti kao nagib tangente na $I-U$ karakteristiku diode u statičkoj radnoj točki. Pri većoj istosmjernej struci nagib tangente je veći, zbog čega dolazi do veće promjene struje za jednaku promjenu napona pa je dinamički otpor manji. Iz toga proizlazi da 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:

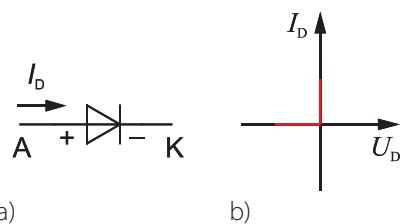
$$r_d = \frac{U_T}{I_D},$$

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

Dinamički otpor zaporno polarizirane diode praktički je beskonačan.

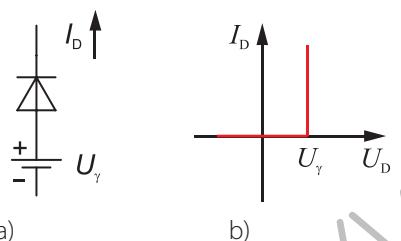
- Ako su amplitude izmjeničnih napona i struja na diodi dovoljno male, karakteristika diode oko statičke radne točke može se nadomjestiti pravcem – tangentom na karakteristiku diode u radnoj točki. Kažemo da radimo u **području malih signala**. U području malih signala nema izobličenja napona u odnosu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

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



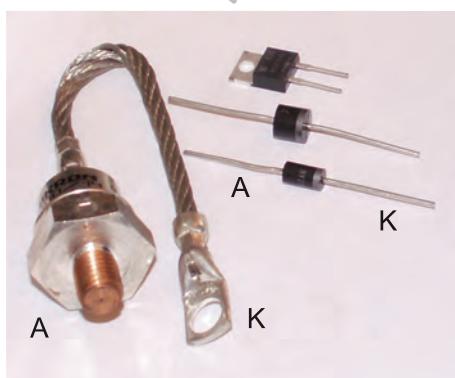
Slika 2.2-10

Idealna dioda:
a) simbol
b) strujno-naponska karakteristika



Slika 2.2-11

Idealna dioda s unutarnjim naponom:
a) simbol
b) strujno-naponska karakteristika



Slika 2.2-12

Razni oblici kućišta dioda



Slika 2.2-13

Kućište diode 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 te kapacitet. Kapacitet osiromašenog područja može se svesti na kapacitet pločastog kondenzatora. Slika 2.2-9 prikazuje ovisnost kapaciteta diode o zapornom naponu.

Pri propusnoj polarizaciji diode, PN-spoj ima **difuzijski kapacitet** koji je posljedica nakupljanja manjinskih nosilaca naboja u neutralnim područjima PN-spoja. Za propusne napone veće od napona praga, difuzijski kapacitet znatno je veći od kapaciteta osiromašenog područja i raste linearno s istosmernom strujom I_D .

2.2.6 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 2.2-10 prikazuje strujno-naponsku karakteristiku.

Stvarne diode možemo prikazati idealnom diodom i naponskim izvorom, prema slici 2.2-11. Dioda se može propusno polarizirati tek kad je vanjski napon veći od unutarnjeg napona praga U_g .

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

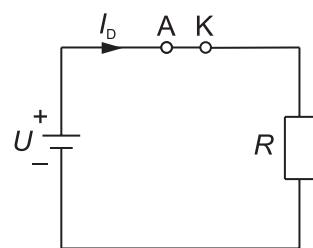
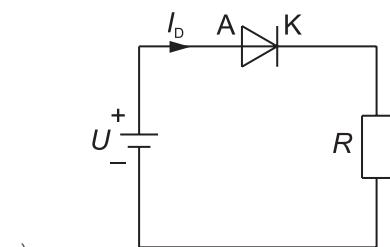
2.2.7 Kućišta i označavanje diode

Kućište diode može biti stakleno, plastično i metalno, ovisno o vrsti i snazi diode, kao što je prikazano na slici 2.2-12. 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.

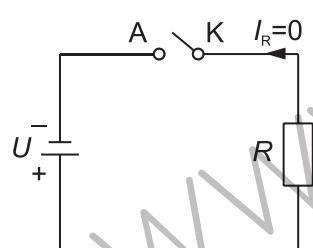
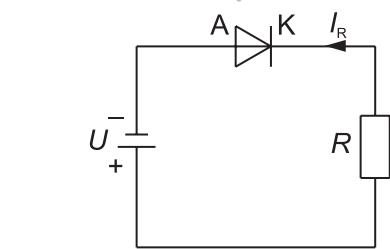
Diode se izrađuju i u kućištima za površinsku montažu (engl. *surface mount technology* – SMT), slika 2.2-13.

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

**Slika 2.3-1**

Propusna polarizacija diode:

- a) shema spoja
- b) nadomjesna shema – uključena sklopka

**Slika 2.3-2**

Zaporna polarizacija diode:

- a) shema spoja
- b) nadomjesna shema – isključena sklopka

2.3 SKLOPOVI S DIODAMA

2.3.1 Dioda u strujnom krugu

a) Propusno polarizirana dioda – uključena sklopka

Diodu i otpornik priključimo na izvor istosmjernog napona, prema slici 2.3-1a. Anoda je na većem potencijalu od katode pa je dioda propusno polarizirana. Na propusno polariziranoj diodi je maleni pozitivni napon $U_D = U_{AK} > 0$. Kroz diodu teče propusna struja I_D .

Za strujni krug prema jednadžbi $\Sigma I = 0$, Kirchhoffovog zakona vrijedi:

$$U = I_D R + U_D.$$

Propusna struja je:

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

Ako je napon izvora mnogo veći od napona na diodi, $U \gg U_D$, pad napona na diodi može se zanemariti pa je napon na otporniku približno jednak naponu izvora, $U_R \approx U$. Tada struju računamo prema pojednostavljenom izrazu:

$$I_D = \frac{U}{R}.$$

Jakost struje ovisi o priključenom naponu izvora i o otporu serijski spojenog otpornika. Otpor propusno polarizirane diode je malen.

Propusno polarizirana dioda ponaša se kao uključena sklopka.

b) Zaporno polarizirana dioda – isključena sklopka

Diodu i otpornik priključimo na izvor istosmjernog napona, prema slici 2.3-2. Anoda je na manjem potencijalu od katode ($U_D = U_{AK} < 0$) pa je dioda zaporno polarizirana. Na diodi vlada napon izvora, otpor diode je vrlo velik, a strujnim krugom teče zanemariva zaporna struja. Uz zanemarivanje zaporne struje, može se zanemariti i pad napona na otporniku:

$$I_R = 0, U_R = 0, U_D = -U.$$

Zaporno polarizirana dioda ponaša se kao isključena sklopka.

c) Grafički prikaz

Dioda je nelinearna komponenta. Stoga se pri analizi rada koristi i grafička metoda. Provest ćemo analizu pri istosmjernom naponu.

Uz poznatu strujno-naponsku karakteristiku diode, grafički možemo odrediti **statičku radnu točku (SRT)**, odnosno struju i napon na diodi. Da bi se dobila SRT, potrebno je ucrtati **radni pravac**, koji određuje