

# 1.

## Poluvodička dioda

- 1.1. Poluvodiči**
- 1.2. Poluvodička dioda**
- 1.3. Neke vrste dioda**
- 1.4. Sklopovi s diodama**

## 1.1. Poluvodiči

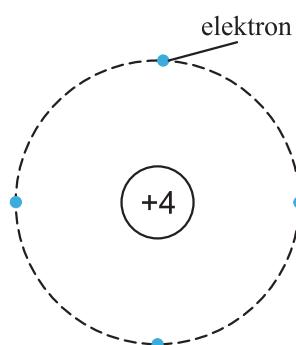
### 1.1.1. Svojstva poluvodiča



Slika 1.1.  
Silicij



Slika 1.2.  
Germanij



Slika 1.4.  
Pojednostavljeni model atoma  
poluvodiča silicija i germanija

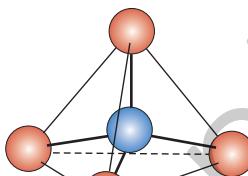
**Poluvodiči** su materijali čija je električna provodnost izrazito manja od provodnosti vodiča, a veća od provodnosti izolatora te ovisi o namjerno dodanim primjesama.

U elektronici i mikroelektronici poluvodiči se upotrebljavaju kao:

- **elementarni poluvodiči:** silicij (Si, slika 1.1) i germanij (Ge, slika 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 1.3. Svaki atom dijeli svoja četiri valentna elektrona s četiri susjedna atoma, udružujući ih u parove. Atomi se nalaze u vrhovima tetraedra.

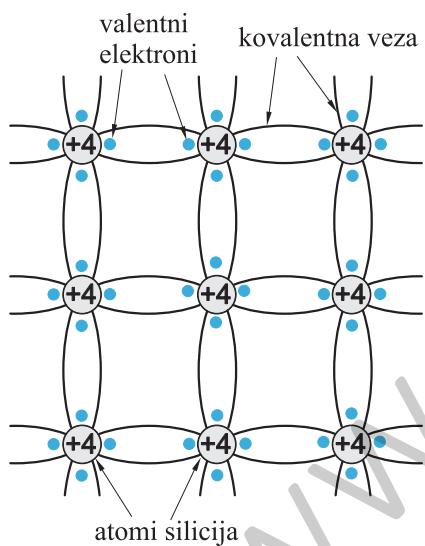


Slika 1.3.  
Tetraedarska prostorna veza među atomima

Atome silicija i germanija prikazujemo pojednostavljenim modelom atoma s elektronima valentne ljske i onoliko protona koliko ima valentnih elektrona koji su s njima u ravnoteži, prema slici 1.4.

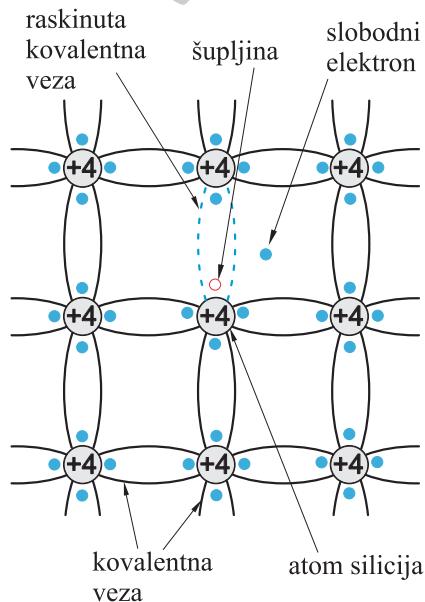
Ako poluvodič nema primjesa drugih elemenata, naziva se **čisti** ili **intrinzični poluvodič**.

Na temperaturama blizu absolutne nule ( $-273,15^{\circ}\text{C} = 0\text{ K}$ ) čisti poluvodič nema slobodnih nosilaca naboja jer su svi valentni elek-



Slika 1.5.

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



Slika 1.6.

Poluvodič na sobnoj temperaturi  
(dvodimenzionalni prikaz)

tronii čvrsto vezani u kovalentnu vezu. Struja kroz poluvodič ne teče pa se on ponaša kao izolator (slika 1.5).

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 nabolj više i taj atom postaje pozitivan ion. Nastalo prazno mjesto nazivamo **šupljinom**, kako je prikazano na slici 1.6. Dakle, šupljinu smatramo nosiocem pozitivnog nabolja. Ona ima jednaku vrijednost nabolja kao elektron, ali je suprotnog predznaka.

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

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

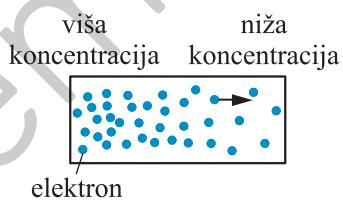
**Slobodni elektroni** nosioci su negativnog, a **šupljine** pozitivnog nabolja te se mogu kretati kroz poluvodič i voditi struju.

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.

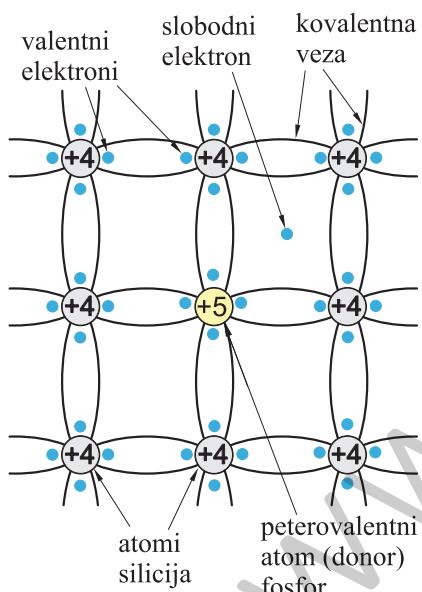
### Vođenje struje u poluvodičima

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

Postoji li nejednolika koncentracija nosilaca nabolja, u poluvodiču nastaje **difuzijska struja**. Nosioci nabolja gibaju se s mesta više koncentracije prema mjestu niže koncentracije, s tendencijom da se koncentracije izjednače (slika 1.7).

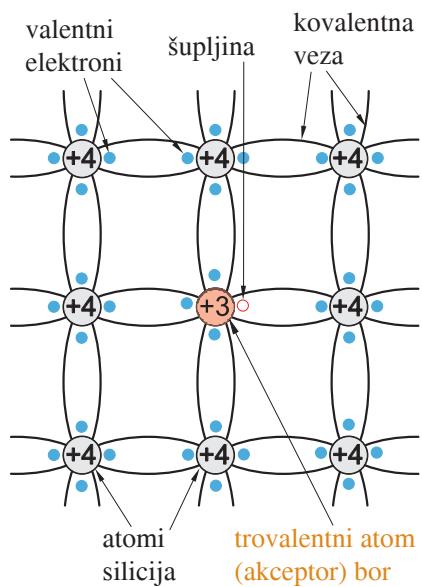


Slika 1.7.  
Difuzijska struja



Slika 1.9.

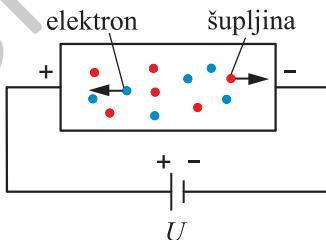
Poluvodič N-tipa



Slika 1.10.

Poluvodič P-tipa

Ako se na poluvodič priključi vanjski napon, u poluvodiču dolazi do gibanja nosilaca naboja pod djelovanjem nastalog električnog polja. 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 1.8).



Slika 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 element čija je valencija za jedan veća od valencije atoma poluvodiča.

Čistom siliciju dodaje se peterovalentni element, najčešće fosfor, arsen ili antimон. Četiri valentna elektrona primješa 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 1.9. Svaki peterovalentni atom daje po jedan slobodni elektron pa se naziva **donor**. Nakon što otpusti jedan elektron, atom donora postaje **pozitivan ion**.

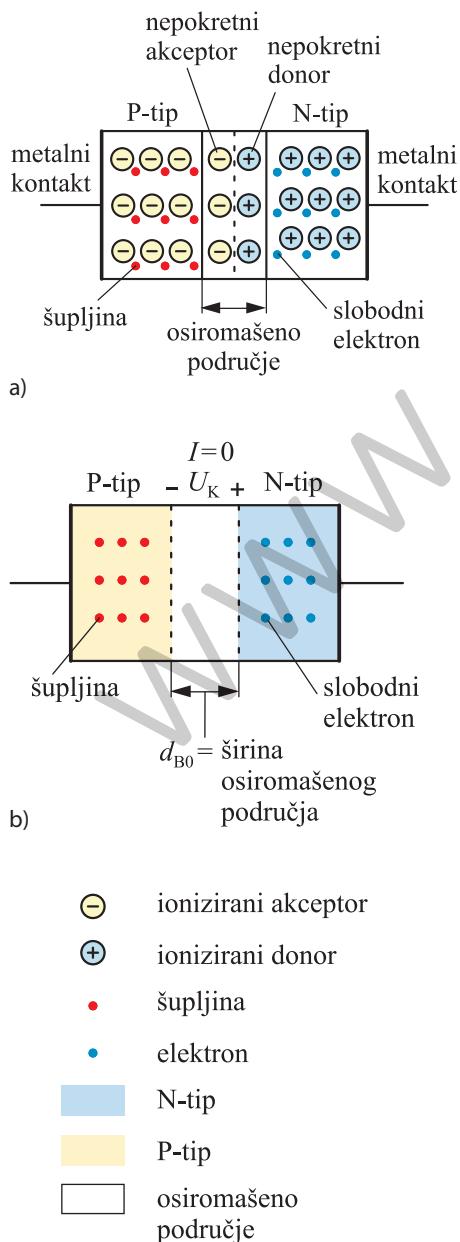
Osim slobodnih elektrona nastalih dodavanjem primjesa, postoji i mala koncentracija šupljina nastala stalnim procesom generacije i rekombinacije parova elektron-šupljina.

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

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

#### a) 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.

**Slika 1.11.**

PN-spoj u stanju ravnoteže:

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

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 1.10. Na takvo prazno mjesto može doći elektron susjednog atoma, a na tom atomu silicija ostaje šupljina. Dolaskom četvrtog elektrona atom primjese 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 nosioci naboja**.

U poluvodiču P-tipa vodljivost je ostvarena šupljinama, odnosno 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 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 različitih koncentracija nosilaca, male koncentracije elektrona u P-tipu i velike u N-tipu poluvodiča, odnosno velike koncentracije šupljina u P-tipu i male u N-tipu poluvodiča, poteku difuzijske struje većinskih nosilaca naboja. Šupljine koje prelaze na N-stranu rekomбинiraju 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 naboje**, nepokretni donori i akceptorji koji su čvrsto vezani u kristalnu rešetku, što možemo vidjeti na slici 1.11. Izvan osiromašenog područja nalazi se neutralno N-područje i P-područje.

Prostorni naboje 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.

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.

#### 1.1.4. Propusna polarizacija PN-spoja

Priklučimo PN-spoj na vanjski izvor napona prema slici 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 koji čine struju diode. Kroz PN-spoj teče **struja propusne polarizacije ili propusna struja  $I_D$** . PN-spoj je **propusno polariziran**.

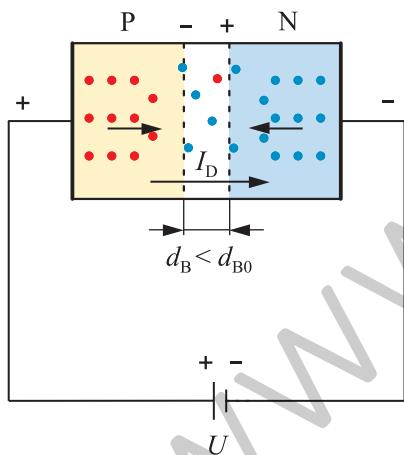
Smjer struje odgovara polaritetu vanjskog napona. Ukupnu struju PN-spoja  $I_D$  čine struje elektrona i šupljina koje se zbrajaju i pritom imaju isti smjer. Povećanjem napona struja naglo raste. Što je priključeni napon veći, to je ukupni napon na osiromašenom području niži pa je struja kroz PN-spoj veća.

#### 1.1.5 Zaporna polarizacija PN-spoja

PN-spoj priključimo na vanjski izvor napona, prema slici 1.13. Pozitivni pol izvora napona spojen je na N-stranu, a negativni pol na P-stranu.

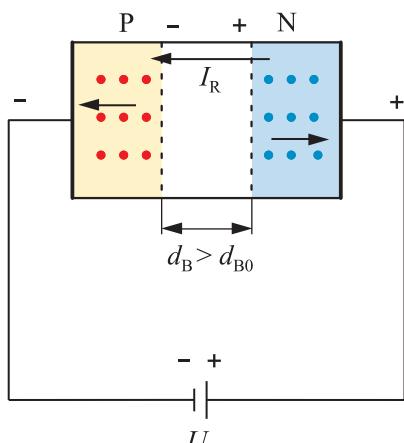
Vanjski je napon takvog polariteta da se povećava potencijalna razlika P-strane i N-strane, a osiromašeno se područje proširuje.

Elektroni kao većinski nosioci naboja iz N-strane privučeni su pozitivnom polu izvora. Nasuprot tome, šupljine su, kao većinski nosioci naboja iz P-strane, privučene negativnom polu izvora. Zbog



Slika 1.12.

Pojednostavljeni prikaz propusne polarizacije PN-spoja



Slika 1.13.

Pojedostavljeni prikaz zaporne polarizacije PN-spoja

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 zaporno polariziranog PN-spoja naziva se **zaporna struja  $I_R$** , a čine je struje manjinskih nosilaca naboja koje se zbrajaju i pritom imaju isti smjer.

Zaporna struja je stalna i ne ovisi o priključenom naponu pa se zato često naziva **zaporna struja zasićenja i označava s  $I_S$** . Kod tipičnih PN-spojeva zaporna struja je zanemariva, reda vrijednosti nanoampera za silicij i mikroampера за 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**.

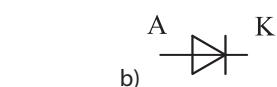
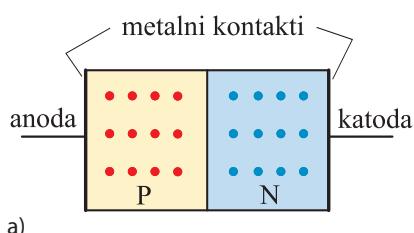
Velika zaporna struja može dovesti do uništenja kristala zbog zagrijavanja.

Razlikujemo lavinski i Zenerov proboj PN-spoja.

#### • **Lavinski proboj**

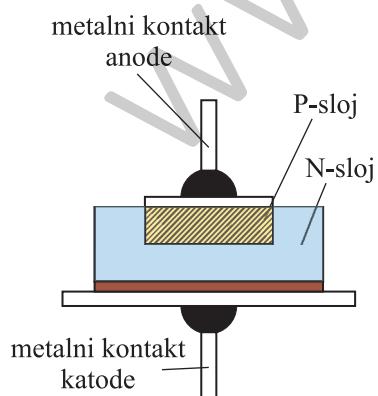
Porastom zapornog napona raste jakost električnog polja u osiromašenom području. Kod određene se jakosti električnog polja elektroni i šupljine prilikom prolaza preko osiromašenog područja ubrzavaju i dobivaju dovoljnu energiju da mogu raskinuti kovalentne veze unutar osiromašenog područja. Stvaraju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

• **Zenerov ili tunelski proboj** nastaje kod PN-spoja uskih osiromašenih područja što 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.



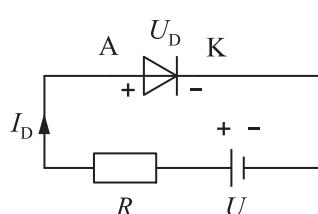
Slika 1.14.

Poluvodička dioda:  
a) pojednostavljeni prikaz  
b) simbol



Slika 1.15.

Presjek monokristala poluvodičke diode



Slika 1.16.

Propusna polarizacija diode

## 1.2. Poluvodička PN-diода

### 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 1.14 nalazi se pojednostavljeni prikaz i simbol poluvodičke PN-diode, a na slici 1.15 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. Primjepom PN-strukture može se ostvariti više različitih vrsta PN-dioda.

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

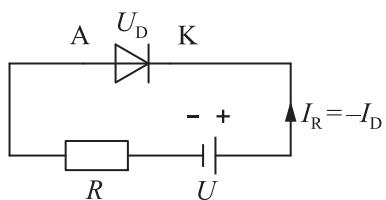
### 1.2.2. Strujno-naponska karakteristika PN-diode

U svrhu primjene diode potrebno je 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 1.16 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.



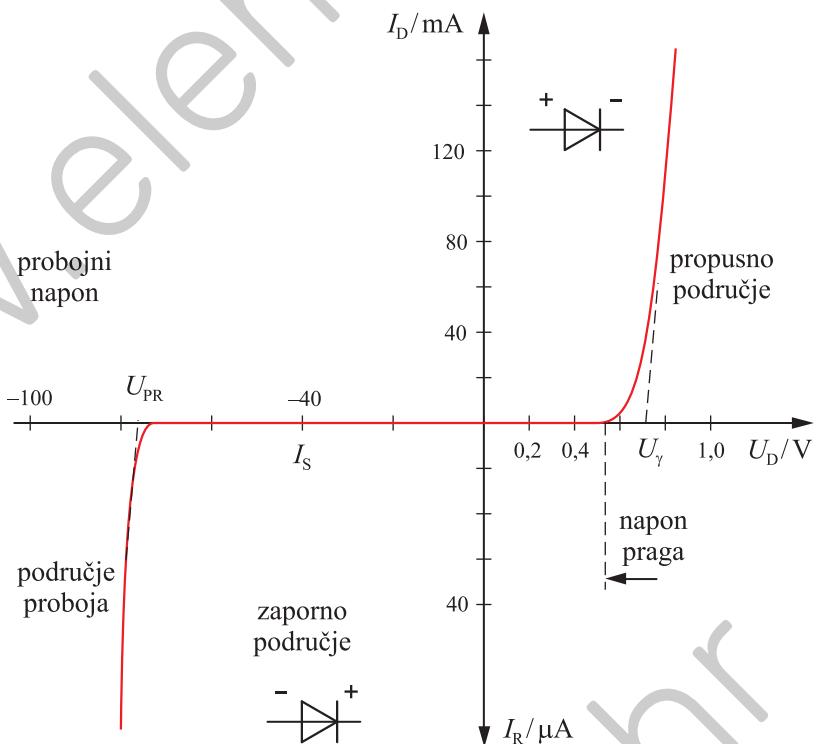
Slika 1.17.

Zaporna polarizacija diode

**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.

U spoju prema slici 1.17 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 1.18 prikazuje strujno-naponsku karakteristiku diode.



Slika 1.18.

Strujno-naponska karakteristika PN-diode

Na karakteristici razlikujemo nekoliko područja:

**a) Propusno područje**

U spoju prema slici 1.16 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  $U_\gamma$** . 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  $U_r$** . Do tog je napona struja zanemarivo mala, a nakon njega znatno raste.

Napon praga za silicijске 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 1.17 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 probajnog 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.

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

## Napomena

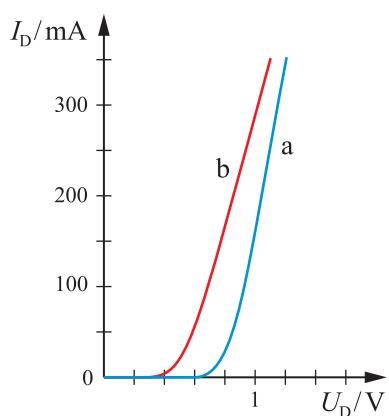
Naponski ekvivalent temperaturе  $U_T$  izravno je ovisan о temperaturи kristala i za njega vrijedi:

$$U_T = \frac{kT}{q}, \text{ gdje je } k \text{ Boltzmann-}$$

va konstanta,  $T$  absolutna temperatura i  $q$  elementarni naboј. Uvrštavanjem konstanti slijedi:

$$U_T = \frac{T}{11600}, \text{ a } \text{iskazuje } \text{se } u$$

voltima (V), pri čemu je temperatura izražena u kelvinima (K). Na temperaturi  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  ima vrijednost  $0.025\text{ V}$ .



Slika 1.19.

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  $T_2$ ;  $T_2 > T_1$

### 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.

Pri propusnoj polarizaciji diode uz pozitivan napon  $U_D \gg U_T$  eksponentijalni član u zagradi znatno je veći od jedinice i struja raste eksponentijalno 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 struji zasićenja:  $I_D = -I_S$ .

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

### 1.2.3. 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 1.19. S porastom temperature mijenja se probajni napon, ovisno o vrsti probaja, prema slici 1.20.

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.