

1.

Sklopovi s diodama

U ovom poglavlju ostvarit ćeš sljedeće ishode učenja (SIU 5467):

- razlikovati rad i svojstva poluvodičkih dioda
- analizirati osnovne spojeve, područja rada i primjenu poluvodičkih dioda
- interpretirati snimljene karakteristike i ograničenja u radu poluvodičkih dioda
- analizirati rad sklopova s diodama s pomoću simulacijskog programa
- interpretirati rezultate mjerenja na sklopovima s diodama u simulacijskom programu i/ili na stvarnim sklopovima.

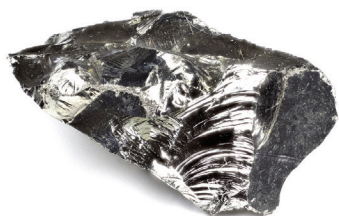
1.1. Poluvodiči

1.1.1. Svojstva poluvodiča

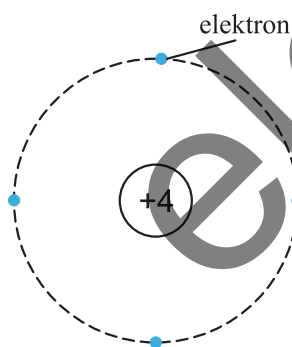
Poluvodiči su materijali čija je električna provodnost izrazito manja od provodnosti vodiča, a veća od provodnosti izolatora te ovisi o namjerno dodanim primjesama.



Slika 1.1.
Silicij



Slika 1.2.
Germanij

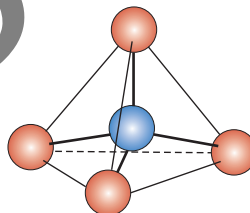


Slika 1.4.
Pojednostavljeni model atoma
poluvodiča silicija i germanija

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 fosfid (InP), indijev antimonid (InSb), cinkov sulfid (ZnS) 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.



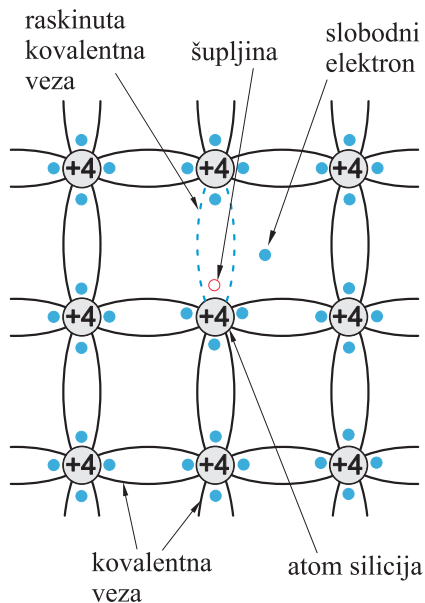
Slika 1.3.
Tetraedarska prostorna veza među atomima

Atome silicija i germanija prikazujemo pojednostavnjenim modelom atoma s elektronima valentne ljuske 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**.

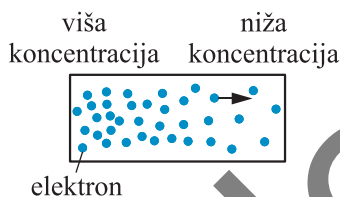
Na temperaturama blizu apsolutne nule ($-273,15\text{ °C} = 0\text{ K}$) čisti poluvodič nema slobodnih nosilaca naboja jer su svi valentni elektroni čvrsto vezani u kovalentnu vezu. Struja kroz poluvodič ne teče pa se on ponaša kao izolator.

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 naboj više



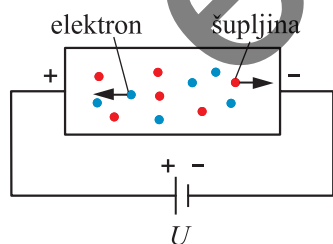
Slika 1.5.

Poluvodič na sobnoj temperaturi
(dvodimenzionalni prikaz)



Slika 1.6.

Difuzijska struja



Slika 1.7.

Driftna struja

i taj atom postaje pozitivan ion. Nastalo prazno mjesto nazivamo **šupljinom**, kako je prikazano na slici 1.5. Dakle, šupljinu smatramo nosiocem pozitivnog naboja. Ona ima jednaku vrijednost naboja kao elektron, ali je 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.

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

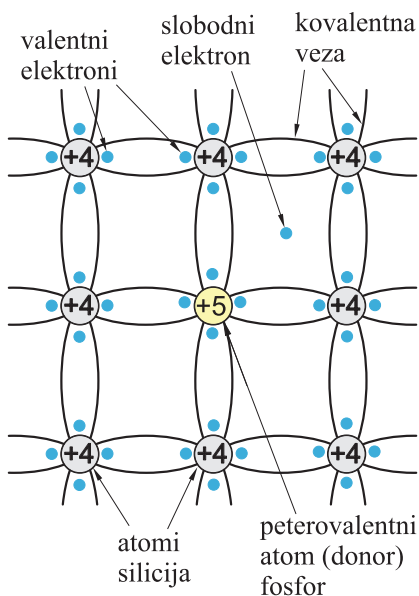
Postoji li nejednolika koncentracija nosilaca naboja, u poluvodiču nastaje **difuzijska struja**. Nosioci naboja gibaju se s mjesta više koncentracije prema mjestu niže koncentracije, s tendencijom da se koncentracije izjednače (slika 1.6).

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 1.7).

Želimo li povećati vodljivost čistog poluvodiča, 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.

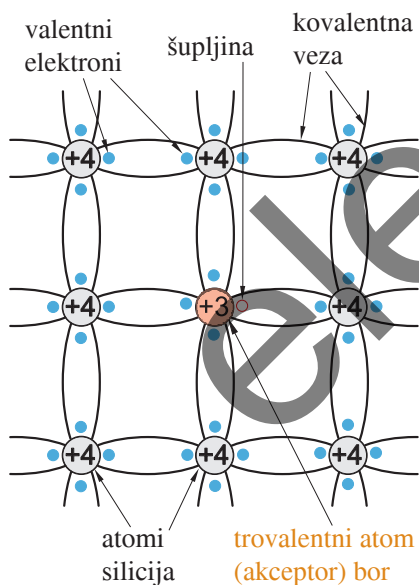
Primjena poluvodiča

Poluvodiči se pretežno upotrebljavaju 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.



Slika 1.8.

Poluvodič N-tipa



Slika 1.9.

Poluvodič P-tipa

1.1.2. N-tip i P-tip poluvodiča

Dodavanjem primjese čistom poluvodiču radi povećanja vodljivosti nastaju dva tipa poluvodiča: N-tip i P-tip.

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 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 1.8. 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 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, odnosno negativnim nabojem.

b) P-tip poluvodiča

Poluvodič P-tipa ima koncentraciju šupljina veću 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 1.9. 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**.

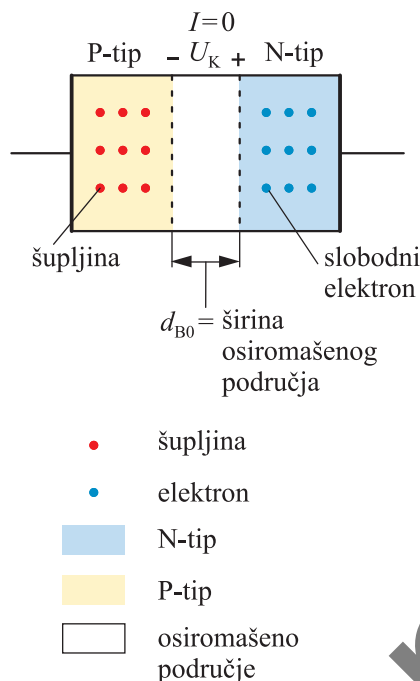
Osim šupljina nastalih dodavanjem primjese, postoji i mala koncentracija slobodnih elektrona nastala stalnim procesom generacije i rekombinacije parova elektron-šupljina.

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

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

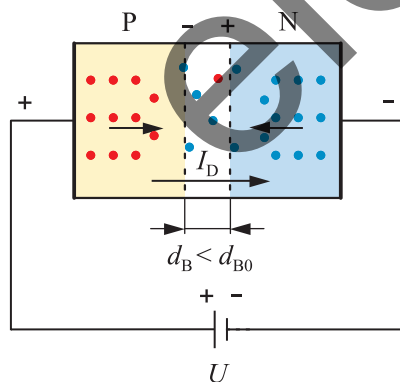
1.1.3. PN-spoj

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.



Slika 1.10.

PN-spoj u stanju ravnoteže



Slika 1.11.

Pjednostavnjeni prikaz propusne polarizacije PN-spoja

a) PN-spoj u stanju ravnoteže

U tehnološkom postupku spajanjem P-tipa i N-tipa poluvodiča nastaje PN-spoj.

U prijelaznom području nastaje usko područje bez slobodnih nosilaca naboja. To je **osiromašeno područje ili područje prostornog naboja**. U tom je području **prostorni naboj**, nepokretni donori i akceptori koji su čvrsto vezani u kristalnu rešetku, što možemo vidjeti na slici 1.10. Izvan osiromašenog područja nalazi se neutralno N-područje i P-područje.

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.

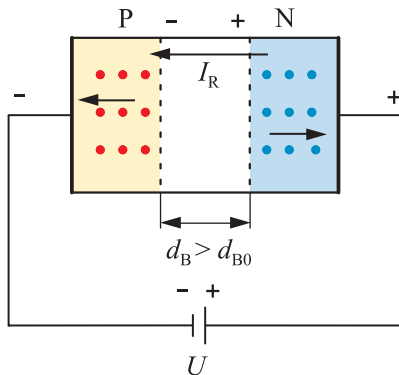
Apsolutna vrijednost kontaktnog potencijala za silicij je između 0,4 i 0,9 V, a za germanij između 0,2 i 0,5 V.

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

b) Propusna polarizacija PN-spoja

Priključimo PN-spoj na vanjski izvor napona prema slici 1.11. 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. Kroz PN-spoj teče **struja propusne polarizacije ili propusna struja I_D** . PN-spoj je **propusno polariziran**.



Slika 1.12.

Pojednostavnjeni prikaz zaporne polarizacije PN-spoja

Napomena

Zenerov ili **tunelski proboj** nastaje kod PN-spoja uskih osiromašenih područja, što se javlja kod jako dopiranih P-strana i N-strana. Pri malom naponu zaporne polarizacije, odnosno probojnom naponu manjem od oko 5 V, elektroni tuneliranjem prelaze s P-strane na N-stranu. Što je osiromašeno područje uže, tuneliranje elektrona je veće.

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, ukupni je napon na osiromašenom području niži pa je struja kroz PN-spoj veća.

c) Zaporna polarizacija PN-spoja

PN-spoj priključimo na vanjski izvor napona, prema slici 1.12. 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.

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 mikroampera za germanij.

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

d) Proboj

Porastom napona zaporne polarizacije osiromašeno se područje 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.

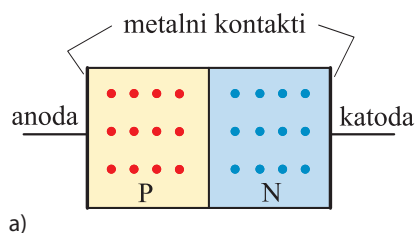
Razlikujemo lavinski i Zenerov proboj PN-spoja.

Kod **lavinskog proboja** porastom zapornog napona raste jakost električnog polja u osiromašenom području. Elektroni i šupljine se prolazeći osiromašenim područjem, ubrzavaju i dobivaju dovoljnu energiju da mogu raskinuti kovalentne veze. Stvaraju se dodatni parovi elektron-šupljina, čiji se broj povećava poput lavine, što uzrokuje porast struje.

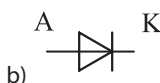
Zenerov ili **tunelski proboj** nastaje kod PN-spoja uskih osiromašenih područja, što se javlja kod jako dopiranih P-strana i N-strana.

Pitanja za provjeru znanja

1. Što su poluvodiči?
2. Što su nosioci elektriciteta kod poluvodiča?
3. Objasnite pojavu generiranja i rekombinaciju parova elektron-šupljina.
4. Objasnite nastanak P-tipa i N-tipa poluvodiča.
5. Objasnite PN-spoj u stanju ravnoteže.
6. Objasnite propusnu polarizaciju PN-spoja.
7. Objasnite zapornu polarizaciju PN-spoja.
8. Objasnite proboj PN-spoja.



a)

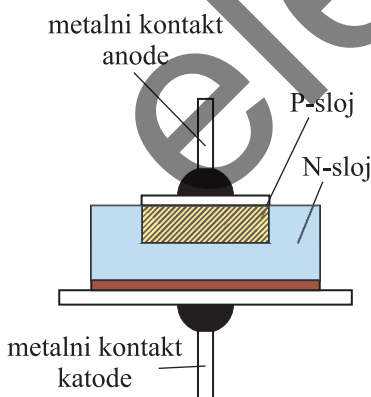


b)

Slika 1.13.

Poluvodička dioda:

- a) pojednostavljeni prikaz
b) simbol



Slika 1.14.

Presjek monokristala poluvodičke diode

1.2. Poluvodička PN-dioda

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

1.2.1. Svojstva poluvodičkih PN-dioda

Na slici 1.13 nalazi se pojednostavljeni prikaz i simbol poluvodičke PN-diode, a na slici 1.14 presjek monokristala poluvodičke diode.

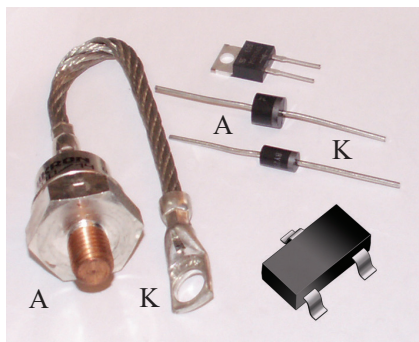
Priključak **anode (A)** ostvaren je nanošenjem metalnog kontakta na površinu P-tipa poluvodiča. Priključak **katode (K)** ostvaren je nanošenjem metalnog kontakta na površinu N-tipa poluvodiča.

S obzirom na to da poluvodičku PN-diodu čini PN-spoj, sva provedena analiza propusne polarizacije, zaporne polarizacije i proboja 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.

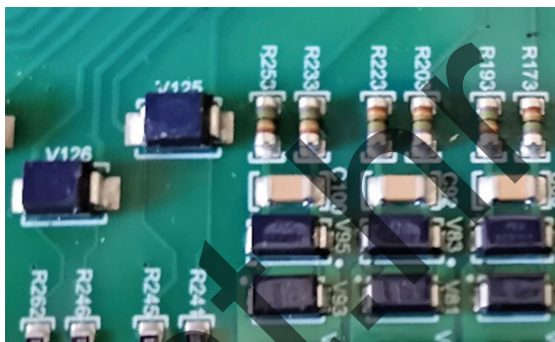
Poluvodičke diode kao elektroničke komponente izrađuju se od monokristala silicija, germanija ili galijeve arsenida. U daljnjem ćemo izlaganju sve analize provesti na silicijskim PN-diodama. Primjenom PN-strukture može se ostvariti više različitih vrsta PN-dioda.

Razni oblici kućišta dioda prikazani su na slici 1.15. Kućište diode može biti stakleno, plastično i metalno, ovisno o vrsti i snazi diode. Dioda se izrađuju i u kućištima za površinsku montažu, slika 1.16 (engl. *surface mount technology* – SMT). U jednom kućištu može biti jedna ili dvije diode. Na svakom se kućištu nalaze oznake koje pobliže označavaju diodu (detaljnije u dodatku).



Slika 1.15.

Razni oblici kućišta dioda



Slika 1.16.

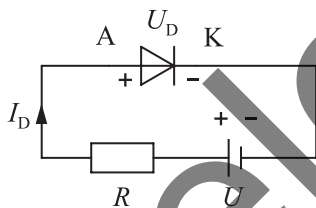
Diode za površinsku montažu na tiskanoj pločici

Primjena poluvodičke diode

Poluvodičke diode upotrebljavaju se kao električke sklopke, primjerice u diodnim logičkim sklopovima, u sklopovima za ispravljanje i za ograničavanje napona.

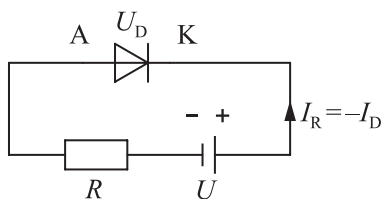
1.2.2. Polarizacija i strujno-naponska karakteristika PN-diode

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



Slika 1.17.

Propusna polarizacija diode



Slika 1.18.

Zaporna polarizacija diode

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

$$I_D = f(U_D).$$

U spoju prema slici 1.17 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 1.18 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.