

Glava 1

Osnove fizike poluprovodnika

U zavisnosti od vrijednosti specifične električne provodnosti σ (ili specifične električne otpornosti ρ), materijali se mogu svrstati u tri grupe: provodnici, poluprovodnici i izolatori. Specifična električna provodnost silicijuma (Si), najčešće korišćenog elementa u poluprovodničkoj industriji, može se mijenjati u opsegu od $5 \cdot 10^{-2}$ do $5 \cdot 10^5 (\Omega\text{cm})^{-1}$, što predstavlja promjenu od sedam redova veličine. Mogućnost promjene provodnosti poluprovodničkih materijala u tako širokom opsegu omogućava projektovanje veoma upotrebljivih elektronskih komponenata.

U Mendeljevom periodnom sistemu elemenata, na lijevoj strani nalaze se provodnici (metali), krajnje desno su izolatori, dok su u središnjem dijelu grupisani poluprovodnici. U tabeli 1.1 prikazan je izvod iz periodnog sistema elemenata sa najčešće korišćenim poluprovodničkim elementima (osjenčena polja).

Tabela 1.1. Dio periodnog sistema elemenata sa naznačenim poluprovodničkim elementima

Perioda	Grupa				
	III	IV	V	VI	VII
Druga	B Bor	C Ugljenik			
Treća	Al Aluminijum	Si Silicijum	P Fosfor	S Sumpor	
Četvrta	Ga Galijum	Ge Germanijum	As Arsen	Se Selen	
Peta	In Indijum	Sn Kalaj	Sb Antimon	Te Telur	J Jod

Osim poluprovodničkih elemenata (datih u tabeli 1.1), za proizvodnju elektronskih kola i sistema koriste se i dvokomponentna i trokomponentna jedinjenja, pri čemu su najviše zastupljena takozvana III/V jedinjenja (jedan element treće i jedan element pete grupe). U tabeli 1.2 navedena su III/V poluprovodnička jedinjenja.

Tabela 1.2. III/V poluprovodnička jedinjenja

III/V jedinjenje	P (fosfor)	As (arsen)	Sb (antimon)
Al (aluminijum)	AlP	AlAs	AlSb
Ga (galijum)	GaP	GaAs	GaSb
In (indijum)	InP	InAs	InSb

1.1. Kristalna struktura poluprovodnika

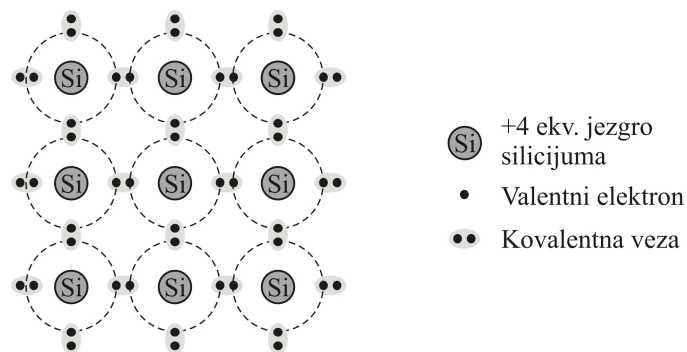
Poluprovodnici koji se danas koriste (i elementarni poluprovodnici i jedinjenja) imaju kristalnu strukturu. Kristalna struktura elementarnih poluprovodnika je dijamantskog tipa (silicijum, germanijum), dok je kristalna struktura poluprovodničkih jedinjenja (GaAs, GaP, AlAs, InSb) uglavnom struktura sfalerita. Sfaleritna struktura je slična dijamantskoj, samo što strukturu čine dva elementa.

U poluprovodničkoj industriji najviše se koristi silicijum, bilo iz ekonomskih, bilo iz tehnoloških razloga. Atomi silicijuma je 14 i nalazi se u četvrtoj grupi periodnog sistema elemenata, što znači da u posljednjoj orbiti, koja je nepopunjena, ima četiri elektrona (valentni elektroni). Atomi silicijuma su, stoga, podložni davanju ili primanju četiri elektrona u cilju postizanja stabilnosti posljednje orbite. Valentni elektroni atoma silicijuma stvaraju kovalentne veze sa valentnim elektronima susjednih atoma silicijuma. Na ovaj način je svaki atom silicijuma vezan sa četiri susjedna atoma silicijuma.

U odnosu na uniformnost kristalne rešetke, mogu se razlikovati monokristalni, polikristalni i amorfni tip silicijuma. Ukoliko je struktura silicijuma (isto važi i za ostale poluprovodnike) pravilna po cijeloj zapremini kristala, onda takav kristal nazivamo monokristalom.

1.2. Nosioci naelektrisanja

Trodimenzijska struktura kristalne rešetke je od značaja za određen broj primjena koje se odnose, uglavnom, na tehnološke koncepte. Međutim, osnovne osobine poluprovodnika mogu se objasniti korišćenjem dvodimenzionalne strukture. U ovoj prezentaciji, samo se valentni elektroni prikazuju posebno, dok se ostali elektroni i jezgro atoma prikazuju pomoću pozitivno naelektrisanog jezgra sa onoliko pozitivnog naelektrisanja koliko ima valentnih elektrona. Dvodimenzionalna struktura kristala silicijuma na temperaturi apsolutne nule ($T = 0$ K) prikazana je na sl. 1.1.



Slika 1.1. Dvodimenzionalna prezentacija kristalne rešetke silicijuma

Na temperaturama većim od apsolutne nule, kovalentne veze su još dovoljno čvrste, pa je mali broj elektrona koji imaju dovoljno energije da raskinu te veze. Čist kristal silicijuma se, u takvim uslovima, ponaša kao izolator (ima veliku vrijednost specifične električne otpornosti). Sa porastom temperature, usljed termičkih vibracija atoma kristalne rešetke, pojedini elektroni iz posljednje ljuske mogu imati dovoljno energije da napuste matični atom i postanu *slobodni elektroni*. Upraznjeno mjesto u valentnoj vezi, na kojem je bio elektron, naziva se *šupljina* (eng. *hole*). U električnom smislu, pod šupljinom ćemo podrazumijevati pozitivno naelektrisanu česticu čija je količina naelektrisanja jednaka apsolutnoj vrijednosti naelektrisanja jednog elektrona.

Atom koga je napustio elektron postaje električno pozitivno naelektrisan (pozitivan jon) i nestabilan (sl. 1.2). Takav jon teži da privuče elektron iz susjedne kovalentne veze kako bi kompletirao svoje četiri kovalentne veze i postao ponovo električno neutralan. Privučeni elektron iz susjednog atoma ostavlja za sobom šupljinu, te novostvoreni pozitivni jon takođe privlači elektrone iz njemu susjednih atoma. Na ovaj način stiče se utisak da se

pozitivno naelektrisanje kreće od atoma do atoma; međutim, elektroni su ti koji se kreću. Za dalje razumijevanje mehanizama transporta nosilaca naelektrisanja, nije neophodno stalno imati na umu prethodno opisano kretanje šupljine – šupljinu možemo smatrati pozitivnim pokretnim naelektrisanjem, ne ulazeći dublje u mehanizam njegovog kretanja.

Na osnovu prethodno rečenog, zaključuje se da u poluprovodnicima postoje dvije vrste slobodnih nosilaca naelektrisanja, elektroni i šupljine. Provodnost poluprovodnika zavisi od broja slobodnih nosilaca naelektrisanja i najčešće se definiše preko koncentracije. *Koncentracija* je broj nosilaca naelektrisanja u jedinici zapremine, pa će koncentracija slobodnih elektrona u daljem tekstu biti označena sa n , a koncentracija šupljina sa p . Ukupna specifična električna provodnost poluprovodnika određena je prisustvom obje vrste nosilaca naelektrisanja:

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p, \quad (1.1)$$

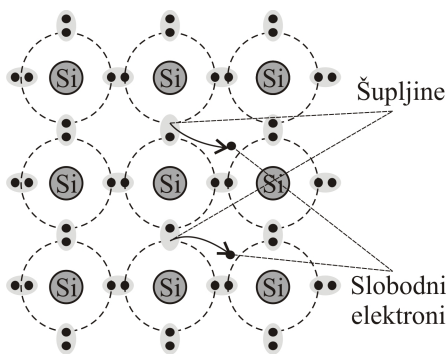
gdje su sa σ_n i σ_p označene specifične električne provodnosti elektrona i šupljina, redom. Ove veličine date su sljedećim izrazima:

$$\sigma_n = qn\mu_n, \quad (1.2)$$

$$\sigma_p = qp\mu_p. \quad (1.3)$$

U prethodnim jednačinama sa q je označena količina naelektrisanja kvanta naelektrisanja ($q \simeq 1.61 \cdot 10^{-19}$ C), koja se često u literaturi označava i sa e , dok su μ_n i μ_p pokretljivosti elektrona i šupljina, redom. Ukupna specifična električna provodnost poluprovodnika je:

$$\sigma = qn\mu_n + qp\mu_p. \quad (1.4)$$



Slika 1.2. Formiranje para elektron-šupljina

1.3. Sopstveni poluprovodnici

Kristal poluprovodnika koji je izgrađen od jednog poluprovodničkog elementa ili jedinjenja naziva se *sopstveni poluprovodnik*. Iako je veoma teško tehnološki dobiti hemijski čistu strukturu, model sopstvenog poluprovodnika koristan je za objašnjavanje osobina poluprovodnika.

U sopstvenom poluprovodniku, koncentracija slobodnih elektrona n jednaka je koncentraciji šupljina p (jer i slobodni elektron i šupljina nastaju raskidanjem kovalentne veze). U sopstvenom poluprovodniku, koncentracija slobodnih elektrona, odnosno šupljina, označava se sa n_i i zove koncentracija sopstvenih nosilaca naelektrisanja:

$$n_i = n = p. \quad (1.5)$$

Koncentracija sopstvenih nosilaca naelektrisanja n_i , kao i pokretljivosti slobodnih elektrona i šupljina μ_n i μ_p , konstante su za određeni poluprovodnik na datoj temperaturi. Njihove vrijednosti za silicijum i galijum-arsenid na sobnoj temperaturi date su u tabeli 1.3.

Tabela 1.3. Koncentracije sopstvenih nosilaca naelektrisanja i pokretljivosti nosilaca naelektrisanja za silicijum i galijum-arsenid na $T = 300$ K

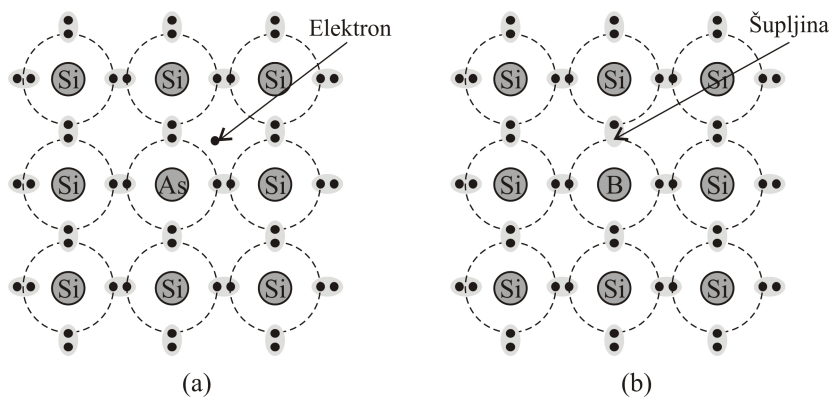
Poluprovodnik	n_i (cm ⁻³)	μ_n (cm ² /(Vs))	μ_p (cm ² /(Vs))
Si	$1.02 \cdot 10^{10}$	1400	470
GaAs	$2.1 \cdot 10^6$	8500	400

1.4. Primjesni poluprovodnici

Koncentracije termički generisanih elektrona i šupljina u sopstvenom silicijumskom poluprovodniku na sobnoj temperaturi nisu dovoljno velike; mnogo veći broj slobodnih nosilaca naelektrisanja može se dobiti ugradnjom odgovarajućeg broja atoma drugih poluprovodnika u silicijum. Taj proces se naziva *dopiranje*, a atomi drugih poluprovodnika koji se ugrađuju u silicijum zovu se *primjese* (primjesni atomi, nečistoće). Dopiranje silicijuma vrši se elementima III ili V grupe periodnog sistema elemenata.

1.4.1. Poluprovodnik n-tipa

Ako primjesni atomi pripadaju V grupi periodnog sistema, onda oni imaju pet valentnih elektrona, od kojih četiri valentna elektrona stvaraju kovalentne veze sa valentnim elektronima susjednih atoma silicijuma. Peti valentni elektron postaje lako slobodan na svim temperaturama koje su od značaja za rad poluprovodničkih komponenata, ostavljajući za sobom pozitivno naelektrisan jon petovalentne primjese (sl. 1.3.a). Ove primjese se nazivaju *donori*, jer silicijumskom poluprovodniku doniraju (eng. *donate*) slobodne elektrone. Njihova koncentracija će u daljem tekstu biti označena sa N_D . Važno je uočiti da se ovim procesom ne stvaraju slobodne šupljine. Poluprovodnik koji je dopiran petovalentnom primjesom je *n-tip poluprovodnika*, jer sadrži značajno veći broj negativnih naelektrisanja (elektrona) u poređenju sa brojem pozitivnih naelektrisanja. Kao petovalentne primjese, za dopiranje silicijuma najčešće se koriste arsen (As) i fosfor (P).



Slika 1.3. Dopiranje silicijuma petovalentnim (a) i trovalentnim (b) primjesama

1.4.2. Poluprovodnik p-tipa

Primjesni atomi koji pripadaju III grupi periodnog sistema elemenata imaju tri valentna elektrona. Ti valentni elektroni stvaraju kovalentne veze sa susjednim atomima silicijuma, pri čemu ostaje jedno upražnjeno mjesto (šupljina) koje bi mogao popuniti elektron kako bi se stvorila nedostajuća četvrta kovalentna veza. Ove primjese nazivaju se *akceptori*, jer one mogu primiti (eng. *accept*) elektrone. Njihova koncentracija će u daljem tekstu biti označena sa N_A . Važno je uočiti da se ovim procesom ne stvaraju slobodni elektroni. Poluprovodnik koji je dopiran trovalentnom primjesom je

p-tip poluprovodnika, jer sadrži značajno veći broj pozitivnih naelektrisanja (šupljina) u poređenju sa brojem negativnih naelektrisanja. Bor (B) se najčešće koristi kao akceptorska primjesa (manje se koriste indijum (In) i aluminijum (Al)).

Koncentracije elektrona i šupljina u poluprovodniku najčešće su vrlo različite. Poluprovodnik n-tipa bogat je elektronima i one su u ovom tipu poluprovodnika *većinski nosioci*, dok šupljina ima relativno malo, te se zovu *manjinski nosioci*.

U poluprovodniku p-tipa, šupljina ima značajno više, pa su one većinski nosioci u ovom tipu poluprovodnika, dok su elektroni manjinski nosioci.

1.5. Transport nosilaca naelektrisanja

U prethodnom poglavlju razmatrani su poluprovodnici u ravnotežnom stanju, kada na njih ne djeluje spoljašnje električno polje i kada je koncentracija nosilaca naelektrisanja uniformna. I u tom slučaju, nosioci se kreću određenom brzinom v_{th} usljed toga što posjeduju kinetičku energiju E_{kth} :

$$E_{kth} = \frac{m_{n,p} v_{th,n,p}^2}{2} = \frac{3}{2} kT, \quad (1.6)$$

odakle je brzina nosilaca naelektrisanja:

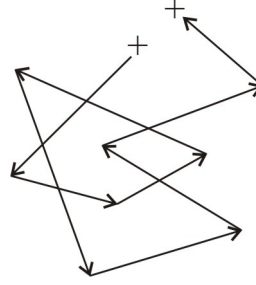
$$v_{th,n,p} = \sqrt{\frac{3kT}{m_{n,p}}}. \quad (1.7)$$

Indeks n odnosi se na elektrone, a indeks p na šupljine.

Kretanje elektrona i šupljina srednjom termičkom brzinom v_{th} je haotično, jer se pravac kretanja mijenja u sudarima ili prilikom rasijavanja na nesavršenostima kristala (sl. 1.4). Vrijeme između dva sudara reda je veličine 0.1 pikosekundi, dok je put koji nosioci pređu između dva sudara reda nekoliko desetaka nanometara. Međutim, usljed haotičnog kretanja, ukupna termička brzina velikog broja nosilaca naelektrisanja u bilo kom trenutku jednaka je nuli (nema doprinosa u pređenom putu nosilaca naelektrisanja). Termičko kretanje nosilaca naelektrisanja ne doprinosi uspostavljanju električne struje u poluprovodniku, ali generiše termički šum.

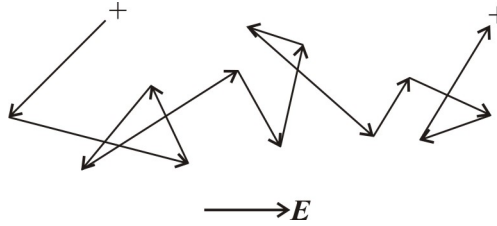
1.5.1. Drift nosilaca naelektrisanja

Driftovsko kretanje nosilaca naelektrisanja nastaje kada se poluprovodnik nađe pod dejstvom spoljašnjeg električnog polja, koje se može predstaviti



Slika 1.4. Termičko kretanje nosilaca naelektrisanja

vektorom jačine električnog polja \mathbf{E} . Usljed Kulonove sile, kretanje šupljina je u smjeru spoljašnjeg električnog polja, dok je kretanje elektrona u suprotnom smjeru. Ovo driftovsko kretanje naelektrisanja superponira se na termičko kretanje (sl. 1.5). Kako postoji doprinos kretanja naelektrisanja u pređenom putu, može se definisati vektor brzine \mathbf{v} , koja se još zove i *driftovska brzina*.



Slika 1.5. Kretanje šupljina usljed spoljašnjeg električnog polja i termičkih vibracija kristalne rešetke

Driftovska brzina nosilaca naelektrisanja zavisi od vektora jačine električnog polja i različita je za elektrone i šupljine:

$$v_n = -\mu_n E, \quad (1.8)$$

$$v_p = \mu_p E, \quad (1.9)$$

gdje su μ_n i μ_p pokretljivosti elektrona i šupljina, redom. Negativni znak u (1.8) posljedica je toga što je drift elektrona suprotan smjeru vektora jačine električnog polja, a ne zbog toga što je elektron negativno naelektrisan.

Usljed driftovskog kretanja nosilaca naelektrisanja, u poluprovodniku se uspostavlja struja, *driftovska struja*, koja se može opisati gustinom struje. Gustina struje šupljina je:

$$J_{p,drift} = qp v_p = qp \mu_p E, \quad (1.10)$$

dok je gustina struje elektrona, sa brzinom v_n iz (1.8):

$$J_{n,drift} = -qn v_n = qn \mu_n E. \quad (1.11)$$

Ukupna gustina driftovske struje jednaka je zbiru gustina struje šupljina i elektrona:

$$J_{drift} = J_{p,drift} + J_{n,drift} = (qp\mu_p + qn\mu_n)E = \sigma E. \quad (1.12)$$

Obično je jedna komponenta gustine struje dominantna (većinskih nosilaca), u zavisnosti od tipa poluprovodnika, jer je odnos koncentracija većinskih i manjinskih nosilaca veliki.

1.5.2. Difuzija nosilaca naelektrisanja

Drugi važan mehanizam kretanja nosilaca naelektrisanja u poluprovodnicima je *difuzija*, a struja koja je posljedica difuzionog kretanja zove se *difuzionu struja*. Difuzija, kao proces, u provodnicima nema značaja zbog velike električne provodnosti provodnika. Međutim, zbog male provodnosti i mogućnosti formiranja neravnomjernih raspodjela nosilaca naelektrisanja, difuzija je za poluprovodnike veoma važan proces.

Ako se u poluprovodnik na neki način ubacuju nosioci naelektrisanja (injekcija nosilaca naelektrisanja), kao što je prilazano na sl. 1.6.a, formira se neravnomjerna raspodjela naelektrisanja. Čak i u odsustvu spoljašnjeg električnog polja, nosioci naelektrisanja se kreću sa mjesta injekcije (veća koncentracija) kroz zapreminu poluprovodnika (manja koncentracija). Na ovaj način uspostavlja se difuzionu struja, koja postoji sve dok postoji i neravnomjerna raspodjela nosilaca naelektrisanja.

Poznato je da je brzina kretanja čestica u procesu difuzije (tj. nosilaca naelektrisanja u poluprovodnicima) proporcionalna gradijentu njihove koncentracije. Ukoliko su u poluprovodniku neravnomjerne raspodjele elektrona i šupljina, uspostavlja se difuzione struje elektrona i šupljina, čije su gustine redom:

$$J_{n,diff} = qD_n \frac{dn}{dx}, \quad (1.13)$$

$$J_{p,diff} = -qD_p \frac{dp}{dx}, \quad (1.14)$$

gdje su D_n i D_p difuzione konstante elektrona i šupljina (opisuju sposobnost čestice da difunduje). U sopstvenom silicijumskom poluprovodniku, ove konstante su približno: $D_n = 34 \text{ cm}^2/\text{s}$ i $D_p = 12 \text{ cm}^2/\text{s}$. Na sl. 1.6.b prikazani

su smjerovi kretanja nosilaca naelektrisanja za datu raspodjelu i smjerovi odgovarajućih difuzionih struja.

Ukupna gustina difuzione struje u poluprovodniku u kojem postoji neravnomjerna raspodjela obje vrste nosilaca naelektrisanja je:

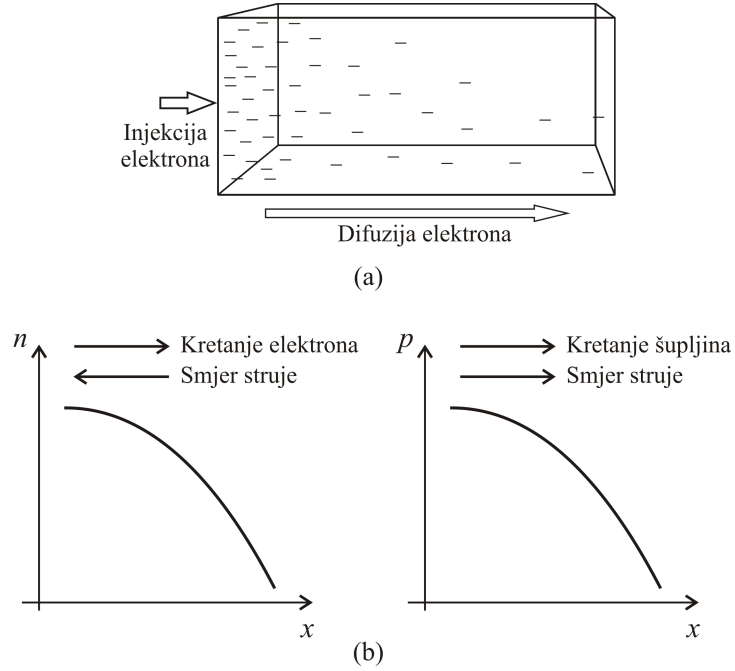
$$J_{diff} = J_{n,diff} + J_{p,diff} = qD_n \frac{dn}{dx} - qD_p \frac{dp}{dx}. \quad (1.15)$$

Uspostavljanju struje u poluprovodniku, dakle, doprinose transportni procesi, drift i difuzija. Ukupna gustina struje, koja je u vezi sa transportnim kretanjem elektrona, je:

$$J_n = J_{n,drift} + J_{n,diff} = qn\mu_n E + qD_n \frac{dn}{dx}, \quad (1.16)$$

dok je gustina struje usljed transporta šupljina:

$$J_p = J_{p,drift} + J_{p,diff} = qp\mu_p E - qD_p \frac{dp}{dx}, \quad (1.17)$$



Slika 1.6. Difuzija u poluprovodniku (a) i primjer raspodjele elektrona i šupljina duž poluprovodnika sa odgovarajućim smjerovima njihovog kretanja i struja (b)

pa je ukupna gustina struje u poluprovodniku:

$$J = J_n + J_p. \quad (1.18)$$

1.6. PN spoj

Kod poluprovodnika smo vidjeli da se dopiranjem dobija veliki broj slobodnih elektrona ili šupljina, u zavisnosti od vrste primjesa kojom je poluprovodnik dopiran. Posebno interesantna struktura u elektronici je ukoliko se silicijumski poluprovodnik, određenim tehnološkim postupcima, dopira tako da se u jedan dio ubacuju trovalentne primjese, a u drugi dio petovalentne primjese. Struktura koja nastaje na ovaj način zove se *PN spoj*. PN spoj se tehnološki može formirati implantacijom ili difuzijom akceptorskih primjesa u n-tip supstrata, odnosno donorskih primjesa u p-tip supstrata. Ovako formirana struktura osnovni je element velikog broja standardnih poluprovodničkih komponenata, a koristi se i za realizaciju optoelektronskih i mikrotalasnih komponenata. Ukoliko se spoljašnji izvodi primijene direktno sa jedne i druge strane PN spoja, dobija se komponenta koja se zove dioda. U ovom poglavlju biće razmatrane osobine PN spoja u ravnotežnom stanju, kao i u uslovima inverzne i direktne polarizacije.

1.6.1. Ravnotežno stanje

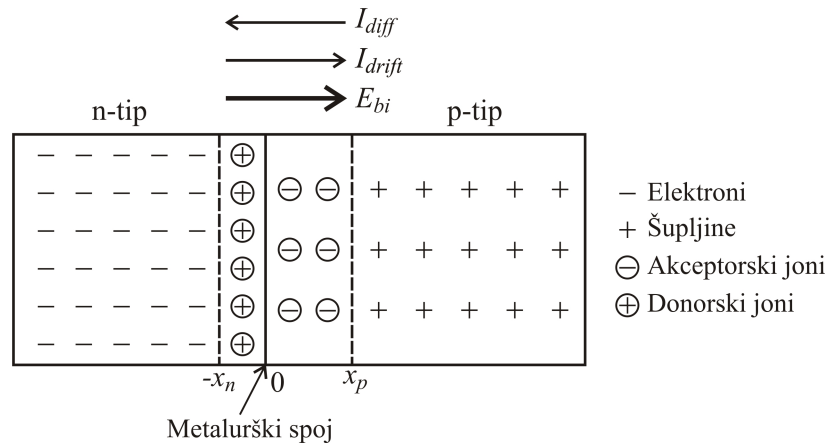
Posmatraćemo PN strukturu sa sl. 1.7 sa otvorenim priključcima, odnosno u odsustvu polarizacije. U takvim uslovima, kažemo da je PN spoj u ravnoteži. Iako takva nepolarisana struktura nema praktičnog značaja, poslužiće za razumijevanje pojava koje se dešavaju kada se na priključke dovede odgovarajuća polarizacija.

Granica razdvajanja oblasti poluprovodnika n-tipa i p-tipa naziva se *fizički* ili *metalurški spoj*. Sa jedne strane spoja je poluprovodnik p-tipa, u kojem su većinski nosioci naelektrisanja šupljine (p_p), dok je sa druge strane spoja poluprovodnik n-tipa sa elektronima kao većinskim nosiocima naelektrisanja (n_n). Takođe, u poluprovodnicima postoje i manjinski nosioci naelektrisanja, elektroni u p-tipu (n_p) i šupljine u n-tipu poluprovodnika (p_n). Njihove koncentracije značajno su manje u odnosu na koncentracije većinskih nosilaca naelektrisanja.

Usljed različitih koncentracija šupljina sa jedne i druge strane spoja, nastaje njihova difuzija sa mjesta veće koncentracije ka mjestu manje koncentracije kroz PN spoj, od p-oblasti ka n-oblasti spoja. U p-oblasti spoja

ostaće nekompenzovani negativni akceptorski joni. Šupljine, koje su u poluprovodniku n-tipa manjinski nosioci naelektrisanja, rekombinovaće se sa većinskim slobodnim elektronima. Takođe, elektroni difunduju kroz PN spoj od n-oblasti ka p-oblasti spoja, ostavljajući za sobom nekompenzovane pozitivne donorske jone. Elektroni, koji pređu u p-tip poluprovodnika, u njemu su manjinski nosioci naelektrisanja i rekombinuju se sa većinskim šupljinama. Ovo difuziono kretanje nosilaca naelektrisanja, i elektrona i šupljina, uspostavlja difuzionu struju. Stoga, uz sam spoj, i sa jedne i sa druge strane, neće biti slobodnih nosilaca naelektrisanja (elektrona i šupljina), već isključivo pozitivnih (u n-oblasti) i negativnih (u p-oblasti) jona. Ova oblast zove se *osiromašena oblast* (eng. *depletion region*), jer je *osiromašena* slobodnim naelektrisanjima. Za osiromašenu oblast mora važiti jednačina elektroneutralnosti, odnosno broj šupljina koje za sobom ostavljaju akceptorske jone mora biti jednak broju elektrona koji za sobom ostavljaju donorske jone.

U osiromašenoj oblasti postoje samo nepokretni joni, pa se ona još naziva i oblast prostornog naelektrisanja (eng. *space charge region*). S obzirom na to da su pozitivni i negativni joni prostorno razdvojeni, u oblasti osiromašenja se pojavljuje električno polje E_{bi} , sa smjerom od pozitivnih ka negativnim jonima (kao na sl. 1.7), koje se naziva *ugrađeno polje*. Smjer električnog polja je takav da se suprotstavlja difuziji većinskih šupljina iz p-oblasti ka n-oblasti i elektrona iz n-oblasti ka p-oblasti spoja, a potpomaže transport manjinskih nosilaca naelektrisanja kroz spoj (šupljina iz n-oblasti u p-oblast i elektrona iz p-oblasti u n-oblast). Duž osiromašene oblasti pojavljuje se i potencijalna razlika, odnosno ugrađeni potencijal PN spoja V_{bi} (eng. *built-in*



Slika 1.7. PN spoj u ravnotežnom stanju

potential). Ovaj ugrađeni potencijal ima ulogu barijere koju većinski nosioci naelektrisanja moraju da savladaju kako bi difundovali iz oblasti veće koncentracije u oblast manje koncentracije. Što je veća vrijednost ugrađenog potencijala, to je manji broj nosilaca naelektrisanja koji mogu da savladaju tu barijeru.

Ravnotežno stanje PN spoja nastaje kad ugrađeno električno polje postane dovoljno veliko da potpuno zaustavi dalju difuziju nosilaca, odnosno kad driftovska struja, koja je posljedica ugrađenog električnog polja, dostigne vrijednost difuzione struje:

$$|J_{n,drift}| = |J_{n,diff}|, \quad (1.19)$$

$$|J_{p,drift}| = |J_{p,diff}|. \quad (1.20)$$

Ugrađeni potencijal PN spoja je:

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \frac{p_p}{p_n} = V_t \ln \frac{p_p}{p_n}, \quad (1.21)$$

gdje je $V_t = kT/q$ termički potencijal (na sobnoj temperaturi $T = 300$ K, $V_t \approx 25$ mV).

Ako se pretpostavi da su na sobnoj temperaturi sve primjese jonizovane, onda je koncentracija šupljina u p-tipu poluprovodnika p_p približno jednaka koncentraciji akceptorskih primjesa N_A , dok je koncentracija elektrona u n-tipu poluprovodnika jednaka koncentraciji donorskih primjesa N_D :

$$p_p \approx N_A, \quad (1.22)$$

$$n_n \approx N_D. \quad (1.23)$$

Koncentracija manjinskih elektrona u p-tipu poluprovodnika je:

$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p} = \frac{n_i^2}{N_A}, \quad (1.24)$$

dok je koncentracija manjinskih šupljina u n-tipu poluprovodnika:

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n} = \frac{n_i^2}{N_D}. \quad (1.25)$$

Zamjenom (1.22) i (1.23) u (1.21), dobija se konačni izraz za ugrađeni potencijal PN spoja:

$$V_{bi} = V_t \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}. \quad (1.26)$$

Uobičajene vrijednosti ugrađenog potencijala PN spoja za silicijum na sobnoj temperaturi su u opsegu od 0.6 do 0.9 V.

Širina osiromašene oblasti

Ukoliko se koncentracije akceptorskih i donorskih primjesa u PN strukturi razlikuju, širenje osiromašene oblasti u p-tip i n-tip poluprovodnika neće biti jednako. Neka je ukupna količina negativnih naelektrisanja u osiromašenoj oblasti označena sa Q_- , a ukupna količina pozitivnih naelektrisanja sa Q_+ :

$$|Q_-| = qN_A A x_p, \quad (1.27)$$

$$|Q_+| = qN_D A x_n, \quad (1.28)$$

gdje je sa A označena površina PN spoja. Iz jednačine elektroneutralnosti:

$$|Q_-| = |Q_+| \Rightarrow qN_A A x_p = qN_D A x_n, \quad (1.29)$$

slijedi da je:

$$x_n N_D = x_p N_A. \quad (1.30)$$

Osiromašena oblast širi se više u oblast PN spoja sa manjom koncentracijom primjesa. Ako je, na primjer, $N_D > N_A$, osiromašena oblast će se više širiti u p-oblast PN spoja.

Ukupna širina osiromašene oblasti je:

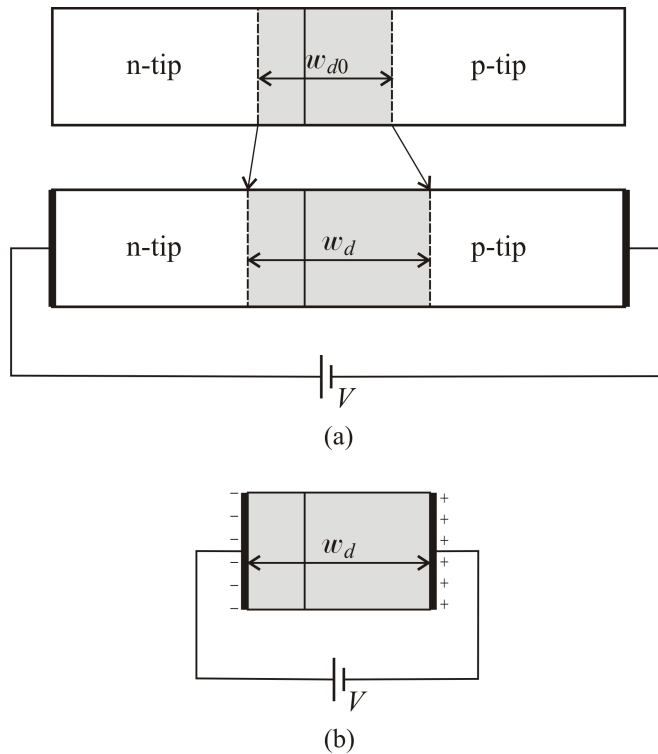
$$w_{d0} = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_{Si}}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) V_{bi}}, \quad (1.31)$$

gdje je ϵ_0 dielektrična konstanta vakuuma ($\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-14}$ F/cm), a ϵ_{Si} je relativna dielektrična konstanta silicijuma ($\epsilon_{Si} = 11.7$). Uobičajene vrijednosti za širinu osiromašene oblasti kreću se u opsegu od 0.1 do 1 μm .

1.6.2. Inverzna polarizacija

Pod polarizacijom se podrazumijeva obezbjeđivanje uslova da komponenta ili kolo rade u željenom radnom režimu, što se postiže primjenom odgovarajućeg napona.

Pod inverznom polarizacijom PN spoja podrazumijeva se takva spoljašnja polarizacija kod koje je n-tip poluprovodnika na većem potencijalu u odnosu na p-tip poluprovodnika (sl. 1.8.a). U praktičnom slučaju to znači da se pozitivan priključak izvora elektromotorne sile povezuje na spoljašnji



Slika 1.8. Inverzno polarisan PN spoj (a) i PN spoj kao kondenzator (b)

izvod PN spoja koji kontaktira n-tip poluprovodnika, a negativni priključak na spoljašnji izvod PN spoja koji kontaktira p-tip poluprovodnika.

Kod inverzne polarizacije, spoljašnji napon uzrokuje pojavu električnog polja koje je istog smjera kao i ugrađeno električno polje, što znači da se ukupno električno polje na spoju povećava. Veće električno polje zahtijeva i veću koncentraciju prostornih naelektrisanja, pa dolazi do širenja osiromašene oblasti. S obzirom na to da je spoljašnjom polarizacijom povećana barijera, difuzioni transport nosilaca naelektrisanja je skoro u potpunosti onemogućen. Drugim riječima, može se smatrati da kroz inverzno polarisan PN spoj nema difuzione struje. Smjer električnog polja je takav da potpomaže driftovsko kretanje manjinskih nosilaca naelektrisanja, ali je njihova koncentracija mala, pa će i odgovarajuća driftovska struja biti mala.

Dakle, u PN strukturi koja je inverzno polarisana proširena je osiromašena oblast tako da postoji vrlo mala struja koja je jednaka driftovskoj

komponenti struje manjinskih nosilaca naelektrisanja:

$$I = -I_{drift} = -I_S, \quad (1.32)$$

gdje je sa I_S označena inverzna struja zasićenja (ili struja curenja) PN spoja koja može biti reda veličine i do nA.

Pri inverznoj polarizaciji, PN spoj se odlikuje širom osiromašenom oblašću. Širina te oblasti mijenja se sa promjenom spoljašnjeg napona. Ako PN spoj posmatramo u malo drugačijem kontekstu, gdje osiromašena oblast ima osobine dielektrika, onda se može reći da PN spoj ima kapacitivne osobine (sl. 1.8.b), odnosno da se ponaša kao kondenzator. Po analogiji sa pločastim kondenzatorom, kapacitivnost inverzno polarisanog PN spoja po jedinici površine za nultu polarizaciju može se odrediti iz sljedećeg izraza:

$$C_{j0} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{Si}}{w_{d0}} = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_{Si} q}{2} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \frac{1}{V_{bi}}}, \quad (1.33)$$

gdje je debljina dielektrika zapravo širina osiromašene oblasti w_{d0} (1.31). Kako se sa inverznom polarizacijom povećava barijera na samom spoju (uvećava se ukupni potencijal spoja), to će se povećati i širina osiromašene oblasti:

$$w_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_{Si}}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_{bi} - V_R)}, \quad (1.34)$$

gdje je V_R napon inverzne polarizacije (indeks R je od engleske riječi *reverse*) i uzima se sa negativnim algebarskim predznakom. Zamjenom (1.34) u (1.33) u slučaju inverzno polarisanog spoja dobija se izraz za kapacitivnost spoja po jedinici površine:

$$C_j = \frac{C_{j0}}{\sqrt{1 - \frac{V_R}{V_{bi}}}}. \quad (1.35)$$

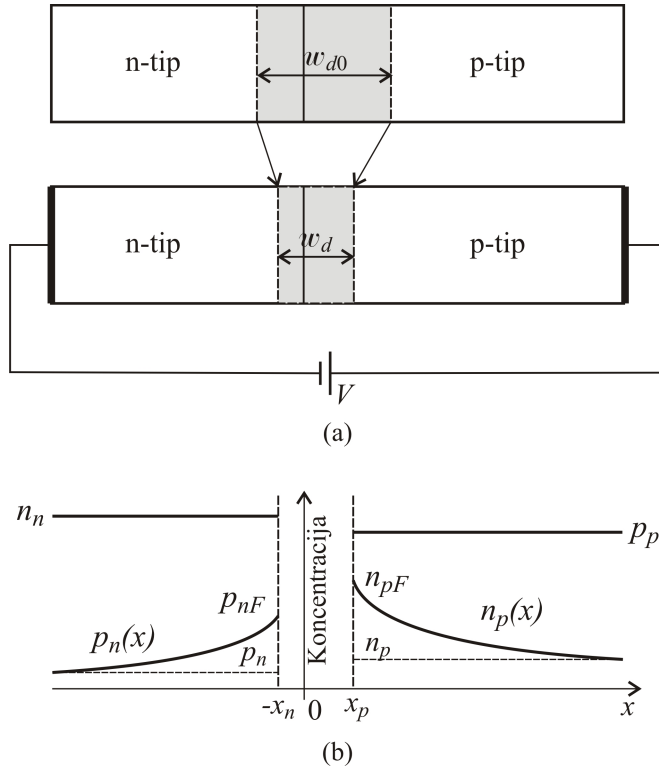
U opštem slučaju, kapacitivnost PN spoja po jedinici površine zavisi od oblika profila primjesa spoja, pa se može odrediti na osnovu:

$$C_j = \frac{C_{j0}}{\sqrt[m]{1 - \frac{V_R}{V_{bi}}}}, \quad (1.36)$$

gdje je m parametar spoja i može imati vrijednosti $2 \leq m \leq 3$.

1.6.3. Direktna polarizacija

Pod direktnom polarizacijom PN spoja podrazumijeva se takva spoljašnja polarizacija kod koje je p-tip poluprovodnika na većem potencijalu u odnosu na n-tip poluprovodnika (sl. 1.9.a). U praktičnom slučaju to znači da se pozitivan priključak izvora elektromotorne sile primjenjuje na spoljašnji izvod PN spoja koji kontaktira p-tip poluprovodnika, a negativni priključak na spoljašnji izvod PN spoja koji kontaktira n-tip poluprovodnika.



Slika 1.9. Direktno polarisan PN spoj (a) i raspodjela naelektrisanja (b)

Spoljašnja direktna polarizacija stvara električno polje koje je suprotnog smjera u odnosu na ugrađeno polje, čime se smanjuje potencijalna barijera za difuziju nosilaca naelektrisanja.

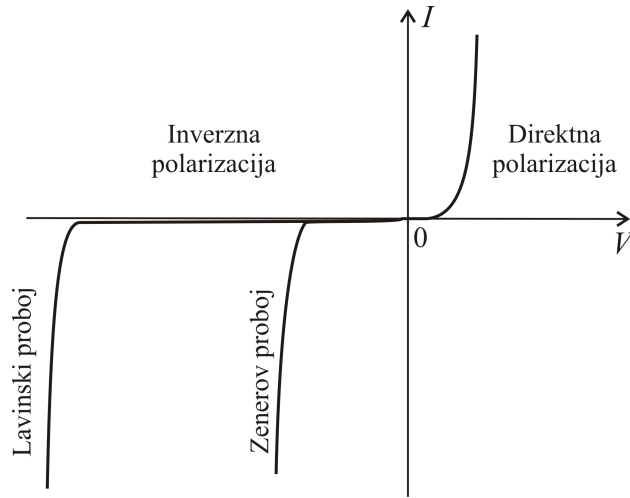
Ukupna struja pri direktnoj polarizaciji je:

$$I = I_{diff} + I_{drift} = I_S \left(e^{\frac{V_F}{V_t}} - 1 \right), \quad (1.37)$$

gdje je I_S inverzna struja zasićenja.

1.6.4. Proboj PN spoja

Vidjeli smo da, u slučaju inverzne polarizacije, kroz PN strukturu postoji vrlo mala struja, jednaka inverznoj struji zasićenja I_S (1.32). Međutim, povećavanjem inverznog napona polarizacije V_R (a samim tim i električnog polja), pri određenoj polarizaciji kroz strukturu se može pojaviti velika inverzna struja zasićenja I_S , kao što je prikazano na sl. 1.10. Kažemo da je tada nastupio *proboj*.



Slika 1.10. Strujno-naponska karakteristika PN spoja

Do proboja kod PN spoja može doći zbog dva efekta, Zenerovog i efekta lavine, te razlikujemo Zenerov proboj i lavinski proboj.

Zenerov proboj

Električno polje, koje nastaje usljed inverzne polarizacije, može da dostigne vrijednosti koje su neophodne za raskidanje kovalentnih veza u kristalnoj strukturi provodnika i generisanja parova elektron-šupljina. Generisani elektroni kreću se ka n-oblasti spoja, a šupljine ka p-oblasti spoja, naglo povećavajući inverznu struju kroz spoj. Ova pojava nastaje pri vrijednostima električnog polja koja su reda veličine 10^6 V/cm.

Zenerov proboj (eng. *Zener breakdown*) javlja se kod PN spojeva sa užom osiromašenom oblašću. Kako širina osiromašene oblasti, na osnovu (1.31), inverzno proporcionalno zavisi od koncentracije primjesa, to se Zenerov proboj dešava za PN spojeve sa većim nivoima dopiranja, sa inverznim naponom polarizacije V_R uobičajeno u opsegu od -3 V do -8 V.

Lavinski proboj

Za PN strukturu sa nižim nivoima dopiranja pri inverznoj polarizaciji ne dešava se Zenerov, već lavinski proboj (eng. *avalanche breakdown*). Bez obzira na to što je inverzna struja zasićenja mala, svi nosioci koji prolaze prilikom transporta kroz osiromašenu oblast izloženi su dejstvu električnog polja, koje se povećava sa povećanjem inverznog napona polarizacije. Povećava se kinetička energija nosilaca naelektrisanja, pa u sudarima sa atomima kristalne rešetke, oni imaju dovoljno energije da raskinu kovalentne veze i generišu dodatne slobodne elektrone. Efekat se naziva još i udarna jonizacija, jer se svaki oslobođeni elektron kreće pod dejstvom jakog električnog polja, te i sam može u sudarima osloboditi dodatne elektrone, čime naglo raste broj slobodnih nosilaca naelektrisanja, a samim tim i struja PN spoja. Naziv *lavinski proboj* potiče od toga što se koncentracija slobodnih nosilaca naelektrisanja lavinski umnožava.

Spoljašnji inverzni napon polarizacije pri kojem dolazi do proboja, bez obzira na mehanizam, zove se probojni napon i označava sa V_B (eng. *break-down voltage*). Proboj može nastati i kao kombinacija ova dva efekta.

Interesantno je da temperaturni koeficijent probojnog napona usljed Zenerovog efekta može da bude pozitivan i negativan, a da je usljed lavinskog efekta pozitivan. Prilikom probojnih napona $|V_B| \simeq 3.5$ V, temperaturni koeficijent je oko nula, pa se Zenerova dioda sa ovim probojnim naponom primjenjuje kao izvor referentnog napona.

Proboji, bilo Zenerov ili lavinski, ne moraju biti destruktivni, što zavisi od vrste spoja i maksimalne dozvoljene inverzne struje. To su podaci koje proizvođači specificiraju.