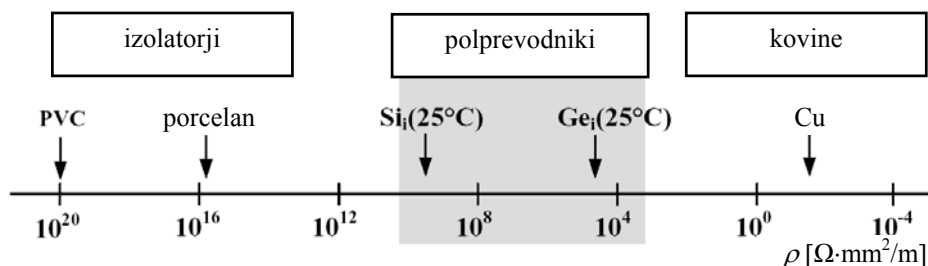


## Uvod v fiziko polprevodniških materialov

Polprevodniške materiale uvrščamo po električnih lastnostih, t.j. specifični električni upornosti, vmes med kovine in izolatorje (slika 1). Pri tem ponovimo, da je specifična električna upornost nekega materiala pravzaprav merilo njegovega upiranja prehodu električnega toka, t.j. transportu prostih nosilcev elektrine skozi material.



Slika 1: Umestitev polprevodniških materialov s stališča električne upornosti

Za primerjavo omenimo, da znaša upornost 1 m dolge palice s presekom  $1 \text{ mm}^2$ , ki je izdelana iz:

- bakra:  $17,5 \cdot 10^{-3} \Omega$
- čistega silicija:  $2,1 \cdot 10^9 \Omega$
- PVC:  $10^{20} \Omega$ .

Vzrok tako velikim razlikam je v atomski zgradbi materiala.

### Zgradba atoma

Vsi atomi sestojijo iz elementarnih delcev: elektronov, protonov in nevtronov.

Elektroni in protoni imajo električni naboj

- Elektron:  $e_- = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$  (negativni naboj)
- Proton:  $e_+ = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$  (pozitivni naboj),

medtem ko nevtroni električnega naboja nimajo.

Velja tudi, da je število protonov enako številu elektronov, kar pomeni, da so vsi atomi navzven električno nevtralni (naboja se kompenzirata).

### Bohrov model atoma

Notranja zgradba atoma se najpogosteje ponazori z modeli, med katerimi je najbolj pogost Bohrov (slika 2). Pri njem so vsi protoni in nevtroni skoncentrirani v jedru atoma, elektroni pa jedro obkrožajo na različni oddaljenosti. Oddaljenost ustreza energijskemu nivoju elektronov, pri čemer ne smemo prezreti kvantne fizike, ki nas uči, da lahko elektroni posedujejo zgolj določene energijske nivoje. Slednje ponazorimo z elektronskimi lupinami določenega premera. Število elektronov na posamezni lupini je omejeno na  $N_{\text{max}} = 2n^2$ , kjer je  $n$  zaporedna številka lupine, če štejemo le-te od znotraj navzven. Velja tudi pravilo, da število elektronov na zunanji lupini – t.i. valenčni elektroni, nikoli ne presega števila 8. Lupine označujemo z velikimi črkami K, L, M...Q.

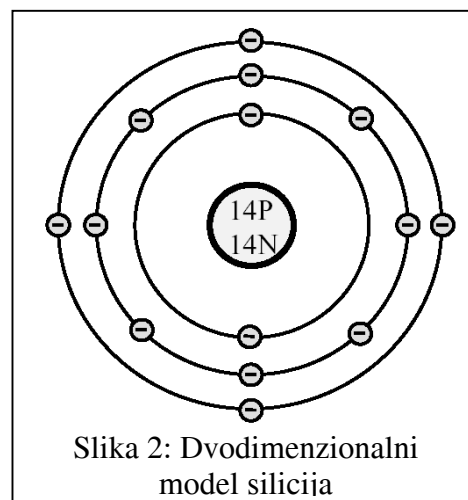


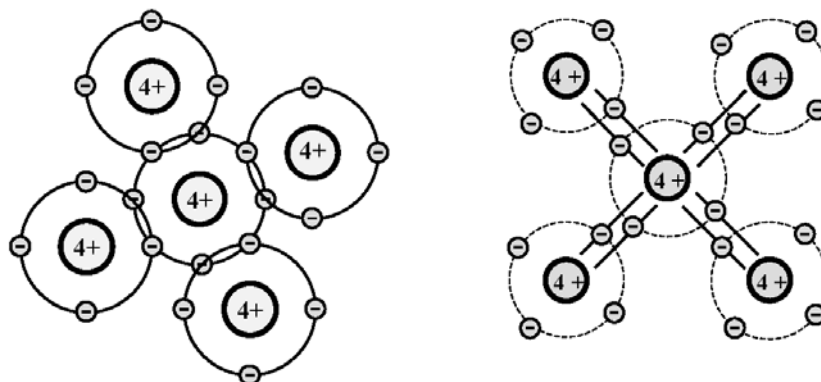
Tabela 1: Oznake elektronskih lupin

lupina	K	L	M	N	O	P	Q	
n	1	2	3	4	5	6	7	
$N_{max}$	2	8	18	32	(50)	(72)	(98)	na notranjih lupinah
$N_{max}$	2	8	8	8	8	8	8	na zunanji lupini (konfiguracija žlahtnih plinov)

Elektroni vedno zapolnijo najprej lupine, ki so bližje jedru, nato pa še ostale, saj tako kot vse snovi v naravi tudi atom teži k stanju z najmanjšo notranjo energijo.

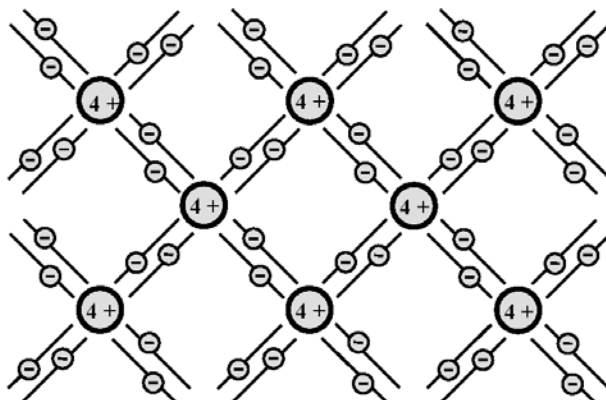
### Kemijska - kovalentna vez

V množici atomov istega kemijskega elementa nastopijo med njimi različne kemijske vezi, med katerimi je najpogostejša kovalenta. Pri kovalentni vezi sodelujejo valenčni elektroni sosednjih atomov, ki le-te povežejo v večjo strukturo kot sta na primer kristal ali molekula. Zgled kovalentne vezi – tvorjenje valenčnega para elektronov – si oglejmo na primeru silicijevega atoma, ki ima štiri valenčne elektrone (slika 3). Ti elektroni lahko pritegnejo štiri sosednje atome, ki tvorijo s prvimi štiri kovalentne vezi.



Slika 3: Dve različni ponazoritvi kovalentne vezi silicijevih atomov

Zunanji atomi lahko prek svojih preostalih treh valenčnih elektronov pritegnejo dodatne atome silicija s čimer se gradi kristalna struktura (slika 4).



Slika 4: Dvodimenzionalna ponazoritev kristalne strukture Si

## Mehanizem prevajanja električnega toka v polprevodnikih

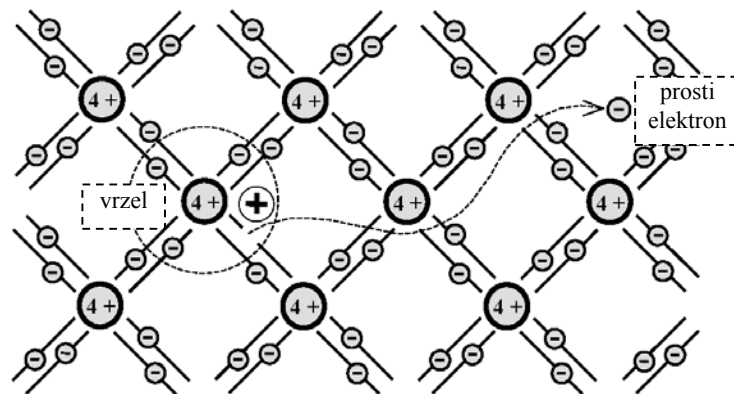
Razlikujemo med mehanizmom prevajanja električnega toka v čistem ter v dopiranem (s primesmi) polprevodniškem materialu.

### Mehanizem prevajanja električnega toka v čistem polprevodniškem materialu

Prevodnost polprevodniškega materiala se zelo razlikuje glede na temperaturo kristala.

Pri  $T = 0^\circ\text{K}$  vsi valenčni elektroni tvorijo kovalentne vezi, zaradi česar v kristalni strukturi ni gibljivih nosilcev elektrine. Od tu sledi, da se čisti polprevodnik pri  $T = 0^\circ\text{K}$  obnaša kot izolator.

Z naraščanjem temperature (povečevanjem notranje energije) se atomom in elektronom v kovalentnih vezeh dodaja energija, ki lahko preseže pragovno vrednost (0,7 eV za Ge; 1,1 eV za Si) energije, ki veže elektrone v kovalentno vez. Ko elektron "zapusti" kovalentno vez, ostane na njegovem mestu presežek pozitivnega naboja, ki ga označujemo kot vrzel.



Slika 5: Nastanek para elektron-vrzel

Omenjeni pojav označujemo kot *nastanek para elektron-vrzel*. V čistih polprevodnikih velja, da sta koncentraciji vrzeli in elektronov na prostorninsko enoto enaki a odvisni od temperature (dovedene energije; lahko tudi z osvetlitvijo).

Obraten pojav od generiranja para elektron-vrzel je *rekombinacija*. Nastopi tedaj, ko izpraznjeno mesto – vrzel zapolni prostorsko gibljivi elektron. Če je tudi ta nastal z generacijo para elektron-vrzel, se mesto vrzeli "navidezno" premakne iz enega na drugo mesto v kristalni strukturi. Zaradi tega pogosto tudi vrzel prištevamo med prosto gibljive nosilce, čeprav se le-ta seli po kristalni strukturi zaradi generiranja in rekombinacij.

Pri temperaturi  $T = 300^\circ\text{K}$  nastane zaradi generacije para elektron vrzel naslednja koncentracija prostih nosilcev naboja na enoto volumna (i-intrinsic: čisti):

- Si:  $n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
- Ge:  $n_i = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$

Slednje je v primerjavi s koncentracijo prostih elektronov ( $n \geq 5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ ) v kovinah zanemarljivo.

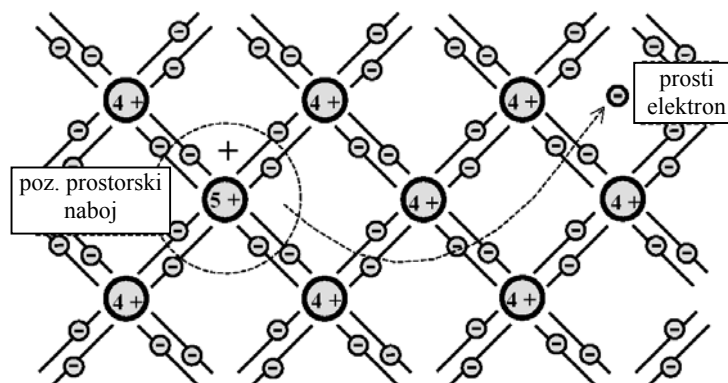
## Mehanizem prevajanja električnega toka v polprevodniškem materialu s primesmi

Koncentracijo prostih nosilcev naboja povečujemo s primesmi tro- in pet-valentnih atomov, t.j. z dopiranjem čistega polprevodniškega materiala.

### Dopiranje s petvalentnimi atomi

V primeru, da siliciju dodamo petvalentni arzen (slika 6), tvorijo štirje njegovi elektroni štiri kovalentne vezi s sosednjimi silicijevimi atomi, medtem ko en elektron ostane nevezan, je prosti elektron. Da se omenjeni elektron osvobodi "svojega" atoma zadošča že zelo majhna energija (10 meV za Ge; 50 meV za Si), ki jo zlahka dosežemo že pri sobni temperaturi. Podobno kot pri generiranju para elektron-vrzel tudi sedaj nastane v bližini atoma-donorja pozitivni presežek naboja, ki je prostorsko vezan. Le da v tem primeru pozitiven prostorski naboj (ion) ne sodeluje pri transportu prostih nosilcev naboja! Velja torej, da so pri sobni temperaturi vsi atomi donorjev ionizirani.

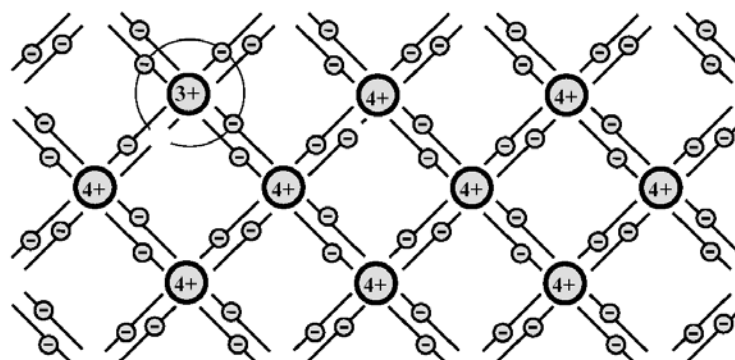
Polprevodnik s presežkom prostih elektronov imenujemo n-tip in je navzven električno nevtralen.



Slika 6: Nastanek presežnega elektrona z dodajanjem donorskih atomov

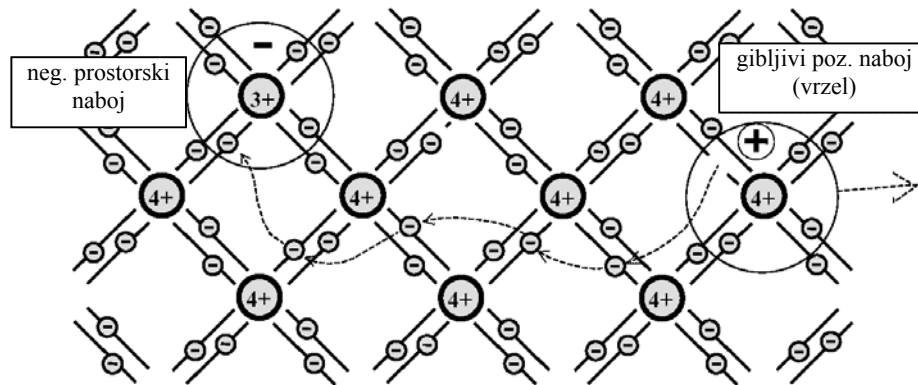
### Dopiranje s trovalentnimi atomi

Če siliciju dodamo trovalentni atom (slika 7), kot je bor B, tvorijo trije valentni elektroni bora s sosednjimi silicijevimi atomi tri kovalentne vezi, medtem ko za četrto kovalentno vez manjka en elektron.



Slika 7: Nepopolna kovalentna vez pri "vgradnji" trovalentnega atoma

Ker pa so kovalentne vezi sosednjih atomov enakovredne, lahko manjkajoči elektron “priskoči” v manjkajočo kovalentno vez pri trovalentnem atomu (slika 8), s čimer pa se na mestu od koder je prispel manjkajoči elektron zopet pojavi presežek pozitivnega naboja – vrzel (prosti, pozitiven nosilec elektrine). Medtem atom, ki prejme prosti elektron (imenujemo ga tudi akceptor), privzame negativen, prostorsko vezan (negibljiv) električen naboj. Tudi ionizacija akceptorskih atomov poteka pri zelo majhnih energijah (10 meV za Ge; 50 meV za Si), ki jih zlahka presežemo pri sobni temperaturi.

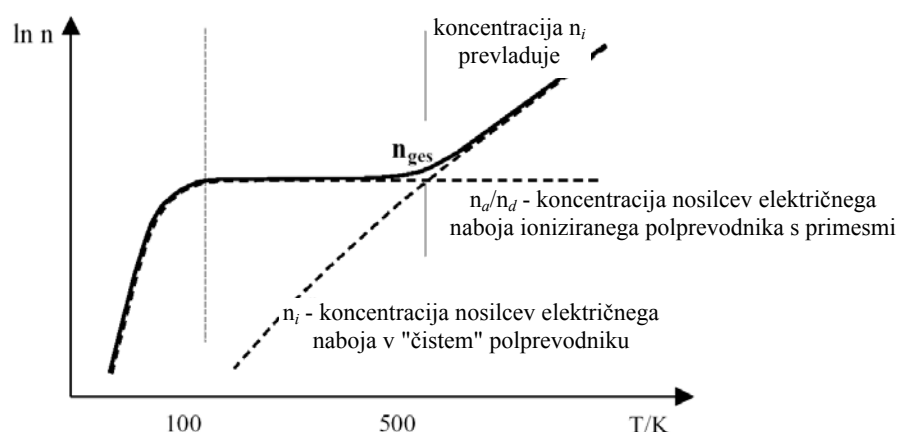


Slika 8: Nastanek presežne vrzeli z dodajanjem akceptorskih atomov

Zaradi presežka vrzeli imenujemo novo nastali kristal p-tip polprevodnika. Pravimo tudi, da so vrzeli večinski nosilci naboja v p-tipu.

### Koncentracija prostih nosilcev naboja v dopiranih polprevodnikih

V dopiranih polprevodnikih sodelujejo pri transportu prostih nosilcev naboja tako nosilci, katerih koncentracija je merodajna koncentraciji v čistem polprevodniku  $n_i$ , kot koncentracija nosilcev, ki jih lahko uravnavamo s stopnjo dopiranja, t.j. s številom dodanih atomov primesi. Ker sta obe koncentraciji temperaturno odvisni, v praksi koncentracija dodanih primesi prevladuje nad koncentracijo prostih nosilcev v čistem polprevodniku.



Slika 9: Potek temperaturne odvisnosti koncentracije prostih nosilcev naboja

Temu je vzrok izrazita temperaturna odvisnost koncentracije prostih nosilcev, ki jo kaže slika 9. Koncentracija prostih nosilcev je sestavljena iz koncentracije  $n_i$  in iz koncentracije dodanih atomov primesi  $n_d/n_d$ .

Razvidna so tri temperaturna območja:

- Območje zelo nizkih temperatur ( $T < 100^\circ\text{K}$ ), kjer še ni dosežena ionizacija vseh atomov primesi.
- Vmesno temperaturno območje ( $100^\circ\text{K} < T < 500^\circ\text{K}$ ), kjer je ionizacija atomov primesi popolna ter kjer je z njo povzročena koncentracija  $n_d/n_d$  mnogo večja od  $n_i$ .
- Območje visokih temperatur ( $T > 500^\circ\text{K}$ ), kjer začne prevladovati koncentracija nosilcev  $n_i$ .

Za izrabo je tehnično zanimivo v glavnem vmesno temperaturno območje, kjer se s spremembo temperature polprevodniškega materiala zelo malo spreminja koncentracija ter s tem tudi električne lastnosti elementa.

Če se ponovno orientiramo na vmesno temperaturno območje, potem lahko ugotovimo, da:

- je koncentracija prostih elektronov v n-tipu polprevodnika (koncentracija »prostih« vrzeli v p-tipu), to je večinskih nosilcev naboja

mного večja od:

- koncentracije »vrzeli« v n-tipu (prostih elektronov v p-tipu), to je manjšinskih nosilcev naboja.

Koncentracija večinskih nosilcev naboja je namreč proporcionala stopnji dopiranosti polprevodnika z atomi primesi, medtem ko je koncentracija manjšinskih nosilcev naboja merodajna pojavu (termičnega) generiranja para elektron-vrzel.

### **Razmerje med večinskimi in manjšinskimi nosilci v n-tipu polprevodnika**

Koncentracija večinskih nosilcev (elektronov) je enaka  $n_n = n_d + n_i$ , kjer je

- $n_n$ : koncentracija večinskih elektronov,
- $n_d$ : koncentracija donorskih atomov,
- $n_i$ : koncentracija elektronov nastalih pri (termičnem) generiranju para elektron-vrzel

oziroma s poenostavitvijo ( $n_d \gg n_i$ )  $n_n \approx n_d$ .

Koncentracija manjšinskih vrzeli bi bila v primeru čistega polprevodnika enaka koncentraciji elektronov ( $n_i$ ) nastalih pri generiranju para elektron-vrzel. To pomeni, da se lahko  $n_i$  vrzeli izniči- rekombinira z  $n_i$  elektroni. Slednje razmerje se pri dopiranem n-tipu polprevodnika poruši, saj se je število elektronov povečalo na približno  $n_n \approx n_d$ . Oziroma povedano drugače; verjetnost, da se bo vrzel rekombinirala je v n-tipu narasla za faktor  $a = n_n/n_i \approx n_d/n_i$ . Posledično, ker se poveča pogostost rekombinacij vrzeli, se njihovo število glede na število vrzeli v čistem polprevodniku ( $n_i$ ) zmanjša v enakem razmerju. Od tu velja:

$$n_n = a \cdot n_i \approx n_d$$

$$p_n = \frac{n_i}{a}$$

oziroma, koncentracija manjšinskih nosilcev naboja (vrzeli) v n-tipu polprevodnika je

$$p_n \approx \frac{n_i^2}{n_d}$$

Vidimo, da sta obe koncentraciji odvisni od stopnje dopiranosti.

## Razmerje med večinskimi in manjšinskimi nosilci v p-tipu polprevodnika

S podobnim razmišljanjem kot v primeru n-polprevodnika pridemo do naslednjih zaključkov

$$p_p \approx n_a$$
$$n_p \approx \frac{n_i^2}{n_a}$$

kjer je  $n_a$  koncentracija akceptorskih atomov primesi.

## Prevodnost polprevodniškega materiala

Lahko sedaj določimo posredno prek definicije gostote električnega toka, ki je merilo pretečenega naboja v časovni enoti skozi namišljeno ploskev s presekom  $S$ .

$$J = \frac{\Delta Q}{\Delta t \cdot S} = \frac{\Delta N \cdot e}{\Delta t \cdot S} \quad n = \frac{\Delta N}{\Delta V},$$

kjer je  $n$  koncentracija prostih nosilcev električnega naboja  $e$ . Od tu dobimo

$$J = \frac{\Delta Q}{\Delta t \cdot S} = \frac{\Delta V \cdot e \cdot n}{\Delta t \cdot S} = e \cdot n \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} = e \cdot n \cdot v.$$

Skupna tokovna gostota prostih vrzeli in elektronov, ki se skozi opazovani presek pomikajo v nasprotni smeri, a tudi z nasprotnim nabojem, je potemtakem

$$J = e \cdot n \cdot v_n + e \cdot p \cdot v_p.$$

Hitrost posameznih prostih nosilcev je proporcionalna pritisnjeni električni poljski jakosti in gibljivosti nosilcev  $v = E \cdot \kappa$ . Ker velja tudi  $J = E \cdot \sigma$ , se končni izraz za tokovno gostoto glasi

$$J = e \cdot (n \cdot \kappa_n + p \cdot \kappa_p) E$$

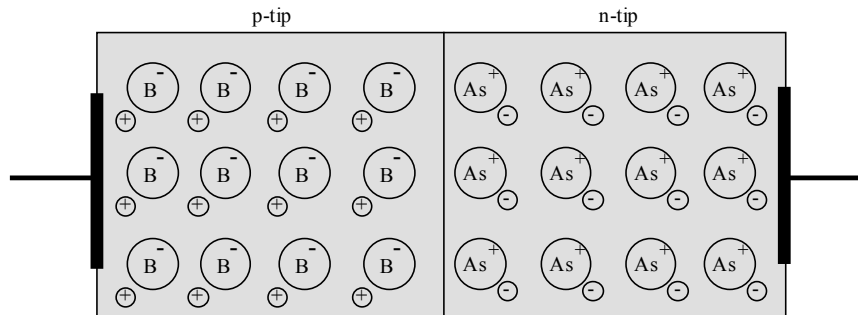
in od tu izraz za specifično prevodnost (S/m)

$$\sigma = e \cdot (n \cdot \kappa_n + p \cdot \kappa_p).$$

Dobljeni izraz povezuje snovne lastnosti z električnimi, kar je bil tudi cilj tega poglavja. Za orientacijo omenimo zgolj še to, da je gibljivost elektronov približno 3-krat večja od gibljivosti vrzeli.

## PN spoj

PN spoj nastane na mejni ploskvi pri spojitvi dveh polprevodnikov različnega tipa. Ker tehnološki proces tvorjenja PN spoja za razumevanje ni bistven, si poenostavljeno mislimo, da PN spoj ustvarimo z združitvijo električno nevtralnih polprevodnikov tipa p in n.



Slika 10: Struktura p-n spoja pred procesom difuzije in rekombinacije

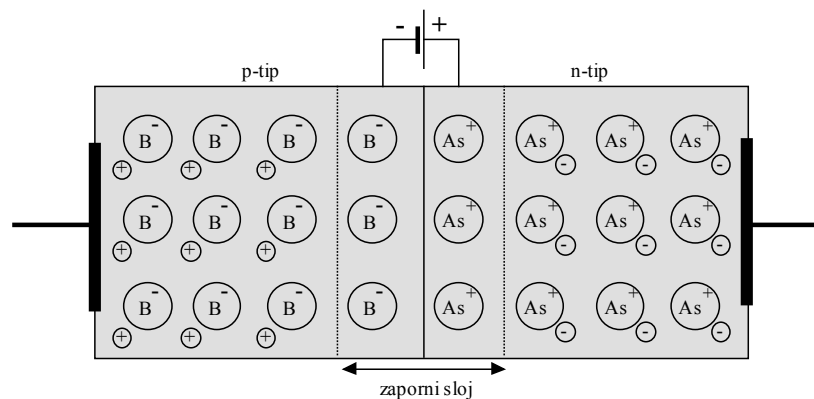
## PN spoj brez zunanje priključene napetosti

Razmere takoj po združitvi, kjer je vsaka polovica kot tudi celoten kristal navzven električno nevtralen, kaže slika 10. Koncentracija nosilcev z leve in desne strani spoja pri tem praviloma ni enakomerna (slika 11).



Slika 11: Neenakomerna porazdelitev prostih vrzeli in elektronov na obeh straneh PN spoja

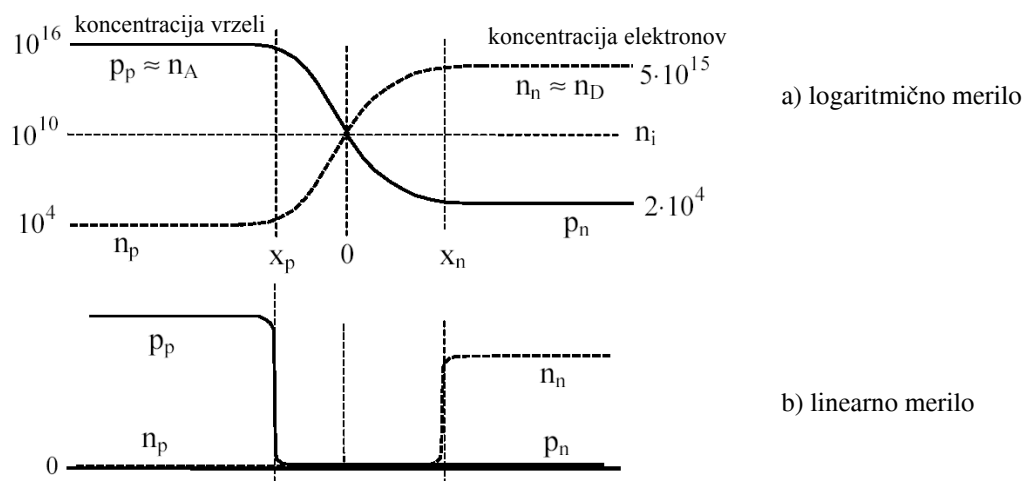
Prosti nosilci elektrine t.j. elektroni in vrzeli začno nato zaradi različne koncentracije in notranje energije prehajati preko PN spoja, s ciljem enakomerne porazdelitve - *proces difuzije*. Ko elektron iz n-tipa preide mejno ploskev, se znajde v področju velike koncentracije vrzeli zaradi česar obstaja velika verjetnost njunega zlitja t.j. rekombinacije. Podobno velja za vrzel iz p-tipa, ki se v n-tipu rekombinira s prostim elektronom. Proces difuzije traja vse dokler električno polje nepomično vezanih in ioniziranih atomov primesi, ki nastanejo ob mejni ploskvi zaradi oddaje prostih elektronov in vrzeli, ni tako veliko, da preprečuje nadaljnjo difuzijo vrzeli v n-področje in elektronov v p-področje (slika 12).



Slika 12: Struktura p-n spoja po difuziji



Področje ob mejni ploskvi imenujemo zaporni sloj v katerem se prosti nosilci naboja zaradi prisotnega električnega polja ne morejo zadržati. Povedano drugače; prostorsko vezani naboj ioniziranih atomov oddriva proste nosilce na drugi strani PN spoja stran od njega. Električno polje prek zapornega sloja lahko zaradi nazornosti ponazorimo z namišljeno napetostjo baterije (slika 12).

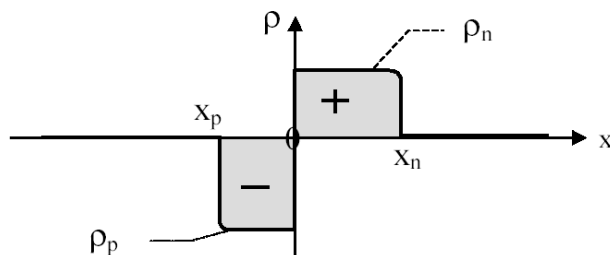


Slika 13: Prostorska porazdelitev koncentracije prostih nosilcev po končani difuziji

Velikost difuzne napetosti je odvisna od gostote prostorskega naboja, ki ga tvorijo ionizirani atomi primesi. Ker se koncentraciji primesi donorjev in akceptorjev praviloma razlikujeta (slika 13), je krajevna porazdelitev zapornega sloja v p in n tipu polprevodnika odvisna prav od slednje razlike. Gostoti prostorskega naboja z ene in druge strani sta tako

$$\rho_p \approx -e \cdot n_a$$

$$\rho_n \approx e \cdot n_d$$



Slika 14: Prostorska porazdelitev koncentracije prostorsko vezanega naboja po končani difuziji

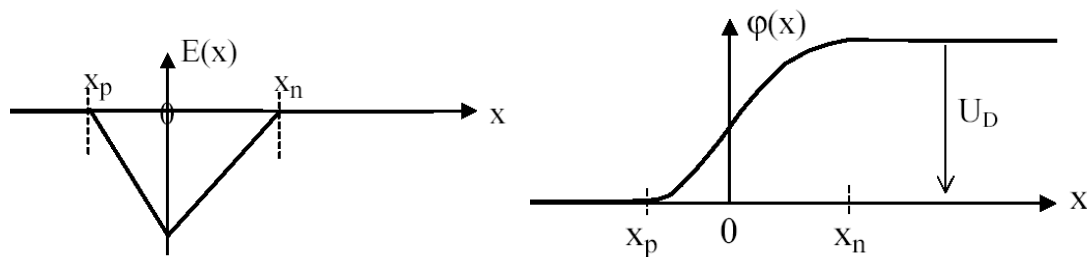
Pri čemer pa mora zaradi električne nevtralnosti veljati

$$x_p \cdot \rho_p = x_n \cdot \rho_n$$

Vsled porazdelitve prostorskega naboja električna poljska jakost  $E(x)$

$$E(x) = \frac{1}{\epsilon} \int_{x_p}^x \rho(x) \cdot dx$$

najprej raste (slika 15), doseže svoj maksimum na PN spoju, nakar začne znova upadati proti vrednosti nič.



Slika 15: Krajevna porazdelitev  $E(x)$  in  $\varphi(x)$  vzdolž zapornega sloja

Električni potencial

$$\varphi(x) = - \int_{x_p}^x E(x) \cdot dx$$

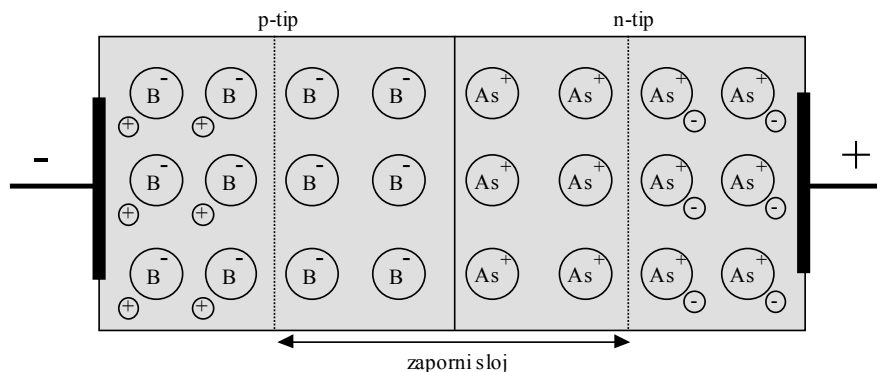
pri integriranju v enakih mejah raste in doseže maksimalno vrednost na desnem robu zapornega sloja. Maksimalno napetostno razliko imenujemo difuzna napetost. Le-ta je v splošnem odvisna od temperature in koncentracije primesi. Nastanek difuzne napetosti upočasnjuje in nato zavre nadaljnji proces difundiranja prostih nosilcev naboja skozi zaporni sloj. Ko se proces zaustavi, velja, da je tok zaradi difundiranja enak toku prostih nosilcev, ki so podvrženi delovanju električnega polja. Iz omenjene enakosti lahko izpeljemo izraz za difuzno napetost, ki je

$$U_D = - \int_{x_p}^x E(x) \cdot dx = \frac{D_n}{\kappa_n} \int_{n_p}^{n_n} \frac{dn}{n} = \frac{D_n}{\kappa_n} \cdot \ln \frac{n_n}{n_p} = U_T \cdot \ln \frac{n_a \cdot n_d}{n_i^2}$$

Napetost  $U_T$  je napetostni ekvivalent za srednjo vrednost energije elektrona pri določeni temperaturi  $T$ . Na koncu te izpeljave velja opozoriti, da napetosti  $U_D$  na sponkah PN spoja ni možno izmeriti, saj se zaradi sklenitve merilnega tokokroga pojavi dodatni PN spoj, katerega napetost nasprotuje na sliki 12 označeni napetosti.

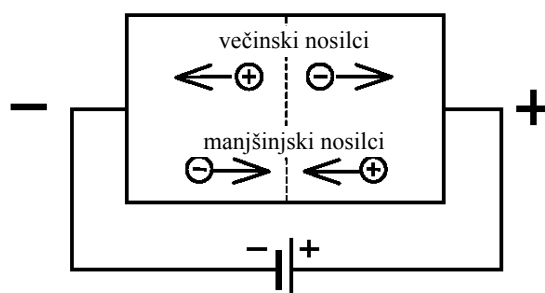
## PN spoj s priključeno napetostjo

Če sedaj na p-n spoj priključimo enosmerno napetost in sicer tako, da je pozitivni pol priključen na n-tip in negativni na p-tip polprevodnika (slika 16), se napetost prek zapornega spoja poveča. Pravimo, da PN spoj priključimo v reverzni – zaporni smeri. Pri tem priključena napetost “izvleče” proste elektrone iz n- in proste vrzeli iz p-področja (torej večinske nosilce naboja) zaradi česar se debelina zapornega sloja poveča.



Slika 16: Reverzna polarizacija p-n spoja

Večinski nosilci naboja pri tem ne prehajajo prek PN spoja, kar pomeni, da ne sodelujejo pri oblikovanju električnega toka v zaporni smeri.

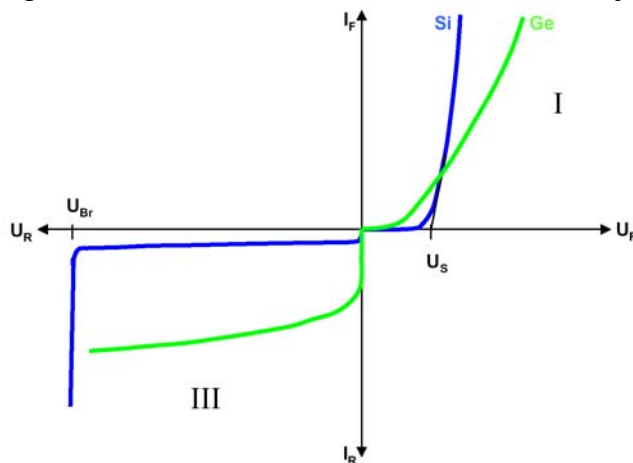


Slika 17: Tok v reverzni smeri tvorijo zgolj manjšinski nosilci

Medtem privlačna sila prostorsko vezanih nabojev v kristalni strukturi PN spoja, kot tudi polariteta zunanje, priključene napetosti usmeri manjšinske nosilce naboja k prehodu preko PN spoja (slika 17). Ker pa ima zaporni sloj pravzaprav lastnosti bolj ali manj idealnega izolatorja (področje z osiromašeno koncentracijo prostih nosilcev naboja), bi marsikdo pričakoval, da je manjšinskim nosilcem pot preko PN spoja onemogočena. Vendar ne smemo prezreti, da se procesa difuzije in rekombinacije zaradi toplotne energije (tresenje kristalne strukture) nikoli ne prekineta, zato nastajajo tudi v zapornem sloju redki nosilci naboja, ki zaradi polaritete difuzne napetosti prehajajo prek mejne ploskve. Tok, ki ga tvorijo ti t.i. manjšinski nosilci naboja, imenujemo reverzni tok diode. Velikost reverznega toka zavisi pretežno od temperature in le delno od velikosti priključene napetosti. Le če se napetost enormno poveča, je energija manjšinskih nosilcev tolikšna, da začno ti izbijati valentne elektrone, pri čemer pride do t.i. plazovitega preboja.

Prevodna smer - če polariteto zunanje baterije spremenimo, tako da je pozitivni pol priključen na p-polprevodnik in negativni na n-polprevodnik, se zaporni sloj zoži, saj pozitivni pol sili vrzeli v področje zapornega sloja. Podobno velja tudi za negativni pol in elektrone zaradi česar postane zaporni sloj bolj prevoden. Če nadalje povečujemo napetost, steče tok večinskih nosilcev naboja, ki je omejen le z upornostjo tokokroga, medtem ko je napetost na diodi približno konstantna.

Zgornji opis slikoviteje podamo v obliki statične u-i karakteristike, ki jo kaže slika 18.



Slika 18: u-i karakteristika diode

Statična karakteristika diode je sestavljena iz dveh vej: iz prevodne pri pozitivni napetosti  $u_F$  in iz reverzne pri negativni napetosti  $u_R$ . Fizikalne lastnosti PN spoja lahko v prevodni in reverzni smeri opišemo z

$$I = I_S \cdot \left( e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right),$$

kjer je  $I_S$  preostali reverzni tok. V prevodni smeri (angl. Forward) tok strmo narašča in je padec napetosti relativno majhen.

Pragovna napetost  $U_T$ , ki za silicijevo diodo znaša približno 0,65 V, je temperaturno odvisna, pri čemer njene velikosti ne moremo zmanjšati z močnejšim dopiranjem atomov primesi. Maksimalni tok v prevodni smeri je omejen s temperaturo kristala, ki pri maksimalni obremenitvi ne sme preseči 125°C.