

Osnove elektronike

III semestar

POLUPROVODNICI 1

Periodni sistem elemenata

																	Helium Atomic number = 2								
1 H																		2 He							
3 Li		4 Be												5 B		6 C		7 N		8 O		9 F		10 Ne	
11 Na		12 Mg												13 Al		14 Si		15 P		16 S		17 Cl		18 Ar	
19 K		20 Ca		21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr						
37 Rb		38 Sr		39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe						
55 Cs		56 Ba		*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn						
87 Fr		88 Ra		**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cp	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo						
				57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu							
				89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr							

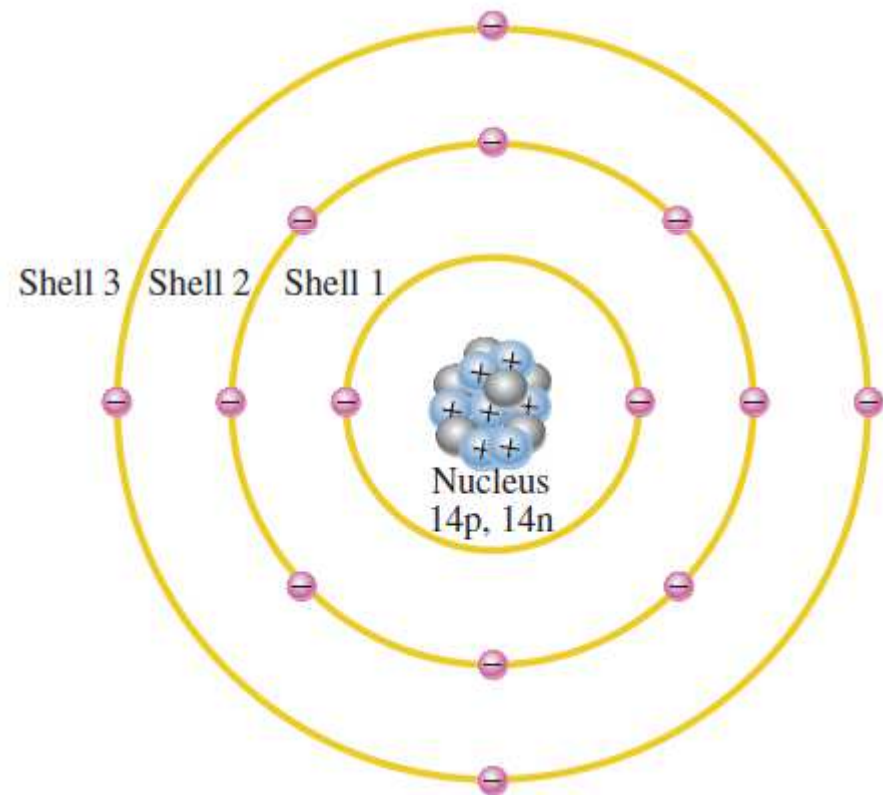
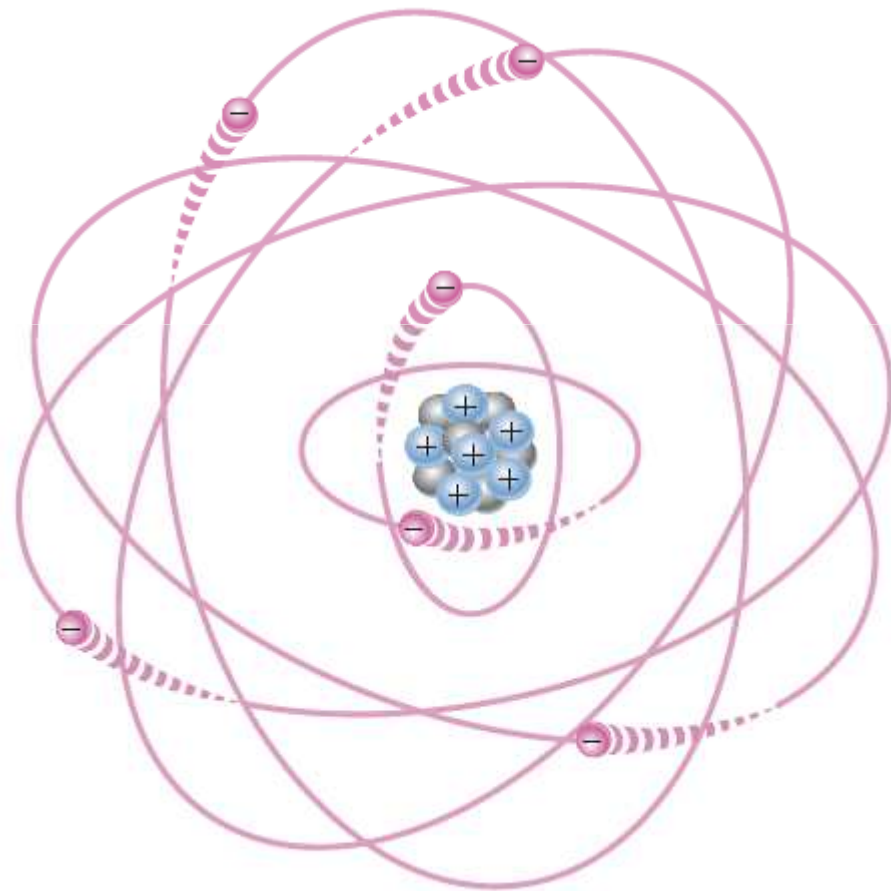
Silicon
Atomic number = 14

↓

Najčešće korišćeni elementi za poluprovodničke komponente

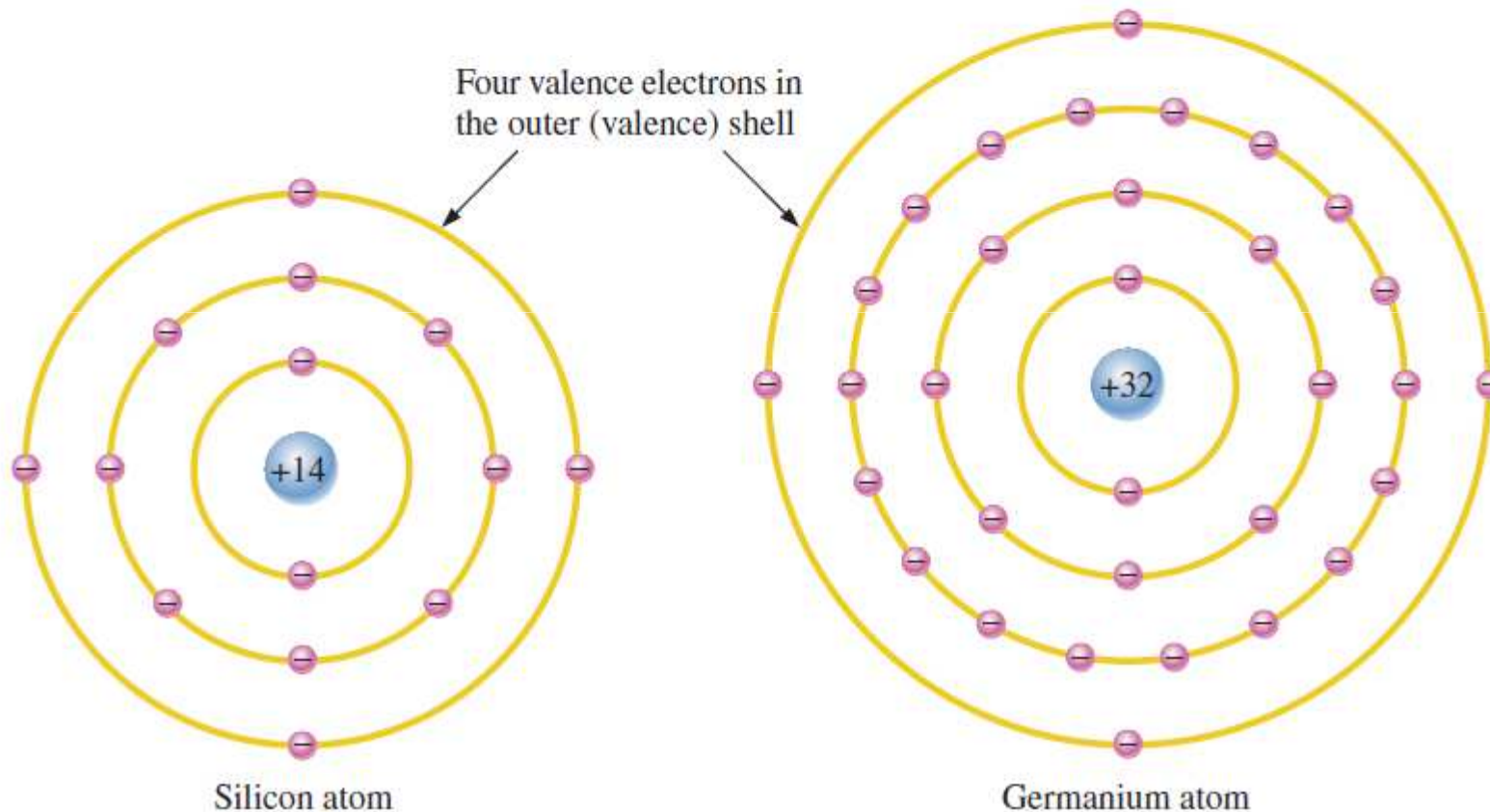
		Grupa				
		12	13	14	15	16
		IIB	IIIA	IVA	VA	VIA
Perioda	2		5 B			
	3		13 Al	14 Si	15 P	16 S
	4	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se
	5	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te
	6	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	

Borov opšti model atoma i silicijumov (Si) atom sa 14 protona, 14 neutrona i 14 elektrona



⊖ Electron ⊕ Proton ● Neutron

4 valentna elektrona silicijuma i germanijuma



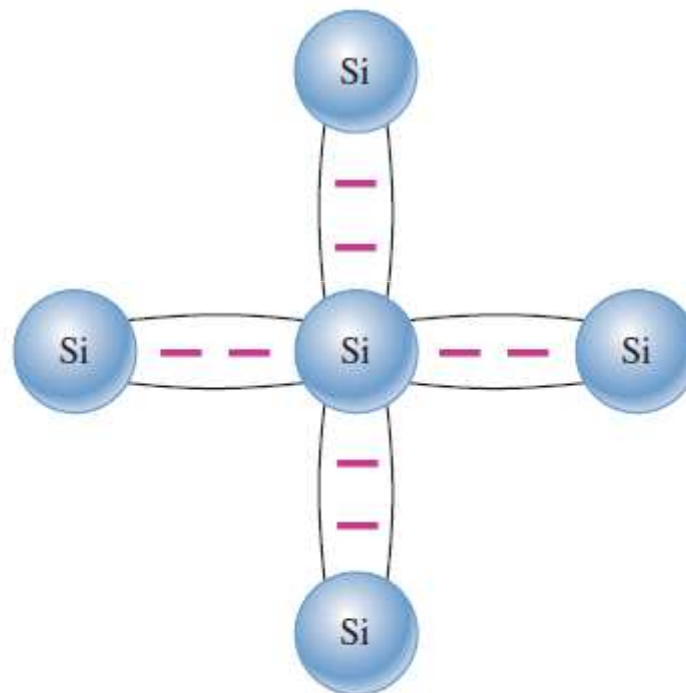
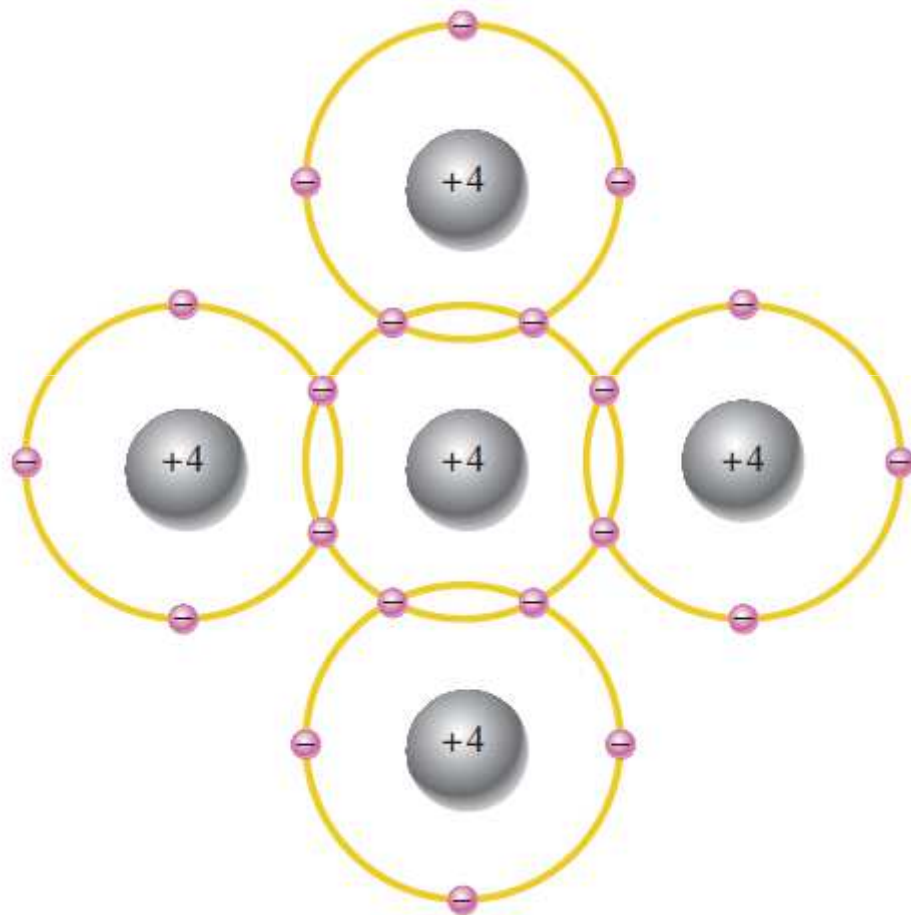
Kristalna struktura silicijuma

Silicijum je drugi najrasprostranjeniji element u Zemljinoj kori.

- ❖ Atom silicijuma se sastoji od jezgra koje u sebi sadrži 14 protona i 14 neutrona, oko koga kruži 14 elektrona.
- ❖ Četiri valentna elektrona su najudaljenija od jezgra.
- ❖ Valentni elektroni učestvuju u stvaranju kovalentnih veza između susednih atoma silicijuma.
- ❖ Svaku kovalentnu vezu formiraju dva elektrona koja pripadaju susednim atomima silicijuma.
- ❖ Svaki atom silicijuma može da formira četiri kovalentne veze, raspoređene u prostoru u obliku tetraedra.

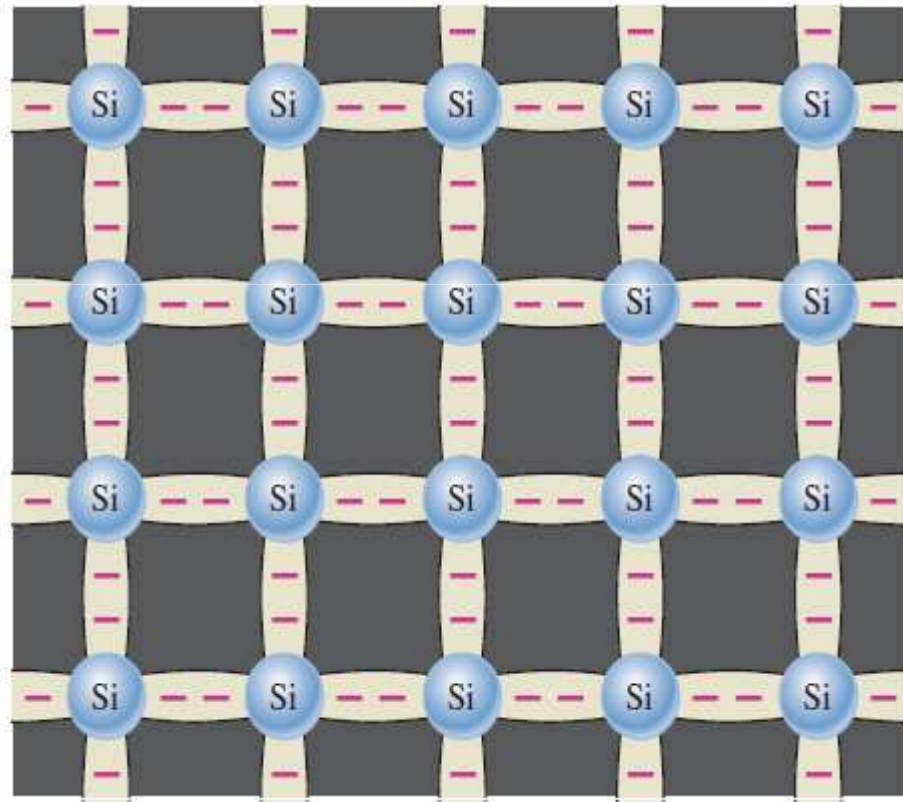
Kovalentne veze Si

Centralni Si atom sa 4 Si atoma

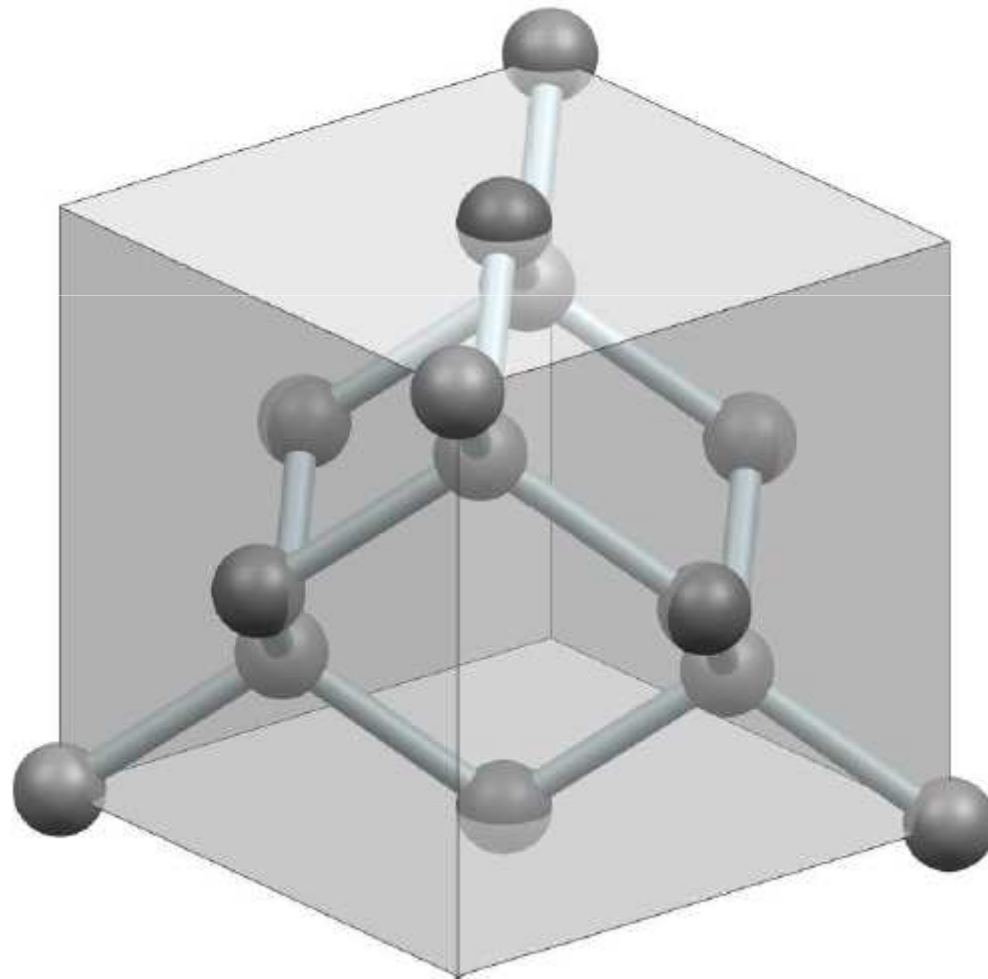


Kovalentne veze Si

Centralni Si atom sa 4 Si atoma



Kovalentne veze Si u prostoru
Atomi Si su nacrtani kao sfere, a
kovalentne veze kao cilindri



Energetske zone

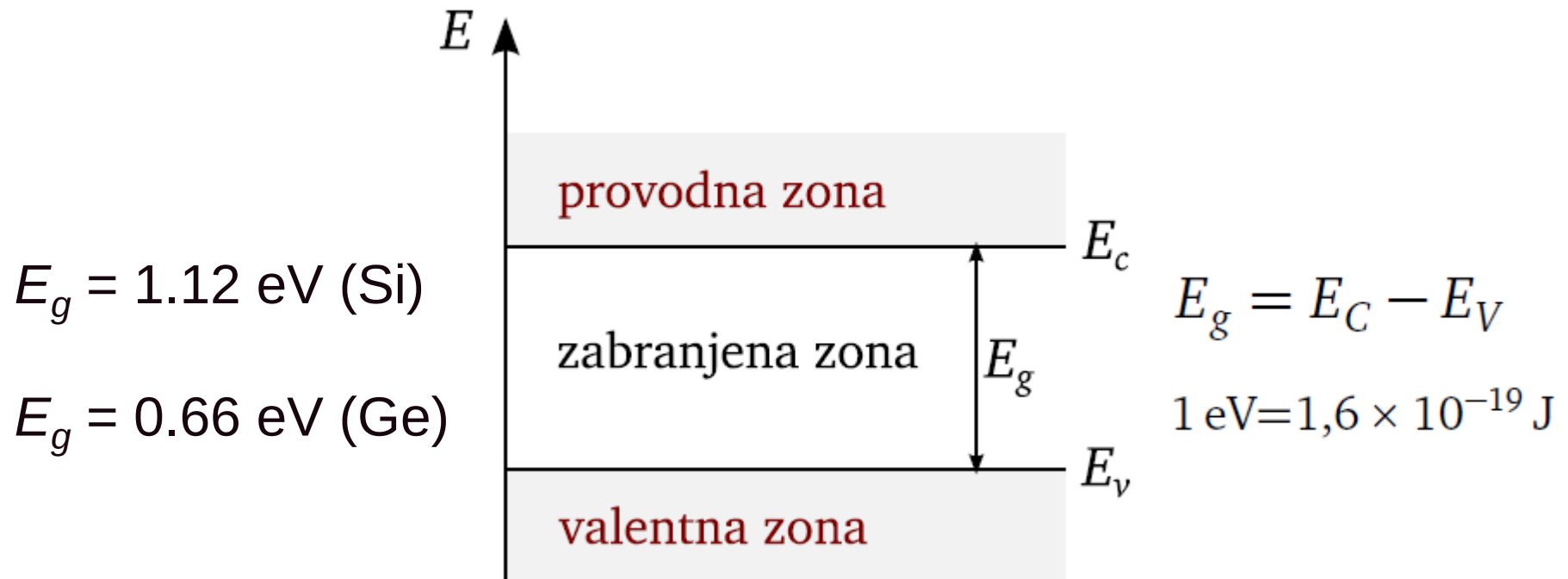
Svaki elektron unutar materijala poseduje energiju koja se naziva energetski nivo.

Skup bliskih energetskih nivoa se naziva energetska zona.

Valentna zona predstavlja skup energija valentnih elektrona.

Provodna zona predstavlja skup energija slobodnih elektrona.

Zabranjena zona predstavlja minimalnu energiju potrebnu za prelazak elektrona iz valentne zone u provodnu zonu.



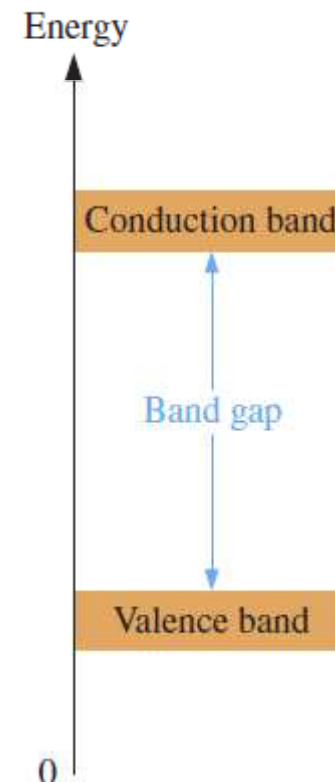
Izolatori

Izolatori su materijali (npr. guma, plastika, staklo, liskun, kvarc), koji praktično ne provode električnu struju pri uobičajenim uslovima rada (pritisak, temperatura, itd.), jer su skoro svi elektroni u valentnoj zoni.

Provodna zona (*conduction band*) i valentna zona (*valence band*) su razdvojene velikim energetske procepom (*band gap*).

Specifična otpornost $\rho > 10^5 \Omega\text{cm}$.

$$E_g > 5 \text{ eV}$$

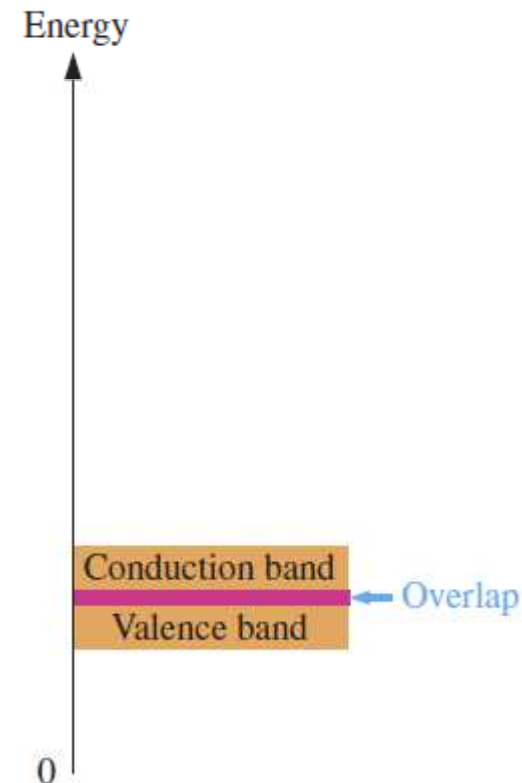


Provodnici

Provodnici su materijali [npr. metali, kao što su: bakar (Cu), srebro (Ag), zlato (Au), aluminijum (Al)] koji lako provode električnu struju, jer su valentni elektroni slabo povezani sa atomom i mogu prelaziti sa atoma na atom kao slobodni elektroni. Provodna zona (*conduction band*) i valentna zona (*valence band*) se preklapaju (*overlap*), tj. ne postoji energetski procep (*band gap*).

Specifična otpornost $\rho < 10^{-2} \Omega\text{cm}$.

$$E_g = 0 \text{ eV}$$

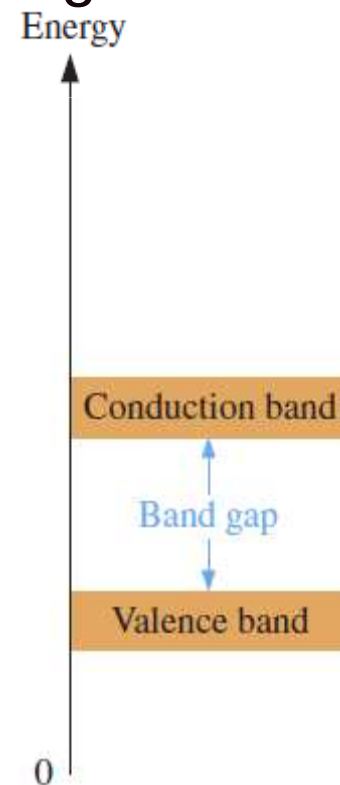


Poluprovodnici

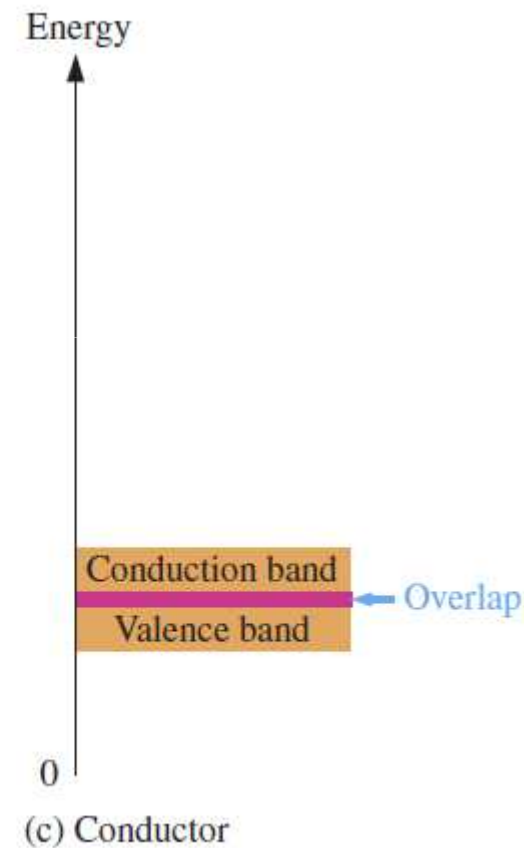
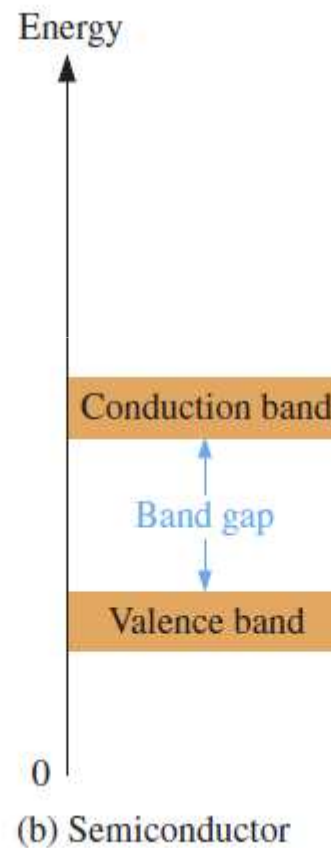
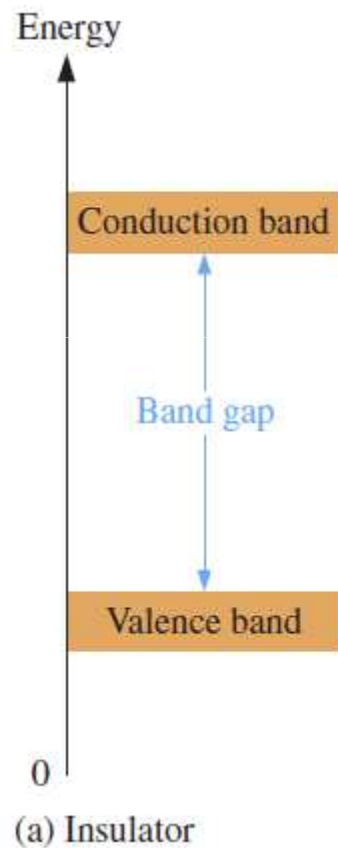
Poluprovodnici su višeelementni ili jednoelementni materijali [antimon (Sb), arsen (As), astatin (At), bor (B), polonijum (Po), telur (Te), silicijum (Si) i germanijum (Ge)], koji su između provodnika i izolatora sa stanovišta provođenja električne struje. Provodna zona (*conduction band*) i valentna zona (*valence band*) su razdvojene srednje velikim energetskim procepom (*band gap*).

Specifična otpornost $10^{-2} \Omega\text{cm} < \rho < 10^5 \Omega\text{cm}$

$0 \text{ eV} < E_g < 5 \text{ eV}$



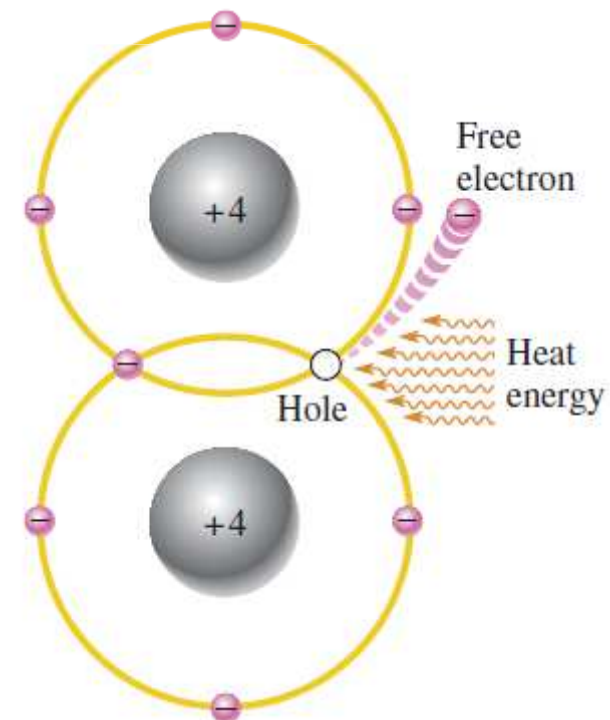
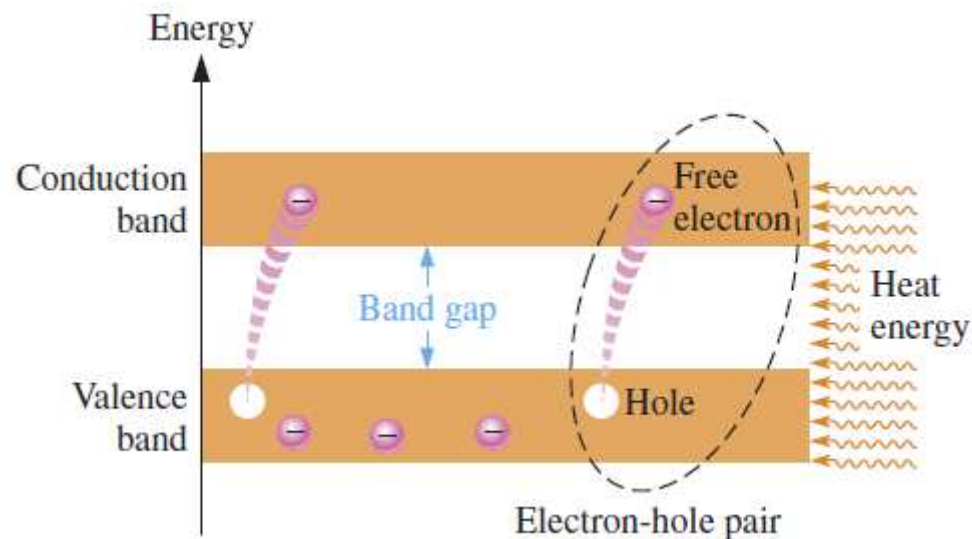
Izolatori, poluprovodnici i provodnici



Elektroni i šupljine

Slobodni elektroni u provodnoj zoni se nazivaju kratko elektroni. Ravnotežna koncentracija elektrona je n_0 .

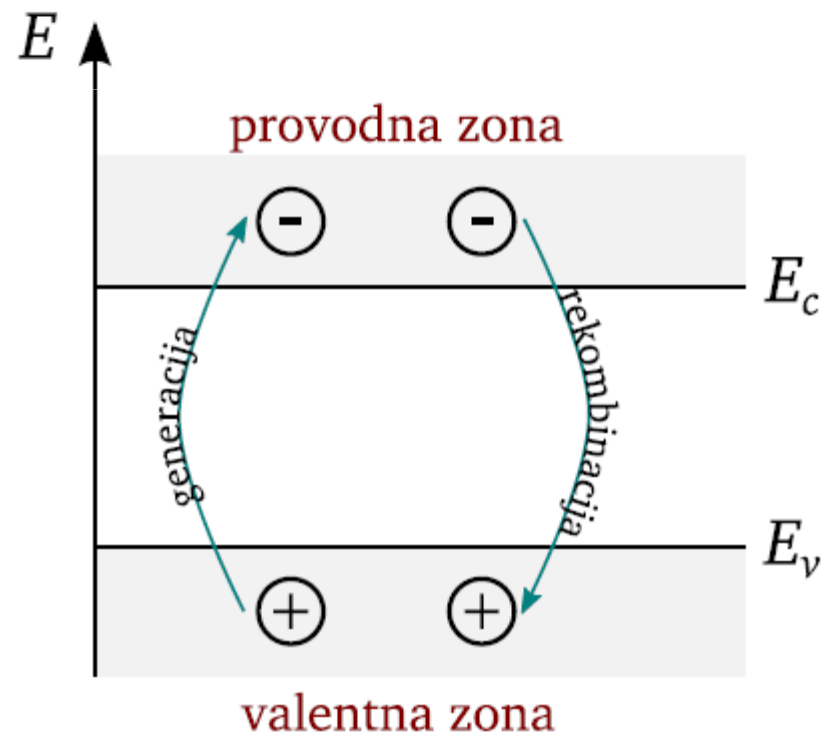
Kada valentni elektron dobije dovoljno veliku energiju da postane slobodan, raskida jednu kovalentnu vezu i za sobom ostavlja nepopunjen energetska nivo koji nazivamo šupljina (hole) i smatramo ga pozitivno naelektrisanim. Ravnotežna koncentracija šupljina je p_0 .



Generacija i rekombinacija

Generacija je proces prelaska elektrona iz valentne zone u provodnu zonu. Pri tome se generiše par elektron-šupljina.

Rekombinacija je proces povratka elektrona iz provodne zone u valentnu zonu. Pri tome nestaje par elektron-šupljina.



Generacija i rekombinacija

Generacija i rekombinacija se odvijaju paralelno u kristalu. U termičkoj ravnoteži su ravnotežne koncentracije elektrona n_0 i šupljina p_0 jednake sopstvenoj koncentraciji n_i .

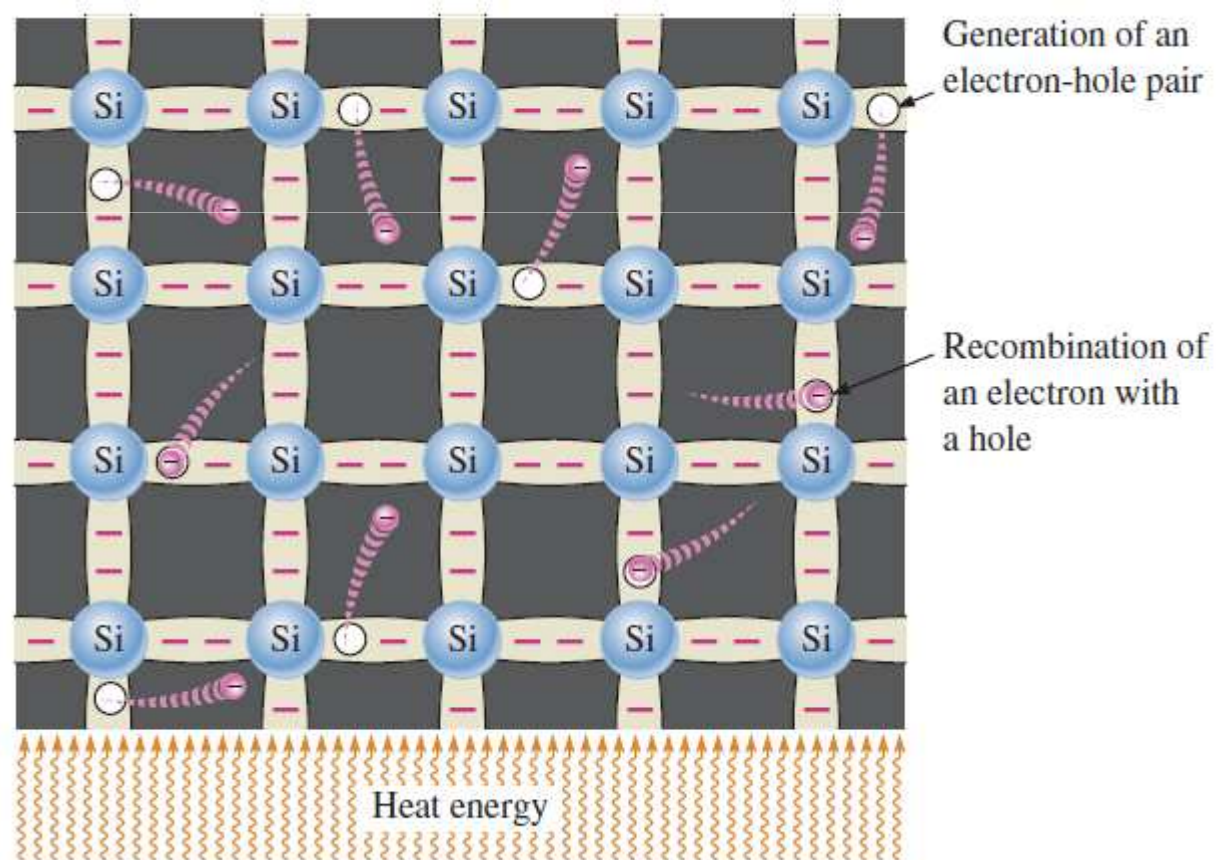
$$n_i = n_0 = p_0$$

$$n_0 p_0 = n_i^2$$

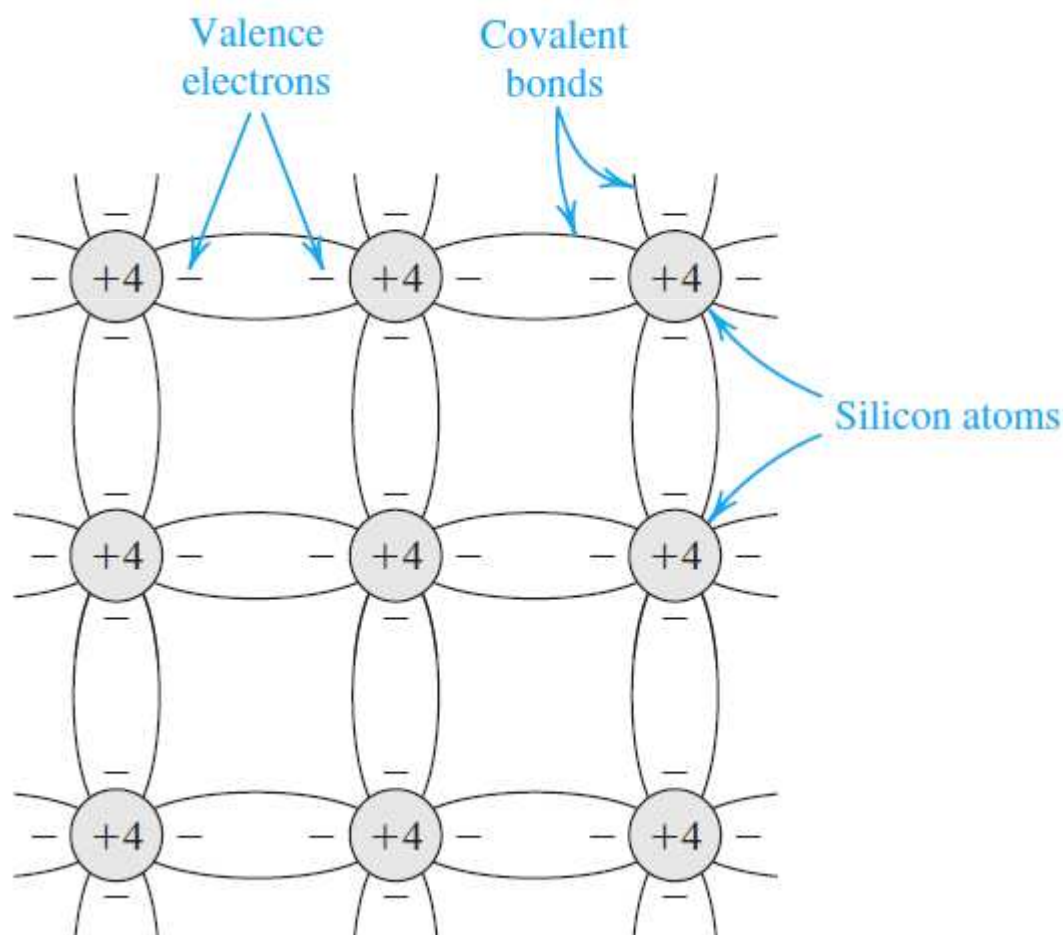
$$n_i = BT^{3/2} e^{-E_g/2kT}$$

$$k = 8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$$

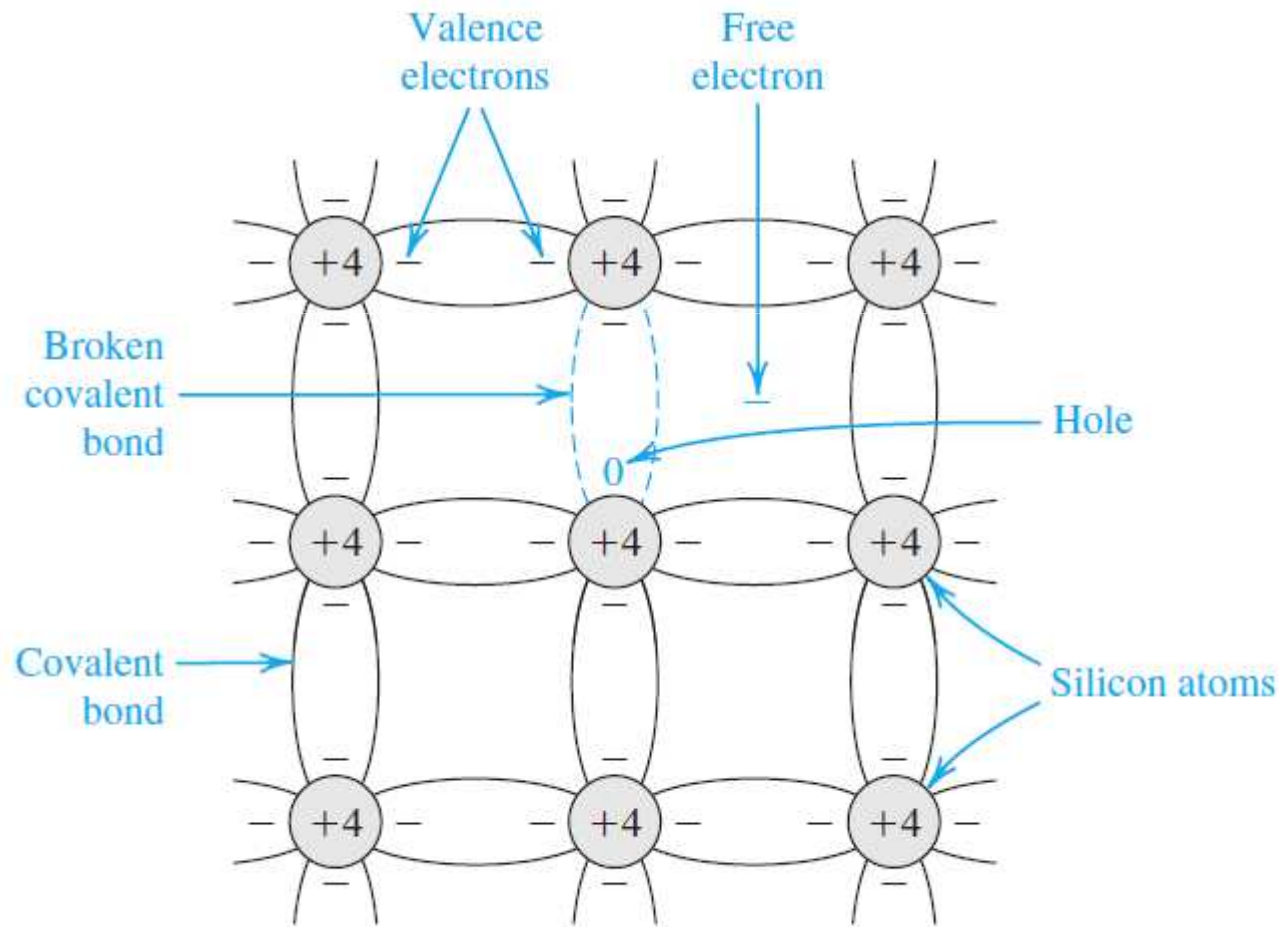
$$B = 7.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}\text{K}^{-3/2}$$



Čist silicijum na temperaturi bliskoj
apsolutnoj nuli nema slobodnih
elektrona (svi su valentni elektroni)

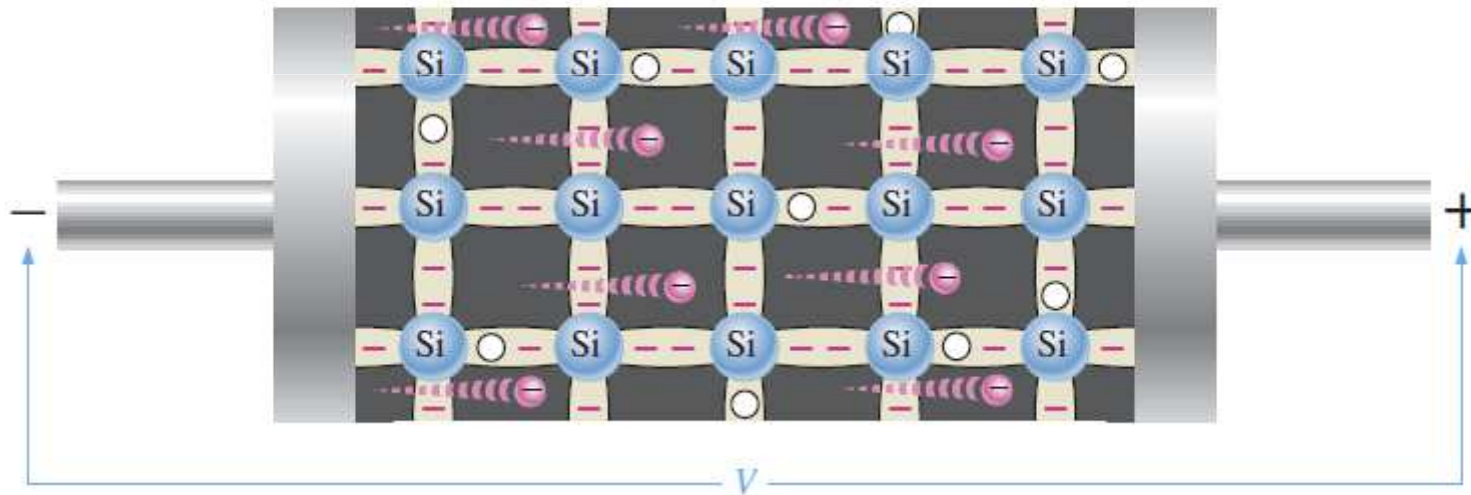


Čist silicijum na sobnoj temperaturi ima slobodne elektrone i šupljine



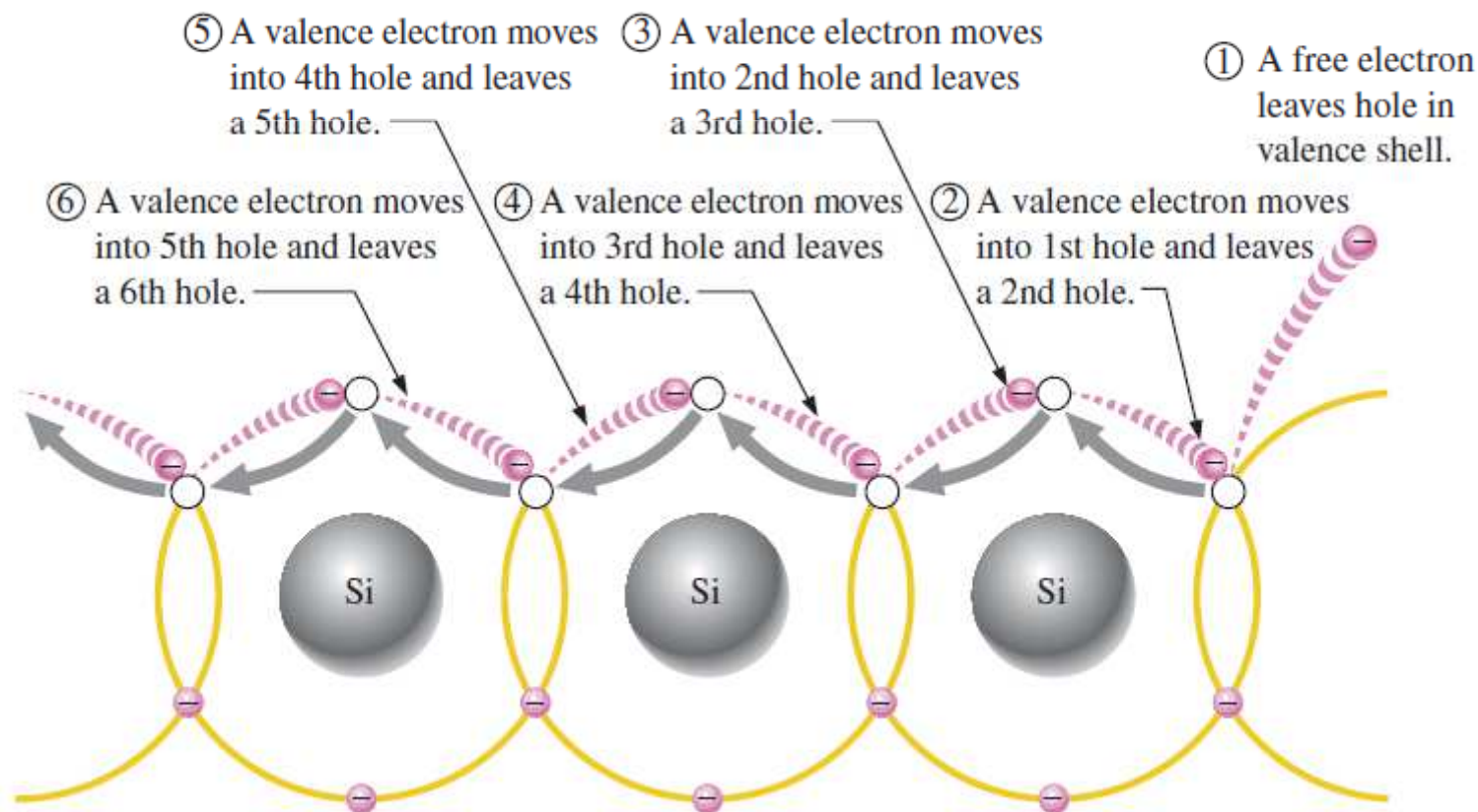
Struja elektrona

Ako se između krajeva čistog silicijuma dovede napon, elektroni će se slobodno kretati ka pozitivnom potencijalu, praveći struju elektrona.



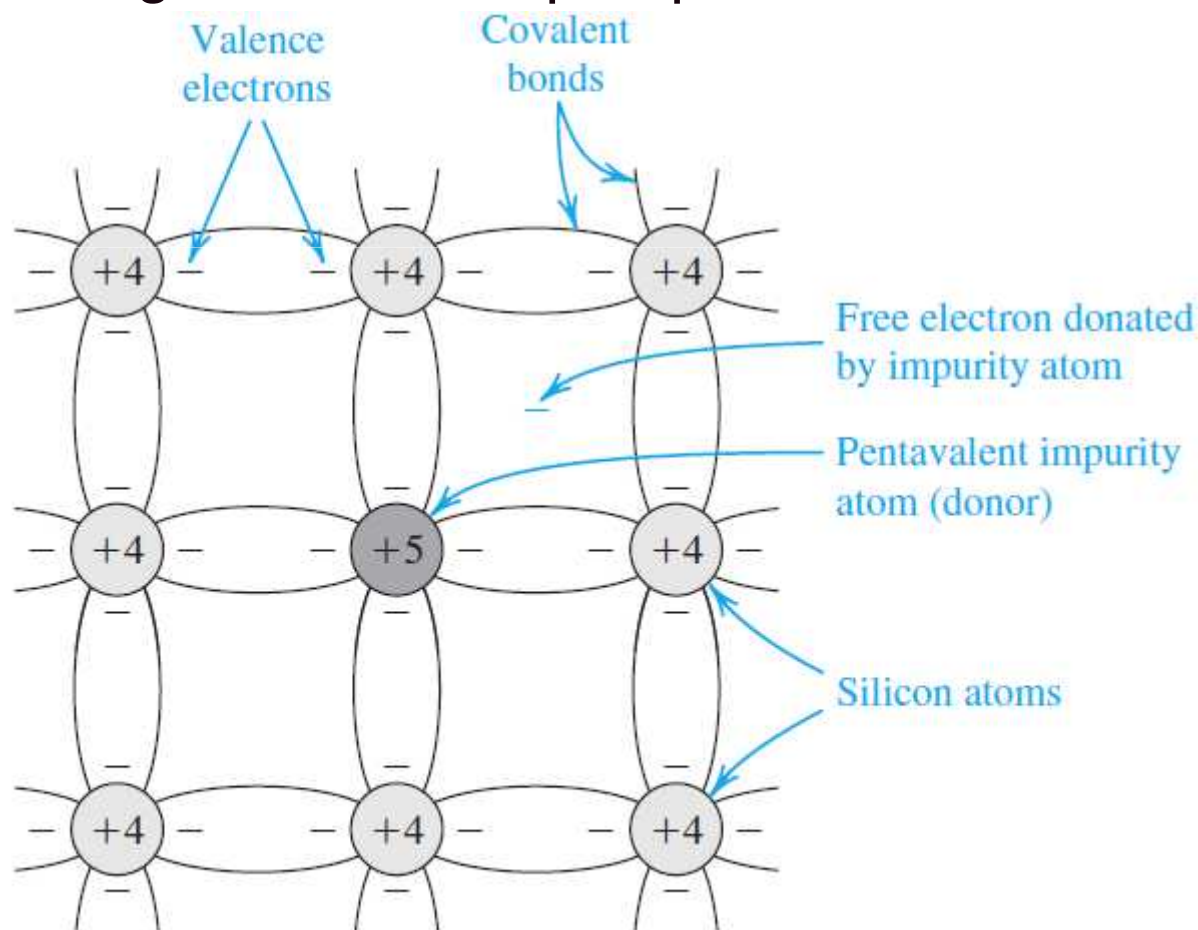
Struja šupljina

Ako se između krajeva čistog silicijuma dovede napon, valentni elektroni će se kretati između atoma, ostavljajući pri tom šupljine, koje možemo smatrati da se kreću u suprotnom smeru od valentnih elektrona, i njihovu struju nazivamo strujom šupljina, da bi je razlikovali od struje elektrona u provodnoj zoni.



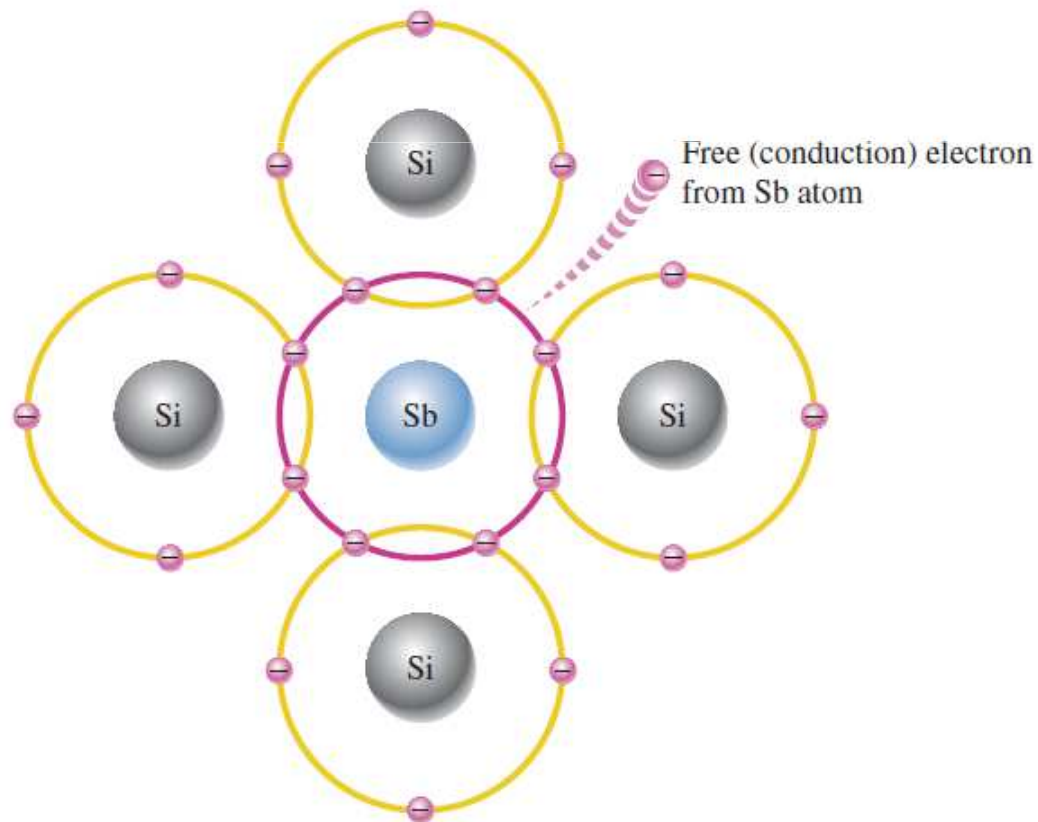
Donori

Dopiranje silicijuma donorskim (petovalentnim) primesama iz V grupe periodnog sistema [fosfor (P), arsen (As), antimon (Sb)] daje 4 elektrona za kovalentne veze i 1 elektron na donorskom energetsom nivou E_d , svega 0.045 eV ispod provodne zone (za P).



Jonizacija

Elektron na donorskom energetskeg nivou E_d sa vrlo malo dodatne energije (0.045 eV za P) prelazi u provodnu zonu gde postaje slobodan elektron i učestvuje u protoku struje elektrona, a za sobom ostavlja nepokretan pozitivan (5 protona i 4 elektrona) donorski jon u kristalnoj rešetki.

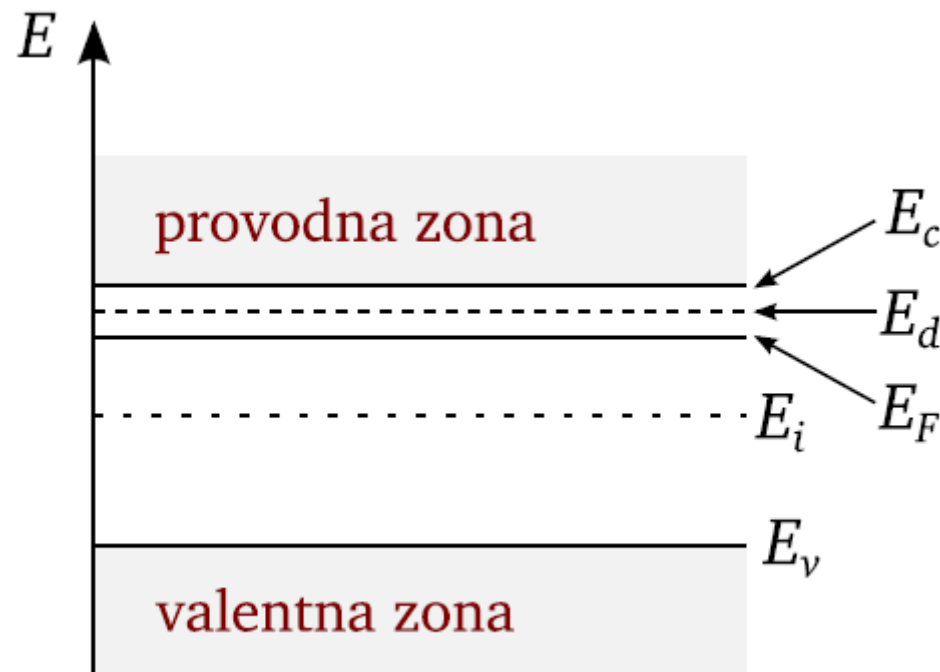


n-tip poluprovodnika

n tip poluprovodnika je većinom dopiran donorima.

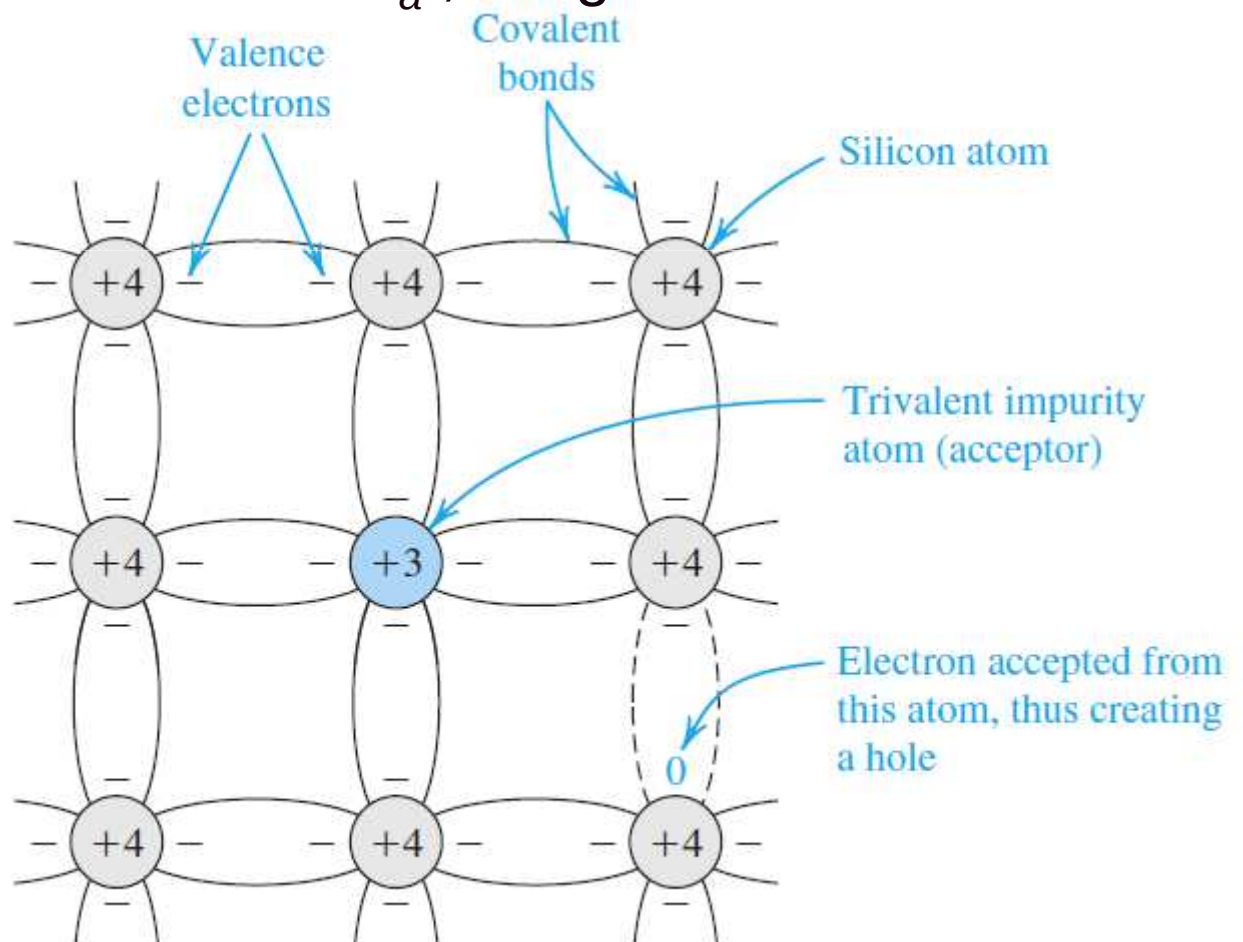
n^+ tip poluprovodnika je toliko jako dopiran donorima da se može smatrati više provodnikom nego poluprovodnikom.

Elektroni u n-tipu poluprovodnika su većinski (ili glavni) nosioci. Šupljine u n-tipu poluprovodnika su manjinski (ili sporedni) nosioci.



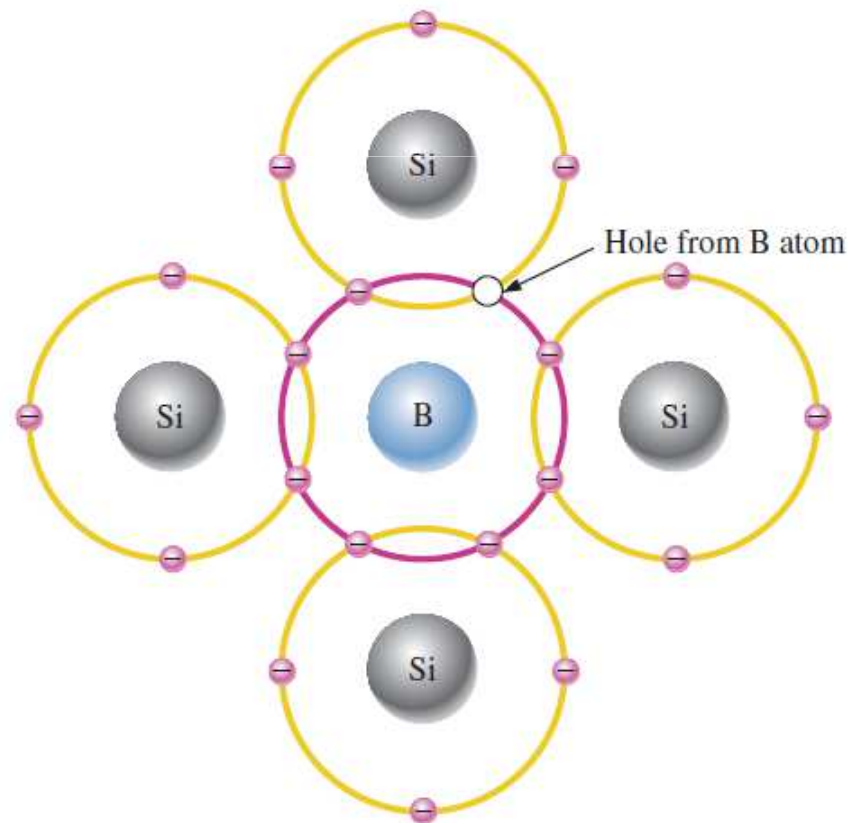
Akceptori

Dopiranje silicijuma akceptorskim (trovalentnim) primesama iz III grupe periodnog sistema [bor (B), aluminijum (Al), galijum (Ga)] daje 3 elektrona za kovalentne veze i prima 1 elektron na akceptorskom energetske nivou E_a , svega 0.045 eV iznad valentne zone (za B).



Jonizacija

Valentni elektron sa vrlo malo dodatne energije (0.045 eV za B) prelazi iz valentne zone na akceptorski energetski nivo E_a , ostavlja za sobom šupljinu koja učestvuje u protoku struje šupljina, i nepokretan negativan (3 protona i 4 elektrona) akceptorski jon u kristalnoj rešetki.

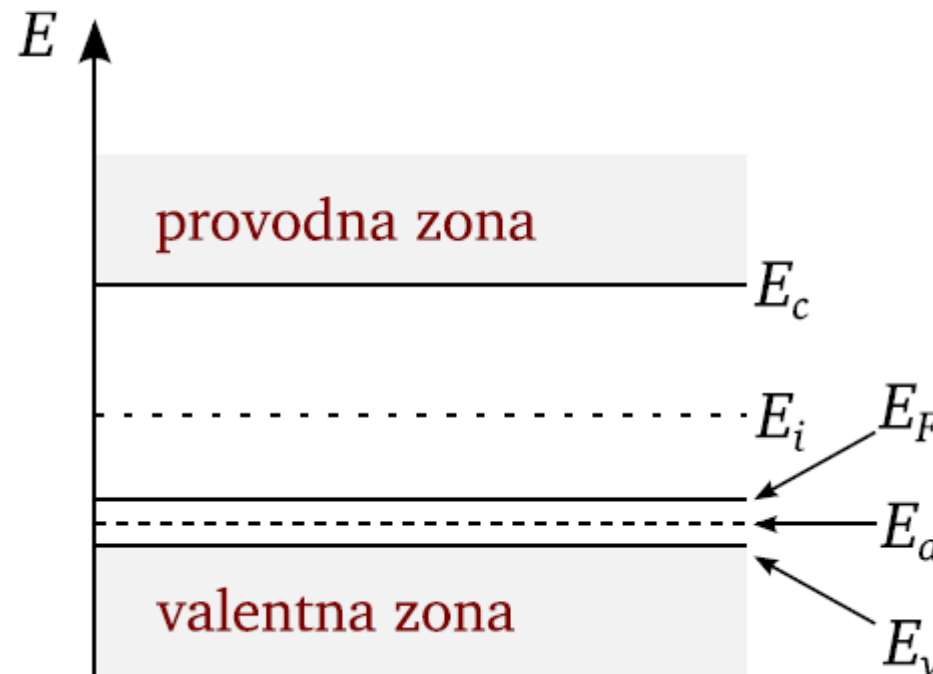


p-tip poluprovodnika

p tip poluprovodnika je većinom dopiran akceptorima.

p⁺ tip poluprovodnika je jako dopiran akceptorima i može se smatrati više provodnikom nego poluprovodnikom.

Šupljine u p-tipu poluprovodnika su većinski (ili glavni) nosioci. Elektroni u p-tipu poluprovodnika su manjinski (ili sporedni) nosioci.



Dopiran poluprovodnik u termodinamičkoj ravnoteži

Dopiran poluprovodnik može da sadrži i donorske primese koncentracije N_D i akceptorske primese koncentracije N_A .

n-tip poluprovodnika je za $N_D > N_A$.

p-tip poluprovodnika je za $N_D < N_A$.

Jednačina elektroneutralnosti pod pretpostavkom da su sve primese jonizovane je:

$$n_0 + N_A = p_0 + N_D$$

Smenom p_0 iz formule:

$$n_0 p_0 = n_i^2$$

dobija se kvadratna jednačina po n_0 :

$$n_0^2 - (N_D - N_A)n_0 = n_i^2$$

Ravnotežne koncentracije elektrona i šupljina

Rešavanjem kvadratne jednačine po n_0 se dobija:

$$n_0 = \frac{N_D - N_A}{2} + \sqrt{\left(\frac{N_D - N_A}{2}\right)^2 + n_i^2}$$

Za jako dopiran n-tip poluprovodnika ($N_D \gg N_A$) se dobija:

$$n_0 = N_D \quad p_0 = n_i^2 / N_D$$

Rešavanjem kvadratne jednačina po p_0 se dobija:

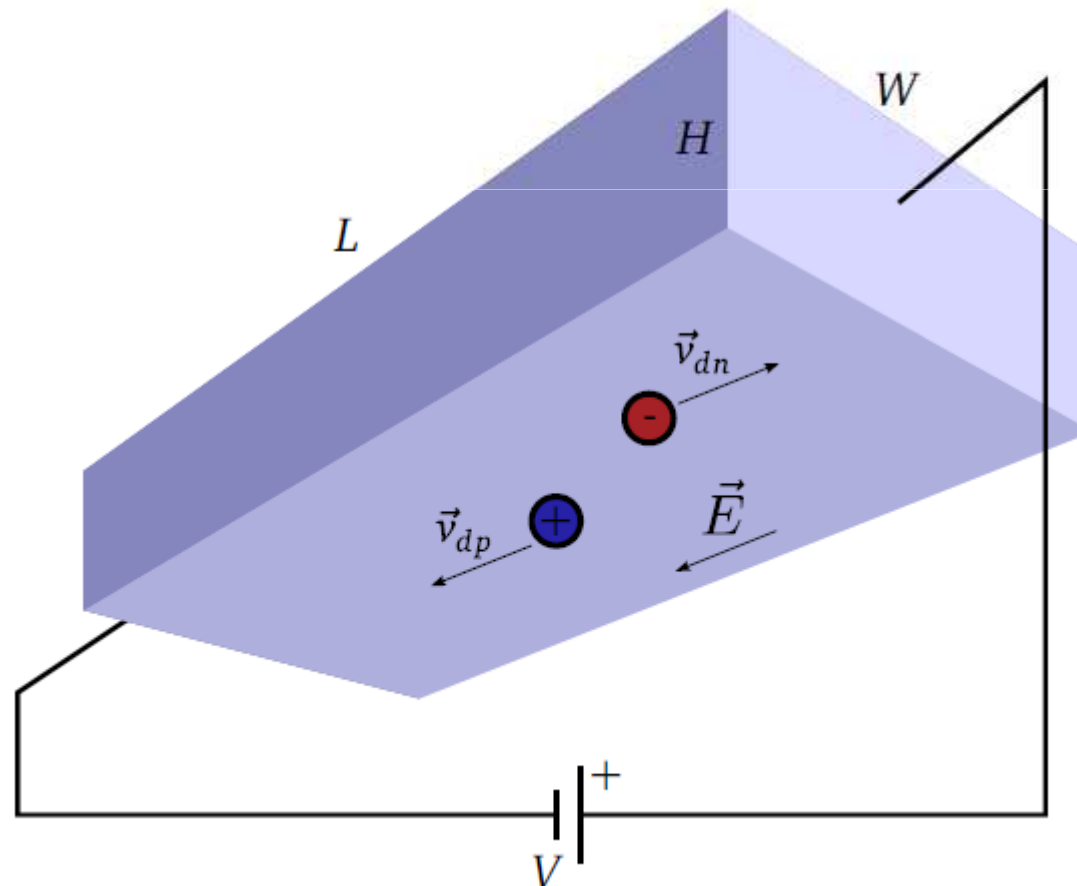
$$p_0 = \frac{N_A - N_D}{2} + \sqrt{\left(\frac{N_A - N_D}{2}\right)^2 + n_i^2}$$

Za jako dopiran p-tip poluprovodnika ($N_D \ll N_A$) se dobija:

$$p_0 = N_A \quad n_0 = n_i^2 / N_A$$

Driftovske brzine naelektrisanja

Ako se na krajeve komada dopiranog poluprovodnika priključi napon V , u njemu će se uspostaviti električno polje $\vec{E}$, koje dovodi do usmerenog kretanja elektrona driftovskom brzinom $\vec{v}_{dn}$ i usmerenog kretanja šupljina driftovskom brzinom $\vec{v}_{dp}$.



Pokretljivost nosilaca naelektrisanja

Ako se smatra da elektron i šupljina pri sudaru sa atomima kristalne rešetke potpuno izgube driftovsku brzinu, kao i da je prosečno vreme između sudara konstantno, dobija se da su driftovske brzine elektrona i šupljina proporcionalne električnom polju preko pokretljivosti elektrona i pokretljivosti šupljina:

$$\mu_n = 1360 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

$$\mu_p = 460 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

$$\vec{F}_n = \frac{dp_n}{dt_n} = -q\vec{E} = \frac{m_n^* \vec{v}_{dn} - 0}{\tau_{cn} - 0} = \frac{m_n^* \vec{v}_{dn}}{\tau_{cn}}$$

$$\vec{v}_{dn} = -\frac{q\tau_{cn}}{m_n^*} \vec{E} = -\mu_n \vec{E}$$

$$\vec{F}_p = \frac{dp_p}{dt_p} = q\vec{E} = \frac{m_p^* \vec{v}_{dp} - 0}{\tau_{cp} - 0} = \frac{m_p^* \vec{v}_{dp}}{\tau_{cp}}$$

$$\vec{v}_{dp} = \frac{q\tau_{cp}}{m_p^*} \vec{E} = \mu_p \vec{E}$$

Gustine struja elektrona i šupljina

Gustine driftovskih struja elektrona koncentracije n i šupljina koncentracije p su:

$$\vec{J}_{n(dr)} = -qn\vec{v}_{dn}$$

$$\vec{J}_{p(dr)} = qp\vec{v}_{dp}$$

Pri čemu je q elementarno naelektrisanje:

$$q = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Ukupna gustina driftovske struje elektrona i šupljina je:

$$\vec{J}_{dr} = \vec{J}_{n(dr)} + \vec{J}_{p(dr)}$$

$$\vec{J}_{dr} = q(\mu_n n + \mu_p p)\vec{E}$$

$$\vec{J}_{dr} = \sigma \vec{E}$$

Specifična provodnost i specifična otpornost poluprovodnika

Specifična provodnost poluprovodnika σ je:

$$\sigma = q(\mu_n n + \mu_p p)$$

Specifična otpornost poluprovodnika ρ je obrnuto
proporcionalna specifičnoj provodnosti poluprovodnika σ :

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q(\mu_n n + \mu_p p)}$$

Osnove elektronike

III semestar

POLUPROVODNICI 1