

The background is a dark green field filled with a complex network of lighter green lines that resemble circuit board traces. These lines are interconnected with numerous small yellow circles, some of which are arranged in vertical columns on the left and right sides of the image. The overall effect is a stylized, high-tech representation of electronic circuitry.

Poluprovodnički materijali

Katedra za elektroniku

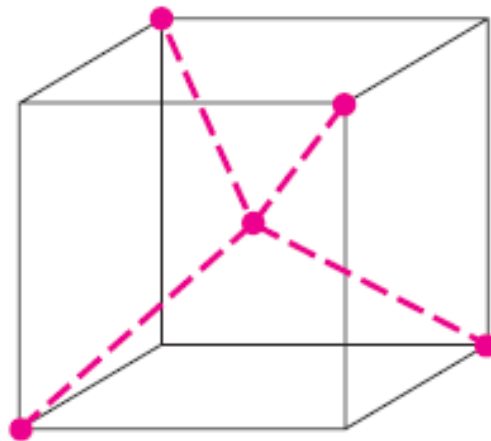
Poluprovodnici

- Savremene elektronske komponente pretežno se izrađuju od **poluprovodničkih** materijala. Kao što sam naziv sugerije, njihova električna provodnost je veća nego kod izolatora, a manja nego kod provodnih materijala.
- Materijali koji poseduju željene osobine su elementi IV grupe periodnog sistema (**Si**, Ge), ili legure koje sačinjavaju elementi različitih grupa.

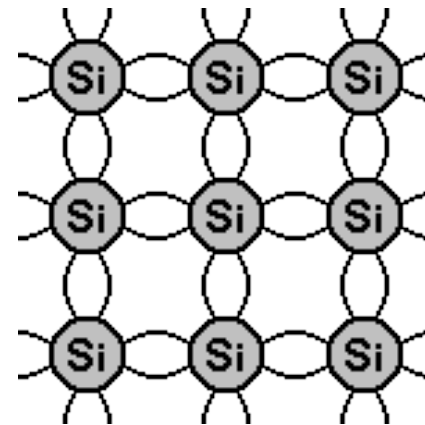
Poluprovodnički element		Poluprovodnička legura	
Si	Silicijum	GaAs	Galijum-arsenid
Ge	Germanijum	GaP	Galijum-fosfid
		AlP	Aluminijum-fosfid
		AlAs	Aluminijum-arsenid
		InP	Indijum-fosfid

Kristalna rešetka silicijuma

- Elementarni silicijum, koji je najrasprostranjeniji i najviše korišćen poluprovodnički materijal kristališe čineći dijamantsku kristalnu rešetku u kojoj je svaki atom silicijuma okružen sa po 4 neposredna suseda na jednakim udaljenostima.
- Susedni atomi silicijuma međusobno su povezani kovalentnim vezama



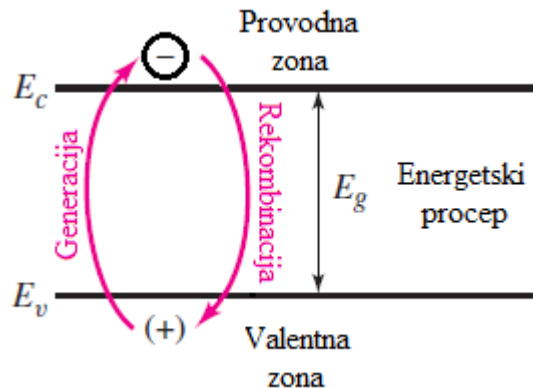
3D prikaz



2D prikaz

Generacija i rekombinacija

- Kovalentne veze formiraju parovi elektrona koji pripadaju valentnim zonama susednih atoma silicijuma u rešetki. Da bi elektron prešao iz valentne u provodnu zonu, potrebno mu je saopštiti energiju kojom se savladava **energetski procep**.



- Prilikom prelaska elektrona iz valentne u provodnu zonu, na valentnom nivou ostaje **šupljina** koja se tretira kao nosilac elementarnog pozitivnog naelektrisanja i koja pored slobodnog elektrona takođe može učestvovati u provođenju struje.
- Proces formiranja para elektron-šupljina izazvan prelaskom elektrona iz valentne u provodnu zonu naziva se **generacija**, a suprotan proces **rekombinacija**.

Sopstveni poluprovodnik

- Čist kristal silicijuma u kojem je zanemarljiva koncentracija primesa drugih elemenata predstavlja tzv. **sopstveni poluprovodnik** (engl. *intrinsic semiconductor*).
- U sopstvenom poluprovodniku procesi generacije i rekombinacije se spontano odvijaju usled dejstva toplotne energije. Koncentracije slobodnih elektrona i šupljina su jednake i date su izrazom:

$$n_i = p_i = \sqrt{A \cdot T^3 \cdot e^{-\frac{E_g}{k \cdot T}}}$$

- n_i je koncentracija slobodnih elektrona, odnosno broj slobodnih elektrona po jedinici zapremine u sopstvenom poluprovodniku
- p_i je koncentracija šupljina u sopstvenom poluprovodniku
- A je konstanta koja zavisi od tipa poluprovodničkog materijala, za Si iznosi $1.08 \cdot 10^{31} \text{cm}^{-3} \text{K}^{-6}$
- T je apsolutna temperatura (u stepenima Kelvina)
- E_g je veličina energetske procepa, za Si iznosi $E_g = 1.12 \text{eV}$
- k je Bolcmanova konstanta, $k = 8.62 \cdot 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}}$

- **Primer:** za silicijum na sobnoj temperaturi ($T=300\text{K}$)

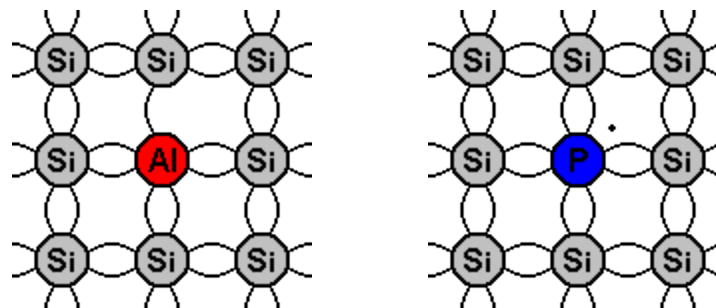
$$n_i = p_i = 6.72 \cdot 10^9 \frac{\text{elektrona (ili šupljina)}}{\text{cm}^3}$$

Primesni poluprovodnik

- Na električnu provodljivost silicijuma moguće je uticati unošenjem primesa drugih elemenata u kristalnu rešetku. Proces unošenja primesa naziva se **dopiranje**, a atomi primesa **dopanti**. Kao koriste se elementi III i V grupe periodnog sistema:

III	V
B (bor)	N (azot)
Al (aluminijum)	P (fosfor)
Ga (galijum)	As (arsenik)
In (indijum)	Sb (antimon)

- Atomi elemenata V grupe imaju 5 valentnih elektrona. Od toga, 4 elektrona učestvuju u formiranju kovalentnih veza sa susednim atomima silicijuma, a peti elektron postaje slobodan i prelazi u provodnu zonu. Zbog "doniranja" elektrona, ovakve primese se nazivaju **donorima**.
- Sa druge strane, atomi elemenata III grupe imaju 3 valentna elektrona. Njihovim unošenjem u kristalnu rešetku se uvode nove šupljine, usled čega se ovakve primese nazivaju **akceptorima**.



Koncentracija nosilaca naelektrisanja

- U poluprovodniku koji je dopiran donorima, akceptorima, ili čak primesama oba tipa (tzv. kompenzovani poluprovodnik), kao nosioci naelektrisanja istovremeno su prisutni termički generisani elektroni i šupljine, elektroni koji potiču od donorskih primesa i šupljine koje potiču od akceptorskih primesa. Prilikom izražavanja koncentracija nosilaca koriste se sledeće oznake:

- n_i - koncentracija elektrona u sopstvenom poluprovodniku
- p_i - koncentracija šupljina u sopstvenom poluprovodniku
- n - ukupna koncentracija elektrona u primesnom poluprovodniku
- p - ukupna koncentracija šupljina u primesnom poluprovodniku
- N_D - koncentracija donorskih primesa
- N_A - koncentracija akceptorskih primesa

- U uslovima termičke ravnoteže, važi **zakon dejstva masa**:

$$n \cdot p = n_i^2$$

- Pošto je kristalna rešetka poluprovodnika u celini električno neutralna (tj. $Q_+ = Q_-$), važi i **zakon održanja naelektrisanja**:

$$N_D + p = N_A + n$$

Tipovi poluprovodnika

- Primenom zakona dejstva masa i zakona održanja naelektrisanja dobijaju se izrazi za koncentracije elektrona, odnosno šupljina:

$$n \cdot p = n_i^2 \Rightarrow p = \frac{n_i^2}{n}$$

$$\frac{n_i^2}{n} + N_D = n + N_A$$

$$n^2 + (N_A - N_D) \cdot n - n_i^2 = 0$$

$$n_{1/2} = \frac{(N_D - N_A) \pm \sqrt{(N_D - N_A)^2 + 4n_i^2}}{2}$$

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

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

- Mogući slučajevi:

a) Sopstveni poluprovodnik:

$$N_D - N_A = 0 \Rightarrow n = p = n_i$$

b) Poluprovodnik n-tipa:

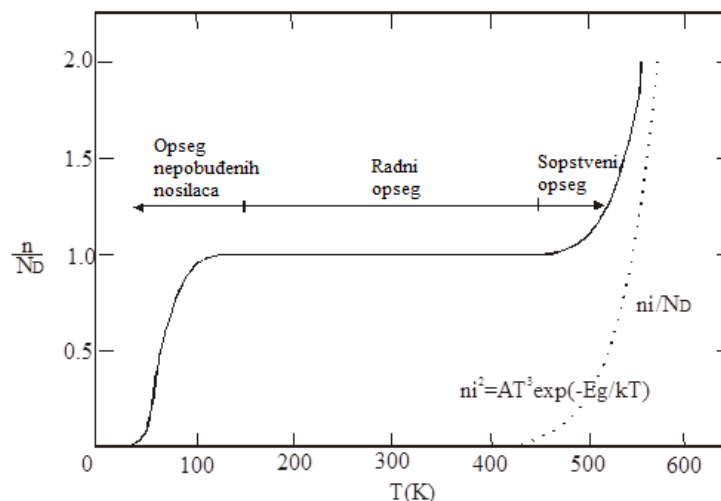
$$N_D - N_A \approx N_D \wedge N_D \gg n_i \Rightarrow \begin{cases} n \approx N_D \\ p \approx \frac{n_i^2}{N_D} \end{cases}$$

c) Poluprovodnik p-tipa:

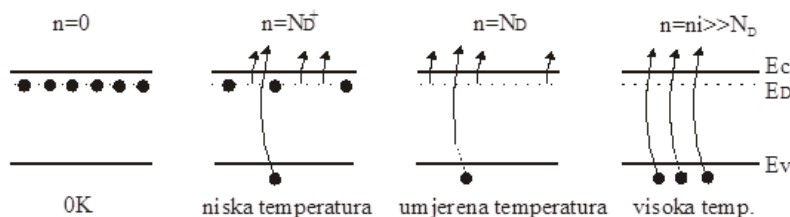
$$N_A - N_D \approx N_A \wedge N_A \gg n_i \Rightarrow \begin{cases} p \approx N_A \\ n \approx \frac{n_i^2}{N_A} \end{cases}$$

d) Dopirani poluprovodnik gde je $n_i \gg |N_A - N_D| \Rightarrow n \approx p \approx n_i$

Temperaturna zavisnost koncentracije elektrona u poluprovodniku n-tipa



(a)



- Na niskim temperaturama, donorski atomi su nepotpuno jonizovani, pošto deo elektrona ostaje "zamrznut" (nepobuđen). Koncentracija elektrona je manja od koncentracije donora, pa se ovaj temperaturni opseg naziva **opsegom nepobuđenih nosilaca**.
- Sa povećanjem temperature, donori se potpuno jonizuju. Koncentracija elektrona približno je jednaka koncentraciji donora. Ovo je tzv. **primesni opseg**, odnosno **radni opseg** u kojem uobičajeno rade elektronske komponente.
- Na visokim temperaturama, koncentracija termički generisanih parova elektron-šupljina počinje da dominira nad koncentracijom donora, pa poluprovodnik ulazi u **sopstveni opseg**, gde se ponaša približno kao sopstveni poluprovodnik.