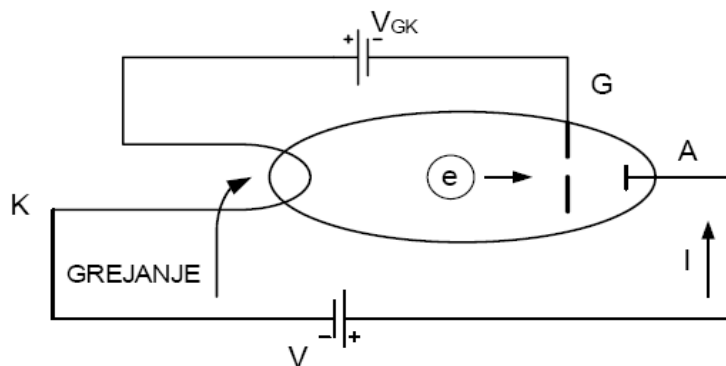


2. Osnovi fizike poluprovodnika

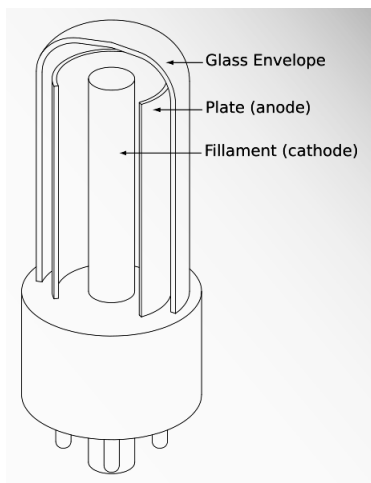
- Osnovi vakuumske elektronike

Kretanje elektrona u vakuumu (početak)

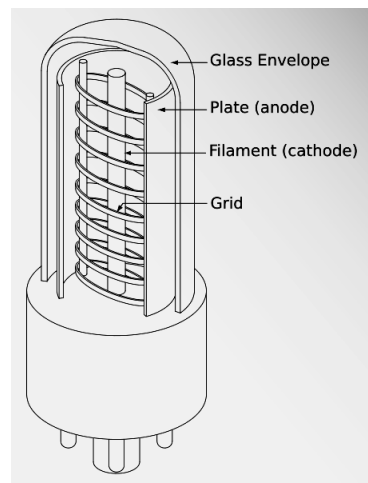
Fleming 1904. godina



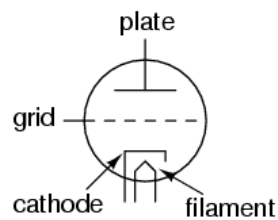
glomazno
velika potrošnja energije



Cevna dioda



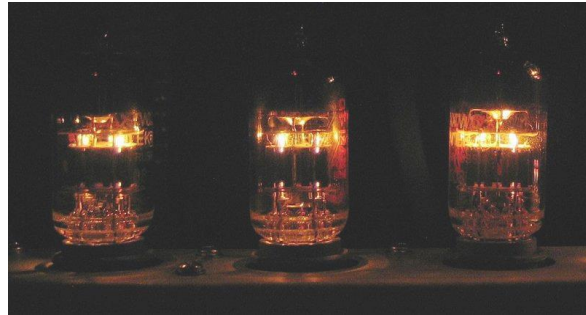
Cevna trioda



el. simbol triode



Minijaturne elekt.cevi 1960-tih



Savremene cevi unutar gitarskog pojačavača

- Klasifikacija materijala prema otpornosti (provodnosti) :

- **Izolatori $\rho > 10^5 [\Omega\text{cm}]$**

- plastika, guma, bakelit, keramika,...

- **Poluprovodnici $10^{-3} [\Omega\text{cm}] < \rho < 10^5 [\Omega\text{cm}]$**

- Ge (germanijum), Si (silicijum), GaAs (galijum-arsenid),...

- **Provodnici $\rho < 10^{-2} [\Omega\text{cm}]$**

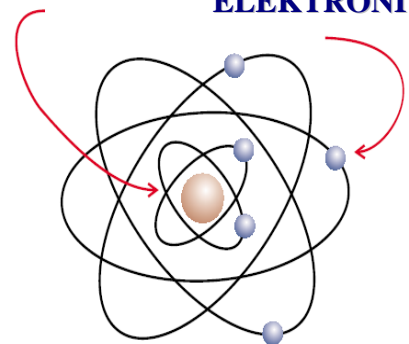
- Au (zlato), Ag (srebro), Pt (platina), Cu (bakar), Al (aluminijum)...

- Provodna svojstva zavise od elektronske strukture materijala

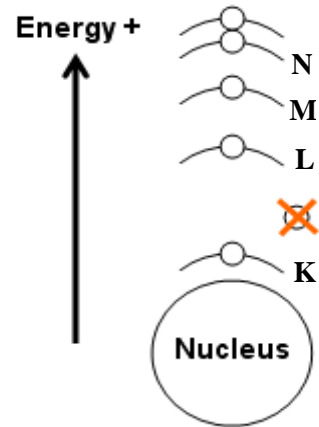
- Atom elementa je najmanja čestica koja ima sve njegove hemijske osobine.
- Broj elektrona jednak je broju protona u jezgru kada je atom neutralan
- U Borovom modelu putanja elektrona je kvantovana
- Svakom kvantnom stanju odgovara jedan energetska nivo
- Udaljenost elektrona od jezgra određena je energijom koju taj elektron poseduje
- Elektroni nepobuđenog atoma zauzimaju najniže energetske nivoe
- Elektron može da se nađe samo na nekom od diskretnih energetskih nivoa određenih glavnim kvantnim brojem n
- Vrednost energetskih nivoa elektrona u atomu izražava se u eV: $1\text{eV} = 1.60219 \times 10^{-19}\text{J}$
- Grupe elektrona koje imaju isti kvantni broj n obrazuju opne (elektronske ljuske): **K, L, M, N, O, P, Q** ljuske
- Za svaku ljusku postoji tačno određen maksimalni broj elektrona

JEZGRO

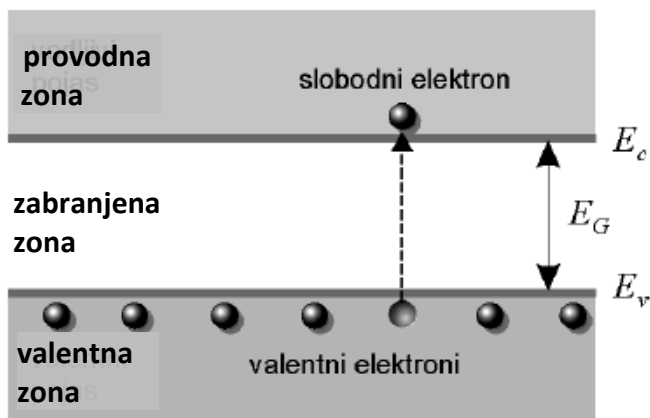
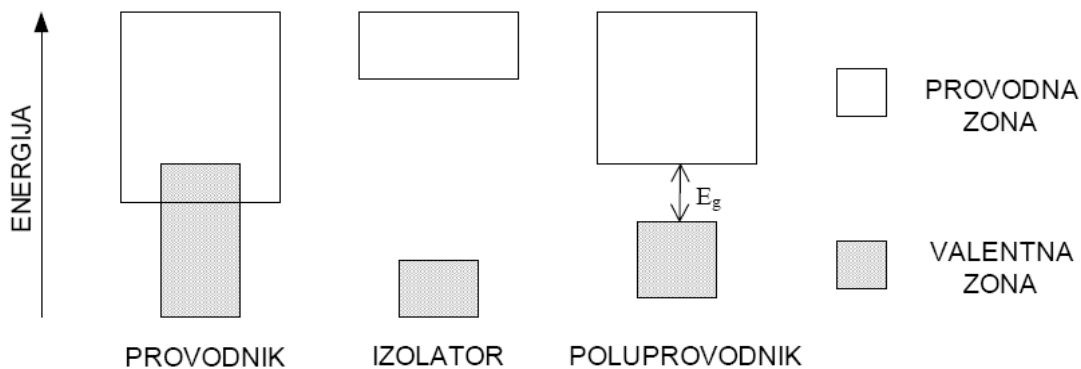
ELEKTRONI



- Ljuska koja je najudaljenija od jezgra atoma naziva se valentna ljuska
- Provodnost materijala (otpornost) određena je brojem elektrona u valentnoj ljusci (*valentni elektroni*)
- Stabilna struktura valentne ljuske je popunjenost sa 8 elektrona
- Provodnost je bolja ukoliko je manje elektrona u valentnoj ljusci
- Dobri izolatori imaju 8 valentnih elektrona
- Valentni elektroni su najslabije vezani za jezgro
- Valentni elektroni učestvuju u hemijskim reakcijama, pojavama provodnosti i svetlosnim pojavama.



- Provodna i valentna zona – energetske dijagrami

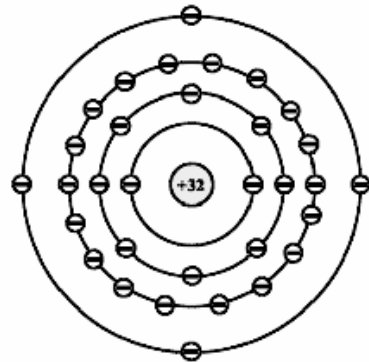


Energetski procep silicijuma Si, $E_{g, Si} = 1.12 [eV]$, germanijuma Ge, $E_{g, Ge} = 0.7 [eV]$ na sobnoj temperaturi $300^0 K$.

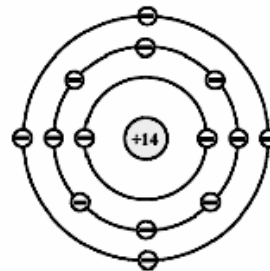
Energetski procep izolatora je veći od 5 [eV] na sobnoj temperaturi, tipično 8[eV].

Energetski procep poluprovodnika opada sa porastom temperature ($E_g \downarrow$ kada $T \uparrow$) jer raste termička energija elektrona.

- Bezprimesni (nedopirani, intrinzični, čisti) poluprovodnik
 - Čist poluprovodnik je materijal bez hemijskih primesa. Najčešće korišćeni poluprovodnički materijali su:
Silicijum (Si), maksimalna radna temperatura 200 °C
Germanijum (Ge), maksimalna radna temperatura 100 °C
Galijum-arsenid (GaAs), maksimalna radna temperatura 300 °C
 - Elementarni poluprovodnici imaju četiri valentna elektrona.

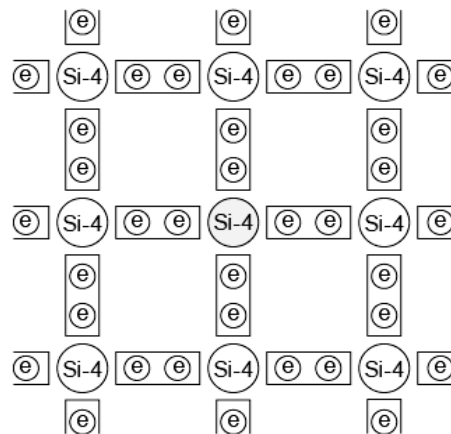
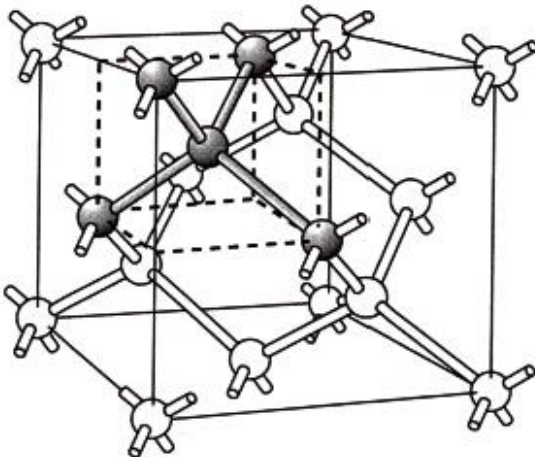
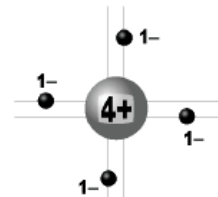


Germanium Atom



Silicon Atom

- Silicijum, Si
 - najčešće korišćeni poluprovodnički element
 - tetraedarska (dijamantska) kristalna rešetka
 - koncentracija atoma u rešetki je $5 \cdot 10^{22} [\text{atoma/cm}^3]$



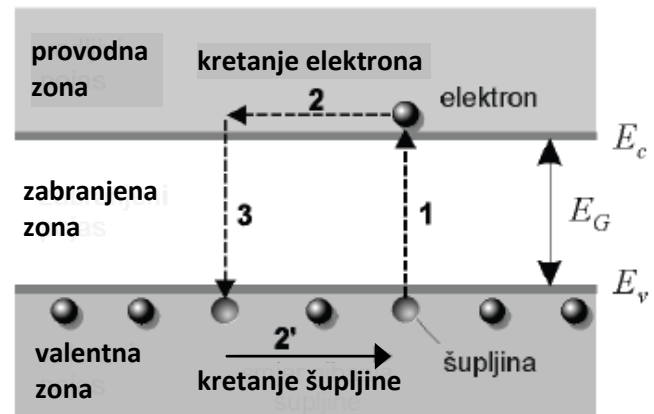
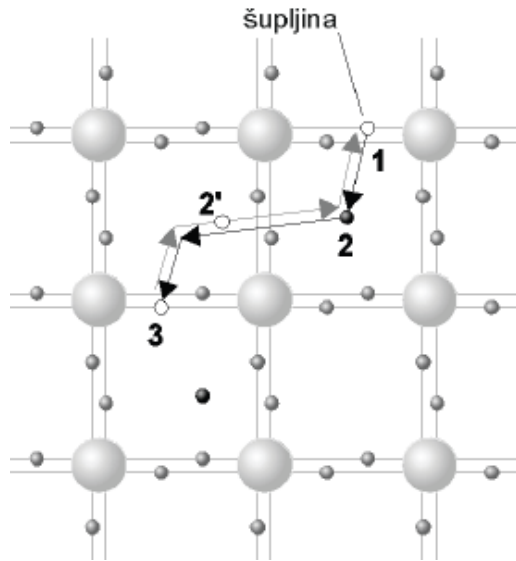
Prostorni i ravanski model kristalne rešetke Silicijuma, Si.

Provodnost određuju valentni elektroni (najslabije vezani za jezgro).

Na $T=0[\text{K}]=-273[^\circ\text{C}]$ svi valentni elektroni su u valentnoj zoni, nema slobodnih elektrona, nema provođenja struje.

Na $T > 0\text{[K]}$ toplota raskida izvestan broj kovalentnih veza, neki elektroni se oslobadjaju iz valentne i prelaze u provodnu zonu, dajući tako slobodne elektrone koji mogu provoditi električnu struju.

- Generacija i rekombinacija



- 1 – oslobađanje elektrona iz kovalentne veze (generacija nosilaca naelektrisanja)
- 2 – kretanje elektrona u provodnoj zoni kroz kristalnu rešetku
- 3 – povratak elektrona u kovalentnu vezu (rekombinacija nosilaca naelektrisanja)
- 2' – ekvivalentno kretanje šupljine u valentnoj zoni kroz kristalnu rešetku

- Generacija para slobodni elektron-šupljina. Elektron apsorbira energiju, napušta valentnu zonu unutar matičnog atoma, postaje slobodan, prelazi u provodnu zonu, ostavljajući za sobom upražnjeno mesto u valentnoj zoni – šupljinu. Šupljina je fiktivna čestica koja ima masu jednaku masi elektrona i pozitivno naelektrisanje jednako naelektrisanju elektrona, fizički to je samo upražnjeno mesto u valentnoj zoni poluprovodnika.
- Rekombinacija. Slobodni elektron emituje (izgubi) energiju (na primer, zbog sudara sa čvorištem kristalne rešetke), pada nazad u valentnu zonu i popunjava upražnjenu kovalentnu vezu – šupljinu.

Generacija je nastajanje para elektron-šupljina, a rekombinacija njihovo nestajanje.

Energija slobodnih elektrona (provodna zona) je veća od energije šupljina (valentna zona).

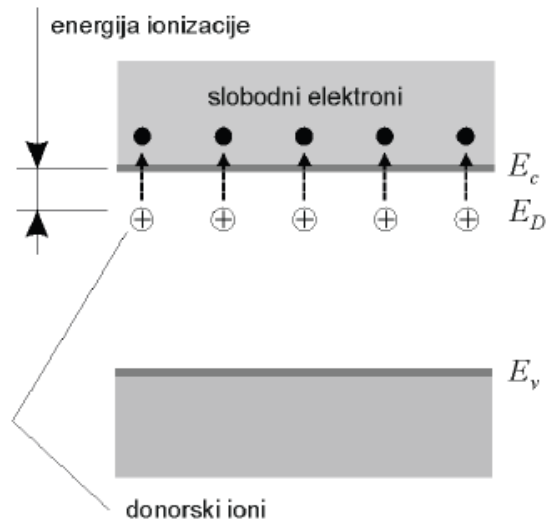
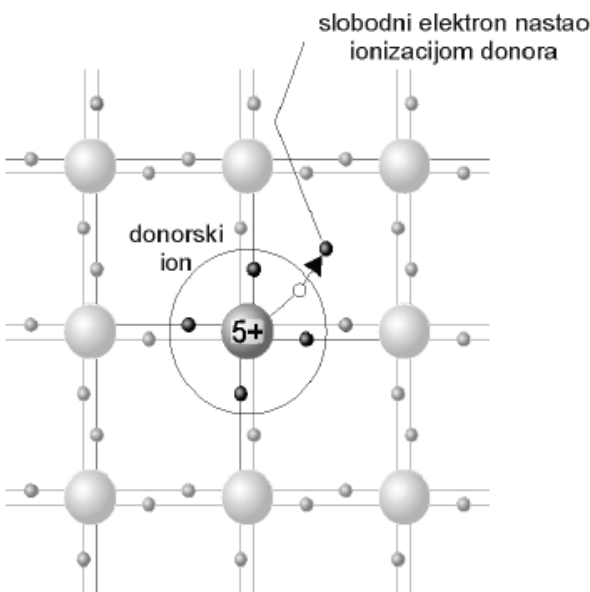
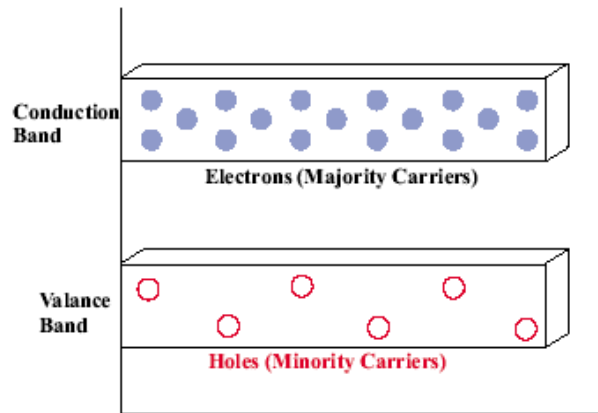
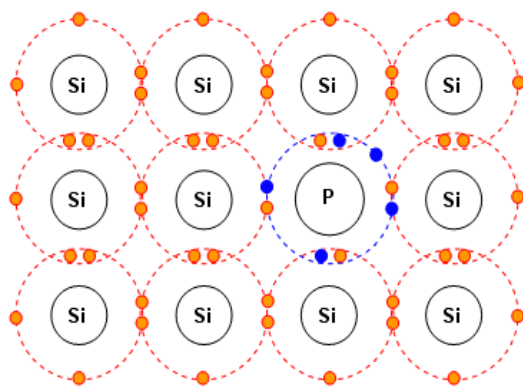
Sopstvena koncentracija elektrona n_i i šupljina p_i u čistom poluprovodniku, u stanju termodinamičke ravnoteže, je jednaka ($n_i = p_i$) jer su svi slobodni elektroni i šupljine nastali *isključivo* procesom generacije.

Na normalnoj temperaturi od 300^0K , u čistom Si poluprovodniku nalazi se $n_i = p_i = 1.45 \cdot 10^{10} [\text{cm}^{-3}]$ parova slobodni elektron–šupljina, pa je čist poluprovodnik na sobnoj temperaturi veoma loš provodnik.

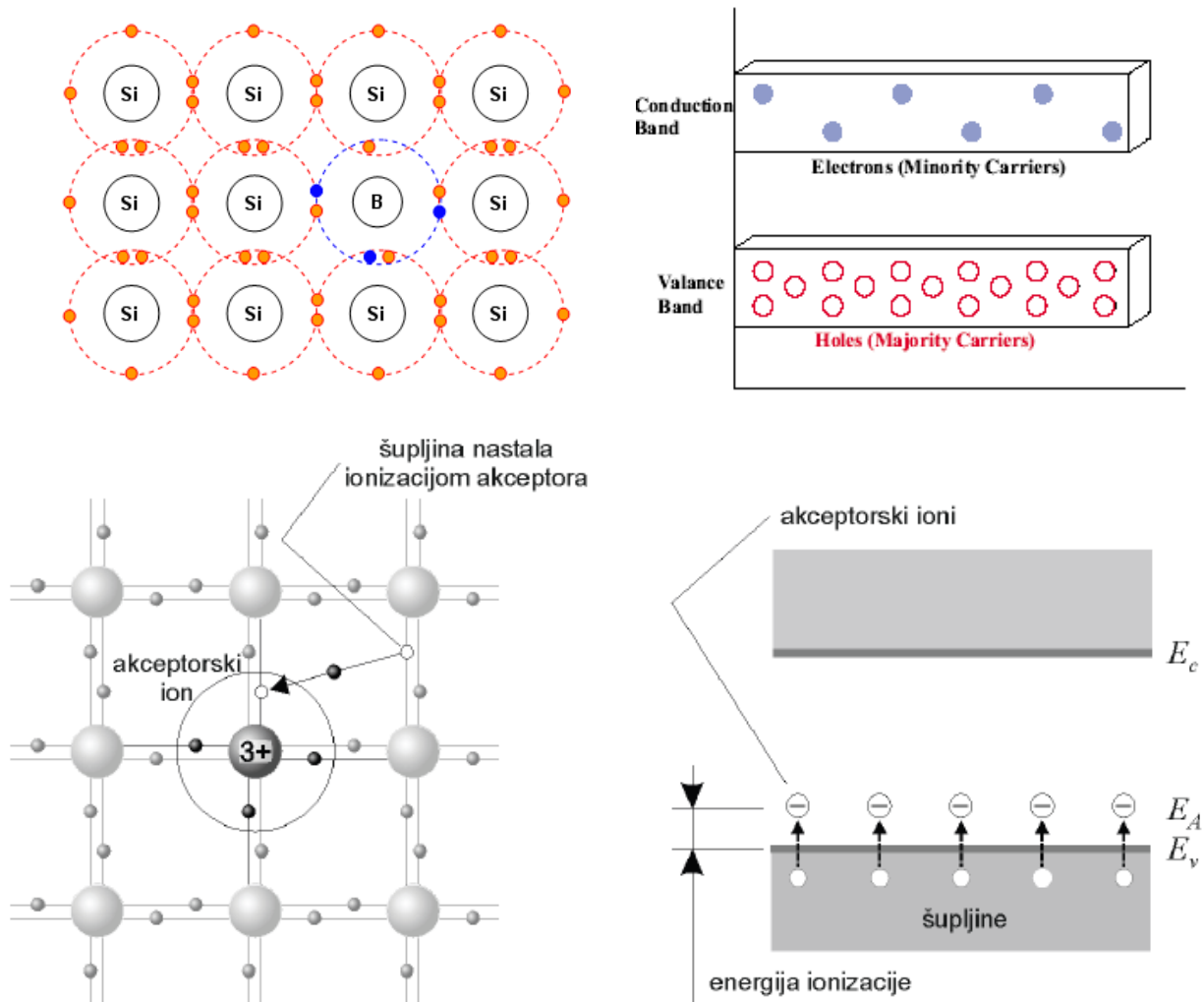
Koncentracija atoma volframa je $\sim 6 \cdot 10^{22} [\text{atoma/cm}^3]$, svaki atom odaje 2 valentna elektrona provodnoj zoni, pa je koncentracija slobodnih elektrona kod volframa na 300^0K , $n_{iW} \sim 1.2 \cdot 10^{23} [\text{elektrona/cm}^3]$, dakle $n_{iW} \gg n_{iSi}$.

Sa porastom temperature provodnost metala opada, a provodnost poluprovodnika raste.

- Dopiranje – postupak nezavisnog generisanja elektrona i šupljina
 - Dodavanjem petovalentnih donorskih primesa (P, As, ...) čistom silicijumu dobija se poluprovodnik N-tipa sa elektronima kao većinskim nosiocima, $n \gg p$. Donori, koncentracije atoma N_d vrlo lako odaju valentne elektrone provodnoj zoni. Otpuštanjem 5. valentnog elektrona donorski atomi postaju pozitivni joni. Iza slobodnog elektrona nastalog "doniranjem" ne ostaje šupljina, ovo nije generacija. Tipična energija potrebna za jonizaciju donorskih atoma je svega reda $0.05\text{-}0.1 [\text{eV}]$.



- Dodavanjem trovalentnih akceptorskih primesa (B, Al, ...) čistom silicijumu dobija se poluprovodnik P-tipa sa šupljinama kao većinskim nosiocima, $p \gg n$. Akceptori koncentracije atoma N_a primaju elektrone. Primanjem 4. valentnog elektrona akceptorski atomi postaju negativno naelektrisani joni. Ovako nastale šupljine ne stvaraju slobodne elektrone, ovo nije generacija.



Potrebna je vrlo mala energija da elektron iz valentne zona Si predje u valentnu zonu atoma akceptora. Kao posledica nastaju negativno naelektrisani akceptorski jon i pozitivno naelektrisana šupljina bez generisanja slobodnog elektrona.

Koncentracija primesa se tipično menja u rasponu od 10^{14} - 10^{18} [atoma primesa/cm³]. Dodavanjem čak i vrlo malih koncentracija primesa provodnost poluprovodnika drastično raste.

Već na temperaturama iznad 100–150[K] svi atomi primesa su jonizovani.

Vrste primesa (P ili N tip) i njihova koncentracija mogu se tehnološki kontrolisati.

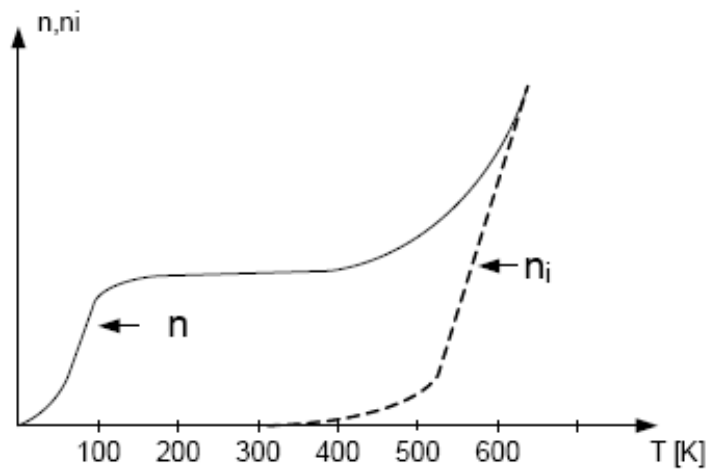
- Poluprovodnik u stanju termodinamičke ravnoteže

$n_0 \cdot p_0 = n_i^2 = A_0 T^3 e^{-\frac{E_{g0}}{kT}}$ (zakon „dejstva masa“) proizvod ravnotežnih koncentracija slobodnih elektrona i šupljina jednak je kvadratu sopstvene, intrinzične koncentracije.

n_0 – ravnotežna koncentracija slobodnih elektrona, p_0 – ravnotežna koncentracija šupljina, $n_i = p_i = 1.45 \cdot 10^{10} [\text{cm}^{-3}]$ sopstvena (intrinzična) koncentracija parova elektron-šupljina u čistom Si na sobnoj temperaturi (300⁰K).

Konstante: $A_0 = 1.26 \cdot 10^{33} [\text{atom}^2/\text{K}^3\text{m}^6]$, $E_{g0} = 1.165 [\text{eV}]$, energetski procep Si na 0⁰ [K], $k = 8.62 \cdot 10^{-5} [\text{eV/K}]$, Bolmanova konstanta

$N_d + p = N_a + n$, zbog globalne elektroneutralnosti primesnog poluprovodnika. Nakon procesa dopiranja poluprovodnik ostaje elektroneutralan !



Koncentracije slobodnih elektrona n i n_i u zavisnosti od temperature.

Ispod 150[K] nije izvršena jonizacija svih atoma primesa, pa je provodnost izuzetno mala.

Iznad 500[K], termičkim generisanjem, sopstvena koncentracija elektrona nadmašuje koncentraciju doniranih elektrona od strane primesa, pa poluprovodnik postaje dobar provodnik, ali gubi identitet (p ili n tip).

➤ Izračunavanje koncentracije elektrona i šupljina u dopiranom poluprovodniku.

Iz zakona dejstva masa sledi $n \cdot p = n_i^2 = A_0 T^3 e^{-\frac{E_{g0}}{kT}} = \text{const}(T)$, pa je za N tip poluprovodnika $n = N_d + n_i \approx N_d$, jer je uvek $N_d \gg n_i$.

$$\text{Iz } n \cdot p = n_i^2 \text{ sledi } p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{n_i \cdot n_i}{N_d} = \frac{n_i}{N_d} n_i.$$

Kako je uvek $n_i = p_i$, dobija se $p = \frac{n_i}{N_d} \cdot p_i$, dakle $p \ll p_i$. Analogno za P tip važi

$$n \ll n_i.$$

Dakle, koncentracija manjinskih nosilaca naelektrisanja u dopiranom poluprovodniku je mnogo manja od sopstvene (intrinzične) koncentracije. Koncentracija većinskih nosilaca je naravno mnogo veća od sopstvene koncentracije.

- Provođenje struje u poluprovodniku

- Nosioi naelektrisanja su slobodni elektroni (koncentracije n) i šupljine (koncentracije p). Donorski i akceptorski joni su čvrsto vezani unutar rešetke i ne učestvuju u provođenju struje.

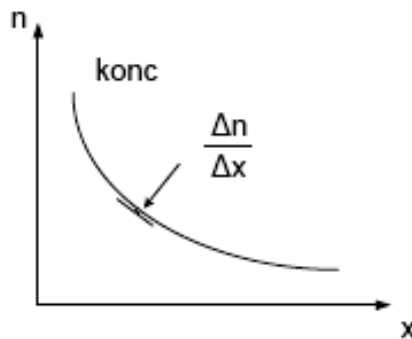
- Kondukcionalna (drift) komponenta struje nastaje usled kretanja nosilaca naelektrisanja pod dejstvom električnog polja:

$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E}$, $\sigma = q \cdot n \cdot \mu_n + q \cdot p \cdot \mu_p$, gde su μ_n i μ_p pokretljivost elektrona i šupljina, respektivno.

$\mu_n \approx 3\mu_p$, za Si na sobnoj temperaturi, jer se elektroni lakše pomeraju u provodnoj zoni nego šupljine u valentnoj zoni.

- Difuzionna komponenta struje nastaje usled kretanja nosilaca naelektrisanja od mesta veće ka mestu manje koncentracije

$J_n = q \cdot D_n \cdot \frac{dn}{dx}$ za elektrone i $J_p = -q \cdot D_p \cdot \frac{dp}{dx}$ za šupljine, gde su D_n i D_p difuzione konstante elektrona i šupljina, respektivno.



Gradijent koncentracije nosilaca

Difuzionna komponenta struje šupljina ima isti smer kao i smer opadanja koncentracije, zato znak minus ispred (jer je $dp/dx < 0$).

- $\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = V_T = 26[\text{mV}]$ na sobnoj temperaturi za Si. ← Ajnštajnovе relacije

- Ukupna struja je onda :

$$J = J_n + J_p = q\mu_n nE + qD_n \frac{dn}{dx} + q\mu_p pE - qD_p \frac{dp}{dx},$$

Ne moraju uvek postojati sve komponente struje u poluprovodniku.