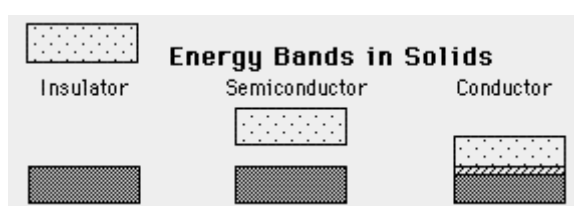


## Prilog 2.

### POLUVODIČI

Prema stupnju električne vodljivosti kristala razlikujemo metale, poluvodiče i izolatore. Pri temperaturi apsolutne nule otpor električni metala je minimalan, a ovisi o nepravilnostima kristalne strukture. Nasuprot metalima u savršenim izolatorima električni otpor na apsolutnoj nuli bio bi beskonačan. Poluvodiči su čvrste kristalne tvari kojima je električna vodljivost manja od električne vodljivosti metala, a veća od električne vodljivosti izolatora.

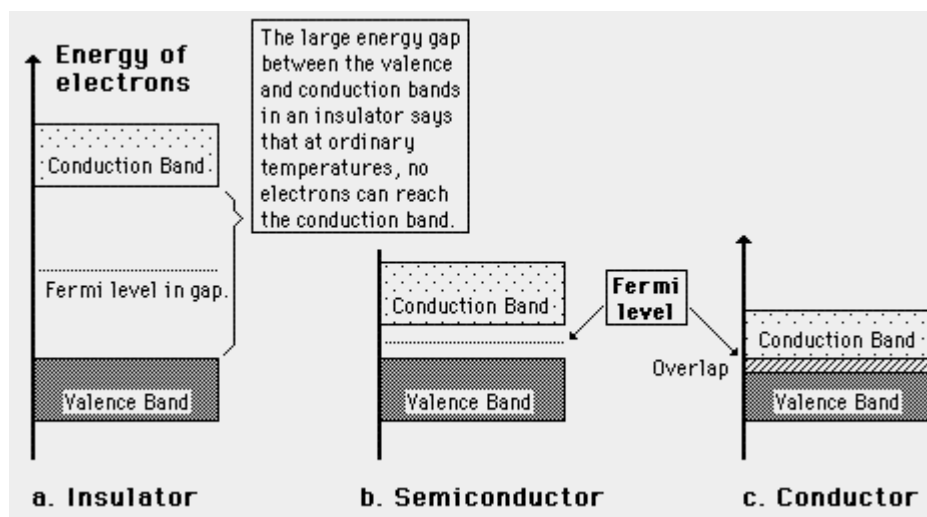
Različito ponašanje metala, poluvodiča i izolatora možemo objasniti pomoću koncepta dostupnih energijska stanja (slika 1.).



Slika 1. Energijske vrpce u čvrstim tijelima

Naime, međudjelovanjem atoma u čvrstom tijelu stvaraju se **energijske vrpce** (energy bands). Dok su atomi dovoljno udaljeni, energija elektrona određena je nizom diskretnih nivoa. Smanjivanjem razmaka između atoma, međudjelovanje postaje sve jače. Od svakog energijskog nivoa izoliranog atoma nastat će mnoštvo bliskih nivoa grupiranih u energijsku vrpcu. Širina vrpce raste s pojačanjem elektronskog međudjelovanja. Vrpce mogu biti razdvojene područjem energijskih stanja u kojima se elektroni ne mogu nalaziti, **energijskim procjepom** (energy gap), ili se mogu preklapati.

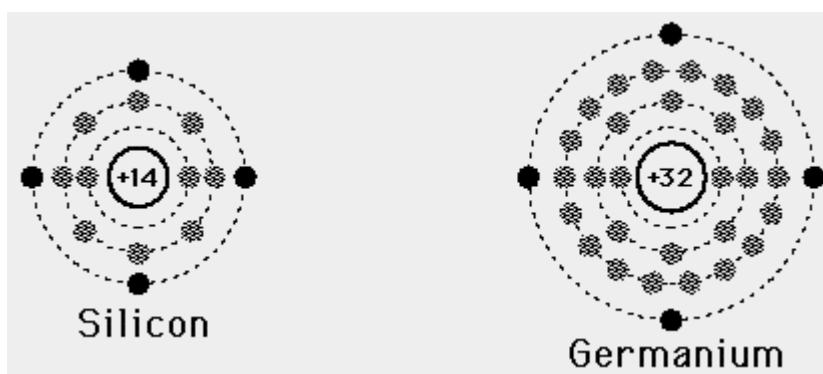
Kvantna teorija objasnila je različito ponašanje metala, poluvodiča i izolatora sa stupnjem popunjenosti energijskih vrpca. Kod izolatora i poluvodiča na apsolutnoj nuli valentni elektroni u potpunosti popunjavaju najvišu zauzetu vrpca, koju nazivamo **valentna vrpca**. Sljedeća viša vrpca, **vodljiva vrpca**, na apsolutnoj nuli je potpuno prazna, što znači da nema elektrona koji mogu sudjelovati u vođenju električne struje. Kod vodiča valentna i vodljiva vrpca se preklapaju pa dio elektrona može sudjelovati u vođenju električne struje i pri temperaturi apsolutne nule (slika 2.). Energijski procjep između valentne i vodljive vrpce u tipičnim izolatorima iznosi približno 5eV do 10eV, a u poluvodičima oko 1eV. Energijski procjep izolatora je preširok da bi se na temperaturama manjima od tališta, termički mogao pobuditi veći broj elektrona. Uži energijski procjep poluvodiča omogućuje dijelu elektrona da pri povišenim temperaturama prijeđe u vodljivu vrpcu proizvodeći pritom električnu struju.



Slika 2. Vodljiva i valentna vrpca kod izolatora, poluvodiča i vodiča

### Silicij i germanij

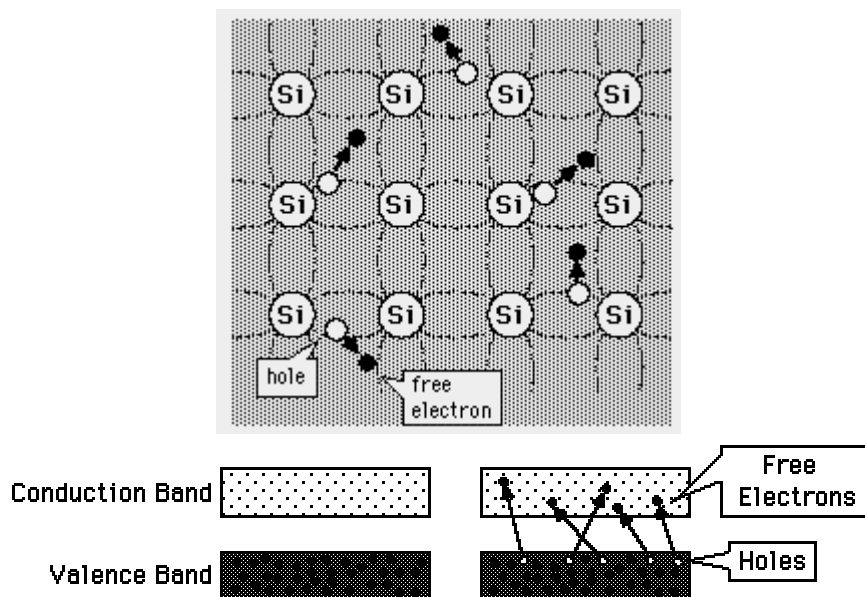
Najpoznatiji poluvodiči su silicij i germanij. Oba elementa su četverovalentna, a njihovi su atomi u kristalu vezani kovalentnim silama (slika 3.).



Slika 3. Silicij i germanij

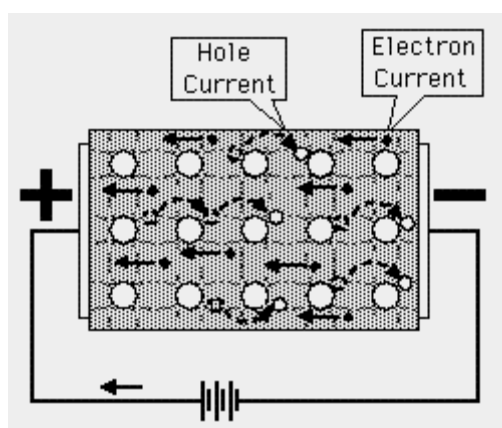
### Intrinsični poluvodiči

Idealno pravilan poluvodič bez defekata nazivamo **intrinzičan poluvodič**. Na temperaturi iznad apsolutne nule postoji konačna vjerojatnost da će elektron biti izbačen iz svog položaja ostavljajući iza sebe slobodno mjesto koje nazivamo "šupljinom" (slika 4.).



Slika 4. Elektroni i šupljine kod silicija

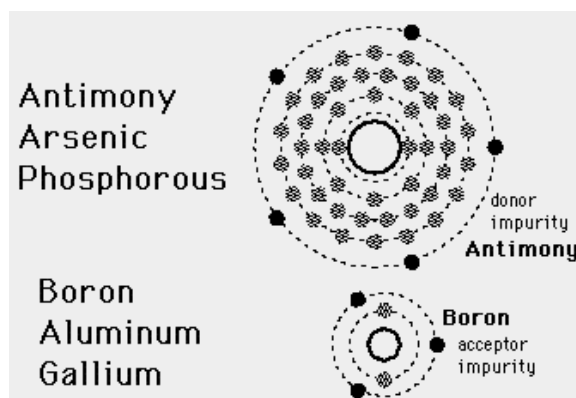
Ako primijenimo napon, elektroni i šupljine doprinose struji (slika 5.).



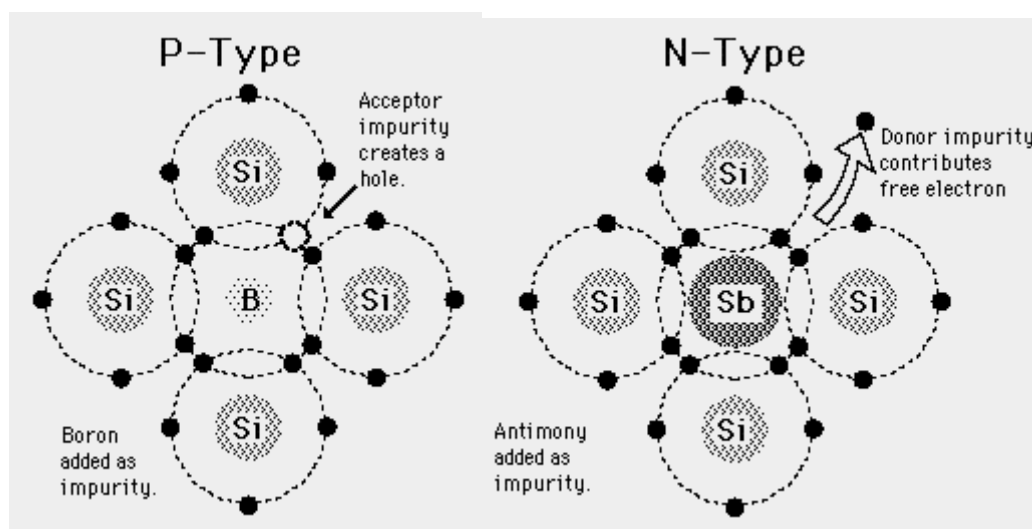
Slika 5. Struja elektrona i šupljina kod intrinzičnog poluvodiča

### Poluvodiči s primjesama

Dodavanje malog broja primjesa u pravilnu kristalnu rešetku silicija ili germanija mijenju se njihova električna svojstva. Ako su primjese peterovalentne (donori) onda dobivene poluvodiče nazivamo **n-poluvodičima**, a ako su trovalentne (akceptori) onda ih nazivamo **p-poluvodičima** (slike 5. i 6.).

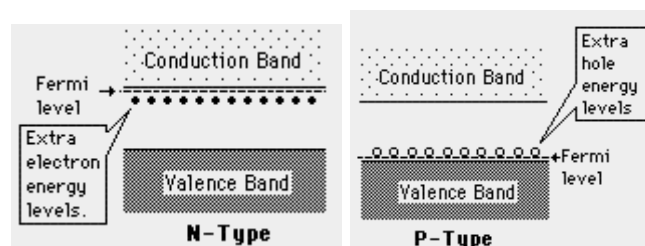


Slika 6. Donorske i akceptorske primjese



Slika 7. N- i p- tip poluvodiča

Primjena teorije vrpce pokazuje da su u slučaju n- i p- poluvodiča dobiveni dodatni energijski nivoi. Slabije vezani elektroni donorske primjese nalaze se u energijskim nivoima pri vrhu energijskog procjepa. Što znači da se ti elektroni mogu lako pobuditi u vodljivu vrpcu. Kod akceptorskih primjesa energijski nivoi šupljina u energijskom procjepu omogućavaju pobuđivanje elektrona iz valentne vrpce koji onda za sobom ostavljaju šupljine (slika 8.).



Slika 8. Energijske vrpce u dopiranim poluvodičima

## Elektronska raspodjela i Fermijev nivo

Osnovne značajke elektronske raspodjele na apsolutnoj nuli određuje Paulijev princip (tj. raspodjela elektrona po energijskim vrpcama određena je Fermi-Diracovom raspodjelom). Fermijev nivo određen je raspodjelom energijskih stanja i ukupnim brojem elektrona. Na apsolutnoj nuli sva energijska stanja

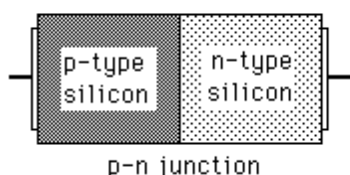
ispod Fermijevog potpuno su zauzeta, a sva stanja iznad Fermijevog prazna. Dakle, **Fermijeva energija  $E_F$**  je energija najvišeg zauzetog stanja elektrona pri temperaturi apsolutne nule.

Fermijev nivo kod metala nalazi se u valentnom pojasu, a kod poluvodiča u energijskom procjepu. Kod intrinzičnih poluvodiča Fermijev nivo nalazi se na polovici energijskog procjeka, kod p-tipa bliže valentnoj vrpici, a kod n-tipa bliže vodljivoj vrpici.

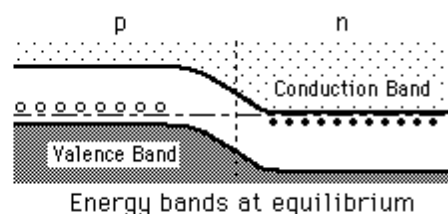
### p-n spoj

Spoje li se nekim tehnološkim postupkom (npr. legiranjem ili difuzijom) p-tip i n-tip poluvodiča nastaje p-n spoj (slika 9.). Ovakav spoj predstavlja najjednostavniji poluvodički element, poluvodičku diodu. Stoga se pri opisivanju svojstva p-n spoja govori o svojstvima diode.

Efektivni nositelji naboja (slobodni elektroni i šupljine) prisutni su u različitim koncentracijama u p i n tipu poluvodiča. Formiranjem p-n spoja dolazi do difuzije većinskih nositelja: elektroni difundiraju iz n-poluvodiča u p-poluvodič, a šupljine koje su većinski nositelji u p-tipu difundiraju iz p u n područje. Nastala struja većinskih nositelja naziva se **difuzijska struja**. Rekombinacijom elektrona i šupljina primjese u p-tipu poluvodiča postaju negativno nabijene, isto tako primjese u n-tipu odlaskom elektrona postaju pozitivno nabijene (slika 11.). Ovi naboji uspostavljaju električno polje kojem je smjer suprotan smjeru difuzijske struje. Nastalo polje uzrokuje struju manjinskih nositelja suprotnu smjeru gibanja većinskih nositelja, tzv. **driftnu struju**. Promjeni koncentracije nositelja naboja odgovara pomak svih energijskih nivoa u tim poluvodičima pa prema tome i Fermijevih nivoa. Ravnoteža između difuzijske i driftne struje uspostavlja se kad su Fermijevi nivoi s obje strane p-n spoja jednaki (slika 10.).

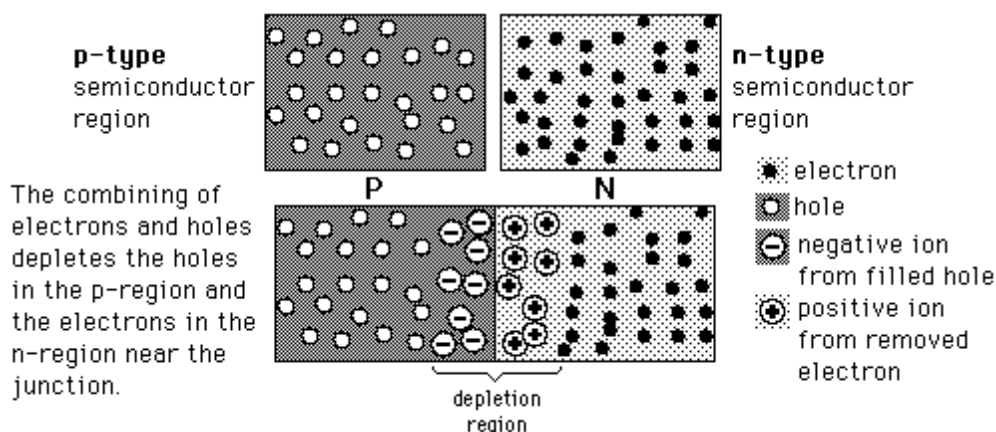


Slika 9. p-n spoj



Slika 10. Energijski nivoi u ravnotežnom stanju

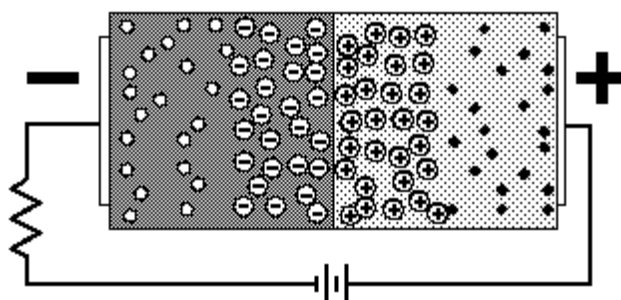
U ravnotežnom stanju difuzijska i driftna struje su jednake, pa je ukupna struja jednaka nuli. Na kontaktu između p- i n- poluvodiča stvara se osiromašeni sloj u kojem nema nositelja naboja i na čijim granicama je potencijal koji opada od n prema p strani (slika 11.). Razlika ovih potencijala naziva se **kontaktni napon**.



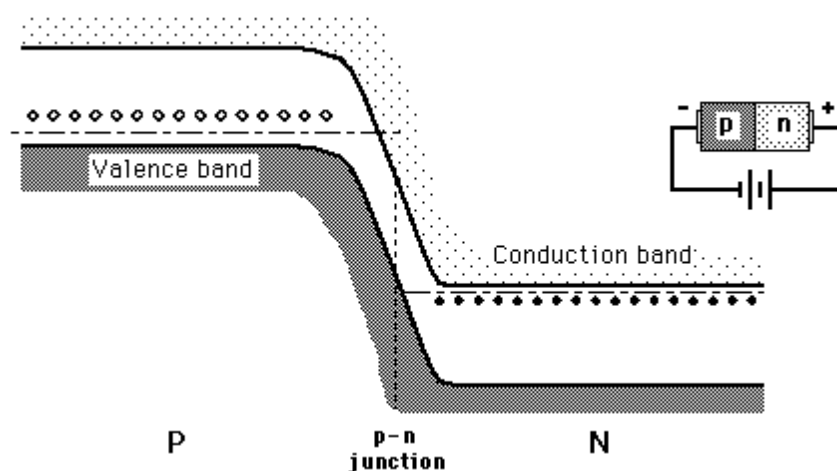
**Slika 11.** Rekombinacija elektrona i šupljina i nastajanje područja osiromašenja

### Nepropusno polarizirani p-n spoj

Narinemo li na p-n spoj napon, spoj se ponaša različito prema polaritetu napona. Ako je narinuti napona negativan na p-području, barijera se dodatno osiromašuje nositeljima i postaje još slabije vodljiva (slika 12.). Ovakav napon dodatno smanjuje struju većinskih nositelja. Međutim i u nepropusno polariziranom p-n spoju imamo struju manjinskih nositelja (driftnu struju). Ta struja ovisi o koncentraciji manjinskih nositelja u oba tipa poluvodiča i o temperaturi.



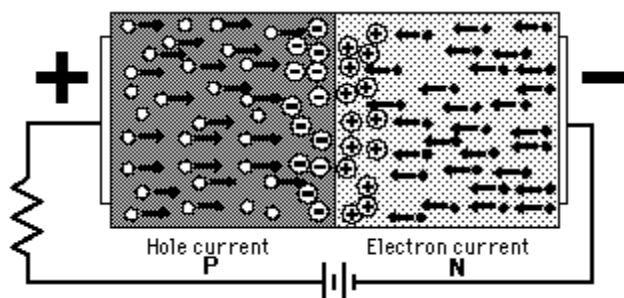
**Slika 12a.** Gibanje većinskih nositelja pri reverznoj polarizaciji



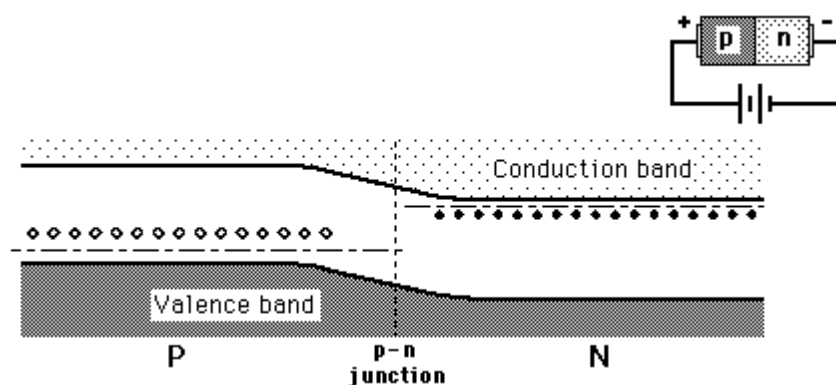
**Slika 12b.** Prikaz energijskih nivoa u reverznom modu

## Propusno polarizirani p-n spoj

Narinuti napon u propusno polariziranom p-n spoju smanjuje kontaktni potencijal i većinski nositelji se guraju prema području barijere. Rekombinacija šupljina i elektrona održava stalnu difuzijsku struju kroz spoj (slika 13.). S porastom napona struja brzo raste jer broj nositelja naboja koji mogu preskočiti potencijalnu barijeru raste eksponencijalno.



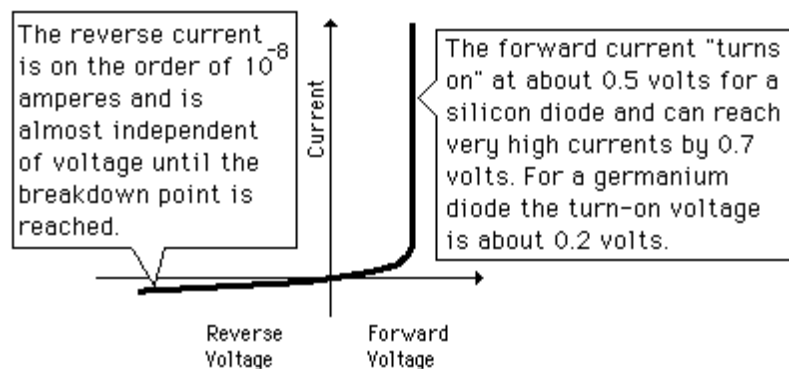
Slika 13a. Gibanje većinskih nositelja pri popusnoj polarizaciji



Slika 13b. Prikaz energijskih nivoa u propusnom modu

## Svojstva p-n spoja

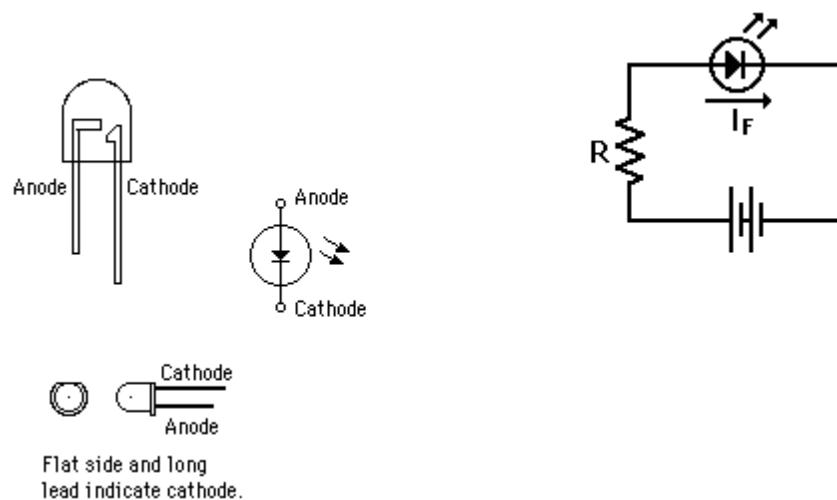
Osnovna primjena p-n spoja je njegovo ispravljačko djelovanje, tj. p-n spoj vodi struju samo u jednom smjeru. U propusnom modu struja raste eksponencijalno s povećanjem narinutog napona. Pri nepropusnoj polarizaciji difuzijska struja većinskih nositelja se smanjuje, pa prevladava mala struja manjinskih nositelja koja je neovisna o narinutom naponu (slika 14.).



Slika 14. Naponsko-strujna karakteristika diode

## Poluvodičke diode

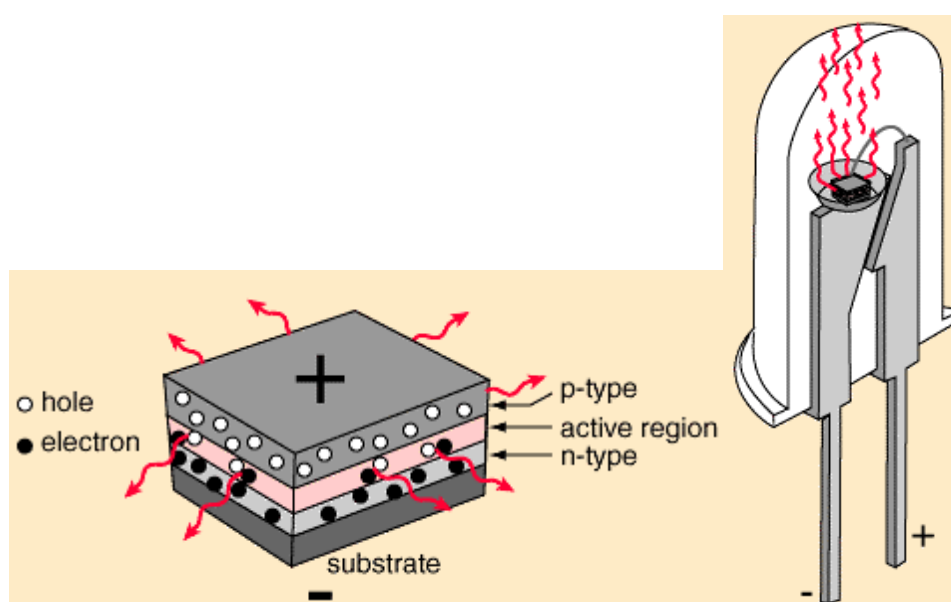
Poluvodičke diode su elementi sa dvije elektrode koje imaju nelinearnu naponsko-strujnu karakteristiku (slika 15.). Građene su od p-n spoja od različitih materijala ili od istog materijala različitih koncentracija primjesa. Danas se proizvodi velik broj tipova dioda s vrlo različitim karakteristikama, različitih oblika i dimenzija. Dioda se također razlikuju i po izboru materijala i po postupku kojim se proizvode. Osim kao ispravljači diode imaju i niz drugih primjena npr. stabilizacija i ograničavanje napona.



Slika 15. Poluvodičke diode

## LED - svijetleće diode (Light Emitting Diodes)

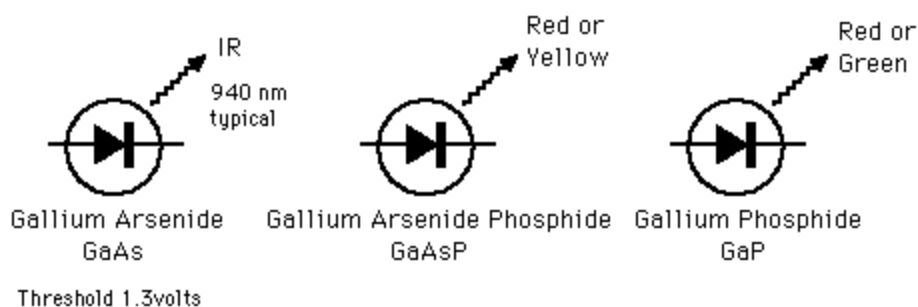
Jedan od načina konstrukcije LED-a je polaganje triju slojeva poluvodiča na podlogu. Između p- i n- tipa poluvodiča stavlja se aktivno područje koje ima svojstvo da rekombinacijom elektrona i šupljina emitira svjetlost (slika 16.).



Slika 16. LED građena od tri poluvodička sloja

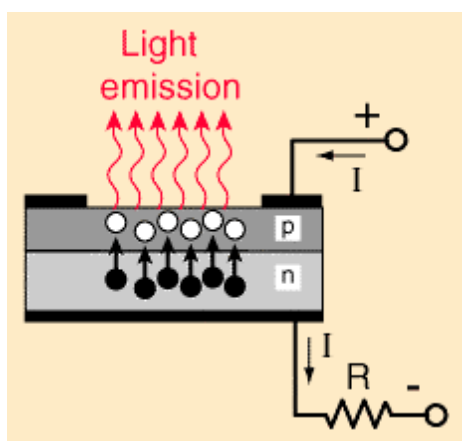


Nekoliko vrsta LED-a prikazano je na slici 17. Poluvodički spojevi od silicija i germanija ne koriste se u konstrukciji LED-a jer rekombinacijom ne proizvode infracrvenu ili vidljivu svjetlost.



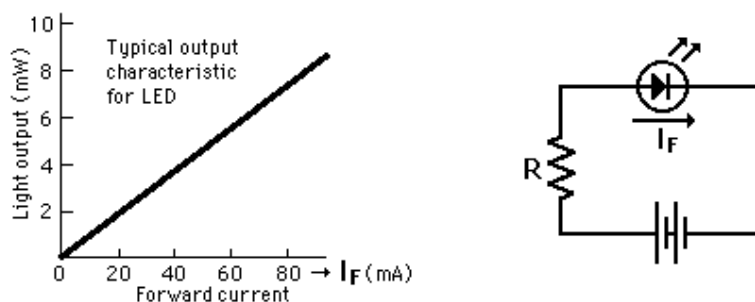
Slika 17. LED-e

U propusnoj polarizaciji šupljine i elektroni se guraju prema aktivnom području (području osiromašenja). Rekombinacijom elektrona i šupljina, elektron pada na niži energijski nivo i pri tom emitira foton energije  $h\nu$  (slika 18.). Energija emitiranog fotona približno je jednaka energijskom procjepu. Frekvencija emitiranih fotona ovisi o karakteristikama materijala. Ovaj proces naziva se **elektroluminiscencija**.



Slika 18. Elektroluminiscencija u LED-i

Materijal od kojeg je građeno aktivno područje ima svojstvo da su emitirani fotoni u infracrvenom ili vidljivom spektru. Intenzitet emitirane svjetlosti proporcionalan je struji kroz aktivno područje (slika 19.).



Slika 19. Ovisnost intenziteta emitirane svjetlosti i struje LED