

1. Podjele elektrotehničkih materijala

- 1.1 Uvod
- 1.2 Neke podjele materijala
- 1.3 Izbor materijala
- 1.4 Ispitivanje materijala
- 1.5 Građa tvari
- 1.6 Ionizacija
- 1.7 Spajanje atoma
- 1.8 Podjela materijala prema električnim svojstvima
- 1.9 Ekološki, ekonomski i društveni utjecaj materijala





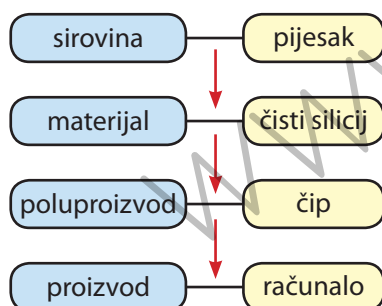
Slika 1.1-1

Različite sirovine: drvo, nafta, ugljen, hematit



Slika 1.1-2

Od sirovine do proizvoda



1.1 UVOD

Gdje god da se okrenemo, vidimo različite tvari i različite proizvode. Možemo vidjeti kamen, zemlju, vodu, drveće, kuće, ceste... Koja je razlika između zemlje ili nafte i ceste, a koja između drveta i ormara?

Razlika je u preradi. Drvo se moralo posjeći i obraditi. Potom ga je trebalo oblikovati u ormar. Za to je bio potreban ljudski ili strojni rad, a za obavljanje rada odgovarajući alat. Drvo je sirovina od koje se izrađuje ormar – konačni proizvod. Da bi se od sirovine napravio proizvod, potrebni su različiti alati i postupci obrade sirovine. Postupcima prerade sirovine u gotove proizvode bavi se **tehnologija**. Tehnologija dolazi od grč. *techne*, što znači umjetnost ili vještina, i *logos*, što znači riječ ili govor. To znači da je u tehnologiji riječ o umijeću (vještini). U tehnici je riječ o vještini prerade sirovina u poluproizvode ili konačne proizvode.

Sirovine su različiti materijali (slika 1.1-1), koji imaju različita svojstva. Najčešće se (ne i uvijek) izdvajaju iz tla. Međutim, u budućnosti se može očekivati i izdvajanje korisnih sirovina iz morske vode. Rijetke su sirovine koje se mogu odmah upotrijebiti. Zato se iz rude izdvaja potreban materijal. Stoga se može reći da je materijal prerađena sirovina. Poluproizvodi su materijali, koji su djelomično obrađeni, kao, primjerice, daska.

Ako se obradom sirovine dobivaju konačni proizvodi, koji imaju elektrotehničku funkciju, riječ je o **elektrotehničkim materijalima** i o tehnologiji elektromaterijala. Proizvodi koji se dobivaju tehnologijom elektromaterijala najčešće su komponente (sastavnice) većih cjelina. Proizvodni ciklus od sirovine do konačnog proizvoda ilustriran je na slici 1.1-2, na primjeru zlata.

Tehnologija je umijeće nalaženja najpovoljnijih, a ne najboljih rješenja. Tako je azbest idealan materijal kada je potrebna zaštita od požara. Međutim, vrlo je opasan jer uzrokuje opasnu bolest. Isto tako, srebro je bolji vodič električne struje, a koristi se bakar jer je jeftiniji.

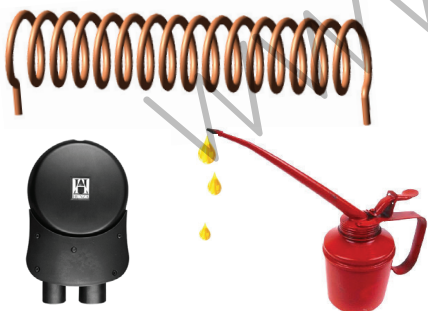
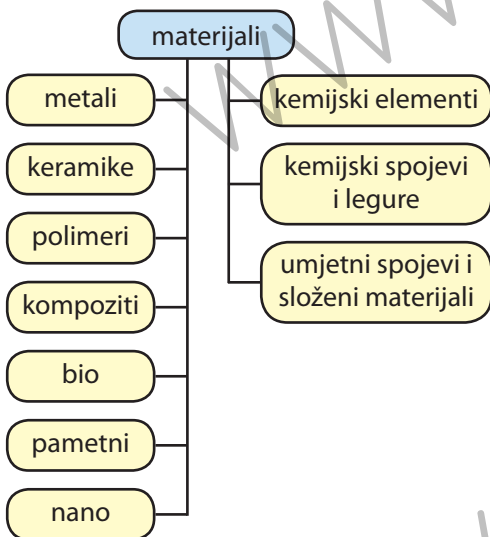
Jedan je od razloga proučavanja materijala taj da će se svaki tehničar ili inženjer tehničkih znanosti prije ili kasnije naći u situaciji kada će biti važne karakteristike materijala. Često je najveći problem izabrati pravi materijal za određenu namjenu. Potrebno je, primjerice, paziti na izračunate potrebne vrijednosti elektrotehničkih veličina, na norme i standarde koji su propisani zakonom ili koje zahtijevaju krajnji korisnici te na dostupnost komponenti i materijala, njihova svojstva, ekološke osobine i cijenu. Danas su osobito zanimljive ekološke osobine, kao što je biorazgradivost materijala.

Materijali su svugdje oko nas. Igraju tako značajnu ulogu da su se po njima nazivala i doba razvoja civilizacije, kao što su, primjerice, kameno doba, bronzano doba i sl. U početku su se koristili samo materijali koji ne iziskuju posebnu obradu, kao kamen, drvo i sl. S vremenom su ljudi naučili obrađivati materijale dostupne u prirodi, npr. termičkom

Napomena

Danas se sve češće upotrebljava izraz **kemijsko počelo** umjesto kemijskoga elementa.

Slitina ili legura je smjesa dvije ili više rastaljenih kovina, koje se miješaju, ili razmrvljenih tvari, koje se stapaju u čvrstu masu grijanjem bez taljenja (tzv. sinteriranje).



Slika 1.2-1

Vodič zavojnice (elektrotehnički materijal), kućište (konstrukcijski materijal), ulje (pomoćni materijal)

obradom. S time se dobilo na kvaliteti konačnih proizvoda. Sustavno proučavanje materijala omogućeno je razumijevanjem njegove građe.

U ovom poglavlju prikazat će se osnovne podjele materijala i njihova građa.

1.2 NEKE PODJELE MATERIJALA

Promatrajući razne materijale, primjećuje se da oni imaju različit izgled i različita svojstva. Svi su vidjeli hrđanje željeza. Isto tako, plastične vrećice iz trgovine ne hrđaju. Neki se materijali koriste za ambalažu, kao što su limenke za piće ili plastični sanduci za boce. Postavlja se pitanje, može li se materijale podijeliti na neke grupe sa sličnim svojstvima.

Materijale je moguće podijeliti na različite načine. Općenito, sve su tvari **kemijski elementi**, **kemijski spojevi**, **legure** ili **umjetni spojevi i složeni materijali**. Kemijski elementi i spojevi nalaze se u prirodi. Umjetne spojeve proizvode ljudi. Složeni materijali mogu nastati i u prirodi, ali najčešće su rezultat smišljenog djelovanja ljudi. Umjetni spojevi i složeni materijali su keramike, kompoziti, sintetički materijali kao polimeri, pametni materijali, biomaterijali, nanomaterijali i dr.

Materijali koji se koriste u elektrotehnici mogu se podijeliti na **elektrotehničke**, **konstrukcijske** i **pomoćne materijale**.

Elektrotehnički materijali služe za ostvarivanje temeljne zadaće električnih proizvoda. Ako je riječ o, primjerice, kabelu, on bi bio vodič. Njemu je zadaća voditi električnu struju. Elektrotehnički materijal može biti i izolacijski, magnetski i dr.

Konstrukcijski materijali služe za uobličavanje proizvoda u funkcionalnu cjelinu. Osim funkcije, konstrukcijski materijali pomažu u izgledu proizvoda. Služe za mehaničko povezivanje.

Namjena **pomoćnih materijala** je osiguranje boljeg i dugotrajnijeg rada električnog proizvoda. Služe u izradi i funkcioniranju elektrotehničkih proizvoda. To primjerice može biti premaz za zaštitu od korozije ili ulje za podmazivanje.

Slika 1.2-1 prikazuje primjere elektrotehničkih, konstrukcijskih i pomoćnih materijala.

Slijede glavne skupine materijala.

Metali su npr. željezo, aluminij, bakar, nikal, titan ili zlato. Mogu u sebi sadržavati primjese nemetalnih elemenata. Isto tako, mogu biti i legure dvaju ili više elemenata. Ovi su materijali žilavi, čvrsti, rastezljivi, otporni na lom, a mnogi dobro vode struju i toplinu. Nisu prozirni.



Slika 1.2-2

Primjeri nekih materijala: legure, plastika, keramika

Keramike su spojevi između metalnih i nemetalnih elemenata. Najčešće su spojevi kisika, ugljika ili dušika. To je široka skupina raznovrsnih materijala među koje se ubrajaju i porculan, staklo ili cement. Također su čvrsti i žilavi, ali ne i rastezljivi (duktilni) te osjetljivi na lomove. Često su izolatori i otporni su na visoke temperature i teške uvjete. Znaju biti optički prozirni.

Polimeri su organski spojevi koji nemaju metala u sebi. Niske su gustoće, nisu čvrsti ni žilavi, a rastezljivi su i savitljivi. To znači da se mogu oblikovati u složene oblike. Niske su električne vodljivosti i nemagnetski su.

Slika 1.2-2 prikazuje primjere legure, plastike i keramike.

Kompozitni materijali složeni su iz dva ili više materijala iz gornje tri skupne. Kako se materijali i dalje razvijaju, u novije vrijeme pojavili su se i biomaterijali, "pametni" materijali i nanomaterijali.

Biomaterijali se koriste za zamjenu ljudskog tkiva i izradu proteza.

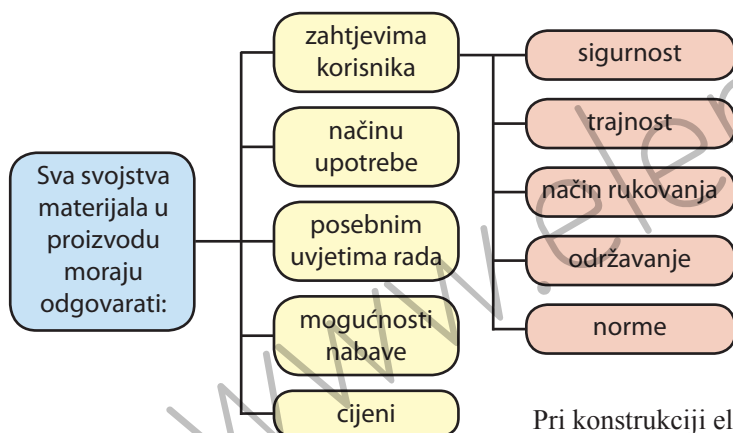
"Pametni" materijali prepoznaju promjene u okolini i prilagođavaju im se.

Kako znanost i tehnologija napreduju, došlo je do mogućnosti stvaranja smislenih struktura na razini pojedinačnih molekula, čak i atoma. Takve strukture tvore **nanomaterijale**.

Područje spoznaja o materijalima nije samo mnoštvo ispraznih činjenica. S pomoću tehnologije se iz mnoštva činjenica izvlači praktičan zaključak i izvodi konačno praktično rješenje. Razvoj tehnologije i materijala smatra se strateškim nacionalnim interesom u mnogim državama. U to se područje ulažu ogromne količine novca.

1.3 IZBOR MATERIJALA

Učenici koji žive blizu morske obale znaju da za konstrukciju za ceradu (tendu) na brodici ne mogu koristiti željezo. Naime, željezo hrđa u takvoj okolini. Za tu bi namjenu konstrukcija morala biti kromirana, aluminijska, premazana posebnom bojom ili od posebnog čelika. Isto tako, svaka druga ljudska djelatnost ima svoje posebnosti. Normalno je da i u elektrotehnici postoje načini izbora materijala.

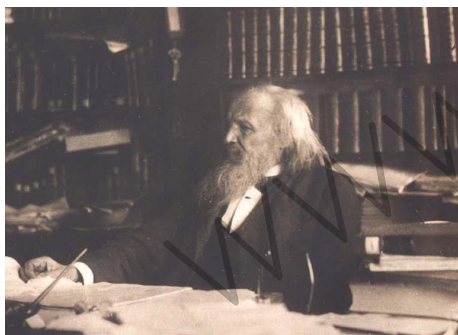
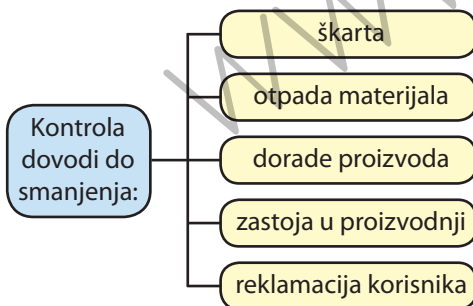


Pri konstrukciji elektrotehničkih materijala, potrebno je voditi računa o njihovim brojnim svojstvima. Sva svojstva moraju odgovarati **zahtjevima korisnika, načinu uporabe, posebnim uvjetima rada, mogućnosti nabave, cijeni** itd.

Zahtjevi korisnika mogu se odnositi na **sigurnost, trajnost, način rukovanja, održavanje, standarde i norme**. Ako nije riječ o narudžbi,

Napomena

Norme su bitne u postupku ispitivanja materijala. Pogledati Prilog 1.



Slika 1.5-1

Dmitrij Ivanovič Mendeljejev (1834. – 1907.)
– ruski kemičar

nego o serijskoj proizvodnji, takav izbor vrši proizvođač. Ako je izbor povoljan za korisnike, proizvođač će biti uspješniji. Posebni uvjeti rada uvijek se moraju uzeti u obzir. To mogu biti uvjeti pojačane vlažnosti, ekstremnih temperatura i sl. Materijal koji radi na ekstremnim temperaturama mora imati veliku stabilnost s obzirom na razna svojstva. Ako u okolini ima agresivnih plinova ili tekućina, potrebne su posebne zaštite. Posebni uvjeti su i rad u kemijskoj industriji, na brodovima, u rudnicima i sl. Na kraju, potrebno je voditi računa i o uvjetima na tržištu, nabavnim rutama, rokovima, zalihama, cijenama i dr.

Da bi se mogao izvršiti pravilan izbor, potrebno je poznavati uvjete u kojima će proizvod raditi i svojstva materijala u tim uvjetima. U prilogu 2 dan je primjer izbora materijala.

1.4 ISPITIVANJE MATERIJALA

Kako bi se znalo koja su svojstva materijala, potrebno ih je ustanoviti. To se čini **ispitivanjem**. Za svako svojstvo postoji postupak provjere. Ta se svojstva mogu promijeniti u procesu proizvodnje konačnog proizvoda. Obično se ne mogu postići sva najbolja svojstva jer bi proizvod u tom slučaju bio mnogo skuplji nego kod drugih proizvođača. Uvijek se traži optimum između svojstava kako bi se zadovoljio zahtjev cijene.

Ispitivanje materijala obavlja se u raznim ustanovama i laboratorijima, ali i kod proizvođača. Stoga postoji služba tehničke kontrole. Ona obično obavlja poslove kontrole ulaznog proizvoda, procesa rada i izlaznu kontrolu gotovih proizvoda.

Napomena

Srodnost pojedinih elemenata objašnjena je u Kemiji i Osnovama elektrotehnike.

1.5 GRAĐA TVARI

Pogledamo li поближе neki komad voća, primjerice šljivu, primijetiti ćemo da ona izvana ima jedan oblik. Međutim, prerežemo li je nožem, očito je da se ona od nečega sastoji. Osim tijela, ima i koštanu jezgru. Imaju li i materijali, slično šljivi, nekakvu građu?

Kao što se zna iz drugih predmeta, materija je sastavljena od kemijskih elemenata. To su osnovne postojeće supstance. Razlikuju se po svojim svojstvima. Zakon o periodičnosti svojstava kemijskih elemenata izrazio je kao periodni sustav elemenata **Dmitrij Mendeljejev**. Objavio je periodni sustav elemenata 1871. godine i do danas u njemu nije pronađena pogreška.

Svaki kemijski element ima karakterističan atom. Atomi se spajaju u molekule. Tako je sastavljen sav materijalni svijet koji vidimo oko sebe.

Napomena

Naboj elektrona je:

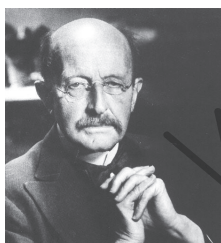
$$e = -1,6021892 \cdot 10^{-19} \text{ C},$$

a masa:

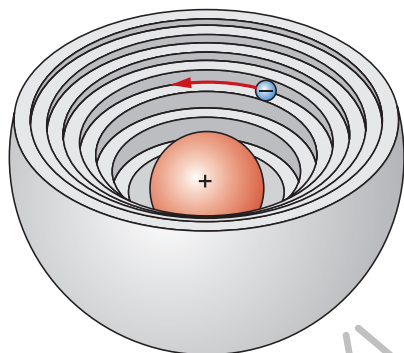
$$m_e = 9,109534 \cdot 10^{-31} \text{ kg}.$$

**Slika 1.5-2**

Niels Henrik David Bohr (1885. – 1962.) – danski fizičar, dobio Nobelovu nagradu za fiziku 1922. godine.

**Slika 1.5-3**

Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858. – 1947.) – njemački fizičar, dobio Nobelovu nagradu za fiziku 1918. godine.

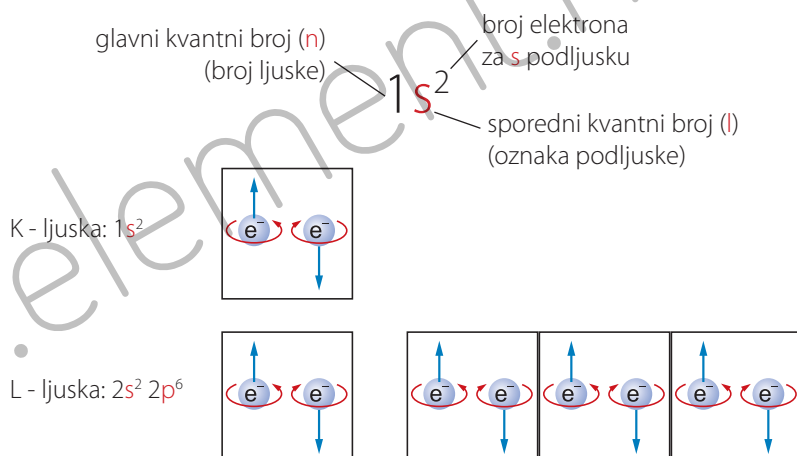
**Slika 1.5-4**

Elektron na diskretnim energijskim razinama

Poput šljive, atom također ima svoju građu. **Ernest Rutherford** je 1903. utvrdio da se atom sastoji od električki pozitivno nabijene jezgre i elektrona, koji su nositelji elementarnog negativnog električnog naboja. Elektroni u pojednostavljenom modelu atoma kruže oko jezgre. Između pozitivno nabijene jezgre i negativno nabijenih elektrona prisutne su privlačne električne sile. Manjkavost modela slijedi iz zdravorazumske pretpostavke o trenju unutar atoma (tada se govorilo o eteru koji popunjava sav prostor pa tako i onaj između jezgre i elektrona).

Pitanje: ako se elektron giba, “troši” energiju. Znači li to da će pasti u jezgru i neutralizirati se?! Odgovor na to pitanje stigao je kada je napuštena tvrdnja o postojanju etera. To je značilo da je prostor između elektrona i jezgre prazan. U takvim je uvjetima dobro došlo usavršenje modela atoma, koju je dao Niels Bohr. On je za to koristio kvantnu teoriju Maxa Plancka.

Prema Bohru, energija se upija i odašilje isključivo u diskretnim iznosima. Oni se nazivaju kvanti. Elektroni kruže oko jezgre po kvantiziranim stazama (zvanim ljuske) i tada ne odašilju (ne gube) energiju (slika 1.5-4, diskretne energijske razine na kojima može biti elektron). Sedam je staza. Najniže staze imaju nižu energiju, a više staze višu energiju. Od jezgre se po redu nižu ljuske: K, L, M, N, O, P i Q. Ljuska je popunjena s $2 \cdot n^2$ elektrona, gdje je n broj ljuske računajući od jezgre. Elektroni iz vanjske ljuske nazivaju se valentnim elektronima. **Oni određuju kemijska svojstva atoma.** Razmještaj elektrona po ljuskama je elektronska konfiguracija, a primjer je dan na slici 1.5-5.

**Slika 1.5-5**

Elektronska konfiguracija atoma Ne

Rotiranje elektrona oko samog sebe naziva se spinom. Spin je značajan u objašnjavanju magnetskih i supravodljivih pojava. No, bilo kakvo materijalno objašnjenje prirode elektrona može se opovrgnuti nekim

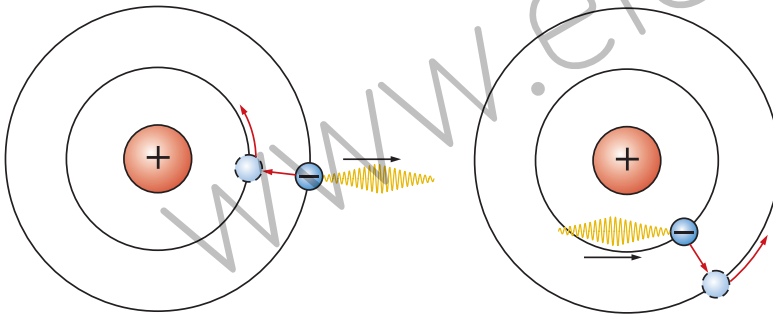
Napomena

Upijanje (kvanta) energije = apsorpcija (kvanta) energije

Odašiljanje (kvanta) energije = emisija (kvanta) energije

Kvant energije = paketić energije

Za mjerenje iznosa energije koje upija ili odašilje atom koristi se jedinica elektronvolt: $1 \text{ eV} \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$



Napomena

Kad god je moguć pojednostavljen prikaz s pomoću čestica, on će se koristiti. To ne znači da je ispravan, nego da je jednostavan za objašnjenja.

Napomena

Prilikom opisa stanja elektrona koriste se kvantni brojevi:

- glavni kvantni broj $n = 1, 2, 3, \dots$
- sporedni ili orbitalni kvantni broj $l = 0, 1, \dots, (n - 1)$
- magnetski orbitalni kvantni broj $m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$
- magnetski spinski kvantni broj m_s .

Prema Paulijevom načelu isključenja, u atomu se ne mogu nalaziti dva elektrona s četiri jednaka kvantna broja.

eksperimentima. Eksperimenti kojima se dokazuje da se elektronu pridružuju valna svojstva su interferencija i ogib. Stoga čestično objašnjenje elektrona nije dobro, nego se govori da elektron ima i pridruženi val, što objašnjava njegova valna svojstva.

Kako bi se model atoma prilagodio činjenici da elektron ima i valna i čestična svojstva, Louis de Broglie formirao je novi model atoma. Prema njemu, elektron se giba oko jezgre kao val. Staza mu je cjelobrojni višekratnik valnih duljina, λ . Kad elektron prima ili gubi energiju, mora prijeći iz jedne u drugu stazu. Stoga energija kvanta odgovara razlici staza:

$$E = h \cdot \nu = E_{\text{više}} - E_{\text{niže}}$$

gdje je viša staza 2, 3 itd., a niža 1, 2 itd. Sa h se označava Planckova konstanta iznosa $6,626176 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$, a sa ν frekvencija. Frekvencija (ν) i valna duljina (λ) povezane su jednadžbom:

$$c = \nu \cdot \lambda.$$

Ako elektron prelazi iz više u nižu stazu, odašilje u okolinu kvant energije. U suprotnom je upija. To je prikazano slikom 1.5-6.

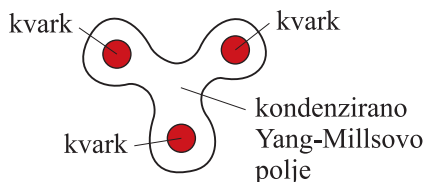
Sastav jezgre nije od osobite važnosti za proučavanje građe materijala. Potrebno je samo znati da se sastoji od čestica protona (nositelj pozitivnog naboja iznosa poput elektrona) i neutrona (električki neutralne čestice). Ako nema vanjskih posebnih utjecaja, svaki je atom električki neutralan, jer se u jezgri nalazi onoliko protona koliko oko jezgre kruži elektrona. Ulaskom u jezgu, bavimo se nuklearnim reakcijama. Produkt takvih reakcija promjena je kemijskog sastava, što nije tema ovog predmeta.

Slika 1.5-6

Promjena energijskog stanja elektrona

Bohrovim modelom atoma ne može se objasniti cijeli niz problema. Može se smatrati točnim samo za vodikov atom. U ovom je modelu pogrešna pretpostavka da se elektron u atomu giba po određenoj putanji. Gibanje elektrona u atomu opisuje se valnom funkcijom. Takav model atoma naziva se kvantno-fizičkim modelom. Stoga je uveden pojam kvantnog elektronskog oblaka. Taj je oblak najgušći tamo gdje je najveća vjerojatnost postojanja elektrona.

Daljnijim napretkom fizike, došlo je do uvođenja Yang-Millsovog polja, koje je danas temelj sveobuhvatne teorije materije. Ispravnost teorije toliko je velika da je nazvana standardnim modelom. Međutim, Bohrov model atoma dovoljan je za razumijevanje procesa u tehnologiji, osim u nanotehnologiji, a dovoljno je jednostavan pa će se smatrati polazištem za razna objašnjenja u gradivu (uz poneku dopunu).



hadron (proton, neutron itd.)

Slika 1.5-7

Sastav "elementarnih" čestica – protona i neutrona

ZA ONE KOJI ŽELE ZNATI VIŠE

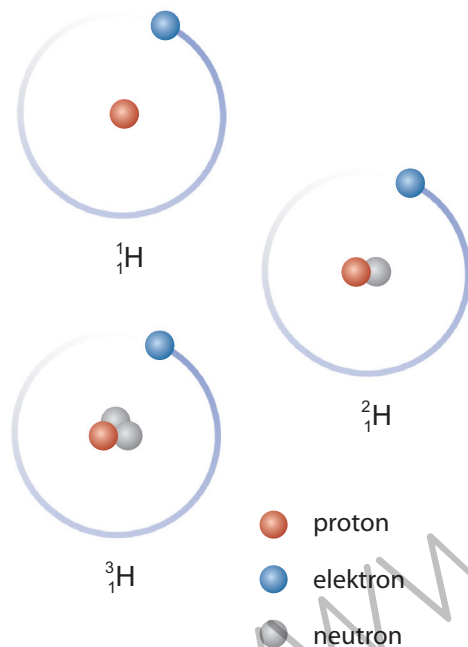
Standardni model

Za razliku od elektrona, proton i neutron nisu elementarne čestice. Naime, naziv "elementarne" znači da se ne mogu dalje razgrađivati na manje čestice, tj. da nemaju građu. Međutim, one se sastoje od po tri kvarka (slika 1.5-7). Kvarkovi su povezani gluonima – česticama koje izmjenjuju silu povezivanja u jedinstvenu cjelinu. Gluoni su nastali zbog Yang-Millovog polja, koje se kondenzira u ljepljivu žitku masu. Električni naboji kvarkova su $+1/3$, $+2/3$, $-1/3$ i $-2/3$ naboja elektrona. To znači da se neutralna čestica može postići s $-2/3$ i dva kvarka od $+1/3$. Drugi način je $+2/3$ i dva kvarka od $-1/3$ naboja elektrona.

Prema standardnom modelu, čestice i sile nužne za objašnjenje svih pojava vrlo su brojne. Postoji:

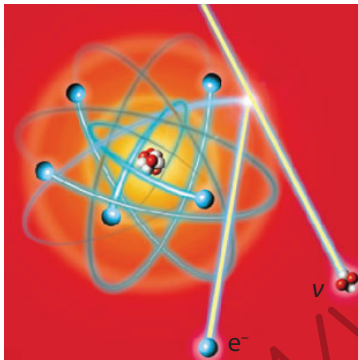
- 36 kvarkova
- osma Yang-Millovih polja za opisivanje gluona
- četiri Yang-Millova polja za slabe i elektromagnetske sile
- šest vrsta leptona za slabe interakcije (elektron i čestice koje su veće od njega, ali u istoj obitelji, a nazivaju se muon, tau lepton i odgovarajući neutrini)
- tzv. Higgsove čestice potrebne za računanje mase i konstanta drugih čestica
- najmanje 19 proizvoljnih konstanti za opisivanje masa čestica i jačine interakcija, a koje ne slijede iz teorije, niti su po njoj određene.

Fizičarima još uvijek nije dovoljno jasno što je to čestica. Einstein je držao da je to kondenzirana energija. Stoga je smišljena teorija superstruna. Struna titra i stotinu je trilijuna puta manja od protona. Svaki način titranja jest posebna rezonancija ili čestica. Titranjem strune u prostor-vremenu ona izvodi složeno gibanje. Kako je ponovno riječ o energiji (energiji titranja), dolazi se do toga da je čestica energija. Stoga postoji i teorija hologramskog svemira. Prema njoj, stvarnost je šuma valova, a hologram je ono što naš mozak od tih valova tumači kao materijalni svijet.



Slika 1.5-8

Atom izotopa vodika: a) osnovnog (protij), b) teškog (deuterij), c) superteškog (tricij)



Slika 1.6-1

Ionizacija

POGLED U KEMIJU

1.5.1 Izotopi

U atomima istog kemijskog elementa jednak je broj elektrona i protona. Broj protona određuje redni broj atoma u periodnom sustavu elemenata. Broj neutrona i protona zapravo je cijela masa atoma (maseni broj). Neutroni i protoni su barioni. Dok je broj protona ograničen s činjenicom da mora biti jednak broju elektrona, neutrone naizgled ništa ne ograničava.

Iako se može zamisliti da atom nekog kemijskog elementa ima bilo koji broj neutrona, u prirodi postoji jako mali broj atoma različitih masa, a istog kemijskog elementa. Takvi atomi, koji se razlikuju samo po broju neutrona, nazivaju se **izotopima**. Izotopi su atomi istog kemijskog elementa različite atomske mase. Postoje stabilni i nestabilni. Kod, primjerice, berilija, natrija i aluminijsa, postoji samo jedan stabilan izotop. Kositar pak ima čak deset stabilnih izotopa.

Vodik se sastoji od dva stabilna izotopa - protija i deuterija te jednog nestabilnog - tricija. Simbole izotopa pišemo kao indeks gore lijevo, dok atomski broj pišemo dolje lijevo, kao primjerice za izotope vodika: ${}^1_1\text{H}$, ${}^2_1\text{H}$ i ${}^3_1\text{H}$. (slika 1.5-8) Osim istog broja protona, može se govoriti i o izobarima, koji imaju isti maseni broj, ili o izotonima, koji su istog broja neutrona.

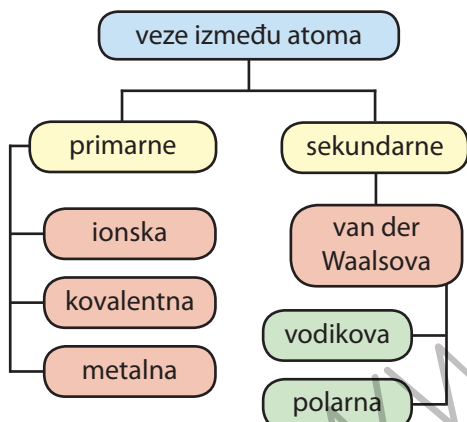
1.6 IONIZACIJA

Jedna od najvažnijih pojava za elektrotehniku je ionizacija. Atom je kao cjelina električki neutralan. Elektroni su razmješteni po stazama. Energijske razine staza rastu kako se povećava njihova udaljenost od jezgre. Ako se želi da elektron prijeđe na višu energijsku razinu, potrebno mu je privesti energiju (slika 1.6-1). Kada je elektron prešao u višu stazu, kaže se da je u pobuđenom stanju.

Ako je privedena energija veća od one potrebne za najvišu stazu, tada se njenim privođenjem nadvladavaju privlačne sile jezgre. Posljedica je da će elektron napustiti atom i postati slobodan. Stoga će u jezgri atoma biti više pozitivnih naboja, nego negativnih u elektronskom omotaču. Ta će razlika činiti atom električno nabijenom česticom. Takva je čestica pozitivna i naziva se **kationom**.

Ako bi u nekom procesu atom primio dodatni elektron, imao bi višak elektrona. Tada bi opet postao ion. Takav se ion naziva **anionom**. Stvaranje iona naziva se **ionizacijom**.

Energija koju je trebalo dodati elektronu da bi napustio atom naziva se **ionizacijskom energijom**. Ionizacija se može dogoditi ako se bilo koji elektron pobudi tako da napusti atom. Što je elektron dalje od jezgre, manja mu je energija za to potrebna.



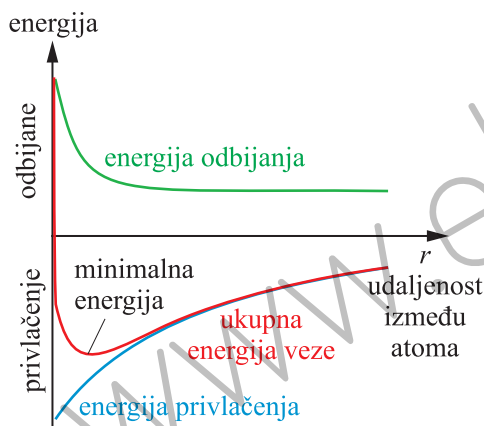
Uzimanjem energije od elektrona, njegova se energija spušta. Kad padne na određenu razinu, može ga privući jezgra nekog atoma. Stoga se kaže da električno nabijena tijela imaju vid potencijalne energije. Ta se energija naziva **električnom energijom**.

1.7 SPAJANJE ATOMA

Kad se atomi ne bi spajali, svijet oko nas izgledao bi potpuno različito: ne bi bilo živih bića, stijena, mora, rijeka itd. Zvijezde bi postojale, jer se uglavnom sastoje od istog plina, a procesi u njima su nuklearni. Jezgre planeta bi bile bezlične mase ili plinovi. Takve mase nemaju svoju građu ili unutrašnje uređenje (osim ono zbog gravitacije).

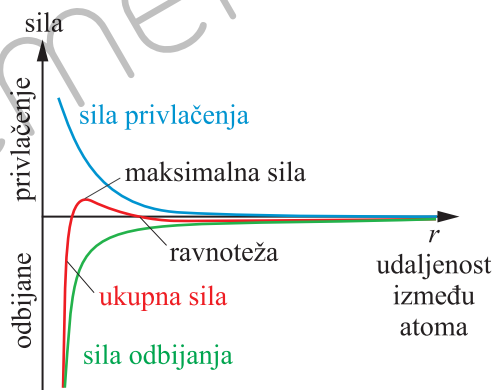
Atomi se spajaju putem nekoliko mehanizama. Oni mogu biti kemijski ili fizički. Kemijski ili primarni načini spajanja su ionska, kovalentna i metalna veza. Te vrste veza igraju značajnu ulogu u elektrotehnici. Fizičke ili sekundarne veze temelje se na van der Waalsovoj sili, a mogu biti vodikove i polarne. Što se tiče elektrotehničkih materijala, važnije su kemijske veze.

Atomi se ne spajaju iz hira. Postoji prirodni zakon koji ih tjera na spajanje: težnja za stanjem minimalne energije. Energija je minimalna kada je zbroj privlačnih i odbojnih sila jednak nuli. Privlačne sile nastaju između pozitivne jezgre jednog atoma i negativnih elektrona drugog atoma. Odbojne sile nastaju između istoimenih naboja elektronskih omotača dva atoma. Ovo je slučaj dva izolirana atoma. U praksi na njih utječu i drugi atomi pa veze i proračun sila mogu biti složenije. Slike 1.7-1 i 1.7-2 prikazuju kako se mijenjaju energija vezanja i sila između atoma.



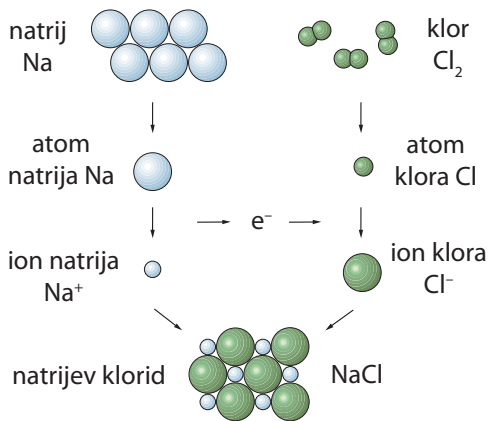
Slika 1.7-1

Energija (potencijalna) vezanja atoma



Slika 1.7-2

Sila veze atoma



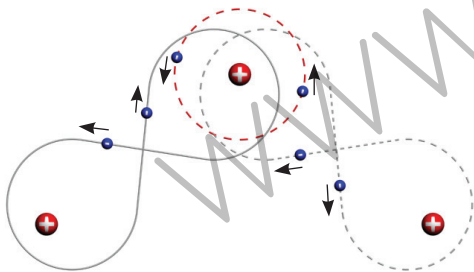
Slika 1.7-3

Ionsko vezanje atoma na primjeru kuhinjske soli (NaCl)



Slika 1.7-4

Charles Augustin de Coulomb (1736. – 1806.) – francuski fizičar. Jedinica za električni naboj naziva se prema njemu kulon.



Slika 1.7-5

Kovalentno spojena molekula vode

1.7.1 Ionska veza

Ionska se veza u pravilu pojavljuje kod vezanja u spojeve atoma nemetala i metala. To su kombinacije elemenata sa suprotnih strana periodnog sustava elemenata, npr. prvog i zadnjeg neplemenitog stupca u periodnom sustavu u Prilogu 2. Kod ionske veze, jedan ili više elektrona vanjske ljuske jednog elementa prelaze na atome drugog elementa. Može se poopćiti tako da se zaključi da ionska veza nastaje kad se spajaju atomi I. i II. stupca periodnog sustava (Li, K, Na, Mg...) s atomima VI. i VII. stupca. Pri tome, atomi I. i II. stupca otpuštanjem jednog elektrona postaju kationi (pozitivni ioni), a atomi VI. i VII. stupca primanjem elektrona postaju anioni (negativni ioni).

Primjer je kuhinjska sol (natrijev klorid, NaCl, slika 1.7-3). Kationi i anioni međusobno se privlače električnom (Coulombovom) silom:

$$F = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

gdje je:

Q_1 umnožak broja elektrona prvog atoma s elementarnim nabojem (e)

Q_2 umnožak broja elektrona drugog atoma s elementarnim nabojem

ϵ_0 dielektrična konstanta vakuuma ($\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m)

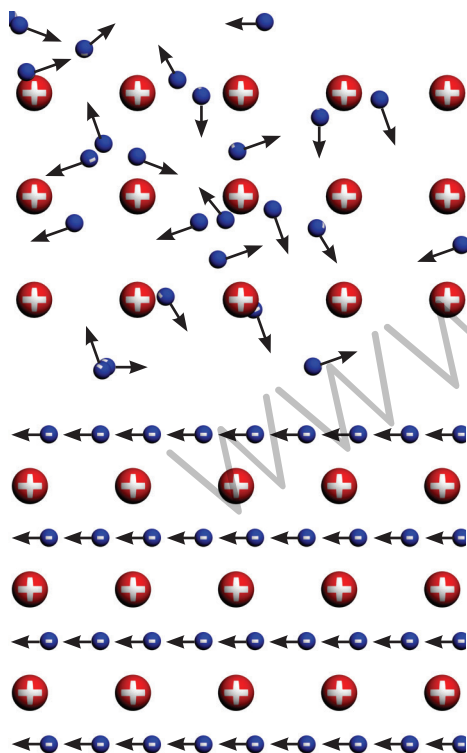
r udaljenost između naboja.

S ionskom vezom postiže se da svaki od elementa ima popunjene vanjske ljuske. U pravilu metali predaju valentne elektrone (oni su iz vanjske ljuske) nemetalnom atomu. Pri tome oba atoma postižu konfiguraciju plemenitih plinova (to znači da su im vanjske ljuske popunjene). Iako se stvaraju ioni (čestice s električnim nabojem), **materijali u ionskoj vezi vrlo slabo vode električnu struju.**

1.7.2 Kovalentna veza

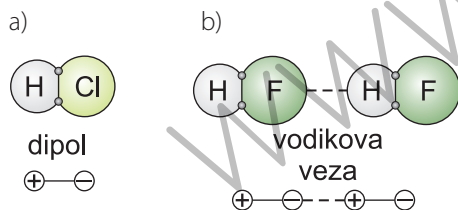
Kod spajanja atoma na ovaj način, veze se ostvaruju dijeljenjem valentnih elektrona između susjednih atoma. Pri tome elektroni postaju zajednički. Na taj način, veze tvore važni materijali u elektronici – germanij i silicij, ali i najvažniji element za tvorbu organskih spojeva – ugljik. Značajna je i molekula vode (slika 1.7-5), koja se također tvori kovalentnom vezom. **Materijali s kovalentnim vezama loši su vodiči električne struje.** Molekule stvorene kovalentnom vezom imaju definiran oblik i nemaju slobodnih elektrona.

Kovalentna veza je usmjerena. To znači da se odvija između točno određenih atoma. Ona postoji samo između atoma koji sudjeluju u dijeljenju atoma. Na ovaj se način spajaju mnogi nemetali u molekule (H₂, Cl₂, F₂ itd.). Također, ovako se spajaju elementi svojstava koja nisu slična



Slika 1.7-6

Slobodni elektroni u metalnoj vezi



Slika 1.7-7

Van der Waalsova polarna veza na primjeru HCl (a), vodikova veza na primjeru HF (b)

(CH_4 , H_2O , HNO_3 , HF). Na ovaj se način spajaju i elementi koji se nalaze na desnoj strani periodnog sustava, kao galijev arsenid (GaAs) ili silicijev karbid (SiC).

Kovalentne veze mogu biti iznimno jake (dijamant) ili vrlo slabe (bizmut). Ovo je tipična veza za polimere.

1.7.3 Metalna veza

Metalni atomi imaju do tri valentna elektrona. Oni su slabo vezani, zbog čega se lako mogu odvojiti od jezgre. To se događa čak i pri maloj energiji koja se dobije pri temperaturama čak i nižim od sobne. Međutim, privlačna sila pozitivnih iona u metalu dovoljno je velika da ne mogu odletjeti u slobodan prostor. Stoga tvore elektronski oblak u prostoru između iona. Ioni su smješteni u čvorovima kristalne rešetke. Ti su slobodni elektroni zajednički. **Uzrok su velike provodnosti metala** (slika 1.7-6).

Ova veza nije usmjerena, zbog čega se metalni ioni nastoje što više približiti. U tom nastojanju, tvore gustu kristalnu građu s velikom pravilnošću u rasporedu iona.

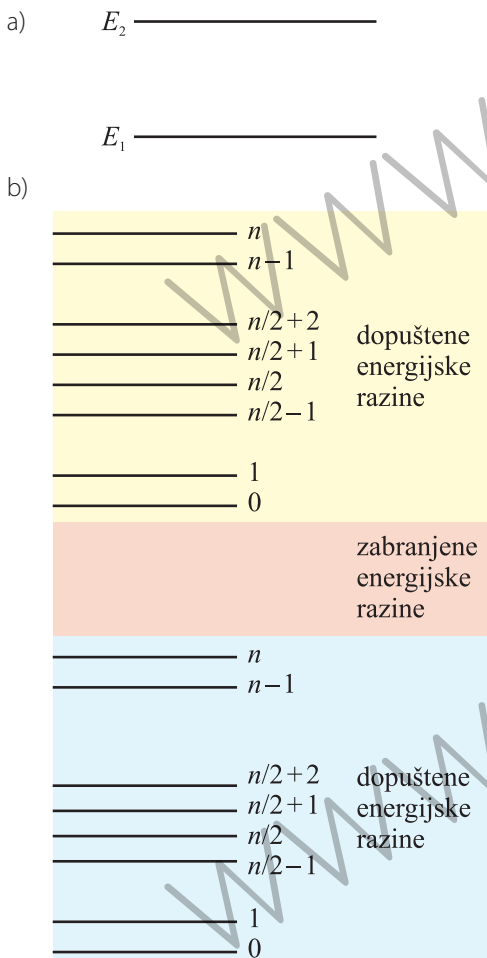
Ako se za primjer uzme bakar, ioni Cu^+ pakirani su kompaktno zbog učinka elektrona između iona. Pritom nastaje struktura u obliku kocke.

Metali također dobro vode toplinu, jer slobodni elektroni lako međudjeluju s okolinom. Mogu lako predavati toplinu okolini te stoga imamo osjećaj da su hladni.

U mnogim materijalima, vezanje atoma nije samo jedne prirode. Pojavljuju se, primjerice, dvije veze. To se može dogoditi kada se npr. spajaju dva različita atoma kovalentnom vezom. Tada elektroni nisu ravnomjerno razdijeljeni između atoma. Jedan je atom negativniji ili pozitivniji od drugog pa nastaje razlika. Ta razlika uzrokuje Coulombovu silu. Tada je veza i ionska, a ne samo kovalentna. Takve i slične veze nazivaju se **miješanim vezama**. U ovakvim vezama zajednički elektroni provode više vremena oko pozitivnijeg atoma. To je čest slučaj u keramikama, gdje tip veze može biti i kovalentan (kao u Si_3N_4), i ionski (MgO), i mješoviti (Al_2O_3).

1.7.4 Sekundarne veze

Van der Waalsova veza je dipolna (vidjeti Osnove elektrotehnike) privlačna sila. Atomi se spajaju u molekule samo ako se središta pozitivnog (+ pol) i negativnog naboja (– pol) molekula ne poklapaju. Negativni dio molekule tada privlači elektrostatskom silom pozitivni dio molekule. Primjer je klorovodična kiselina, HCl (slika 1.7-7). Kod ove veze temelj je u fizici. Nastaje zbog nastajanja električnih dipola (dva pola – polarna veza).



Slika 1.8-1

Razdvajanje energijskih razina kod nastanka energijskih pojaseva

Vodikova veza nastaje između molekula u kojima su vodikovi atomi povezani s elektronegativnim elementima (vidjeti Osnove elektrotehnike; potencijali elemenata kod stvaranja galvanskih članaka), kao što su, primjerice, fluor ili dušik. Ova je veza slabija od ionske ili kovalentne, ali jača od van der Waalsove polarne.

Vežanjem atoma u molekule, iz atomskih nastaju molekulске orbitale. Ako molekulске orbitale povećavaju elektronsku gustoću između atoma, jer smanjuju elektrostatsko odbijanje jezgara, nazivaju se veznim orbitalama, a u suprotnom, protuveznim orbitalama. Ovaj tip nije od velike važnosti u klasičnim elektrotehničkim materijalima.

1.8 PODJELA MATERIJALA PREMA ELEKTRIČNIM SVOJSTVIMA

Vodiči mogu biti prve i druge vrste. **Vodiči prve vrste** su metalni vodiči, tj. vodiči s kristalnom građom. Pojednostavljeno rečeno, to su vodiči u čvrstom agregacijskom stanju. Posebnu skupinu čine novootkriveni vodiči (plastično, keramički, nanovodiči, molekularni vodiči i sl.). Oni se zbog agregacijskog stanja mogu uvjetno svrstati među vodiče prve vrste, iako ne i po načinu spajanja atoma. Osim krutih tijela, vodiči mogu biti i tvari u drugim agregacijskim stanjima pa se takvi vodiči nazivaju **vodičima druge vrste**. Primjer je elektrolit u akumulatoru ili morska voda. Među vodiče ubrajaju se metali, ugljen, otopine soli, kiselina i lužina itd.

Navedenu podjelu krutih tijela na izolatore, poluvodiče i vodiče moguće je izvršiti na temelju vrste veze.

Kod većine vodiča, vrsta veze je metalna. Metalne veze stvaraju gusto pakirane strukture (slagaline). Vodiči dobro provode električnu struju i imaju malenu električnu otpornost do $10^{-5} \Omega\text{m}$.

Vodiči prve vrste su metali (metalna veza), a vodiči druge vrste otopine kiselina, lužina i soli. S obzirom na to da se konačan proizvod rijetko sastoji od drugih agregacijskih stanja, najveća pažnja može se posvetiti krutim tvarima, tj. njihovoj kristalnoj rešetki. Plinovi ili tekućine također mogu biti i izolatori.

Kod izolatora i poluvodiča, veze su ionske i kovalentne.

U skupinu izolatora ubrajaju se npr. staklo, drvo, guma, porculan, destilirana voda te vakuum, koji se smatra idealnim izolatorom. Kod njih je potrebna vrlo velika energija za odvajanje valentnih elektrona (ionizaciju).

Električna svojstva materijala nastaju zbog tipa veze, a s obzirom na broj atoma, jednostavno se tumače teorijom pojaseva. Naime, energijske razine dva atoma koji su u međudjelovanju razdvajaju se. Jedan ima malo više, a drugi malo niže energijske razine od izvorne. Međutim, atomi su tako mali da ih ima jako puno u djeliću prostora.

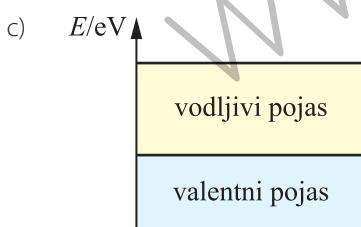
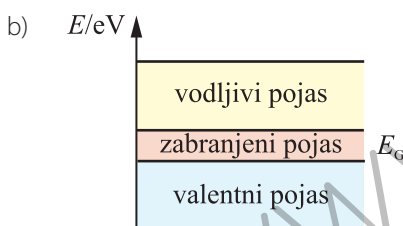
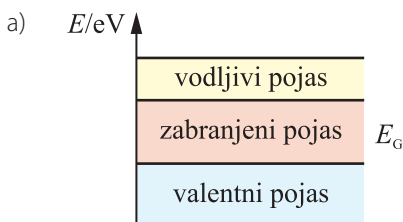


Slika 1.8-2

Ludwig Boltzmann,
austrijski fizičar
(1844. – 1906.)

Ponovimo

Električna otpornost (ρ) je svojstvo materijala da pruža otpor prolasku električne struje. Nemojte je zamjenjivati s električnim otporom (R). Električni otpor ovisi o otpornosti materijala i o geometriji vodiča. Jedinica za otpornost je ometar (oznaka: Ωm) ili ommilimetar kvadratni po metru (oznaka: $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$), a za otpor om (oznaka: Ω).



Slika 1.8-3

Pojasevi idealnih izolatora (a), poluvodiča (b) i metalnih vodiča (c)

Stoga se može očekivati da će tih razdvajanja dozvoljenih energija biti mnogo. Ako su atomi relativno jako udaljeni jedan od drugog, onda će imati svoja izvorna energijska stanja (E_1 i E_2 sa slike 1.8-1). Ako postoji međudjelovanje, one se razdvajaju u n odvojenih energijskih razina. S obzirom na to da se povećava gustoća dopuštenih energijskih razina, kod velikog broja atoma dolazi do mogućnosti gotovo kontinuiranih promjena energije. To se naziva **energijskim pojasom**. Ustanovljeni su pojasevi u kojima nema dopuštenih energija i pojasevi u kojima se ona gotovo kontinuirano mijenja. Pojasevi dopuštenih energija **valentni** su ili pak **vodljivi**. Pojasevi bez dopuštenih energija **zabranjeni** su.

Na količinu slobodnih elektrona utječu energijske razine, vrsta materijala, ali i temperatura. Jedno je dopuštena energija, a drugo je hoće li biti elektrona koji zauzimaju tu energiju. Da bi se vodila električna struja, elektroni moraju biti u vodljivom pojasu. To su slobodni elektroni. Njima se zbog vibracija atoma u prosjeku predaje energija:

$$E_T = \frac{kT}{e} (\text{V})$$

gdje je:

- k Boltzmannova konstanta ($k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$)
- T apsolutna temperatura
- e naboj elektrona.

S većim porastom temperature, izolatori sve više gube svoja izolacijska svojstva. To se događa zbog toga što na većim temperaturama elektroni dobivaju veće energije. Stoga imaju dovoljno za preskočiti energije koje su zabranjene. Izolatori imaju visoku električnu otpornost (veću od $10 \text{ k}\Omega\text{m}$).

Poluvodički materijali (npr. germanij, silicij, selen, titanov oksid itd.) imaju električnu otpornost u granicama od $10 \mu\Omega\text{m}$ do $10 \text{ k}\Omega\text{m}$.

U vodičima ne postoji zabranjeni pojas pa je velik broj slobodnih elektrona, čak i pri sobnoj temperaturi. Stoga su i materijali tog tipa (u metalnoj vezi) dobili ime vodiči.

Je li neko tijelo izolator, poluvodič ili vodič, ovisi o obliku energijskih pojaseva. Na električna svojstva ne utječu niži energijski pojasevi koji potječu od elektrona popunjenih ljuski. Stoga će se razmatrati samo energijski pojasevi koji potječu od valentnih elektrona. Slika 1.8-3 prikazuje valentne, vodljive i zabranjene pojaseve u izolatorima, poluvodičima i vodičima.

Ako se gleda po vanjskoj temperaturi, na apsolutnoj je nuli valentni pojas u potpunosti ispunjen, a vodljivi je pojas prazan. Na toj temperaturi neće kod izolatora ili poluvodiča teći električna struja, jer nema vodljivih

elektrona. Porastom temperature, kao posljedica vibracija njihove građe, elektronima se predaje dodatna energija.

Da bi kroz kristal mogla teći električna struja, elektroni iz valentnog pojasa trebaju prijeći u vodljivi pojas. Da bi se to ostvarilo, treba im se predati iznos energije veći od širine zabranjenog pojasa:

$$E > E_G$$

Jasno je da će materijali koji imaju manji E_G bolje voditi električnu struju, jer im je potrebno dodati manju energiju za prelazak u vodljivi pojas. Granica je između poluvodiča i izolatora, vezano uz širinu zabranjenog pojasa, 2 eV. Ako je $E_G > 2$ eV, riječ je o izolatorima, a u suprotnom o poluvodičima. Veličina zabranjenog pojasa ovisi o temperaturi okoline. Tako poluvodič silicij E_G na apsolutnoj nuli ima širinu zabranjenog pojasa 1,2 eV, a na sobnoj temperaturi 1,1 eV.

Kod metalnih vodiča, vodljivi se pojas dodiruje ili preklapa valentni pojas.

Očito je da je razlika između poluvodiča i izolatora samo u veličini zabranjenog pojasa. Kod izolatora je on toliki da ne vodi struju u normalnom radu i pri normalnim uvjetima. Statistički se i tada može dogoditi da koji elektron boravi u vodljivom pojasu, ali to je zanemarivi broj.

1.9 EKOLOŠKI, EKONOMSKI I DRUŠTVENI UTJECAJ MATERIJALA

Ekonomija u tehnici nije dovoljno zastupljena. Naime, neki proizvod s tehničkog stajališta može biti jako dobar, a da nikad ne doživi uspjeh na tržištu. Isto tako, mnogo je proizvoda koji nisu tehnički jako kvalitetni, a dobro se prodaju. Da bi se smanjili troškovi proizvodnje, mora se uzeti u obzir izbor materijala i način proizvodnje. Troškovi se mogu smanjiti i jeftinijom radnom snagom. To mogu raditi samo multinacionalne kompanije. U ekonomske se čimbenike ubraja i sigurnost proizvodnih kapaciteta i prometnih veza. Krajnji je cilj svih ekonomskih razmatranja povećanje dobiti – profita. Danas raste svijest o ekološkom utjecaju, stoga se smanjuje profit po proizvodu na račun ekologije. Naravno, reklamiranjem takvih proizvoda postiže se ukupno bolji financijski učinak.

Ekološka pitanja jako su važna. Danas se, primjerice, razvijaju nanoroboti, koji su veličine molekule ili nekoliko atoma. Tehnolozi su osmislili kako ih proizvoditi. Jedan od načina je samogradnja. Ako se ti robotički mogu sami graditi znači da imaju sposobnost reprodukcije. Što ako iz laboratorija pobjegnu u okoliš? Kakve to može imati ekološke posljedice?

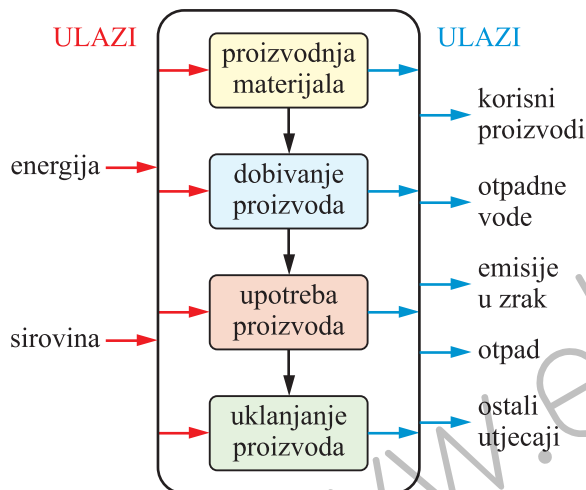
Dodatan je problem i to što je upitno jesmo li išta naučili iz prošlosti. Jako je poznat primjer azbesta. To je veoma važan materijal u protupožarnoj

Napomena

Kakav bi proizvod trebao biti?

U idealnom slučaju, materijal od kojeg je proizvod napravljen, trebao bi biti takav da se može reciklirati (Zemlja nema beskonačne izvore sirovina). Poželjno bi bilo da se može ukloniti bez negativnog utjecaja na okoliš. Biorazgradivost sve je češća karakteristika proizvoda pa se s ekologijom povezuje i ekonomija – to se reklamira.

zaštiti. Kasnije se pokazalo da je i opasan. I to ne samo za vatrogasce, radnike u tvornicama azbesta i ljude u kućama s azbestnom izolacijom. Azbest se okolišem širi kroz zrak. Bilo tko u okolici može ga udahnuti.



Slika 1.9-1
Životni ciklus proizvoda

Uz sve to, postavlja se pitanje što raditi sa sve više materijala od proizvoda koji se više ne koriste, a mogu biti opasni. Primjerice, aktualan je problem odlaganja računalnog otpada. Danas se nastoji reciklirati materijale s matičnih ploča računala, kućišta i dr. Nastoji se vraćati akumulatore automobila da se ne bi uništavao okoliš sulfatima koji isure u okoliš iz njih. Kod nas je aktualna priča s povratnom ambalažom. U svijetu se to radi besplatno, jer postoji svijest o reciklaži. Početni je stupanj razdvajanje smeća na nekoliko tipova. To može svatko učiniti.

Stoga tehničari i inženjeri moraju voditi računa kod izrade proizvoda o cjelokupnom životnom vijeku materijala: od izdvajanja iz sirovine, sinteze ili obrade, proizvodnje, primjene i uklanjanja ili reciklaže (slika 1.9-1).

Nikad ne treba zaboraviti kakav utjecaj proizvod ostavlja na društvo. Uzmimo npr. kako se svijet promijenio uvođenjem osobnih računala. Možete li ga danas zamisliti bez njih? Jesu li pridonijeli kvaliteti života pojedinca? Djeluju li asocijalno ili nas zbližavaju?

PITANJA

1. Kako se klasificiraju materijali u elektrotehnici?
2. Kako se dijele elektrotehnički materijali?
3. Koje su veze između atoma prisutne u izolacijskim materijalima?
4. Od kojih se veza tvore vodiči?
5. Što je ionizacija i kako do nje dolazi?
6. Kojim zahtjevima moraju udovoljavati materijali?