

ELEKTROTEHNIČKI MATERIJALI

Doc. dr Milena Đukanović
mlenenadj@ac.me

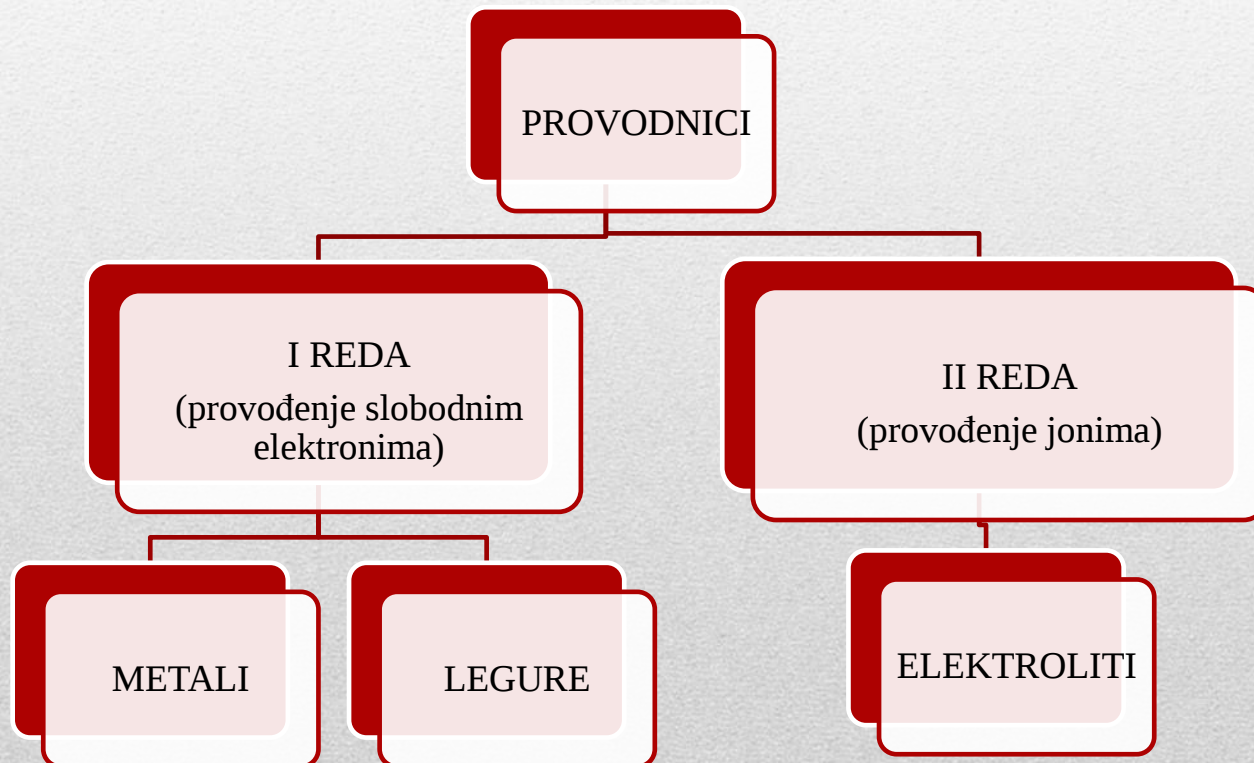
PREDAVANJE VI

PROVODNICI



OSNOVNE KARAKTERISTIKE PROVODNIKA:

- Provodnici su materijali bez energetskog procjepa (valentna i provodna zona ili se preklapaju ili je valentna zona djelimično popunjena na $T = 0 \text{ K}$), sa specifičnom električnom otpornošću u opsegu $\rho = 10^{-8} - 10^{-6}$.



PODJELA PROVODNIH MATERIJALA:

Po veličini
specifične električne
provodnosti

Provodni
materijali male
specifične
provodnosti

Provodni
materijali
velike
specifične
provodnosti

Po položaju u Periodnom
sistemu elemenata

Alkalne

Zemnoalkalne

Lantanide

Drugi (lako
topljivi, teško
topljivi, laki
metali,
feromagnetni
metali itd.)

PODJELA PROVODNIH MATERIJALA:

Po strukturi
elektronskog omotača

Normalne

Prelazne

Po temperaturi
topljenja

Lako topljive

Teško
topljive

Po boji

Crne

Obojene

Po primjeni

Materijali za
provodnike

Materijali za
kontakte

OSNOVNE KARAKTERISTIKE PROVODNIKA:

1. Električna provodnost:

- Već su objašnjeni načini provođenja struje u provodnicima prvog reda pomoću metalne veze, slobodnih elektrona i energetske pojaseva.
- Uz djelovanje električnog polja elektroni se usmjereno kreću. Srednja brzina elektrona v_{sr} je:

- $\vec{v}_{sr} = -\mu \cdot \vec{E}$

- $\mu = \frac{q \cdot \tau}{m_e}$

gdje je:

E - električno polje

μ - pokretljivost elektrona

q - apsolutna vrijednost naelektrisanja elektrona

τ - vrijeme života elektrona

m_e - masa elektrona

OSNOVNE KARAKTERISTIKE PROVODNIKA:

1. Električna provodnost:

- Gustina električne struje J jednaka je:

$$\bullet \vec{J} = -n \cdot q \cdot \vec{v}_{sr}$$

- gdje je n koncentracija slobodnih elektrona. Ovaj izraz vrijedi u slučaju kada koncentracija elektrona i njihova pokretljivost ne zavisi od jačine spoljašnjeg električnog polja. Slijedi da je:

$$\bullet \vec{J} = n \cdot q \cdot \mu \cdot \vec{E} = \gamma \cdot \vec{E}$$

- gdje je γ **električna provodnost**.
- Kod materijala kod kojih samo elektroni učestvuju u provođenju električne struje, električna provodnost iznosi:

$$\bullet \gamma = n \cdot q \cdot \mu$$

OSNOVNE KARAKTERISTIKE PROVODNIKA:

2. Električna otpornost:

- Električna otpornost ρ je recipročna vrijednost električne provodnosti:

- $\rho = \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{n \cdot q \cdot \mu}$

- U idealnom kristalu na temperaturi apsolutne nule, kretanje elektrona pod dejstvom spoljašnjeg električnog polja bi bilo jednako ubrzano. Međutim, u realnim uslovima, na temperaturama iznad apsolutne nule dolazi do usporavanja elektrona rasijavajućim sudarima. Ti sudari se najčešće odvijaju interakcijom elektrona, ili sa termičkim oscilacijama kristalne rešetke, ili jonizovanim primjesnim elektronima, što dovodi do usporavanja elektrona.
- Ukupna električna otpornost jednaka je zbiru električne otpornosti usljed sudara s atomima rešetke ρ_{at} i električne otpornosti usljed sudara s jonima primjesa ρ_{pr} :

- $\rho = \rho_{at} + \rho_{pr}$

OSNOVNE KARAKTERISTIKE PROVODNIKA:

3. Zavisnost električne otpornost od temperature:

- Vibracije atoma su temperaturno zavisne, stoga su temperaturno zavisni i sudari elektrona s atomima. Sudaranje elektrona sa jonima primjesa ne zavisi od temperature. Dakle, temperaturna zavisnost ρ je određena samo zavisnošću ρ_{at} od temperature.
- Pri nižim temperaturama pokretljivost elektrona u metalima usljed sudara sa kristalnom rešetkom iznosi:

$$\bullet \mu_{at} \sim \frac{1}{T^5}$$

tj. zavisnost električne otpornosti pri nižim temperaturama može se izraziti kao:

$$\bullet \rho_{at} = B \cdot T^5$$

gdje je B konstanta materijala nezavisna od temperature.

OSNOVNE KARAKTERISTIKE PROVODNIKA:

3. Zavisnost električne otpornost od temperature:

- Pri višim temperaturama pokretljivost elektrona u metalima usljed sudara s kristalnom rešetkom je:

- $\mu_{at} \sim \frac{1}{T}$

- To vodi do toga da je za električnu otpornost na višim temperaturama:

- $\rho_{at} = A \cdot T$

gdje je A konstanta materijala nezavisna od temperature.

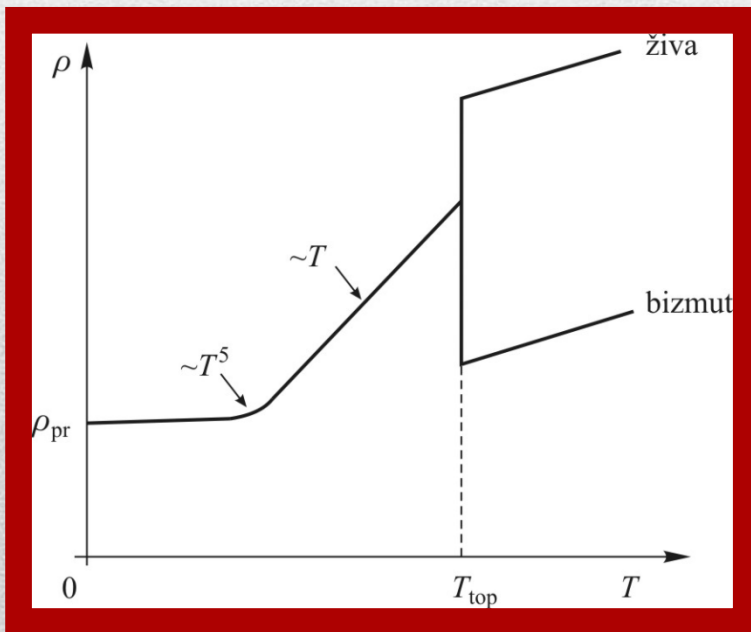
- Pri višim temperaturama sudaranje elektrona usljed toplotne vibracije rešetke je jače izraženo i iznosi:

- $\rho = \rho_{at} + \rho_{pr} \approx \rho_{at} = A \cdot T$

OSNOVNE KARAKTERISTIKE PROVODNIKA:

3. Zavisnost električne otpornost od temperature:

- Pri nižim temperaturama (< 100 K) je:
 - $\rho = B \cdot T^5 + \rho_{pr}$
- Za $T \rightarrow 0$, $BT^5 \rightarrow 0$, pa je:
 - $\rho = \rho_{pr}$



Zavisnost električne otpornosti metala
od temperature

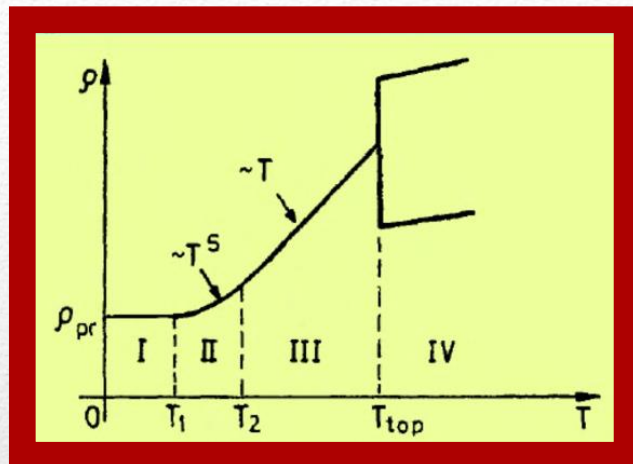
OSNOVNE KARAKTERISTIKE PROVODNIKA:

3. Zavisnost električne otpornosti od temperature:

- U opsegu I električna otpornost je konstantna, pošto su pri vrlo niskim temp. (< 10 K) vibracije jona kristalne rešetke zanemarljivo male. Pri vrlo niskim temperaturama promjena temperature utiče isto tako neznatno na nesavršenosti (defekte) kristalne rešetke.

Minimalna vrijednost električne otpornosti metala naziva se zaostala električna otpornost i zavisi od čistoće metalnog provodnika, vrste i koncentracije defekata.

- U opsegu II (10 K - 100 K) električna otpornost počinje brzo da raste po zakonu T^5 , a u opsegu III (> 100 K) srazmjerna je sa T . Ova linearana oblast je najčešće i radna oblast primjene metalnih provodnika u elektrotehnici.
- U opsegu IV, u okolini temperature topljenja, promjena $\rho(T)$ odstupa od linearne zavisnosti, gdje nakon topljenja metala i prelaska u amorfno stanje nastaje skokovita promjena električne otpornosti.



OSNOVNE KARAKTERISTIKE PROVODNIKA:

3. Temperaturni koeficijent električne otpornosti:

- Veličina koja karakteriše zavisnost električne otpornosti od temperature zove se temperaturni koeficijent električne otpornosti α :

$$\bullet \alpha = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dt}$$

- Temperaturni koeficijent električne otpornosti je pri nižim temperaturama izrazito temperaturno zavisn, a pri višim temperaturama je skoro konstantan. Temperaturni koeficijent električne provodnosti provodnih materijala prve vrste ima skoro uvijek pozitivnu vrijednost, dok se kod nekih metalnih legura dešava da ovaj koeficijent ima negativnu vrijednost.

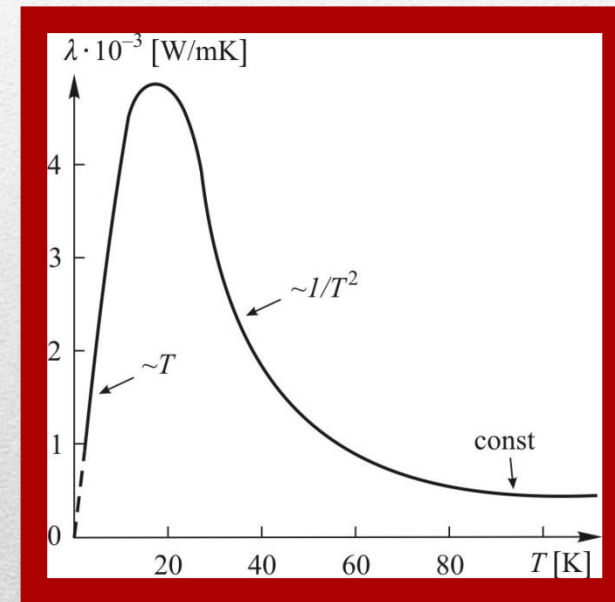
OSNOVNE KARAKTERISTIKE PROVODNIKA:

4. Koeficijent toplotne provodnosti:

- Toplota se prenosi kroz provodne materijale atomima koji vibriraju oko ravnotežnog položaja i slobodnim elektronima. Koeficijent toplotne provodnosti λ je:

- $$\lambda = \lambda_{at} + \lambda_{el}$$

- Kod čistih metala, pri visokim temperaturama koeficijent toplotne provodnosti ne zavisi od temperature
- Pri nižim temperaturama koeficijent je proporcionalan sa T^2 , a pri vrlo niskim temperaturama (blizu 0 K) koeficijent je proporcionalan sa T .

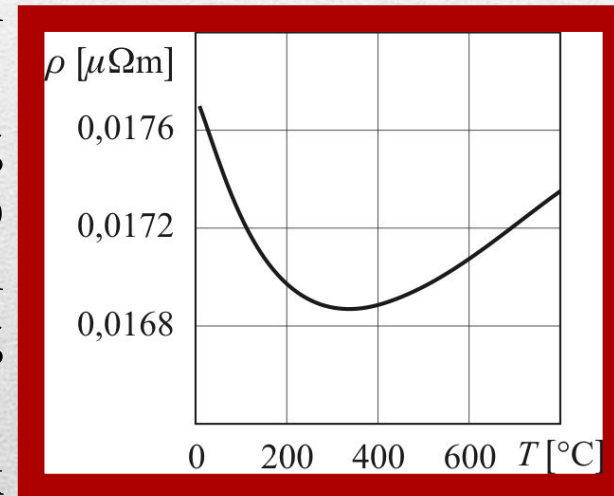


Zavisnost koeficijenta toplotne provodnosti Cu od temperature

OSNOVNE KARAKTERISTIKE PROVODNIKA:

4. Uticaj mehaničkih napreznja na električnu otpornost metala i metalnih legura:

- Električna otpornost metala i metalnih legura mijenja se usljed mehaničkog napreznja, u zavisnosti od vrste i smjera napreznja.
- **Piezorezistencija** - prilikom ravnomjernog elastičnog sabijanja provodnika dolazi do smanjenja električne provodnosti, a pri ravnomjernom elastičnom istezanju do njenog povećanja.
- Plastična deformacija metala i legura uvijek dovodi do povećanja električne otpornosti, bez obzira da li do nje dolazi sabijanjem ili istezanjem.



Zavisnost električne otpornosti Cu od temperature žarenja

PROVODNI MATERIJALI VELIKE ELEKTRIČNE PROVODNOSTI:

- U tabeli su date osnovne karakteristike metala velike električne provodnosti (željezo, iako ne spada u metale velike električne provodnosti je dodato zbog poređenja):

Metal	elek. otpor. ρ ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)	temp. koef. otpor. α (1/K)	elek. provod. γ (10^6 S/m)	topl. provod. λ (W/mK)
srebro	0,0162	0,0036	61,5	453
bakar	0,0169	0,0040	58,2	385
zlato	0,0240	0,0037	40,9	312
aluminijum	0,0262	0,0042	35,5	209
željezo	0,0971	0,0057	10,3	80,2

METALI VELIKE ELEKTRIČNE PROVODNOSTI:

1. BAKAR

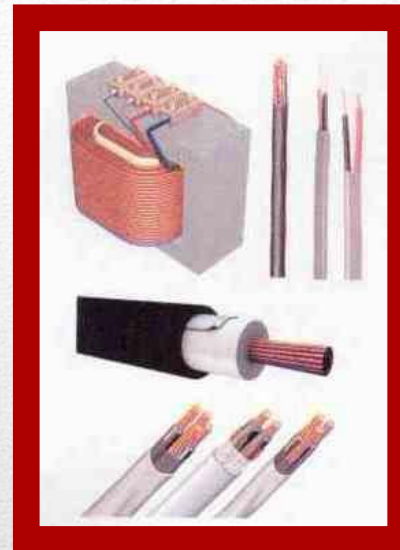
- je hemijski element koji se u prirodi najčešće nalazi kao kolpinit (CuFeS_2), halkozin (Cu_2S), kuprit (Cu_2O), ili, nekad i čist.
- Ima sjajno crvenu boju.
- Proces dobijanja bakra dijeli se na dvije faze:
 - dobijanje sirovog bakra
 - prečišćavanje sirovog bakra (za primjene u elektrotehnici potrebna je čistoća veća od 99,5%).
- Relativno je tvrd i veoma plastičan.
- Lako se obrađuje valjanjem, izvlačenjem i presovanjem.
- Otporan je na koroziju, a neotporan na djelovanje organskih kiselina i amonijaka.
- Poslije srebra, bakar je najbolji provodnik toplote i elektriciteta.



METALI VELIKE ELEKTRIČNE PROVODNOSTI:

1. BAKAR

- Proizvodi od bakra su u obliku žica, limova, traka.
- U elektrotehnici se koristi za izradu provodnika, kablova, namotaja električnih mašina, anoda u galvanohemiji i galvanoplastici i za izradu elektroda u vakuumskim cijevima.
- Pored čistog bakra, u elektrotehnici se često primjenjuju i njegove legure.
- Prema važećim standardima, pod legurama bakra se podrazumijevaju materijali sa dominantnim sadržajem bakra.
- Legure bakra je moguće podijeliti prema načinu izrade, namjeni, broju glavnih dodatih elemenata i prirodi glavnih dodatih elemenata. Koristeći posljednju podjelu, legure bakra se dele na **bronze** i **mesinge**.



METALI VELIKE ELEKTRIČNE PROVODNOSTI:

2. ALUMINIJUM

- je hemijski element koji se u prirodi nalazi u obliku raznih ruda koje sadrže aluminijum oksid (Al_2O_3).
- Srebrnasto-bijele je boje.
- Spada u lake metale.
- Proces dobijanja aluminija dijeli se na dvije faze:
 - dobijanje Al_2O_3 ,
 - elektroliza aluminijuma.
- Relativno je mek i plastičan.
- Lako se obrađuje valjanjem i kovanjem u hladnom stanju.
- Podesan je za dobijanje tankih žica i folija.
- U dodiru sa vazduhom skoro trenutno oksidiše, prevlačeći se slojem oksida.



METALI VELIKE ELEKTRIČNE PROVODNOSTI:

2. ALUMINIJUM

- **Aluminijum** izuzetno dobro provodi elektricitet i toplotu. Nakon bakra, aluminijum je najčešće korišćen metal u elektrotehnici. Koristi se za izradu provodnika, kablova, tankoslojnih i drugih provodnih djelova, elektroda integrisanih kola itd.
- Pored čistog aluminijuma, u elektrotehnici su i legure aluminijuma našle značajnu primjenu.

❖ Poređenje Al i Cu:

- Aluminijum je 3,5 puta lakši od bakra.
- Provodnost aluminijuma je 1,6 puta manja od provodnosti bakra (alumijski provodnik iste dužine i ukupnog otpora ima 1,6 puta veći presjek nego bakar).
- Aluminijum je znatno manje čvrstoće od bakra.
- Iako je temperatura topljenja aluminijuma niža od temperature topljenja bakra, kod aluminija je potrebno više energije, jer ima veću specifičnu toplotu i tačku topljenja.
- Aluminijum je skoro dva puta jeftiniji od bakra.

METALI VELIKE ELEKTRIČNE PROVODNOSTI:

3. ZLATO

- **Zlato** je hemijski elemenat I grupe Periodnog sistema i u prirodi se nalazi skoro isključivo u čistom stanju.
- Sjajno je žute boje.
- Veoma je meko i istegljivo.
- Lako se obrađuje kovanjem i izvlačenjem.
- Djelove od zlata je moguće lako spajati gasnim postupkom, elektrolučno i lemljenjem.
- Otporno je na koroziju, postojano je i otporno na djelovanje svih kiselina, osim tzv. carske vode (smješa hlorovodonične i azotne kiseline, u razmjeri 3 : 1).
- Izuzetno je skupo. U elektrotehnici se koristi za izradu kontakata, provodnih slojeva, zaštitnih prevlaka, elektroda fotootpornika i žica mikroelektronskih kola.



METALI VELIKE ELEKTRIČNE PROVODNOSTI:

4. SREBRO

- **Srebro** se u prirodi najčešće nalazi kao argenitit (Ag_2S), ili čisto.
- Sjajno bijele je boje.
- Dosta je meko i istegljivo, pa se može oblikovati u tanke žice i folije.
- Srebro je postojano na vazduhu, zbog čega se ubraja u plemenite metale. Otporno je na djelovanje kisjelina pri sobnoj temperaturi. Pod dejstvom vodonik sulfida, koji se nalazi u vazduhu, prevlači se tankim slojem srebrosulfida tamne boje.
- Od svih materijala najbolje provodi elektricitet i toplotu. U elektrotehnici se primjenjuje za izradu fotokatoda, provodnih prevlaka, fotoosjetljivih emulzija, izvoda i elektroda elektrovakuumske tehnike, kontakata.



PROVODNI MATERIJALI MALE ELEKTRIČNE PROVODNOSTI:

- Zajednička osobina provodnih materijala male električne provodnosti su znatno veća električna otpornost u odnosu na bakar, mali temperaturni koeficijent električne otpornosti i postojanost prema koroziji.

LAKO TOPLJIVI MATERIJALI:



TEŠKO TOPLJIVI MATERIJALI:

