

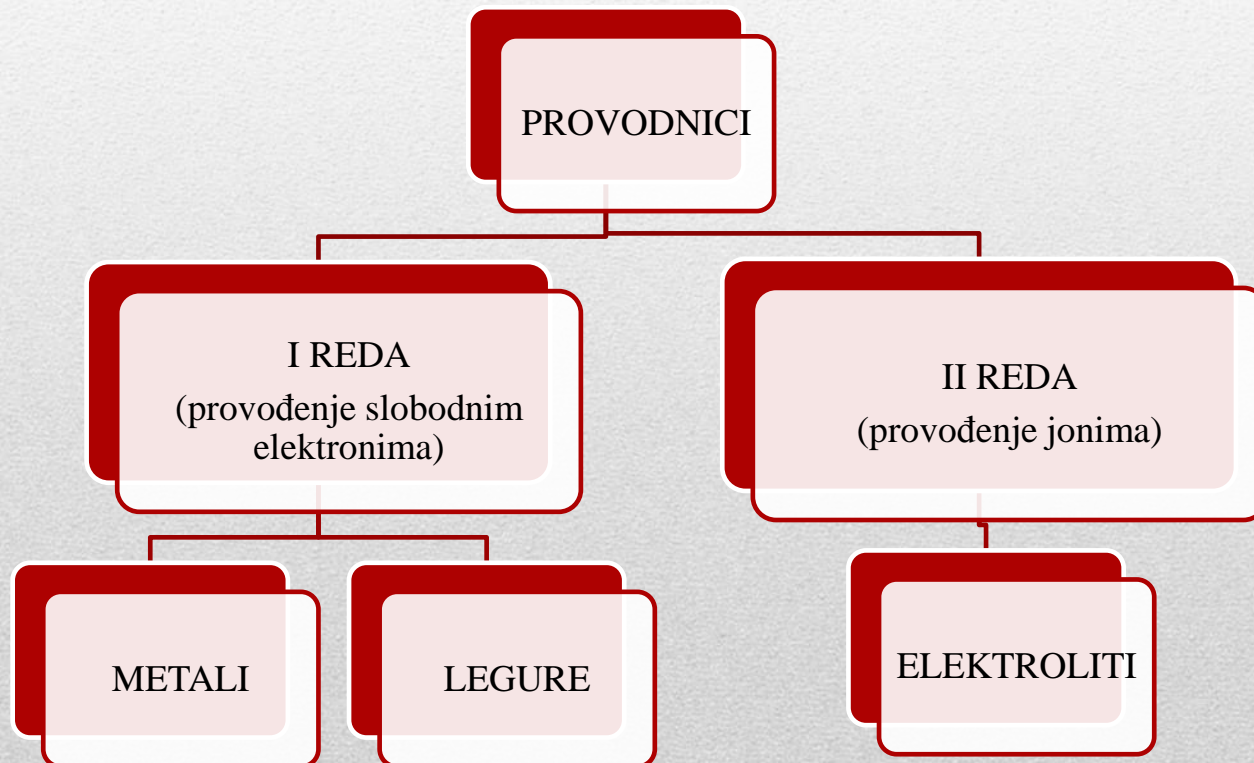
ELEKTROTEHNIČKI MATERIJALI

Doc. dr Milena Đukanović
milenadj@ac.me

**PREDAVANJE VI | VII
PROVODNICI
SUPERPROVODNICI**

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

Alkalni

Zemnoalkalni

Lantanidi

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 usmjerenom 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 otpornosti 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 otpornosti 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.

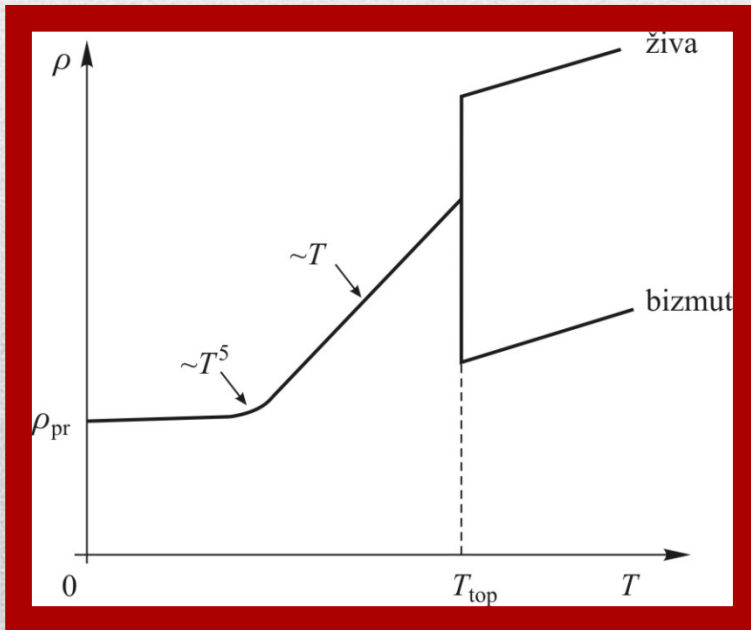
- Pri višim temperaturama sudaranje elektrona usljed toplotne vibracije rešetke je jače izraženo i iznosi:

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

OSNOVNE KARAKTERISTIKE PROVODNIKA:

3. Zavisnost električne otpornosti 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.

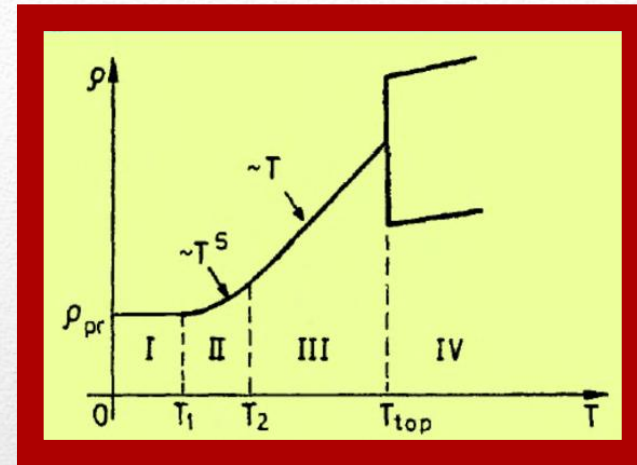
OSNOVNE KARAKTERISTIKE PROVODNIKA:

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 linearna 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:

4. Temperaturni koeficijent električne otpornosti:

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

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

- Temperaturni koeficijent električne otpornosti je pri nižim temperaturama izrazito temperaturno zavisian, 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.

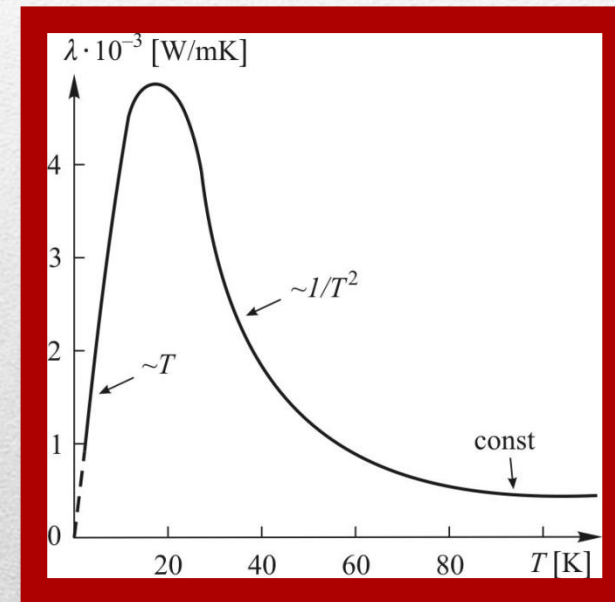
OSNOVNE KARAKTERISTIKE PROVODNIKA:

5. Koeficijent toplotne provodnosti:

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

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

- 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.

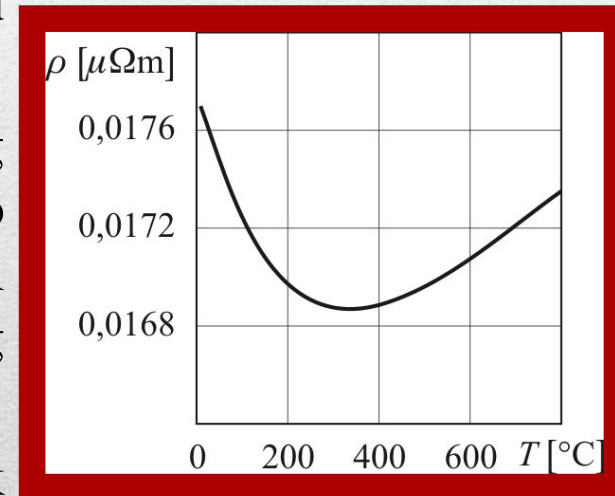


Zavisnost koeficijenta toplotne provodnosti Cu od temperature.

OSNOVNE KARAKTERISTIKE PROVODNIKA:

6. 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 ravnornjornog elastičnog sabijanja provodnika dolazi do smanjenja električne provodnosti, a pri ravnornjornom elastičnom istežanju do njenog povećanja.
- Plastična deformacija metala i legura uvijek dovodi do povećanja električne otpornosti, bez obzira da li do nje dolazi sabijanjem ili istežanjem.



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 dijele 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 aluminijuma 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 (aluminijski 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

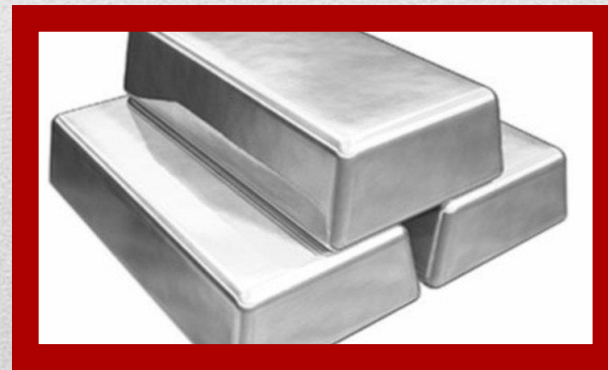
- **Zlato** je hemijski element I grupe Periodnog sistema i u prirodi se nalazi skoro isključivo u čistom stanju.
- Sjajno je žute boje.
- Veoma je meko i istegljivo.
- Lako se obrađuje kovanjem i izvlačenjem.
- Djelove od zlata je moguće lako spajati gasnim postupkom, elektrolučno i lemljenjem.
- Otporno 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:

ŽIVA

OLOVO

CINK

GVODŽDE

BIZMUT

INDIJUM

KOBALT

KALAJ

TEŠKO TOPLJIVI MATERIJALI:

VOLFRAM

MOLIBDEN

TANTAL

HROM

PROVODNI MATERIJALI SPECIJALNIH NAMJENA

MATERIJALI ZA ELEKTRIČNE KONTAKTE

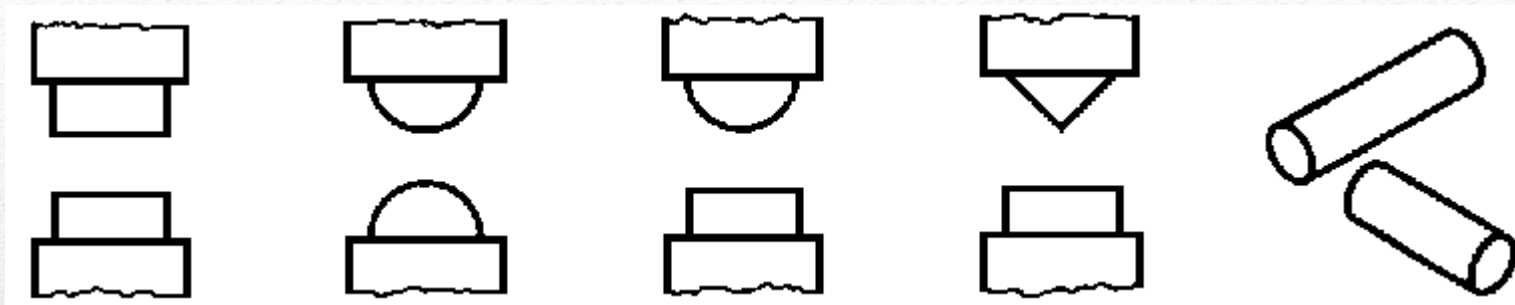
- **Električni kontakti** su neizostavna komponenta svih električnih uređaja čija pouzdanost rada upravo zavisi od njih. To su konstrukcijski sklopovi, u kojima se kontakti između pojedinih provodnih elemenata ostvaruju pritiskanjem jednog na drugi element, pomoću kontaktnih opruga ili navojaka, ili na neki drugi način.
- Električni kontakti moraju jasno razdvajati stanje „on“ i stanje „off“ i biti pouzdani.

Prema
mehanizmu rada

Prekidni
električni
kontakti

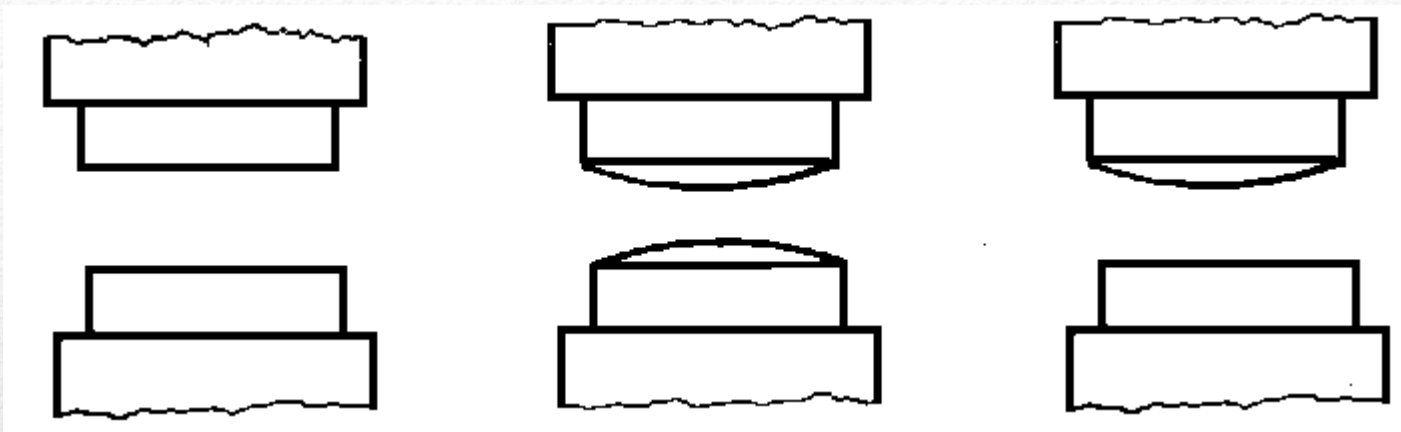
Klizni
električni
kontakti

MATERIJALI ZA ELEKTRIČNE KONTAKTE



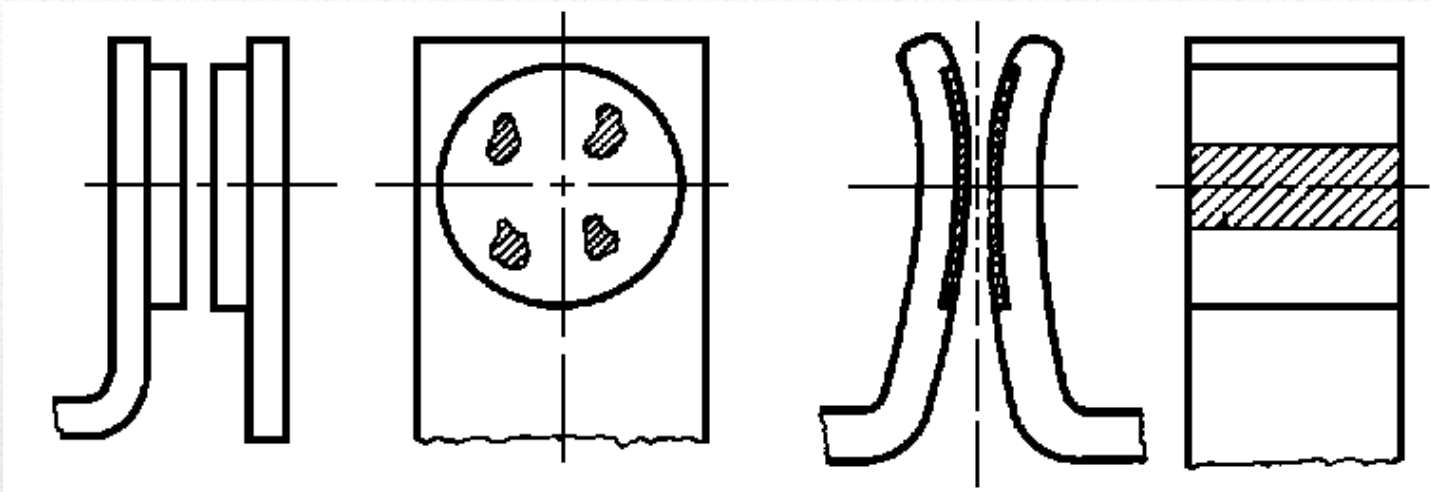
- U **kontakte za mala opterećenja** ubrajaju se vremenski releji, mjerni preklopnici, precizni kontakti u instrumentima itd.
- Materijali koji se koriste za njihovi izradu su: platina, paladijum, iridijum, rodijum, srebro, zlato, volfram i molibden.
- Zbog visoke cijene platine, zlata i rodijuma koriste se platinirani kontakti: nositelj je bakar ili srebro, a iznad je pločica od npr. platine.
- Takođe se često koriste i legure zlata i platine, platine i iridijuma (dobra mehanička svojstva), kao i zlata, srebra i nikla (koriste se u lošim atmosferskim uslovima).

MATERIJALI ZA ELEKTRIČNE KONTAKTE



- Kod **kontakata za srednja opterećenja** dolazi do većeg trošenja i većeg zagrijavanja kontakata.
 - Materijali koji se koriste za izradu kontakata za srednja opterećenja su: volfram, srebro, srebro – volfram, srebro – kadmijum, srebro – nikal, srebro – molibden.
 - Kod većih opterećenja koristi se volfram, jer je otporan na stvaranje električnog luka.
 - Srebro se koristi za telefonske i telegrafske releje.
-

MATERIJALI ZA ELEKTRIČNE KONTAKTE



- **Kontakti za velika opterećenja** trebaju imati posebnu konstrukciju sa većim dodirnim površinama zbog lakšeg odvođenja toplote.
- Dobri materijali za kontakte za velika opterećenja su bakar, legure bakra, srebro i legure srebra.

MATERIJALI ZA ELEKTRIČNE OTPORNIKE:

- Za izradu električnih otpornika uglavnom se koriste otporne legure ($\rho \sim 10^{-6}\Omega\text{m}$).
- Otpornik je element strujnog kruga kojem je zadatak da na sebe u različite svrhe preuzima jedan dio ili cijeli napon strujnog kruga.
- Uloga otpornika može biti različita: regulacija struje i napona, mjerne svrhe, pretvaranje struje u toplotu itd.
- Pri preuzimanju dijela ili cijelog napona, struja koja teče kroz otpornik uzrokuje da otpornik na sebe preuzima određenu snagu.
- Dimenzioniranje otpornika u strujnom krugu određuje se prema:
 - a) iznosu potrebnog električnog otpora
 - b) iznosu dozvoljene struje (da se ne dostigne ili pređe maksimalna temperatura)
 - c) visini napona.
- Sa stanovišta snage i veličine otpora postoje dvije osnovne vrste otpornika:
 - a) žičani
 - b) nežičani

PROJEKTOVANJE OTPORNIKA:

- Otpornici od otporne žice se izrađuju namotavanjem izolovane ili neizolovane žice na izolaciono tijelo od keramike.
- Koriste se legure čije se specifične otpornosti kreću od $0,5\text{mm}^2/\text{m}$ do $1,3\text{mm}^2/\text{m}$ kao što su hromnikl (80%Ni plus 20%Cr), manganin, konstantan i dr. Izborom dužine i presjeka mogu se dobiti otpornici vrijednosti od 0.2Ω do $1\text{M}\Omega$ pogodni za rad na višim temperaturama od 200°C do 300°C .
- Prilikom projektovanja otpornika potrebno je odrediti geometrijske dimenzije tijela, tj. dužinu i presjek upotrijebljenog otpornog materijala uz poznavanje nominalnih vrijednosti parametara.
- Jedan od važnijih parametara je pregrijavanje otpornika. Ako se temperatura otpornika pri radu poveća sa sobne temperature T_0 za ΔT , tada koeficijent prenošenja toplote α_P [$\text{W}/^\circ\text{C cm}^2$] direktno utiče na snagu koju otpornik predaje spoljašnjoj sredini. Ta snaga pregrijavanja iznosi:

$$\bullet P_d = \alpha_P S \Delta T$$

PROJEKTOVANJE OTPORNIKA:

- Proračun raznih parametara:
 1. Površina hlađenja S se dobija kao:

$$S = \frac{P_d}{\alpha_p \Delta T}$$

2. Kako je površina cilindra $S = 2r\pi L = D\pi L$, iz toga slijedi da je dužina cilindra $L = \frac{S}{\pi D}$.

3. Po cijeloj površini cilindra namotana je otporna žica prečnika $d_{\check{z}}$ i dužine $l_{\check{z}}$. Pošto namotaji prekrivaju cijelu površinu omotača tijela otpornika, tada je površina S jednaka projekciji površine koju zauzima sama žica:

$$S \cong d_{\check{z}} l_{\check{z}}.$$

4. Na osnovu otpornosti otpornika od žice dobija se prečnik žice:

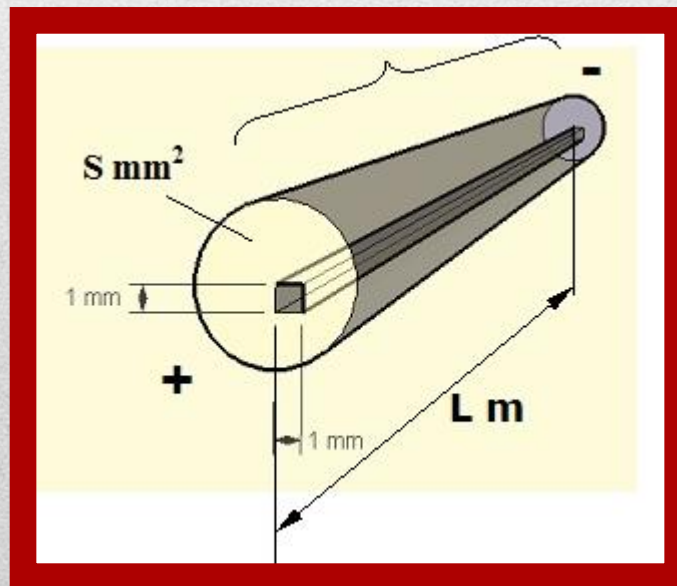
$$R = \rho \frac{l_{\check{z}}}{S_{\check{z}}} = \rho \frac{l_{\check{z}}}{\left(\frac{d_{\check{z}}}{2}\right)^2 \pi} = \rho \frac{4l_{\check{z}}}{\pi d_{\check{z}}^2} = 4\rho \frac{S}{\pi d_{\check{z}}^3},$$

$$d_{\check{z}} = \sqrt[3]{\frac{4\rho S}{\pi R}}$$

PROJEKTOVANJE OTPORNIKA:

- Proračun raznih parametara:

5. Maksimalna struja iznosi: $I_{max} = \sqrt{\frac{P_{max}}{R}}$.
6. Ukupni maksimalni napon iznosi: $U_{max} = RI_{max}$.
7. Broj namotaja se može izračunati kao: $N = \frac{L}{d_z}$.
8. Napon između namotaja iznosi: $U_z = \frac{U_{max}}{N}$.



ZADACI:

1. Otpornik $R = 12 \text{ k}\Omega$, nominalne snage $P_d = 6 \text{ W}$ pri $\Delta T = 60^\circ\text{C}$ načinjen je namotavanjem žice od konstantana $\rho = 0,5 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$, $\alpha_p = 1 \cdot 10^{-3} \text{ W}/\text{cm}^2\text{C}$, na keramički cilindrični štap prečnika $D = 3 \text{ cm}$ i to zavojak do zavojka sa oksidnim slojem kao izolacijom.
- Odrediti dužinu cilindra L , dužinu žice i njen prečnik, kao i maksimalnu struju, maksimalni napon i broj namotaja žice.
- Za poznatu nominalnu snagu i temperaturu pregrijavanja, može se lako izračunati površina hlađenja:

$$\bullet S = \frac{P_d}{\alpha_p \Delta T} = 100 \text{ cm}^2$$

- Dužina cilindra dobija se prema formuli:

$$\bullet L = \frac{S}{\pi D} = 10.6 \text{ cm}$$

- Prečnik žice se dobija kao:

$$\bullet d_{\check{z}} = \sqrt[3]{\frac{4\rho S}{\pi R}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 0.5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^4}{\pi \cdot 12 \cdot 10^3}} = 0.08 \text{ mm}$$

ZADACI:

- Dužina žice iznosi:

- $l_{\check{z}} = \frac{S}{d_{\check{z}}} = 125m$

- Maksimalna struja iznosi :

- $I_{max} = \sqrt{\frac{P_{max}}{R}} = 22,3mA$

- Maksimalni napon iznosi:

- $U_{max} = RI_{max} = 268V$

- Broj namotaja iznosi:

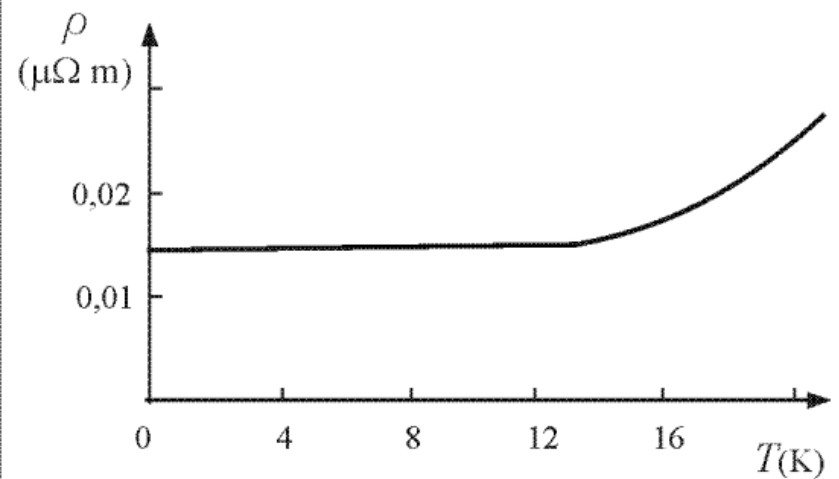
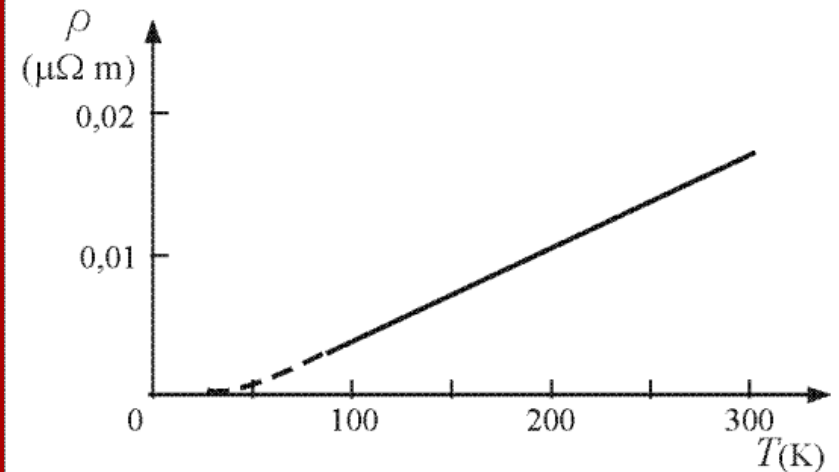
- $N = \frac{L}{d_{\check{z}}} = 1325$

SUPERPROVODNICI:

- ❖ Superprovodnici su materijali koji provode električnu struju bez gubitaka.
- ❖ Pojava superprovodnosti primijećena je na vrlo niskim temperaturama, bliskim apsolutnoj nuli ($T = 0 \text{ K}$) ili bolje reći na temperaturi tečnog helijuma ($T = 4.2 \text{ K}$).
- ❖ Međutim, u međuvremenu se otkrilo da ove temperature, tzv. kritične temperature, za određene superprovodne materijale mogu biti i znatno više, npr.:
 - ✓ $T_{Kr} = 23.2 \text{ K}$ za superprovodni niobijum-germanijum
 - ✓ $T_{Kr} = 100 \text{ K}$ za superprovodni keramički materijal.
- ❖ Ovo otkriće ekonomičnijih visokotemperaturnih superprovodnika je povećalo i naučna istraživanja u ovoj oblasti, za koju se očekuje da izazove novu tehnološku revoluciju u elektrotehnici, sličnu poluprovodničkoj tokom posljednjih decenija, uz rasprostranjenu komercijalnu primjenu.

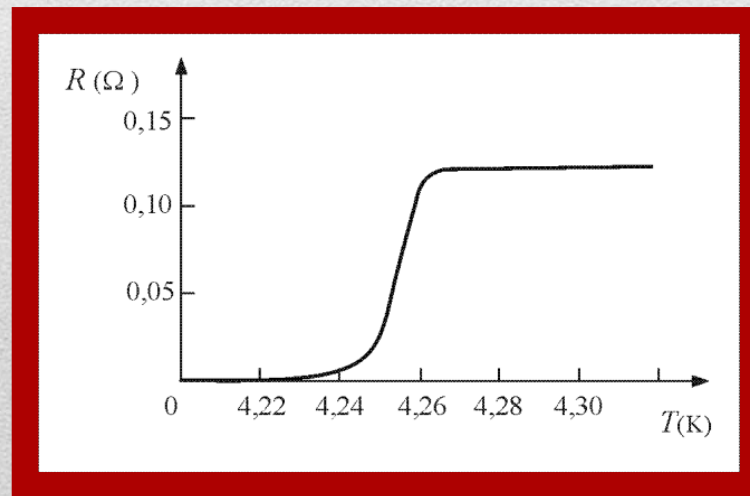
SUPERPROVODNICI:

- ❖ Kod potpuno čistih metala specifična električna otpornost teži, teorijski, nuli kada apsolutna temperatura teži nuli.
- ❖ Na gornjoj slici je prikazana zavisnost specifične električne otpornosti čistog bakra od temperature.
- ❖ Na donjoj slici je prikazan bakar sa primjesama i nesavršenostima kristalne strukture, tj. realniji slučaj u praksi, pa specifična električna otpornost ima konstantnu, takozvanu zaostalu vrijednost u blizini apsolutne nule.



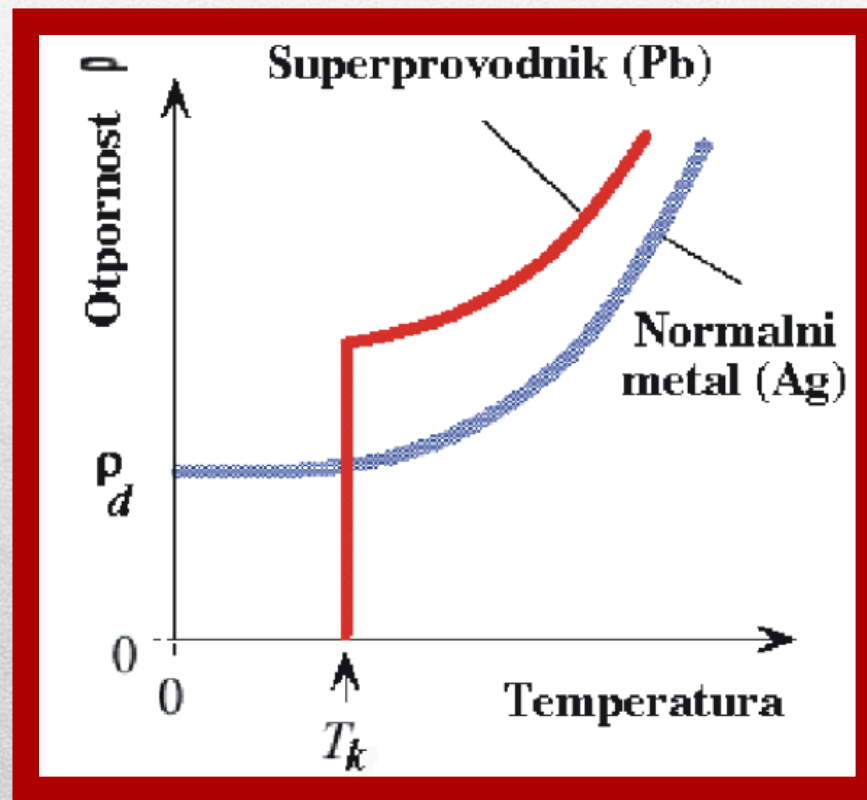
SUPERPROVODNICI:

- ❖ Specifični slučaj se javlja kod nekih metala i metalnih legura kod kojih je zavisnost specifične električne otpornosti od temperature pri izuzetno niskim temperaturama sasvim drugačija od one prikazane na prethodnom slajdu.
- ❖ Kod ovih provodnih materijala specifična električna otpornost pri kritičnoj temperaturi naglo opada od neke određene vrijednosti na nulu. Pri daljem snižavanju temperature specifična električna otpornost ovih materijala zadržava nultu vrijednost, što se vidi na slici ispod.
- ❖ Takvi materijali se zbog ove svoje osobine nazivaju superprovodni, a sama osobina o kojoj je reč superprovodnost.



SUPERPROVODNICI:

- ❖ Superprovodnom materijalu od olova (Pb) naglo vrijednost otpornosti pada na 0 pri kritičnoj temperaturi $T_{Kr} = 7.2 \text{ K}$, dok normalni provodnik srebro (Ag) nema to svojstvo.



SUPERPROVODNICI:

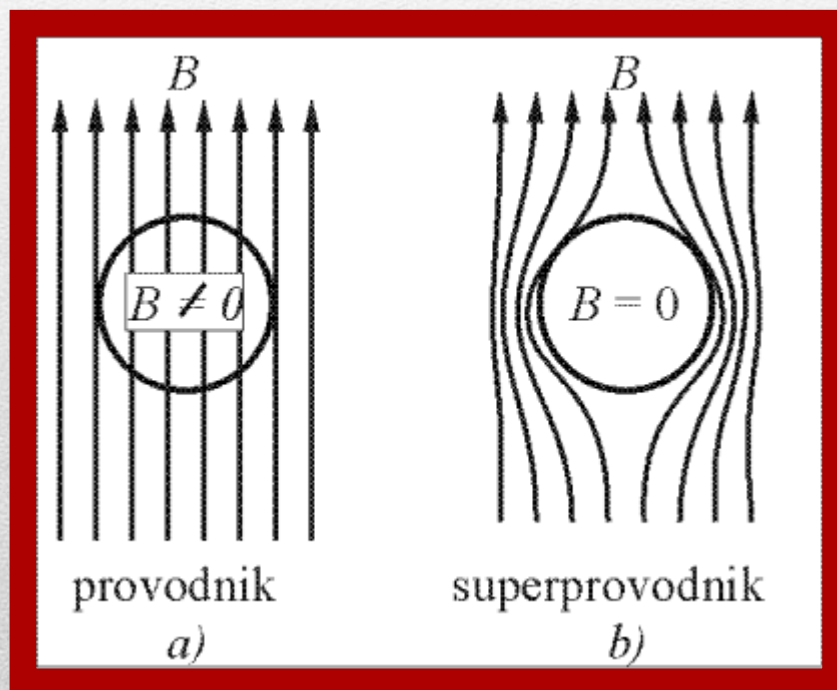
Element	Kritična temperatura T_{Kr} [K]
Aluminijum Al	1.175-1.196
Indijum In	3.39-3.404
Molibden Mo	0.899-0.916
Niobijum Nb	9-9.7
Cink Zn	0.855-0.875
Volfram W	0.0154-0.012
Vanadijum V	4.5-5.475

SUPERPROVODNICI:

- ❖ Pored kritične temperature, na pojavu superprovodnosti utiču i magnetno polje (H) u kojem se superprovodnik nalazi i gustina struje (J) u njemu.
- ❖ Dakle, moraju biti ispunjeni i uslovi da je magnetno polje manje od nekog kritičnog magnetnog polja ($H < H_{Kr}$) i da je gustina struje manja od neke kritične gustine struje ($J < J_{Kr}$), pri čemu postoji međusobna zavisnost ove tri veličine.
- ❖ Npr. ukoliko je $T < T_{Kr}$, a superprovodnik je smješten u magnetno polje koje je manje od kritičnog ($H < H_{Kr}$), dolazi do pojave iščezavanja magnetnog polja u unutrašnjosti superprovodnika, što je još poznato kao *Majsnerov efekat*.

SUPERPROVODNICI:

- ❖ Majsnerov efekt podrazuimjeva da se superprovodni materijal ponaša kao idealni dijamagnetik. To znači da spoljašnje magnetno polje ne prodire u materijal koji se nalazi u superprovodnom stanju.



Prikaz a) provodnika i b) superprovodnika (pri $T < T_c$), smještenih u magnetno polje.