

Materiale electrotehnice

II Conductia electrica

3. Conductia electrica a metalelor

Materiale electrotehnice
Facultatea de Energetica, 2009-2010, anul III ISE

Prof.dr.ing.Florin Ciuprina

Conductia electrica a metalelor

Structura disciplinei

Capitolul	Conținutul
I Proprietati generale ale cristalelor	
1	Corpuri cristaline Sări ale corpurilor Rețele cristaline Defecte ale rețetelor cristaline
2	Electroni în cristale Modele (clasic și cuantice) ale electronului. Benzii de energie asociate corpurilor cristaline. Clasificarea materialelor în conductori, semiconductori și izolatori.
II Conductia electrica	
3	Conductia electrica a metalelor. Conductia metalelor la temperaturi uzuale Supraconductibilitatea electrica.
4	Conductia electrica a semiconductorilor Mecanisme de conductie. Expresia conductivitatii intrinseci și extrinseci
5	Conductia electrica a izolatoarelor solizi Conductia în câmpuri slabe (Conductia electronica, Conductia ionica). Conductia în câmpuri intense (Străpungerea izolatoarelor solizi).
III Proprietati dielectrice	
6	Polarizarea electrica Tipuri de polarizare Polarizarea în câmpuri armonice. Pierderi în dielectrici.
IV Proprietati magnetice	
7	Tipuri de magnetism

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

3. Conductia electrica a metalelor

- 3.1 Conductivitatea electrica a metalelor în aproximatia electronilor cvasiliberi
- 3.2 Relatia dintre drumul liber mijlociu și constanta rețelei
- 3.3 Dependenta conductivitatii metalelor de diferiti factori
- 3.4 Aplicatii ale materialelor conductoare
- 3.5 Supraconductibilitatea electrica

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

3. Conductia electrica a metalelor

- 3.1 Conductivitatea electrica a metalelor in aproximatia electronilor cvasiliberi
- 3.2 Relatia dintre drumul liber mijlociu si constanta retelei
- 3.3 Dependenta conductivitatii metalelor de diferiti factori
- 3.4 Aplicatii ale materialelor conductoare
- 3.5 Supraconductibilitatea electrica

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

3.1 Conductivitatea electrica a metalelor in aproximatia electronilor cvasiliberi

Notiuni generale

Densitatea microscopica a curentului electric: $\mathbf{j}_m = \rho_m \mathbf{v}_m \quad \rho_m = Nq_m$
 $\mathbf{j}_m = Nq_m \mathbf{v}_m$

Densitatea macroscopica a curentului electric: $\mathbf{J} = \rho_m \widetilde{\mathbf{v}}_{mc} = Nq_m \widetilde{\mathbf{v}}_{mc}$

purtatorii de sarcina = electroni: $\mathbf{J} = Nq_m \widetilde{\mathbf{v}}_D = Nq_m \mathcal{M} \mathbf{E}$

Legea conductiei electrice: $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$

→ $\sigma = Nq_m \mathcal{M}$

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

3.1 Conductivitatea electrica a metalelor in aproximatia electronilor cvasiliberi

Ipoteze:

- Metal monovalent
- $E = E_i$

$dN_0 = \frac{(2m_0^3)^{\frac{1}{2}}}{2\pi^2 \hbar^3} w^{\frac{1}{2}} \varphi(w) dw$

$\varphi(w) = \varphi_0(w) + \tau q_0 \mathbf{v} \mathbf{E} \frac{\partial \varphi_0(w)}{\partial w} \quad \varphi_0(w) = \frac{1}{e^{\frac{w - \mu_0}{kT}} + 1}$

$w_F(0) = \frac{\hbar^2}{2m_0} (3n^{\frac{2}{3}} N_0)^{\frac{2}{3}} \quad w_F(T) \approx w_F(0)$

$w = \frac{m_0^* v^2}{2} = \frac{m_0^*}{2} (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)$

$\mathbf{v} = \mathbf{v}_T + \mathbf{v}_D, (v_T \gg v_D) \Rightarrow v_x = v_y = v_z$

Admitind ca in interiorul intervalului dw electronii au practic aceeași viteză v_x

$dJ_x = dN_0(-q_0)v_x$
 $dJ_x = -\frac{(2m_0^*)^{\frac{3}{2}}}{2\pi^2 \hbar^3} m^{\frac{1}{2}} \varphi(w) q_0 v_x dw$

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

3.1 Conductivitatea electrica a metalelor in aproximatia electronilor cvasiliberi

$$dJ_x = -\frac{(2m_0^3)^{\frac{2}{3}}}{2\pi^2\hbar^3} w^{\frac{1}{2}} \varphi_0(w) q_0 v_x dw$$

$$J_x = \int_{v_x=-\infty}^{v_x=+\infty} dJ_x = \int_{v_x=-\infty}^{v_x=+\infty} \left[-\frac{(2m_0^3)^{\frac{2}{3}}}{2\pi^2\hbar^3} w^{\frac{1}{2}} \varphi_0(w) q_0 v_x + \tau q_0 E_x \int_{v_x=-\infty}^{v_x=+\infty} w^{\frac{1}{2}} v_x \frac{\partial \varphi_0(w)}{\partial w} dw \right]$$

$$I_1 = \int_{v_x=-\infty}^{v_x=+\infty} w^{\frac{1}{2}} v_x \varphi_0(w) dw,$$

$$I_2 = \int_{v_x=-\infty}^{v_x=+\infty} w^{\frac{1}{2}} v_x \frac{\partial \varphi_0(w)}{\partial w} dw.$$

$$J_x = \sigma_x E_x = \sigma E_x$$

$$\sigma = \frac{N_0 q_0^2 \tau}{m_0^*}$$

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

3.1 Conductivitatea electrica a metalelor in aproximatia electronilor cvasiliberi

$$\sigma = \frac{N_0 q_0^2 \tau}{m_0^*} \quad \sigma = \frac{N_0 q_0^2 \tilde{l}}{m_0^* v_F}$$

$$\rho = \frac{m_0^*}{N_0 q_0^2 \tau} \quad \rho = \frac{m_0^* v_F}{N_0 q_0^2 \tilde{l}}$$

Metal	Ag	Al
σ [MS/m]	68	36
\tilde{l} [Å]	570	147
$N_0 \cdot 10^{-28}$ [m ⁻³]	5,8	18,06
$\tau \cdot 10^{14}$ [s]	4,1	0,73
$w_F(0)$ [eV]	5,48	12,01
v_F [Mm/s]	1,4	2,02
a [Å]	4,09	2,88

$\tilde{l} \gg a$

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

3. Conductia electrica a metalelor

- 3.1 Conductivitatea electrica a metalelor in aproximatia electronilor cvasiliberi
- 3.2 Relatia dintre drumul liber mijlociu si constanta retelei
- 3.3 Dependenta conductivitatii metalelor de diferiti factori
- 3.4 Aplicatii ale materialelor conductoare
- 3.5 Supraconductibilitatea electrica

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

3.2 Relatia dintre drumul liber mijlociu si constanta retelei

Agitatia termica = unde termice: - longitudinale sau transversale
 - acustice sau optice

- stationare (unda reflectata in faza cu unda incidenta)
 ⇕
 - moduri normale de vibratie

Importante pentru studiul conductivitatii metalelor la temperaturi uzuale

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

3.2 Relatia dintre drumul liber mijlociu si constanta retelei

Ipozeze:

- metal monovalent
- mod normal de vibratie, acustic si longitudinal: $\lambda_j \gg a$

a)

b)

c)

$\bar{l} = \lambda/2 \gg a$

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

3. Conductia electrica a metalelor

- 3.1 Conductivitatea electrica a metalelor in aproximatia electronilor cvasiliberi
- 3.2 Relatia dintre drumul liber mijlociu si constanta retelei
- 3.3 Dependenta conductivitatii metalelor de diferiti factori
- 3.4 Aplicatii ale materialelor conductoare
- 3.5 Supraconductibilitatea electrica

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

3.3 Dependenta conductivitatii metalelor de diferiti factori

$$\sigma = \frac{N_0 q_0^2 \tau}{m_0^*}$$

$$\rho = \frac{m_0^*}{N_0 q_0^2} \left(\frac{1}{\tau_T} + \frac{1}{\tau_{imp}} + \frac{1}{\tau_{mec}} \right) = \rho_T + \rho_{imp} + \rho_{mec}$$

$$\rho = \rho_T + \rho_{rez} \text{ - relatia lui Mathiessen}$$

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

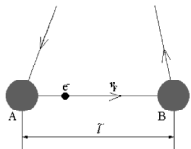
Conductia electrica a metalelor

3.3 Dependenta conductivitatii metalelor de diferiti factori

Influenta temperaturii

$$\sigma = \frac{N_0 q_0^2 \tau}{m_0^*}$$

electron in echilibru termodinamic cu retea cristalina:



$$\Delta w = \frac{3}{2} kT \quad T > T_D$$

principiul de incertitudine al lui Heisenberg: $\Delta w \Delta t \geq \frac{\hbar}{2} \rightarrow \frac{3}{2} kT \tau \geq \frac{\hbar}{2} \rightarrow$

$$\tau = \frac{\hbar}{3kT} \rightarrow \sigma = \frac{N_0 q_0^2 \tau}{m_0^*} = \frac{N_0 q_0^2 \hbar}{3k m_0^* T} \rightarrow \sigma = \frac{C}{T} \quad T > T_D$$

Element	Cu	Ag	Au	Pt	Al
T_D [K]	320	214	160	240	428

empiric: $\sigma \approx \frac{C'}{T^5} \quad T \leq T_D$

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

3.3 Dependenta conductivitatii metalelor de diferiti factori

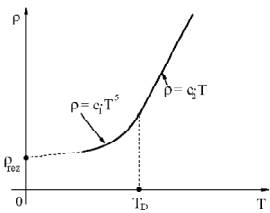
Influenta temperaturii

$$\sigma = \frac{C}{T}, \quad T > T_D$$

$$\sigma \approx \frac{C'}{T^5}, \quad T \leq T_D$$

$$\rho = 1/\sigma$$

$$\rho = \begin{cases} c_1 T^5, & T \leq T_D \\ c_2 T, & T > T_D. \end{cases}$$

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha_\rho (T - T_0)]$$


$$\rho = \rho_T + \rho_{rez}$$

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

3.3 Dependenta conductivitatii metalelor de diferiti factori

Influenta impuritatilor

$$\rho_{imp} = \frac{\pi m_0^* v_F r_i^2 N_i}{q_0^2 N_0}$$

$$\rho_{imp} \approx \text{const} \cdot N_i$$

Conținut de impurități [%]

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

3.3 Dependenta conductivitatii metalelor de diferiti factori

Influenta impuritatilor

soluții solide

amestecuri eutectice

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

3.3 Dependenta conductivitatii metalelor de diferiti factori

Influenta starii de agregare

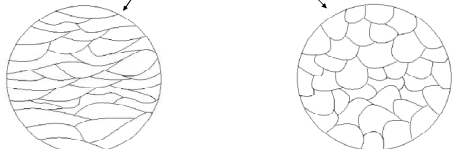
Metal	Ag	Cu	Al	Au	Bi	Sb	Ga
$\rho_{lichid} / \rho_{solid}$	2,1	2,04	2,21	2,29	0,45	0,62	0,58

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

3.3 Dependenta conductivitatii metalelor de diferiti factori

Influenta prelucrărilor mecanice si a tratamentelor termice



Stare tare Stare moale

conductivitatea scade cu 3 până la 6% conductivitatea crește cu 3 până la 6%

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

3. Conductia electrica a metalelor

- 3.1 Conductivitatea electrica a metalelor in aproximatia electronilor cvasiliberi
- 3.2 Relatia dintre drumul liber mijlociu si constanta rețelei
- 3.3 Dependenta conductivitatii metalelor de diferiti factori
- 3.4 Aplicatii ale materialelor conductoare
- 3.5 Supraconductibilitatea electrica

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

3.4 Aplicatii ale materialelor conductoare

- Materiale cu conductivitate electrica mare
- Materiale cu rezistivitate electrica mare
- Materiale pentru contacte electrice
- Materiale cu utilizari speciale

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

3.4 Aplicatii ale materialelor conductoare

- Materiale cu conductivitate electrica mare
- Materiale cu rezistivitate electrica mare
- Materiale pentru contacte electrice
- Materiale cu utilizari speciale

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

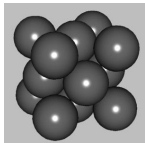
Conductia electrica a metalelor

Materiale cu conductivitate electrica mare

Cuprul si aliajele sale

Cuprul Cu

- cristalizeaza in CFC
- densitatea: 8,9 kg/dm³
- rezistivitatea electrica: $1,7 \cdot 10^{-8} \Omega m$
- rezistenta la rupere: 200 (moale) – 500 (tare) MN/m²
- $\rho(T) = 0,01724 + 0,0000681 (T - 293) \mu\Omega m$
- **utilizari:** conductoare de bobinaj, linii de transport a energiei electrice, colector pentru masini electrice, cabluri pentru inalta frecventa, dispozitive si circuite electronice, aliaje etc.



Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

Materiale cu conductivitate electrica mare

Cuprul si aliajele sale

Aliaje ale cuprului

- **Alame:** Cu (> 50%) + Zn (+ Pb, Mn, Si, Ni, Fe, As)
- densitatea: 8,4 – 8,8 kg/dm³
- rezistivitatea electrica: $(3 - 7) \cdot 10^{-8} \Omega m$
- rezistenta la rupere: 250 – 700 MN/m
- rezistenta mare la coroziune
- **utilizari:** table, benzi, fire, componente pentru stechere, prize electrice, elemente de contact, radiatoare etc.

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

Materiale cu conductivitate electrica mare

Cuprul si aliajele sale

Aliaje ale cuprului

- **Bronzuri: Cu (> 50%) + Sn** (+ Al, Si, Cd, Be, P, Cr, Ti, Ag)
- densitatea: 8,2 – 8,9 kg/dm³
- rezistivitatea electrica: $(2 - 10) \cdot 10^{-8} \Omega m$
- rezistenta la rupere: 300 – 900 MN/m
- duritate mare, rezistenta mare la coroziune
- **utilizari:** conductoare aeriene, fire de troleu, contacte arcuite, lamele de colector etc.

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

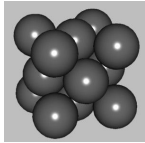
Conductia electrica a metalelor

Materiale cu conductivitate electrica mare

Aluminiul si aliajele sale

Aluminiul Al

- cristalizeaza in CFC
- densitatea: 2,7 kg/dm³
- rezistivitatea electrica: $2,8 \cdot 10^{-8} \Omega m$
- rezistenta la rupere: 70 (moale) – 250 (tare) MN/m²
- **utilizari:** electrozi pentru condensatoare, cabluri si linii aeriene de transport a energiei electrice, conductoare de bobinaj, carcase de masini electrice, aliaje etc.



Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

Materiale cu conductivitate electrica mare

Aluminiul si aliajele sale

Aliaje ale aluminiului

- **Al (> 85%) + Si, Cu, Mg, Mn, Zn, Ni, Be**
- Exemple:
 - Aldrey (98,45 Al; 0,6 Si; 0,7 Mg, 0,2 Fe)
 - Siluminii (11 ... 13,5 % Si)
- **utilizari:** conductoare pentru linii aeriene, piese turnate (colivii pentru motoare asincrone) etc.

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

Materiale cu conductivitate electrica mare

- Fierul - cost scazut, rezistenta mecanica mare;
- utilizari: conductoare solicitate mecanic (trolee pentru macarale, conductoare bimetalice), linii de distributie a energiei electrice;
- Argintul - nu se oxideaza decat la temperaturi ridicate, oxidul de argint este bun conductor;
- utilizari: contacte electrice, armaturi pentru condensatoare;
- Platina - rezistenta mare la coroziune si arc electric;
- utilizari: contacte electrice, termocuple;

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

3.4 Aplicatii ale materialelor conductoare

- Materiale cu conductivitate electrica mare
- Materiale cu rezistivitate electrica mare
- Materiale pentru contacte electrice
- Materiale cu utilizari speciale

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

Materiale cu rezistivitate electrica mare

- **Materiale pentru rezistoare de precizie si etalon**
 - aliaje tip manganina (Cu +Mn, Ni, Al, Fe);
 - aliaje pe baza de metale pretioase (Au-Cu, Ag-Mn-Sn)
- **Materiale pentru reostate**
 - constantan (Cu-Ni 60-40)
 - nichelina (Cu-Ni-Mn 67-30-3)
 - fonta
- **Materiale utilizate in electrotermie**
 - Wolfram, Molibden, Tantal, Niobiu
 - **utilizari:** cupatoare electrice, elemente de incalzire, aparate electrocasnice, lampi cu incandescenta etc.

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

3.4 Aplicatii ale materialelor conductoare

- Materiale cu conductivitate electrica mare
- Materiale cu rezistivitate electrica mare
- Materiale pentru contacte electrice
- Materiale cu utilizari speciale

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

Materiale pentru contacte electrice

- **Caracteristici**
 - rezistenta electrica de contact mica;
 - rezistenta mare la coroziune, eroziune, uzura mecanica, sudare etc.
- **Contacte fixe**
 - *de strangere*: Ag, Cu, Al, Mo.
 - *masive*: Cu, Al + aliaj de lipire.
- **Contacte de rupere**
 - *de putere mica*: aliaje - Au-Ag, Pd-Ag, Pt-Ir, Cu-Au, Ni-Pt, Ag-Cu, - pe baza de W, Mo etc.
 - *de putere medie*: - Cu, Ag, Pd, W, alame, bronzuri, - bimetale (Cu sau Al laminate impreuna cu Ag, Pd, Pt).
 - *de putere mare*: materiale sinterizate (Cu-W, Cu-Ni, Cu-Cr, Ag-Cd) depuse (sub forma de placute) pe piesele de contact.
- **Contacte alunecatoare**
 - *lamete de colector*: Ag, Cu tare, bronzuri cu cadmiu si beriliu.
 - *inele de contact*: bronzuri, alame, otel.
 - *fire de troleu*: bronzuri cu cadmiu si beriliu.
 - *perii*: carbune grafitat, amestecuri de grafit cu cupru sau bronz.

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

3.4 Aplicatii ale materialelor conductoare

- Materiale cu conductivitate electrica mare
- Materiale cu rezistivitate electrica mare
- Materiale pentru contacte electrice
- Materiale cu utilizari speciale

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

Materiale cu utilizari speciale

- Materiale pentru termobimetale
 - cu coeficient de dilatație mic: aliaje Ni-Fe
 - cu coeficient de dilatație mare: Fe, Ni, Cu, constantan (Cu-Ni 60-40), alama
- Materiale pentru termocuple
 - Cu, Fe, Pt, constantan, copel (Cu-Ni 56-44),
 - cromel (Ni-Cr 90-10), alamel (Ni-Al-Mn-Si 95-2-2-1), aliaje Pt-Rh 90-10
- Aliaje de lipit
 - moi ($T_f < 400\text{ }^\circ\text{C}$, $\sigma_f \approx 50\text{-}70\text{ MN/m}^2$)
 - tari ($T_f < 500\text{ }^\circ\text{C}$, $\sigma_f \approx 500\text{ MN/m}^2$)

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

3. Conductia electrica a metalelor

- 3.1 Conductivitatea electrica a metalelor in aproximatia electronilor cvasiliberi
- 3.2 Relatia dintre drumul liber mijlociu si constanta rețelei
- 3.3 Dependenta conductivității metalelor de diferiti factori
- 3.4 Aplicatii ale materialelor conductoare
- 3.5 Supraconductibilitatea electrica

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

3.5 Supraconductibilitatea electrica

Supraconductibilitatea este definită ca fiind proprietatea aparținând anumitor materiale de a avea o rezistivitate electrică nulă ($\rho = 0$) atunci când temperatura materialului este mai mică decât o temperatură critică T_c , și intensitatea câmpului magnetic nu depășește o valoare critică H_c . Astfel de materiale sunt denumite supraconductori.

Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926)
fizician olandez

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

3.5 Supraconductibilitatea electrica

- Efecte asociate supraconductibilitatii
- Teoria clasica a supraconductibilitatii. Ec. London
- Teoria BCS
- Istoria supraconductorilor
- Tipuri de supraconductori
- Aplicatii ale supraconductorilor

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

3.5 Supraconductibilitatea electrica

- Efecte asociate supraconductibilitatii
- Teoria clasica a supraconductibilitatii. Ec. London
- Teoria BCS
- Istoria supraconductorilor
- Tipuri de supraconductori
- Aplicatii ale supraconductorilor

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

Efecte asociate supraconductibilitatii

- Efectul campurilor magnetice intense
- Efectul Meissner
- Efectul frecventelor inalte
- Efectul izotopic

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

Efecte asociate supraconductibilitatii

- Efectul campurilor magnetice intense

Anularea supraconductibilitatii de catre campurile magnetice intense

$$H_c(T) = H_{c0} \left[1 - \left(\frac{T}{T_{c0}} \right)^2 \right]$$

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

Efecte asociate supraconductibilitatii

- Efectul Meissner

Expulzarea campului magnetic din interiorul unui supraconductor

a) $T > T_c$
 $H < H_c$

Conductor normal

b) $T < T_c$
 $H < H_c$

Supraconductor

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

Efecte asociate supraconductibilitatii

- Efectul frecventelor inalte

Anularea supraconductibilitatii la frecvente foarte mari ($10^{13} - 10^{14}$ Hz)

$T < T_c$ si $H < H_c$

$f < 10^{13} - 10^{14}$ Hz

Supraconductor

$T < T_c$ si $H < H_c$

$f > 10^{13} - 10^{14}$ Hz

Conductor normal

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

Efecte asociate supraconductibilitatii

- Efectul izotopic

Temperatura critica T_c variaza cu masa izotopica a materialului

Exemplu:

Hg	$M = 199,5$	$M = 203,4$
	$T_c = 4,185 \text{ K}$	$T_c = 4,146 \text{ K}$

$$M^\alpha T_c = \text{const}$$

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

3.5 Supraconductibilitatea electrica

- Efecte asociate supraconductibilitatii
- Teoria clasica a supraconductibilitatii. Ec. London
- Teoria BCS
- Istoria supraconductorilor
- Tipuri de supraconductori
- Aplicatii ale supraconductorilor

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

Teoria clasica a supraconductibilitatii. Ecuatiile London

Ipozeze privind supraconductorii (la T_c):

- **electroni normali (n)** – interactioneaza cu reseaua (sufera ciocniri)
- **electroni supraconductori (sc)** – nu interactioneaza cu reseaua (nu sufera ciocniri)

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_n + \mathbf{J}_{sc}$$

$$\mathbf{J}_n = -q_0 N_n \mathbf{v}_n$$

$$\mathbf{J}_{sc} = -q_0 N_{sc} \mathbf{v}_{sc}$$

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

Teoria clasica a supraconductibilitatii.

Ecuatiile London

Ecuatiile Maxwell:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t},$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t},$$

$$\text{div } \mathbf{D} = \rho_v,$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0.$$

Ecuatiile London:

ecuatia I: $\mathbf{E} = \Lambda \frac{\partial \mathbf{J}_{sc}}{\partial t}$ sau $\mathbf{E} = \frac{\partial}{\partial t} (\Lambda \mathbf{J}_{sc})$

ecuatia a II-a: $\mathbf{B} = -\text{rot} (\Lambda \mathbf{J}_{sc})$

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

3.5 Supraconductibilitatea electrica


- Efecte asociate supraconductibilitatii
- Teoria clasica a supraconductibilitatii. Ec. London
- Teoria BCS
- Istoria supraconductorilor
- Tipuri de supraconductori
- Aplicatii ale supraconductorilor


Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor


Teoria BCS

- a fost elaborata in 1957 de Bardeen, Cooper si Schrieffer
- explica supraconductibilitatea prin interactiunile electroni – fononi
- la T_c se formeaza perechi Cooper (cooperoni)
- cooperonii au $m_g = 0 \rightarrow$ sunt bosoni (Statistica Bose-Einstein) si nu fermioni (statistica Fermi-Dirac)
- pot exista oricati cooperoni pe acelasi nivel de energie






John Bardeen (1908-1991)
fizician american



Leon Cooper (1930-)
fizician american



Robert Schrieffer (1921-)
fizician american

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

3.5 Supraconductibilitatea electrica

- Efecte asociate supraconductibilitatii
- Teoria clasica a supraconductibilitatii. Ec. London
- Teoria BCS
- Istoria supraconductorilor
- Tipuri de supraconductori
- Aplicatii ale supraconductorilor

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE


Conductia electrica a metalelor

Istoria supraconductorilor


1911 Supraconductibilitatea a fost observata pentru prima data, intr-un esantion de mercur, de catre fizicianul olandez Heike Kamerlingh Onnes, la universitatea din Leiden, Olanda. Acesta a racit mercurul pana la temperatura heliului lichid (4,2 K), moment in care rezistenta sa electrica s-a anulat brusc.

1913 Onnes a fost recompensat cu premiul Nobel pentru cercetarile sale in acest domeniu.


1933 Walther Meissner si Robert Ochsenfeld au descoperit ca un material supraconductor expulzeaza campul magnetic. Acest fenomen este astazi cunoscut ca **efectul Meissner (-Ochsenfeld)**. Efectul Meissner este atat de puternic, incat un magnet poate fi levitat deasupra unui material supraconductor.



Heike Kamerlingh Onnes
1853-1926
fizician olandez



Walther Meissner
1882-1974
fizician german



Robert Ochsenfeld
1901-1993
fizician german

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE


Conductia electrica a metalelor

Istoria supraconductorilor


1957 Teoria BCS: Prima explicatie teoretica a fenomenului de supraconducție, prezentata de fizicienii americani John Bardeen, Leon Cooper si Robert Schrieffer.

1962 Oamenii de stiinta de la Westinghouse au realizat **primul fir supraconductor comercial**, un aliaj de niobiu si titan. Prima utilizare a acestui fir de inalta energie a fost pentru electromagnetii unui accelerator de particule.


1962 Brian D. Josephson, un student din ciclul al treilea al universitatii din Cambridge, a prezis ca un curent electric va circula intre doua materiale supraconductoare, chiar si atunci cand ele sunt separate de un material ne-supraconductor sau un izolant. Acest fenomen de tunelare, cunoscut astazi sub numele de "**efect Josephson**", a fost aplicat la fabricarea unor dispozitive electronice, ca de exemplu CALMAR, un instrument capabil sa detecteze campuri magnetice de intensitati foarte reduse.




John Bardeen (1908-1991)
fizician american



Leon Cooper (1903-)
fizician american



Robert Schrieffer (1921-)
fizician american



Brian Josephson (1931-)
fizician britanic

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

Istoria supraconductivilor

1980 A fost sintetizat cu succes **primul supraconductor organic** (pe baza de carbon) de catre cercetatorul danez Klaus Bechgaard de la Universitatea din Copenhaga impreuna cu trei membri ai unei echipe franceze. Materialul abreviat (TMTSF)₂PF₆ a trebuit sa fie racit la o temperatura de numai 1.2 K si apoi supus unei presiuni inalte pentru a deveni supraconductor. Simpla sa existenta a dovedit posibilitatea crearii de molecule modelate pentru a se comporta intr-un mod previzibil.

Cc1cc(C)sc(C)c1

TMTSF

Structura (TMTSF)₂PF₆

1986 Alex Müller și Georg Bednorz, cercetatori de la laboratoarele IBM din Elvetia au creat un **compus pe baza de ceramica** La_{2-x}Ba_xCuO₄, aceasta devenind **supraconductor** la temperatura cea mai înaltă de până atunci, **30 K**.

Alex Müller (1927)
fiziolan elvetian

Johannes Georg Bednorz (1950)
fizic german

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

Istoria supraconductivilor

1987 O echipa de cercetatori de la Universitatea din Alabama a substituit ytriu (Y) cu lantanu (La) în molecula lui Müller și Bednorz obținând pentru compusul YBa₂Cu₃O_{7-x} o temperatura critica incredibila, de **92 K**. Pentru prima data un material, numit astăzi YBCO (Ytriu, Bariu, Cupru și Oxigen), avea o temperatura critica mai mare decat cea a azotului lichid.

1993 A fost sintetizat primul supraconductor ceramic din **clasa cupratilor de mercur**, clasa actuala de supraconductori din ceramica, cu temperatura de tranzitie cea mai mare. O temperatura critica de 138 K a fost obtinuta în 1994 la Institutul National de Standarde și Tehnologie din Colorado, SUA pentru materialul (Hg_{0.8}Tl_{0.2})Ba₂Ca₂Cu₃O_{8.33}.

2009 Recordul pentru cea mai ridicata temperatura critica este de 254 K. Materialul testat pentru omologarea acestui record este (Tl₁Ba)Ba₂Cu₃O₁₃.

Structura unei ceramici YBCO

● Ba

● O

● Y

● Cu

c

b

a

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

3.5 Supraconductibilitatea electrica

- Efecte asociate supraconductibilitatii
- Teoria clasica a supraconductibilitatii. Ec. London
- Teoria BCS
- Istoria supraconductivilor
- Tipuri de supraconductori
- Aplicatii ale supraconductivilor

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

Tipuri de supraconductori

- Supraconductori de speța I
- Supraconductori de speța a II-a

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

Tipuri de supraconductori

- Supraconductori de speța I
 - numiti si supraconductori usori, au fost primii supraconductori descoperiti si necesita cele mai scazute temperaturi (T_c) pentru a ajunge in stare supraconductoare.
 - sunt in general metale care prezinta o conductivitate importanta la temperatura camerei.
 - sunt caracterizati printr-o tranzitie brusca din starea normala in starea supraconductoare la temperatura critica T_c .
 - in general $T_c < 10$ K.

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

Tipuri de supraconductori

- Supraconductori de speța I

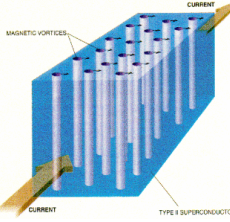
Element	T_c [K]	Element	T_c [K]	Element	T_c [K]
Plumb (Pb)	7,196	Lantaniu (La)	4,88	Tantal (Ta)	4,47
Mercur (Hg)	4,15	Staniu (Sn)	3,72	Indiu (In)	3,41
Paladiu (Pd)	3,3	Crom (Cr)	3	Taliu (Tl)	2,38
Reniu (Re)	1,697	Protactiniu (Pa)	1,40	Toriu (Th)	1,38
Aluminiu (Al)	1,175	Galiu (Ga)	1,083	Molibden (Mo)	0,915
Zinc (Zn)	0,85	Osmiu (Os)	0,66	Zirconiu (Zr)	0,61
Americiu (Am)	0,60	Cadmium (Cd)	0,517	Ruteniu (Ru)	0,49
Titan (Ti)	0,40	Uraniu (U)	0,20	Hafniu (Hf)	0,128
Iridiu (Ir)	0,1125	Beriliu (Be)	0,023	Wolfram (W)	0,0154
Platină (Pt)	0,0019	Rodiu (Rh)	0,000325		

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

Tipuri de supraconductori

- Supraconductori de speța a II-a
- ▶ au fost descoperiti dupa supraconductorii de speța I;
- ▶ in afara de cateva elemente pure (V, Tc, Nb), sunt aliaje metalice si compusi ceramici
- ▶ in general (compusii ceramici) au temperaturi critice T_c mult mai mari decat supraconductorii de speța I;
- ▶ tranzitia din starea normala in starea supraconductorie nu se realizeaza brusc (la o anumita T_c) ci gradual, trecand printr-o faza mixta; intre T_{c1} si T_{c2} , sau intre H_{c1} si H_{c2} , apar fluxoizi (vortexuri) in care materialul este in stare normala.

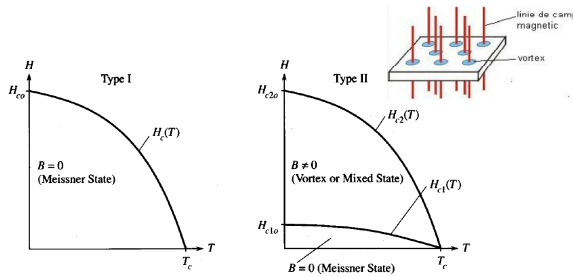


MATERIALE ELECTROTEHNICE, FACULTATEA DE ENERGETICA, ANUL III ISE

Conductia electrica a metalelor

Tipuri de supraconductori

- Supraconductori de speța a II-a



MATERIALE ELECTROTEHNICE, FACULTATEA DE ENERGETICA, ANUL III ISE

Conductia electrica a metalelor

3.5 Supraconductibilitatea electrica

- Efecte asociate supraconductibilitatii
- Teoria clasica a supraconductibilitatii. Ec. London
- Teoria BCS
- Istoria supraconductorilor
- Tipuri de supraconductori
- Aplicatii ale supraconductorilor

MATERIALE ELECTROTEHNICE, FACULTATEA DE ENERGETICA, ANUL III ISE

Conductia electrica a metalelor

Aplicatii ale supraconductorilor

- Levitatia magnetica – Trenuri MAGLEV

Ex: Yamanashi Maglev MLX01 (Japonia)
581 km/h in 2003



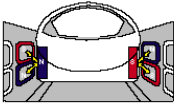

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

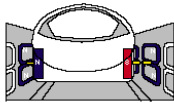
Aplicatii ale supraconductorilor

- Trenuri MAGLEV

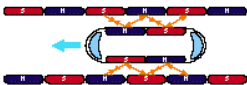
Levitare



Ghidare laterala



Propulsie



Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE


Conductia electrica a metalelor

Aplicatii ale supraconductorilor

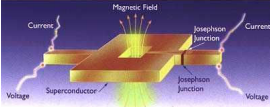
- Biomagnetism

- Magnetic Resonance Imaging (MRI)

Prin aplicarea asupra corpului uman a unui camp magnetic intens, creat de un supraconductor, atomii de hidrogen care exista in apa din corp si moleculele de grasime sunt fortate sa acumuleze energia campului magnetic. Ele cedeaza apoi aceasta energie la o frecventa care poate fi detectata si reprezentata grafic de un calculator.



A SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) is the most sensitive type of detector known to science. Consisting of a superconducting loop with two Josephson junctions, SQUIDs are used to measure magnetic fields.



- Magnetoenceelografie - SQUID

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

Aplicatii ale supraconductorilor

- Acceleratoare de particule

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

Aplicatii ale supraconductorilor

- Cabluri pentru transportul energiei electrice
 - cu supraconductori de temperaturi ridicate (HTS)

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

Aplicatii ale supraconductorilor

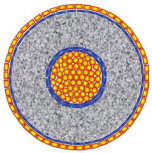
- Cabluri pentru transportul energiei electrice
 - cu supraconductori de temperaturi ridicate (HTS)

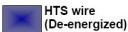
Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor


Aplicatii ale supraconductorilor

- Cabluri pentru transportul energiei electrice
 - cu supraconductori de temperaturi ridicate (HTS)






HTS wire
(De-energized)



Copper wire
(Energized)



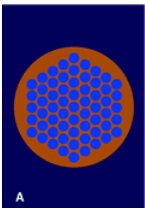
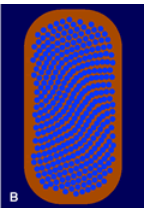
LN-impregnated
dielectric

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

Aplicatii ale supraconductorilor

- Cabluri pentru transportul energiei electrice
 - cu supraconductori de temperaturi scazute

Cross Sections Of Two Typical Filamentary Composites Of NbTi
In A Copper Matrix

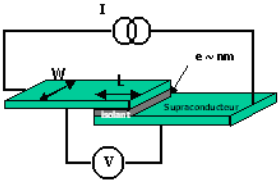
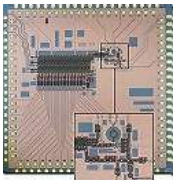
Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

Conductia electrica a metalelor

Aplicatii ale supraconductorilor

- Microprocesoare cu jonctiuni Josephson

Calculatoare – "petaflop" (10^{15} operatii in virgula mobila / s)

Materiale electrotehnice, Facultatea de Energetica, anul III ISE

