

Science des matériaux de l'électrotechnique

II Conduction électrique
3. Conduction électrique des métaux

Science des matériaux de l'électrotechnique
F.L.S. 2009-2010, 1231F Prof. dr.ing Florin Ciuprina

Conduction électrique des métaux

Structure du cours

Chapitre	Contenu
I Propriétés générales des cristaux	
1	Corps cristallins Etats des corps Réseaux cristallins Défauts des réseaux cristallins
2	Electrons dans les cristaux Modèles (classique et quantiques) de l'électron. Bandes d'énergie associées aux corps cristallins. Classification des matériaux en conducteurs, semiconducteurs et isolants.
II Conduction électrique	
3	Conduction électrique des métaux. Conduction aux températures usuelles Supraconductivité électrique.
4	Conduction électrique des semiconducteurs Mécanismes de conduction. Expressions des conductivités intrinsèque et extrinsèques.
5	Conduction électrique des isolants solides Conduction en champs usuels (Conduction électronique, Conduction ionique). Conduction en champs intenses (Claquage des isolants solides).
III Propriétés diélectriques	
6	Polarisation électrique Types de polarisation Polarisation en champs harmoniques. Pertes diélectriques.
IV Propriétés magnétiques	
7	Types de magnétisme

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

3. Conduction électrique des métaux

- 3.1 Conductivité électrique des métaux dans l'approximation des électrons quasilibres
- 3.2 Relation entre le libre parcours et la constante du réseau
- 3.3 Dépendance entre la conductivité des métaux et différents facteurs
- 3.4 Supraconductivité électrique

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

3. Conduction électrique des métaux

- 3.1 Conductivité électrique des métaux dans l'approximation des électrons quasilibres
- 3.2 Relation entre le libre parcours et la constante du réseau
- 3.3 Dépendance entre la conductivité des métaux et différents facteurs
- 3.4 Supraconductivité électrique

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

3.1 Conductivité électrique des métaux dans l'approximation des électrons quasilibres

Notions générales

Densité microscopique du courant électrique: $\mathbf{j}_m = \rho_m \mathbf{v}_m \quad \rho_m = Nq_m$
 $\mathbf{j}_m = Nq_m \mathbf{v}_m$

Densité macroscopique du courant électrique: $\mathbf{J} = \rho_m \widetilde{\mathbf{v}}_{mc} = Nq_m \widetilde{\mathbf{v}}_{mc}$

porteurs de charge = électrons: $\mathbf{J} = Nq_m \widetilde{\mathbf{v}}_D = Nq_m \mathcal{M} \mathbf{E}$ } →

Loi de la conduction électrique: $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ } →

→ $\sigma = Nq_m \mathcal{M}$

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

3.1 Conductivité électrique des métaux dans l'approximation des électrons quasilibres

Hypothèses:

- Métal monovalent
- $\mathbf{E} = E_x \mathbf{i}$

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

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

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

$w = \frac{m_0^* v^2}{2} = \frac{m_0^*}{2} (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) \quad \Rightarrow \quad w = \frac{3}{2} m_0^* v_x^2$

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

On admet que dans dw les électrons ont tous la vitesse v_x } →

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

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

3.1 Conductivité électrique des métaux dans l'approximation des électrons quasilibres

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

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

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

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

$$J_x = \sigma_x E_x = \sigma E_x \quad \sigma = \frac{N_0 q_0^2 \tau}{m_0^*}$$

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

3.1 Conductivité électrique des métaux dans l'approximation des électrons quasilibres

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

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

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

$\tilde{l} \gg a$

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

3.2 Relation entre le libre parcours et la constante du réseau

Agitation thermique = ondes thermiques: - **longitudinales** ou **transversales**
 - **acoustiques** ou **optiques**

- stationnaires (onde réfléchi en phase avec l'onde directe)
- ↕
- modes normaux de vibration

Importantes pour l'étude de la conductivité des métaux aux températures usuelles

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

3.3 Dépendance entre la conductivité des métaux et différents facteurs

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

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

$$\rho = \rho_T + \rho_{rez} \text{ - expression de Mathiessen}$$

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

3.3 Dépendance entre la conductivité des métaux et différents facteurs

L'influence de la température

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

électron en équilibre thermodynamique avec le réseau:

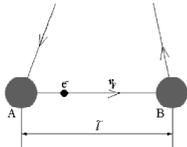
$$\Delta w = \frac{3}{2} kT \quad T > T_D$$

principe d'incertitude de 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

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



Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

3.3 Dépendance entre la conductivité des métaux et différents facteurs

L'influence de la température

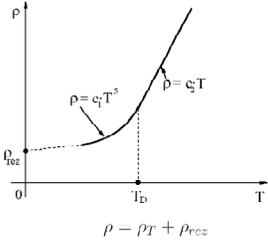
$$\sigma = \frac{C}{T}, \quad T > T_D$$

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

$$\rho = 1/\sigma$$

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

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

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


Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

3.3 Dépendance entre la conductivité des métaux et différents facteurs

L'influence des impuretés

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

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

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

3.3 Dépendance entre la conductivité des métaux et différents facteurs

L'influence des impuretés

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

3.3 Dependenta conductivitatii metalelor de diferiti factori

L'influence de l'état d'agrégation

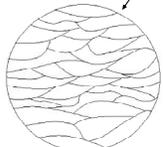
Métal	Ag	Cu	Al	Au	Bi	Sb	Ga
$\rho_{liquide}/\rho_{solide}$	2.1	2.04	2.21	2.29	0.45	0.62	0.58

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

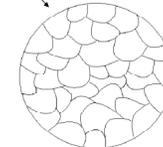
3.3 Dependenta conductivitatii metalelor de diferiti factori

L'influence des usinages mécaniques et des traitements thermiques



état dur (fibreux)

la conductivité diminue de 3 à 6%



état doux

la conductivité augmente de 3 à 6%

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

3. Conduction électrique des métaux

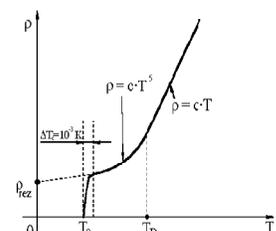
- 3.1 Conductivité électrique des métaux dans l'approximation des électrons quasilibres
- 3.2 Relation entre le libre parcours et la constante du réseau
- 3.3 Dépendance entre la conductivité des métaux et différents facteurs
- 3.4 Supraconductivité électrique

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

3.4 Supraconductivité électrique

La supraconductivité est définie comme la propriété appartenant à certains matériaux de présenter une résistivité électrique nulle lorsque la température du matériaux est inférieure à une température critique T_c et le champ magnétique n'excède pas un champ magnétique critique H_c . De tels matériaux sont appelés supraconducteurs.





Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926)
physicien/hollandais

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

3.4 Supraconductivité électrique

- Effets associés à la supraconductivité
- Théorie classique de la supraconductivité. Equations de London
- Théorie BCS
- Histoire des supraconducteurs
- Types de supraconducteurs
- Utilisations des supraconducteurs

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

3.4 Supraconductivité électrique

- Effets associés à la supraconductivité
- Théorie classique de la supraconductivité. Equations de London
- Théorie BCS
- Histoire des supraconducteurs
- Types de supraconducteurs
- Utilisations des supraconducteurs

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

Effets associés à la supraconductivité

- Effet des champs magnétiques intenses
- Effet Meissner
- Effet des hautes fréquences
- Effet isotopique

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

Effets associés à la supraconductivité

- Effet des champs magnétiques intenses

Annulation de la supraconductivité par les champs magnétiques intenses

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

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

Effets associés à la supraconductivité

- Effet Meissner

Expulsion du champ magnétique de l'intérieur d'un supraconducteur

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

Conducteur normal

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

Supraconducteur

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

Effets associés à la supraconductivité

- Effet des hautes fréquences

Annulation de la supraconductivité a hautes fréquences ($10^{13} - 10^{14}$ Hz)

$T < T_c$ et $H < H_c$	$T < T_c$ et $H < H_c$
$f < 10^{13} - 10^{14}$ Hz	$f > 10^{13} - 10^{14}$ Hz
Supraconducteur	Conducteur normal

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

Effets associés à la supraconductivité

- Effet isotopique

La température critique T_c varie avec la masse isotopique du métal

Exemple:

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

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

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

3.4 Supraconductivité électrique

- Effets associés à la supraconductivité
- Théorie classique de la supraconductivité. Equations de London
- Théorie BCS
- Histoire des supraconducteurs
- Types de supraconducteurs
- Utilisations des supraconducteurs

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

Théorie classique de la supraconductivité. Equations de London

Hypothèses sur les supraconducteurs (à T_c):

- **electrons normaux (n)** – interagissent avec le réseau (subissent des collisions)
- **electrons supraconducteurs (sc)** – n'interagissent pas avec le réseau (ne subissent pas de collisions)

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

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

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

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

Theorie classique de la supraconductivité. Equations de London

Equations de Maxwell:

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

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

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

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

Equations de London:

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

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

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

3.4 Supraconductivité électrique

- Effets associés à la supraconductivité
- Theorie classique de la supraconductivité.
Equations de London
- Theorie BCS
- Histoire des supraconducteurs
- Types de supraconducteurs
- Utilisations des supraconducteurs

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

Théorie BCS

- élaborée en 1957 par Bardeen, Cooper et Schrieffer
- explique la supraconductivité par interactions électrons – phonons
- à T_c il apparaissent des paires Cooper (coopérons)
- les coopérons ont $m_s = 0 \rightarrow$ sont bosons (Statistique Bose-Einstein) et non fermions (statistique Fermi-Dirac)
- on peut trouver n'importe combien coopérons sur le même niveau d'énergie

●	●	●	●
●	●	●	●
●	●	●	●
●	●	●	●





Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

3.4 Supraconductivité électrique

- Effets associés à la supraconductivité
- Théorie classique de la supraconductivité. Equations de London
- Théorie BCS
- Histoire des supraconducteurs
- Types de supraconducteurs
- Utilisations des supraconducteurs

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

Histoire des supraconducteurs

1911 La supraconductivité a été observée pour la première fois dans le mercure par le physicien hollandais Heike Kamerlingh Onnes d'Université Leiden. Quand il l'a rafraîchi à la température de l'hélium liquide, 4 degrés Kelvin, sa résistance a soudainement disparu.

1913 Onnes a gagné un Prix Nobel de physique pour sa recherche dans ce secteur.

1933 Walther Meissner et Robert Ochsenfeld ont découvert qu'un matériel de supraconducteur repoussera un champ magnétique. On connaît ce phénomène comme *l'effet de Meissner (-Ochsenfeld)*. L'effet de Meissner est si fort qu'un aimant peut en réalité être soulevé par lévitation sur un matériau supraconducteur.



Heike Kamerlingh Onnes
1853-1926
physicien hollandais



Walther Meissner
1882 - 1974
physicien allemand



Robert Ochsenfeld
1901 - 1993
physicien allemand

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

Histoire des supraconducteurs

1957 **Théorie BCS**: Première explication théorique de la supraconductivité, présentée par les physiciens américains John Bardeen, Leon Cooper et Robert Schrieffer.

1962 En 1962 les scientifiques à Westinghouse ont développé le **premier fil supraconducteur** commercial, un alliage de Niobium et le Titane. La première utilisation de ce fil de haute énergie fut des électro-aimants pour accélérateur de particules.

1962 Brian D. Josephson, un étudiant de troisième cycle à l'Université de Cambridge, a prévu que le courant électrique coulerait entre 2 matériaux supraconducteurs - même quand ils sont séparés par un élément non-supraconducteur ou un isolant. Sa prédiction fut confirmée plus tard et lui permit de gagner une part du Prix Nobel de Physique de 1973. On connaît aujourd'hui ce phénomène de tunnelage comme celui de "l'effet Josephson" et ont été appliqués aux dispositifs électroniques comme le CALMAR, un instrument capable de détecter les champs magnétiques les plus faibles.



John Bardeen (1908-1991)
physicien américain



Leon Cooper (1930-1993)
physicien américain



Robert Schrieffer (1921-1999)
physicien américain



Brian Josephson (1931-2014)
physicien britannique

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

Types de supraconducteurs

- Supraconducteurs de type I
- Supraconductori de type II

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

Types de supraconducteurs

- Supraconducteurs de type I
 - appelle aussi supraconducteurs légers, ont été les premiers supraconducteurs découverts et nécessite les plus bas températures (T_c) pour supraconduire.
 - sont en général des métaux qui présente une conductivité importante a la température ambiante.
 - sont caractérisés par une transition brusque de l'état normal a l'état supraconducteurs a T_c .
 - en général $T_c < 10$ K.

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

Types de supraconducteurs

- Supraconducteurs de type 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		

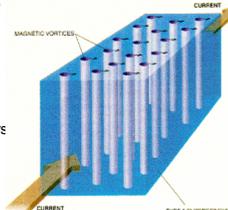
Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

Tipuri de supraconductori

Supraconducteurs de type II

- ont été découverts après les supraconducteurs de type I;
- en dehors de quelques éléments purs (V, Tc, Nb), sont des alliages métalliques et des composés de céramiques;
- en général (les composés de céramiques) ont T_c nettement supérieures aux supraconducteurs de type I;
- la transition de l'état normal à l'état supraconducteur ne se réalise pas brusquement (à T_c), mais graduellement, en passant par une phase mixte. Entre T_{c1} et T_{c2} ou entre H_{c1} et H_{c2} , dans le supraconducteur il y a des "tubés" (vortex) dans lesquels le matériau est en état normal.

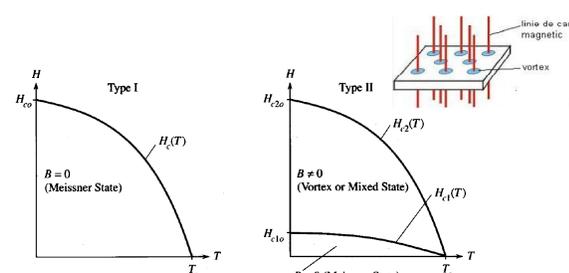


Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

Tipuri de supraconductori

Supraconducteurs de type II



Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

3.4 Supraconductivité électrique

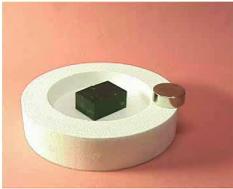
- Effets associés à la supraconductivité
- Théorie classique de la supraconductivité. Equations de London
- Théorie BCS
- Histoire des supraconducteurs
- Types de supraconducteurs
- Utilisations des supraconducteurs

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

Utilisations des supraconducteurs

- Levitation magnétique – Trains MAGLEV
 - Ex: Yamanashi Maglev MLX01 (Japonia)
581 km/h in 2003



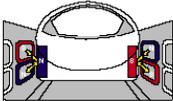

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

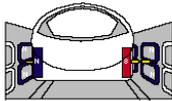
Utilisations des supraconducteurs

- Trains MAGLEV

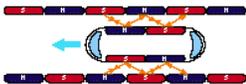
Lévitation



Guidage latérale



Propulsion



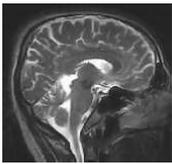
Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

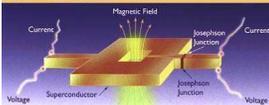
Utilisations des supraconducteurs

- Biomagnétisme
 - Magnetic Resonance Imaging (MRI)

En appliquant au corps humain d'un champ magnétique intense, crée par un supraconducteur, les atomes d'hydrogènes qui existent dans les molécules d'eau et les graisses du corps permettent d'accepter l'énergie du champ magnétique. Ils laissent alors voir cette énergie à une fréquence qui peut être détectée et montrée graphiquement par un ordinateur.


 - Magnetoencephalographie - SQUID

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.



Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

Utilisations des supraconducteurs

- Accélérateurs de particules

From LEP to LHC
Superconducting magnets

27 Km

Compact Muon Solenoid

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

Utilisations des supraconducteurs

- Cables pour le transport de l'énergie électrique
 - avec supraconducteurs à haute température (HTS)

■ HTS wire (De-energized)

■ Copper wire (De-energized)

■ LN-impregnated dielectric

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

Utilisations des supraconducteurs

- Cables pour le transport de l'énergie électrique
 - avec supraconducteurs à haute température (HTS)

■ HTS wire (Energized)

■ Copper wire (De-energized)

■ LN-impregnated dielectric

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

Utilisations des supraconducteurs

- Cables pour le transport de l'énergie électrique
 - avec supraconducteurs à haute température (HTS)
 - HTS wire (De-energized)
 - Copper wire (Energized)
 - LN-impregnated dielectric

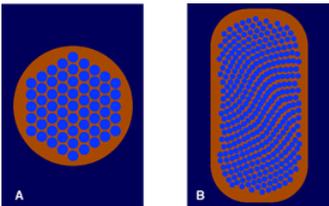


Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

Utilisations des supraconducteurs

- Cables pour le transport de l'énergie électrique
 - avec supraconducteurs à basse température
 - Cross Sections Of Two Typical Filamentary Composites Of NbTi In A Copper Matrix



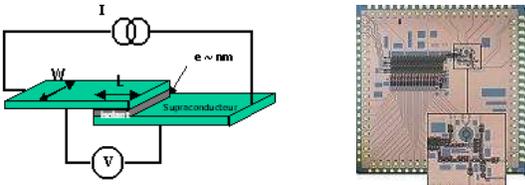
Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

Conduction électrique des métaux

Utilisations des supraconducteurs

- microprocesseur avec jonction Josephson

Ordinateurs – "petaflop" (10¹⁵ opération en virgule flottante / s)



Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

