

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



1

Západočeská univerzita v Plzni
Katedra materiálů a technologií

3.

Elektrotechnické materiály KET/ELTM

Ing. Robert Vík, Ph.D.



FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI

EK 410, rvik@fel.zcu.cz



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



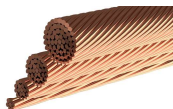
2

Vodivé materiály

- při konstrukci elektrického podsystemu v elektrotechnických zařízeních se využívají materiály s vysokou elektrickou vodivostí
- mají dostatek **volných** nosičů náboje
- podle nosičů náboje rozlišujeme

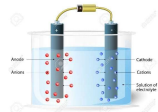
► vodiče 1. třídy

- nosičem náboje elektrony
- kovy a jejich slitiny, grafit, polovodiče



► vodiče 2. třídy

- nosičem náboje ionty
- o několik řádů nižší vodivost než u vodičů 1. třídy
- roztoky a taveniny iontových látek, plyny



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



3

Vodivost pevných látek

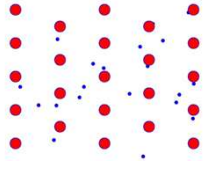
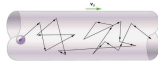
- elektrickou vodivost pevných látek lze zjednodušeně popsat jako usměrněný pohyb elektronů (**elektronová teorie**)
 - kovy** mají díky kovové vazbě dostatek volných nosičů – vedou dobře → **vodiče**
 - nekovy nebo iontové látky** – nosiče pevně vázány - vedou špatně → **nevodiče**

$$J = env (A \cdot m^{-2})$$

J – proudová hustota

n – koncentrace nosičů náboje (m^{-3})

v – střední driftová rychlost ($m \cdot s^{-1}$)



video



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

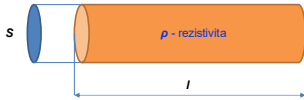


4

Vodivost pevných látek

- při pohybu elektrony interagují s ionty – předávají energii a kov se ohřívá – **rezistivita materiálu ρ ($\Omega \cdot m$)**

elektrický odpor R



$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} [\Omega]$$

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \Delta t)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} [S \cdot m^{-1}]$$

- měřitkem vodivosti materiálu je **konduktivita σ ($S \cdot m^{-1}$)**
- s rostoucí teplotou dochází i k většímu kmitání iontů v uzlových bodech mříže (**rezistivita kovů roste s teplotou**) a opačně, s klesající teplotou rezistivita kovů klesá
(pozor! neplatí příčinou supravodivosti – jiný mechanismus vedení proudu)
- závislost na teplotě udává teplotní koef. odporu α (K^{-1})



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



5

Rezistivita a konduktivita vybraných materiálů

Materiál	Měrný odpor ρ ($10^{-8} \Omega \cdot m$)	Měrná vodivost γ ($10^7 S \cdot m^{-1}$)	Teplotní souč. odporu α (K^{-1})
Stříbro (Ag)	0,0159	63,0	0,0038
Měď (Cu)	0,0168	59,6	0,0040
Zlato (Au)	0,0244	41,0	0,0034
Hliník (Al)	0,0265	37,7	0,0039
Wolfram (W)	0,0560	17,9	0,0045
Zinek (Zn)	0,0590	16,9	0,0037
Nikl (Ni)	0,0699	14,3	0,006
Železo (Fe)	0,0970	10,0	0,005
Platina (Pt)	0,1060	9,4	0,00392
Manganin	0,482	2,1	0,000002
Konstantan	0,490	2,0	0,000008
Nerezová ocel	0,690	1,5	0,00094
Uhlík (grafit)	2,5 - 5	0,2 - 0,3	-0,0002



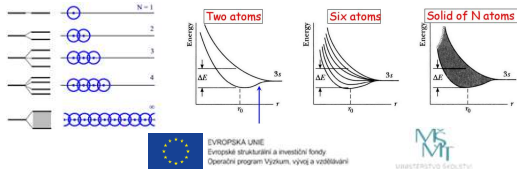
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



6

Pásová teorie vodivosti pevných látek

- v některých případech popis elektrické vodivosti pomocí elektronové teorie nevyhovuje → **pásová teorie vodivosti pevných látek**
- v krystalické mřížce překryv elektronových orbitalů - vytváří pásy dovolených energií
 - elektrony zaplňují hladiny v pásu tak, aby měly co nejmenší energii
 - elektrony obsazují pás s vyšší energií teprve po úplném obsazení energeticky nižšího pásu
- při překryvu velkého počtu orbitalů dochází ke štěpení energetických hladin - vznik **pásů dovolených energií**



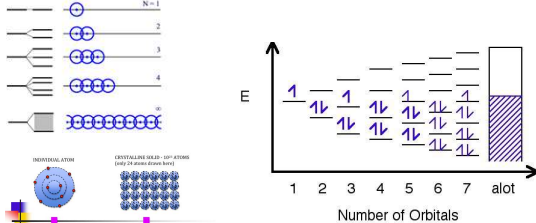
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MT
Vysoká škola technická
Vysoká škola technická

7

Pásová teorie vodivosti pevných látek

- při překryvu velkého počtu orbitalů dochází ke štěpení energetických hladin - vznik **pásů dovolených energií**



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

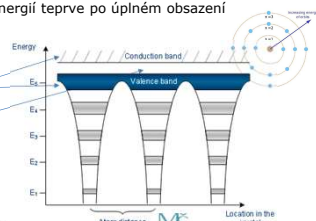
MT
Vysoká škola technická
Vysoká škola technická

8

Pásová teorie vodivosti pevných látek

- v některých případech popis elektrické vodivosti pomocí elektronové teorie nevyhovuje → **pásová teorie vodivosti pevných látek**
- v krystalické mřížce překryv elektronových orbitalů - vytváří pásy dovolených energií
 - elektrony zaplňují hladiny v pásu tak, aby měly co nejmenší energii
 - elektrony obsazují pás s vyšší energií teprve po úplném obsazení energeticky nižšího pásu

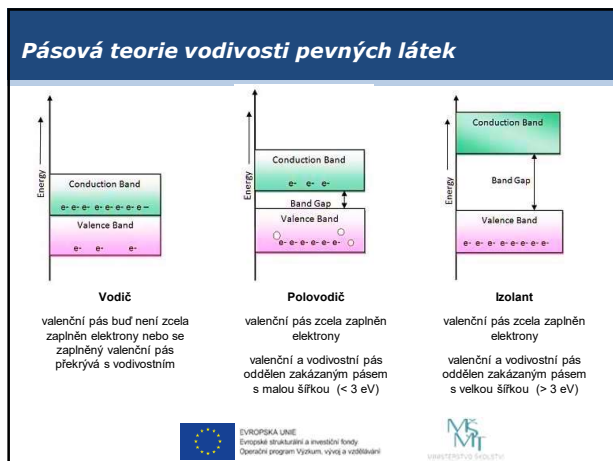
- valenční pás** - poslední pás obsahující elektrony
- vodivostní pás** - první neobsazený pás orbitalů
- zakázaný pás** - odděluje dva sousední energetické pásy



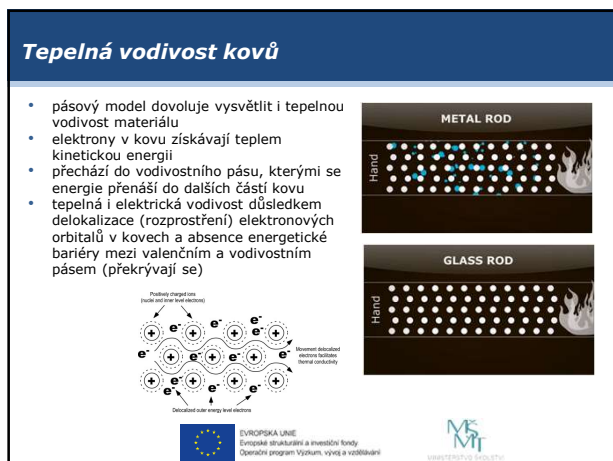
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MT
Vysoká škola technická
Vysoká škola technická

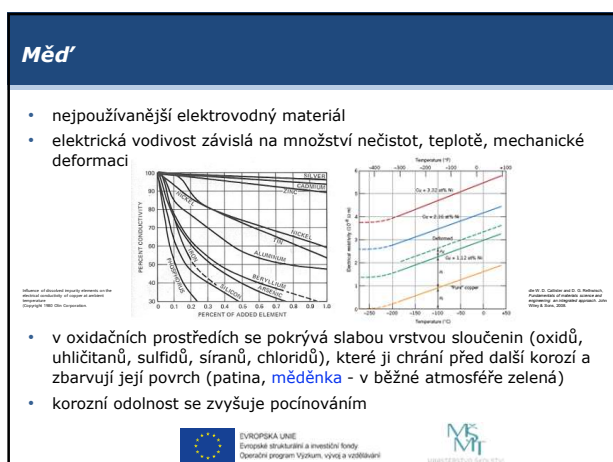
9



10



11



12

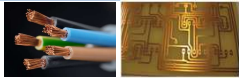
Měď

Použití

- 55 % Cu – měděné výrobky
- 45 % Cu – výroba slitin
- *elektrovodná měď* (99,9 %) – vodiče, kabely, vinutí elektrických strojů, součásti přístrojů, kluzné kontakty
- *měď pro desky plošných spojů* – fólie buď válcovaná nebo galvanická (tenčí, lepší mechanické vlastnosti), následně se laminuje na substrát
- *bezoxysíkatá měď* (Cu OFHC) – vakuová technika, precizní kabely

Přísady

- Cd – troleje, dálkové vodiče, telefonní vodiče
- Cr – elektrody pro odporové svařování
- Ag – komutátory, součásti el. strojů




EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MS MT
Ministerstvo průmyslu a obchodu

13

Slitiny mědi

- lepší mechanické vlastnosti, jsou odolnější vůči koroznímu prostředí a některé jsou vytvrditelné za tepla

Mosazi

- slitiny Cu + Zn
- dobrá obrobitelnost, odolnost vůči korozi, cena
- označení Ms+číslo (Ms95, Ms80 atd.) – podíl mědi v %
- šroubky, svorky, podložky, kontakty

Bronzy

- v porovnání s mosazí lepší mech. vlastnosti (např. pevnost v tahu)
- všechny slitiny Cu kromě mosazí, označení dle přidaného kovu, např.:
- *cínový bronz* – součásti spínačů, sběrné kroužky, kontaktní segmenty
- *hliníkový bronz* – součásti odolné vyšším teplotám
- *niklový bronz* – odporové vodiče, termoelektrické články



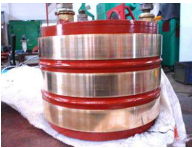
14

Slitiny mědi

mosaz
součástky pro elektrotechniku



bronzy
sběrné kroužky



elektrovodné pružiny



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

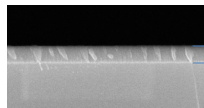
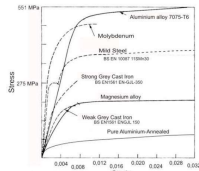
MS MT
Ministerstvo průmyslu a obchodu

15

Hliník

Charakteristické vlastnosti:

- ▶ 4. nejlepší vodič (cca 60 % elektrické vodivosti Cu)
- ▶ nízká hustota – lehký (cca 3x lehčí než Cu)
- ▶ málo pevný (cca 70 – 150 MPa, ocel běžně > 400 MPa)
- ▶ na vzduchu velmi stálý – pokrývá se tenkým povlakem Al_2O_3



Al_2O_3
cca 4-5 nm



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



16

Hliník

Použití

- ▶ holé vodiče rozvodných zařízení
 - ▶ elektrovedná hliníková lana (AlFe)
 - ▶ sdružené troleje
 - ▶ silnoproudé kabely do 35 kV
 - ▶ ochranné vodiče
 - ▶ klecová vinutí s kotvou nakrátko
 - ▶ stínění sdělovacích kabelů, atd.
- rozvody nn ve starších budovách – problémy s křehnutím hliníkových vodičů, teče pod tlakem (nutnost dotahování kontaktů)



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



17

Hliník a jeho použití



ACSR
Aluminum Conductor
Steel Reinforcement



AAC
All Aluminum
Conductor



AAAC
All Aluminum
Alloy Conductor



ACCC
Aluminum Conductor
Composite Core



mikrodráčky pro
kontaktování chipů

elektrovedná hliníková lana různé konstrukce



klecové vinutí
s kotvou nakrátko



kabel s Al
vodiči



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

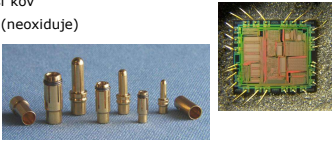


18

Zlato

Charakteristické vlastnosti:

- měkký, dobře tvárný a tažný kov, lze tepat velmi tenké fólie (0,1 μm)
- po platině chemicky nejodolnější kov
- nízký a stálý přechodový odpor (neoxiduje)
- vysoká cena



Použití:

- v čisté podobě s používá např. pro pokovování (DPS, kontakty)
- vodiče v integrovaných obvodech
- slitiny – kontakty pro malé přitlačné síly a nízké proudy

 EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

 MŠMT
Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy

19

Stříbro

Charakteristické vlastnosti:

- z kovů nejvyšší elektrická a tepelná vodivost
- velmi tvárné, lze je vytepat ve slabé fólie (min. 5 μm)
- dobře chemicky odolné (náchylné jen na sloučeniny síry - černání)
- dobrý poměr cena/výkon (fyzikálně-chemické vlastnosti)



Použití:

- tavné pojistky
- tiskové pasty a inkousty pro vodivé motivy
- elektrická vodivá lepidla pro osazování DPS
- kontakty (ne silně mechanicky namáhané, příp. speciální)

 EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

 MŠMT
Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy

20

Materiály pro kontakty

- prvek, zprostředkující uvolnitelné spojení dvou vodičů, přes které prochází elektrický proud
- na materiály pro kontakty kladena řada požadavků:
 - ▶ malý přechodový odpor
 - ▶ velká elektrická a tepelná vodivost
 - ▶ odolnost proti erozi působením el. oblouku
 - ▶ odolnost vůči mechanickému opotřebení
 - ▶ odolnost proti oxidaci (chemické korozi)



 EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

 MŠMT
Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy

21

Materiály pro kontakty

Oblast použití - příklady použití	Složení materiálů
Rychlé spínání napětí (nepatrných proudů) - mikrospínače	Ag, Au, Pt, Rh, Ag+Ni, Ag+Pd, Pt+Ir
Kontakty pro spínání malých proudů (výkonů) - přístrojové a pomocné spínače - programovatelné spínače - regulátory	Cu+Ag, Ag+Pd, Ag+SnO ₂ , Pd+Cu, Pt, Pt+Ir
Kontakty pro spínání středních proudů (výkonů) - stykače - jističe - nízkonapěťové výkonové spínače	mosaz, bronz, Ag+Cu, Ag+SnO ₂ , Ag+Zn, Cu+Ag, Pt+Ir, nebo posílená měď
Kontakty pro spínání velkých proudů (výkonů) - vysokonapěťové výkonové vypínače	Ag+Cu, bronz nebo posílená tvrdá měď
Kontakty s velkou odolností proti opalování - vysokonapěťové výkonové spínače	slinutiny W+Ag nebo W+Cu
Posuvné a kluzné kontakty - sběrače elektrických lokomotiv - kartáče elektrických točivých strojů	Elektrotechnický C, Ag+C, Cu+C

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, Mládeže a tělovýchovy

22

Materiály pro kontakty

Oblast použití - příklady použití	Složení materiálů
Rychlé spínání napětí (nepatrných proudů) - mikrospínače	Ag, Au, Pt, Rh, Ag+Ni, Ag+Pd, Pt+Ir
Kontakty - přístrojové - programovatelné - regulátory	Cu+Ag, Ag+Pd, Ag+SnO ₂ , Pd+Cu, Pt, Pt+Ir
Kontakty - stykače - jističe - nízkonapěťové	mosaz, bronz, Ag+Cu, Ag+SnO ₂ , Ag+Zn, Cu+Ag, Pt+Ir, nebo posílená měď
Kontakty - vysokonapěťové	Ag+Cu, bronz nebo posílená tvrdá měď
Kontakty - vysokonapěťové	slinutiny W+Ag nebo W+Cu
Posuvné a kluzné kontakty - sběrače elektrických lokomotiv - kartáče elektrických točivých strojů	Elektrotechnický C, Ag+C, Cu+C

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, Mládeže a tělovýchovy

23

Materiály pro kontakty

Oblast použití - příklady použití	Složení materiálů
Rychlé spínání napětí (nepatrných proudů) - mikrospínače	Ag, Au, Pt, Rh, Ag+Ni, Ag+Pd, Pt+Ir
Kontakty - přístrojové - programovatelné - regulátory	Cu+Ag, Ag+Pd, Ag+SnO ₂ , Pd+Cu, Pt, Pt+Ir
Kontakty - stykače - jističe - nízkonapěťové	mosaz, bronz, Ag+Cu, Ag+SnO ₂ , Ag+Zn, Cu+Ag, Pt+Ir, nebo posílená měď
Kontakty - vysokonapěťové	Ag+Cu, bronz nebo posílená tvrdá měď
Kontakty - vysokonapěťové	slinutiny W+Ag nebo W+Cu
Posuvné a kluzné kontakty - sběrače elektrických lokomotiv - kartáče elektrických točivých strojů	Elektrotechnický C, Ag+C, Cu+C

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

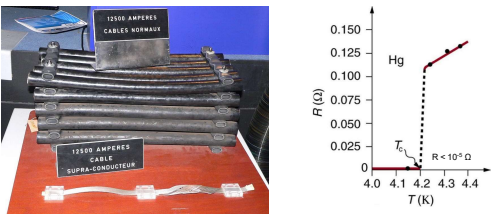
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, Mládeže a tělovýchovy

24

8

Supravodiče

- jev, při kterém u některých materiálů **při velmi nízkých teplotách** ($< -200\text{ °C}$) skokově **klesá rezistivita na téměř nulovou hodnotu** (vedení proudu bez Jouleových ztrát)



Mécanisme de la supraconductivité par pénétration

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MS MT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

25

Supravodiče

- jev, při kterém u některých materiálů **při velmi nízkých teplotách** ($< -200\text{ °C}$) skokově **klesá rezistivita na téměř nulovou hodnotu** (vedení proudu bez Jouleových ztrát)
- teplota tohoto přechodu je tzv. **kritická teplota T_c**
- objev u rtuti (1911, H. Kamerlingh-Onnes)
- vysvětlení v roce 1957 tzv. **BSC teorie** (Bardeen-Cooper-Schriefferova teorie)
 - elektrony tvoří při $T < T_c$ tzv. Cooperovy páry
 - při nízké teplotě značně klesá tepelná vibrace mřížky



Mécanisme de la supraconductivité par pénétration

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MS MT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

26

Supravodiče



<https://www.youtube.com/watch?v=CEUd0Vw0VI>

EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MS MT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

video

27

Supravodič v magnetickém poli

- supravodiče jsou **ideální diamagnetickými** materiály – vytlačují ze svého objemu magnetické pole – **Meissnerův-(Ochsenfeldův) efekt**

<http://www.youtube.com/watch?v=KdH1L0Dyng>

EVROPSKÁ UNIE
 Evropské strukturální a investiční fondy
 Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MS
 MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ

28

Supravodiče

EVROPSKÁ UNIE
 Evropské strukturální a investiční fondy
 Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MS
 MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ

29

Podmínky supravodivosti

- materiál se nachází supravodivém stavu, pokud jsou splněny následující podmínky:
 - teplota **T** je **nižší** než kritická teplota **T_c**
 - magnetická indukce **B** je **nižší** než kritická indukce **B_c**
 - proudová hustota **J** je **nižší** než kritická proudová hustota **J_c**

EVROPSKÁ UNIE
 Evropské strukturální a investiční fondy
 Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

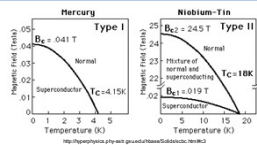
MS
 MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ

30

Materiály se supravodivými vlastnostmi

- dva základní typy supravodičů

- supravodiče I. typu**
 - vykazují úplný Meissner-Ochsenfeldův jev
 - čisté kovy
 - relativně malá hodnota B_c ($\sim$ mT)



- supravodiče II. typu**
 - zejména slitiny a intermetalické sloučeniny a keramické materiály
 - přechod mezi normální a supravodivým stavem není plynulý – v mezistavu se vyskytuje magnetické pole uvnitř supravodiče jako tzv. víry (**vortexy**)
 - velké hodnoty B_c ($\sim 10^1$ T)



- podle kritické teploty
 - nízkoteplotní supravodiče** (T_c do cca 25 K) – chlazení **LHe**
 - vysokoteplotní supravodiče** (T_c nad 30 K) – chlazení **LH₂**, **LN₂** (výrazně levnější)



31

Materiály se supravodivými vlastnostmi

Supravodiče I. typu

Materiál	T_c (K)	B_c (T)
Hg	4,15	0,04
Pb	7,2	0,08
Al	1,2	0,01
Cd	0,52	0,003
Tl	0,39	0,01
Mo	0,92	0,01
Sn	3,72	0,03
Zn	0,85	0,005

Supravodiče II. typu

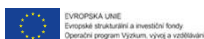
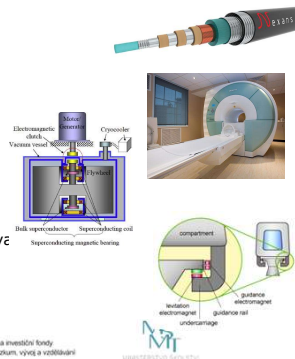
Materiál	T_c (K)	B_c (T)
Nb ₃ Sn	18,3	30
Nb-Ti	10	15
YBa ₂ Cu ₃ O ₇ (c)	95	120-150
Nb	9,25	0,82
V	5	1
C ₆₀ K ₃ (fulleren)	19,8	0,013
In ₂ O ₃	3,3	3
MgB ₂	39	74
Bi ₂ Sr ₂ CaCu ₂ O ₈ (c)	96	200



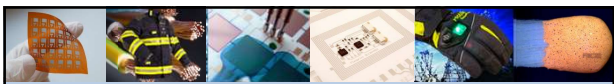
32

Aplikace supravodičů

- měření velmi malých mag. polí
- bezeztrátový přenos elektrické energie
- uchování elektrické energie
- supravodivé magnety
- magnetická ložiska
- vysokorychlostní kolejová doprava (MAGLEV)



33



Západočeská univerzita v Plzni
Katedra materiálů a technologií

Děkuji za pozornost

 EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

 FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI

 IMT
INSTITUT MATERIÁLŮ A TECHNOLOGIÍ
KATEDRA MATERIÁLŮ A TECHNOLOGIÍ

34
