

## 4 Materiály pre nízke a veľmi nízke teploty

### 4.1 Úvod

Vo všeobecnosti platí, že:

- a) Kovy a zliatiny kovov v prostredí veľmi nízkych teplôt nemenia svoje základné vlastnosti.
- b) Sklo a keramika znášajú nízke teploty bez zmien vlastností, avšak vykazujú malú odolnosť voči náhlým zmenám teplôt. Táto vlastnosť súvisí s malou tepelnou vodivosťou a veľkým teplotným súčiniteľom dĺžkovej rozťažnosti. Manipulácia s nimi v prostredí nízkych teplôt súvisí aj s ich rozmermi.
- c) Plasty znášajú veľmi nízke teploty zle. Dochádza k ich skrehnutiu, ktoré pri ohriati síce zmizne, ale pri opätovnom ochladzovaní dochádza najmä pri mechanickom namáhaní k ich deštrukcii. Na druhej strane znášajú veľmi dobre náhle zmeny teplôt. Táto vlastnosť sa používa pri hermetizácii a pri izolácii vodičov. Osobitnú pozornosť je potrebné venovať spojom plast – kov, pretože plasty majú o jeden rád väčšiu tepelnú rozťažnosť ako kovy. Pri nízkych teplotách klesá pružnosť plastov, čo môže v týchto spojoch vyvolať vznik trhlín.

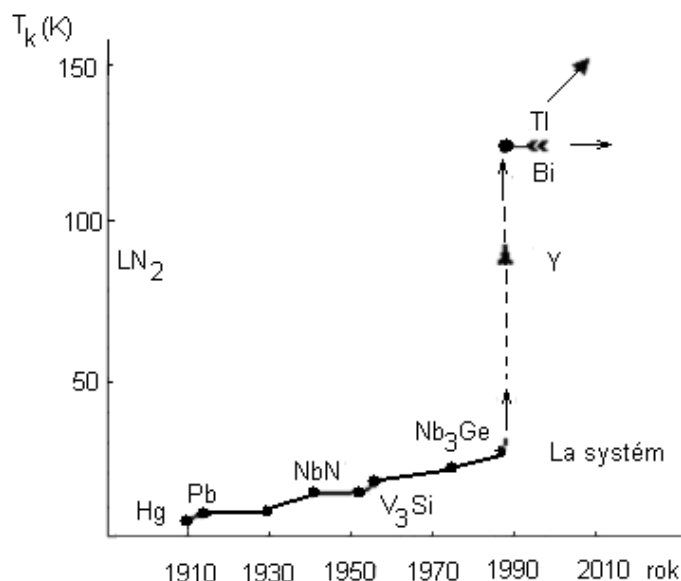
### 4.2 Kryogénne médiá

Ako kryogénne médiá sa v elektronike používajú kvapalný dusík (bod varu  $-196^{\circ}\text{C}$ ), argón (bod varu  $-186^{\circ}\text{C}$ ) a kvapalné hélium (bod varu  $-269^{\circ}\text{C}$ ) a kvapalný vodík (bod varu  $-253^{\circ}\text{C}$ ). Dusík a argón sa uchovávajú v kvapalnom stave v Dewarových nádobách a manipulácia s nimi je pomerne jednoduchá (dajú sa prelievať z nádoby do nádoby). Kvapalné hélium sa musí udržiavať v špeciálnych nádobách so superizoláciou.

U niektorých látok pri teplotách blízkyh absolútnej nule odpor klesá nekontinuálne, skokom na hodnotu teoreticky aj prakticky nulovú. Podľa kvantovej mechaniky elektróny blízke Fermiho hladine, za podkritických teplôt prechádzajú do stavu s veľmi nízkou energiou.

### 4.3 Supravodivosť a supravodiče

*Supravodivosť* je pokles rezistivity niektorých kovov a zliatin pri teplote blízkej k absolútnej nule na nulovú hodnotu. Pokusy pri meraniach ukázali nulový odpor resp. rezistivitu. U niektorých materiálov poklesne rezistivita aj 16 krát oproti izbovej teplote. Jav supravodivosti bol objavený v r. 1911 na ortuti ( $T_k = 7,2 \text{ K}$ ) a v súčasnosti existuje len 27 prvkov (volfrám pri kritickkej teplote  $T_k = 0,01 \text{ K}$ , olovo pri  $T_k = 4,2 \text{ K}$ , hliník pri  $T_k = 1,2 \text{ K}$ , niób pri  $T_k = 9,3 \text{ K}$ ) a asi 1 500 zliatin ( $\text{Nb}_3\text{Ga}$  s kritickou teplotou  $23,2 \text{ K}$ ,  $\text{NbZr}$ ,  $\text{NbTi}$ ,  $\text{Nb}_3\text{Al}$ ,  $\text{V}_3\text{Si}$ ,  $\text{NbN}$ ), u ktorých bol jav supravodivosti objavený. Tento jav sa zatiaľ nepotvrdil u ušľachtilých a alkalických prvkov. Céziu sa stáva supravodivým, ak naň pôsobí vysoký tlak. Rast kritických teplôt nových supravodivých materiálov v závislosti od roku ich objavu je na obr. 4.1.



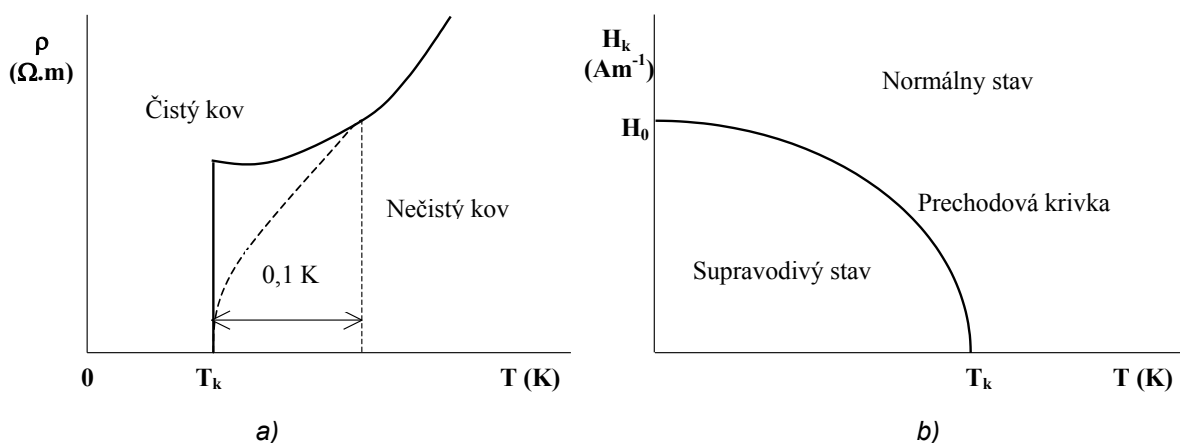
Obr. 4.1 Rast kritických teplôt nových supravodivých materiálov v závislosti od roku ich objavu

Supravodivý stav je považovaný za samostatný stav materiálu s vyšším stupňom poriadku, ak sa entrópia rovná nule. Je to vratný stav.

Supravodivý stav nastane u týchto materiálov, ak sú splnené **tri podmienky supravodivosti**:

- teplota supravodiča je nižšia ako kritická teplota  $T_k$ ,
- intenzita magnetického poľa je nižšia ako kritická intenzita  $H_k$ ,
- hustota prúdu je nižšia ako kritická hustota  $J_k$ .

Teplotná závislosť rezistivity veľmi čistých a nečistých kovov v rozsahu prechodovej teploty a prechodová krivka sú na obr. 4.2.



Obr. 4.2 a) Teplotná závislosť rezistivity veľmi čistých a nečistých kovov v rozsahu prechodovej teploty, b) Prechodová krivka (hranica medzi normálnym a supravodivým stavom)

Intenzitu magnetického poľa  $H$  ( $\text{Am}^{-1}$ ) vypočítame podľa vzťahu:

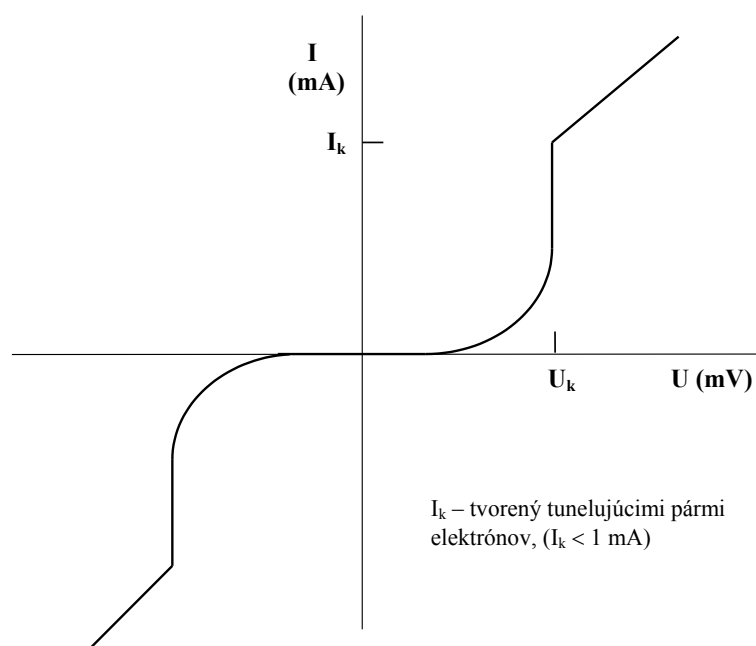
$$H_{kr} = H_0 \left[ 1 - \left( \frac{T}{T_k} \right)^2 \right] \quad (4.1)$$

Supravodiče sa používajú:

- Na prenos elektrickej energie pri 100 % účinnosti.
- Ako trecie ložiská, na prepínacie zariadenia – kryotróny.
- Vo vysokomagnetických solenoidoch.
- Na zníženie Joulových strát v jadrách, čo umožňuje prenos veľmi veľkých výkonov, pre výrobu súčiastok novej generácie pre veľmi rýchle počítače.
- V oblasti digitálnej techniky, kde sa využíva tzv. **Josephsonova tunelujúca štruktúra**: supravodič – izolant – supravodič, ktorá sa označuje ako *Josephsonov tunelujúci priechod* (junction) JTJ. Táto štruktúra využíva na prechod zo supravodivého do normálneho stavu princíp rozrušenia supravodivého stavu magnetickým poľom. Jej výhodou je vysoká spínacia rýchlosť, extrémne nízky stratový výkon (o tri rády nižší ako u polovodičových súčiastok) a možnosť realizácie jednoduchou technológiou (tab. 4.1 a obr. 4.3).

Tabuľka 4.1 Parametre súčiastok s JTJ priechodom

Technológia ( $\mu\text{m}$ )	Spínacia doba (ps)	Stratový výkon ( $\mu\text{W}$ )	JTJ priechod
5	10,3	11,7	Pb – zliatiny
2,5	13,0	2,0	Pb- zliatiny
1,5	5,6	4,0	NbN-Pb-In



Obr. 4.3 VA charakteristika JTJ priechodu

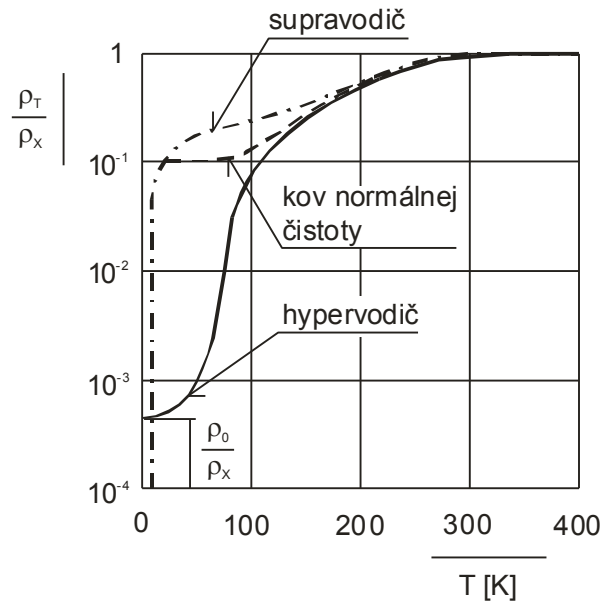
- Supravodivé klopné obvody realizované pomocou JTJ priechodov sa využívajú v oblasti digitálnej techniky.
- Pre realizáciu supravodivých sčítačiek, násobičiek s veľmi krátkou dobou pod 1 ns.

Nevýhodou supravodičov je ich pracovná teplota, ktorá sa pohybuje od  $-255^{\circ}\text{C}$  do  $-270^{\circ}\text{C}$ .

#### 4.4 Hypervodivosť a hypervodiče

Niektoré veľmi čisté kovy (99.995 %) s minimálnym počtom mriežkových porúch majú mimoriadne veľkú vodivosť v oblasti kryogénnych teplôt (pod 100 K). Ich hlavnou výhodou je

vyššia pracovná teplota v porovnaní so supravodičmi, umožňujúca použitie lacnejších chladiacich médií: kvapalného vodíka (20 K) alebo dusíka (77 K), namiesto drahého hélia. Hypervodivosť sa objavuje u čistého hliníka (v prostredí kvapalného vodíka) a čistého berýlia (v prostredí kvapalného dusíka). Závislosť pomeru rezistivity  $\rho_T/\rho_x$ , t.j. rezistivity pri kritickej teplote  $\rho_T$  k rezistivite pri izbovej teplote  $\rho_x$  od teploty pri supravodičoch, hypervodičoch a kovoch technickej čistoty je na obr. 4.4.



Obr. 4.4 Závislosť pomeru rezistivity  $\rho_T / \rho_x$  (rezistivity pri kritickej teplote  $\rho_T$  k rezistivite pri izbovej teplote  $\rho_x$ ) od teploty pri supravodičoch, hypervodičoch a kovoch technickej čistoty