

Kryogenní materiály

Experimentální metody
fyziky kondenzovaných soustav II
NFPL146
NFPL 095 ZS 2010/11

Materiály pro kryogeniku

Dobré vodiče tepla

měď, hliník, stříbro

Špatné vodiče tepla

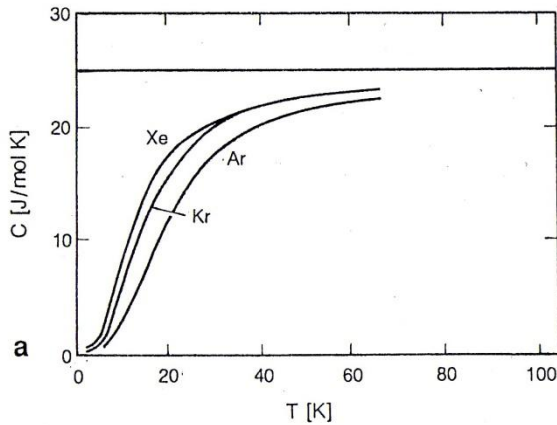
slitiny mědi,
nerezová ocel,
sklo, tavený křemen
plasty

Měrná tepelná kapacita

$$C_V = T \sum \left(\frac{\delta S}{\delta T} \right)_V = \left(\frac{\delta U}{\delta T} \right)_V$$

Izolátory

Dulongova-Petitova mez:
 $C_V = 3R$ – pro vysoké teploty



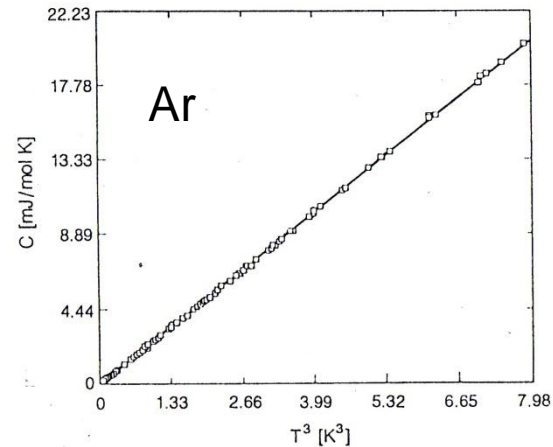
Einsteinův model nezávislých oscilátorů

$$U = N \langle n \rangle \hbar \omega = \frac{N \hbar \omega}{e^x - 1}, C_V = N k x^2 \frac{e^x}{[e^x - 1]^2}, x = \frac{\hbar \omega}{kT}$$

Debyův model hustoty stavů fononů

$$U = 9NkT \left(\frac{T}{\Theta} \right)^3 \int_0^{x_D} \frac{x^3}{e^x - 1} dx, C_V = 9Nk \left(\frac{T}{\Theta} \right)^3 \int_0^{x_D} \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} dx$$

$$C_{ph}(T) = 1944 \left(T / \Theta_D \right)^3 \text{ [J/mol.K]}, \text{ pro } T < \Theta_D$$



Kovy

Fermiho-Dirakova distribuční funkce

model volných elektronů

$$f_e(E) = 1/[(\exp(E-\mu)/k_B T + 1)]$$

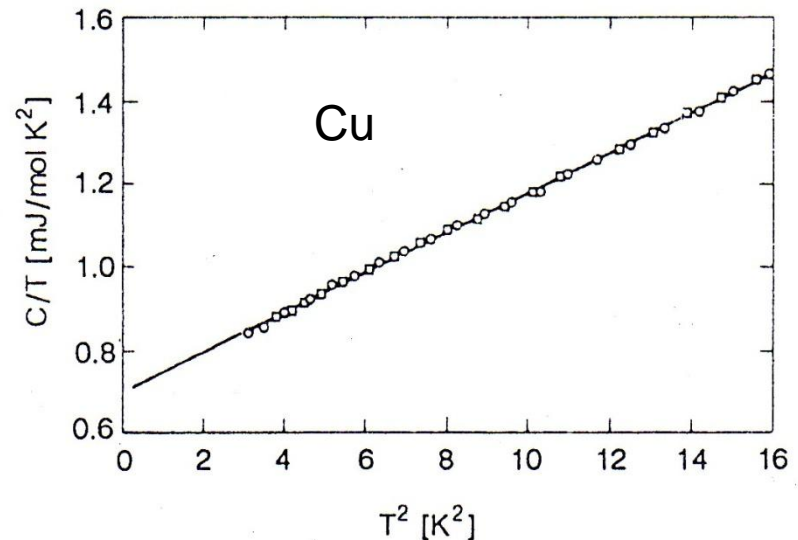
hustota stavů: $g_e(E) = V_m/2\pi^2(2m/\hbar^2)^{3/2}E^{1/2}$

excitace elektronů v blízkosti Fermiho energie

$$C_e(T) = \pi^2/2 \cdot N_A k_B \cdot T/T_F = \gamma T$$

celková měrná tepelná kapacita kovů

$$C = \gamma T + \beta T^3$$



Magnetická tepelná kapacita - Schottkyho anomálie

$S=1/2$
dvouhladinový systém

$$C_m = k_B N_A \left[\frac{\Delta E}{2k_B T} \right]^2$$

pro $\Delta E \ll k_B T$

pro $T < 1$ K
(fononový příspěvek zanedbatelný)

$$C = \gamma T + \delta T^{-2}$$

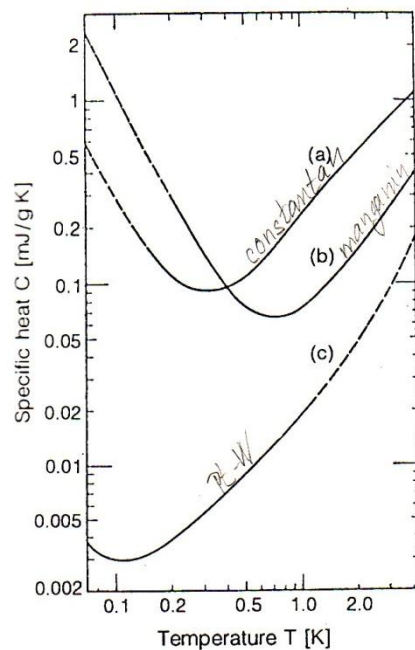
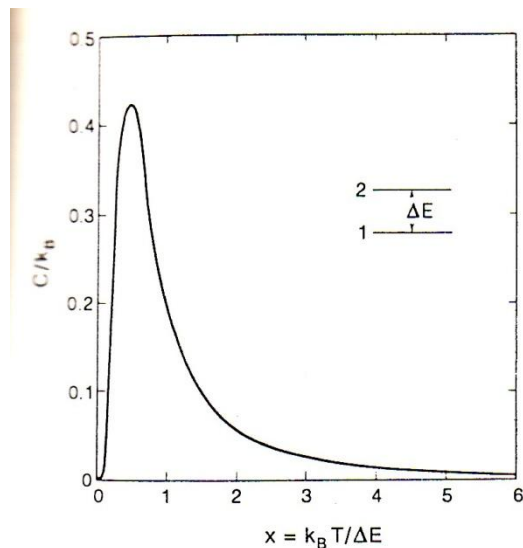


Fig.3.9
(57%Cu
13% Mn
[3.26])

Supravodivé kovy

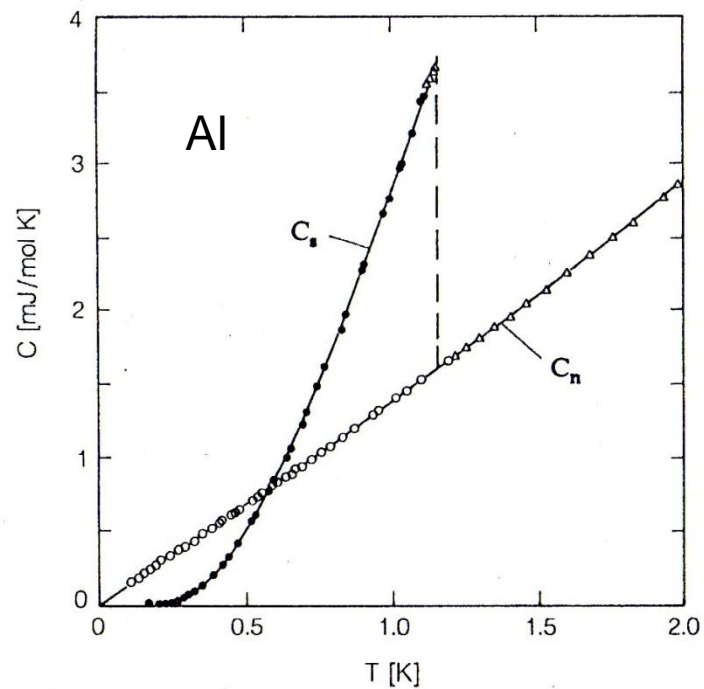
C_{ph} se při přechodu zachová

z teorie BCS – skok měrné tepelné kapacity

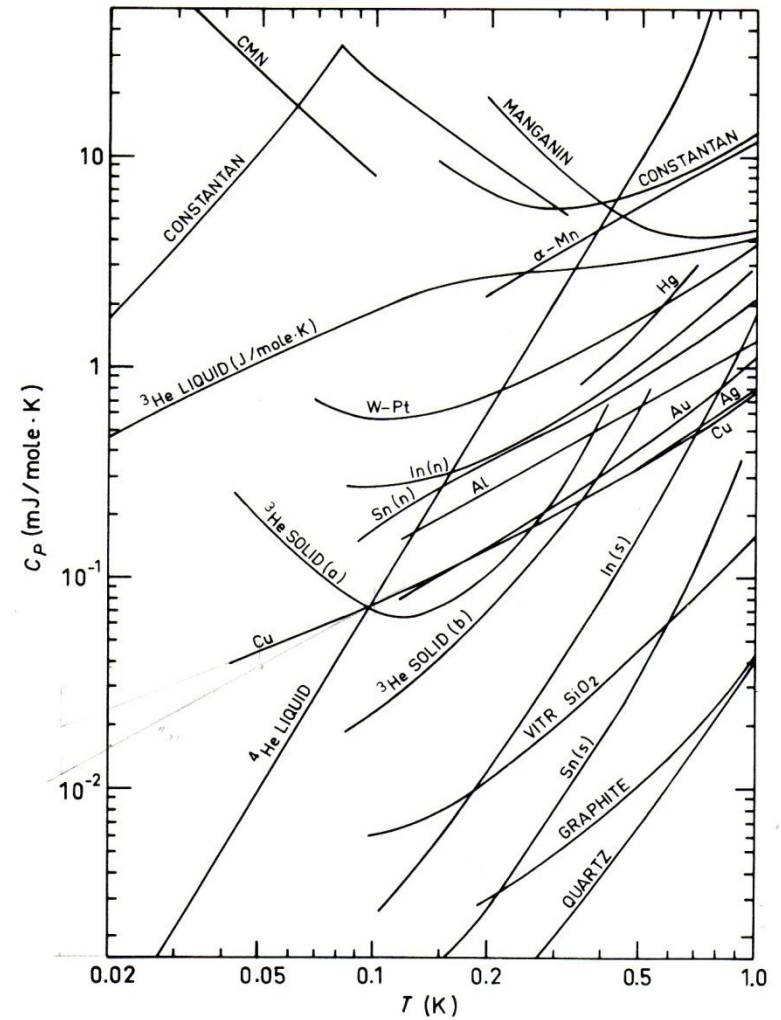
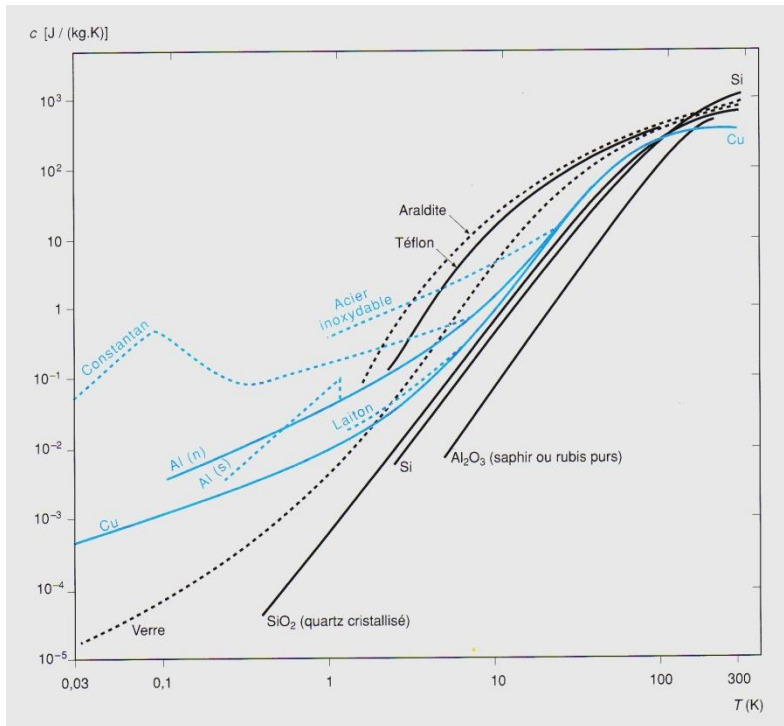
$$\Delta C = 1.43 \gamma T_C$$

elektronová měrná tepelná kapacita

$$C_{e,s} = \gamma \exp(-bT_C/T)$$



Měrná tepelná kapacita některých materiálů



Tepelná vodivost

$$dQ/dt = - A \cdot \kappa \cdot \Delta T$$

z kinetické teorie plynů

$$\kappa = 1/3 (C/V_m) \cdot v \cdot \lambda$$

$$T \ll \Theta_D$$

(rozptyl fononů na hranicích zrn)

λ_{ph} – teplotně nezávislá

$$\kappa_{ph} \sim C_{ph} \sim T^3$$

$$T < \Theta_D/10$$

interakce fonon - fonon

λ_{ph} roste s klesající teplotou

nepravidelnosti mřížky:

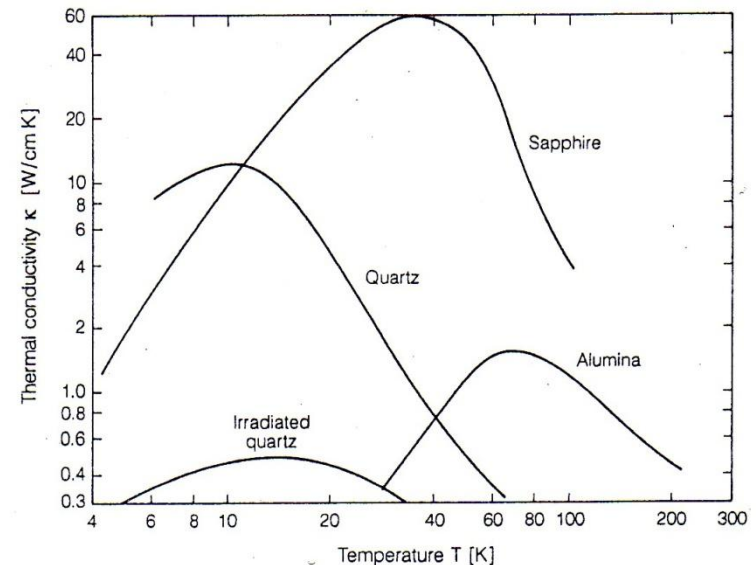
$\lambda_{ph} = \text{konst.}$ - hranice zrn

$\lambda_{ph} \sim 1/T$ dislokace

$\lambda_{ph} \sim T^{-4}$ bodové poruchy (Rayleigh)

fonony

$$\kappa_{ph} = 1/3 (C_{ph}/V_m) v_s \lambda_{ph}(T)$$



Elektrony

kinetický model volných elektronů

$$\kappa_e = 1/3(C_e/V_m)v_F\lambda_e(T) \quad v_F > v_s$$

vysoké teploty – rozptyl na fononech

- κ_e s teplotou klesá

nízké teploty – poruchy a příměsi

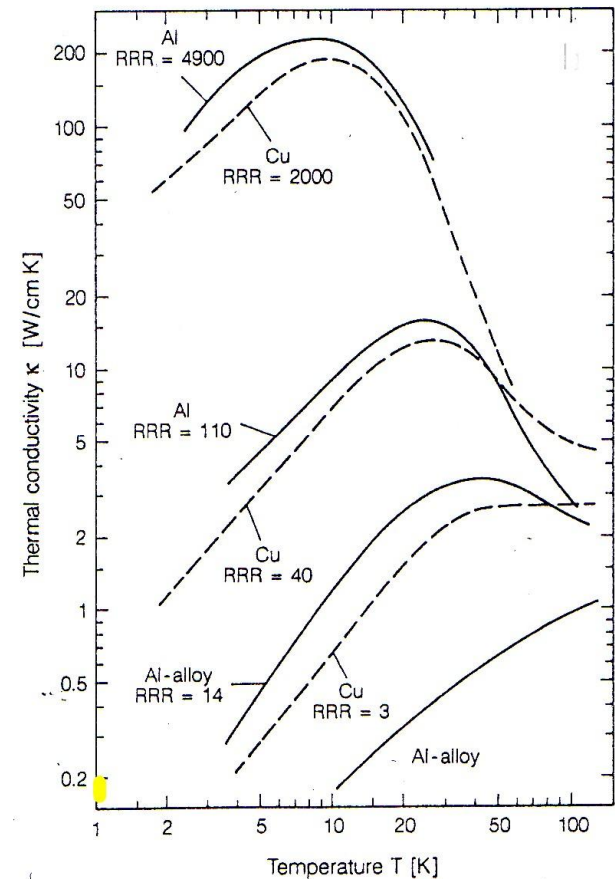
λ_e – teplotně nezávislá

$$\kappa_e \sim C_e \sim T$$

Wiedemannův - Franzův zákon

$$\kappa/\sigma = L_0 T$$

Lorentzovo číslo $L_0 = 2.45 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \Omega / \text{K}^2$



$$\text{RRR} = \rho_{300 \text{ K}} / \rho_{4.2 \text{ K}}$$

Wiedemannův – Franzův zákon

hustota proudu v kovech $j = nev_F = \frac{ne^2\tau E}{m}$

driftová rychlost elektronů $v_F = -eE\tau / m$

(τ – střední doba života mezi srážkami)

elektrická vodivost σ z Ohmova zákona $j = \sigma E$ $\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$

tepelná vodivost elektronů $\kappa = 1/3 C_{el} v_F \lambda$ $\kappa = \frac{\pi^2 nk^2 T \tau}{3m}$

$E_F = kT_F = \frac{1}{2}mv_F^2$ $\lambda = v_F\tau$ $C_{el} = \frac{1}{2}\pi^2 Nk \frac{T}{T_F}$

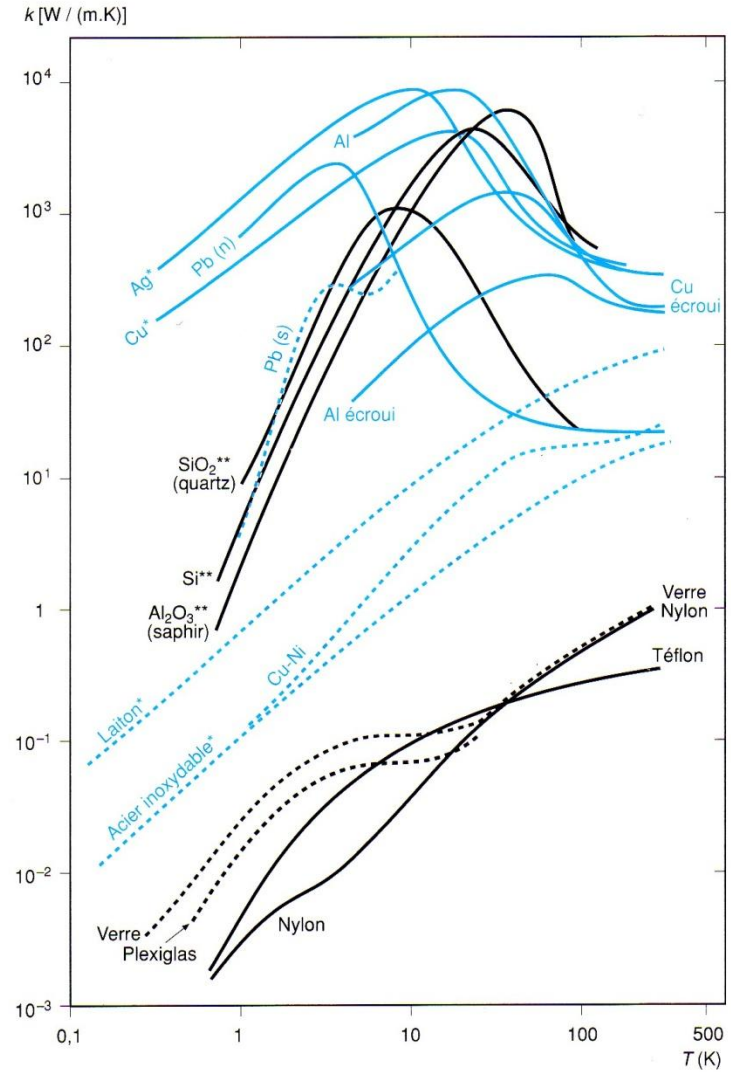
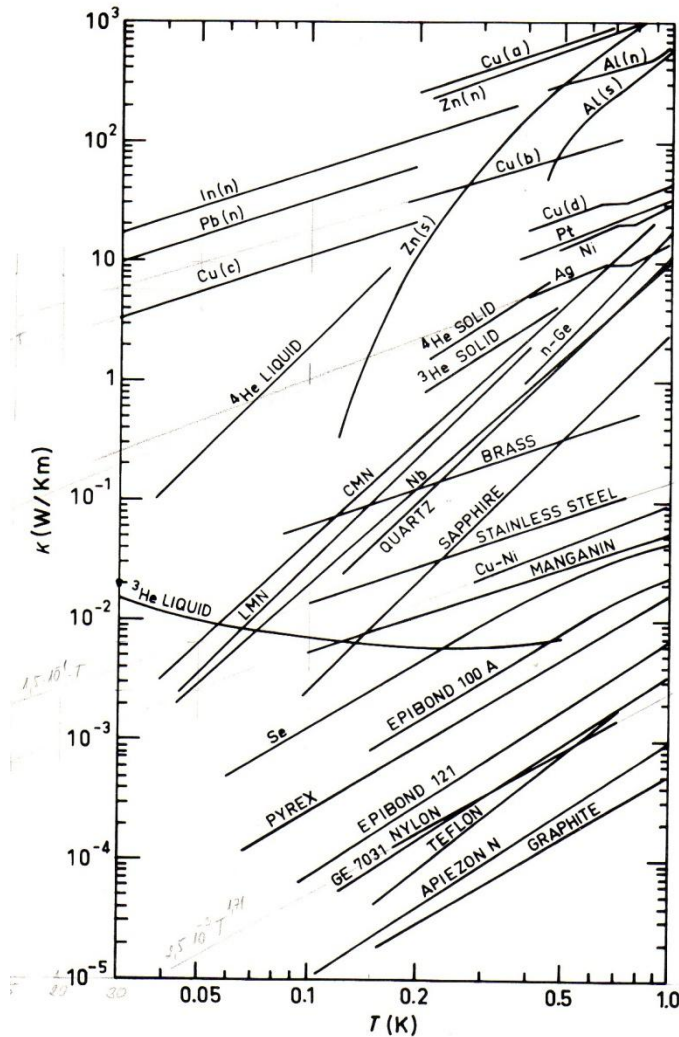
Wiedemannův - Franzův zákon

$\kappa/\sigma = L T$

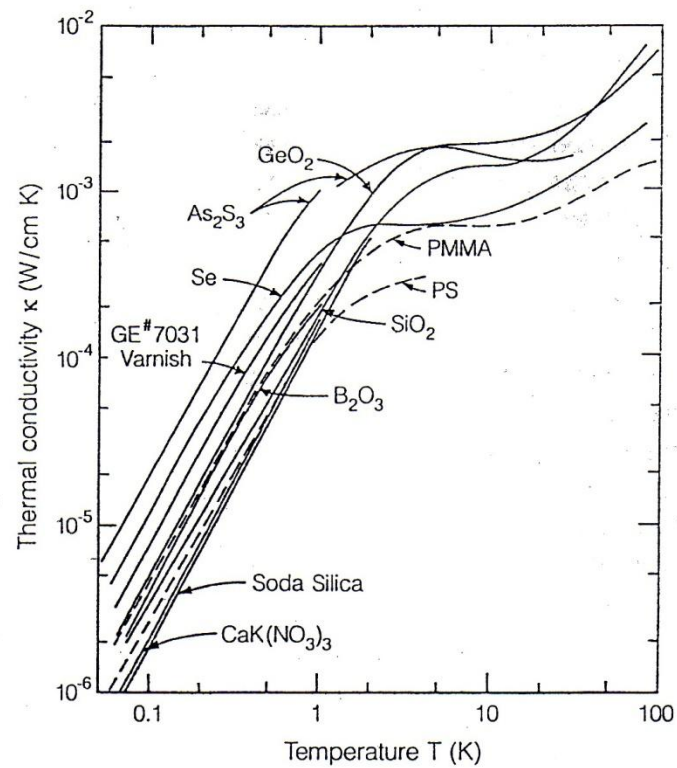
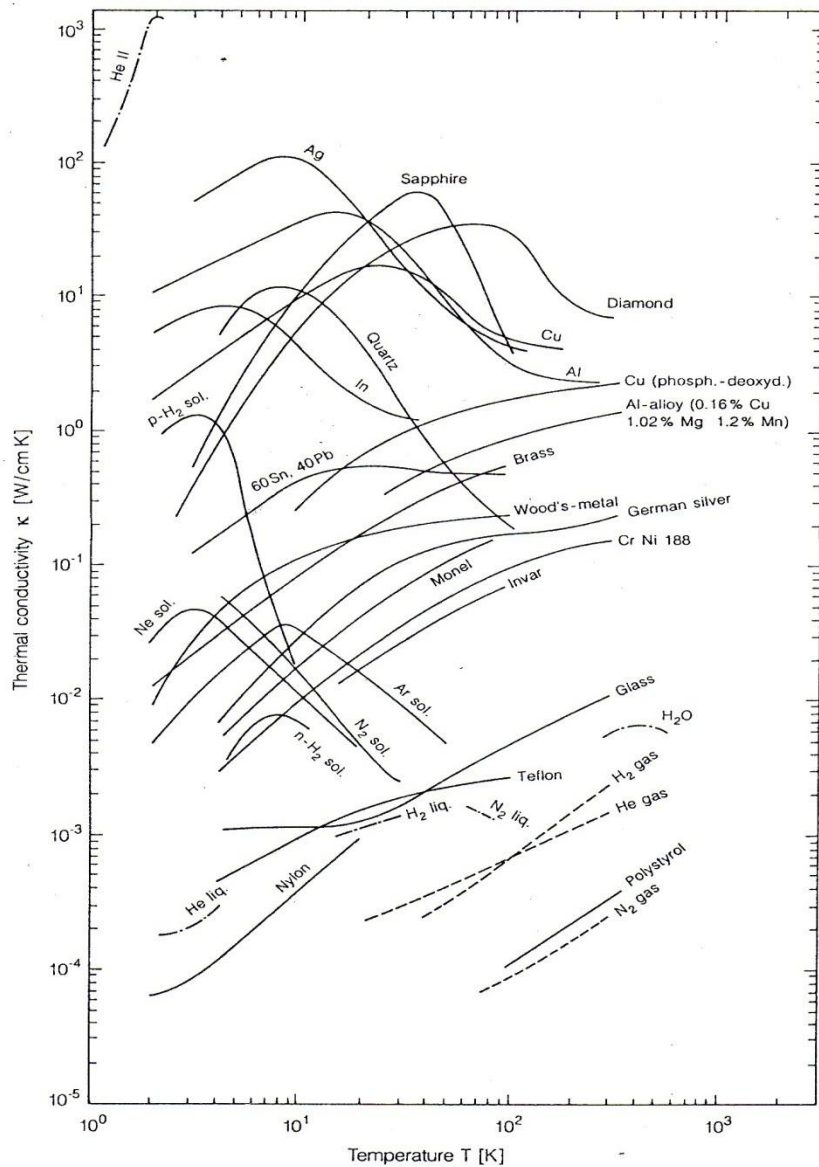
Lorentzovo číslo $L = 2.45 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \Omega / \text{K}^2$

$$\frac{\kappa}{\sigma} = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k}{e} \right)^2 T$$

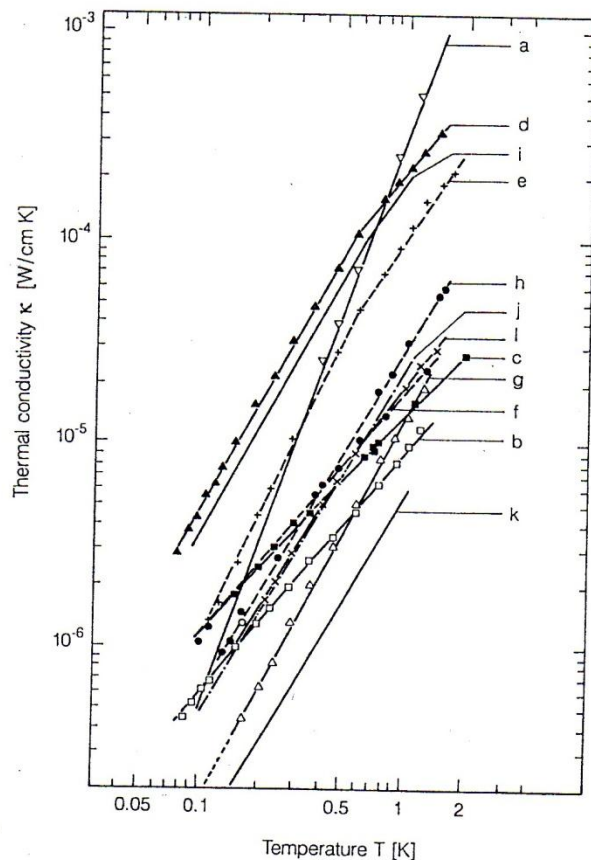
Tepelná vodivost různých materiálů



další údaje o tepelné vodivosti



Tepelná vodivost dielektrik



13.20 Thermal conductivities of various dielectric materials often used in cryogenic apparatus (a: sintered Al_2O_3 ; b: carbon BB5; c: nuclear graphite; d: Araldite CT 200; e: Araldite with talc; f: Vespel SP1; g: Vespel SP22; h: Vespel SP5; i: Epibond 100 A; j: Nylon; k: Graphite AGOT; ℓ : Vespel SP21 with 15% by weight graphite) [3.57]

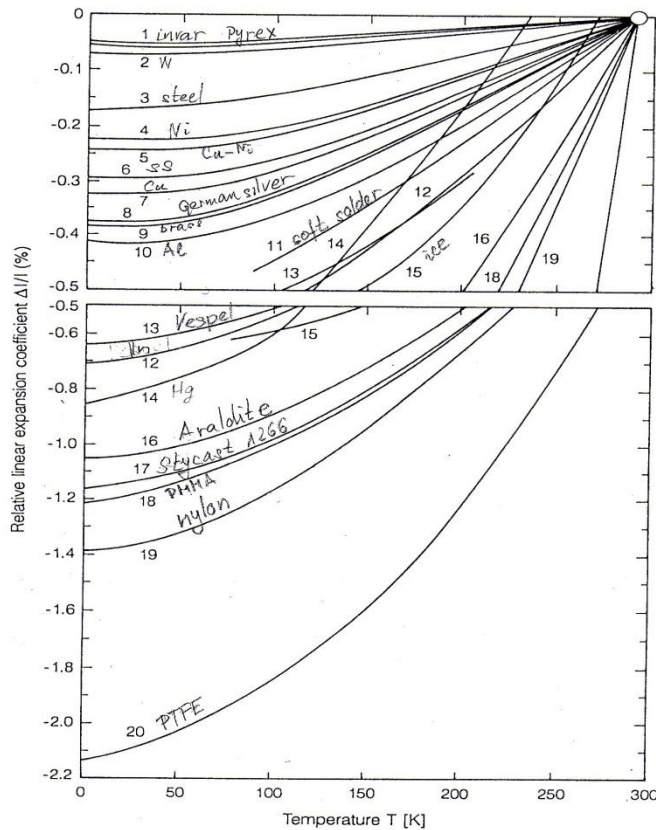
Teplotní roztažnost

anharmonický charakter kmitů mřížky

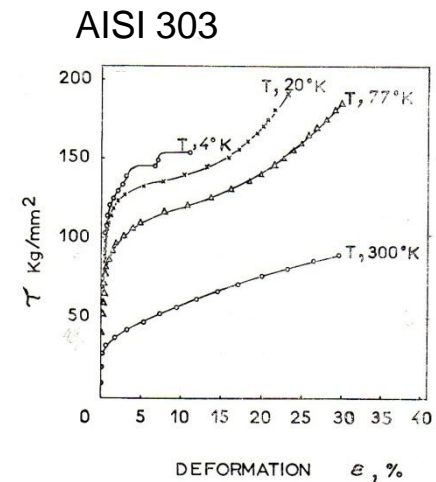
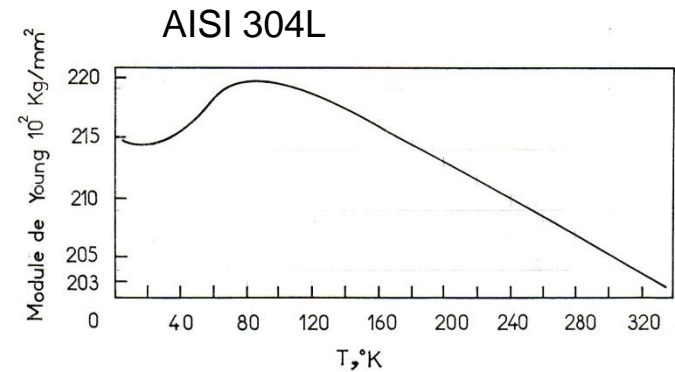
$$U(x) = cx^2 - gx^3 - fx^4$$

střední hodnota posunutí polohy atomů

$$\langle x \rangle = \frac{3g}{4c^2} kT$$



Nízkoteplotní zpevnění ocelí



Kapicův tepelný odpor na rozhraní

$$\Delta T = R_K \cdot dQ/dt$$

akustické nepřizpůsobení

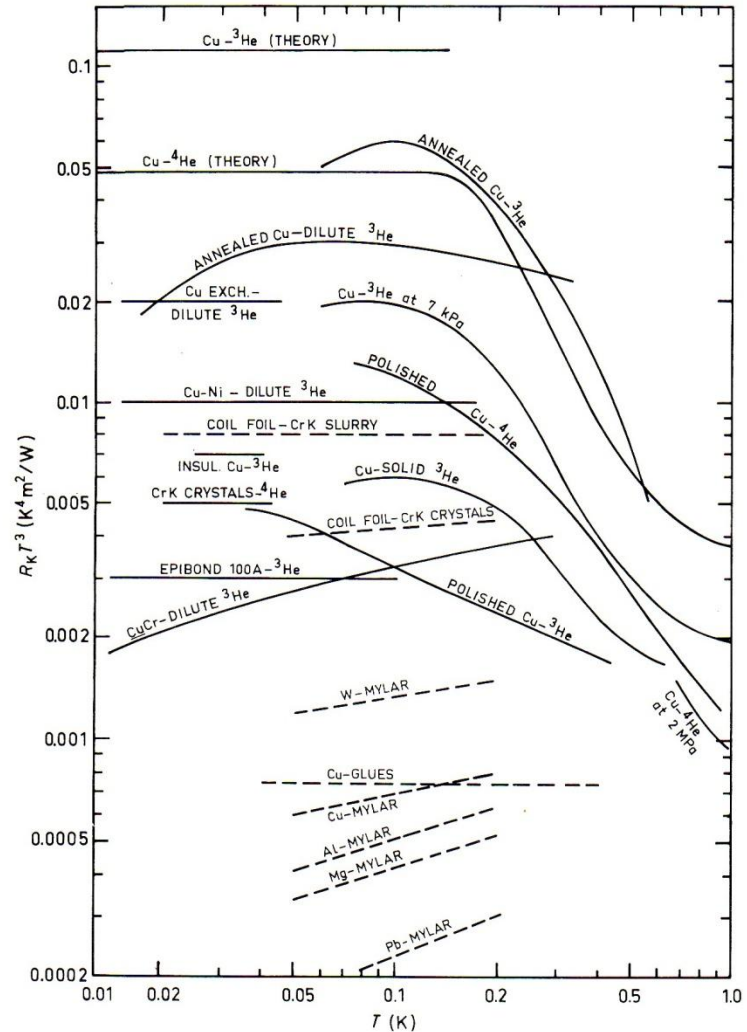
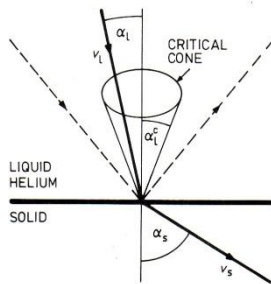
relativní podíl fononů přecházejících přes rozhraní kapalina – pevná látka

$$f = \sin^2 \alpha_i^c / 2\pi = \frac{1}{2} \left(\frac{v_l}{v_s} \right)^2$$

Snellův zákon lomu - $\alpha_i^c \sim 3$

$$v_l \sim 200 \text{ m/s} \quad v_s \sim 5000 \text{ m/s}$$

$$R_K = \frac{A \Delta T}{\dot{Q}} = \frac{15 h^3 \rho_s v_s^3}{16 \pi^5 k^4 \rho_l v_l T^3}$$



Konstrukční materiály

měď: OFHC, žíhaná RRR > 1000

stříbro žíhané, nákladné

hliník: obtížné svařování a pájení, povrchová oxidace

nerezová ocel: austenitická fáze γ (f.c.c.) 18 – 20 % Cr, 8 – 12 % Ni
stabilizovaná Ti, Mo, Nb proti martensitické transformaci,
nemagnetické (AISI 300 – 316, EN 58, ČSN 17241 – 17248)

měď - nikel: 70Cu 30Ni, 50Cu 50Ni - tvárné, snadné pájení, nemagnetické

mosaz: 70Cu 30Zn monel: 66Ni 30Cu 2Fe 2Mn inkonel: 72Ni 14-17Cr 6-10Fe

neusilber (pakfong): 47Cu 41Zn 9Ni 2Pb

manganin: 87Cu 13Mn constantan: 57Cu 43Ni

Teflon: polytetrafluorethylén (PTFE) $(CF_2)_n$

Kel-F: polychloretrifluorethylén (CTFE) $(CF_2CFCl)_n$

Vespel: SP 1, SP 21 polyimid

Torlon: polyamidimid (PAI)

Mylar: polyethylenetereftalát (PET) $(C_{10}H_8O_4)_n$

Kapton: polypyromelitimid (PPMI) $(C_{22}H_{10}N_2O_5)_n$,

Kapton XP (150XP019) 37,5 μ m/12.5 μ m Teflon PFA

Svařování a pájení

Obloukové svařování v Ar atmosféře (nerezová ocel)

Svářování svazkem elektronů ve vakuu

Svařování laserovým svazkem

Tvrdé pájky: Ag – pájky tavidla: borax, H_3BO_3

66% Ag 27% Cu 7% Zn (800 – 840 °C)

40% Ag 20% Cu 20% Cd 20% Zn (640 – 680 °C)

Castolin 1802, 157

Niklové pájky, pájky se zlatem nebo palladiem

Ni – Microbraz – kapilární pájení ve vakuu

Měkké pájky: 60% Sn 40% Pb (183 – 191 °C) tavidla: kalafuna, $ZnCl_2$,

63% Sn 37%Pb eutectická (183 °C) NH_3Cl , H_3PO_4

50% Sn 32% Pb 18%Cd (145°C)

10% Sn 90% Pb (275-302 °C)

Woodův kov: 50% Bi 25% Pb 12,5% Sn 12,5% Cd (65 – 70 °C)

Ostalloy 158 49,5% Bi 27,3% Pb13,1% Sn 10,1% Cd (70 °C)

Cerrolow 136 49% Bi 18% Pb 12% Sn 21% In (58 °C)

In 155 °C, Ga 29,5 °C In-Ga (~33 °C)

pájka bez parazitního termo emn 70,5% Cd 29,5% Sn

Lepidla, epoxidové pryskyřice

General Electric Varnish **GE 7031** – nezpolymerizovaná fenolová pryskyřice
typu Resinox , také BF 1, BF 6

vakuový tuk Apiezon

epoxidové pryskyřice:

Araldite, Epibond

Stycast 2850 FT – přizpůsoben tepelné roztažnosti Cu

Stycast 2850 GT –přizpůsoben tepelné roztažnosti mosazi

Catalyst 23 LV (7,5/100)

Stycast 1260 (bezbarvý) (27,5/100)

Superizolace:

fólie pokovené hliníkem NRC – 2

střídavě vinutá hliníková fólie a tenká izolace

kaptonová lepicí páska, teflonová páska,