Fyzika nízkých teplot

- Měření nízkých teplot
  - Teplotní stupnice ITS90
  - Plynové a parní teploměry
  - Odporové teploměry
  - Polovodičové teploměry
  - Další typy teploměrů pro měření nízkých teplot
- Tepelné izolace a hladinoměry kryokapalin
  - Přenos tepla vedením, zářením,...
  - Tepelné izolace - vakuová, superizolace, pěnová,....
  - Dewarova nádoba
  - Různé typy hladinoměrů pro kryokapaliny
- Aplikace nízkých teplot
  - Aplikace ve vakuové technice
  - Aplikace v průmyslu, ve zdravotnictví, v dopravě,...
  - Aplikace v raketové technice

Měření nízkých teplot

- Teplotní stupnice ITS-90
- Plynové a parní teploměry
- Odporové teploměry
- Polovodičové teploměry
- Další typy teploměrů pro měření nízkých teplot

Teplotní stupnice

Definice teploty:
Pro každý systém existuje jistá intenzivní stavová veličina - teplota, mající stejnou hodnotu ve všech systémech, které jsou navzájem v rovnováze.

rozsah teplotní stupnice a velikost jednoho stupně je věcí dohody

Teplotní stupnice

- Kelvinova stupnice
- Celsiova stupnice
- Farenheitova - USA
- Rankinova - USA
- Réaumurova stupnice - záp. Evropa do konce 19. stol

Kelvinova stupnice

definována 1854 pomocí Carnotova cyklu

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

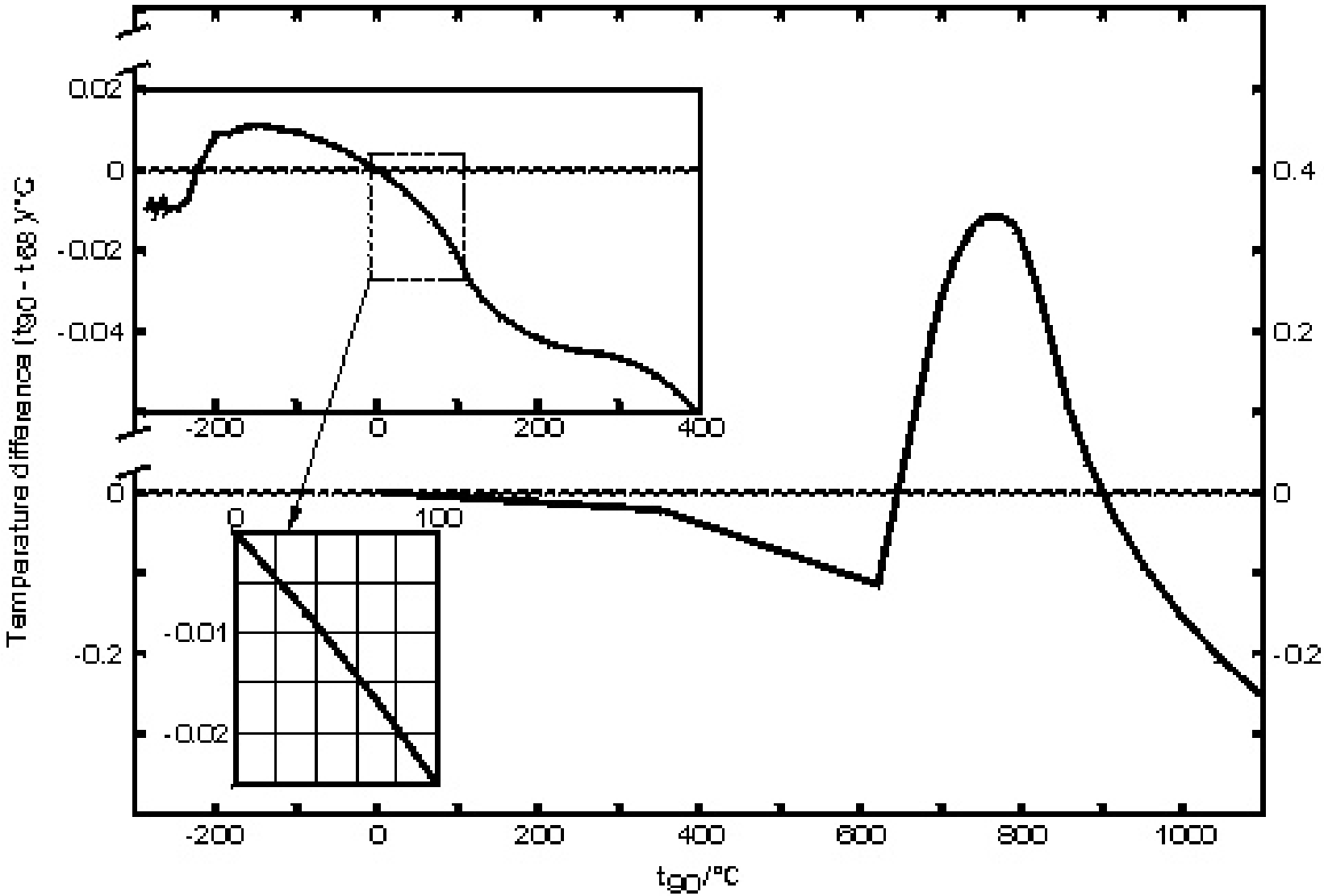
$$u = 1 - \frac{Q_1}{Q_2}$$

Q_1 - teplo odevzdané
Q_2 - teplo přijaté

ITS-90

Mezinárodní teplotní stupnice ITS-90, www.ITS-90.com.
17 pevných teplotních bodů, rozsah 0.65 - 1357.77 K

Starší stupnice IPTS-68 - 11 pevných bodů + 11 sekundárních bodů, rozsah 2.172 - 1337 K -problém s teplotou bodu varu kryokapalin, vliv hydrostatického tlaku
(105 mK/10 cm pro O_2, 58 mK/10 cm pro N_2)



1

[1] www.ITS-90.com

ITS-90

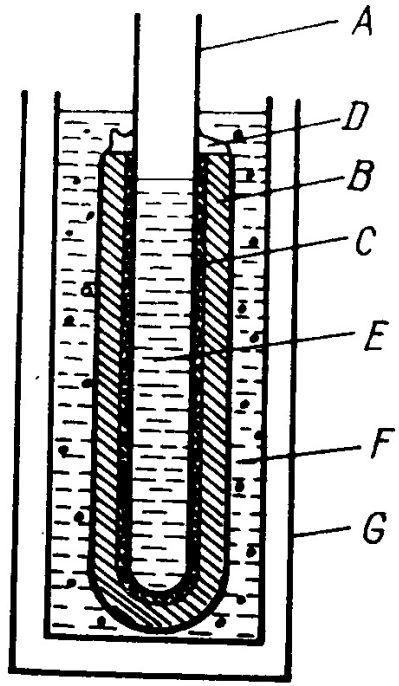
Number	Temperature T90 K	t90 °C	Substance a	State b
1	0.65 to 5	-272.5 to -268.15	He	V
2	13.8033	-259.3467	e-H_2	T
3	17	-256.15	e-H_2 (or He)	V
4	20.3	-252.85	e-H_2 (or He)	V
5	24.5561	-248.5939	Ne	T
6	54.3584	-218.7916	O_2	T
7	83.8058	-189.3442	Ar	T
8	234.3156	-38.8344	Hg	T
9	273.16	0.01	H_20	T
10	302.9146	29.7646	Ga	M
11	429.7485	156.5985	In	F
12	505.078	231.928	Sn	F

ITS-90

v rozsahu 0.65 - 5 K, definice pomocí tenze par ^3He a ^4He

$$T_{90}[K] = A_0 + \sum_{i=1}^{9} A_i \left[\frac{ln(P) - B}{C} \right]^i$$

Trojný bod vody



Obr. 53. Realizace trojného bodu vody (273,16 K)

B - odplyněná, redestilovaná voda, F - voda a tající led, C - led, D - vodní pára, po několika hodinách, v části E teplota trojného bodu 273.16 K $\pm$ 0.2 mK [2]

[2] J.Jelínek, Z. Málek: Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982

Supravodivé teplotní body

supravodič	čistota	kritická teplota [K]
Pb	6N	7.201
In	5N	3.416
Al	5N	1.175
Zn	6N	0.844
Cd	6N	0.515

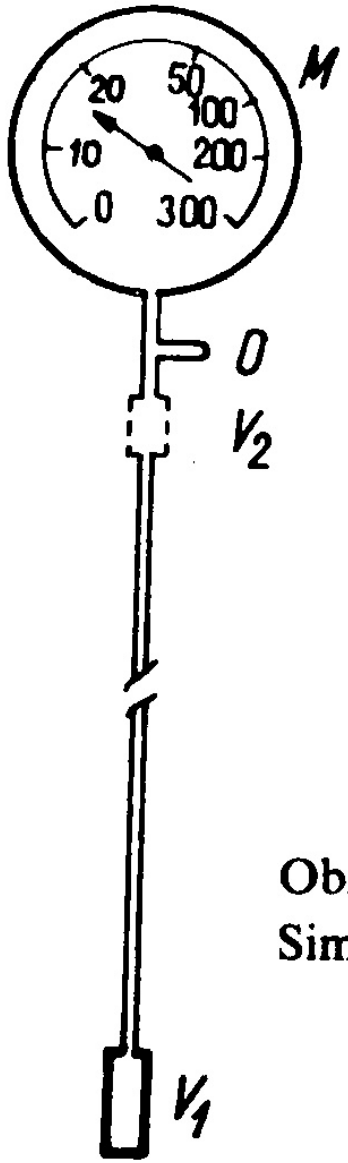
přesnost 2 mK, reprodukovatelnost 1 mK

Plynový teploměr

princip - měření tlaku
plyn He (ideální plyn), tlak plynu vždy nižší než tenze par pro danou teplotu, referenční tlak a teplota T_0 , p_0

$$T = T_0 \frac{p}{p_0}$$

za předpokladu $V_2 \doteq 0$
rozsah měřených teplot 1-300 K



Obr. 36. Jednoduchý Simonův plynový teploměr

3

[3] J.Jelínek, Z. Málek: Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982

Korekce

- parazitní objem V_2
- termomolekulární rozdíl tlaků
- neideální plyn
- změna teploty manometru během měření

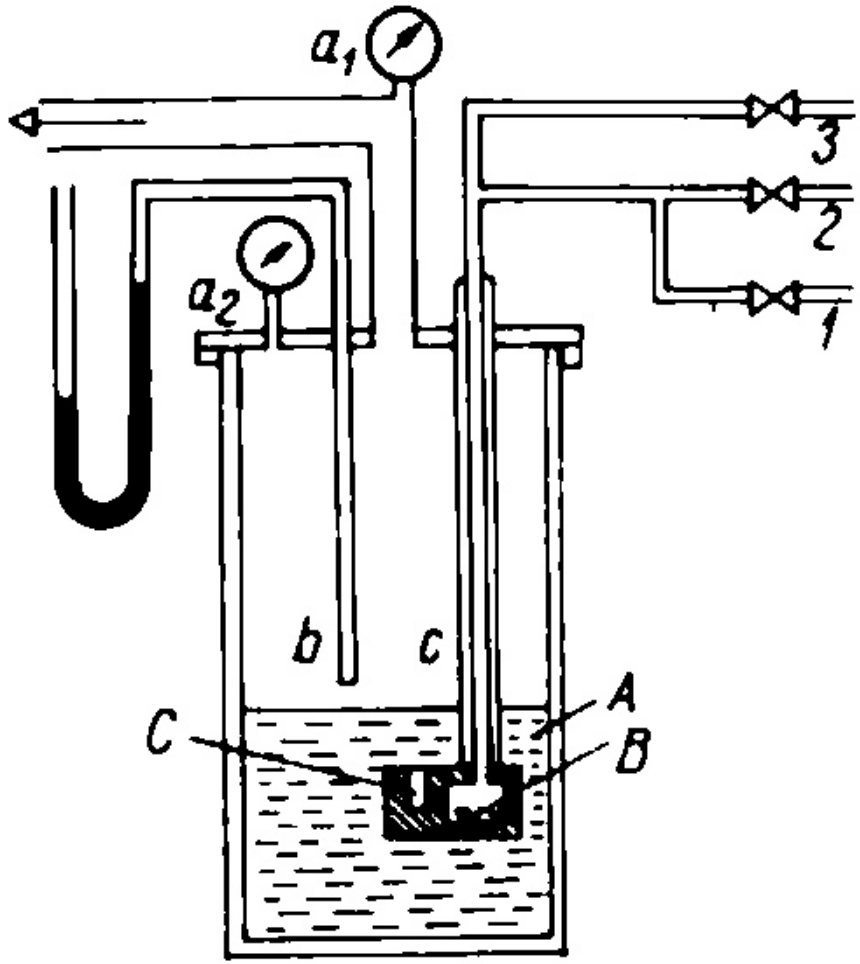
$$T = \frac{P}{\frac{P_0}{T_0} + \frac{P_0 - P}{T_p}\frac{V_2}{V_1}}$$

přesnost až 0.01 K

Parní teploměr

- rovnovážný tlak par nad hladinou zkapalněného plynu
- závislosti pro čisté látky změřeny
- zpravidla pracují mezi trojným bodem a bodem varu
- přesnost asi 1%, citlivost až $10^{-4}K$

Parní teploměr



[4]

[4] J.Jelínek, Z. Málek: Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982

Parní teploměr

látka	rozsah teplot [K]	max.rozsah [K]
^3He	1.5 - 3.3	0.3 - 3.3
^4He	2.3 - 4.5	0.9 - 5.2
H_2	13.8 - 21.2	13.8 - 33.2
Ne	24.5 - 28.1	21.0 - 44.4
N_2	63 - 80	63 - 126
O_2	70 - 93	54 - 154
CH_4	86 - 116	90 - 191
NO	107 - 123	
CF_4	90 - 150	
C_2H_4	133 - 174	

Odporové teploměry

tepelné kotvení, ohřev teplotního čidla

- kovové
- slitinové
- uhlíkové
- termistory
- germaniové
- galiumarsenidové

Výkonové zatížení

teplotní oblast [K]	výkonové zatížení [W]
10^2 až 10	10^{-6} až 10^{-8}
10 až 1	10^{-8} až 10^{-10}
1 až 10^{-1}	10^{-10} až 10^{-12}
10^{-1} až 10^{-2}	10^{-12} až 10^{-14}

pro teplotní snímač délka 10 mm, průměr 3 mm, zvýšení chyby o 0.1 %

Kovové teploměry

Pt teploměry

- Pt drátek 0.05 - 0.2 mm
- při 0 $^{\circ}C$ odpor 10 - 100 Ω
- problém s pnutím
- závislé na mag. poli, B = 5 T, T = 20 K, chyba 100%

$$W_r(T) + \Delta W(T) = W(T) = \frac{R_T}{R_{273.16K}}$$

$$W(29.7646^{\circ}C) \geq 1.11807 \text{ , } nebo \quad W(-38.8344^{\circ}C) \leq 0.844235$$

$$T = 273.16 \times \left(B_0 + \sum_{i=1}^{15} B_i \left[\frac{W_r(T)^{1/6} - 0.65}{0.35} \right]^i \right)$$

v rozsahu 13.8033 K až 273.16 K, s přesností 0.1 mK

$$T = 273.15 + \left(D_0 + \sum_{i=1}^{9} D_i \left[\frac{W_r(T) - 2.64}{1.64} \right]^i \right)$$

v rozsahu 273.16 K až 1235 K, s přesností 0.13 mK

Cu teploměry

- Cu drátek 0.05 - 0.1 mm, se smaltovou izolací
- lineární závislost až do teplot LN_2
- levné, méně citlivé na mech. pnutí
- přesnost 0.1% do 70 K, 70 - 200 K asi 1%
- závislé na mag. poli, B = 5 T, T = 4 K, chyba 300%

Pb, In teploměry

lepší citlivost než Pt, In - 3.5 - 300 K přesnost 0.1 K

Slitinové teploměry

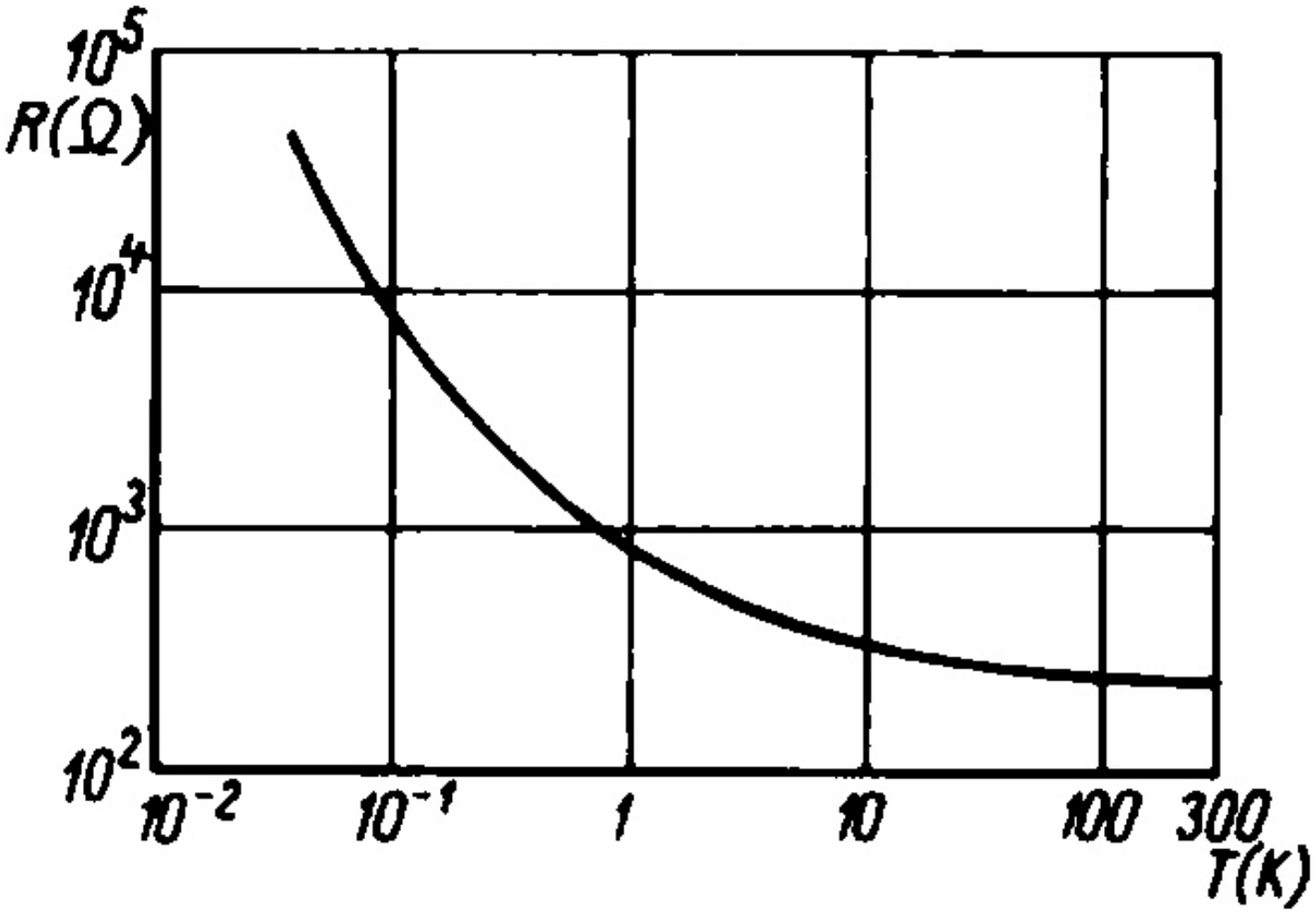
- Rh + 0.5% Fe
- konstantan - Cu60/Ni40
- manganin - Cu84/Mn12/Ni4
- pod 100 K mají téměř konstantní součinitel odporu
- závislé na mag. poli

Uhlíkové teploměry

- uhlíkový odpor
- problém s ohřevem a mechanickým namáháním
- reprodukovatelnost - formátovat, různé šarže - různé vlastnosti
- malá závislost na mag.poli B = 10 T asi 9%
- pro rozsah 2-20 K s chybou asi 0.5 %:

$$logR + \frac{C}{logR} = A + \frac{B}{T}$$

Uhlíkové teploměry



5

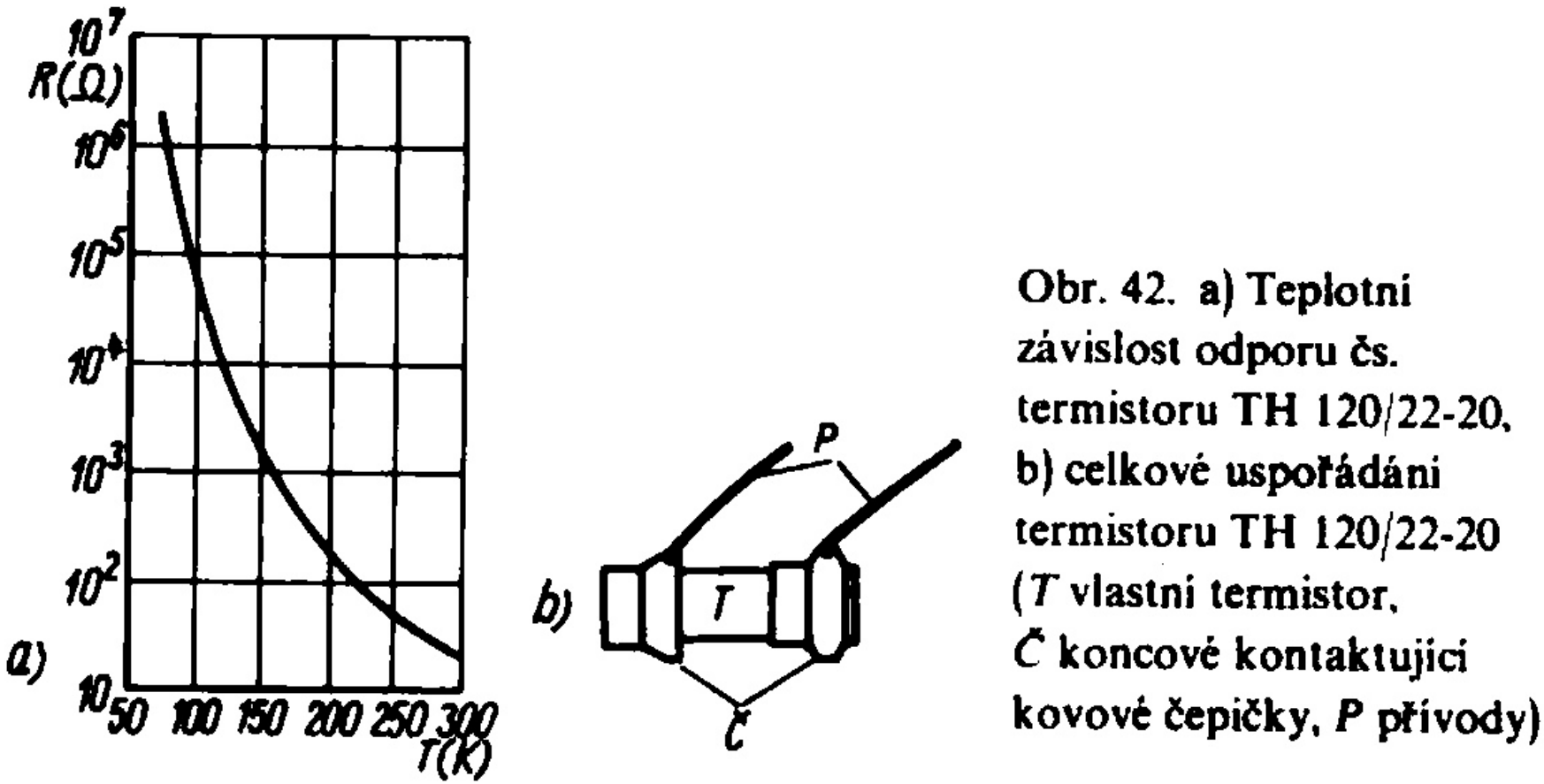
[5] J.Jelínek, Z. Málek: Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982

Termistory

- kysličník niklu a manganu
- velký součinitel odporu
- slabá závislost na mag.poli
- reprodukovatelnost - formátování pro stabilitu 0.1%
  - 50 cyklů z 293 na 77 K
  - 7 dnů při pok.teplotě
  - 50 cyklů z 293 na 77 K
  - 14 dnů skladovat

$$R = R_0 exp\left[-K\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right]$$

Termistory



Obr. 42. a) Teplotní závislost odporu čs. termistoru TH 120/22-20, b) celkové uspořádání termistoru TH 120/22-20 (*T* vlastní termistor, *Č* koncové kontaktující kovové čepičky, *P* přívody)

6

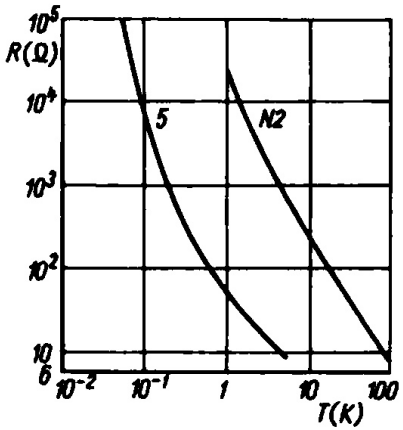
[6] J.Jelínek, Z. Málek: Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982

Germaniové teploměry - GRT

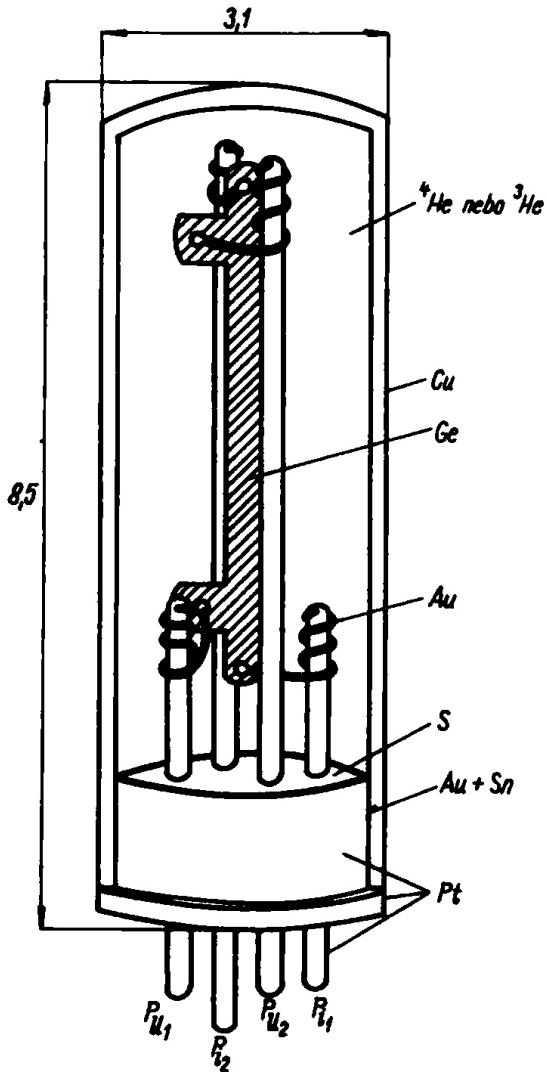
- Ge + příměs As, Ga, Sb, Bi
- rozsah od 50 mK do 100 K - dva snímače
- přesnost až 0.5 mK
- dobrá stabilita
- sekundární standart

$$logR = \sum_{n=0}^{m} A_n (logT)^n, m \sim 13$$

Germaniové teploměry



Obr. 44. Závislosti $R(T)$ dvou typů Ge snímačů (5 a N2) Scientific Instruments [98]



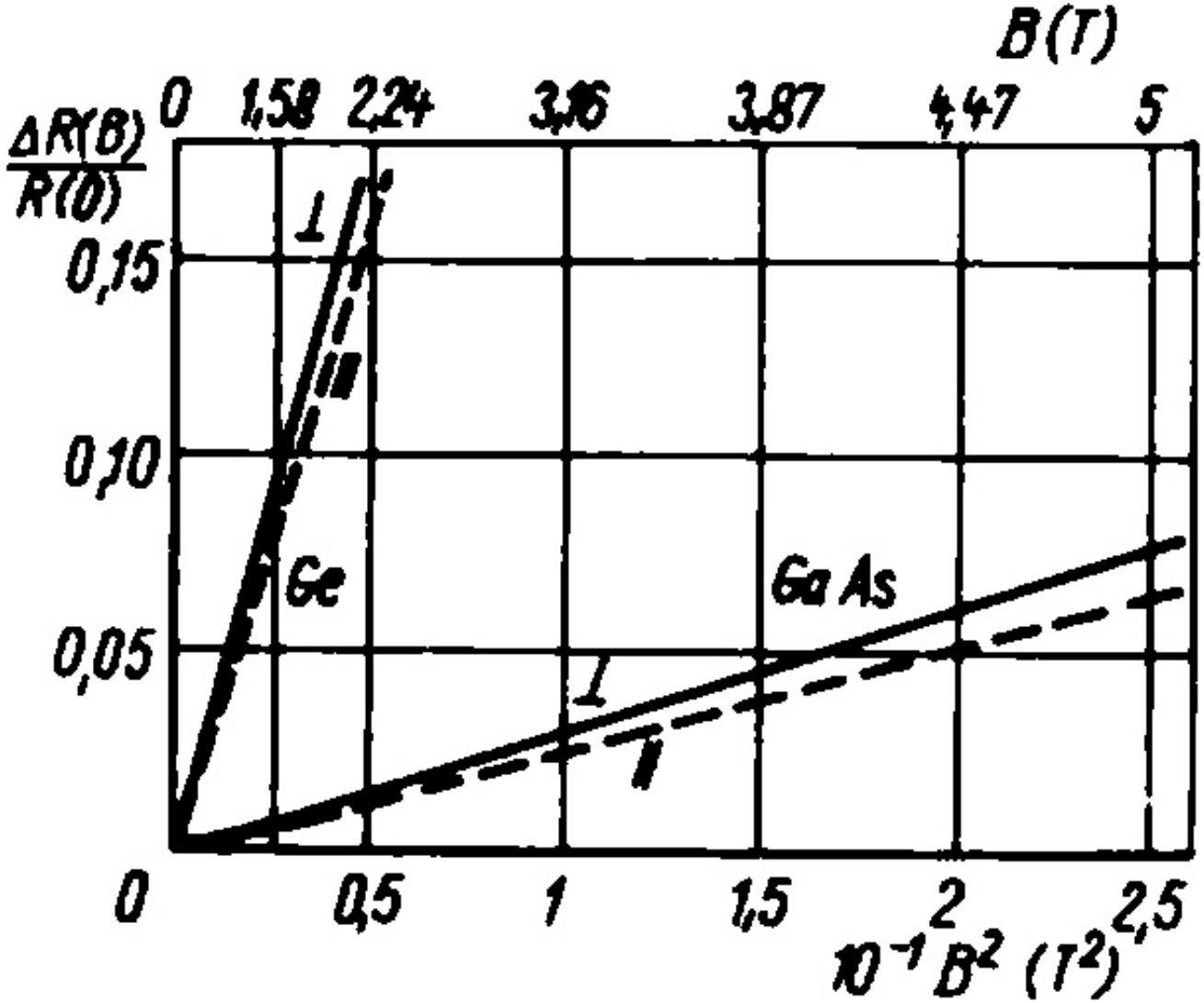
Obr. 45. Schéma uspořádání čtyřelektrodového Ge snímače Cryocal použitelného jako sekundární termometrický standard [99] (*Ge* germanium, P_i proudové přívody, P_u napěťové přívody, *Au* zlaté drátkové pružné přívody, *Pt* platina, *Cu* zlacené měděné pouzdro plněné plynným He, *Au* + *Sn* pájka s bodem tání 280 °C, *S* sklo)

7

[7] J.Jelínek, Z. Málek: Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982

Galiumarsenidové teploměry

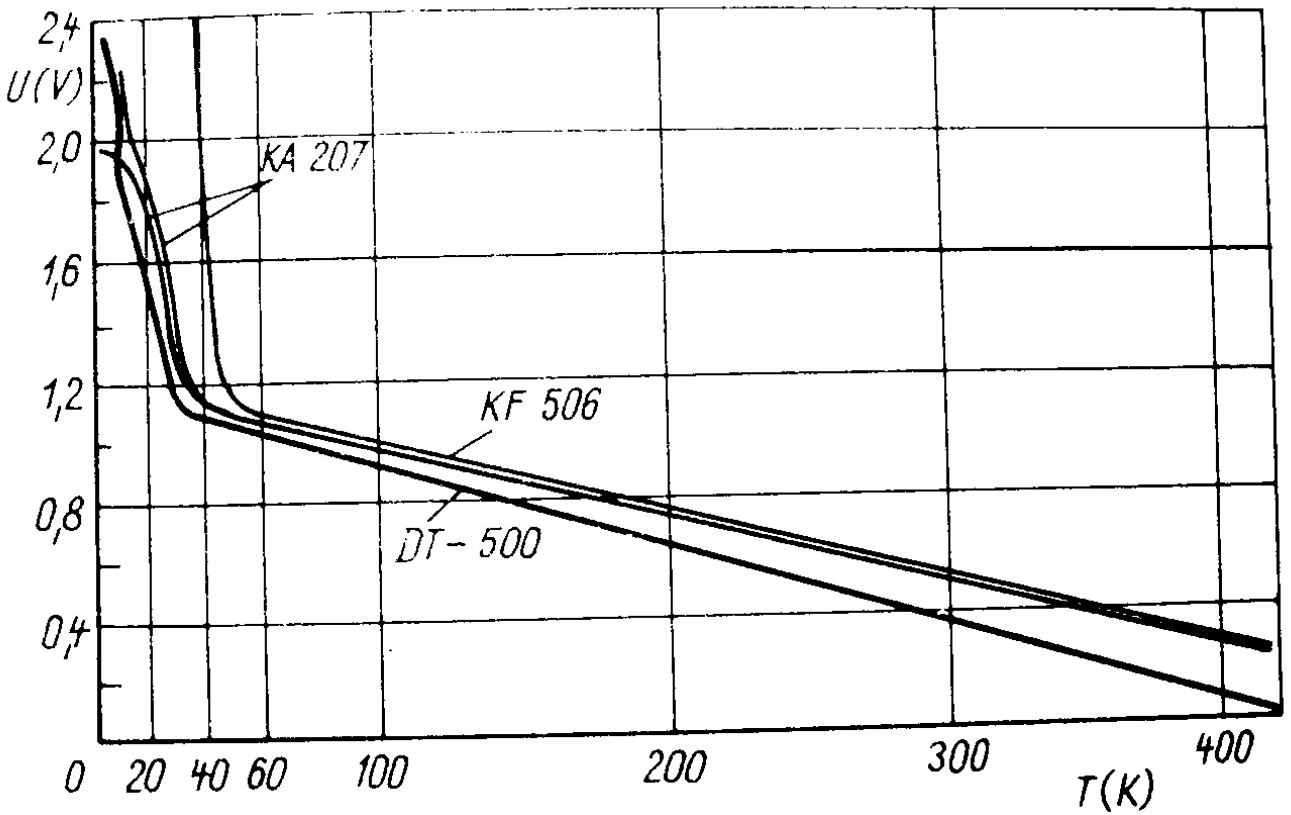
- GaAs monokrystal
- dopovaný Cu, nebo Zn
- slabá závislost na mag. poli
- dobrá dlouhodobá stabilita
- použitelné do 300 K



[8] J.Jelínek, Z. Málek: Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982

Teploměr s PN přechodem

- Si diody, tranzistory
- napětí na PN přechodu
- B = 5 T, chyba 2.4 K
- měří do 400 K
- dobrá reprodukovatelnost pro běžné měření



Obr. 50. Teplotní závislost spádu napětí na Si diodě DT-500 při proudu 10 μA v propustném směru [123], na dvou čs. Si diodách KA 207 a na čs. Si tranzistoru KF 506 (báze-emitor) při proudu 50 μA (diody) a 150 μA (tranzistor) v propustném směru [124]

9

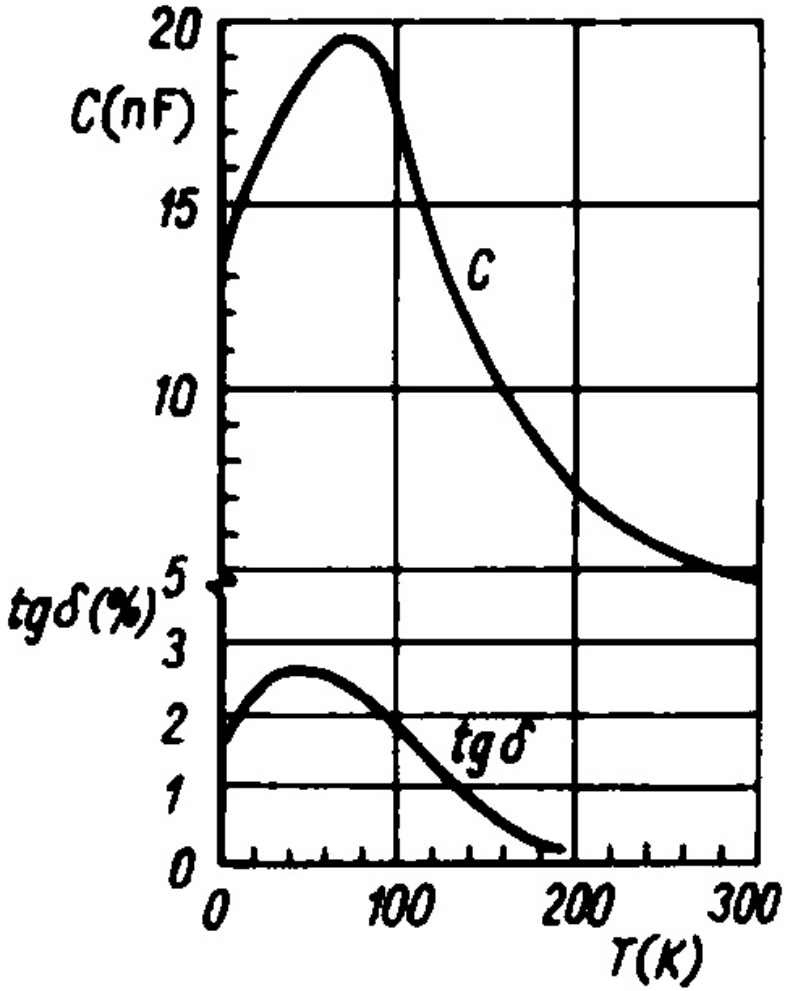
[9] J.Jelínek, Z. Málek: Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982

Kapacitní teploměry

- dielektrikum $SrTiO_3$
- nezávislé na mag. poli
- nepoužitelné v rozsahu 60-70 K
- měří až do 10 mK

$$T = \sum_{n=0}^{4} A_n C^n$$

Kapacitní teploměry



Obr. 51. Teplotní závislost elektrické kapacity C a tangenty ztrátového úhlu tg δ (měřeno 7,5 mV při 5 kHz) sklokeramického $SrTiO_3$ kondenzátoru [130]

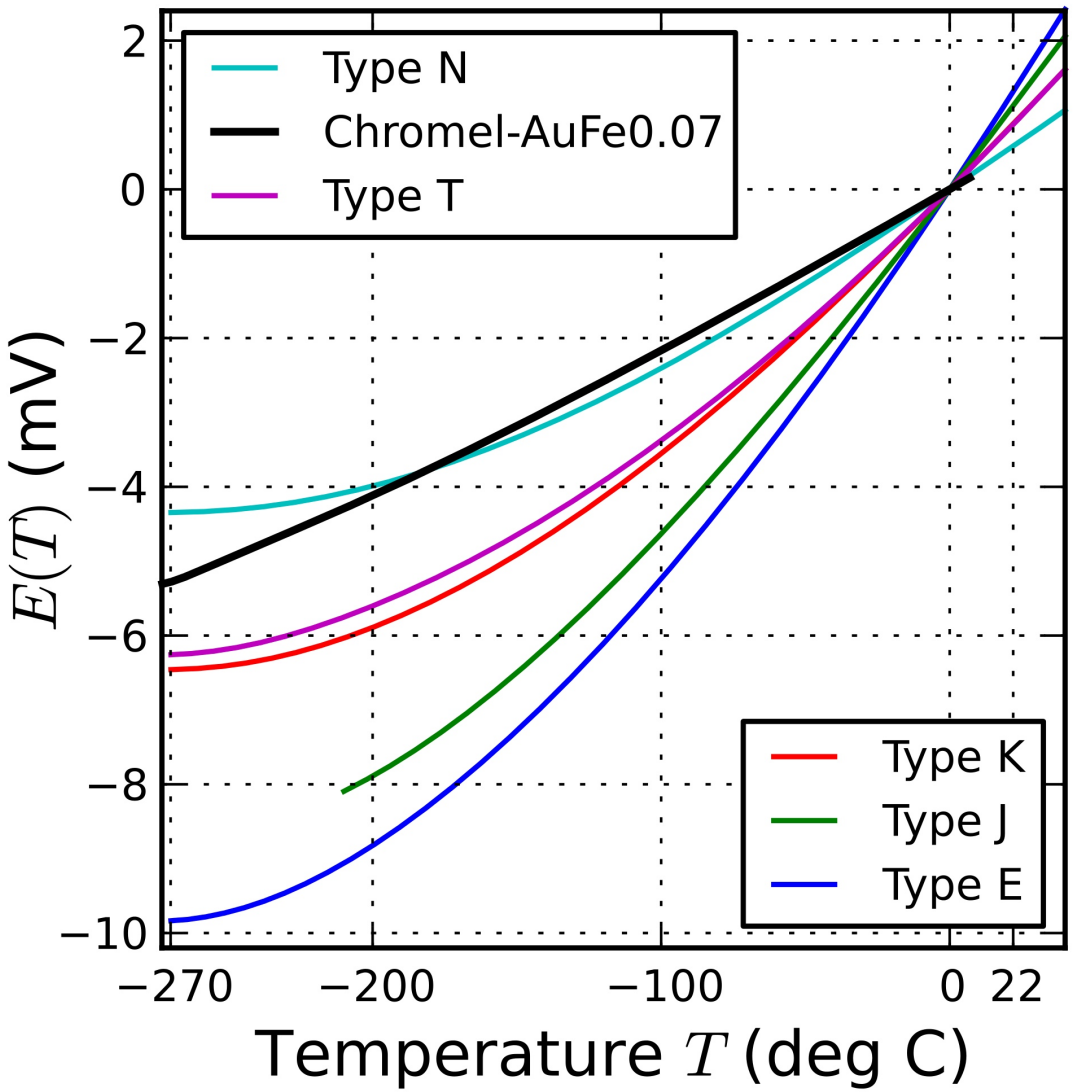
10

[10] J.Jelínek, Z. Málek: Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982

Termočlánky

- malé rozměry
- citlivost zpravidla klesá s teplotou
- referenční teplota - blízko měřené teplotě
- vliv složení, mech. deformace, různé tavby 10% rozdíl
- spojování
- K - NiCr-NiAl
- J - Fe-CuNi
- T - Cu-CuNi
- Chromel Ni90Cu10 - Au+Fe0.03

Termočlánky



11

[11] en.wikipedia.org/wiki/Thermocouple

Akustická termometrie

- měření rychlosti zvuku
- většinou He + akustický rezonátor
- typicky rozsah 2 - 20 K
- USA v roce 1965 - kalibrace Ge teploměrů

$$v^2 = \kappa \frac{RT}{M}; \kappa = \frac{C_p}{C_v}$$

Krystalový teploměr

- závislost rezonanční frekvence křemenného výbrusu na teplotě
- rozsah -80 °C až 250 °C
- př. základní frekvence 28.2 MHz, citlivost 1 kHz/K
- přesnost až 0.05 °C

$$f = f_0(1 + \alpha \Delta T)$$

12

[12] M.Kreidl: Měření teploty, BEN , Praha 2005

Optické vláknové senzory teploty

- vlákno 400 μm
- amplitudová modulace
- fázová
- polarizační
- rozložení vlnové délky - posun absorpční čáry
- Fabry-Perotův rezonátor
- -272 $^{\circ}C$ až 250 $^{\circ}C$
- chyba měření asi 0.2 $^{\circ}C$ až 0.8 $^{\circ}C$

13

[13] M.Kreidl: Měření teploty, BEN , Praha 2005

Infračervené teploměry

- pyrometry - detekce infračerveného záření
- rozsah -40 $^{\circ}C$ až 10000 $^{\circ}C$
- 0.4 μm až 25 μm
- emisivita

14

[14] M.Kreidl: Měření teploty, BEN , Praha 2005

Měření velmi nízkých teplot

primární

- šumové
- tlak tání pevného ^3He
- osmotický tlak mezi ^4He a $^3He + {}^4He$
- polarizační jev
- anizotropie γ záření

sekundární

- tenze par ^3He
- odporové teploměry
- magnetická susceptibilita paramagnetických látek
- statická jaderná susceptibilita
- spektra jaderné magnetické rezonance

Šumové teploměry

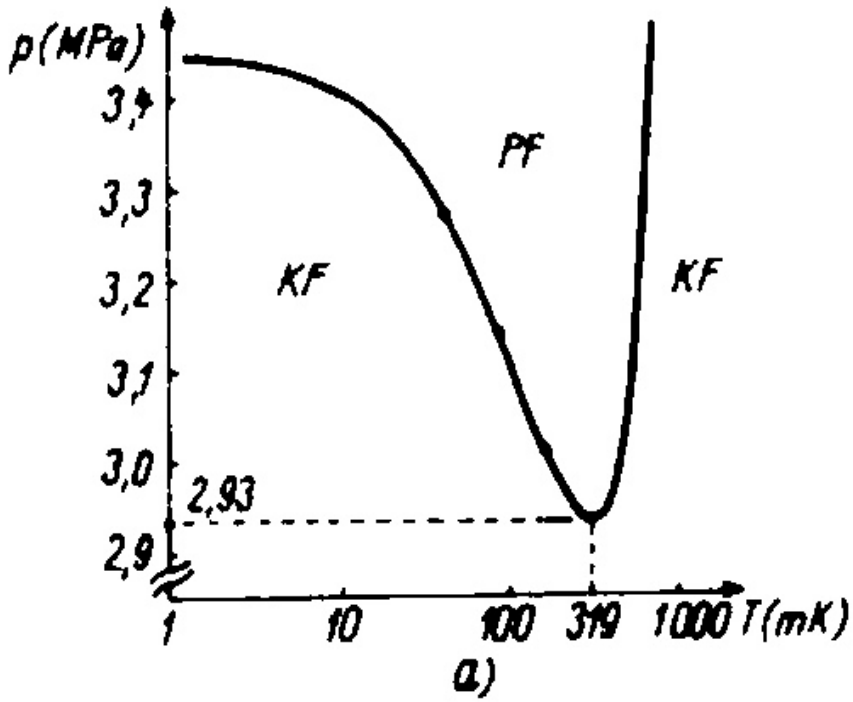
- Johnsonův šum - bílý šum
- oblast mK a μK
- napětí řádu $10^{-10}\,V$
- supravodivý detektor magnetického toku Squid (napětí až $10^{-15}\ V$)

$$\overline{U^2} = 4kTR\Delta f$$

R - odpor, Δf šířka kmitočtového pásma

Tlak tání pevného ^3He

- rozsah 319 mK - 2.5 mK
- tlak tání se mění od 2.9 do 3.4 MPa



15

[15] J.Jelínek, Z. Málek: Kryogenní technika, SNTL, Praha, 1982

Osmotický tlak mezi ^4He a $^3He + ^4He$

- porézní materiál odděluje supratekuté ^4He a 0.1% $^3He + ^4He$
- vznikne rozdíl tlaků - závisí teplotě
- rozsah 10 - 700 mK prakticky lineární
- diferenciální manometr, nezávislý na mag. poli

Polarizační jev v Mossbauerově spektroskopii

- primární teploměr
- radioaktivní materiál
- obsazeni hladin je závislé na teplotě
- ohřev vzorku

Anizotropie γ záření

- 2 - 20 mK
- radioaktivní materiál - ^{54}Mn a ^{60}Co
- obsazení hladin je závislé na teplotě
- ohřev vzorku

Magnetické teploměry

- závislost magnetické susceptibility na teplotě pro paramagnetické látky
- dusičnan ceritohořečnatý, dusičnan ceritolantanohořečnatý
- Squid
- teploty i pod 1 mK

$$\chi = \frac{C}{T}$$

Statická jaderná susceptibilita

- Cu 99.9999 %
- Squid
- μK oblast

Jaderné magnetické rezonance NMR

- dynamická susceptibilita nepřímo úměrná teplotě
- vzorek v mag.poli 10^{-2} T
- kolmo působí vf mag. pole
- pulzní provoz
- Cu, Pt, Al
- μK oblast