



9. TEPLOTNÍ SENZORY

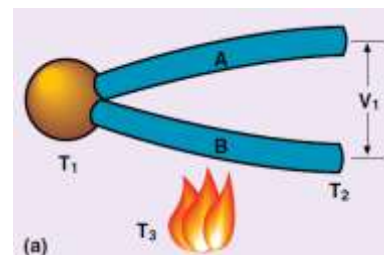
Přednášející:

prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.

husak@fel.cvut.cz

<http://micro.feld.cvut.cz>

tel.: 2 2435 2267



Cvičící:

Ing. Adam Bouřa, Ph.D.

Ing. Alexandr Laposa, Ph.D.

Ing. Tomáš Teplý



Teplotní senzory – Jednotky

Jednotky : k měření teploty se používají různé jednotky

°C – stupeň Celsia v Evropě zaveden mezinárodní smlouvou v r. 1948

K – Kelvin

°F – stupeň Fahrenheita – USA, GB

°R – stupeň Réaumurova, používal se před zavedením °C

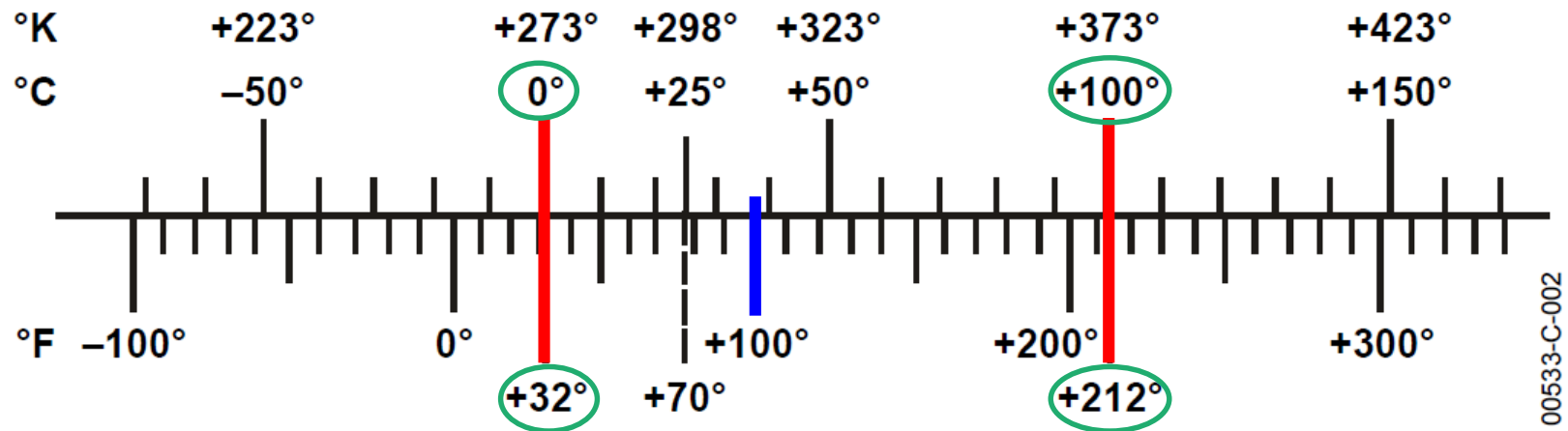
°Rank – stupeň Rankina, USA, GB

Převodní tabulka

	Fahrenheit	Celsius	Kelvin	Reaumur	Rankine
Celsius	$F = 32 + \frac{9}{5}C$	-	$K = 273,15 + C$	$Re = \frac{4}{5}C$	$Ra = 32 + \frac{9}{5}C + 459,67$
Fahrenheit	-	$C = \frac{5}{9}(F - 32)$	$K = \frac{5}{9}(F - 32) + 273,15$	$Re = \frac{4}{9}(F - 32)$	$Ra = F + 459,67$



Teplovní senzory – Převody



$$^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9} (^{\circ}\text{F} - 32) \quad \text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273.15$$

$$^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5} (^{\circ}\text{C} + 32) \quad ^{\circ}\text{R} = ^{\circ}\text{F} + 459.7$$



Teplotní senzory – Rozdělení

Podle fyzikálního principu

- ☐ odporové kovové, polovodičové
- ☐ polovodičové s p-n přechodem
 - dioda (Si, Ge, GaAs, varikap, ZD)
 - tranzistor (bipolární, unipolární)
 - kovové, polovodičové
- ☐ termoelektrické
- ☐ optické
- ☐ dilatační
- ☐ krystalové, radiační, chemické, šumové, akustické, magnetické, kapacitní, aerodynamické, SAW

Podle transformace signálu

- ☐ aktivní
- ☐ pasivní



Teplotní senzory – Rozdělení

Podle styku s měřeným prostředím

- ☐ dotykové
- ☐ bezdotykové

Dotykové – dilatační

- kapalinové
- plynové
- bimetalové

Dotykové – speciální

- akustické (ultrazvukové)
- magnetické
- s tekutými krystaly
- teploměrné barvy
- šumové

Bezdotykové

- tepelné (bolometry, pyrometry)
- kvantové



Teplotní senzory – Statické vlastnosti

Statická charakteristika

- v ideálním případě přímka, reálná charakteristika popsána polynomem

Citlivost

Práh citlivosti

Dynamický rozsah

- Interval přípustných hodnot snímané veličiny

Reprodukovatelnost

Rozlišitelnost



Množství tepla v tělese

$$Q = mcT$$

m – hmotnost,
 c – měrná tepelná kapacita,
 T - teplota

Rychlost průtoku tepla tělesem

$$\frac{dQ}{dT} \quad \frac{dT}{dx} \quad \frac{dQ}{dT} = -kS \cdot \frac{dT}{dx}$$

S - průřez

Teplotní gradient (tepelná vodivost)

Tepelný odpor:

$$R_T = \frac{1}{k} \cdot \frac{l}{S}$$

? Napište definice pro: Množství tepla v tělese, Rychlost průtoku tepla tělesem, Teplotní gradient (tepelná vodivost)



Tepl. senzory – Ekvivalence tepelných a elektrických veličin

System	Proměnná	Prvky	Dynamické	Statické
Elektrický	I, U	R, L, C	$q = C/U$	$U = IR$
Tepelný	Q, T	R_T, c	$Q = c/T$	$T = QR_T$



Teplotní senzory odporové kovové (RTD)



RTD (Resistance Temperature Device or detector)

- materiál:** především čisté kovy (Pt, Ni, Cu ...)

Wolfram (vysoce lineární)

Měď (menší teplotní rozsahy)

Nikl (nižší teploty, nízká cena, nelineární), $-60^{\circ}\text{C} \div 120^{\circ}\text{C}$

Platina (vysoká cena, lineární, nejběžnější, $-260^{\circ}\text{C} \div 630^{\circ}\text{C}$)

slitiny Ni (nižší teploty, nízká cena)

slitiny Ag, Au do 120°C

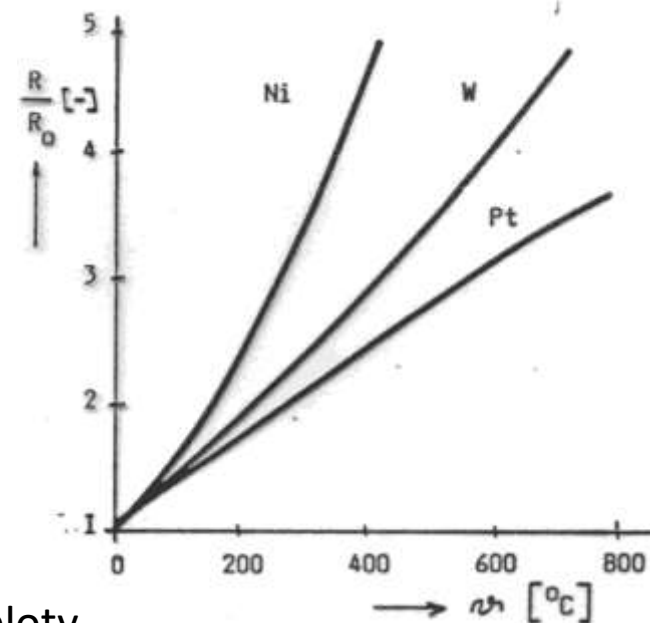
- závislost $R=f(\vartheta)$** není lineární, ale v praxi většinou se odporové senzory považují za lineární

$$R = R_0 \left(1 + \alpha \vartheta + \beta \vartheta^2 + \gamma (\vartheta - 100) \vartheta^3 \right)$$

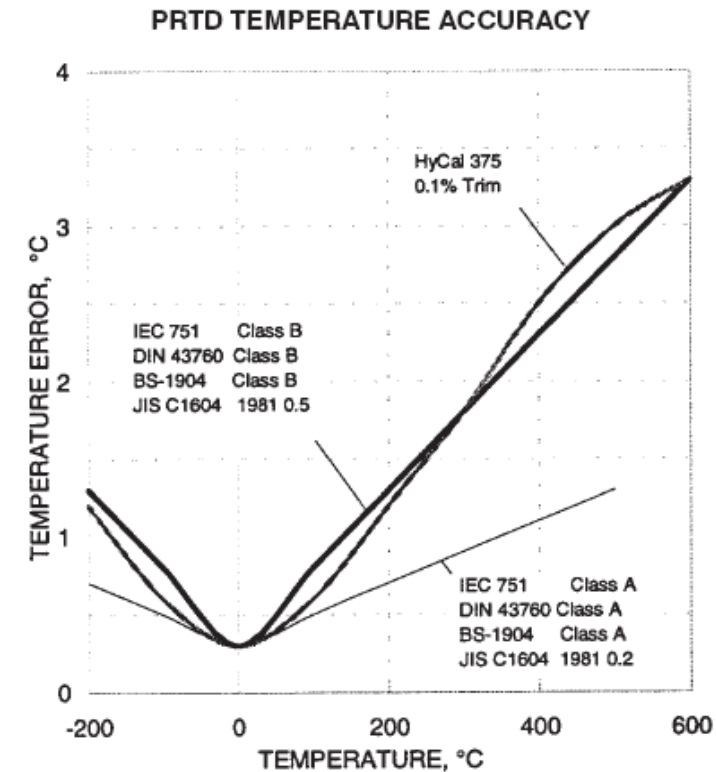
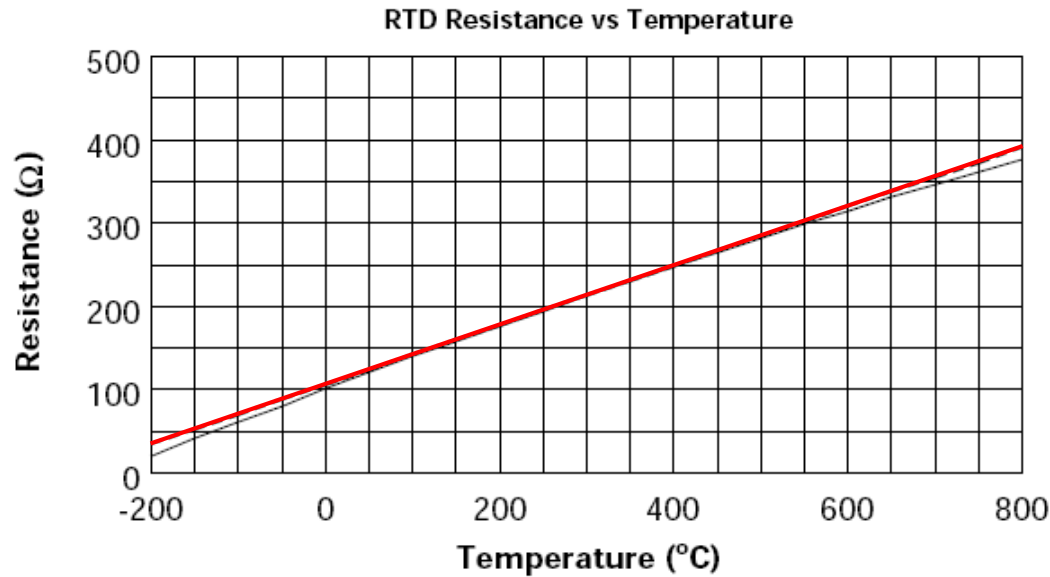
Pro malé rozsahy teplot se rovnice zjednodušuje

Poznámka: RTD patří k nejčastějším typům pro měření teploty

? Odporové kovové teplotní senzory (RTD):
Uveďte alespoň 2 typické materiály pro teplotní senzory, uveďte typický teplotní rozsah, napište základní rovnici pro aproximaci průběhu odporu v malém rozmezí teplot ($0 - 100^{\circ}\text{C}$).



Tepl. senzory – Odporové kovové (RTD)



Tepl. senzory – Odporové kovové (RTD)

INTERNATIONAL STANDARDS

Standard	Comment	
IEC 751	Defines Class A and B performance for 100 Ω 0.00385 alpha Pt RTDs.	
DIN 43760	Matches IEC 751.	
BS-1904	Matches IEC 751.	
JIS C1604	Matches IEC 751. Adds 0.003916 alpha.	
ITS-90	Defines temperature scale and transfer standard.	
Parameter	IEC 751 Class A	IEC 751 Class B
R_0	100 $\Omega \pm 0.06\%$	100 $\Omega \pm 0.12\%$
Alpha, α	.00385 \pm .000063	.00385 \pm .000063
Range	-200°C to 650°C	-200°C to 850°C
Res., R_T^*	$\pm (.06 + .0008 T - 2E-7T^2)$	$\pm (.12 + .0019 T - 6E-7T^2)$
Temp, T^{**}	$\pm (0.3 + 0.002 T)^\circ\text{C}$	$\pm (0.3 + 0.005 T)^\circ\text{C}$

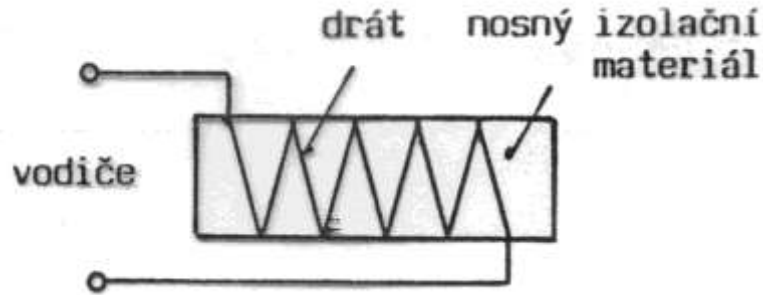
*Units are Ω s. Values apply to 100 Ω Pt RTDs only. Scale by ratio of the R_0 s to apply to other ice point resistances.

*Applies to all 0.00385 alpha Pt RTDs independent of ice point, R_0 .

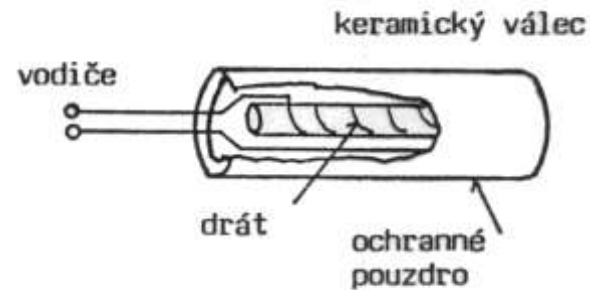


Tepl. senzory – Odporové kovové (RTD)

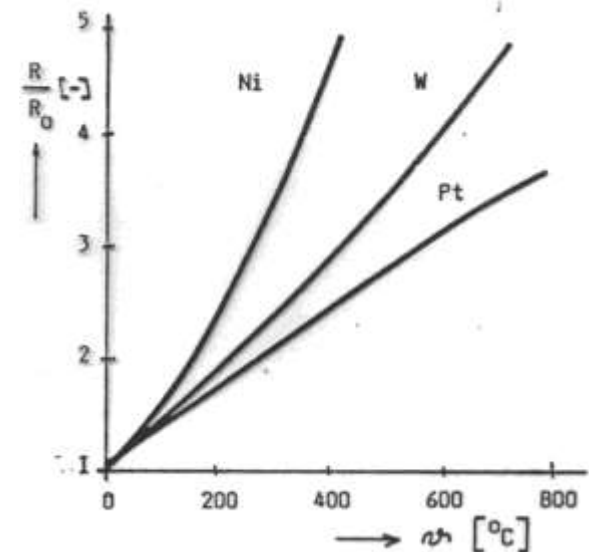
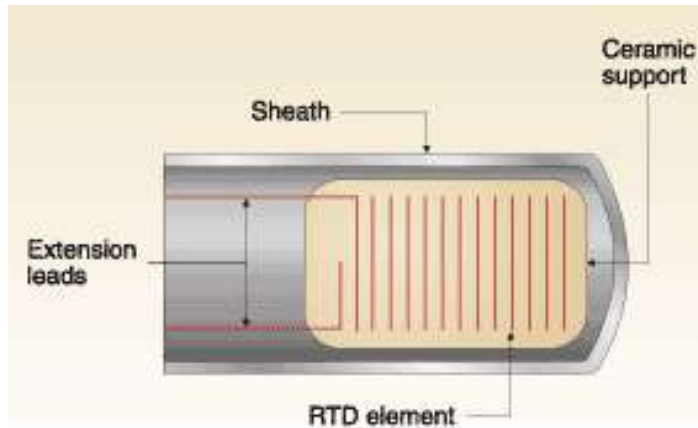
spirálové vinutí



vinutí v keramickém pouzdře



tenká odporová vrstva



Tepl. senzory – Odporové kovové (RTD)

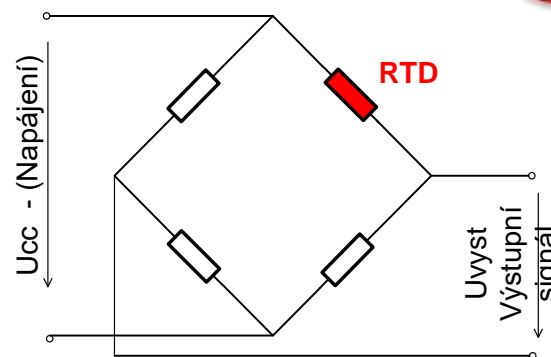


Tepl. senzory – Vyhodnocování signálu z (RTD)

Princip: Změnou teploty se mění odpor senzoru \Rightarrow převedení změny na jinou elektricky měřitelnou veličinu ($R \rightarrow U, I, f$, střída, atd...)

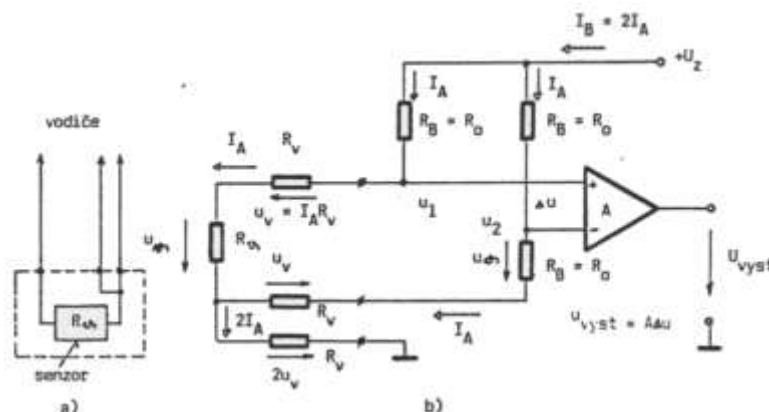
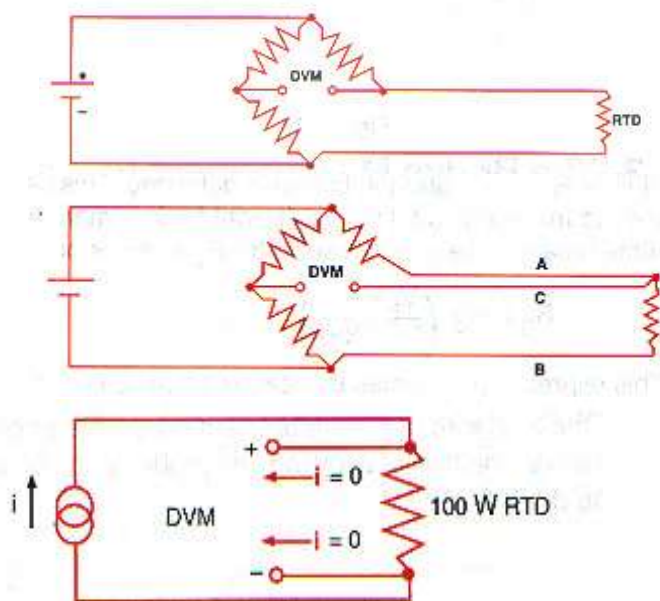
Nejčastěji se používají můstková zapojení

Kompence odporu vedení - dvou-, tří-, čtyř- vodičového zapojení



Wheatstoneův můstek – typický vyhodnocovací obvod

? Vyhodnocování signálu z odporových kovových teplotních senzorů (RTD): Nakreslete zjednodušeně obvodové zapojení pro vyhodnocování teploty.

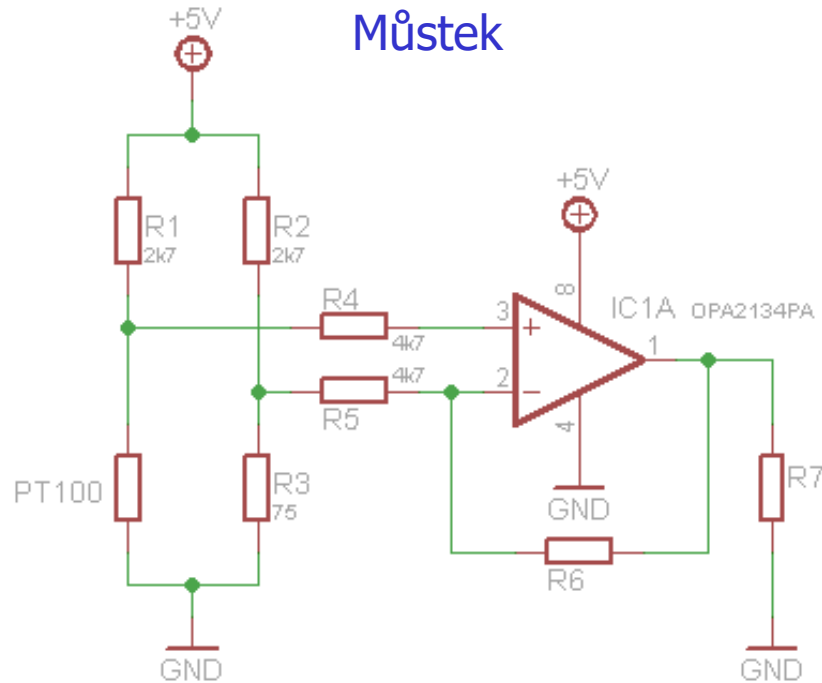


Příklad třívodičového kompenzačního zapojení

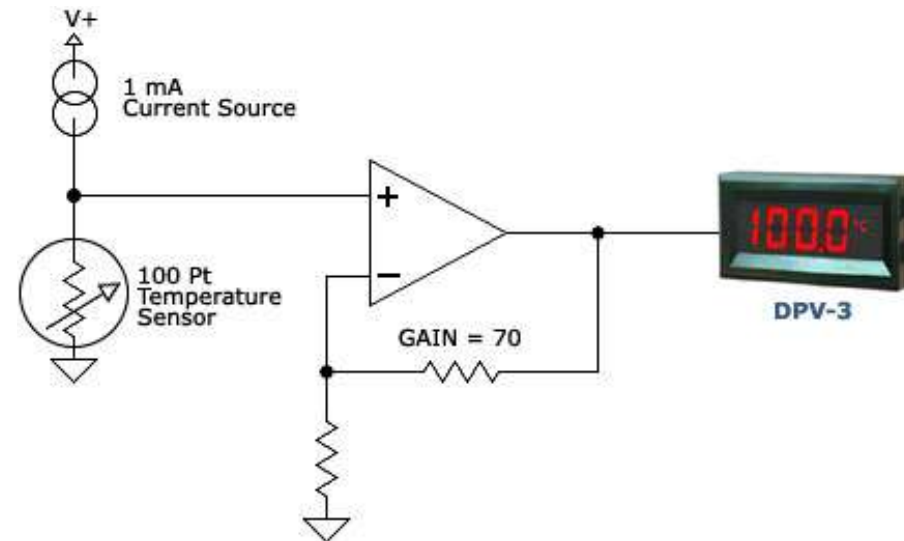


Tepl. senzory – Vyhodnocování signálu z (RTD) s OZ

Můstek



Proudový zdroj



Tepl. senzory RTD - shrnutí

- malý odpor - $100\ \Omega$ (nejběžnější) až $1000\ \Omega$
- široký rozsah pracovních teplot ($-200\ ^\circ\text{C}$ to $850\ ^\circ\text{C}$)
- dobrá citlivost (v porovnání s termočlánky)
- velká přesnost ($\pm 0,0006\ ^\circ\text{C}$ až $0,1\ ^\circ\text{C}$)
- opakovatelnost a stabilita
- malý drift ($0,0025\ ^\circ\text{C}/\text{rok}$), průmyslové modely - drift $< 0,1\ ^\circ\text{C}/\text{rok}$



Odporové polovodičové teplotní senzory



Typy termistorů

PTC (pozistory)

NTC (negistory)

Teplotní závislost odporu

$$R = Ae^{-\frac{B}{T}}$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \exp B \left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right)$$

B – materiálová teplotní konstanta

A – zahrnuje geometrický tvar materiálu (udává výrobce ze dvou hodnot R_1 pro ϑ_1 , R_2 pro ϑ_2)

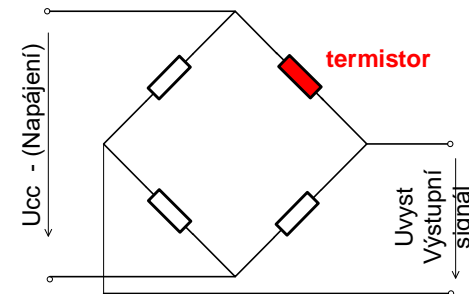
Teplotní koeficient odporu

$$\Delta R = R_0 \alpha \Delta T \Rightarrow \alpha = -\frac{B}{T^2}$$

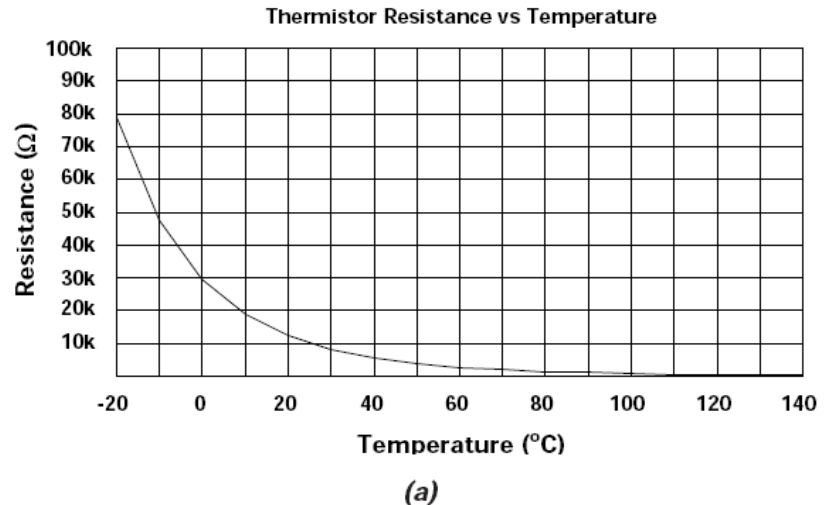
Vyhodnocování informace o změně teploty

Wheatstoneův můstek

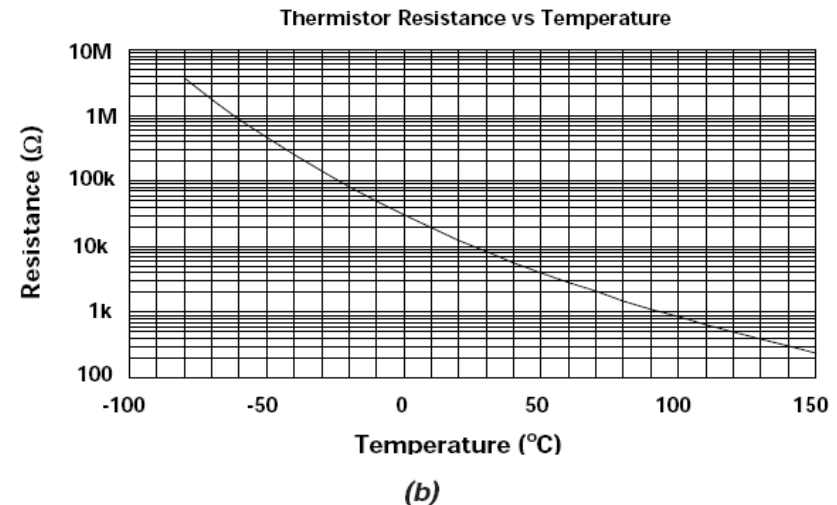
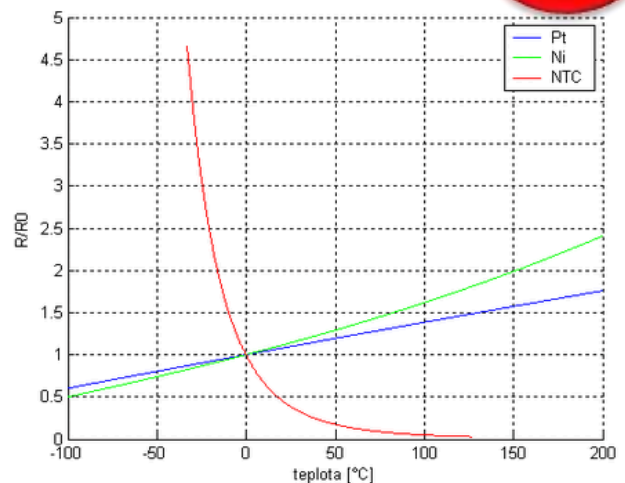
? Odporové polovodičové teplotní senzory s termistory:
Napište rozdíl mezi termistory NTC, PTC, nakreslete typické převodní charakteristiky, Nakreslete zjednodušené obvodové zapojení pro vyhodnocování teploty.



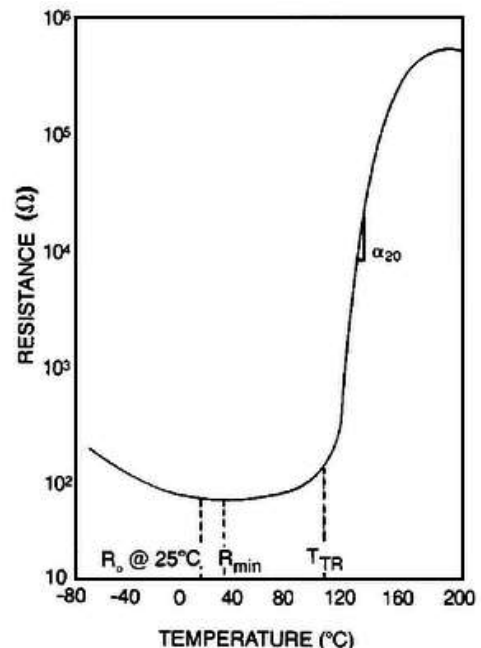
Odporové polovodičové teplotní senzory



NTC



PTC

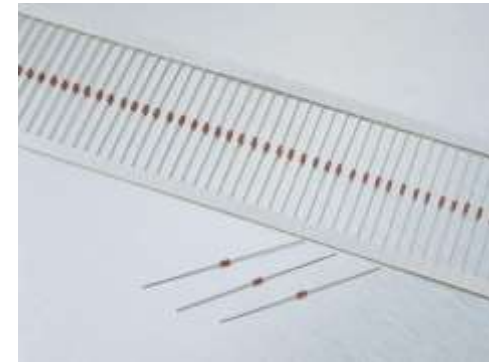
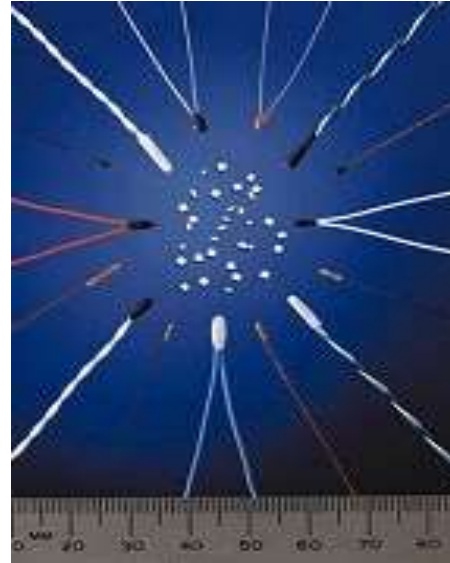


? Odporové polovodičové teplotní senzory s termistiry: Napište rozdíl mezi termistiry NTC, PTC, nakreslete typické převodní charakteristiky, Nakreslete zjednodušené obvodové zapojení pro vyhodnocování teploty.



Odporové polovodičové teplotní senzory

- Velký odpor 1 k Ω to 100 k Ω
 - Eliminuje vliv odporu přívodních vodičů
- Nelineární závislost na teplotě.
 - zejména NTC \rightarrow nutnost linearizace
- Malé rozměry
 - Rychlé časové odezvy
- Levnější než RTD
- Vysoká citlivost a rozlišení
 - Více než 1000 citlivější než RTD
- Necitlivé na vibrace a rázy



Odporové polovodičové teplotní senzory - monokrystalické

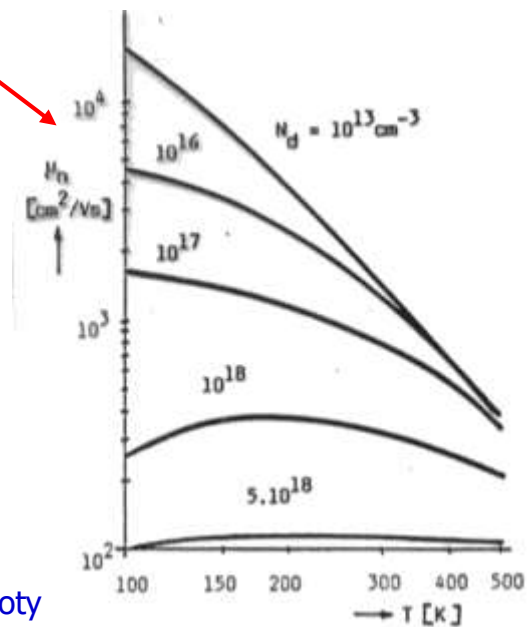
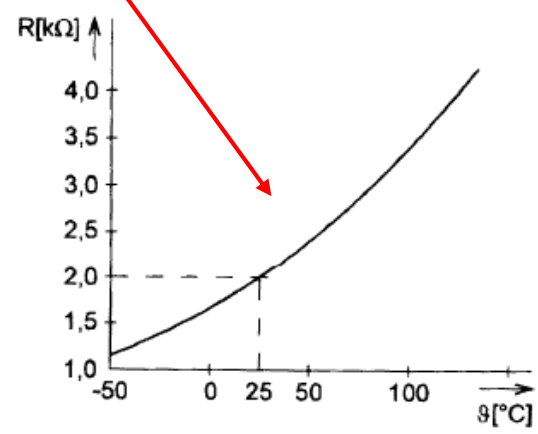
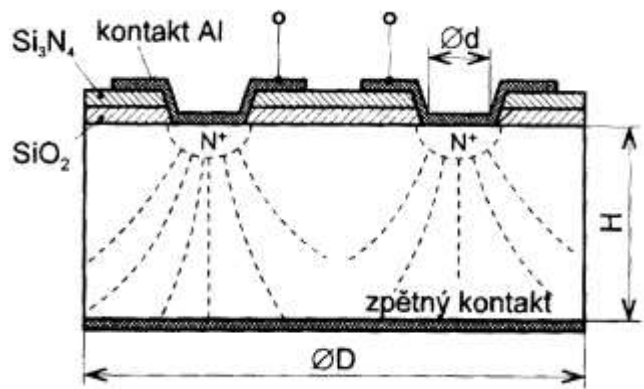
Zkouška

Polovodičový monokrystalický Si senzor (senzor s odporem šíření)

Princip – odpor šíření se uplatňuje v místě styku kovového hrotu s polovodičem. Odpor závisí a rezistivitě ρ a poloměru kontaktu r . Využívá se **kladný** teplotní součinitel (pro Si od $-50 \div 150^{\circ}\text{C}$). S rostoucí teplotou **klesá pohyblivost** volných nosičů náboje.

? Odporové polovodičové teplotní senzory monokrystalické :
Nakreslete a vysvětlete základní principy činnosti.

Symetrické uspořádání senzoru umožňuje využití tzv. odporu šíření v prostoru kruhového kontaktu. V daném prostoru dochází k výrazné nehomogenitě intenzity elektrického pole a tedy i ke vzniku velké hustoty proudu.



Uspořádání monokrystalického Si senzoru teploty Převodní charakteristika Si senzoru teploty



Odporové polovodičové teplotní senzory - monokrystalické

Odpor je dán vztahem:

$$R = \frac{\rho}{\beta D}$$

kde ρ [$\Omega \text{ m}$] je rezistivita,
 D [m] průměr kontaktu,
 β faktor daný geometrií struktury ($\beta < 4$).

Teplotní závislost lze aproximovat vztahem (Obr.6):

$$R = R_r + k(\vartheta - \vartheta_r)^2$$

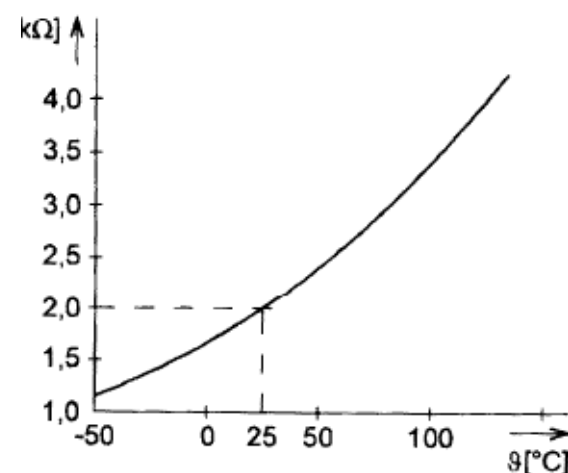
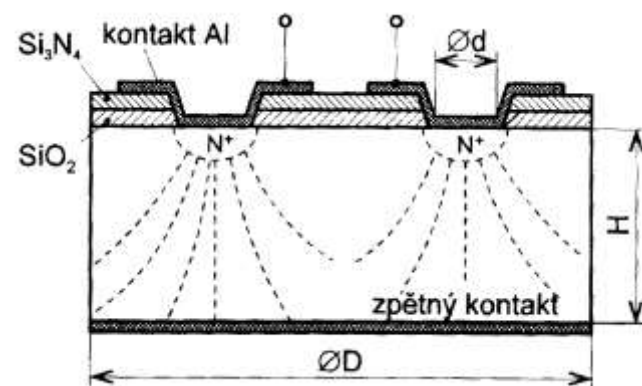
Typické hodnoty monokrystalického senzoru:

$$\vartheta_r = -241,52 \text{ }^\circ\text{C} ,$$

$$R_r = 16 \text{ } \Omega ,$$

$$k = 2,7931 \cdot 10^{-2} \text{ } \Omega \text{ K}^{-2} .$$

Běžné hodnoty odporu při teplotě 25 $^\circ\text{C}$ jsou 1 k Ω a 2 k Ω .



Odporové polovodičové teplotní senzory - monokrystalické

Monokrystalické senzory

Polovodičové monokrystalické senzory teploty lze vyrobit z křemíku, germania nebo india, v praxi se však setkáváme pouze se senzory křemíkovými.

Monokrystalické Si senzory

Pro výrobu křemíkových senzorů se používá nevlastního polovodiče typu N, tedy s dominantní elektronovou vodivostí. Pohyblivost volných nosičů náboje v krystalové mřížce křemíku závisí na teplotě a na počtu příměsí v jednotce objemu. S rostoucí teplotou dochází vlivem rozptylu nosičů náboje na mřížce polovodiče ke zmenšování pohyblivosti těchto nosičů, v důsledku čehož narůstá rezistivita, podobně jako je tomu u kovů. Monokrystalické Si senzory teploty tedy mají kladný teplotní součinitel odporu podobně jako PTC termistory, princip jejich vodivosti je však odlišný. Křemíkové senzory se obvykle používají pro rozsah teplot -50 až 150 °C.

Základní vlastnosti monokrystalických Si senzorů:

Teplotní součinitel odporu je téměř konstantní v celém rozsahu teplot a jeho střední hodnota se pohybuje kolem 0,01 K⁻¹ (platinové senzory: 0,004 K⁻¹, NTC: cca -0,03 až -0,06 K⁻¹).

Dlouhodobá stabilita. Teplotní drift kolem 0,2 K po 10000 hodinách nepřetržitého provozu při maximální provozní teplotě.

Linearita je lepší než u NTC termistorů, ale horší než u platinových senzorů, nelinearitu lze však vhodnými metodami úspěšně korigovat.

Teplotní rozsah je obvykle -55 až 150 °C, k dostání jsou však běžně i senzory s horní teplotní hranicí 300 °C.

Referenční hodnota odporu při teplotě 25 °C je obvykle 1000 nebo 2000 Ω.

Monokrystalické křemíkové senzory jsou běžně k dostání, a to za přijatelnou cenu, která se pohybuje kolem dvaceti až třiceti korun. V řadě aplikací mohou díky svým vlastnostem nahradit platinová čidla, je však nutno počítat s linearizačními obvody. Typickými představiteli křemíkových monokrystalických senzorů jsou čidla řady **KT** a **KTY**. Na následujícím obrázku je vyobrazena závislost odporu na teplotě senzorů KTY81-1 a KTY83 (KTY85).

Závislost odporu senzorů KTY83/85 na teplotě lze aproximovat vztahem

$$R_T = R_{ref} \left[1 + A \cdot (T - T_{ref}) + B \cdot (T - T_{ref})^2 \right],$$

kde $A = 7,635 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, $B = 1,731 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-2}$, $T_{ref} = 25 \text{ °C}$. Senzor KTY85 se od senzoru KTY83 liší teplotním rozsahem a typem pouzdra.

Pro senzory KTY81/82/84 platí následující aproximační vztah:

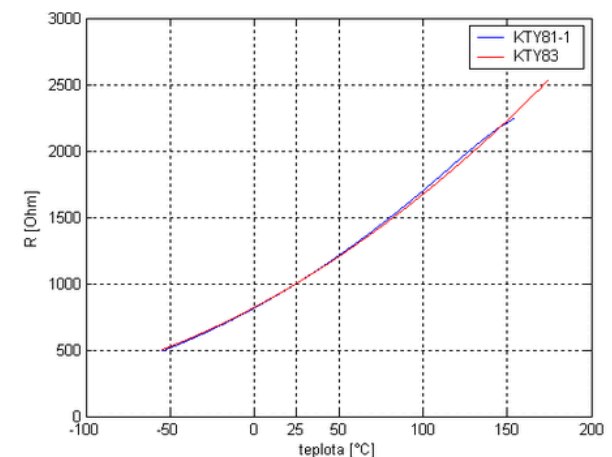
$$R_T = R_{ref} \left[1 + A \cdot (T - T_{ref}) + B \cdot (T - T_{ref})^2 - C \cdot (T - T_i)^D \right],$$

přičemž pro senzor KTY81-1 nabývají uvedené konstanty následujících hodnot:

$A = 7,874 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, $B = 1,874 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-2}$, $C = 3,42 \cdot 10^{-8} \text{ K}^{-D}$ (pro $T < T_i$ je $C=0$), $D=3,7$,

$T_i = 100 \text{ °C}$ a $T_{ref} = 25 \text{ °C}$.

R_{ref} je referenční hodnota odporu při teplotě T_{ref} a u všech tří zmíněných senzorů



Monokrystalické Si senzory jsou díky dlouhodobé stabilitě a nepříliš velké nelinearitě vhodné k

Tenkvrstvé odporové polovodičové teplotní senzory

■ Tenkovrstvový Pt senzor

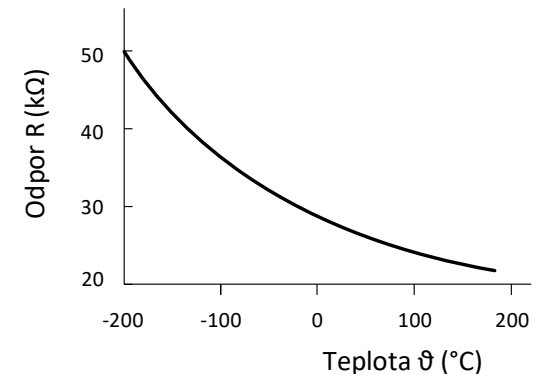
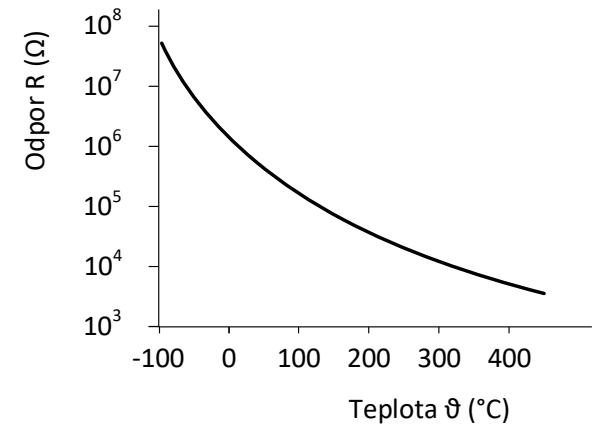
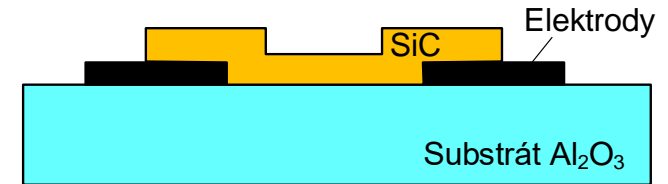
- Lineární charakteristika
- Citlivost $0,44\Omega K^{-1}$
- Výroba – naprašováním na skleněnou podložku

■ Tenkovrstvový SiC senzor

- Stabilní, přesné, nelineární, nenavlhá
- $-100 \div 450^{\circ}C$
- α kladný $5 \times 10^{-3} K^{-1}$
- $R=10k\Omega$ až $1M\Omega$

■ Tenkovrstvé polykrystalické senzory

- Levné, malé rozměry, vysoká reprodukovatelnost
- $-170 \div 450^{\circ}C$
- Časová odezva $\Delta\vartheta=75^{\circ}C \rightarrow \Delta t=60 \div 100ms$



Teplotní senzory s pn přechodem



Teplotní senzory s přechodem pn

Pro měření lze využít všech diod (Si, Ge, GaAs) charakteristika je mírně nelineární.

Varikapy – nejlepší, stálé parametry

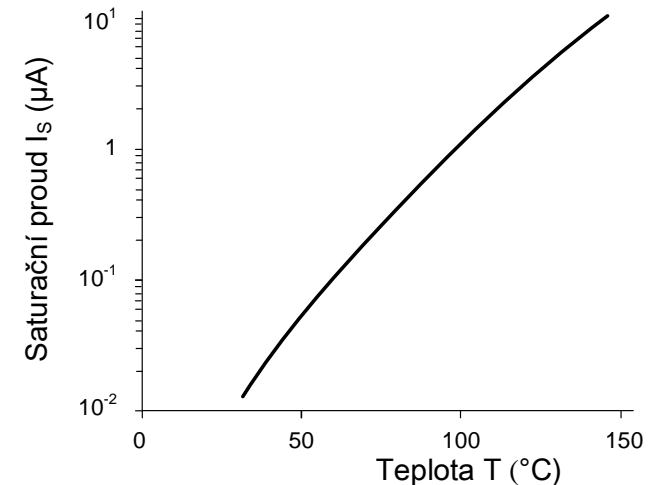
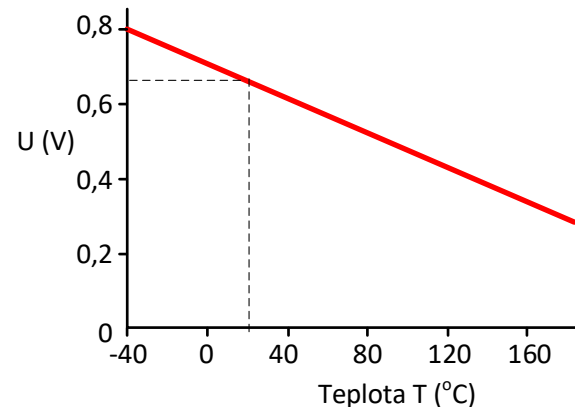
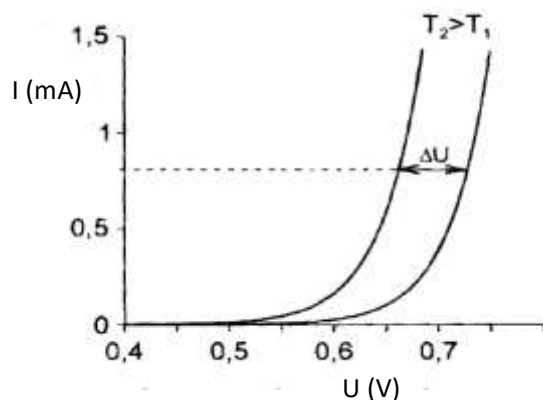
Proud diodou

$$I = I_S \left(e^{\left(\frac{nU}{kT} \right)} - 1 \right) \Rightarrow U \doteq \frac{kT}{q} \ln \frac{I}{I_S}$$

n – parametr, rekombinační koeficient

I_S – saturační proud

U, I – napětí a proud na pn v propustném směru



? Teplotní senzory s p-n přechodem: Napište základní rovnici popisující proud přechodem (Shockley rovnice), Napište nebo odvoďte rovnici pro teplotní závislost napětí na přechodu p-n na teplotě, Nakreslete teplotní závislost saturačního proudu $I_S = f(\text{teplota})$.

$\Rightarrow U = \text{konst} \cdot T$ pokud $I_S = \text{konst.}$, v reálu ale $I_S = f(T) \Rightarrow U \neq \text{konst} \cdot T$ -

charakteristika je obecně nelineární



Citlivost – lze odvodit, že platí

$$\beta = \frac{dU}{dT} = \frac{k}{nq} \ln \frac{I}{I_s}$$

? Citlivost teplotních senzorů s p-n přechodem: Napište princip odvození citlivosti p-n přechodu, Napište typickou číselnou hodnotu citlivosti.

Příklad

pro běžné Si je $I_s = 10^{-10}$ A a $I = 10^{-4}$ A

je **$\beta = -2,1 \text{ mV.K}^{-1}$**

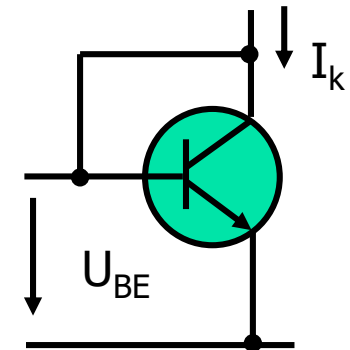
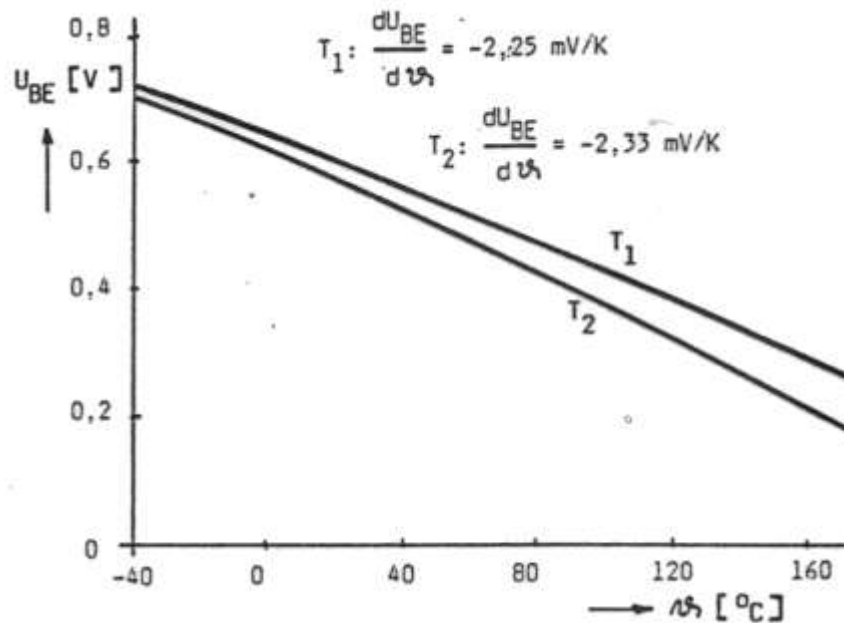
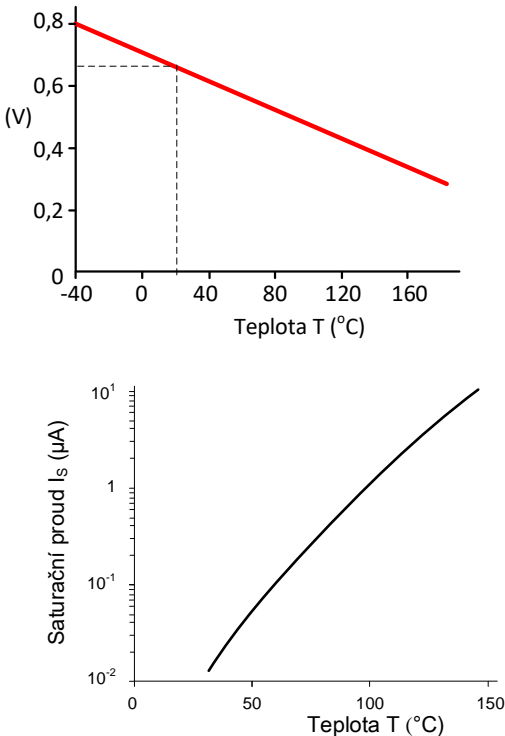
Proud I je vhodné volit jako kompromisní hodnotu s ohledem na

- Vznik nelinearit vlastním ohřevem
- Na velikost napětí na diodě

Teplotní senzory s přechodem pn - charakteristiky

Dioda nebo tranzistor jako teplotní senzor

V praxi se využívá přechod U_{BE} (oproti diodě), protože má menší teplotní závislost saturačního proudu



2 tranzistory nejsou zaměnitelné – každý diskretní senzor teploty se musí navrhovat individuálně

? Teplotní senzory s p-n přechodem:
Nakreslete typický průběh teplotní závislosti napětí na přechodu p-n $U = f(\text{teplota})$ pro dva různé proudy I přechodem.

Teplotní senzory s přechodem pn – Zenerova dioda

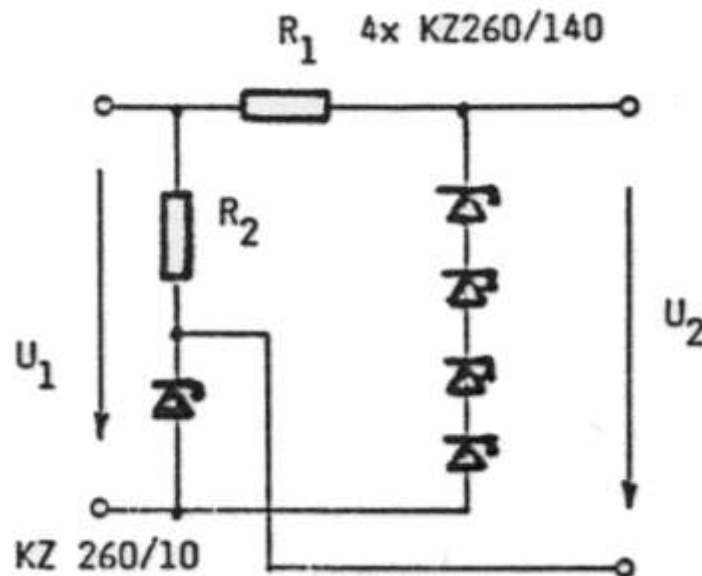
■ Zenerova dioda jako teplotní senzor

- Velká citlivost v závěrné části charakteristiky
- Zenerovo napětí je funkcí teploty

Volbou Zenerova napětí je možné měnit velikost teplotního koeficientu v širokém rozsahu (podle konstrukce a technologie 0 až 110mV/K)

Podle velikosti U_Z je teplotní koeficient **kladný** ($U_Z > 5V$)

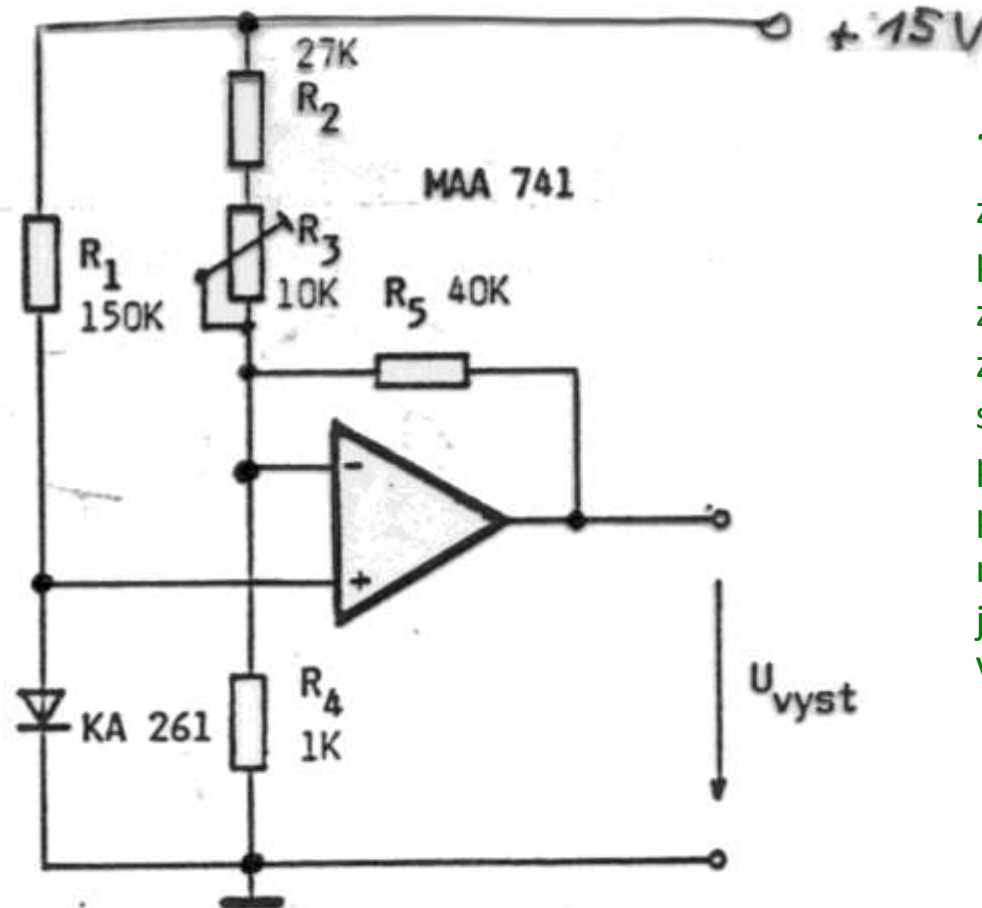
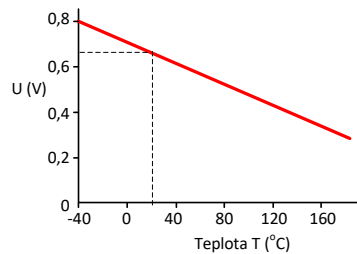
záporný ($U_Z < 5V$)



Tepl. senzory s přechodem pn – vyhodnocování signálu

Zkouška

Základní zapojení jednoduchého převodníku T/U



? Vyhodnocování informace z teplotního senzoru s p-n přechodem: Nakreslete zjednodušené základní zapojení teploměru s přechodem p-n, vysvětlete proč je nutné používat proudový zdroj pro napájení přechodu p-n, jak je tvořen proudový zdroj na Vašem obrázku.



Integrované teplotní senzory



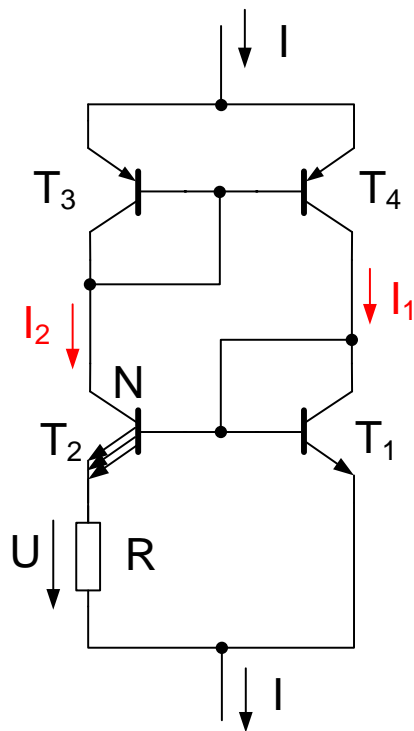
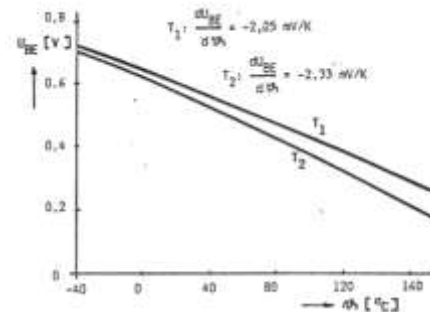
■ Význam

- Linearizace převodních charakteristik
- Snižování nákladů
- Realizace na jednom čipu
- Integrace dalších komponent (zesilovače, převodníky, filtry...)
- Možnost realizace inteligentních struktur v jednom pouzdře (regulace apod.)
- Možnost využití různých technologií

Integrované teplotní senzory - Bipolární

Jednoduchá integrovaná bipolární struktura

- Převodník $T \rightarrow I$
- Proudů tranzistorem T_2 , T_1 jsou v poměru 1:1
- T_2 je složen z N paralelních tranzistorů které mají dohromady plochu jako T_1



$$T_1: U_{BE1} = \frac{kT}{nq} \ln \left(\frac{I_1}{I_0} \right)$$

$$I_1 = I_2 = N \cdot I_{T21}$$

$$T_2: I_2 = N \cdot I_{T21}$$

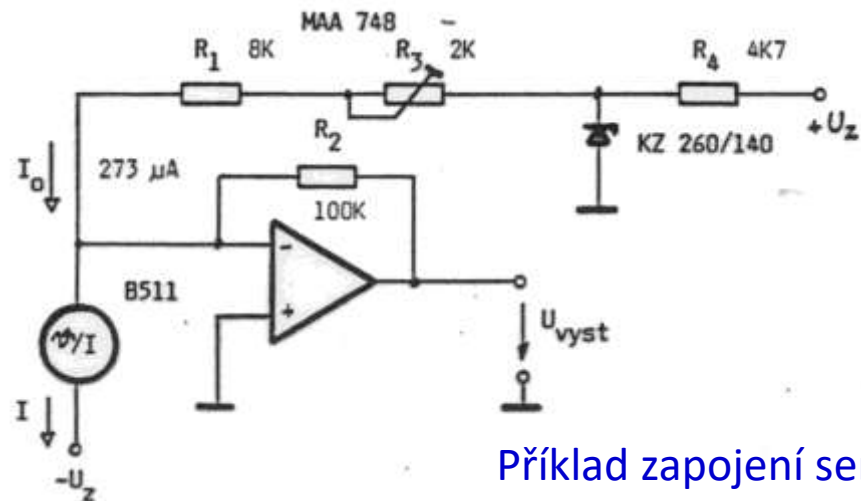
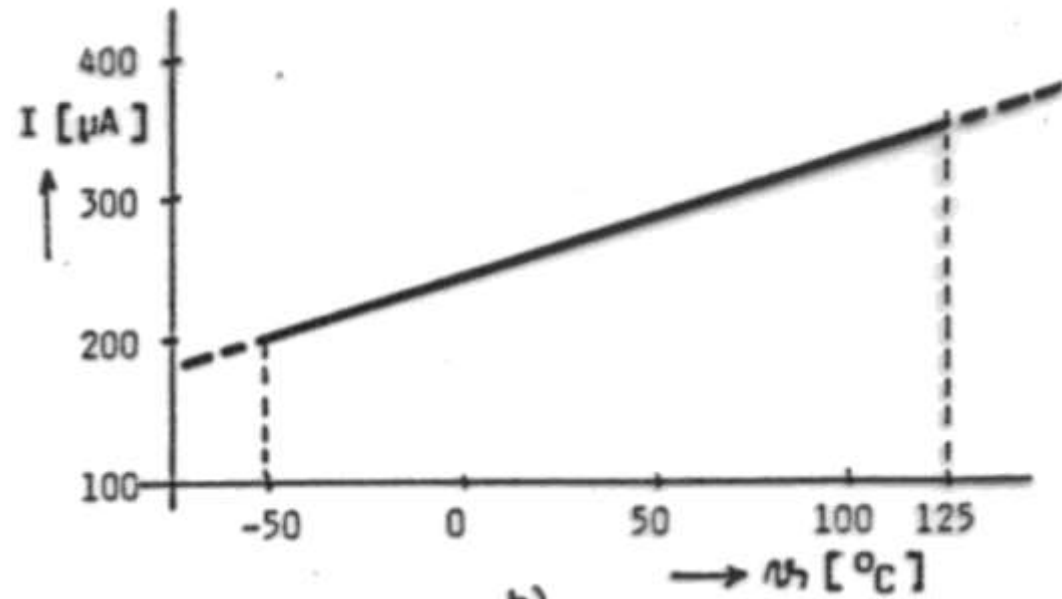
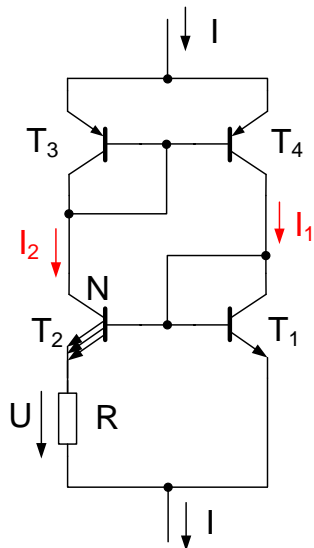
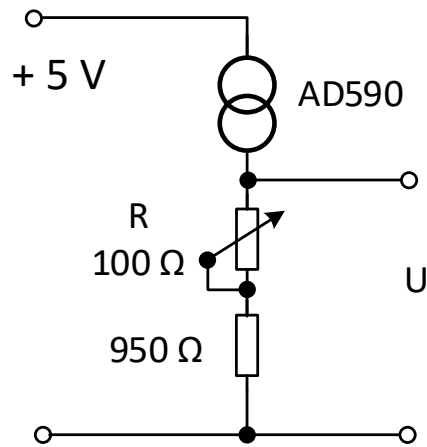
$$T_2: U_{BE2} = \frac{kT}{nq} \ln \left(\frac{I_{T21}}{I_0} \right) \Rightarrow \Delta U_{BE} = \frac{kT}{nq} \ln N$$

- Pokud $I_1=I_2$ rozdíl emitorových napětí je dán předcházející rovnicí $\Rightarrow \Delta U_{BE}=f(T)$
- Potom I_2 protékající odporem R je určen velikostí $U_{BE}=f(T) \Rightarrow I=f(T)$



Integrované tepl. senzory - Bipolární

Převodník T/I s B511, A590



Příklad zapojení senzoru



Integrované tepl. senzory – CMOS (slabá inverze)

- mají podobné chování jako bipoláry → podobné vyhodnocování
- mají velmi dobrou linearitu

I_D – při slabé inverzi

$$I_D = \frac{W}{L} I_{D0} e^{\left(\frac{qU_{GS}}{nkt}\right)} \left[e^{-\frac{qU_S}{KT}} - e^{-\frac{qU_D}{KT}} \right]$$

W, L – šířka, délka kanálu

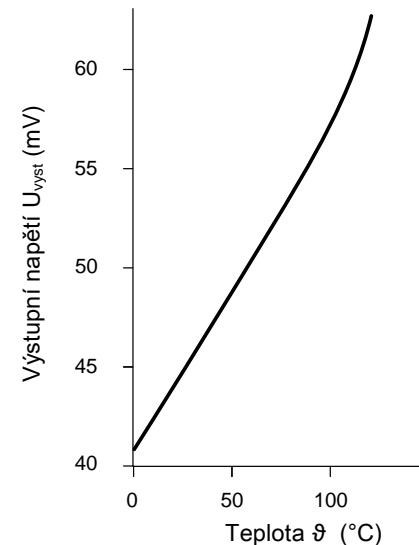
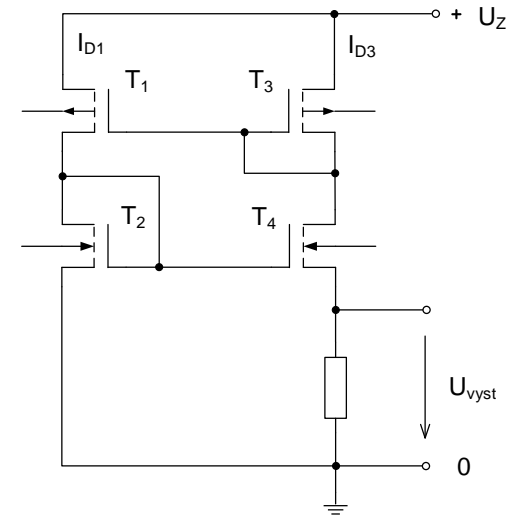
I_{D0} – charakteristický proud

$$U_{vyst} = (U_{GS2} - U_{GS4}) = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{(W/L)_1 \cdot (W/L)_4}{(W/L)_2 \cdot (W/L)_3} \right] \Rightarrow konst * T$$

Linearita – lepší než 0,1%

Teplotní koeficient – 0,162mV/K

Čip – 0,1mm²



Integrované tepl. senzory – CMOS (silná inverze)

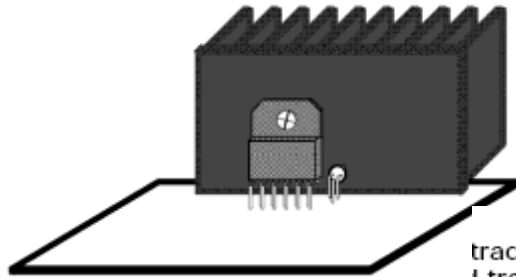
Silná závislost proudu I_D (teplotní závislost prahového napětí a pohyblivých nosičů je **nepřímo úměrná teplotě** \Rightarrow při zvyšování T se zmenšuje I_D a strmost při konstantním U_{GS})

☹ **Nevýhoda:** příliš se **nevyužívá**, je obtížné získat dobrou linearitu převodní charakteristiky



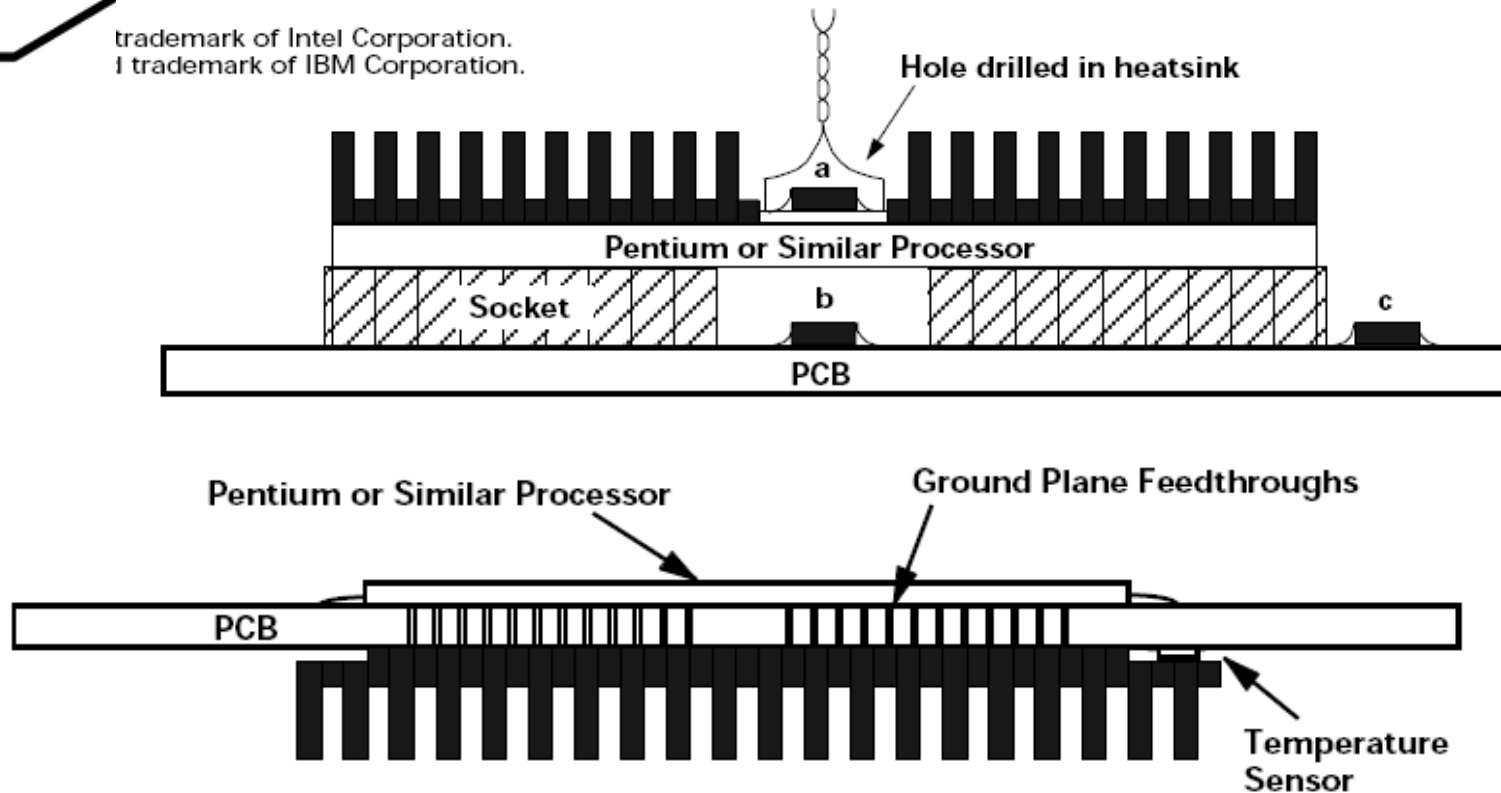
Polovodičové teplotní senzory – Aplikace

Tepelná ochrana audiotechniky



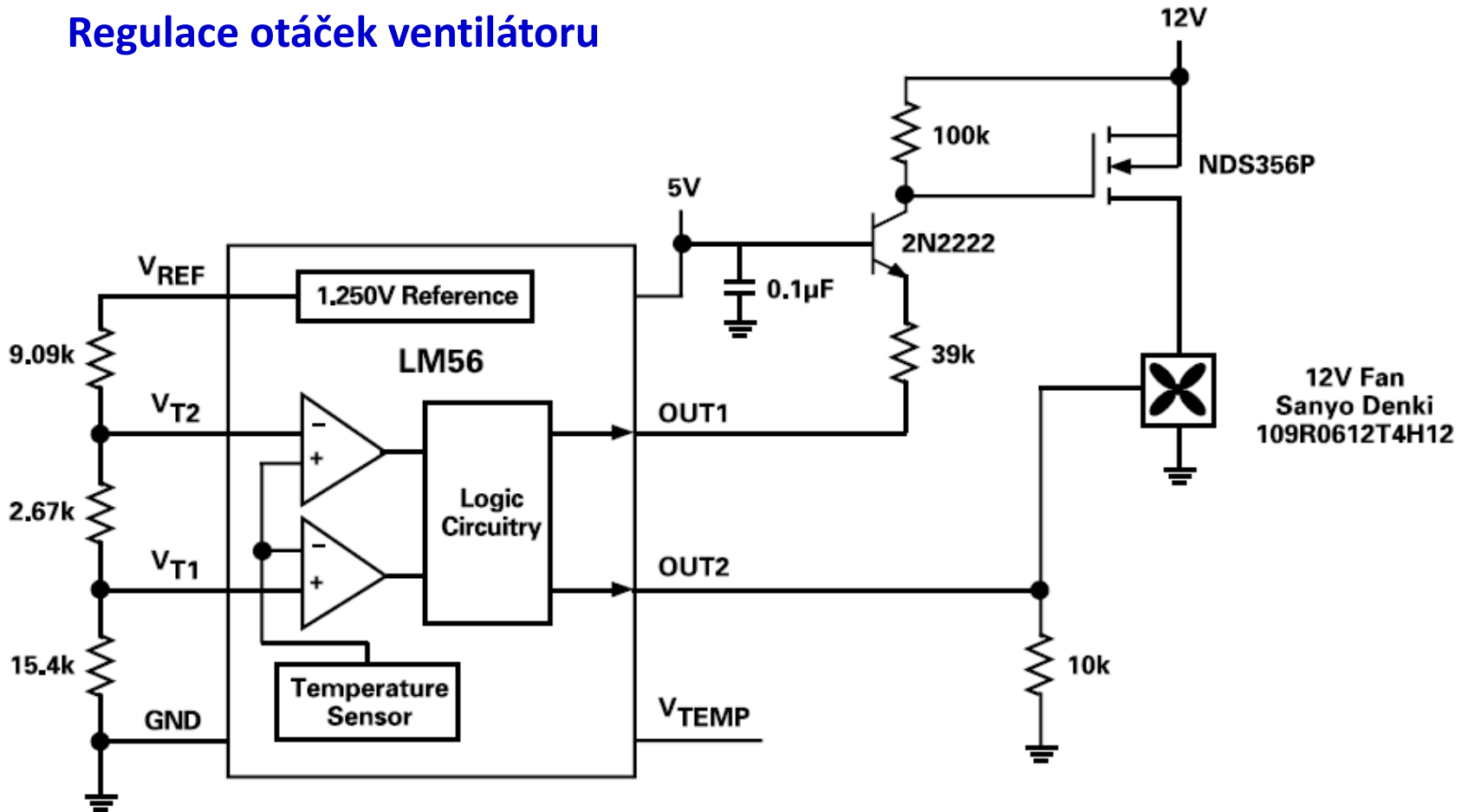
trademark of Intel Corporation.
I trademark of IBM Corporation.

Tepelné ochrany procesoru



Polovodičové teplotní senzory – Aplikace

Regulace otáček ventilátoru



Termoelektrické teplotní senzory

- kovové termočlánky
- integrované termočlánky
- termoelektrické senzory záření

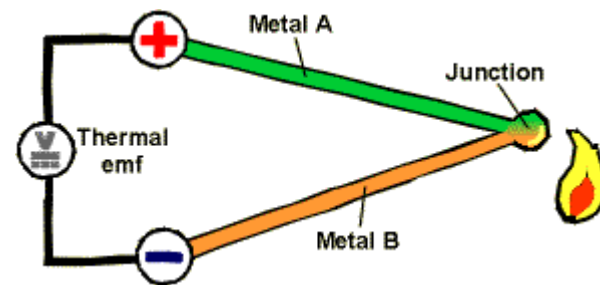
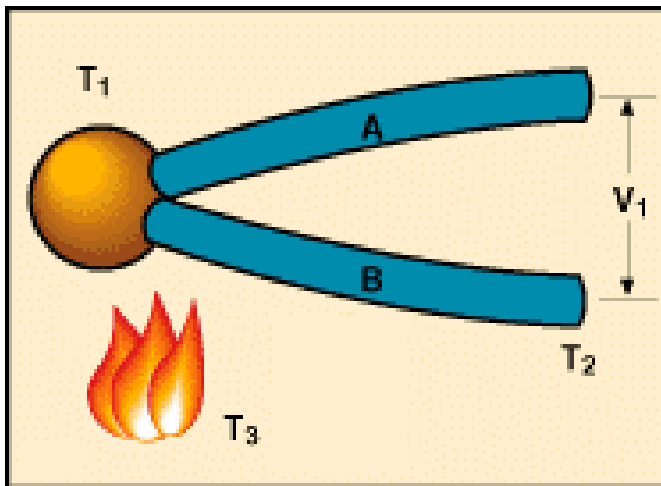


Princip:

Dva různé kovy spojené svařením, pájením nebo výjimečně mechanicky. Kovy lze nahradit polovodiči.

Seebeckův jev

jsou-li spojeny dva vodiče z různých kovů do uzavřeného obvodu a mají-li spoje různou teplotu T_1 a T_2 , protéká obvodem elektrický proud. Pokud obvod rozpojíme, na svorkách naměříme elektromotorické napětí.



? Termoelektrické teplotní senzory:
nakreslete a vysvětlete základní
princip činnosti termočlánu.

■ Výběr materiálu záleží na:

- Teplotním rozsahu
- požadované přesnosti
- Požadované chemické odolnosti
- Odolnosti vůči mechanickému opotřebení a vibracím
- Požadavky na instalaci (velikost drátu)

? Termoelektrické kovové teplotní senzory: Uveďte 3 základní typy kovových termočlánků. Uveďte typické materiály, Nakreslete 3 typické charakteristiky.

■ Chromel-Constantan (E křivka)

- Pro použití pro teploty vyšší než 870°C ve vakuu nebo inertním prostředí. Při záporných teplotách nekoroduje. Tyto termočlánky mají nejvyšší výstupní napětí ze všech standardních kovových termočlánků.

■ Platinum-Rhodium (S a R křivka)

- Mají velkou odolnost proti oxidaci a korozi
- Doporučený rozsah pracovních teplot je 1540 °C.

■ Wolfram-Rhodium (C křivka)

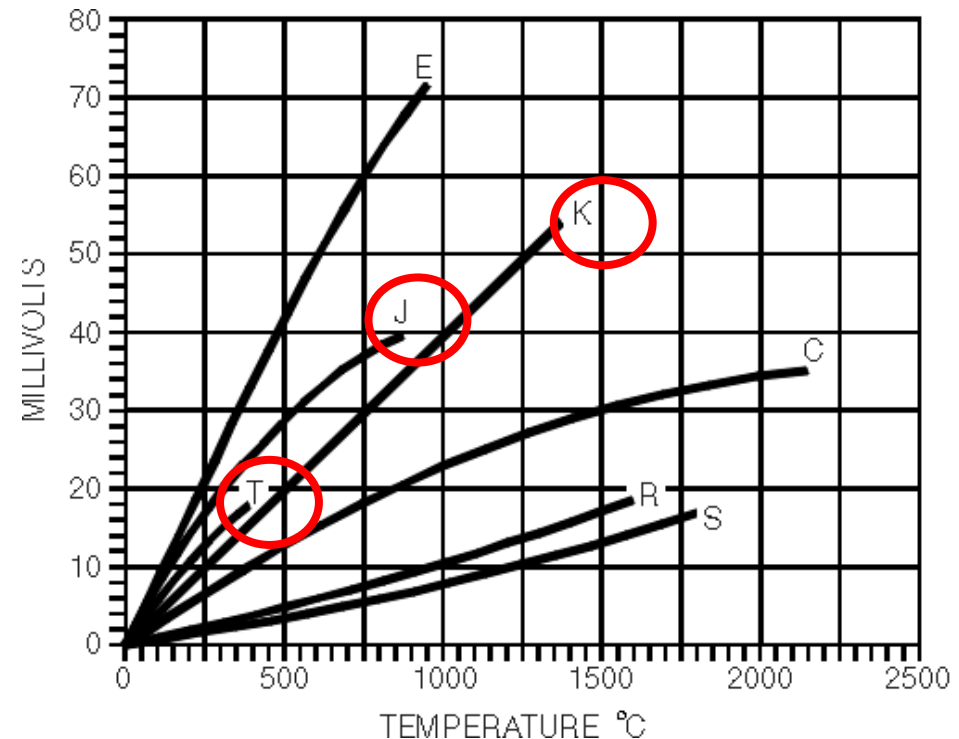
- Používají se pro měření teplot vyšších než 2760 °C.



Termoelektrické tepl. senzory – Kovové, materiály

Zkouška

Označení termočlánku	Původní označení	Měřicí rozsah [°C]
T	Cu-CuNi, Cu-ko	- 200 až 350
J	Fe-CuNi	- 200 až 750
E	NiCr-CuNi, ch-ko	- 100 až 900
K	Ni-Cr-Ni, ch-a	- 200 až 1200
N	NiCrSi-NiSi	- 200 až 1200
S	PtRh10-Pt	0 až 1600
R	PtRh13-Pt	0 až 1600
B	PtRh30-PtRh6	300 až 1700



? Termoelektrické kovové teplotní senzory: Uveďte 3 základní typy kovových termočlánků. Uveďte typické materiály, Nakreslete 3 typické charakteristiky.

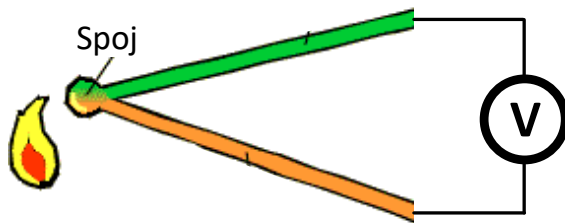


Termoelektrické tepl. senzory – vyhodnocování signálu

Zkouška

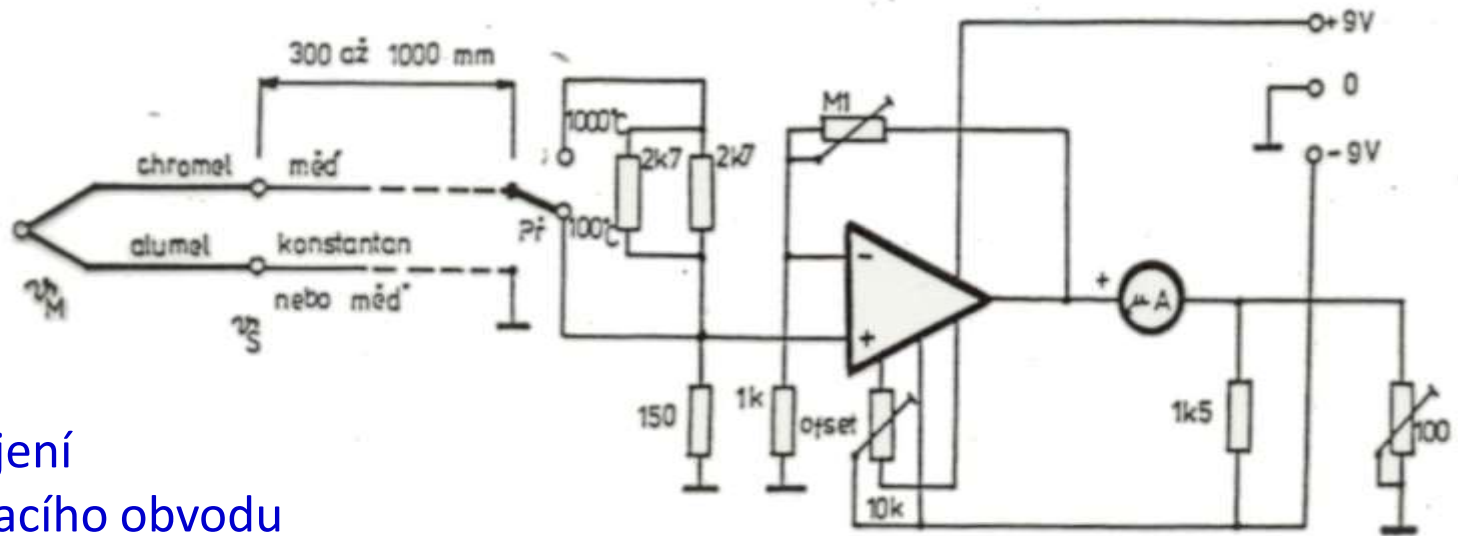
Princip:

- Měření výstupního napětí termočlánku
- Měření voltmetrem



? Termoelektrické teplotní senzory: Nakreslete zjednodušený princip elektronického zapojení pro vyhodnocování signálu z termočlánků.

Příklad zapojení vyhodnocovacího obvodu



Teploměr s termoelektrickým článkem do 1000 °C

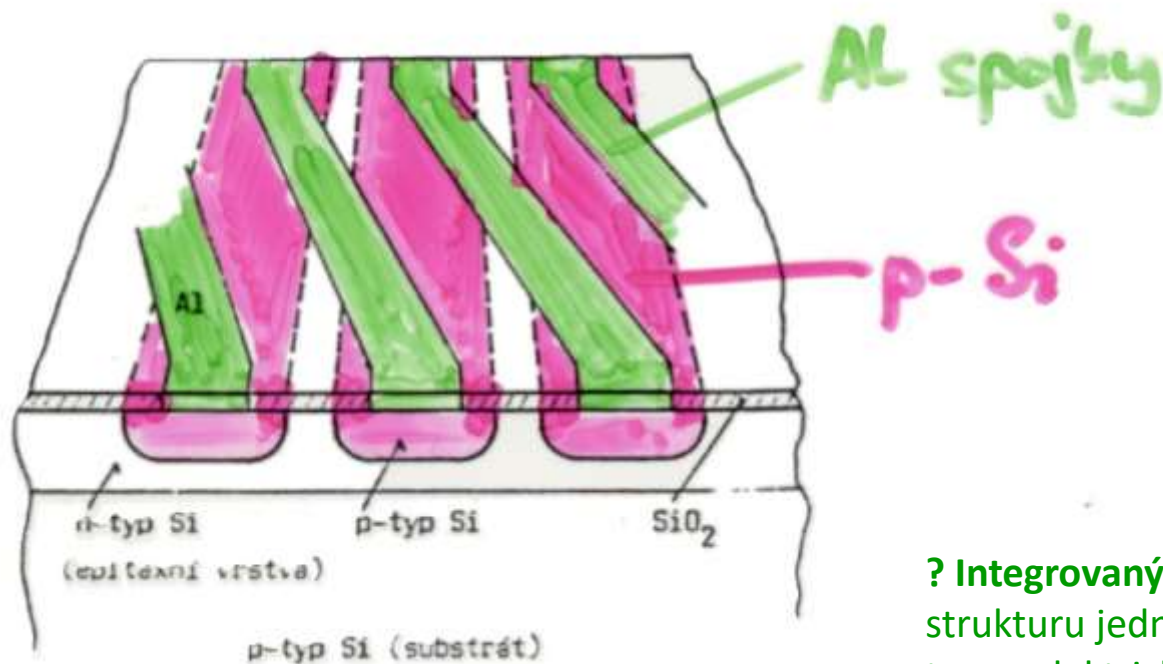


Termoelektrické tepl. senzory – Integrované

Využití:

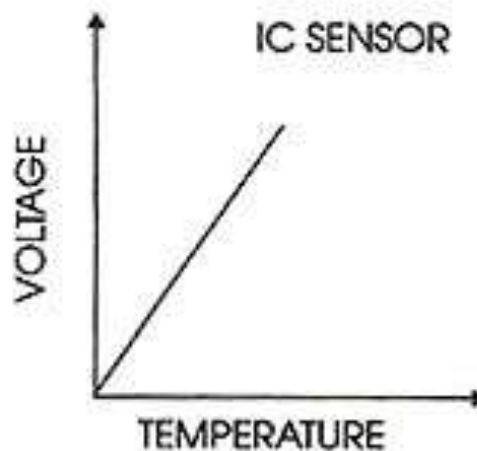
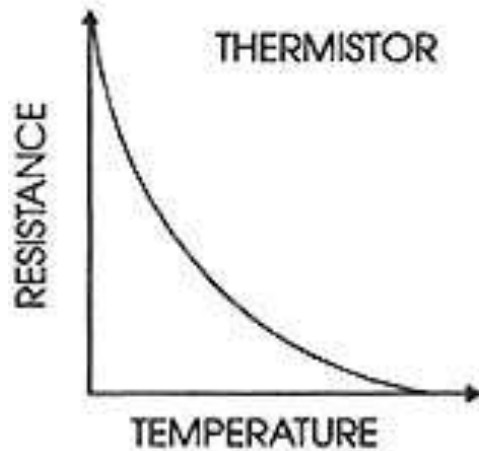
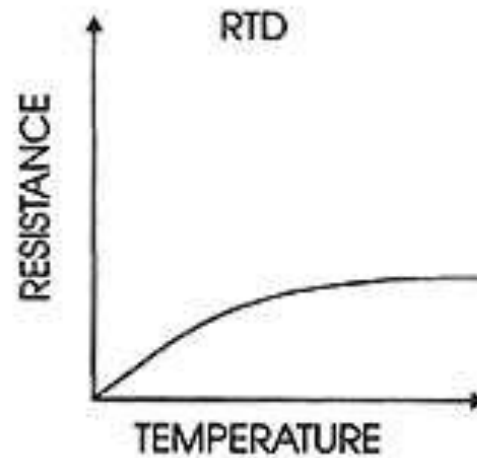
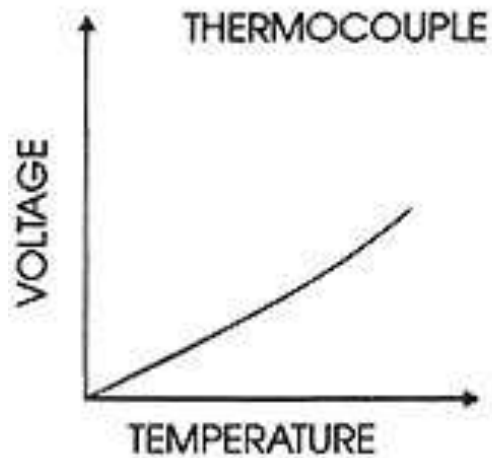
Termoelektrické články lze využít k měření teplotních rozdílů přímo na křemíkovém čipu \Rightarrow lze měřit teplotu na různých místech uvnitř čipu najednou

Termoelektrická baterie


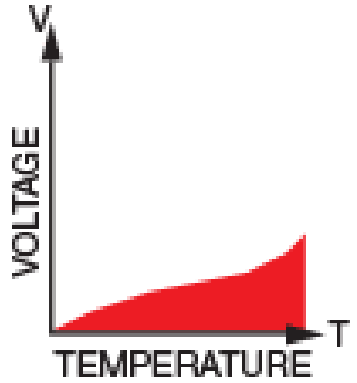

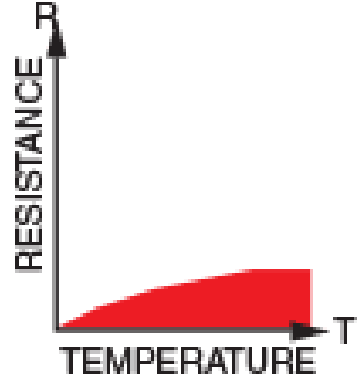

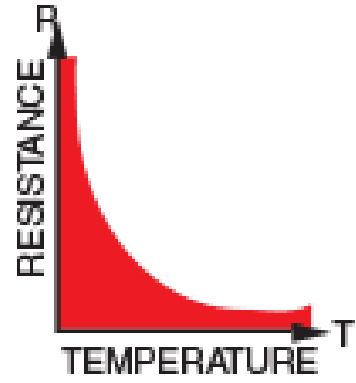

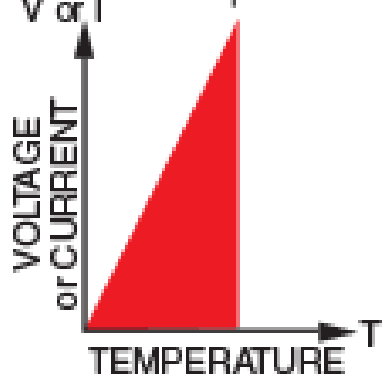


? Integrovaný termoelektrický článek: Nakreslete strukturu jednoho článku. Nakreslete princip termoelektrická baterie. Jak je zabráněno šíření teploty na čipu.

Tepl. senzory – Porovnání RTD, diod, IC, termočlánek



Tepl. senzory – Porovnání RTD, diod, IC, termočlánek

	Thermocouple  	RTD  	Thermistor  	I. C. Sensor  
Advantages	<ul style="list-style-type: none"> Self-powered Simple Rugged Inexpensive Wide variety Wide temperature range 	<ul style="list-style-type: none"> Most stable Most accurate More linear than thermocouple 	<ul style="list-style-type: none"> High output Fast Two-wire ohms measurement 	<ul style="list-style-type: none"> Most linear Highest output Inexpensive
Disadvantages	<ul style="list-style-type: none"> Non-linear Low voltage Reference required Least stable Least sensitive 	<ul style="list-style-type: none"> Expensive Current source required Small ΔR Low absolute resistance Self-heating 	<ul style="list-style-type: none"> Non-linear Limited temperature range Fragile Current source required Self-heating 	<ul style="list-style-type: none"> $T < 200^\circ\text{C}$ Power supply required Slow Self-heating Limited configurations

Bezkontaktní teplotní senzory

- Termoelektrické
- Bolometrické
- Pyroelektrické



Termoelektrické senzory tepelného záření

Princip: Termoelektrický článek se zahřívá absorpcí infračerveného záření

Výroba: tenkovrstvou technologií, termoelektrické radiační bloky (spojením termočlánků), tzn. zvýšení citlivosti, ale zhoršení tepelné časové odezvy.

😊 **Výhody:**

- činnost při pokojových teplotách
- široký spektrální rozsah
- nepotřebují vnější napájení, jednoduchá indikace výstupu- voltmetr nedochází k vzájemnému ovlivňování přes napájecí zdroj
- Seebeckův efekt je v Si **0,5 – 1 mV/K** na jeden proužek
- technologie výroby je kompatibilní s bipolární nebo CMOS

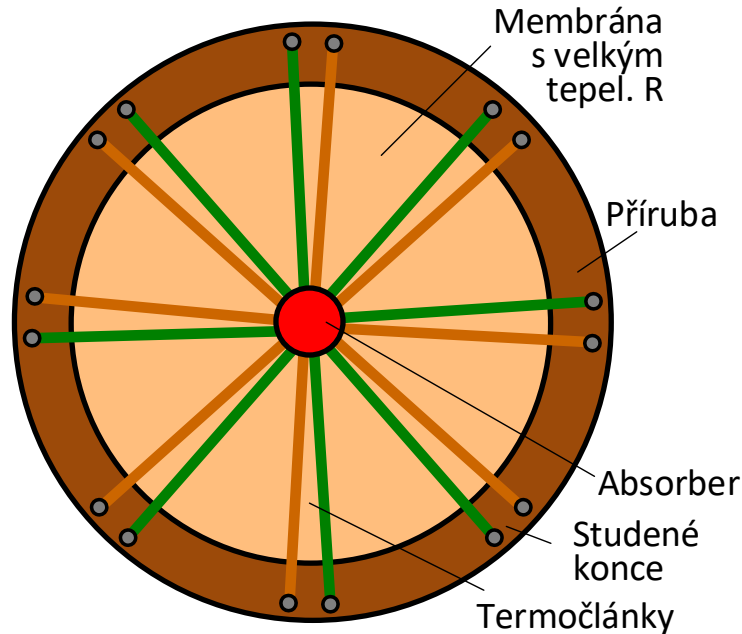
☹ **Nevýhody:** velký vnitřní odpor, limitovaný tepelný odpor senzoru (je dán tím že existuje křemíkové spojení mezi teplou a referenční částí)

Využití: IR senzory, teplotní převodníky, chemické analýzy plynu, průtokoměry, senzory vakua



Termoelektrické senzory tepelného záření

Zkouška

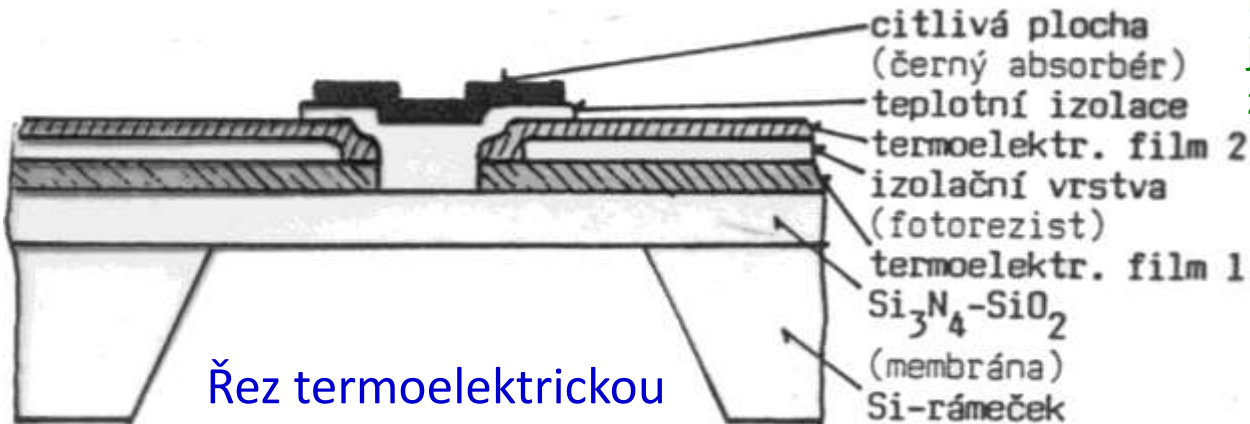


Náhled na membránu s termočlánky

Parametry integrovaných termobloků

počet spoj. termočlánků	účinná plocha [mm ²]	materiály	citlivost [V/V]	časová konst. [ms]
60	0,36	Bi-Sb	6	15
12	0,78	Bi-Sb	9,5	40
54	1	Te-InSb	95	30
44	7,3	pSi-Al	10,6	128
72	0,2	Bi/Sb	180	19

? Bezkontaktní senzory infračerveného záření s termoelektrickým článkem: Nakreslete zjednodušeně strukturu jednoho termočlánku na čipu. Jak je zabráněno šíření teploty po ploše čipu.



Řez termoelektrickou integrovanou strukturou

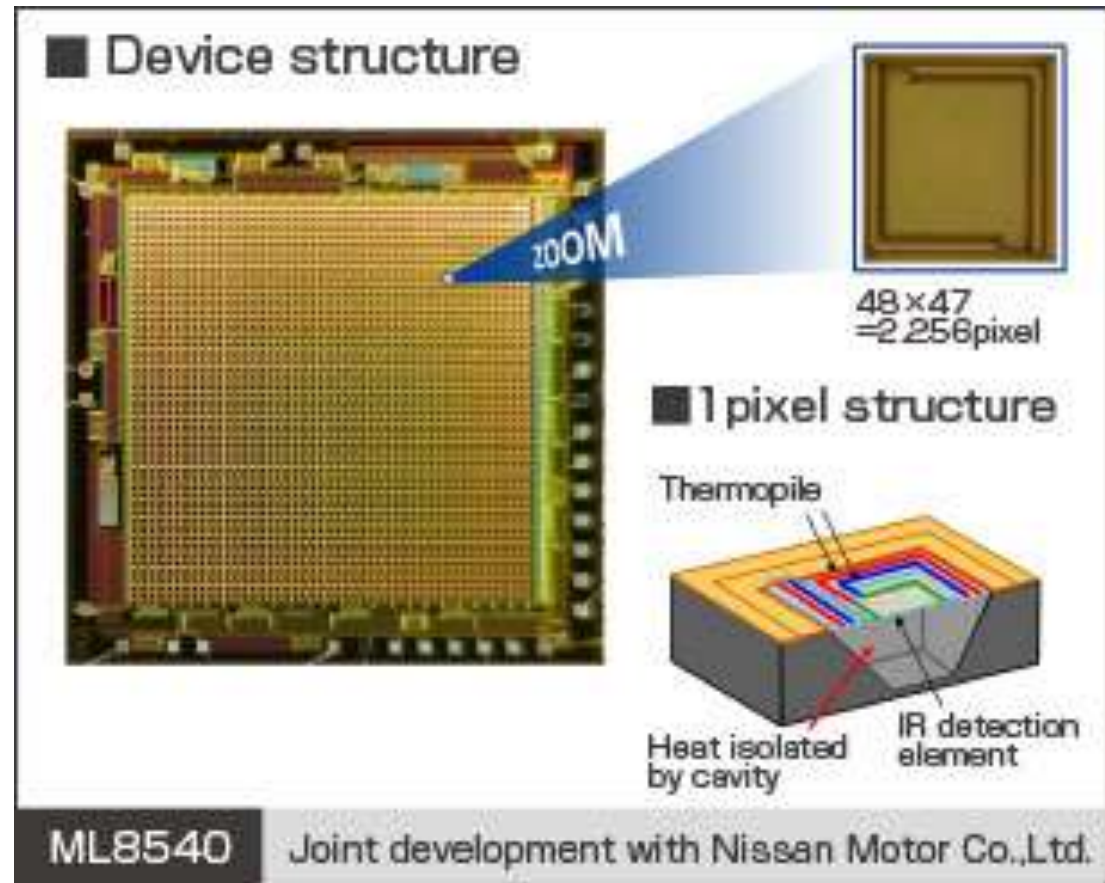


Termoelektrické senzory tepelného záření

The ML8540 is a medium-resolution (approximately 2,000 pixels) infrared image sensor that allows noncontact temperature measurement of an object and easy obtaining of thermal images.

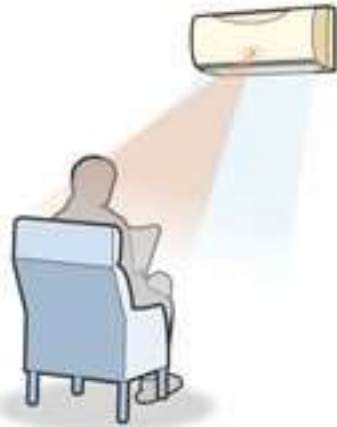
The ML8540 receives infrared rays from an object at 48×47 (2,256) pixels resolution, converts them into voltage through a thermopile, and selects pixels in accordance with external CPU clocks to output signals.

simple-to-use infrared image
sensor for taking thermal
images at 2000 pixels.
Uncooled, small and low power
consumption.

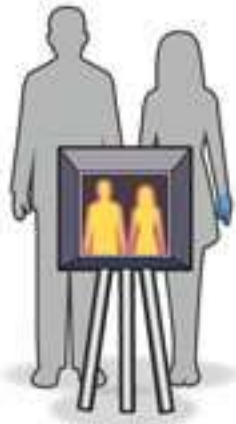


Termoelektrické senzory tepelného záření

Applications



Temp. measurement /
Human detection sensor

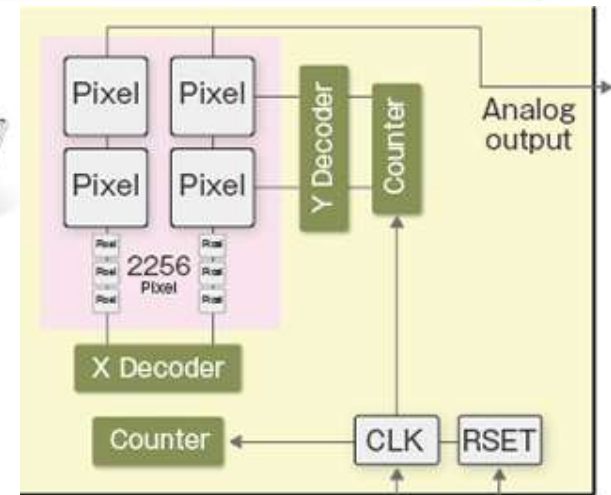
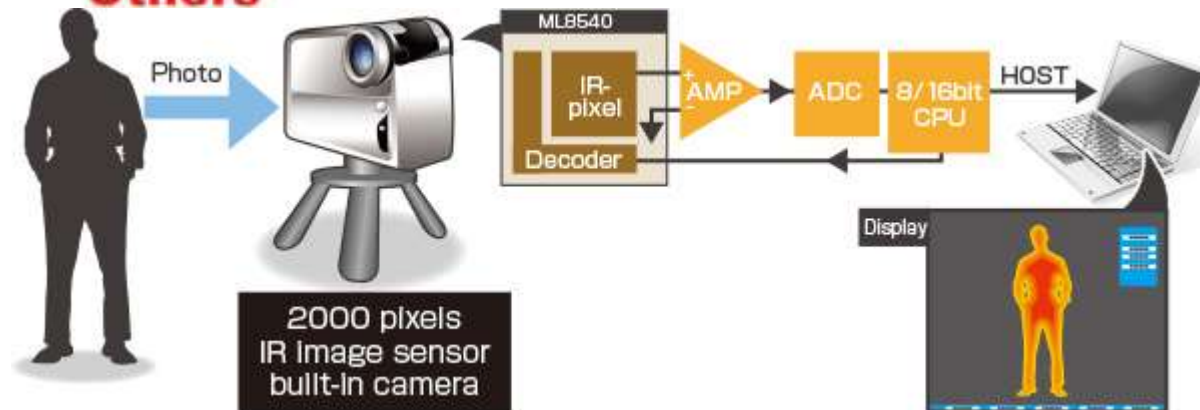


Body temp.
measurement



Heating detection

Others



Odporové senzory tepelného záření - Bolometry

Co jsou BOLOMETRY a MIKROBOLOMETRY ?

- Použití bolometru pro bezkontaktní měření teploty, kdy nelze použít pyroelektrické detektory.
- Mikrobolometry se využívají hlavně pro účely infračerveného snímání obrazu.

Poznámka: Bolometry (z řeckého bole: paprsek) jsou senzory pro bezdotykové měření teploty (thermometers) pracující na principu pyrometrie, tzn. měření celkového vyzářeného tepelného výkonu prostřednictvím infračerveného záření. Tvoří tak alternativu k ostatním sensorům pro bezdotykové měření teploty, infratermočlánky, pyroelektrické senzory a fotonové snímače.

- Bolometry v podobě integrovaných obvodů. Maticové uspořádání (několik desítek, stovek nebo i tisíců bolometrů v matici) - obecně označované jako mikrobolometry.

Aplikace: nejčastěji pro potřeby termovize, tzn. infračerveného snímání obrazu předmětů s následnou možností měření nebo detekce jejich teploty.



Odporové senzory tepelného záření - Bolometry

Princip:

Odporový materiál s velkým teplotním koeficientem a malou časovou konstantou \Rightarrow rychlé

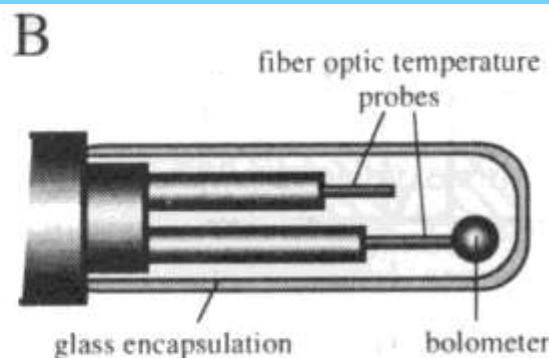
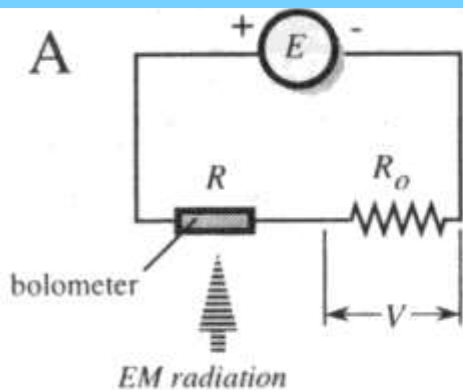
Dopadající záření ohřívá materiál \rightarrow změna R

Materiály:

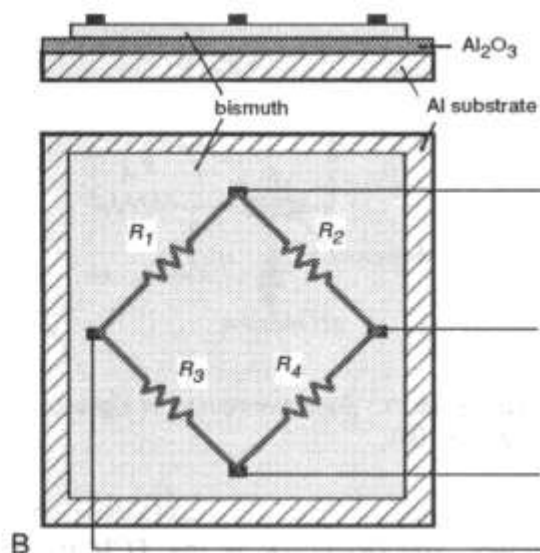
- Pt odporové články – dříve, polovodičové materiály - v současnosti
- Termistorové bolometry – kysličníky MgO , MnO , NiO , TiO_2 (kosmická zařízení)
- Vrstvové bolometry – chalkogenidové sklo $\text{Ti}_2\text{SeAs}_2\text{Te}_3$
- Germaniové, křemíkové bolometry – chladí se na teplotu kapalného hélia, používají se při kosmických měřeních
- Supravodičové bolometry
- Pyroelektrické bolometry



Odporové senzory tepelného záření - Bolometry

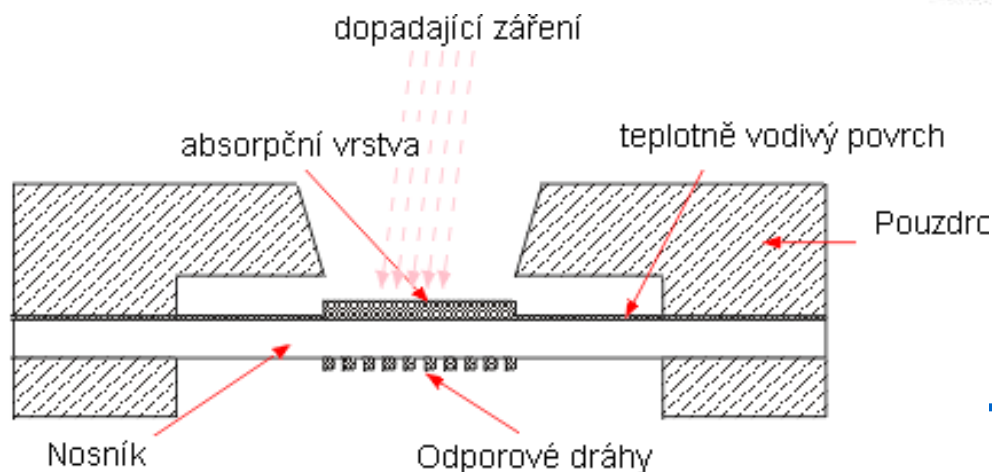


Struktura integrovaného můstku z bolometrů



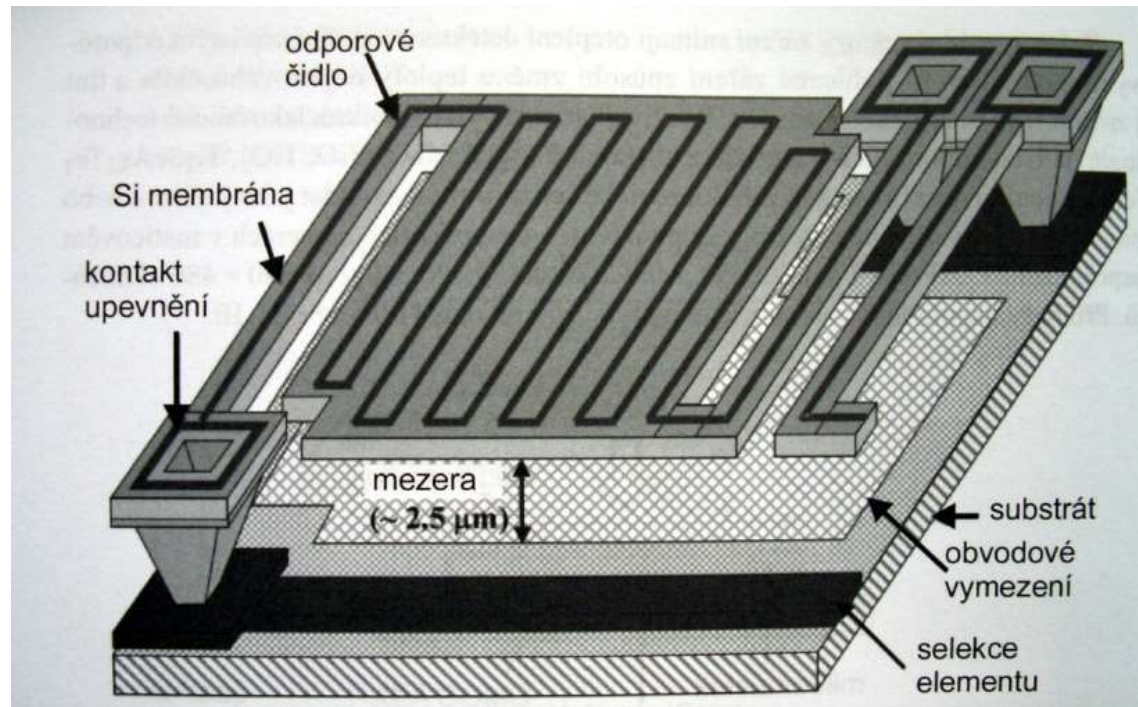
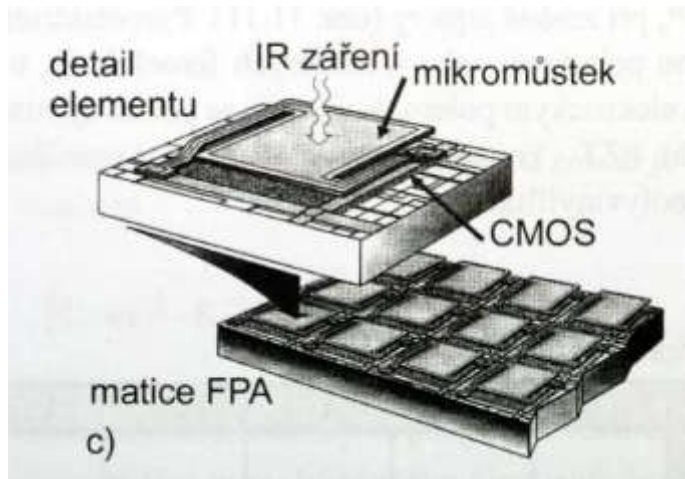
Princip použití bolometru jako proměnného prvku odporového děliče

Provedení jednoduchého bolometru MEMS



? MEMS bolometr: Nakreslete zjednodušeně strukturu jednoho MEMS bolometru na čipu. Jak je zabráněno šíření teploty po ploše čipu.

Uspořádání plošného detektoru používaného v termovizních kamerách

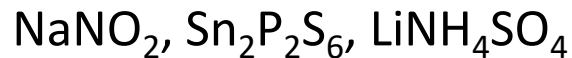


? MEMS bolometr: Nakreslete zjednodušeně strukturu bolometrické matice na čipu.

Širokopásmové bolometry

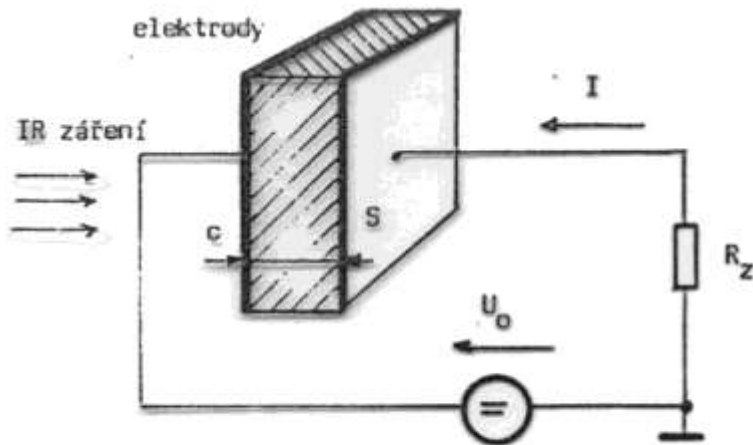
Princip: využívá se kombinace různých fyzikálních jevů (termistorového, pyroelektrického)

Materiály: pyroelektrický materiál u kterého je vodivost funkcí teploty

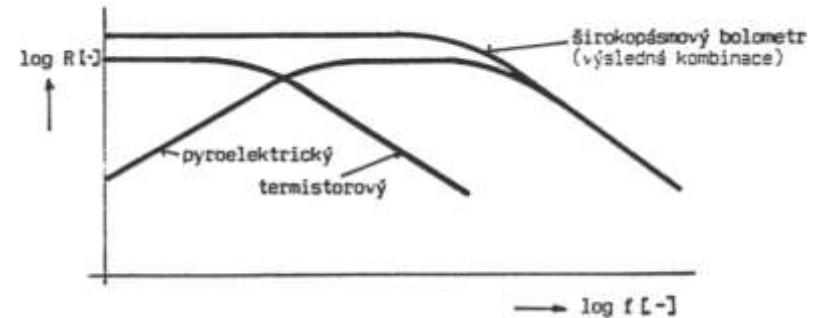


Kompence teploty okolí: můstkové zapojení dvou stejných senzorů

Konstrukce



Princip vyhodnocování informace



Základní parametry některých typů polovodičových bolometrů

typ	pracovní teplota [K]	citlivost [V/V]	odezva [ms]	spektrální rozsah	typická plocha [mm ²]
termistor	290	1000	1 až 10	viditelná obl. do 40 μm	0,4 až 4
tenká oxidová vrstva	290	130	1	viditelná až střední obl.	0,5
Ge	4,2	$2,5 \cdot 10^4$	30	infračer. zář. vzdálená obl.	10
Si	1,8	$2,8 \cdot 10^5$	10	infračer. zář. vzdálená obl.	10



Bolometry - Parametry

- ☐ Jsou rychlé - krátká časová konstanta (až 1 ms)
- ☐ Velká citlivost
- ☐ Spektrální citlivost 1,6 až 5000 μm
- ☐ Velký pracovní teplotní rozsah senzorů (-40°C až 100°C)
- ☐ Lze bez problémů měřit vysoký rozsah teplot měřeného objektu (i nad 1500°C).
- ☐ Malé rozměry (u mikrobolometrů jen desítky μm)
- ☐ Není zde žádné ovlivnění měřeného objektu
- ☐ U mikrobolometrů velký počet snímačů (i přes 80 tisíc) na malé ploše => infračervené snímání obrazu s rozlišením až 320x240 pixelů
- ☐ Vysoká cena
- ☐ U některých typů je nutné chlazení



Bolometry – Aplikace pro termokamery

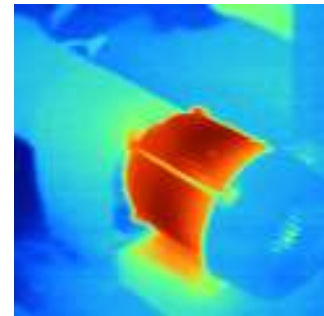
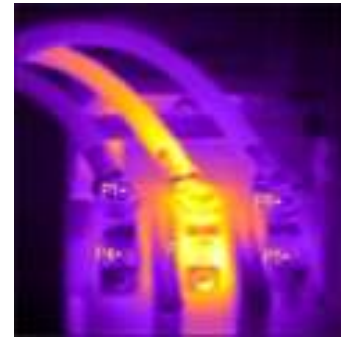
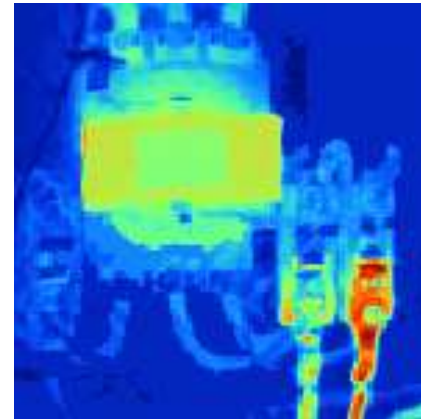
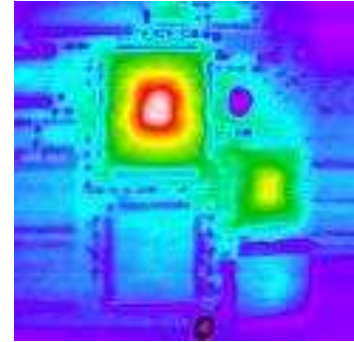
Silicon Infrared Detector - UL 03 04 1 (francouzská firma ULIS)

- Formát pole (rozlišení): přepínatelný mezi 384 x 288 a 320x240 pixelů, 35 μm vzdálenost pixelů (mikrobolometrů na chipu)
- Materiál: Struktura mikrobolometrů je založená na rezistivním amorfním křemíku, který je plně slučitelný s technologií CMOS a není jej nutné chladit.
- Dynamický teplotní rozsah měřeného objektu: až 1500°C
- Pracovní teplotní rozsah senzoru: - 40°C až + 80°C
- Časová konstanta: 7 ms
- Spektrální rozsah: 8 až 14 μm
- NETD: 85 mK (f/1, 300 K, 60 Hz)
- Převodní konstanta: 7 mV/K
- Chyba opakovatelnosti měření: < 1.5%
- Rozměry: 32 x 23,5 x 7,4 mm bez vývodů
- Spotřeba: < 200 mW



Termokamery

- ☐ Detekce ohně a plamenů
- ☐ Monitorování tepelného zatížení součástek, objektů - termovize s rozlišením až 320 x 240 pixelů
- ☐ Detekce výbuchu
- ☐ Bezdotykové měření teploty
- ☐ Spektrometrie
- ☐ Monitorování teploty procesů
- ☐ Měření teploty pohyblivých předmětů
- ☐ Astronomie
- ☐ Infračervené kamery a dalekohledy
- ☐ Zabezpečovací technika



Příklady obrázků získané infračervenými kamerami používající mikrobolometry

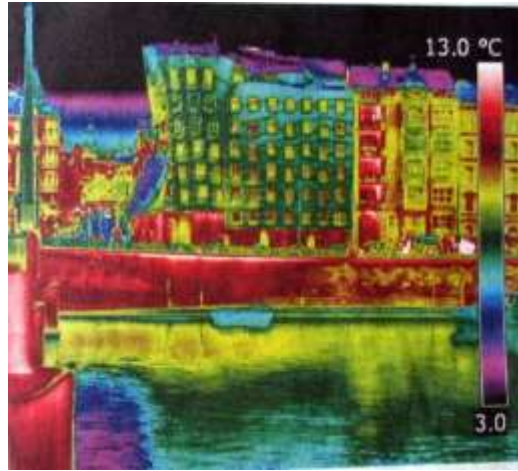


Termokamery

Příklady obrázků získané infračervenými kamerami používající mikrobolometry



Kumulace tepla



Kumulace tepla

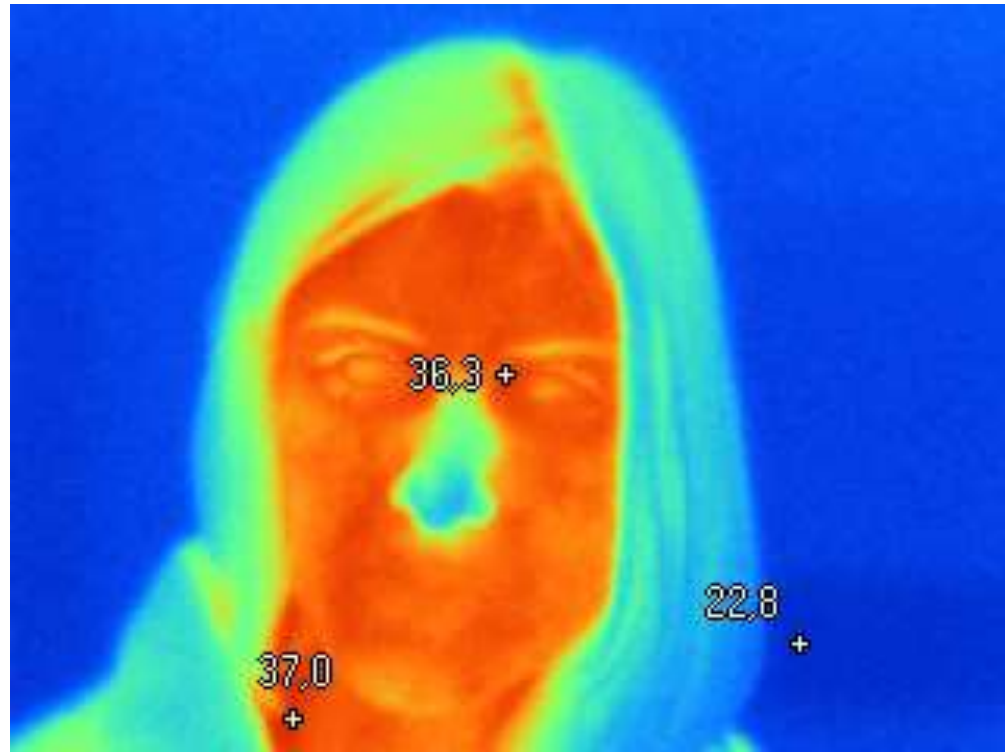


vyzařování tepla



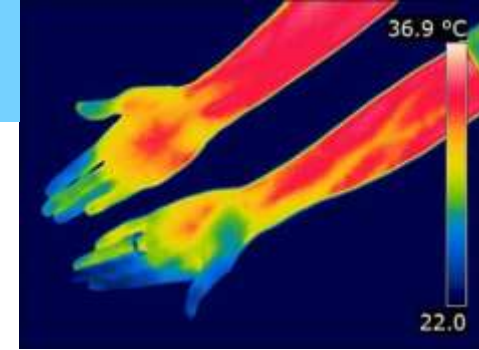
Kumulace tepla

Termokamery

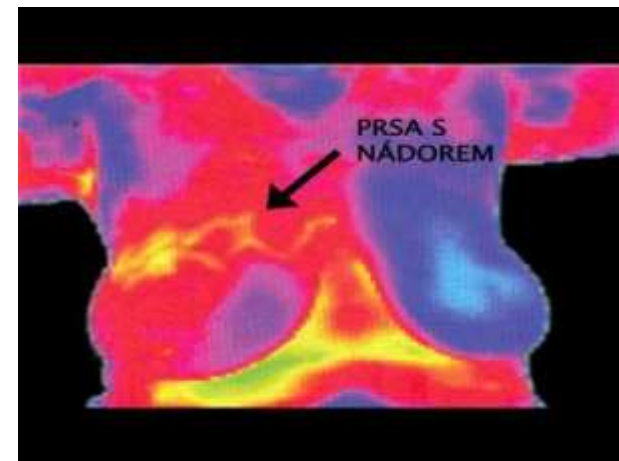
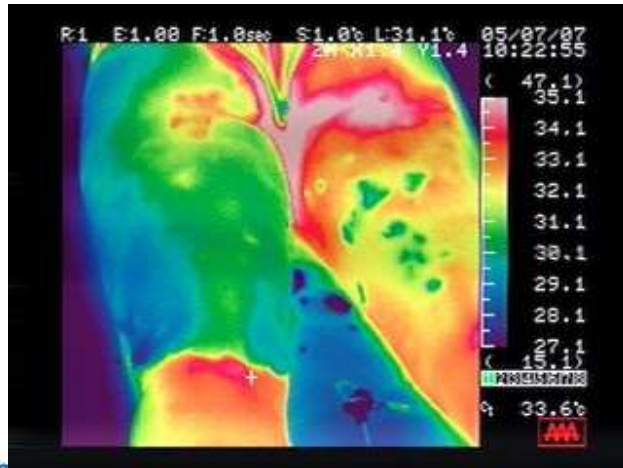
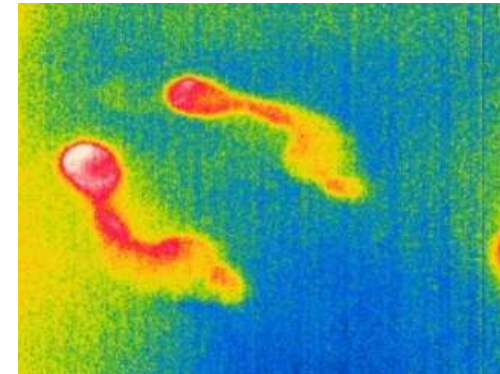


Termokamery

- zjišťování účinku fyzikální léčby pomocí termovize.
- pomocí změření rychlé změny povrchové teploty se prokázaly změny v prokrvení ve tkáních hluboko pod povrchem.
- v plastické chirurgii při kontrole hojení transplantátů
- při diagnostice různých zánětů a poruch prokrvení
- kamerou s vyšší citlivostí lze diagnostikovat také zhoubná nádorová onemocnění – například prsu, štítné žlázy, kloubů atd.

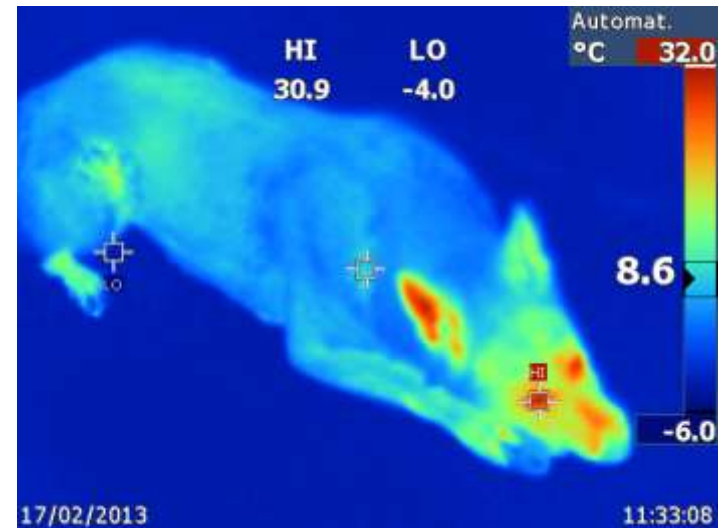
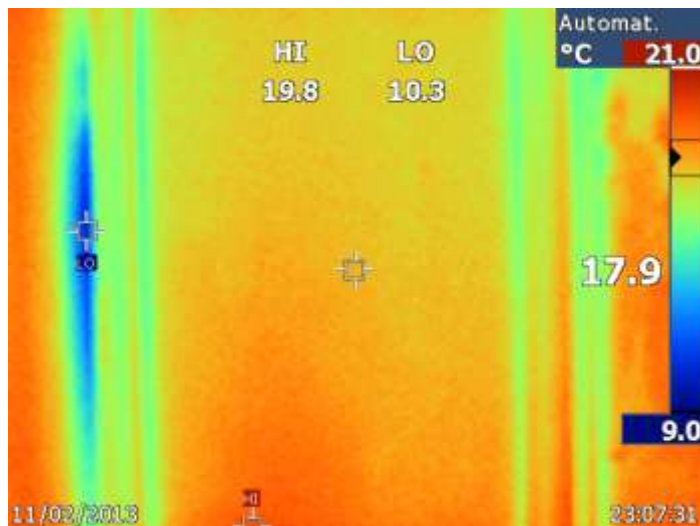
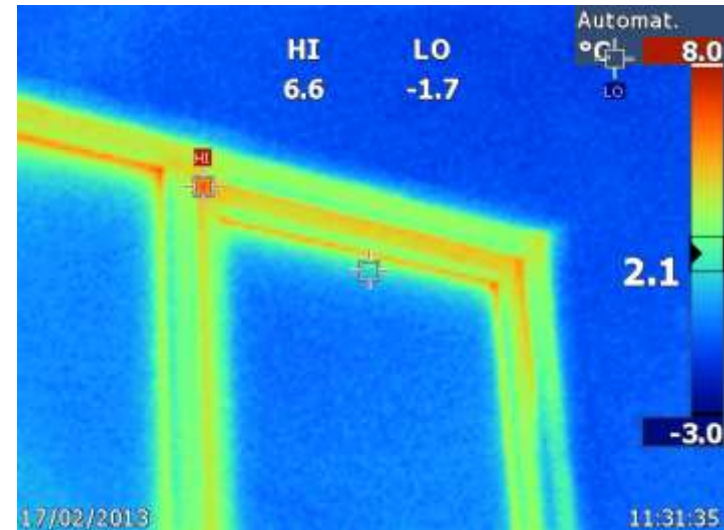
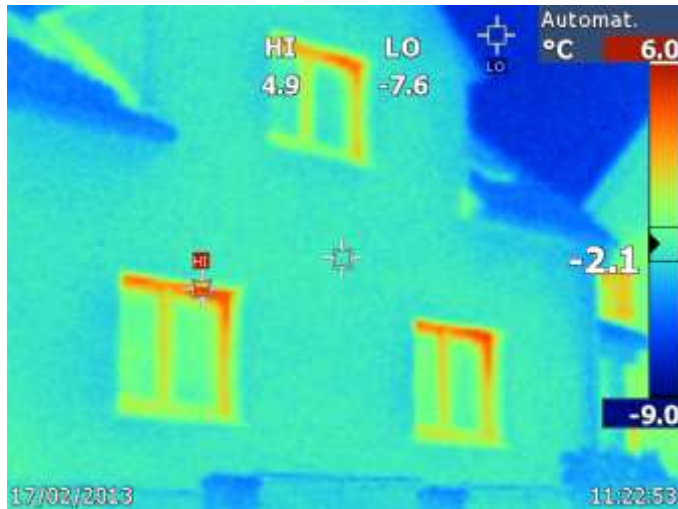


tepelné stopy člověka na podlaze
vydrží i několik desítek minut



Termokamery

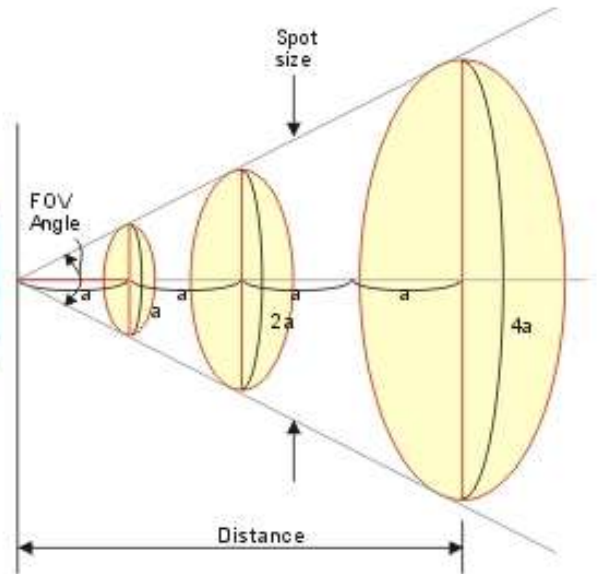
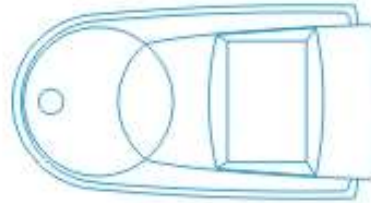
Příklady obrázků získané infračervenými kamerami používající mikrobolometry



Bolometry – Aplikace pro teploměry



**OS36 Series
IR Measurement Device**



Bolometry – Aplikace pro lékařské teploměry



Speciální dotykové teplotní senzory

- Akustické
- Krystalové
- Šumové
- Magnetické
- SAW
- Optické
- Teploměrné barvy



Krystalový teplotní senzor

Princip: využívá se teplotní závislosti kmitočtu krystalu (vhodného řezu)

Vyhodnocování: - oscilátorový obvod, dělič...

- oscilátor je obvykle umístěn blízko krystalu
- signál lze přenášet na větší vzdálenosti
- signál lze snadno upravit (dělit, převádět na časový interval)

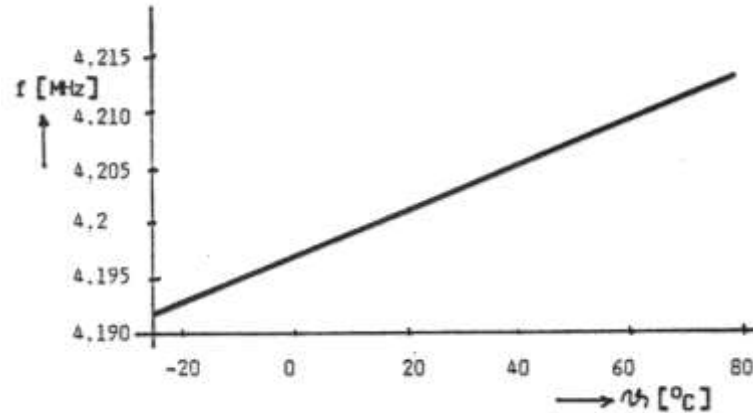
Vlastnosti:

- malá cena
- dobrá linearita
- digitální signál + přenos
- dvouvodičové vedení
- malé napětí + proud
- možnost heterodynního zpracování signálu

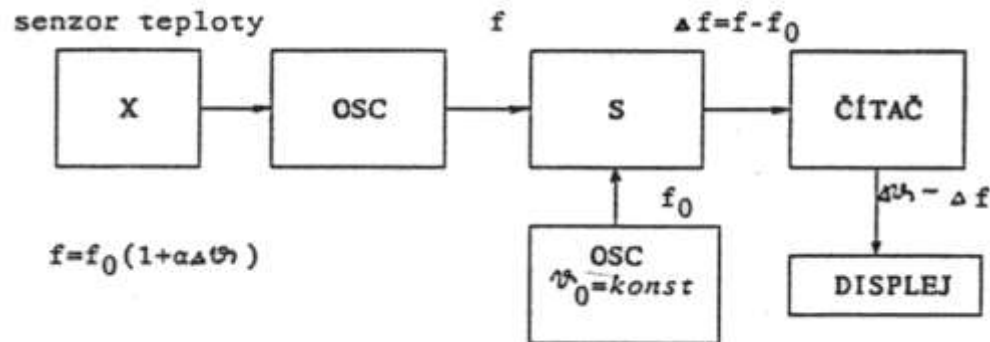


Krystalový teplotní senzor

Převodní charakteristika



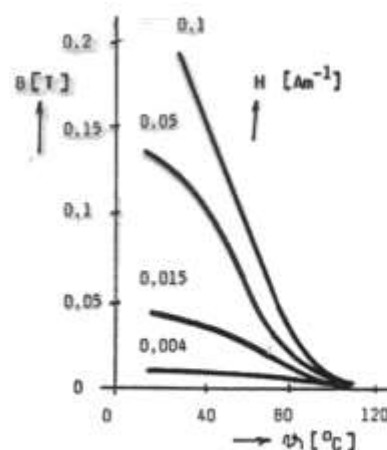
Heterodynní zpracování signálu z krystalového senzoru



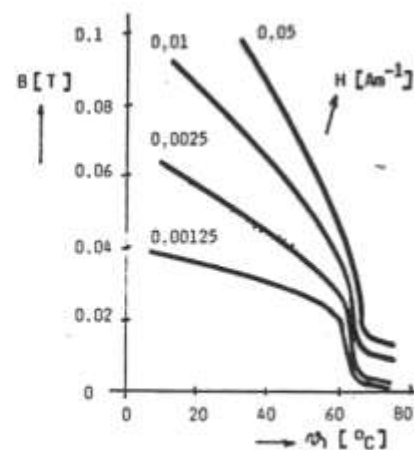
Magnetický teplotní senzor

Princip: $B=f(\vartheta)$

při $H=\text{konst.}$



Závislost magnetické indukce B na teplotě



a) PY 30 MIV, b) ferit H4

Curieova teplota: při vzrůstu teploty nad tuto teplotu se feromagnetické materiály stávají paramagnetickými

Materiály: pokud možno s co největší změnou $\Delta B/\Delta \vartheta$

kovy: thermalloy, calmalloy, thermoperm

ferity: ve tvaru toroidu

☺ **Výhody:** robustní, velký výstupní signál

○ **Nevýhody:** malá časová stálost, velké rozměry, malá přesnost



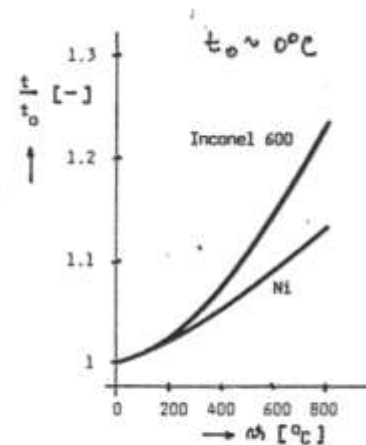
Ultrazvukový teplotní senzor

Princip: rychlost šíření zvuku v látce závisí na teplotě, měří se čas šíření ultrazvukových impulsů

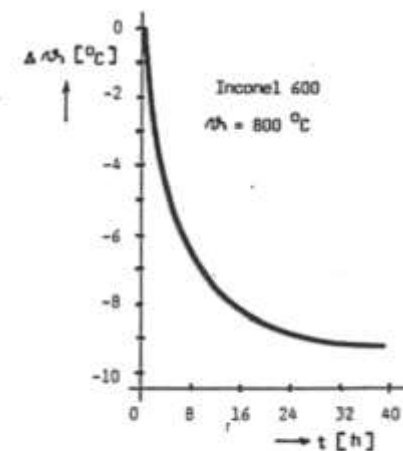
$v=f(\vartheta)$

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Teplotní závislost rychlosti
a stability



Normalizovaná teplotní
závislost rychlosti
šíření zvuku

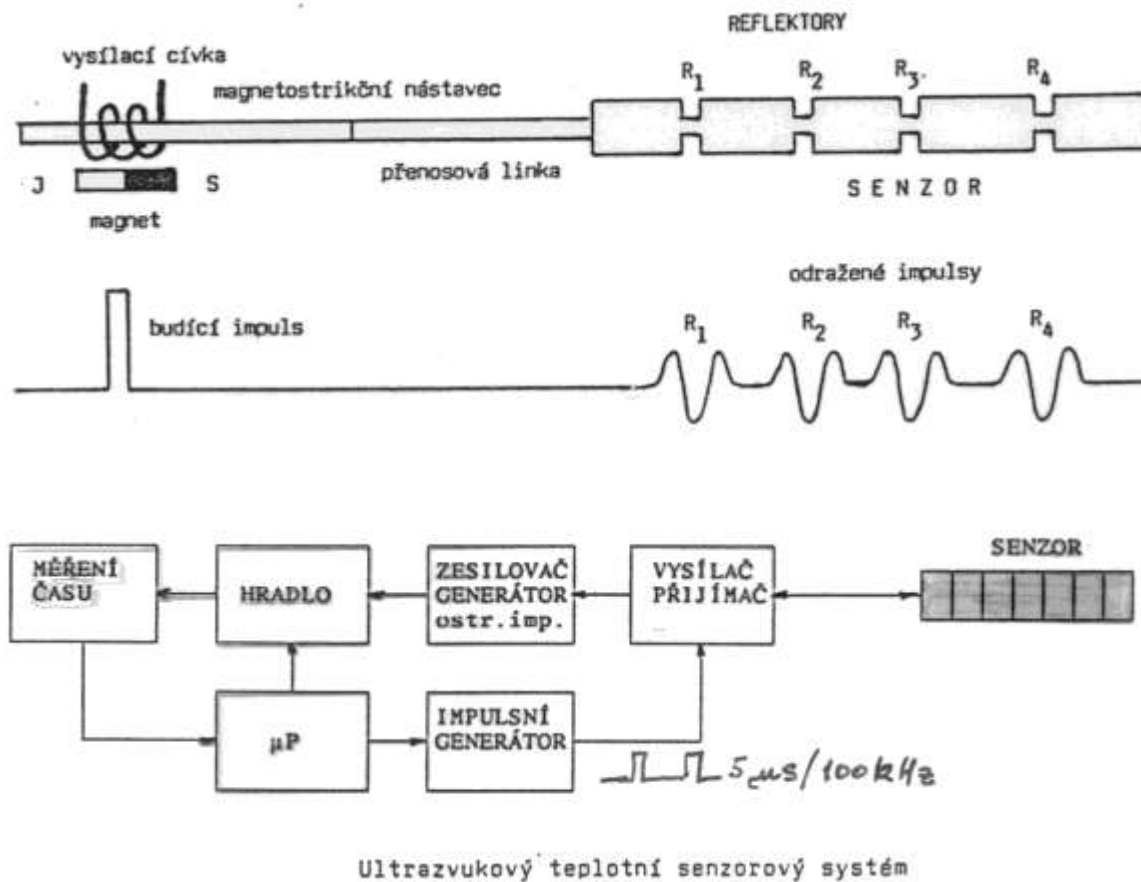


Teplotní stabilita senzoru



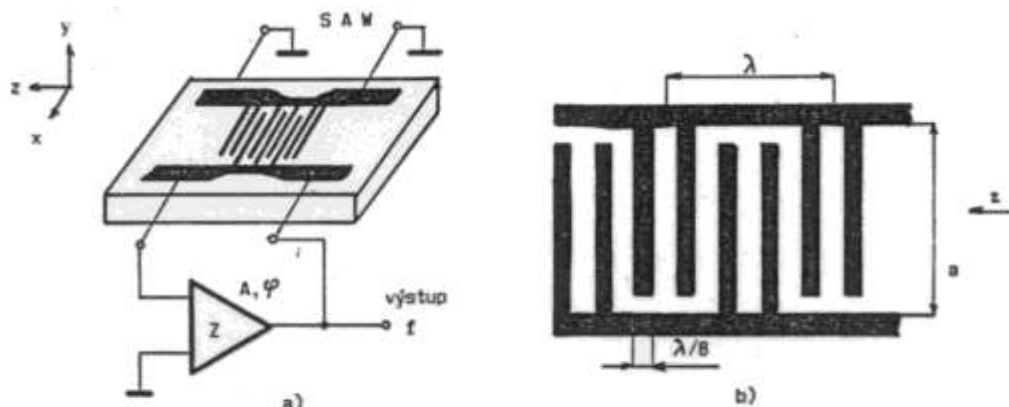
Ultrazvukový teplotní senzor

Konstrukce:

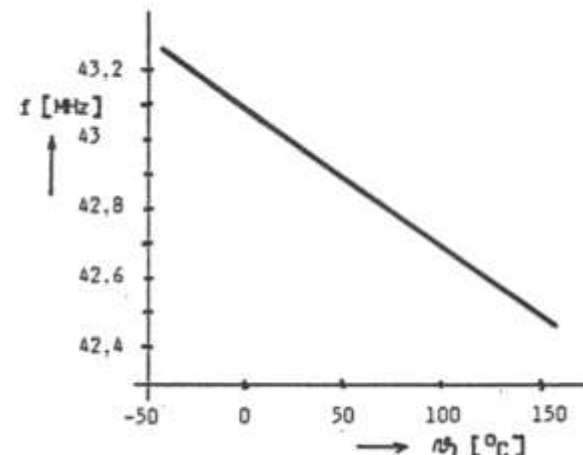


SAW teplotní senzor

Princip: Využívá se teplotní závislosti rychlosti šíření povrchové akustické vlny v určitém materiálu (LiNbO_3)



Teplotní senzor SAW a) princip činnosti oscilátoru se zpožďovacím vedením SAW, b) struktura SAW-uspořádání elektrod



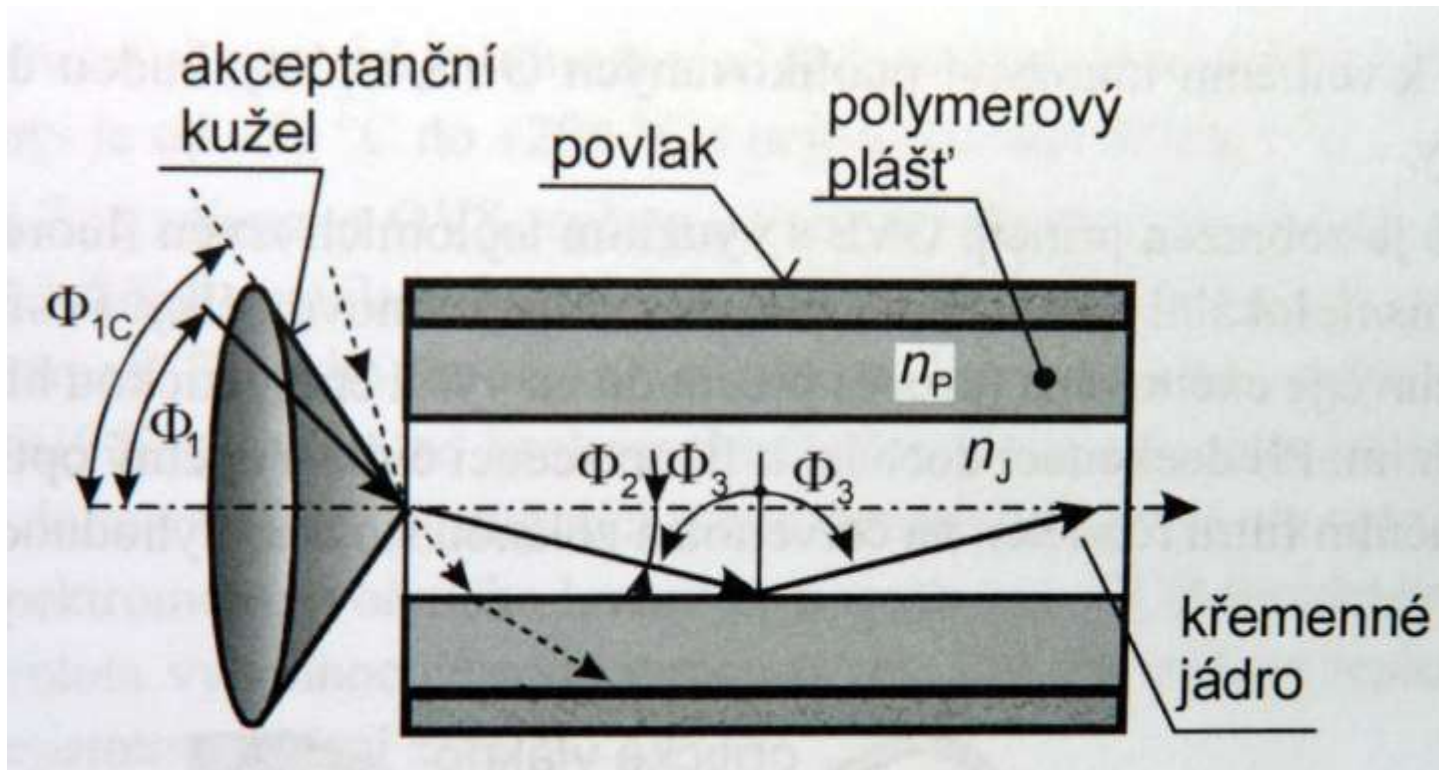
Teplotní závislost
frekvence oscilátoru se
senzorem SAW

Typická závislost: citlivost $4\text{kHz}/^\circ\text{C}$, rozdíl frekvencí pro $\vartheta = -50^\circ\text{C} \div 150^\circ\text{C}$ je $\Delta f = 800\text{kHz}$

? Teplotní senzor SAW:
Nakreslete a vysvětlete
princip činnosti, Nakreslete a
vysvětlete elektronický
vyhodnocovací obvod.

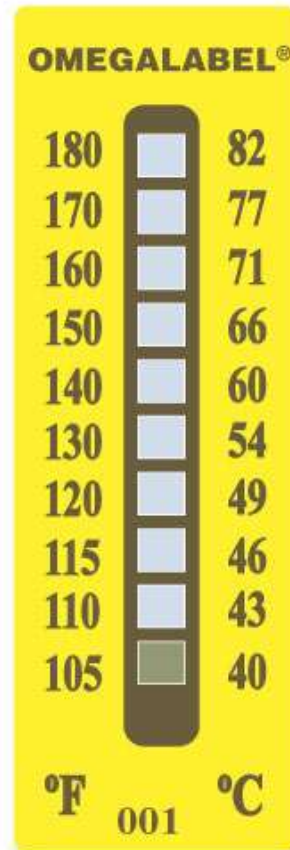
Teplotní senzor s optickým vláknem

- Využití nežádoucích vlivů okolního prostředí na parametry optických kabelů
- Teplota moduluje optický signál



Teplotní senzor s barevnou indikací

- Akrylové laky nebo stmelené prášky obsahující teplotné citlivé anorganické pigmenty



Senzory pro měření kryogenních teplot



Senzory pro měření kryogenních teplot - přehled

- Teploty od 50K níže
- využití teplotně závislých fyzikálních vlastností látek (rychlost šíření zvuku, elektrické vlastnosti, apod.)
- využití teplotně závislých fyzikálních jevů (šum, magnetická rezonance)

Sensor Type	Temperature Range
Silicon diodes	1.4 - 500 K
GaAlAs diodes	1.4 - 500 K
Positive Temperature Coefficient	
Platinum RTDs	14 - 850 K
Rhodium-iron RTDs	0.65 - 400 K
Negative Temperature Coefficient	
Cernox™ RTDs	0.10 - 325 K
Cernox™ High Temp. RTDs	0.30 - 420 K
Germanium RTDs	0.05 - 100 K
Carbon-Glass™ RTDs	1.4 - 325 K
Ruthenium oxide RTDs	0.05 - 300 K 0.05 - 40 K*
Thermocouples	1.4 - 1530 K
Capacitance	1.4 - 290 K

? Teplotní senzory pro měření kryogenních teplot: Napište alespoň 4 základní typy teplotních senzorů, Jaké nevýhody mají termočláňkové, Do jakých nejmenších teplot je možné senzory použít.



Senzory pro měř. kryogenních teplot – termoelektr. odpor

Zkouška

A) Termoelektrické články

výhody: jednoduché, laciné

nevýhoda: termoelektrické napětí není stabilní a je malé

B) Odporové senzory

Kovové – pro 10K÷90K se používá funkce

$$Z = \frac{R_{T1} - R_{T2}}{R_{T0} - R_{T2}}$$

R_{T1} - je odpor Pt pro T_1 ; R_{T0} , R_{T2} – jsou odpory Pt pro známé teploty

Pro 2K ÷ 20K lze $R=f(T)$ vyjádřit jako $R(T) = R_{T1} + AT^2 + BT^\gamma$

R_{T1} , A, B, γ – jsou konstanty určené měřením

Uhlíkové: speciální provedení hmotových odporů s negativní teplotní charakteristikou,
Rozsah 1÷20 K, popřípadě 0,01 ÷ 1 K
Termistory: až od 20 K

? Teplotní senzory pro měření kryogenních teplot: Napište alespoň 4 základní typy teplotních senzorů, Jaké nevýhody mají termočláňkové, Do jakých nejmenších teplot je možné senzory použít.



Senzory pro měř. kryogenních teplot – C, L, šum, P-N

Zkouška

C) Kapacitní teplotní senzory

Konstrukce vhodná pro měření teplot v silném magnetickém poli.

Dielektrikem je krystalické sklo

Citlivost – v lineárním úseku (do 5K) 250pF/K

D) Indukční princip

Měření extrémně nízkých teplot mK ÷ 5 K, využívá se teplotní závislosti magnetické susceptibility paramagnetických solí

E) Šumový teplotní senzor

Princip vychází z definice šumového napětí $U_2 = 4kRfT$

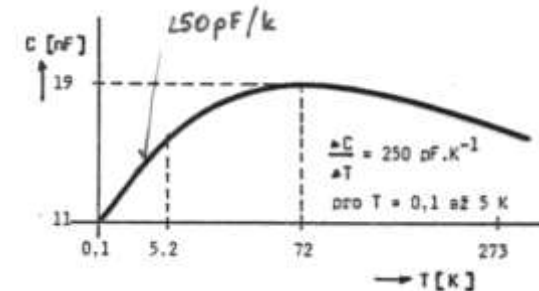
F) P-N přechod

Do 50 K je citlivost přibližně -2 mV/K

Pro $T < 50$ K – platí jiné teplotní koeficienty udávané výrobcem

(Si – 55 mV/K, pro $T = 1 \div 30$ K)

Nevýhoda: značná citlivost na magnetické pole



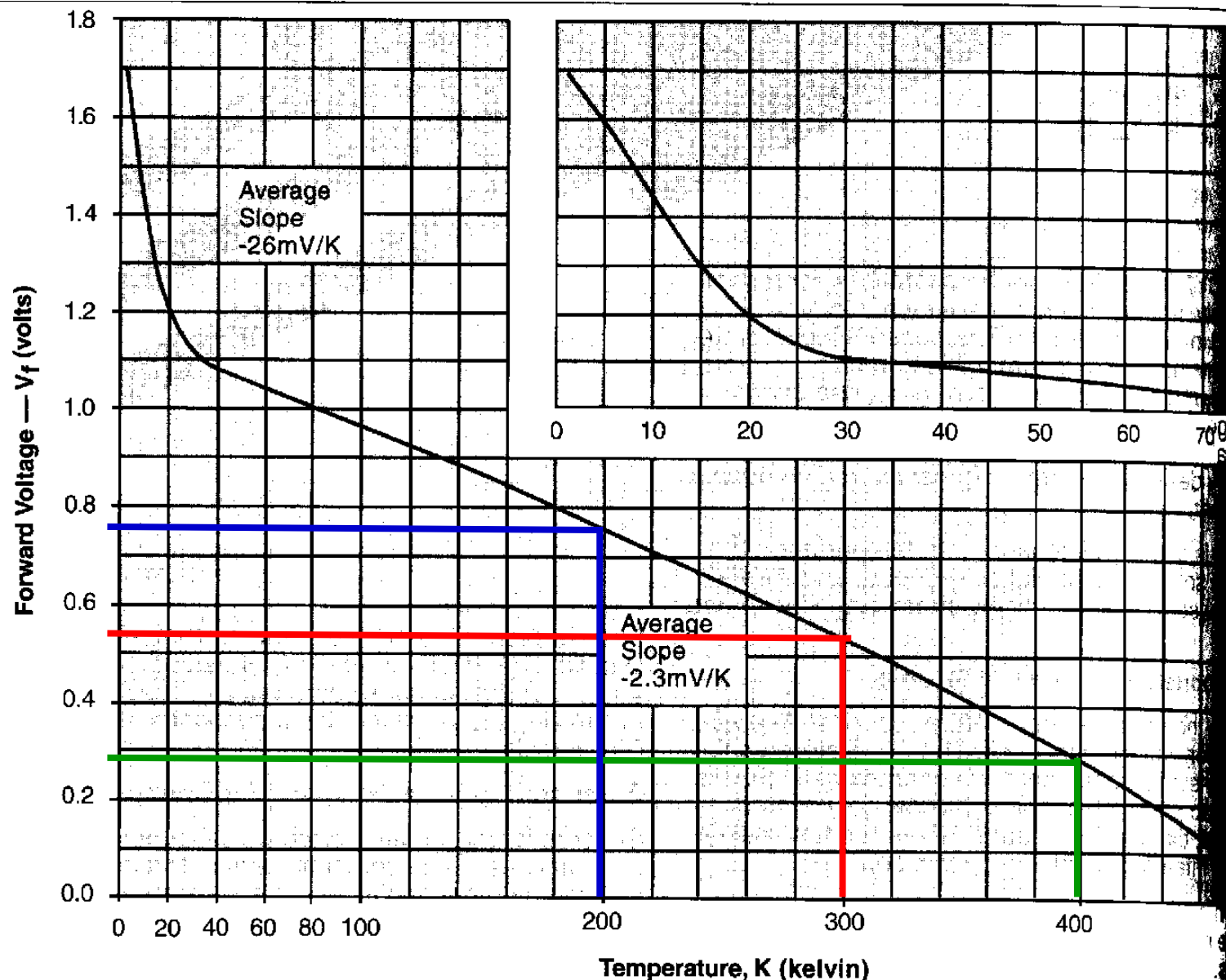
? Teplotní senzory pro měření kryogenních teplot: Napište alespoň 4 základní typy teplotních senzorů, Jaké nevýhody mají termočláňkové, Do jakých nejmenších teplot je možné senzory použít.



Závislost napětí na P-N přechodu na teplotě

Zkouška

Závislost
napětí na P-N
přechodu na
teplotě



Výrobci teplotních senzorů

**SLOPE
INDICATOR**



+GF+ SIGNET
GEORGE FISCHER +GF+ Piping Systems

Honeywell



MicroDAQ.com
the data logger store

MAXIM



TEXAS INSTRUMENTS



Zkouškové otázky

1. Napište definice pro: Množství tepla v tělese, Rychlost průtoku tepla tělesem, Teplotní gradient (tepelná vodivost)
2. Odporové kovové teplotní senzory (RTD): Uveďte alespoň 2 typické materiály pro teplotní senzory, uveďte typický teplotní rozsah, napište základní rovnici pro aproximaci průběhu odporu v malém rozmezí teplot ($0 - 100^{\circ}\text{C}$)
3. Vyhodnocování signálu z odporových kovových teplotních senzorů (RTD): Nakreslete zjednodušeně obvodové zapojení pro vyhodnocování teploty
4. Odporové polovodičové teplotní senzory s termistory: Napište rozdíl mezi termistory NTC, PTC, nakreslete typické převodní charakteristiky, Nakreslete zjednodušené obvodové zapojení pro vyhodnocování teploty
5. Odporové polovodičové teplotní senzory monokrystalické : Nakreslete a vysvětlete základní principy činnosti.
6. Teplotní senzory s p-n přechodem: Napište základní rovnici popisující proud přechodem (Shockley rovnice), Napište nebo odvoďte rovnici pro teplotní závislost napětí na přechodu p-n na teplotě, Nakreslete teplotní závislost saturačního proudu $I_s = f(\text{teplota})$
7. Citlivost teplotních senzorů s p-n přechodem: Napište princip odvození citlivosti p-n přechodu, Napište typickou číselnou hodnotu citlivosti
8. Teplotní senzory s p-n přechodem: Nakreslete typický průběh teplotní závislosti napětí na přechodu p-n $U = f(\text{teplota})$ pro dva různé proudy I přechodem
9. Vyhodnocování informace z teplotního senzoru s p-n přechodem: Nakreslete zjednodušené základní zapojení teploměru s přechodem p-n, vysvětlete proč je nutné používat proudový zdroj pro napájení přechodu p-n, jak je tvořen proudový zdroj na Vašem obrázku
10. Termoelektrické kovové teplotní senzory: nakreslete a vysvětlete základní princip činnosti termočlánku
11. Termoelektrické teplotní senzory: Uveďte 3 základní typy kovových termočlánků. Uveďte typické materiály, Nakreslete 3 typické charakteristiky.
12. Termoelektrické teplotní senzory: Nakreslete zjednodušený princip elektronického zapojení pro vyhodnocování signálu z termočlánků
13. Bezkontaktní senzory infračerveného záření s termoelektrickým článkem: Nakreslete zjednodušeně strukturu jednoho termočlánku na čipu. Jak je zabráněno šíření teploty po ploše čipu
14. MEMS bolometr: Nakreslete zjednodušeně strukturu jednoho MEMS bolometru na čipu. Jak je zabráněno šíření teploty po ploše čipu.
15. MEMS bolometr: Nakreslete zjednodušeně strukturu bolometrické matice na čipu
16. Teplotní senzor SAW: Nakreslete a vysvětlete princip činnosti, Nakreslete a vysvětlete elektronický vyhodnocovací obvod
17. Teplotní senzory pro měření kryogenních teplot: Napište alespoň 4 základní typy teplotních senzorů, Jaké nevýhody mají termočláňkové, Do jakých nejmenších teplot je možné senzory použít.

