

**E-12: Senzory, mikrosenzory a mikroaktuátory pro měření mechanických veličin, průtoku, teploty, chemických a biochemických veličin, nanosenzory, akcelerometry, mikroakční mechanismy (elektrostatický, piezoelektrický, tepelný), Lab-on-chip. Základní principy činnosti, základní elektronické struktury (ISFET, MOS.), elektronická zapojení. (Biomedicínské senzory)**

### Kapacitní tlakové senzory

Na základě změny kapacity je detekována změna tlaku.  $S = \Delta C / \Delta p$

Membrána je může být kruhová nebo čtvercová.

### Kapacitní tlakové senzory – princip činnosti

**Model kapacitního tlakového senzoru**

**Princip činnosti**

- Kondenzátor s jednou pružnou membránovou elektrodou
- Dielektrikum - nejčastěji vzduch nebo vakuum
- Změna vlastností dielektrika - změna  $\epsilon_r = f(p)$

**Změnu kapacity C lze určit dle vztahu**

$$\Delta C = C - C_o = \iint_S \epsilon \frac{dxdy}{h_o - z(x,y)} - \epsilon \frac{S}{h_o} \quad \text{kde} \quad h = h_o - z$$

**Citlivost senzoru**

$$S = \frac{\Delta C}{\Delta p}$$

? Nakreslete zjednodušený model kapacitního tlakového senzoru, napište rovnici pro citlivost kapacitního senzoru

prof. Ing. Miroslav Husák, CSc., FEL ČVUT v Praze

4

### Kapacitní tlakové senzory – parametry

#### Základní charakteristika kapacitních tlakových senzorů

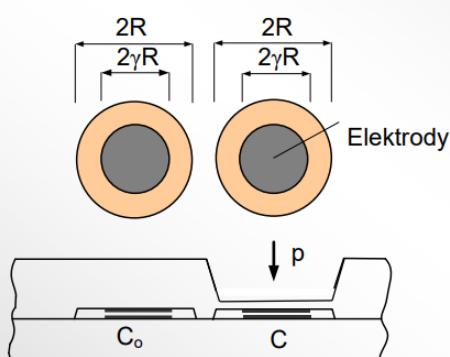
Materiál -	Si, sklo, atd.
Membrána -	Pružná, Si
Tvar membrány -	čtvercová nebo kruhová (vyšší citlivost)
Vzdálenost elektrod - $\mu\text{m}$	1-10 mm <sup>2</sup>
Plocha elektrod -	1-10 pF
Kapacita -	velká
Citlivost -	velmi malá
Teplotní závislost -	velmi malá $\rightarrow C \neq f(\vartheta)$
Teplotní hystereze -	zanedbatelná
Rozměry -	velmi malé
Technologická kompatibilita -	CMOS
Převodní charakteristika -	nelineární
Mezní hodnota C - dána pevností Si membrány a nerovnoměrnostmi na protilehlých plochách elektrod	$\vartheta_{\max} \geq 300^\circ\text{C}$

**Diagram of a capacitive pressure sensor:**

prof. Ing. Miroslav Husák, CSc., FEL ČVUT v Praze

5

## Kruhová nebo čtvercová membrána



$$C_o = \epsilon_0 \frac{\pi \gamma^2 R^2}{h} = \text{konst}$$

$$C = \int dC = \int_0^R \epsilon_0 \frac{2\pi r}{h_o - z(r)} dr$$

$$dC = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{dS}{h} = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{2\pi r}{h} dr$$

Relativní tlaková citlivost  $S_r$   
jako funkce koeficientu  $\gamma$

? Nakreslete zjednodušeně základní integrovanou strukturu s referenční kapacitou a měřicí kapacitou, souvislost

$$S_r = \frac{dC}{dp} = f(\gamma)$$

## Tenzometry

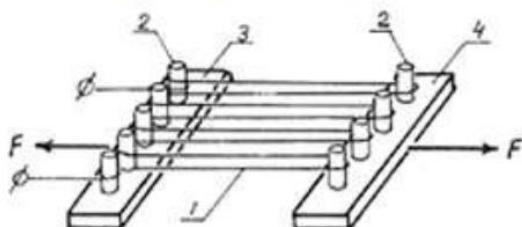
Tenzometr – mění ohmický odpor v závislosti na podélné deformaci

Pro jaká měření lze využít: v Geometrické rozměry (prodloužení); Tlak (diferenciální tlak); Kroutící momenty; Zrychlení v Průtok kapalin a plynů; Hladina v atd.

Výhody: Malá hmotnost; Malé rozměry; Dlouhodobá stabilita parametrů; Velmi malá chyba senzoru; Integrace ⇒ kompaktnost, menší cena

Typy: kovové ⇒ fóliové; drátkové; vrtové

### Nelepené (s volným drátkem)

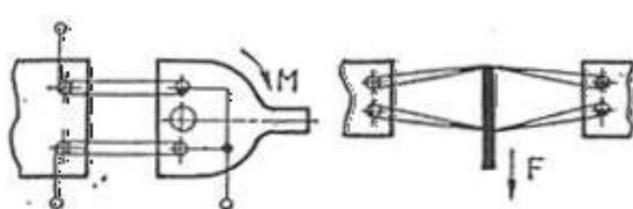
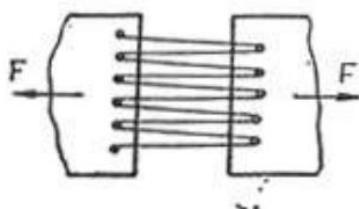


#### Typické parametry:

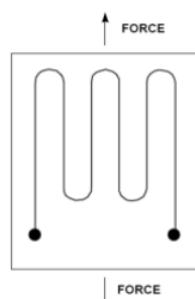
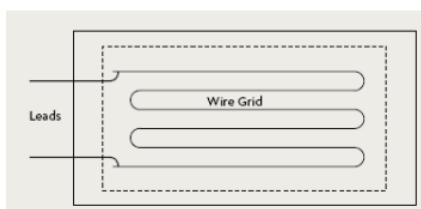
Materiály typické: Pt, Ni, Cu, Fe

Citlivost K: -12 Ni až +6 Pt

Rozměry: cm



### Lepené



#### Typické parametry:

Materiály typické: Pt, Ni, Cu, Fe

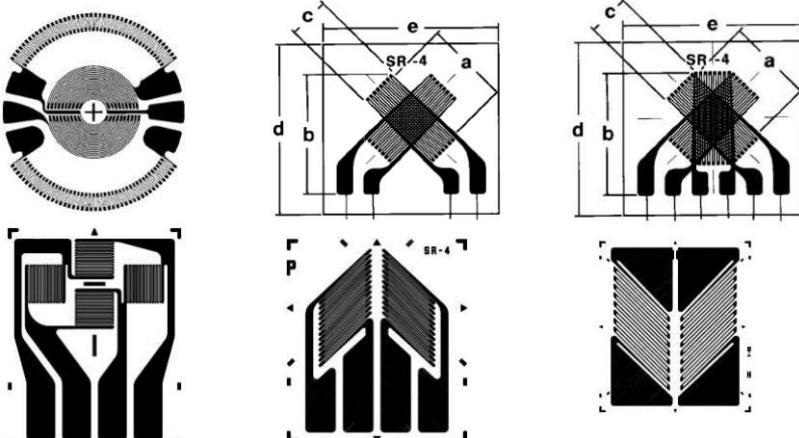
Citlivost K: -12 Ni až +6 Pt

Rozměry: cm

## Kovové tenzometry – fólioové

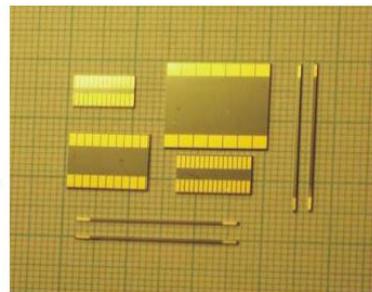
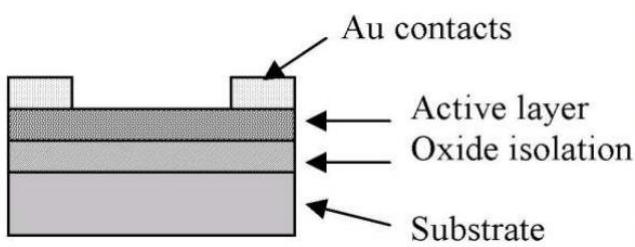
Zkouška

struktury pro speciální aplikace



## Kovové tenzometry – s tenkou odporovou vrstvou

Řez strukturou

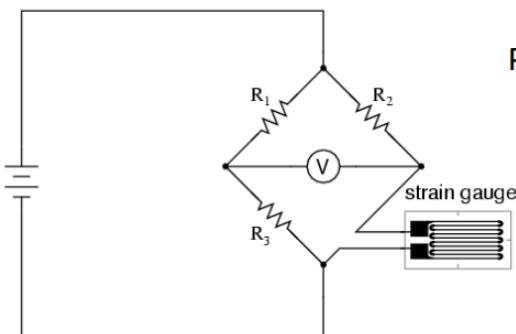


Technologie – aktivní vrstva naprašováním (např. Si) na nosnou destičku

## Tezometry – vyhodnocovací obvody

Zkouška

Wheatstoneův můstek (nejčastěji)



Podmínka pro vyvážený můstek:

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_{T4}}$$

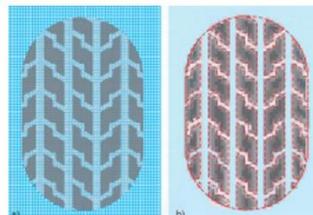
## Maticové taktilní senzory (MTS)

### Princip:

- Vytváření tlakových map ve styku s tělesem
- Základem MTS je matice senzorových prvků (jednotky až stovky)
- MTS měří rozložení sil (MTS napodobuje hmat).
- Slouží i k rozpoznávání

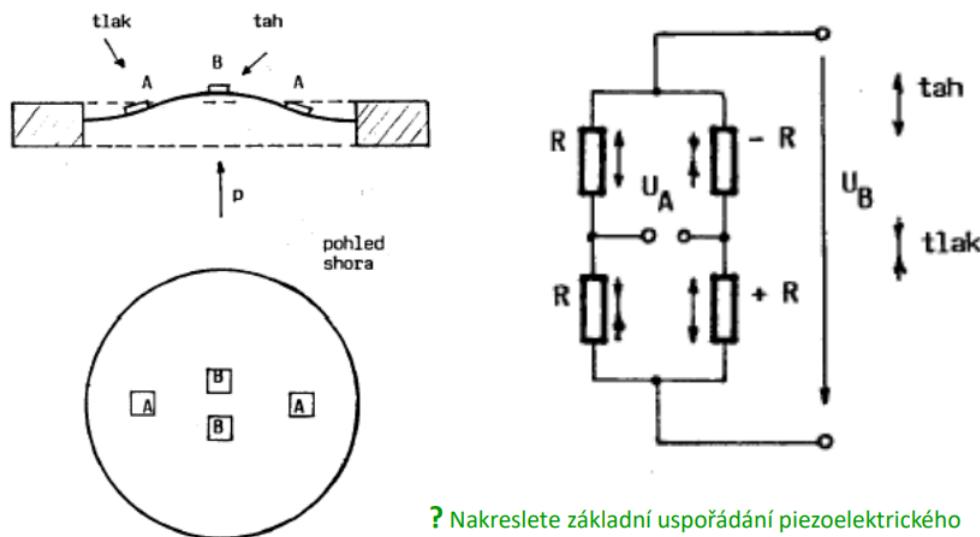
### MTS jsou schopné zjišťovat:

- přítomnost síly, polohu, orientaci, velikost, rozměry, tvar a jeho poruchy, oblast dotyku, identitu, vlastnosti povrchu (drsnost, textura) apod.
- dynamometrické vlastnosti jako tlak, rozložení tlaku, sílu dotyku, rozložení sil, hmotnost, tření, elasticitu apod.



Rozložení zatížení na pneumaticce

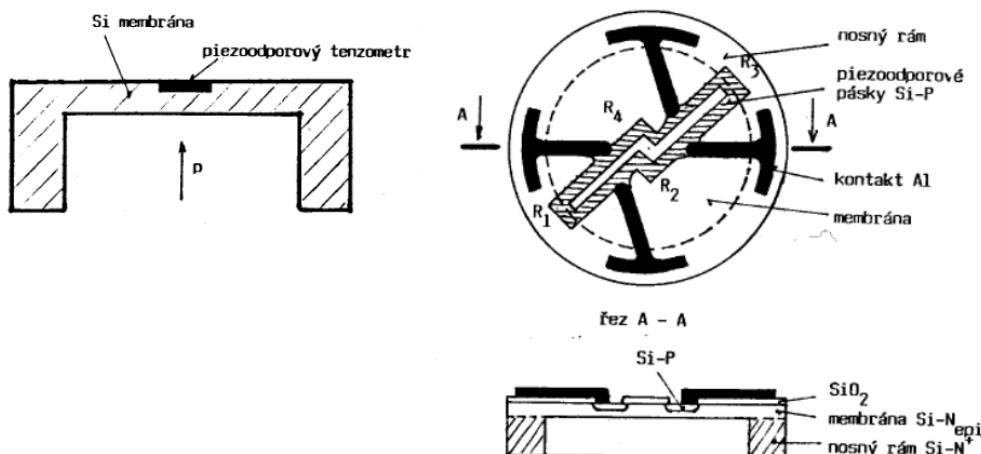
## Piezoodporové senzory tlaku



? Nakreslete základní uspořádání piezoelektrického

## Uspořádání piezoodporů (tenzometrů) na membráně

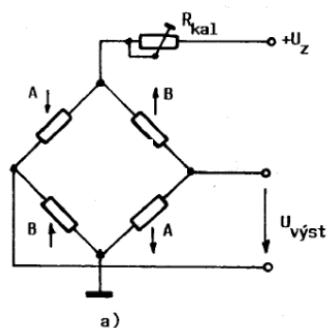
### Příklad struktury tlakového senzoru



## Zpracování signálu z piezoodporů + kompenzace

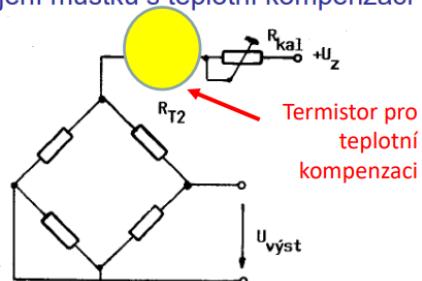


Základní zapojení můstku



a)

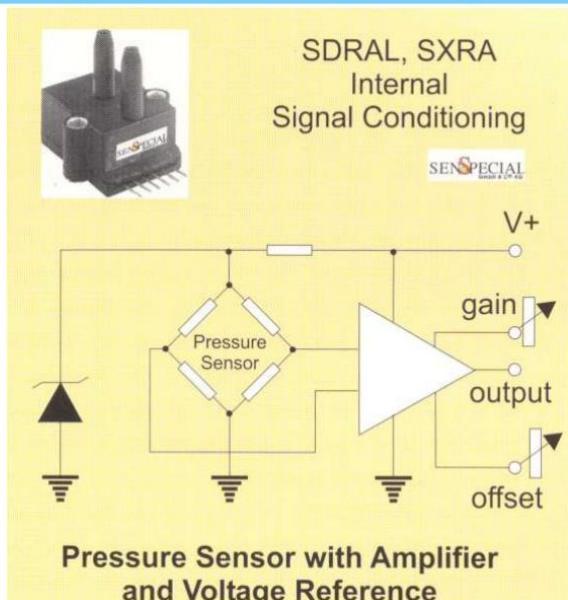
Zapojení můstku s teplotní kompenzací



Termistor pro  
teplotní  
kompenzaci

b)

## Zpracování analogového signálu z piezoodporého můstku



## Tepelní senzory

### 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

- podle styku s měřeným prostředím
  - dotykové
  - bezdotykové

### Dotykové – dilatační

- kapalinové
- plynové
- bimetalové

### Bezdotykové

- tepelné (bolometry, pyrometry)
- kvantové

### Dotykové – speciální

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

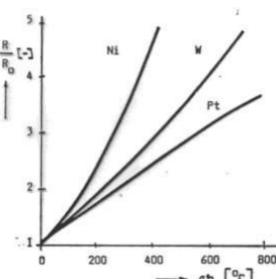
## Tepl. senzory – Odpovodové kovové (RTD)



### 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  $120^{\circ}\text{C}$
- **závislost  $R=f(\vartheta)$**  není lineární i když většinou mluvíme o lineárních odpovodových senzorech

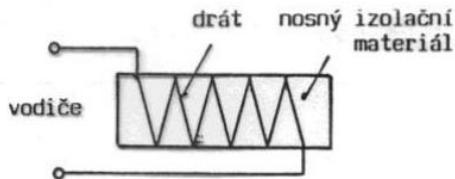
? Odpovodové teplotní senzory (RTD):  
Uveďte alespoň 2 typické materiály pro teplotní senzory, uveďte typický teplotní rozsah, napište základní rovnici pro approximaci průběhu odporu v malém rozmezí teplot ( $0 \div 100^{\circ}\text{C}$ ).



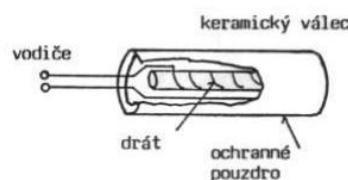
Pro malé rozsahy teplot se rovnice zjednodušíuje

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

### spirálové vinutí



### vinutí v keramickém pouzdře



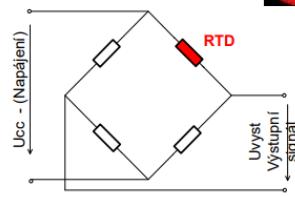
## Tepl. senzory – Vyhodnocování signálu z (RTD)



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

Nejčastěji se používají můstková zapojení

**Kompenzace odporu vedení** - dvou-, tří-, čtyř- vodičového zapojení



Wheatstoneův můstek – typický vyhodnocovací obvod

$I_A = 2I_R$

## Tepl. senzory RTD - shrnutí

- malý odpor -  $100 \Omega$  (nejběžnější) až  $1000 \Omega$
- široký rozsah pracovních teplot (-200 °C to 850 °C)
- dobrá citlivost (v porovnání s termočlánky)
- velká přesnost ( $\pm 0,0006$  °C až 0,1°C)
- opakovatelnost a stabilita
- malý drift (0,0025 °C/rok), průmyslové modely - drift < 0,1 °C/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  $v_1$ ,  $R_2$  pro  $v_2$ )

Teplotní koeficient odporu

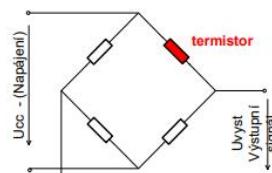
$$\Delta R = R_0 \alpha \Delta T \Rightarrow \alpha = -\frac{B}{T^2}$$

Vyhodnocování informace o změně teploty

Wheatstoneův můstek

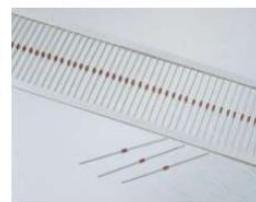
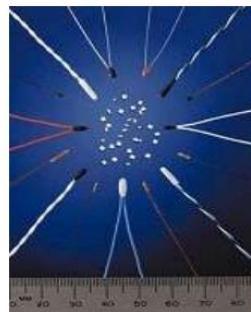
? Odporové polovodičové teplotní senzory s termistory:

Napište rozdíl mezi termistory NTC, PTC, nakreslete typické převodní charakteristiky, Nakreslete zjednodušené obvodové zapojení pro vyhodnocování teploty.



## Odporové polovodičové teplotní senzory

- Velký odpor  $1 k\Omega$  to  $100 k\Omega$ 
  - Eliminuje vliv odporu přívodních vodičů
- Nelineární závislost na teplotě.
  - zejména NTC → 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

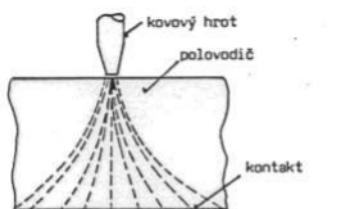
## Polovodičové senzory s odporem šíření



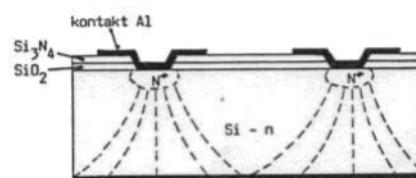
Princip – odpor šíření se uplatňuje v místě styku kovového hrotu s polovodičem. Odpor pak závisí pouze na rezistivitě  $\rho$  a poloměru kontaktu  $r$ .

$$R=f(r, \rho)$$

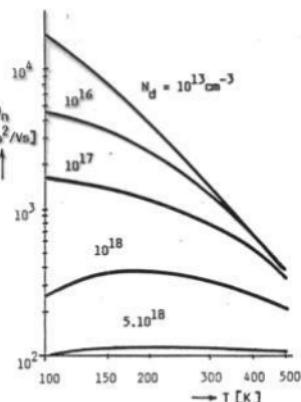
Využívá se kladný teplotní součinitel (pro Si od  $-50 \div 150^\circ\text{C}$ ). S rostoucí teplotou klesá pohyblivost volných nosičů náboje.



Princip teplotního senzoru pracujícího na principu odporu šíření



Praktické uspořádání senzoru teploty



Teplotní závislost pohyblivosti v n-typu křemíku pro různé dotační koncentrace

## Polovodičový monokrystalický Si senzor teploty

Je z nevlastního polovodiče typu N (s dominantní elektronovou vodivostí).

Symetrické uspořádání senzoru umožňuje využiti 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.

Odpor je dán vztahem:

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

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

Teplotní závislost lze approximovat vztahem

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

Typické hodnoty monokrystalického senzoru:

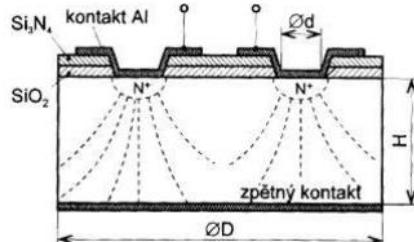
$$\vartheta_r = -241,52^\circ\text{C}$$

$$R_r = 16 \Omega$$

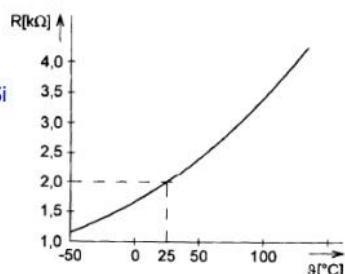
$$k = 2,7931 \cdot 10^{-2} \Omega \text{K}^{-2}$$

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

Uspořádání monokrystalického Si senzoru teploty

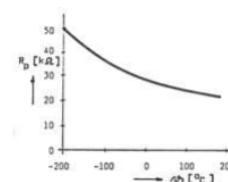
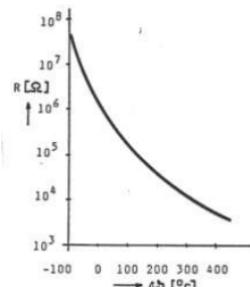
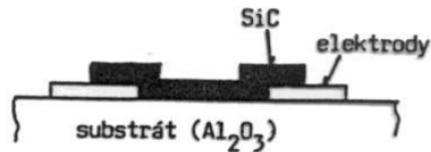


Charakteristika Si senzoru teploty



## Tenkovrstvové odporové polovodičové teplotní senzory

- Tenkovrstvý Pt senzor
  - Lineární charakteristika
  - Citlivost  $0,44\Omega K^{-1}$
  - Výroba – naprašováním na skleněnou podložku
- Tenkovrstvý SiC senzor
  - Stabilní, přesné, nelineární, nenavlhá
  - $-100 \div 450^\circ C$
  - $\alpha$  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  $\Delta\theta=75^\circ C \rightarrow \Delta t=60 \div 100ms$



## Teplotní senzory s přechodem P-N

Pro měření lze využít všech diod (Si, Ge, GaAs) charakteristika je mírně nelineární. **Varikapy** – nejlepší, stálé parametry

**Proud diodou**

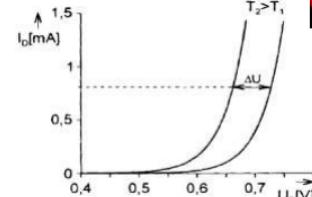
$$I = I_s \left( e^{\left( \frac{U}{n \frac{kT}{q}} \right)} - 1 \right) \Rightarrow U \doteq \frac{kT}{q} \ln \frac{I}{I_s}$$

n – parametr, rekombinační koeficient

$I_s$  – saturační proud

U, I – napětí a proud v propustném směru

$$U_T = \frac{kT}{q}$$



$\Rightarrow U = \text{konst} \cdot T$  pokud  $I_s = \text{konst.}$ , v reálu ale  $I_s = f(T) \Rightarrow U \neq \text{konst} \cdot T$  – charakteristika je obecně nelineární

## Teplotní senzory s přechodem P-N - citlivost

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

## Teplotní senzory s přechodem P-N – Zenerova dioda

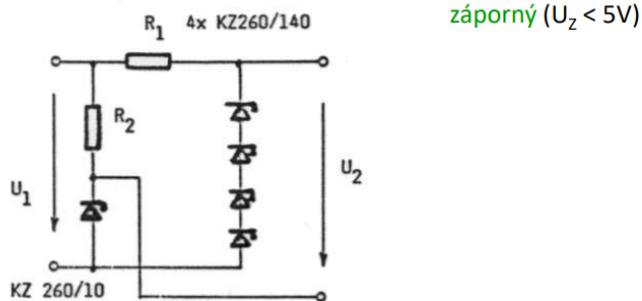
- Zenerova dioda jako teplotní senzor

- 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 ( $U_z > 5V$ )

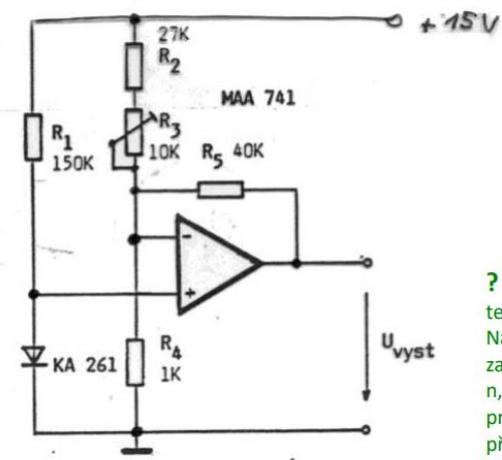
záporný ( $U_z < 5V$ )



## Tepl. senzory s přechodem P-N – vyhodnocování signálu



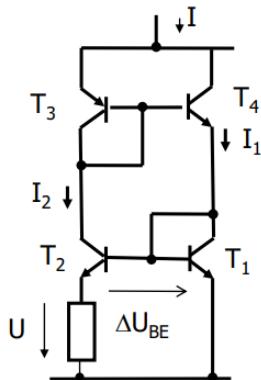
Základní zapojení jednoduchého převodníku T/U



? 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 - Bipolární

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



$$T_1: U_{BE1} = \frac{kT}{nq} \ln\left(\frac{I_1}{I_0}\right) \quad I_1 = I_2 = N \cdot I_{T21}$$

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

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



## Integrované tepl. senzory – 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  $U_{GS}$ )

Tento způsob se příliš nevyužívá, je obtížné získat dobrou linearitu převodní charakteristiky

## Integrované tepl. senzory – CMOS (slabá inverze)

- mají podobné chování jako bipoláry  $\rightarrow$  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

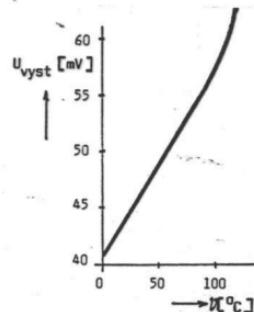
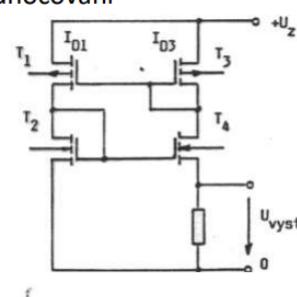
$I_{D0}$  – charakteristický proud

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

Linearita – lepší než 0,1%

Teplotní koeficient – 0,162mV/K

Čip – 0,1mm<sup>2</sup>



Aplikace: Tepelná ochrana audiotekniky; Tepelné ochrany procesoru; Regulace otáček ventilátoru

# Termoelektrické teplotní senzory – Princip

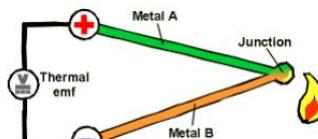
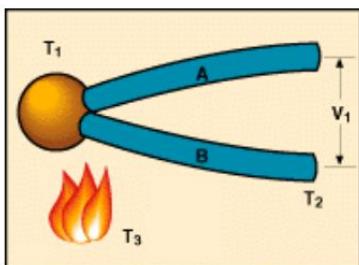


## Princip:

Dva různé kovy (eventuálně polovodiče) spojené svařením, pájením nebo výjimečně mechanicky

## 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

## Termoelektrické teplotní senzory – Kovové

- Výběr materiálu záleží na:
  - Teplotním rozsahu
  - požadované přesnosti
  - Požadované chemické odolnosti
  - Odolnosti vůči mechanickému opotřebení a vibracím
  - Požadavky na instalaci (velikost drátu)
- Chromel-Constantan (E křivka)
  - Pro použití pro teploty vyšší než  $870^{\circ}\text{C}$  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  $1540^{\circ}\text{C}$ .
- Wolfram-Rhodium (C křivka)
  - Používají se pro měření teplot vyšších než  $2760^{\circ}\text{C}$ .

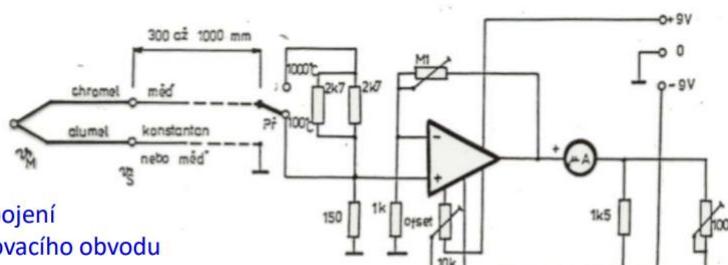
Termoelektrické kovové  
senzory: Uveďte 3 základní  
kovových termočlánků. U  
typické materiály, Nakres  
typické charakteristiky.

## Termoelektrické tepl. senzory – vyhodnocování signálu



## Princip:

- Měření výstupního napětí termočlánku
- Měření voltmetrem



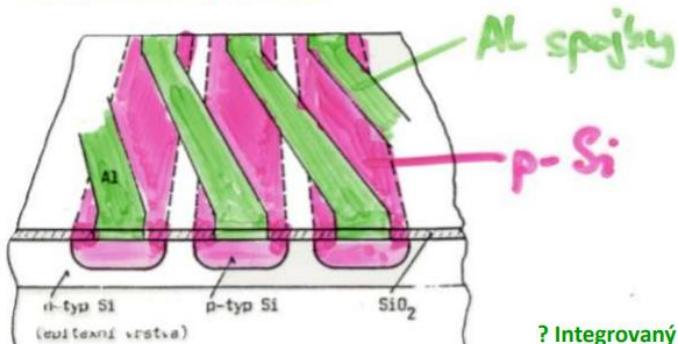
Příklad zapojení  
vyhodnocovacího obvodu

## Termoelektrické tepl. senzory – Integrované

### Využití:

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

### Termoelektrická baterie



? Integrovaný termoelektrický článek: Nakreslete

## 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.

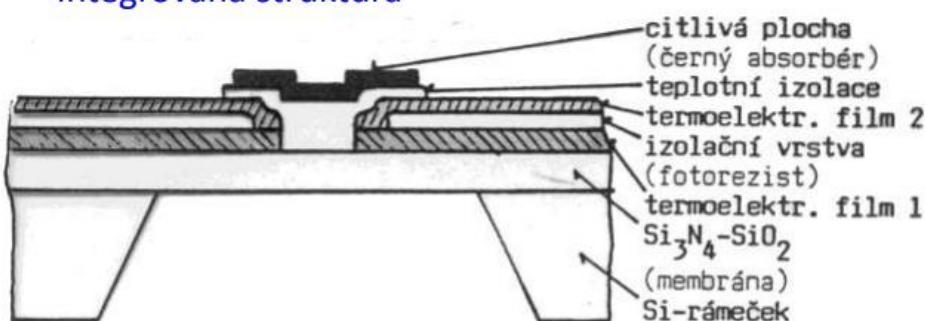
### ☺ Výhody:

- 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  $0,5 - 1 \text{ mV/K}$  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 vakuu

### Termoelektrická integrovaná struktura



## 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 senzorům 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.

**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

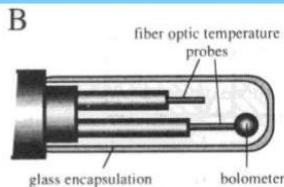
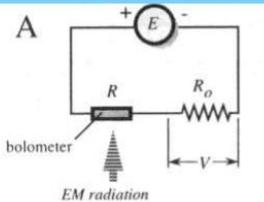
Termistorové bolometry – kysličníky MgO, MnO, NiO, TiO<sub>2</sub> (kosmická zařízení)

Vrstvové bolometry – chalkogenidové sklo Ti<sub>2</sub>SeAs<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>

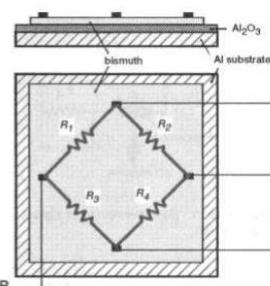
Germaniové, křemíkové bolometry – chladí se na teplotu kapalného hélia, používají se při kosmických měřeních

Suprovodičové bolometry; Pyroelektrické bolometry

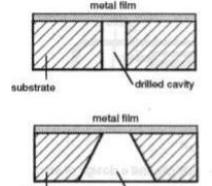
## Odporové senzory tepelného záření - Bolometry



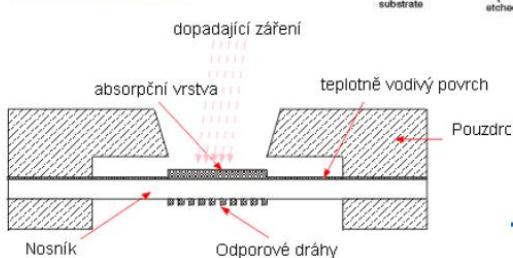
Struktura integrovaného můstku z bolometrů



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.

# Širokopásmové bolometry

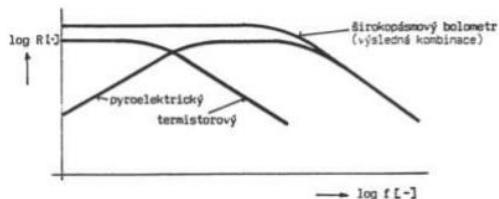
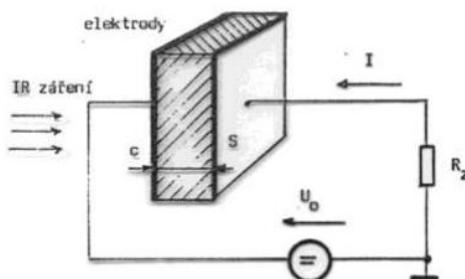
**Princip:** využívá se kombinace různých fyzikálních jevů (termistorového, pyroelektrického)

**Materiály:** pyroelektrický materiál u kterého je vodivost funkcí teploty



**Kompenzace teploty okolí:** můstkové zapojení dvou stejných senzorů

## Konstrukce



Princip výhodnocování informace

## Bolometry - Parametry

- Jsou rychlé - krátká časová konstanta (až 1 ms)
- Velká citlivost
- Spektrální citlivost 1,6 až 5000  $\mu\text{m}$
- 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  $\mu\text{m}$ )
- Není zde žádné ovlivnění měřeného objektu
- U mikrobolometrů velký počet snímačů (i přes 80 tisíc) na malé ploše => infračervené snímaní obrazu s rozlišením až 320x240 pixelů
- Vysoká cena
- U některých typů je nutné chlazení

## Bolometry - Aplikace

- 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

## Krystalový teplotní senzor

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

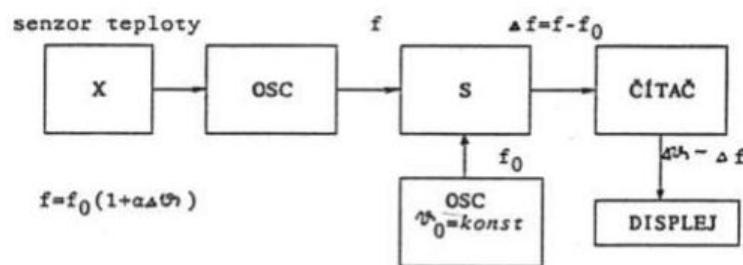
**Vyhodnocování:** - oscilátorový obvod, dělič...

- 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 heterodynenního zpracování signálu

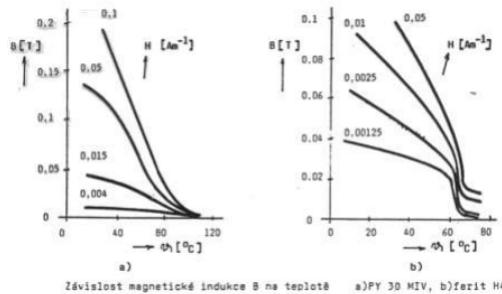
### Heterodynenní zpracování signálu z krystalového senzoru



## Magnetický teplotní senzor

**Princip:  $B=f(\theta)$**

při  $H=\text{konst.}$



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

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

**kovy:** thermalloy, calmalloy, thermoperm

**ferity:** ve tvaru toroidu

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

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

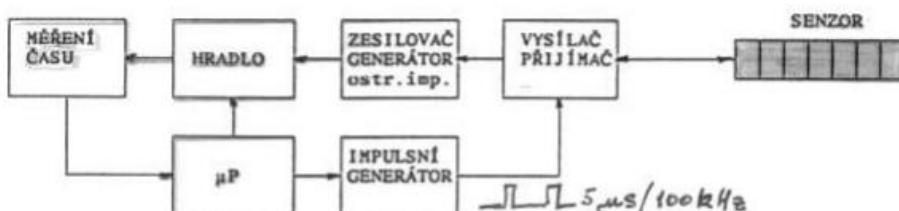
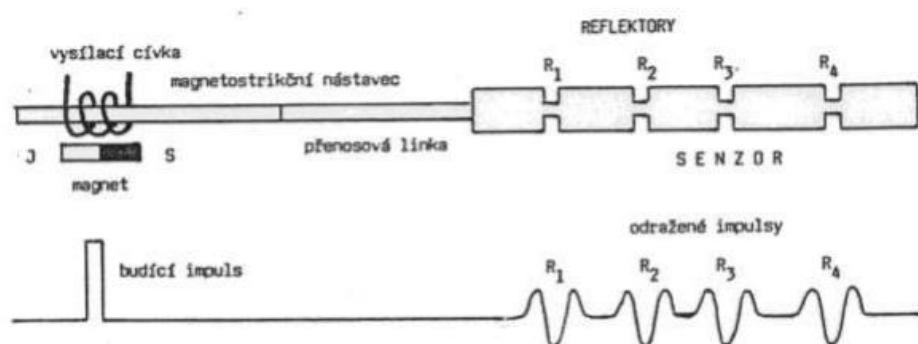
# Ultrazvukový teplotní senzor

**Princip:** rychlosť šírenia zvuku v látke závisí na teplote, mieri sa čas šírenia ultrazvukových impulsov

$$v=f(\vartheta)$$

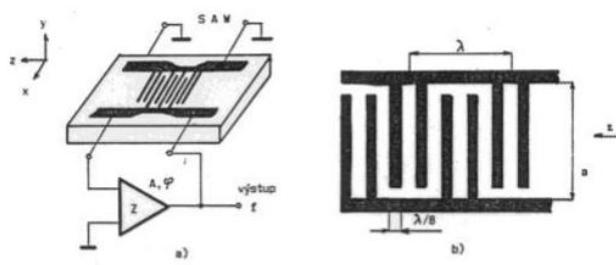
$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Konstrukce:

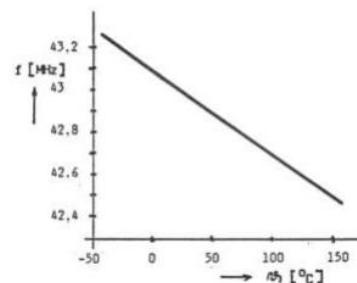


## SAW teplotní senzor

**Princip:** Využívá se teplotní závislosti rychlosťi šírenia povrchové akustické vlny v určitém materiále ( $\text{LiNbO}_3$ )



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

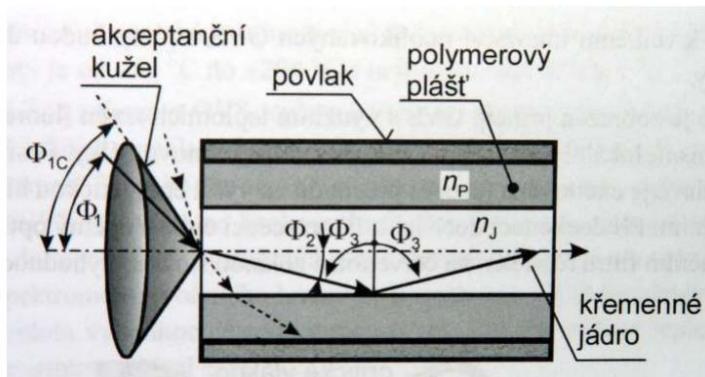


Teplotní závislost  
frekvence oscilátoru se  
senzorem SAW

**Typická závislosť:** citlivosť  $4\text{kHz}/^\circ\text{C}$ , rozdiel frekvencií pro  $9=-50^\circ\text{C} \div 150^\circ\text{C}$  je  $\Delta f=800\text{kHz}$

## Teplotní senzor s optickým vláknem

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



## Senzory pro měř. kryogenních teplot – temoelektr. odpor

### 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,  $\gamma$  – jsou konstanty určené měřením

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

Termistor: až od 20 K

? Teplotní senzory pro měření kryogenních teplot: Napište alespoň 4 základní typy teplotních senzorů. Jaké nevýhody mají termočlánkové, Do jakých

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

### C) Kapacitní teplotní senzory

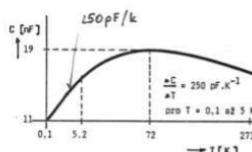


Konstrukce vhodná pro měření teplot v silném magnetickém poli.

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  $T=1\div30$  K)

**Nevýhoda:** značná citlivost na magnetické pole

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

## Senzory průtoku

## Senzory průtoku: Základní informace

- Měření průtoku patří mezi **nejčastěji měřené veličiny**.
- Měřené médium se může vyznačovat **velkým množstvím různých stavů a vlastností** (např. teplota, tlak, měrná hmotnost, viskozita apod.).
- Tekutiny od sebe **lišit** barvou, elektrickou vodivostí, znečištěním, výbušností a chemickými vlastnostmi.
- Při měření průtoku se objevují požadavky na **měření časové změny průtoku**, případně na rozložení rychlosti v průřezu průtokového kanálu.
- Pro optimální návrh senzorů je nezbytné znát, zda jde o proudění **laminární** nebo **turbulentní**.
- Vývoj senzorů průtoku je v současné době soustředěn především pro okrajové oblasti (**velmi malé a velké průtoky**) a extrémní podmínky (tekuté kovy, agresivní kapaliny apod.).
- Velké množství různých fyzikálních principů** při navrhování a konstrukci měřiců průtoku.

## Senzory průtoku: Základní informace

- laminární nebo turbulentní proudění
- různé druhy tekutiny (plyn, kapalina, pára)
- pracovní režim (spojitý, nespojitý)
- parazitní vliv snímače na průtok média (tlaková ztráta snímače)
- speciální požadavky na průtokový kanál (poloha, uklidňovací dráha)
- časová konstanta senzoru
- další

## Přehled průtokoměrů podle fyzikálních principů

### Objemové senzory průtoku

- **nespojité** – zvonové
- **spojité** - kyvné
  - \* bubnové – mokrý, suchý
  - \* pístové – rotační píst, přímočarý píst

U senzorů je průtok převáděn většinou na impulzní výstupní signál, což je výhodné pro další zpracování. Všechny typy senzorů jsou **velmi náročné na řešení mechanické části**.

### Rychlostní senzory průtoku

- **lopatkové** – jednovtokové, vícevtokové
- **šroubové (turbínkové)**, - jeden rotor
  - dva rotory – pružně spojeny
    - \* jeden brzděn
    - \* uloženy nezávisle
- **rotující kulička**

Rychlostní snímače jsou používány velmi často především v hydraulických systémech a měřicích spotřeby. Výstupní signál je impulzní.

## Přehled průtokoměrů podle fyzikálních principů

### Senzory s deformačním členem

- membrána
- jednostranně větvený nosník
- pevné šroubové kolo
- jiné deformační členy

Protékající tekutina působí dynamickým tlakem na deformační člen.

Výstupní signál je mechanické napětí nebo výchylka.

### Průřezové senzory

- clona, dvojitá clona, segmentová clona
- dýza, Venturiho dýza
- Pitot-Venturiho snímač
- Víceotvorový tyčový snímač (rychlostní sonda)

Protékající tekutina způsobí na změně průřezu rozdíl tlaků.

Výstupním signálem je u většiny těchto senzorů tlaková diference.

## Přehled průtokoměrů podle fyzikálních principů

### Plovákové senzory

- pohyblivý plovák
- pohyblivý píst

Silovým účinkem tekutiny a gravitační síly je měněna poloha pohyblivé části snímače.

Výstupním signálem u těchto snímačů je změna polohy, výchylky.

### Indukční senzory

- s elektrodami
- bez elektrod

Používají se pouze pro měření elektricky vodivých kapalin a tekutých kovů.  
Představují jedno z nejlepších řešení daného problému.

### Ultrazvukové senzory

- kontaktní
- bezkontaktní

Většinou se používají pro měření průtoku tekutin v potrubích o větším průměru.

Neobsahují pohyblivé části. Používají se pro speciální aplikace.

## Přehled průtokoměrů podle fyzikálních principů

### Hmotnostní průtokoměry

Snímače pracují na principu Coriolisovy síly.

Využívají se pro měření hmotnostního průtoku kapalin, plynů a páry.

### Využití senzorů rychlosti Pitotova trubice

- Prandtlova trubice
- válcové a kulové snímače rychlosti
- odporové rychlostní snímače (anemometry)
- ionizační rychlostní snímače
- laseranemometry

## Přehled průtokoměrů podle fyzikálních principů

### Tepelné senzory

- anemometrické
- kalorimetrické

### Fluidikové (oscilační) senzory

- využívající precese osového víru, vířivé
- využívající vírové stezky za přepážkou (vírové průtokoměry)
- oscilační snímače (multivibrátor)

Senzory se vyznačují jednoduchostí a relativně vysokou přesností. Měronosnou veličinou na výstupu je kmitočet nebo unifikovaný signál.

### Senzory využívající značení tekutiny

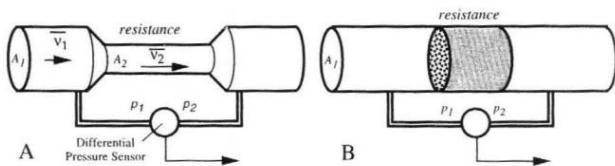
- vodivostní značky
- tepelné značky
- optické značky
- speciální značky (ionizační, magneticky resonanční)

Princip měření časového intervalu mezi vysláním a indikací značky mezi dvěma definovanými body ve směru proudění tekutiny. Používají se pouze ve speciálních případech.

## Tlakové gradientní průtokoměry (průrezové senzory)

- Měření tlakového rozdílu
- Využívá se Bernoulliho rovnosti.
- Rychlosť průtoku se určuje měřením tlaku během proudění.
- Tato technika měření průtoku využívá tzv. proudícího odporu.
- V Bernoulliho rovnováze dojde ke změně tlaků, pro rychlosť průtoku platí:

$$v_{2a} = \frac{1}{\sqrt{k(1-R^2)}} \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p}$$

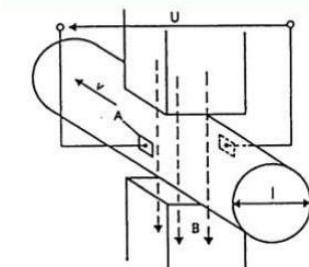


? Průtokoměr založený na tlakovém gradientu: nakreslete a vysvělte princip činnosti

☺ Výhoda: Neobsahuje žádné pohybové komponenty.

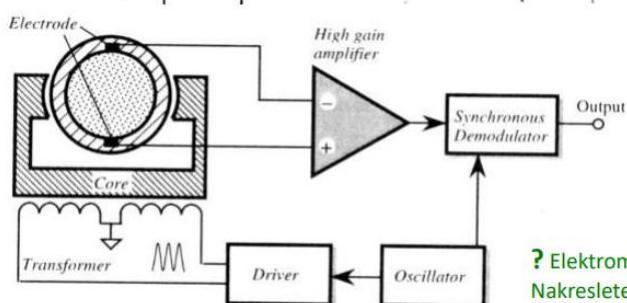
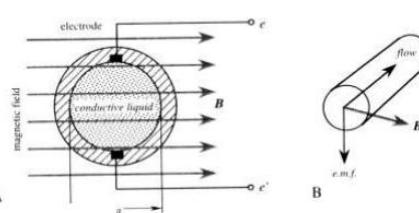
○ Nevýhoda: Omezení průtoku rezistivním prostředím.

## Elektromagnetické (indukční) průtokové senzory



U = indukované napětí  
I = průměr potrubí  
v = vektor střední průtočné rychlosti  
B = magnetická indukce

$$U = \frac{1}{\pi a^2} \int_0^a 2\pi v r dr$$



Požadavek: Pouze pro elektricky vodivé materiály

$$U = B v l$$

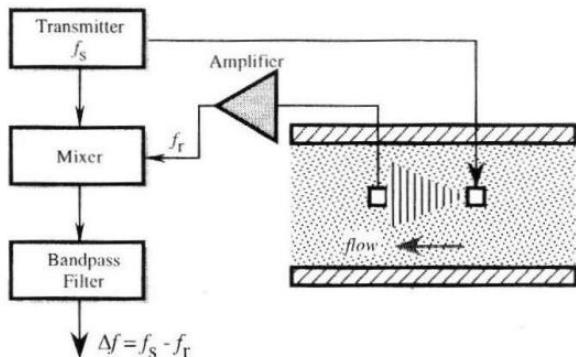
? Elektromagnetický (indukční) průtokový senzor: Nakreslete a vysvělte princip činnosti, napište

# Ultrazvukové (Dopplerovy) průtokové senzory

Zkouška

**Princip:** Dopplerův princip, změna frekvence nebo fázový posuv

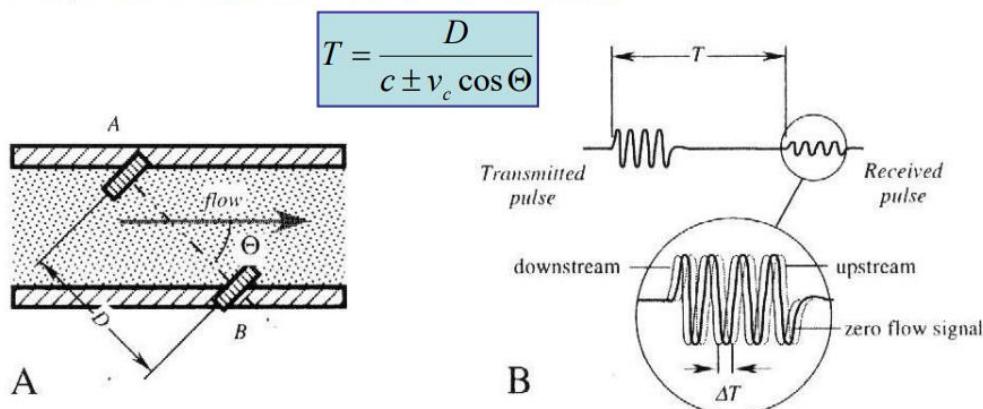
- založen na na **Dopplerovém jevu** (rychlosť šíření ultrazvuku v kapalině se skládá s rychlosťí kapaliny)
- Vysílací a přijímací prvek umístěny uvnitř proudění
- **Rozdílová frekvence  $\Delta f$**  je přímo úměrná rychlosti průtoku
- Velikosti rozměry vysílačů a přijímačů – mnohem menší, než je průřez trubice



? Ultrazvukový průtokový senzor:

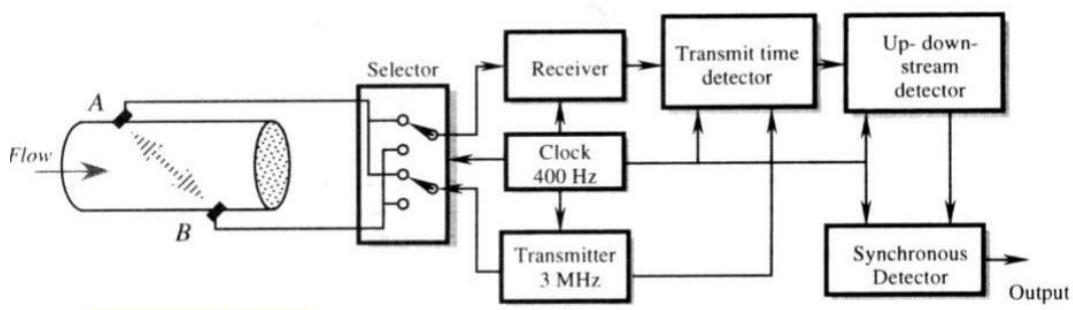
Nakreslete a vysvělte princip činnosti se senzory umístěnými v ose průtoku, se senzory umístěnými pod úhlem, nakreslete princip vyhodnocování průtoku rozdílem frekvencí nebo fázovým posuvem.

- Hlavní idea je detekce **fázového posunu** vlivem proudícího média
- Obsahuje dva piezoelektrické senzory pro generování i příjem US
- Doba průchodu ultrazvuku mezi dvěma snímači A a B



## Principiální zapojení vyhodnocovacích obvodů

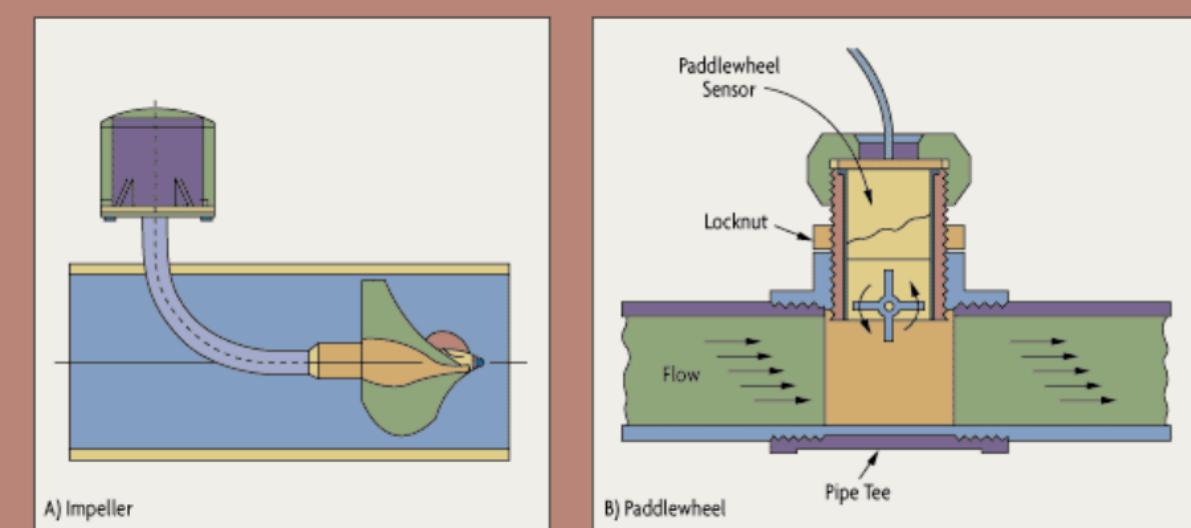
Pro zlepšení odstupu signál-šum se používá průchod ultrazvuku v obou směrech



$$T = \frac{D}{c \pm v_c \cos \Theta}$$

# Rychlostní turbínkové průtokové senzory

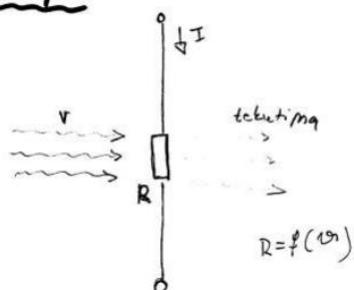
Zkouška



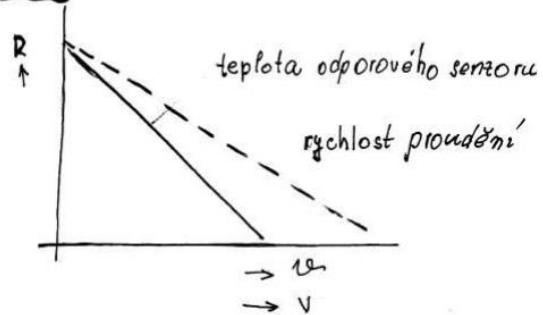
## Anemometrické průtokové senzory: Princip

Zkouška

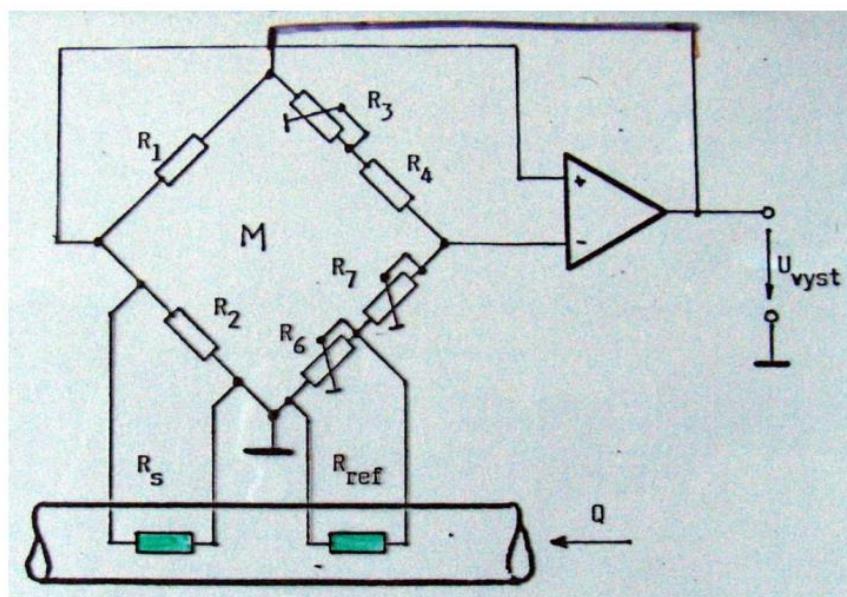
Princip:



Informace:



Vyhodnocovací obvod – konstantní teplotní diference



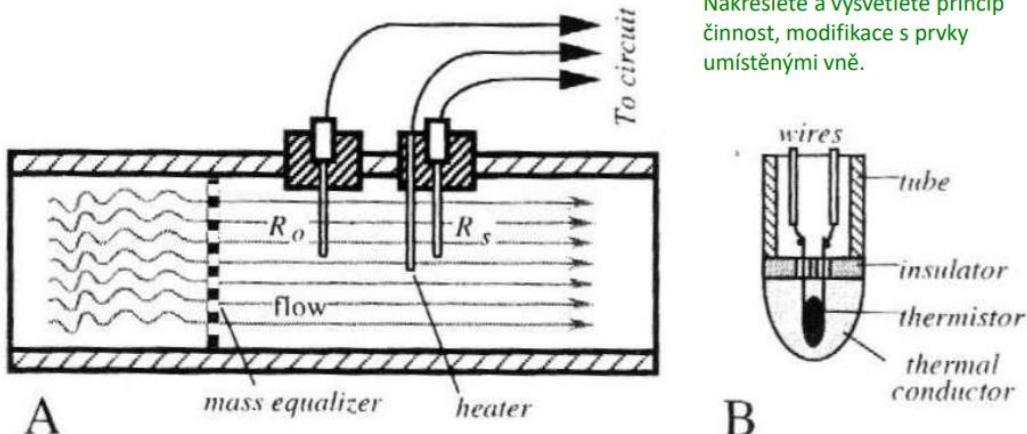
## Kalorimetrický senzor průtoku s tepelnými značkami



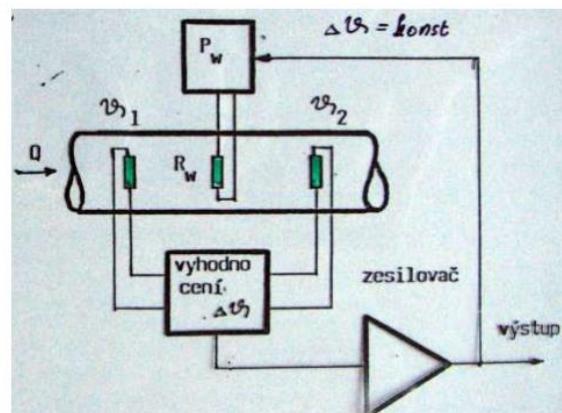
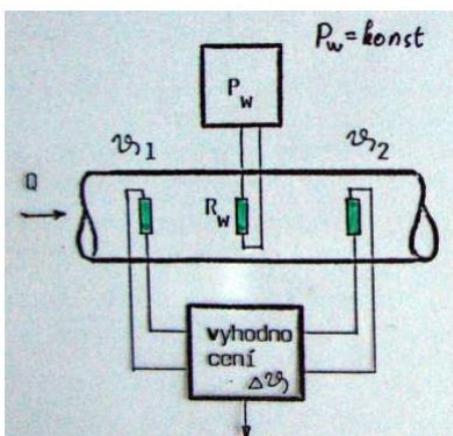
### Princip

- Teplotně označuje proudící médium a detekuje posun označeného média.
- Obsahuje teplotní senzory  $R_o$  a  $R_s$  a ohříváč.
- Měří se teplota ohřátého média.

? Kalorimetrický senzor průtoku s tepelnými značkami:  
Nakreslete a vysvětlete princip činnost, modifikace s prvky umístěnými vně.



Thomasův teplotní průtokoměr s konstantním ohřevem P

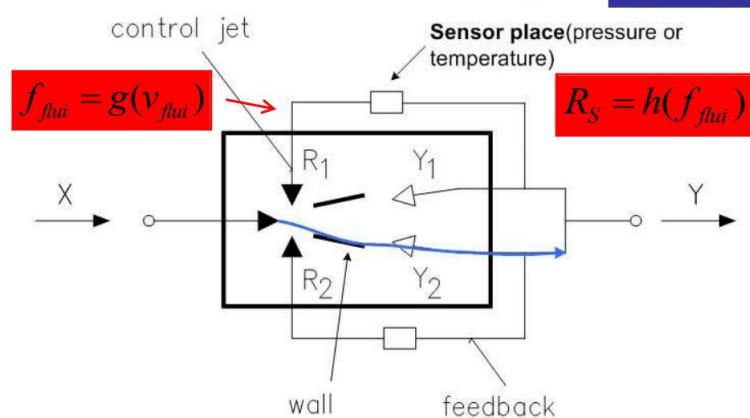


Thomasův teplotní průtokoměr s konstantním teplotním rozdílem

## Senzory průtoku (fluidický oscilátor)

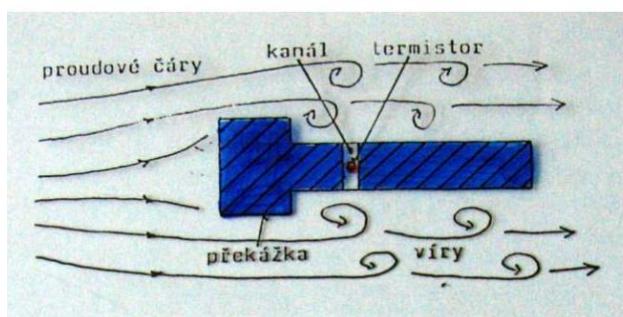
Princip fluidického oscilátoru – rychlosť poudění  $v_2$

$$v_2 > v_1$$

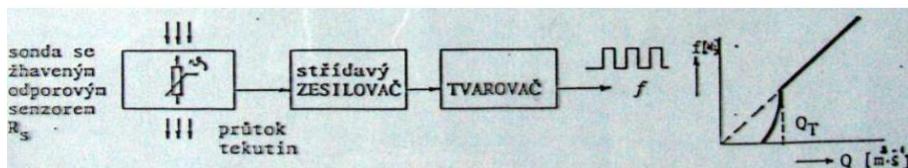


## Senzory průtoku oscilační vírové

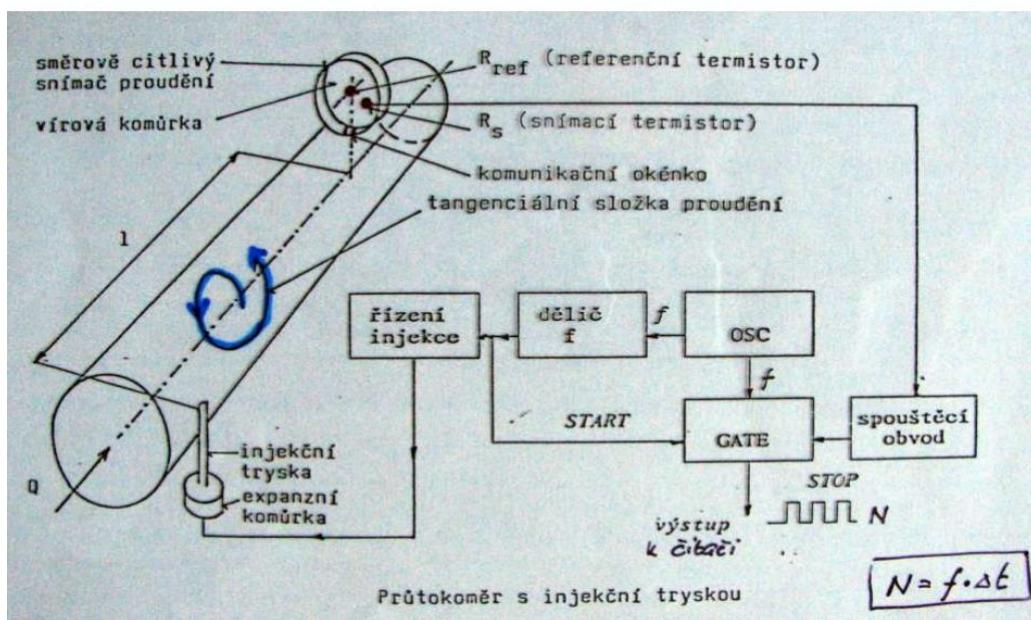
Zkouška



? Senzor průtoku  
oscilační vírový:  
Nakreslete a vysvělte  
princip činnosti, princip  
vyhodnocování signálu.



## Senzory průtoku se značkami v tekutině



## Akcelerometr

## Akcelerometr:

### Akcelerometr - senzor pro měření:

- **dynamické zrychlení** - síla vzniklá změnou rychlosti pohybujícího se předmětu (senzoru)
- **statické zrychlení** - síla vzniklá působením zemské gravitace  
(Pozn.: Při měření dynamického zrychlení je nutné přitomnost statickou složku filtrovat)

### Měření náklonu (úhlu)

Detekce změny náklonu měřením zemské gravitace (statické zrychlení).



### Měření setrvačných sil

Měření rychlosti, vzdálenosti nebo síly - zrychlení integrované přes čas se rovná rychlosti objektu a rychlosť integrovaná přes čas je rovná vzdálenosti.



Použití - airbag aut, navigační systémy, řízení výtahů apod.

### Měření otřesů (nárazu) nebo vibrací

Měření vibrací (např. stroje nebo zemětřesení), kontrola „správného“ chodu stroje (predikce zadření ložisek apod.)

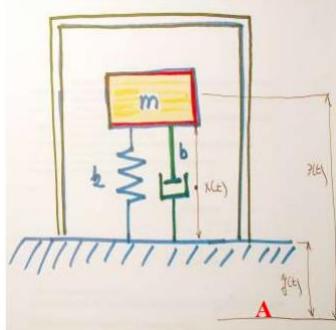


## Akcelerometr: Princip činnosti



- **Měření absolutního zrychlení** - měření zrychlení vůči zemi, např. zemská přitažlivost
- **Měření relativního zrychlení** - měření zrychlení hmoty vůči pohybujícímu se předmětu

Model absolutního akcelerometru



### Relativní / absolutní senzory ?

- **absolutní senzory** využívají vztažný bod vytvořený uvnitř senzoru
- poloha vůči tomuto bodu se pak měří **relativním senzorem** umístěným uvnitř absolutního senzoru

? Akcelerometr: Nakreslete a vysvětlete princip činnosti, co je to seismická hmota, napište základní rovnici popisující pohyb hmoty u jednoosého akcelerometru.

## Akcelerometr se skládá z:

- **základna** pevně spojená s měřeným objektem (M)
- **pružně** (k) uložena **setrvačná hmota** (m), jejíž výchylka vůči základně je vyhodnocována
- **tlumení** (viskózní) reprezentováno jak fyzickými tlumiči, tak např. prouděním vzduchu při nohavu hmoty

## Akcelerometr: Princip činnosti



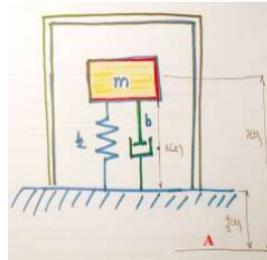
### Pohybová rovnice pro mechanickou soustavu

při vztažném bodu **A**, vůči kterému měříme kmity objektu  $y(t)$  - mechanická soustava je popsána rovnováhou setrvačné hmoty. Direktivní a tlumící síly, tj. pohybovou rovnici:

$$m \frac{d^2z}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + ky = 0$$

Pro časově proměnné složky (základní rovnice):

$$z(t) = x(t) + y(t)$$



## Akcelerometr: Piezoelektrický

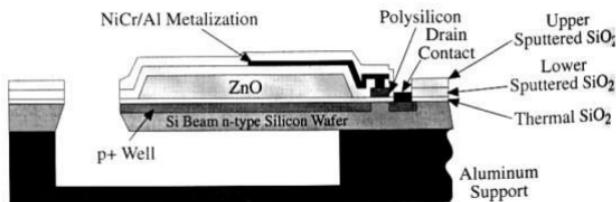
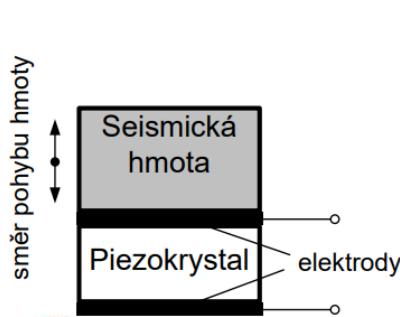


### Princip

- Měří se poloha seismické hmotnosti vůči pouzdrou senzoru – piezoelektrické napětí
- Využití kompresní nebo především smykové deformace (viz dále)

### Nevýhoda

Piezoelektrický akcelerometr **nelze použít** pro měření **statického** zrychlení - vzniklý náboj se vybíjí přes vnitřní odpor a svody



? Akcelerometr s principem piezoelektrickým: Nakreslete zjednodušeně základní strukturu a popište princip činnosti akcelerometru

## Akcelerometr: Piezoodporový



- Princip zjišťování mechanického napětí v piezoodporové struktuře
- Piezoodporový akcelerometr ...
- Nejjednodušší **princip tzv. vetknutého (kmitajícího) nosníku**

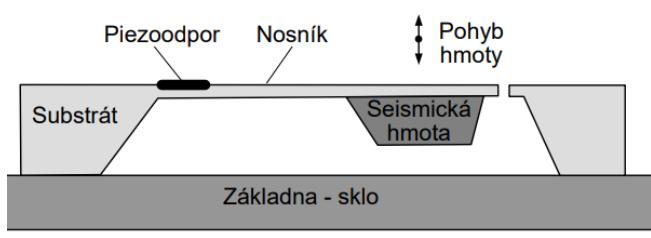
### Princip:

Pohybem hmoty dochází k prodlužování nebo zkracování piezoodporového elementu- princip tenzometru (změna ohmického odporu). Změna je úměrná výchylce hmoty.

### Použití:

Od stejnosměrných hodnot zrychlení asi do 13 kHz.

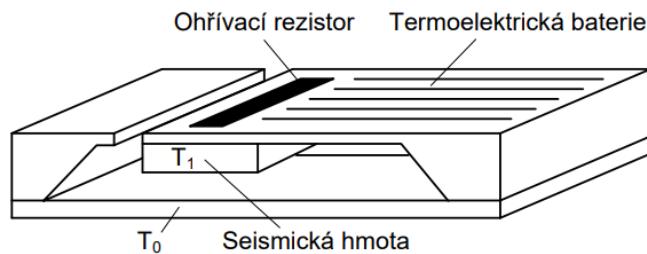
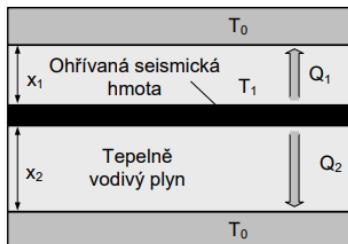
? Akcelerometr s principem piezoodporovým: Nakreslete zjednodušeně základní strukturu a popište princip činnosti akcelerometru



### Součásti:

- vetknutý nosník
- seismická hmota
- snímací prvky v místě deformace (vetknutí) nosníku (obvykle odporové tenzometry)

## Akcelerometr: Tepelný



### Princip:

Seismická hmota umístěna na tenkém nosníku a umístěna v blízkosti tepelné komory nebo mezi dvěma komorami. Hmota i nosník jsou vyrobeny mikroobráběním. Prostor mezi těmito komponenty je vyplněn teplotně vodivým plynem. Hmota je ohřívána na povrchu nebo zabudovaným ohříváčem na teplotu  $T_1$ . Pokud nepůsobí akcelerační zrychlení, potom je teplotní rovnováha mezi hmotou a ohřívanými komorami. **Množství tepla  $Q_1$  a  $Q_2$  vedené od hmoty do komor přes plyn je funkcií vzdáleností  $x_1$  a  $x_2$ .** Měření teploty na nosníku teplotním senzorem.

**Nevýhoda:** Citlivost akcelerometru je  $(1\% \text{ změny výstupního signálu})/g$ , je mnohem menší než u kapacitních nebo piezoelektrických.

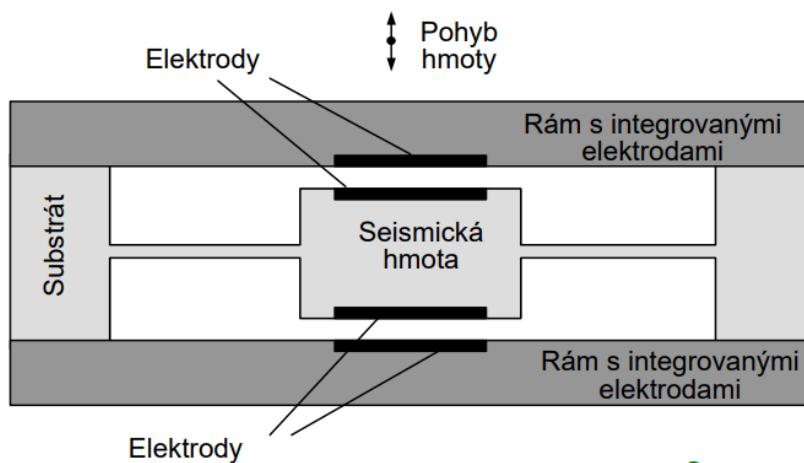
**Výhoda:** menší náchylnost k elektromagnetickému nebo elektrostatickému rušení.

## Akcelerometr: Kapacitní



### Princip činnosti (Diferenciální uspořádání):

- Pevné elektrody tvoří vůči seismické hmotě 2 kapacity
- Při pohybu dochází ke změně vzdálenosti desek - změna kapacit (1 roste, 2. klesá)
- Základ složitějších používaných uspořádání např. hřebenové

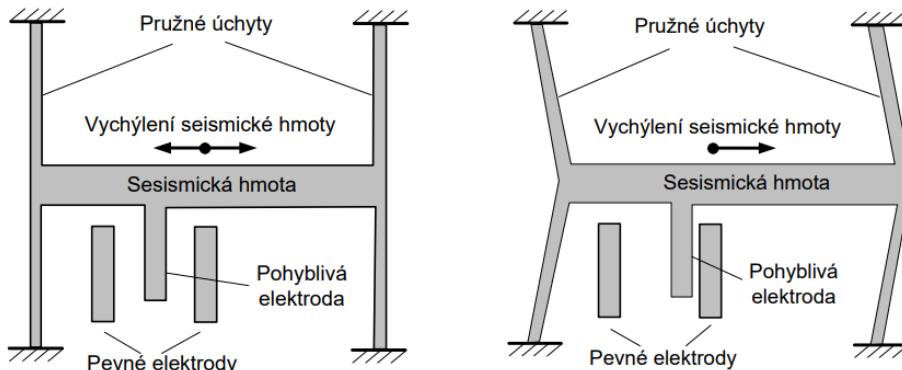


## Akcelerometr: Kapacitní s hřebenovým uspořádáním



### Hřebenové uspořádání kapacitního akcelerometru

- Paralelně pospojované diferenční kapacitory – desítky až stovky
- Část diferenčních kapacitorů může sloužit jako testovací-budíci (elektrostatický princip) – používáno např. v ADXL akcelerometrech fy Analog Devices, viz dále
- Seismická hmota (beam) s pohyblivými elektrodami je upevněna na pružných závěsech (tether), při akceleraci dojde k pohybu oproti rovnovážnému stavu ...

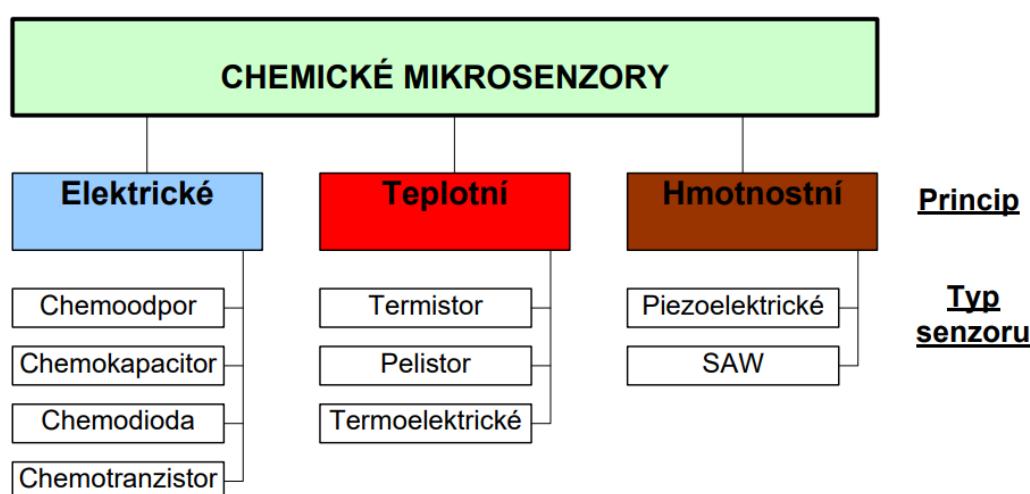


Aplikace: smartphones; chytré hodinky

### Senzory chemických veličin

## Senzory chemických veličin: Hlavní druhy

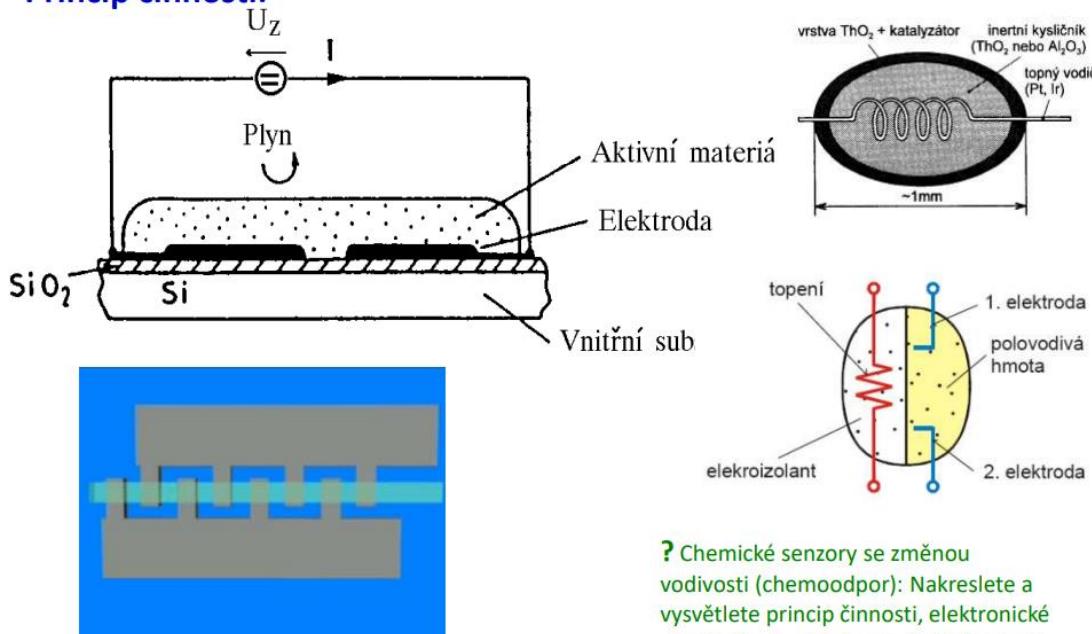
- **Anorganické senzory** - tvoří nejpočetnější skupinu senzorů pro chemický průmysl
- **Organické vrstvy** - senzory jsou ve vývoji
- **Biosenzory** - velký rozvoj v nejbližší budoucnosti



## Senzory se změnou vodivosti: Princip činnosti

Zkouška

### Princip činnosti:



? Chemické senzory se změnou vodivosti (chemoodpor): Nakreslete a vysvětlete princip činnosti, elektronické

### ☺ Výhody:

- vysoká citlivost
- jednoduchost konstrukce, a tím i nízká cena
- možnost miniaturizace
- relativně jednoduchá technologie
- slučitelnost s elektronickými součástkami a integrovanými obvody

### ○ Nevýhody:

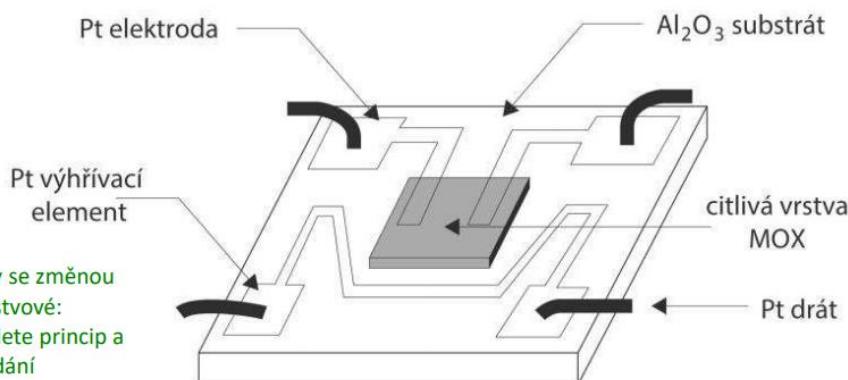
- malá dlouhodobá stabilita
- malá selektivita

## Senzory se změn. vodivosti: TGS – tenké, tlusté vrstvy

Zkouška

### Typické struktury senzorů – TGS dvouelektrodotové, tenké i tlusté vrstvy

Součástí tohoto uspořádání ve většině případů je vyhřívací element převážně z Pt, který díky jeho vyšší závislosti rezistivity na teplotě často slouží současně i jako kontrolní senzor teploty citlivé vrstvy

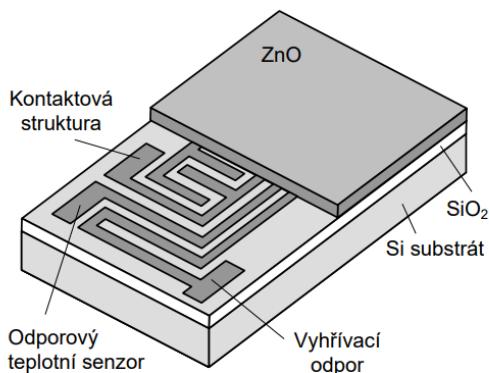


? Chemické senzory se změnou vodivosti – tenkovrstvové:  
Nakreslete a vysvětlete princip a konstrukční uspořádání

## Senzory se změnou vodivosti: TGS - tenkovrstvové



### Horizontální konstrukční uspořádání



? Chemické senzory se změnou vodivosti – tenkovrstvové:  
Nakreslete a vysvětlete princip a konstrukční uspořádání

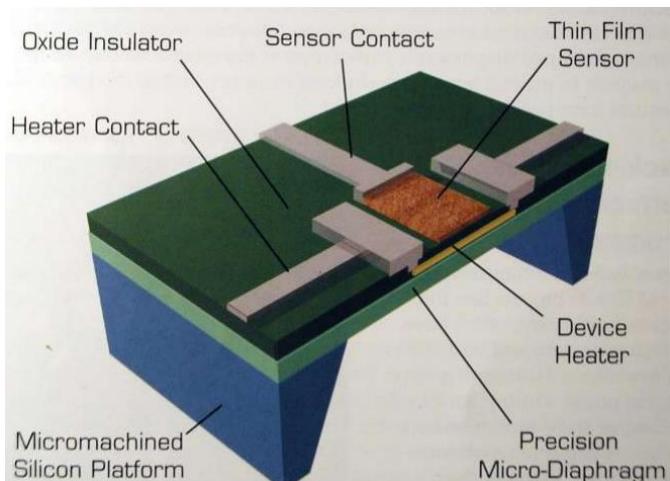
### Nutné součásti senzoru:

- vyhřívací systém
- systém pro měření teploty
- funkční citlivá vrstva
- kontaktní struktura

## Senzory se změnou vodivosti: TGS - tenkovrstvové



Tenkovrstvový senzor 3,1 mm x 3,1 mm, vyrobený technologií mikrosystémového mikroobrábění



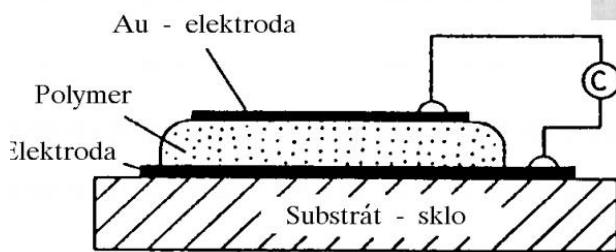
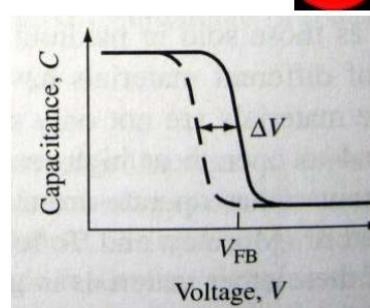
? Chemické senzory se změnou vodivosti – tenkovrstvové:  
Nakreslete konstrukční uspořádání

## Senzory se změnou kapacity: Princip činnosti



### Princip činnosti:

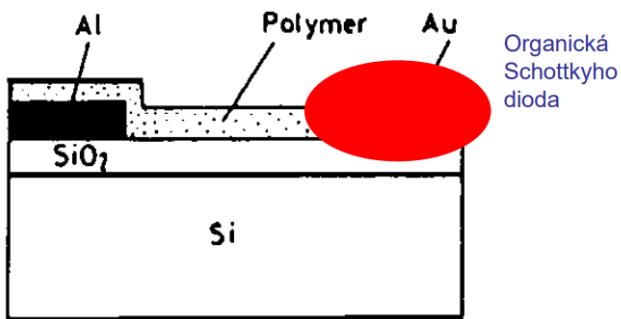
Princip - Působením chemické látky (plynu) se mění dielektrická konstanta  $\epsilon$  chemicky citlivé vrstvy.



? Chemokapacitory  
(Senzory se změnou

## Chemodioda: Princip činnosti

Zkouška



? Chemodioda: nakreslete a vysvětlete princip činnosti

U Schottkyho pn přechodu se projevuje citlivost elektrických charakteristik na působení chemické veličiny (plynu)

pro Schottkyho diodu lze použít kovovou elektrodu (např. Pt) a oxidovou elektrodu ( $TiO_2$ ,  $ZnO$ ).

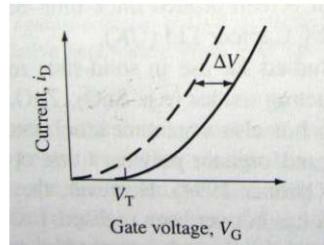
Organická Schottkyho dioda - Činnost vodivých polymerů se mění při přítomnosti organických par - jedna elektroda je z kovu, např. Au a druhá p-typu z polymerového polovodiče

## Chemotranzistor (MOS): Princip činnosti

Zkouška

- Některé fyzikální parametry v rovnicích popisujících chování tranzistoru MOS, zejména proud kanálem  $I_D$  (popř. napětí na hradle  $U_G$ ) jsou závislé na vlivech okolního prostředí, této skutečnosti lze využít pro jejich aplikaci jako senzorů.
- Všechny jsou na Si substrátu s emitorem a kolektorem realizovaným difúzí a pokrytou tenkou nebo silnou vrstvou oxidu.
- Všechny typy se realizují standardními MOSFET technologiemi.
- Většina variant MOSFET mikrosenzorů plynů se liší pouze **technologickými změnami na hradle**.

? Chemotranzistor MOS: nakreslete a vysvětlete princip činnosti, princip vyhodnocování informace, příklad struktury GASFET



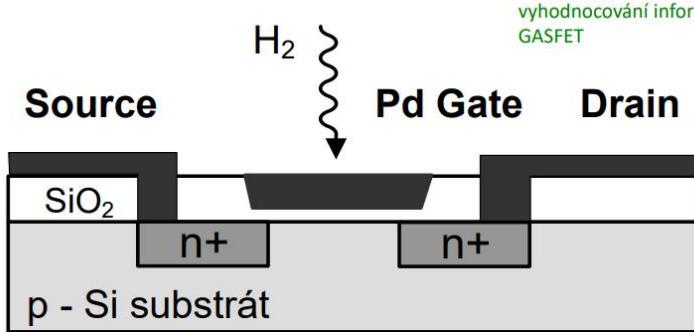
## Chemotranzistor (MOS): GASFET

Zkouška

**GASFET** - senzor plynů

Molekulární  $H_2$  z plynné atmosféry je adsorbován na vnějším povrchu hradla a katalyticky rozložen Pd na jednotlivé vodíkové atomy

? Chemotranzistor MOS: nakreslete a vysvětlete princip činnosti, princip vyhodnocování informace, příklad struktury GASFET



## Gravimetrické senzory chemických látek: Piezo hmotnostní

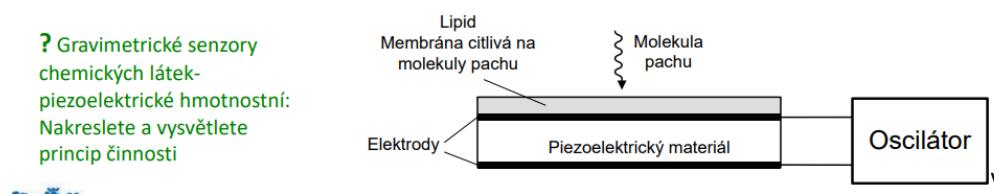


**Princip činnosti** - je založen na změně hmoty při chemické reakci citlivého materiálu mikrosenzoru s chemickou veličinou.

Tyto malé změny ve hmotě mohou být měřeny např. pomocí mikrovah pracujících na piezoelektrickém nebo SAW principu.

### a) Piezoelektrický hmotnostní chemický mikrosenzor

- Vysoká citlivost v porovnání s ostatními typy chemických mikrosenzorů, je vhodný pro použití do  $50^{\circ}\text{C}$ .
- Základ tohoto typu chemického senzoru tvoří křemenný výbrus, na kterém je nanesena vrstva vhodného absorbentu.
- Při změně hmoty o  $\Delta m$  se frekvence oscilátoru, do jehož obvodu je krystal zapojen, změní o hodnotu  $\Delta f$



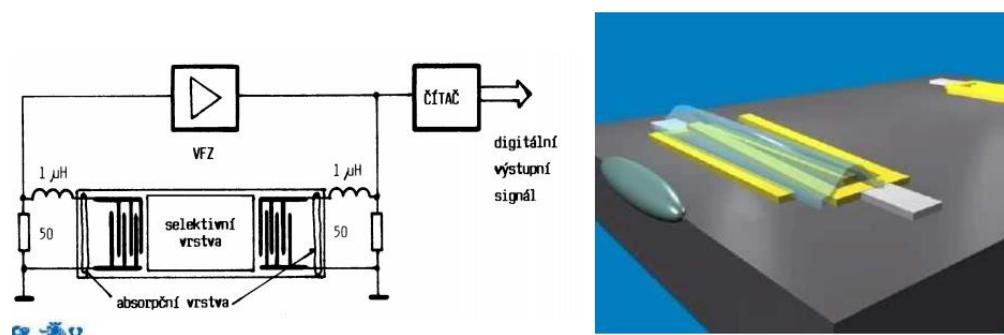
## Gravimetrické senzory chemických látek: SAW hmotnostní



### b) SAW hmotnostní chemické mikrosenzory

- Pro vytvoření citlivé tenké vrstvy se používají polymery, které při reakci s chemickou veličinou mění svoji hmotnost.
- Protože tyto senzory pracují na mnohem vyšších frekvencích ( $\text{GHz}$ ) na rozdíl od krystalových ( $10 \text{ MHz}$ ), dosahují vyššího rozlišení.
- Výběr chemicky citlivých vrstev určuje selektivitu mikrosenzoru.
- Chemický mikrosenzor vznikne umístěním selektivně citlivých vrstev (na různé plyny nebo páry) na povrch prvku SAW

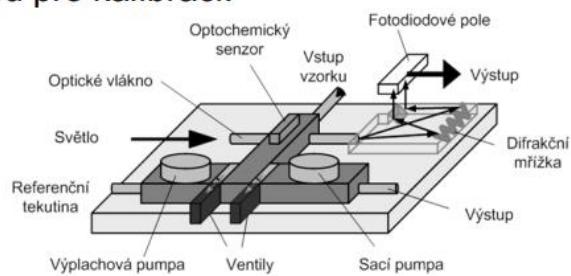
? Gravimetrické senzory chemických látek-SAW hmotnostní: Nakreslete a vysvělte princip činnosti



## Koncepce Lab-on-Chip

### Činnost

- Lab-on-a-Chip využívají často spektrální mikroanalýzu
- Lab-on-Chip kombinují mikropumpy s mikrospektrometry (vyráběny metodou LIGA), chemické mikrosenzory a DSP jednotky.
- nástroje pro mikroanalýzu jsou pouze několik mm veliké.
- Integrovaným polem fotodiód je převedeno spektrum na elektrický signál a následně v mikroprocesoru vyhodnocen.
- Po vyhodnocení dat se reakční komůrka vyprázdní a vypláchne a poté opět naplní referenční kapalinou pro kalibraci.



### ISFET

**ISFET je tranzistor řízený polem fungující na principu změny vodivosti prostřednictvím elektrického pole.**

Odporné cesty mezi oblastmi S (source) a D (drain) se změní, když na hradlo (gate) se přivede napětí (změní se elektrické pole).

Základem je křemík (P), elektrody S a D mají vodivost N. Povrch ISFETu mimo S a D je povlečen  $\text{SiO}_2$ .

Oblast hradla je potažena selektivní membránou, která je v kontaktu s okolním roztokem, ostatní části jsou izolovány epoxypryskyřicí. Potenciál hradla se určuje vzhledem k referentní elektrodě.

# ISFET

ion-sensitive field effect  
transistor

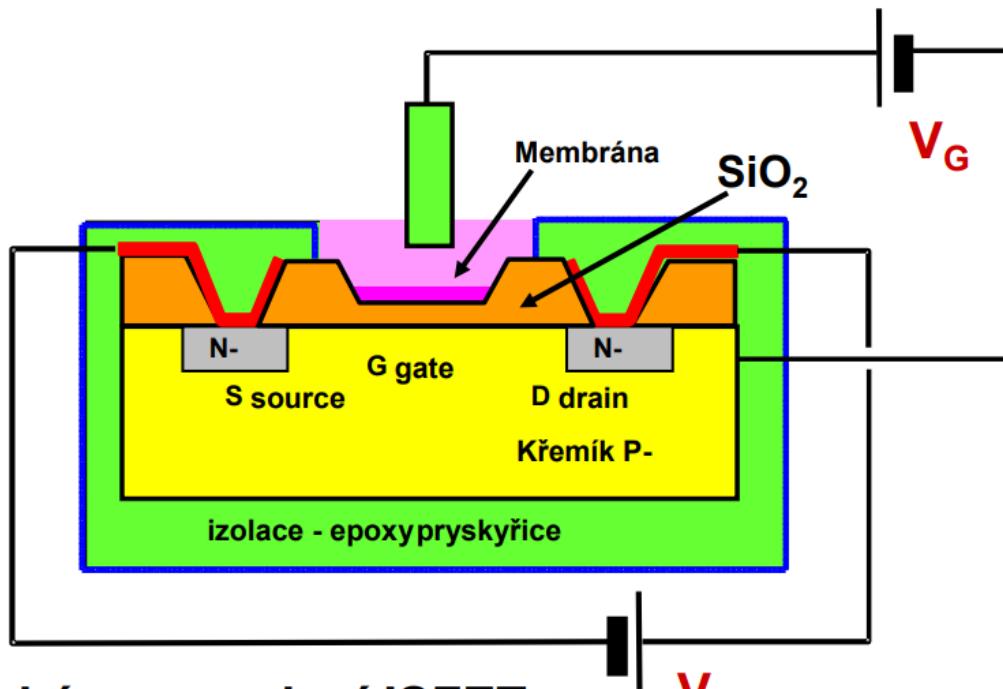


Schéma zapojení ISFETu

## membrána ISFETu:

- ❖ **solid-state**- změny pH  
 $\text{S}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ), odezva logaritmická (52-59 mV/pH)
- ❖ **polymerní** - valinomycin/PVC stanovení K
- ❖ **heterogenní**  $\text{AgCl}$ ,  $\text{AgI}$ ,  $\text{AgCN}$  krystalky v PNF (polyfluorovaný fosfazin)

Při výrobě ISFETů se používá litografie (nanášení jednotlivých vrstev, vytváření struktury pomocí masek)

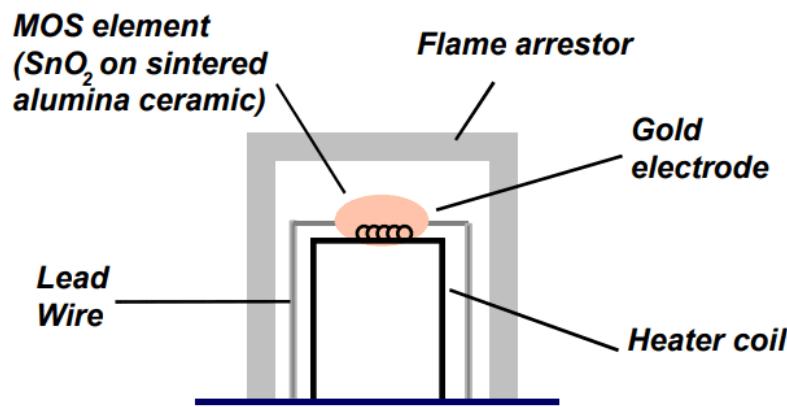
## MOS

### Metal Oxide Sensors (MOS)

#### MOS Detection Mechanism

- Sensing element:
  - Tin dioxide ( $\text{SnO}_2$ ) on sintered alumina ceramic
  - In clean air electrical conductivity low
  - Contact with reducing gases (such as CO or combustibles) increases conductivity
  - Sensitivity to specific gases depends on temperature of sensing element

#### Schematic of Metal Oxide Semiconductor (MOS) Sensor

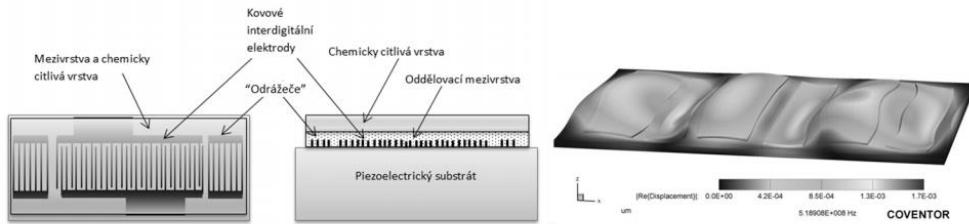


## Nanosenzory

### Důvody pro nano?

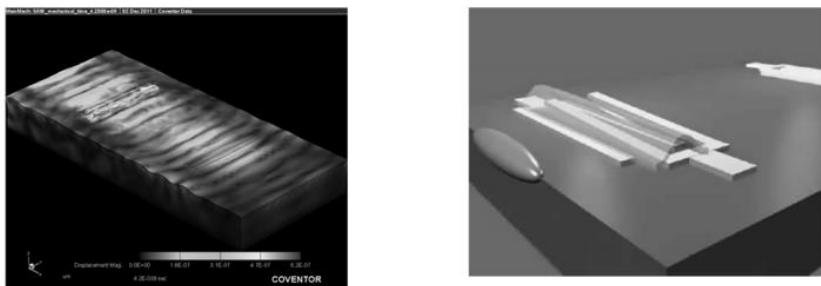
- škála pod 100 nm - kvantové jevy
- probíhá většina základních biologických procesů
- malé klastry Au, Ag- katalytické vlastnosti, antibakteriální, makroskopické Au-inertní
- Fe jako nanokrystál - velká tvrdost
- široké využití v skoro všech odvětvích lidské činnosti - medicína, průmysl, ekologie, potravinářství
- pro aplikace není tak důležitá velikost, ale tvar (který ovlivňuje jak nanomateriály vedou teplo, absorbuje světlo, jak jsou stabilní a jak se chovají v přítomnosti jiných struktur)
- zefektivnění procesu výroby, šetření surovin

- **Senzor plynu**
- Senzor s povrchovou akustickou vlnou (Surface Acoustic Wave - SAW)
- Navázání přesného typu látky na aktívni část senzoru (chemicky selektivní vrstvu) způsobí změnu rezonační frekvence obvodu oscilátoru
- Odstránení plynu vrátí hodnotu rezonační frekvence na typickou hodnotu

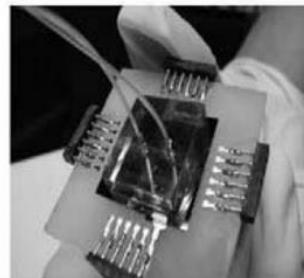
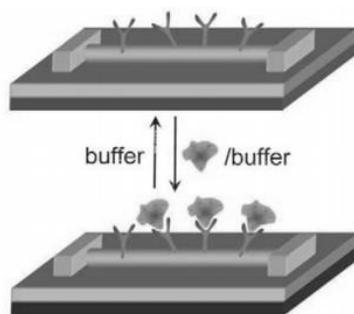


- **Základní funkční princip chemického senzoru se strukturou SAW**

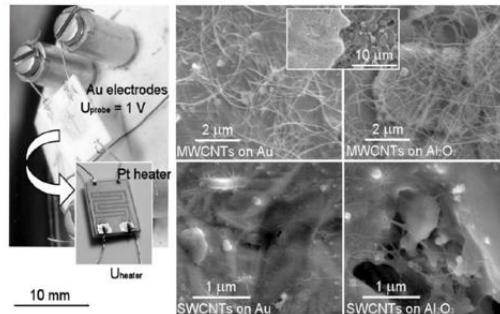
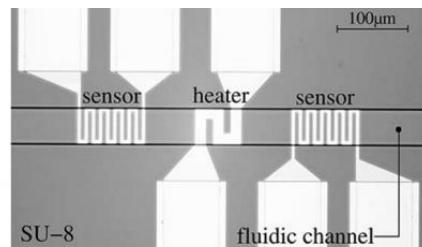
- Vygenerování Rayleighovy akustické vlny (pomocí interdigitálních měničů – Interdigital Transducer - IDT), která se šíří po povrchu substrátu a je ve styku se selektivně reagující vrstvou
- Změna hmotnosti tohoto povrchu způsobí změnu rezonanční frekvence ( $\Delta f$ ) senzoru vlivem adsorbované látky.



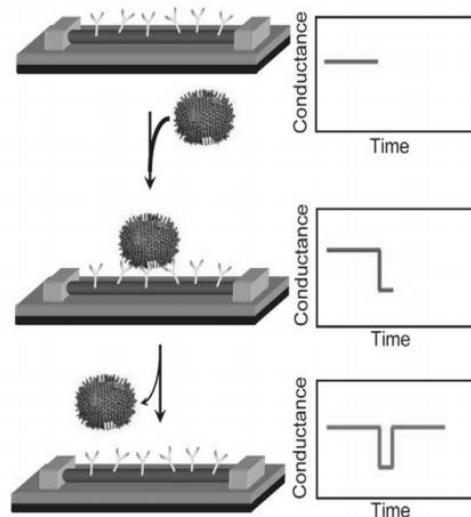
- Senzor bílkoviny
- Náboj bílkoviny zachycený protilátkou na „hradle“ změní hodnotu vodivosti
- Vodivost závisí na množství bílkoviny (červená)
- Medicína, potravinářství



- Senzor plynu
- Navázání látky na aktivní část senzoru (chemicky selektivní vrstvu) způsobí změnu vodivosti senzoru
- Odstránění plynu vrátí hodnotu vodivosti na typickou hodnotu



- Senzor viru
- Změna vodivosti senzoru zapříčiní navázání přesného typu víru na aktivní část senzoru
- Odstránění víru vrátí hodnotu vodivosti na typickou hodnotu



## Nanoaktuátory

- Nanomotor
- Poháněný el. napětím okolo 1V
- Stator tvořený nanotubulkami
- Široké uplatnení

