

# MEMS Inteligentné senzory a aktuátory

Ing. Richard Balogh

## Snímače mechanických veličín

9. 5. 2016



## 9. Mechanické veličiny

- poloha
- rýchlosť (priamočiara)
- zrýchlenie
- otáčky
- uhlové zrýchlenie
- sila
- moment

### 9.1. Priamočiara rýchlosť

- snímanie problematické (pre väčšie rozsahy pohybov):

prevod na rotačný pohyb (otáčky)  
derivácia polohy (ak sa sníma) podľa času  $v = dx/dt$

### 9.2. Snímače otáčok

spojité:

- tachodynamo (klasické, unipolárne)
- tachogenerátor (klasický, Feraris)

impulzné:

- magnetické:
  - s indukovaným napätím
  - s Hallovou sondou
- optické:
  - s reflexnými značkami (vyššie otáčky)
  - s optickými mriežkami (nízke otáčky)

### 9.2. Snímače otáčok

#### Tachodynamo

- má pevný stator, tvorený permanentnými magnetmi a vinutý rotor s komutátorom
- na komutátor dosadajú zberné kontakty
- výstup je jednosmerné napätie:
  - amplitúda lineárne závislá od otáčok
  - polarita závislá od smeru
- výhody:
  - jednoduché, citlivé
  - lineárne a pomerne presné
- nevýhody:
  - zvlnenie výst. napätia, šumy
  - výstup sa nedá zaťažiť
  - nevhodné pre vysoké otáčky (odhadzovanie "kefiek")

### 9.2. Snímače otáčok

#### Tachodynamo

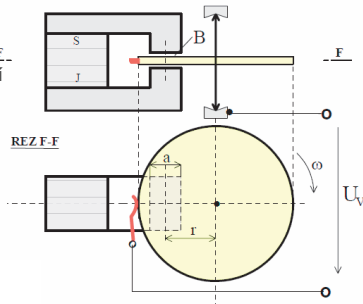
Tachodynamo MEZ typ K5A1

- $n = 0 \div 6000$  ot/min , citl. 20 V na 1000 ot/min
- linearita 1% , zvlnenie 0,5 %
- mech. príkon 0,33 W na 1000 ot/min
- trecí moment kludový 200 mNcm
- záťažný odpor  $> 5000 \Omega$  na volt výst. napätia

## 9.2. Snímače otáčok Unipolárne dynamo

- indukovanie napätia v otáčajúcom sa el. vodivom kotúči v magnetickom poli
- výst. napätie sa odoberá len jedným klzným kontaktom
- lineárna charakteristika
- menšie komutačné poruchy
- malá zotrvačnosť pohyblivých častí
- malé výstupné napätie

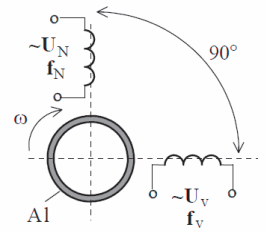
$$U_v = B a r \omega$$



## 9.2. Snímače otáčok Tachogenerátor

- princíp podobný tachodynamu, výstup je cez nedelené zberné krúžky
- výstupné napätie je striedavé, ako signál môžeme využiť jeho
  - amplitúdu, alebo
  - frekvenciu.

$$U_v = k U_N n$$

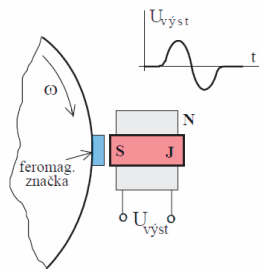


Tachogenerátor s budením (systém Ferraris).

## 9.2. Snímače otáčok Magnetické impulzné snímače

Indukcia napätia  
od zmeny mag. toku

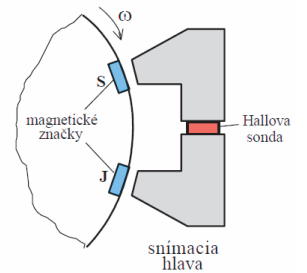
- výstupný signál má dve polarity (približovanie a vzdďaľovanie sa značky)
- amplitúda závisí od obvodovej rýchlosti
- značka je z mag. mäkkého materiálu
- značka môže byť i perm. magnet, zvyšok je potom z mag. mäkkého mat.
- systém je vhodný pre vyššie otáčky



## 9.2. Snímače otáčok Magnetické impulzné snímače

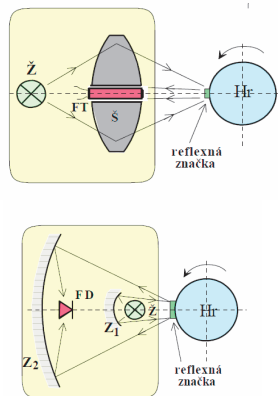
Využitie Hallovho javu

- značky môžu byť nahané priamo na hriadeľ
- nahrávacía hlava je podobná snímacej, len s cievkou namiesto Hall. sondy
- systém je vhodný i pre pomalé otáčky



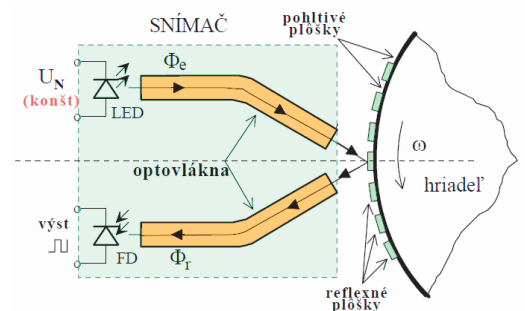
## 9.2. Snímače otáčok Optické impulzné snímače

- presnejšie snímanie (nízke otáčky) → opísané optické mriežky
- nižšie nároky, resp. vyššie otáčky → jednoduchšie systémy, obvykle reflexné



## 9.2. Snímače otáčok Optické impulzné snímače

Systém s optovláknami



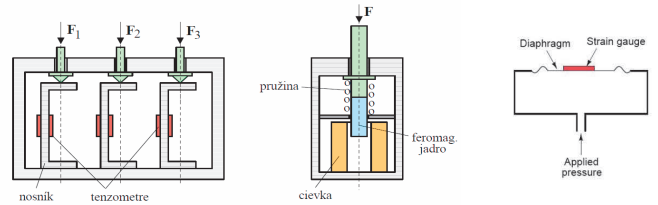
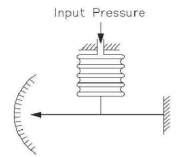
## 9.3. Snímače sily

- **deformačné členy + snímanie** :
  - mech. napätia - tenzometre
  - zmeny polohy - malé výchylky [mm, um]
- **piezoelektrické** - nevhodné pre statické merania
- **magnetoanizotropné**
- **zmena elektrického odporu**

## 9.3. Snímače sily Deformačné členy

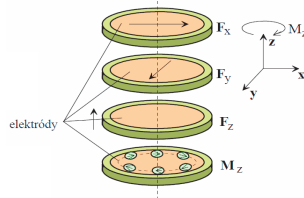
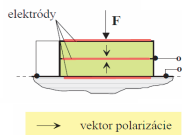
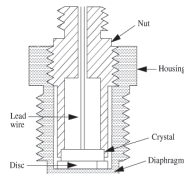
Meria pôsobiacu silu na inú veličinu

- **nosníky** → deformácia, tenzometre
- **pružiny** → zmena polohy, snímač polohy (indukčný, fotoelektrický)
- **pružné podložky** → zmena polohy



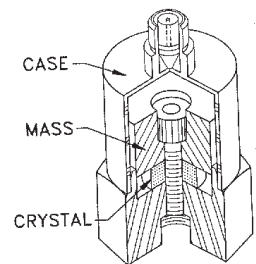
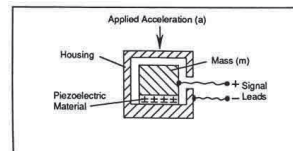
## 9.3. Snímače sily Piezoelektrické snímače

- využívajú vznik náboja pri pôsobení sily ( $U = Q/C$ )
- smer polarizácie - smer citlivosti
- statické merania - náboj po čase "zmizne"
- materiál – piezokeramika

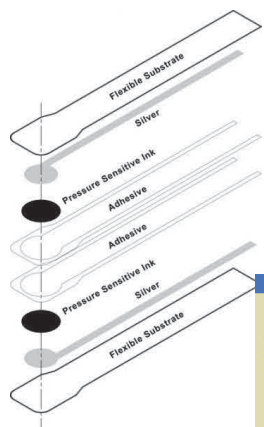


## 9.3. Snímače sily zrýchlenia Piezoelektrické snímače

- teliesko so známou hmotnosťou  $m$ , pri pôsobení sily  $F = m \cdot a$  → snímač zrýchlenia
- meranie vibrácií, diagnostika, monitoring

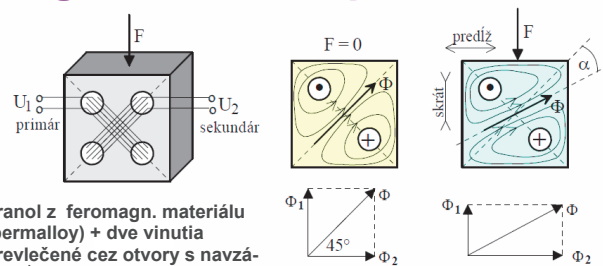


## 9.3. Snímače sily Piezoelektrické snímače



Typical Performance	
Linearity (Error)	< ±3%
Repeatability	< ± 2.5% of Full Scale
Hysteresis	< 4.5% of Full Scale
Drift	< 5% per Logarithmic Time Scale
Response Time	< 5µsec
Operating Temperature	15°F - 140°F (-9°C - 60°C)

## 9.3. Snímače sily Magnetoanizotropné snímače



hranol z feromag. materiálu (permalloy) + dve vinutia prevlečené cez otvory s navzájom  $\perp$  osami, tvoria transformátor

bez pôsobenia sily sekundár neviaže žiadny mag. tok,  $U_2$  je nulové

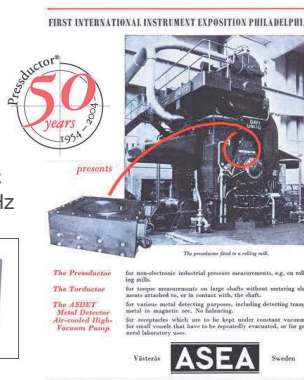
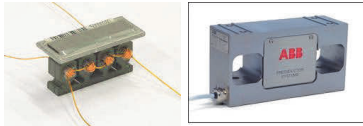
pri silovej deformácii nastanú tieto javy (obecne) :

ťah → +σ (predženie) →  $\mu_r$  stúpa → mag tok  $\Phi$  stúpa  
tlak → -σ (skrátie) →  $\mu_r$  klesá → mag tok  $\Phi$  klesá

## 9.3. Snímače sily Magnetoanizotropné snímače

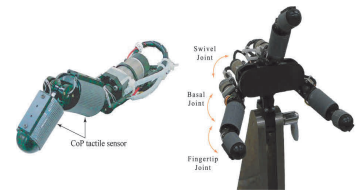
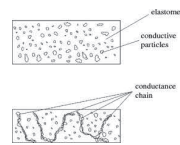
snímač pre  $F = 5000 \text{ kN}$   
(fy ASEA Švédsko)

- linearita, presnosť 0,5 %
- hysteréza 0,2 %
- stlačenie 0,05 mm
- preťaženie 200 %
- rozsah teplôt  $+20 \div +80 \text{ }^\circ\text{C}$
- napájacia f 50, 60, 400 Hz



## 9.3. Snímače sily Zmena elektrického odporu

- vodivá guma
- plastické hmoty (polyuretán)



Materiály vykazujú zmenu odporu pri stlačení  
Miera stlačenia úmerná sile (niekedy pomocná pružina)

Poznámka: Materiály majú značnú časovú a teplotnú chybu



## 9.4. Meranie momentu

### 9.4.1. Meranie deformácie

Meranie je obvykle nepriame, cez deformačný člen - hriadeľ

Vyhodnocuje sa deformácia:

- predĺženie povrchovej priamky ( $\epsilon$  - pomerné)
- skrut hriadeľa  $\phi$

- tenzometrami
- impulzne
- magnetoanizotropne
- inými, upravenými princípmi

## 9.4. Meranie momentu

### 9.4.1. Meranie deformácie

Pri meraní uhla skrutu sa vychádza z výrazu:

$$M_k = \frac{G I_p \phi}{l}$$

- $\phi$  – uhol skrutu (nameraný)
- $M_k$  – krútiaci moment
- $G$  – modul pružnosti v šmyku
- $l$  – dĺžka hriadeľa
- $I_p$  – polárny moment zotrvačnosti

Po dosadení za  $I_p$  pre kruh  $\pi D^4/32$  je:

$$M_k = \frac{\pi D^4 G \phi}{32 l}$$

## 9.4. Meranie momentu

### 9.4.1. Meranie deformácie

Pri meraní  $\epsilon$  sa vychádza z deformácie hriadeľa:

$$M_k = \frac{\pi D^3 \tau_m}{16}$$

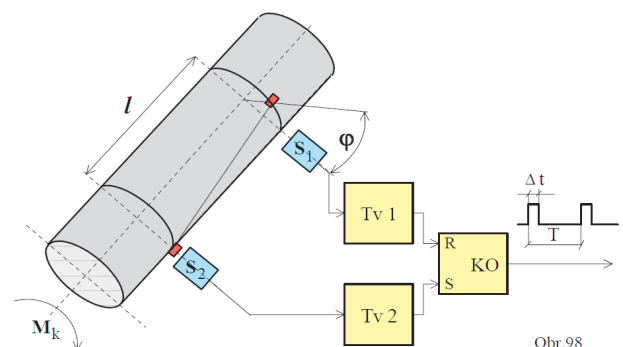
kde

$\frac{\pi D^3}{16} = W_t$  je modul prierezu pre kruh,

- $D$  – priemer hriadeľa,
- $\tau_m$  – je napätie v šmyku (mechanické), prejaví sa povrchovou deformáciou

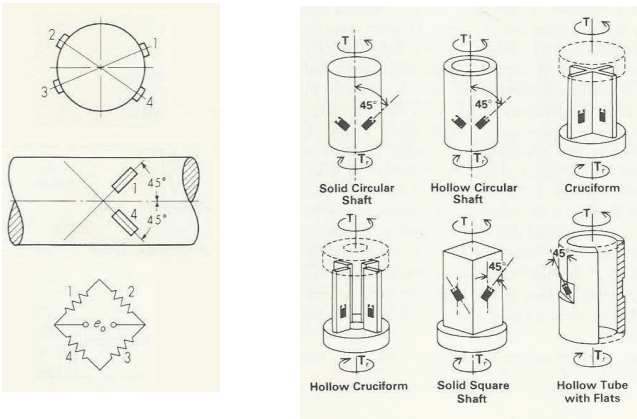
## 9.4. Meranie momentu

### 9.4.1. Meranie deformácie

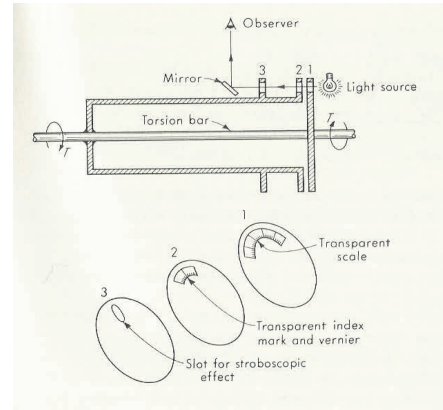


Obr.98

## 9. 4. Meranie momentu Tenzometrický snímač

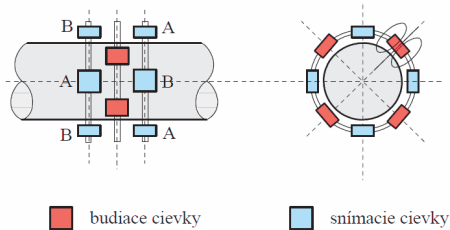


## 9. 4. Meranie momentu Optický snímač



## 9. 4. Meranie momentu 9.4.2. Magnetoanizotropný snímač momentov (na hriadeľi)

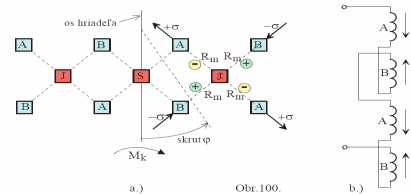
+ hriadeľ musí byť z feromag. materiálu, okolo sú sústavy cievok, ktoré sú pevné, medzi cievkami a hriadeľom je malá vzduchová medzera. Systém je transformátorový princíp + základná deformácia je skrut od momentu, tento sa prejaví sklonom povrchovej priamky (uhol  $\phi$ ) a jej predĺžením v smere kolmom nastane stlačenie materiálu



## 9. 4. Meranie momentu 9.4.2. Magnetoanizotropný snímač momentov (na hriadeľi)

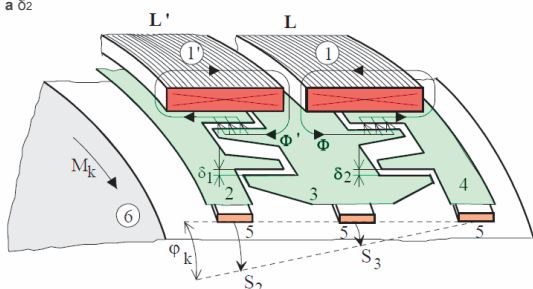
Rozvinutá sústava cievok:

- primárne cievky vytvárajú striedavé mag. pole, póly sú S a J (pre dané  $t$ )
- $M_k = 0 \rightarrow \Phi_m$  primáru vzhľadom na jednu sekundárnu cievku rušia (rovnaké mag. odpory), výstup každej cievky je nulový
- $M_k \neq 0 \rightarrow$  vznikne uhol skrutu  $\phi$  a opísané deformácie (ťah, tlak) zmenia sa  $R_m$  (pre  $+\sigma$  klesá, pre  $-\sigma$  stúpa), zmenia sa  $\Phi_m$  a v sekundárnych cievkach vznikajú napätia
- amplitúda závisí od  $\phi$ , fáza ( $0$  alebo  $180^\circ$ ) od prevládajúceho toku (S, alebo J)
- sekundárne cievky v sérii tak, aby sa napätia sčítali. U v A a B sú v protifáze.



## 9. 4. Meranie momentu Indukčný snímač momentov

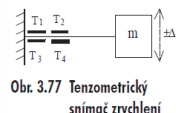
- na nemagnetickom hriadeľi 6 sú nemagnetické pásiky 5, na nich je upevnený magneticky dobre vodivý obvod, časti 2, 3 a 4, nad nimi sú pevné - neotáčajúce sa cievky 1 a 1'.
- osi cievok sú rovnobežné s osou hriadeľa
- každá cievka si vytvorí svoj  $\Phi_m$  s naznačenými siločiarami
- siločiaru na vonkajšej strane cievky cez kryt (nie je zakreslený)
- siločiaru na vnútornej strane cievky cez magnetický obvod 3-2, resp. 3-4
- hlavný  $\Phi_m$  ide cez medzery  $\delta_1$  a  $\delta_2$  (cez všetky po obvode súčasne)
- Veľkosti medzier  $\delta_1$  a  $\delta_2$  teda ovplyvňujú indukčnosti L a L'



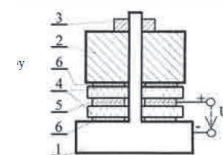
## 9.4. Snímače zrýchlenia

- Zrýchlenie  $a = dv / dt$
- Newtonov zákon  $F = m \cdot a$

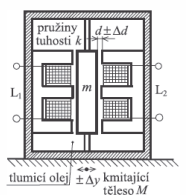
Pri známej hmotnosti telesa  $m$  je sila  $F$  merítkom zrýchlenia  $a$ .



Obr. 3.77 Tenzometrický snímač zrýchlení



Obr. 3.78b Piezoelektrický tlakový snímač zrýchlení



Obr. 3.79 Indukčnosť snímač zrýchlení

## 9. 4. Meranie zrýchlenia MEMS technológia

### •What is MEMS?

- Acronym for Microelectromechanical Systems
- "MEMS is the name given to the practice of making and combining miniaturized mechanical and electrical components." – K. Gabriel, SciAm, Sept 1995.

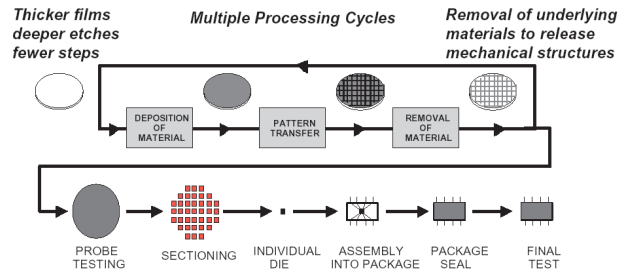
### •Synonym to:

- Micromachines (in Japan)
- Microsystems technology (in Europe)

### •Leverage on existing IC-based fabrication techniques (but now extend to other non IC techniques)

- Potential for low cost through batch fabrication
- Thousands of MEMS devices (scale from ~ 0.2 μm to 1 mm) could be made simultaneously on a single silicon wafer

## 9. 4. Meranie zrýchlenia MEMS technológia

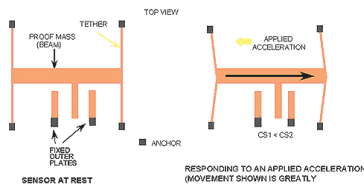


## 9. 4. Meranie zrýchlenia MEMS akcelerometer

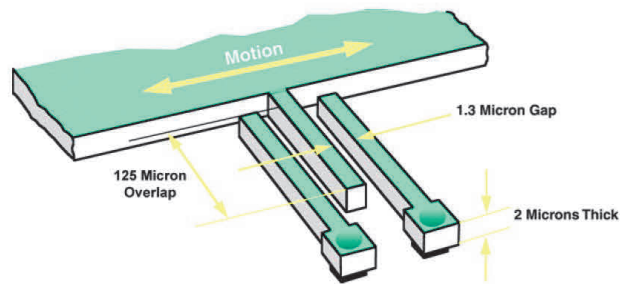
### ADXL202: ±2 g Dual Axis Accelerometer

#### Features

- X and Y Axis on a single chip = Small size and lower cost
- 250uA per Axis = Low power battery operation
- 3.0V to 5.0V Operation = Low power battery operation
- Surface mount package = Small size and ease of use
- High resolution PWM converter = Direct interface to micro (No A/D)
- iMEMS = Low cost AND high performance

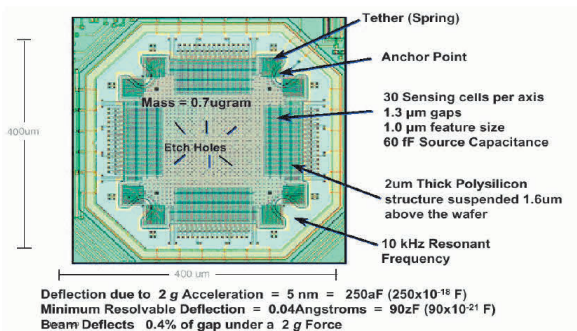


## 9. 4. Meranie zrýchlenia MEMS akcelerometer



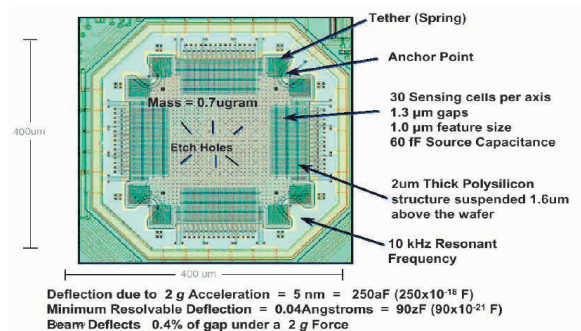
## 9. 4. Meranie zrýchlenia MEMS akcelerometer

### ADXL 202: Micromachined Beam



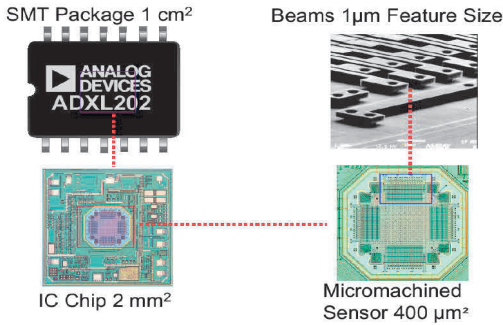
## 9. 4. Meranie zrýchlenia MEMS akcelerometer

### ADXL 202: Micromachined Beam

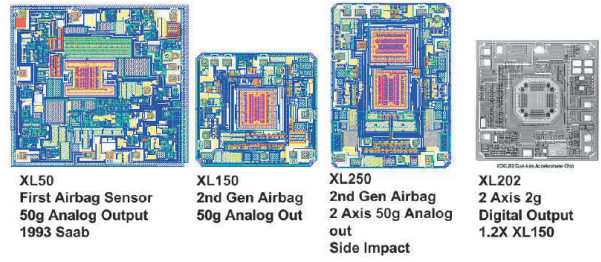


9. 4. Meranie zrýchlenia  
**MEMS akcelerometer**

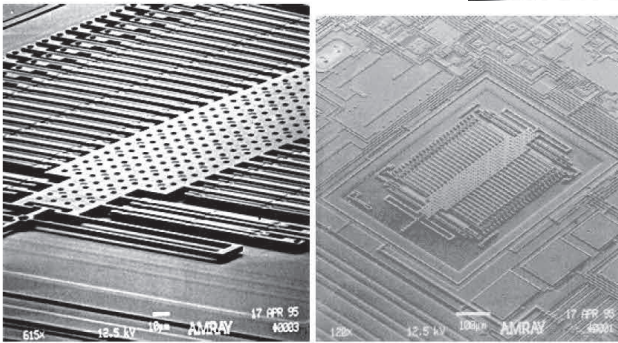
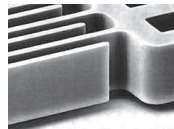
ADXL 202: acceleration sensor



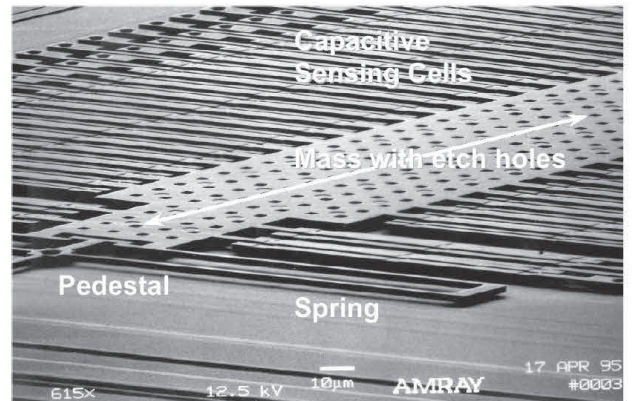
9. 4. Meranie zrýchlenia  
**MEMS akcelerometer**



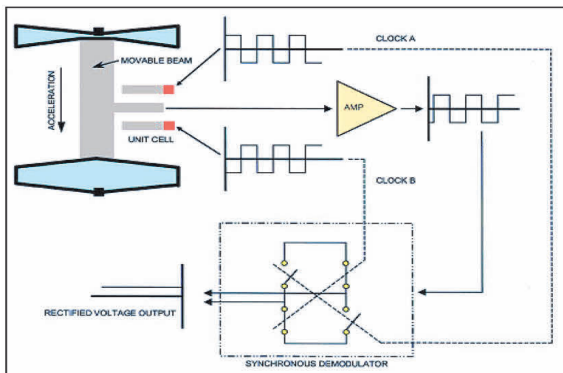
9. 4. Meranie zrýchlenia  
**MEMS akcelerometer**



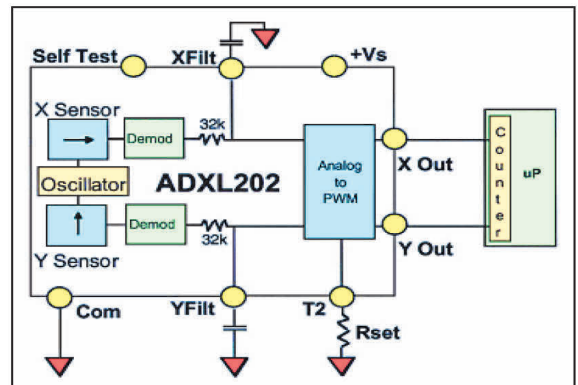
9. 4. Meranie zrýchlenia  
**MEMS akcelerometer**



9. 4. Meranie zrýchlenia  
**MEMS akcelerometer**

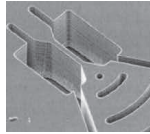
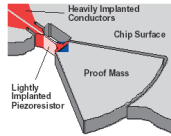


9. 4. Meranie zrýchlenia  
**MEMS akcelerometer**



## 9. 4. Meranie zrýchlenia MEMS akcelerometer

- Piezoresistive MEMS accelerometer
  - Operating Principle: a proof mass attached to a silicon housing through a short flexural element. The implantation of a piezoresistive material on the upper surface of the flexural element. The strain experienced by a piezoresistive material causes a position change of its internal atoms, resulting in the change of its electrical resistance
  - low-noise property at high frequencies



Courtesy of JP Lynch, U Mich.

## 9. 4. Meranie zrýchlenia MEMS MX2125 hot bubble

