



MIKROELEKTRONIKAI ÉRZÉKELŐK I

Dr. Pődör Bálint

BMF KVK Mikroelektronikai és Technológia Intézet
és
MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutató Intézet

9. ELŐADÁS: MECHANIKAI ÉRZÉKELŐK II

2008/2009 tanév 1. félév

1

9. ELŐADÁS: NYOMÁS, ERŐ ÉS GYORSULÁS

1. Mechanikai érzékelők (összefoglaló)
2. Integrált nyomásérzékelő
3. Gyorsulásérzékelés
4. Si alapú gyorsulásérzékelők

2

MECHANIKAI ÉRZÉKELŐK



Mechanikai mennyiségeket (erő, súly, tömeg, elmozdulás, gyorsulás, nyomás, áramlási sebesség, folyadék szint, sűrűség...) mérnek.

A mérés közvetlenül a szenzor paramétereire gyakorolt hatáson keresztül történik, ez többnyire szintén mechanikai természetű.

Membrán → deformáció → jelátalakítás

Csoportosítás:

- A mérendő mennyiség szerint
(pl. nyomásmérő, gyorsulásmérő)
- A jelátalakítás módszere szerint: optikai
piezoelektromos
piezorezisztív
kapacitív

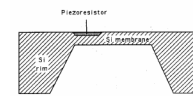
3

A SZENZOROK ÁLTALÁNOS FELÉPÍTÉSE

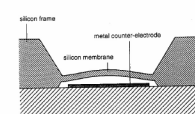


Piezorezisztív érzékelők

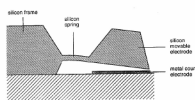
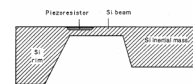
Membrán típusú szenzor:



Kapacitív érzékelők



Befogott tartó típusú szenzor:



4

Si ALAPÚ MECHANIKAI ÉRZÉKELŐK

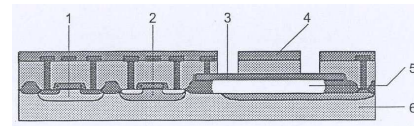


A Si alapú mechanikai érzékelők előnyös tulajdonságai

- jól meghatározott elektromos tulajdonságok mellett rendkívül jó mechanikai tulajdonságok
- jelentős a méretcsökkentés lehetősége
- tömeggyárthatóság
- integrálhatóság

5

NYOMÁSÉRZÉKELŐ IC



- | | |
|----------------------|---------------------|
| 1 – NMOS tranzisztor | 2 – PMOS tranzistor |
| 3 – poli-Si membrán | 4 – oxid tömb |
| 5 – üreg | 6 – Si szubsztrát |

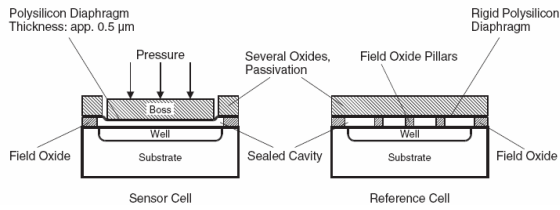
Membrán: Si mikrogépészeti megmunkálás, szelektív marással.

A nyomás hatására a poli-Si membrán és a hordozókristály közötti kapacitás megváltozik.

Beilleszthető a meglévő CMOS technológiai sorba.

6

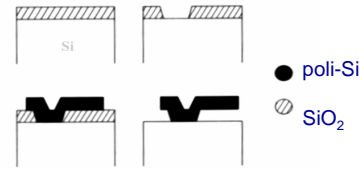
KAPACITÍV SZENZOR



Felületi mikromegmunkálással készített kapacitív szenzor és referencia cellák. Négyzetes cella, kb. 70x70 μm, kapacitás kb. 150 fF, érzékenység néhány fF/bar. 14 cella párhuzamosan (nagyobb érzékenység, nagyobb SNR). Két szenzor egység és két referenciaegység hidat alkot. (Infenion KP100)

7

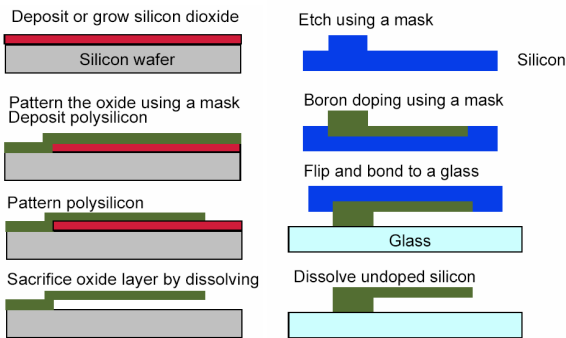
FELÜLETI MIKROMEKMUNKÁLÁS



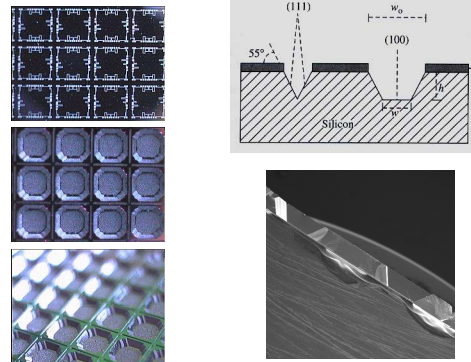
Példa: rezgőnyelv (vagy) membrán kialakítása rétegleválasztási és szelektív marási lépések megfelelő sorrendű alkalmazásával

8

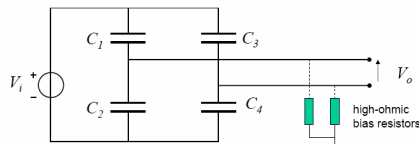
FELÜLETI ÉS TÖMBI MIKROMEKMUNKÁLÁS



Tömbi mikromechanika: KOH marás - egyszerűbb alkatatok



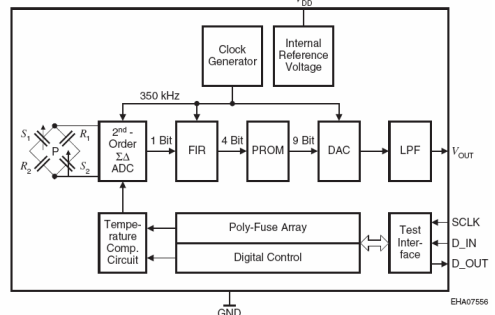
KAPACITÍV HÍD: JEL KIOLVASÁSA



A híd egyenletében az ellenállások helyett az $1/j\omega C$ impedancia szerepel. Kimeneti pontok szigeteltek □ szivárgási áramok driftet okoznak. Drift eliminálása □ AC és nagyértékű előfeszítő ellenállások, vagy DC meghajtás és periodikus reset kapcsoló révén.

11

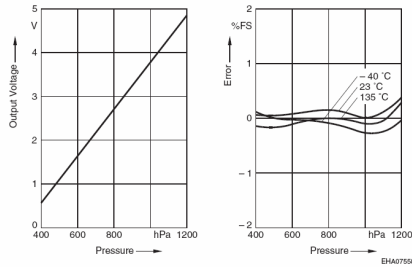
JELFELDOLGOZÁS



Kapacitív integrált nyomásérzékelő IC chip architektúrája (Infenion KP100)

12

SZENZOR KARAKTERISZTIKA



Kalibrált szenzor karakterisztikája és hibagörbéje (a névleges értéktől való eltérés %-ban)

13

GUMIABRONCS NYOMÁS FOLYAMATOS MONITORIZÁLÁSA

TPMS Tire Pressure Monitoring System

Kofi Makinwa
Electronic Instrumentation Laboratory/DIMES
Delft University of Technology, Delft, The Netherlands

előadása anyagai alapján

Jó példa a "smart sensor" rendszerre: integrált elektronika, autonómia (hálózat független táp), vezeték nélküli infotovábbítás

14

GUMIABRONCS NYOMÁS

Sensors for TPMS

TPMS =
Tire Pressure
Monitoring System
Since 2006
mandatory for all
new US cars

Four in every car
⇒ huge market!



Courtesy of Infineon

15

GUMIABRONCS NYOMÁS

Why Monitor Tire Pressure?



- 1/5th of all tires are up to 40% under their correct pressure
- 10% drop in pressure cuts a tire's service life by 15%
- Each 0.2 bar drop in pressure, increases fuel consumption by 1.5%
- 75% of flat tires due to insufficient pressure or gradual pressure loss
- Tire problems are 3rd most common cause of vehicle breakdowns
- ~250 000 accidents a year (US) can be traced to insufficient tire pressure! ⁶

GUMIABRONCS NYOMÁS

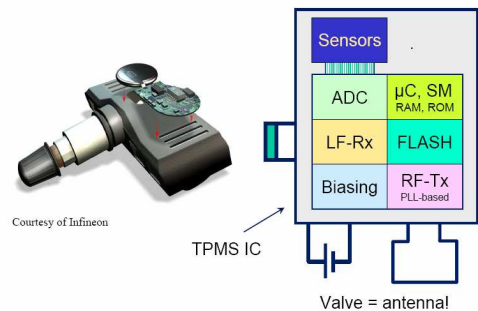
TPMS System Requirements

- Only has to operate at speeds above 25km/s
- Pressure from 100 - 700kPa (1 to 7bar)
± 2 % FS between 0~70°C, max. ±10 kPa
± 5 % FS elsewhere, max. ±25 kPa
- Low pressure alert within 3 min. – tolerance 10kPa.
- Temperature from -40°C to 125°C, ± 3°C
⇒ Untrimmed band-gap sensor
- Low-resolution (Yes/No) motion sensor ⇒ simple!
- 10 year battery life
- Self-testing

17

GUMIABRONCS NYOMÁS

TPMS Tire Module



Courtesy of Infineon

TPMS IC

Valve = antenna!

GUMIABRONCS NYOMÁS

TPMS System Design

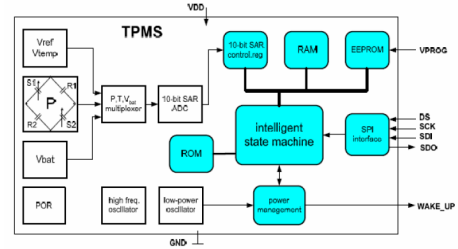
- Single Lithium battery (1.8 ~ 3.6V)
- 2 Capacitive pressure sensors + 2 reference sensors in bridge configuration \Rightarrow low power, good sensitivity
- Band-gap temp sensor compensates for P-sensor's temperature dependency
- Pressure variations used to detect motion!
- 10-bit SAR ADC \Rightarrow sufficient P-sensor resolution (also monitors temperature and battery voltage)

C. Kolle et al., *IEEE Sensors*, pp. 244 – 247, Oct. 2004.
 D. Hammerschmidt et al, *SAE Transactions*, 2005
 J. Jongsma, *Presentation at the ISSCC*, Feb. 2006.

19

GUMIABRONCS NYOMÁS

TPMS IC Block Diagram



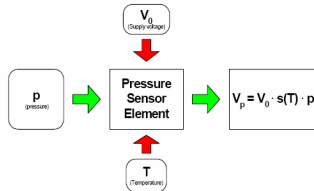
Infineon KP505 smart pressure sensor chip

20

GUMIABRONCS NYOMÁS

P-Sensor Conditioning

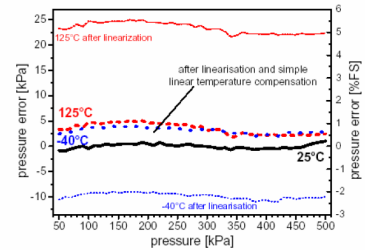
- P-sensor has significant non-linearity and tempco
- This is corrected by 8-bit microcontroller \Rightarrow P-sensor error $< \pm 1\text{-}2\%$ FS



21

GUMIABRONCS NYOMÁS

P-Sensor After Conditioning

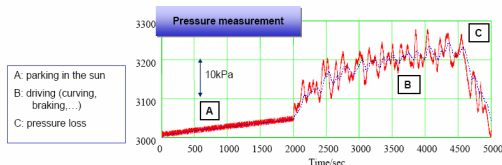


- Typical errors after linearization (with 2nd order polynomial) before/after temperature compensation

22

GUMIABRONCS NYOMÁS

P-sensor as Motion Sensor



- No extra motion sensor \Rightarrow lowers cost, saves power
- But P-sensor must be read-out every 0.5 seconds
- Final system (excluding RF) draws 48mAh in 10 years i.e. about 20% of battery capacity!

23

ÁLTALÁNOS SZEMPONTOK

Power Saving Strategies

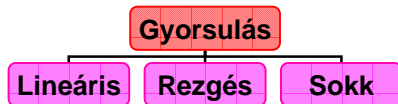
- Choose the right (low-power) sensor
- Choose sensors that can multi-task e.g.
 - Pressure sensor can also detect vibration
 - BG-temp sensor can also generate V_{ref}
- Duty-cycle operation
 - \Rightarrow sensor is switched off as often as possible
 - \Rightarrow minimal analog filtering \Rightarrow fast turn-on/off
- Digitize with the lowest possible resolution
- Concentrate the digitized information
 - \Rightarrow transmit only significant information

24

GYORSULÁSÉRZÉKELŐK

Alapképlet:

$$a = dv/dt = d^2s/dt^2$$



Newton-törvénye:

$$F = m a$$

25

JELLEMZŐ GYORSULÁSOK

1g a Föld gravitációs mezejében ható nehézségi gyorsulás ($1g=9,81m/s^2$)

0-2g emberi mozgások közben fellépő gyorsulás

5-30g gépjármű mozgáskor

100-2000g nagyobb közlekedési balesetkor

>5000g rakéta becsapódásakor

26

MIKROELEKTRONIKAI GYORSULÁSÉRZÉKELŐK

A gyorsulásérzékelő lényegében egy rugó és egy elmozduló tömeg (szeizmikus vagy inerciális tömeg) által alkotott rendszer. Ha a gyorsulás állandó, a szeizmikus tömeg elmozdul (x), míg a rugóerő ki nem egyenlíti a tehetetlenségi erőt.

$$F_{\text{rugó}} = Kx \text{ és } F_{\text{inerciális}} = ma$$

$$a = Kx/m \text{ vagy } x = am/K$$

Mikromechanikai és mikroelektronikai kivitelben a gyorsulásmérők kizárólag rugalmas lemezre (membrán) erősített szeizmikus tömegekből állnak. Mind a rugalmas membrán mind a szeizmikus tömeg szilíciumból (Si) kialakítható.

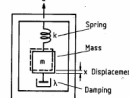
27

GYORSULÁSÉRZÉKELŐK



A gyorsulásérzékelők működési elve

Modell: a rugó – tömeg - csillapítás rendszer



A rendszer mozgásegyenlete:

$$m a = m(d^2x / dt^2) + \lambda(dx / dt) + kx$$

ahol k a rugóállandó, λ a csillapítási együttható

Állandósult állapotban:

A rendszer sajátfrekvenciája:

$$\frac{x}{a} = \frac{m}{k}$$

$$f = 2\pi \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Csillapítást a sajátfrekvencia módosítására, illetve a tönkremenetel elkerülése miatt alkalmaznak.

Érzékelésre a tömeg elmozdulását (kapacitív), vagy a rugóban ébredő feszültséget (piezorezisztív) használják.

28

MÉRÉS/ÉRZÉKELÉSI ELVEK ÉS MÓDSZEREK

A gyorsulás okozta elmozdulás (x) érzékelésére szolgáló három általános módszer:

1. kapacitás mérés elmozduló és álló elektródák között.
2. a rugóban ébredő feszültségek/deformációk mérése piezoellenállásos módszerrel;
3. a rugóban ébredő mechanikai feszültség által a piezoelektromos hatás révén létrehozott töltés/elektromos feszültség mérése.

29

MŰKÖDÉSI ELVEK

Felületi mikromechanikai eljárással készült, kapacitív elvű szenzorok

Tömbi mikromechanikai eljárással készült kapacitív elvű szenzorok

Piezorezisztív elven működő szenzorok

Piezoelektromos elven működő szenzorok

Termodinamikai (szabad hőáramlás) elven működő szenzorok

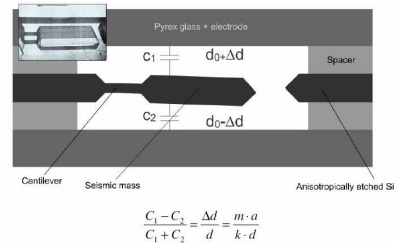
30

ÉRZÉKELÉSI ELVEK ÉS TECHNOLÓGIÁK

	Kapacitás	Piezo-ellenállás	Piezo-elektromos
Impedancia	nagy	alacsony	nagy
Méret	közepes	közepes	kicsi
Hőmérsékleti tartomány	igen széles	közepes	széles
Linearitási hiba	nagy	alacsony	közepes
DC válasz	igen	igen	nem
AC válasz (f)	széles	közepes	széles
Csillapítás	igen	igen	nem
Érzékenység	nagy	közepes	közepes
Túlterhelés okozta nullpont eltolódás	nem	nem	igen
Elektronika	kell	nem	kell
Költségek	közepes	alacsony	magas

31

KAPACITÍV ELVŰ GYORSULÁSÉRZÉKLŐ



Az inerciális tömeg (egyben a mozgó elektród) két pyrex üveg vagy szilícium lemez között van felfüggesztve, melyeken az ellenelektrodok is helyet kapnak. A szimmetrikus elrendezés minimalizálja a hőmérséklet okozta méretváltozások hatását, így általában nincs is szükség aktív hőfokkompenzációra.

KAPACITÍV ELVŰ MIKROELEKTRONIKAI GYORSULÁSÉRZÉKLŐ

Kis deformációkra a d légrések $\pm\Delta d$ megváltozásai arányosak a mérendő gyorsulással (k a megfelelően definiált rugóállandó):

$$\Delta d/d = ma/kd$$

A kétoldali kapacitás

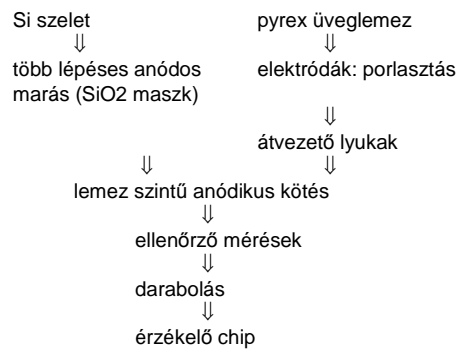
$$C_1 = \text{const}/(d - \Delta d) \text{ illetve } C_2 = \text{const}/(d + \Delta d)$$

Kis deformációknál sorfejtéssel adódik

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2}$$

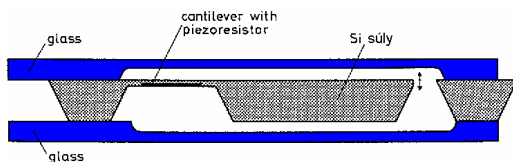
33

TECHNOLÓGIAI FOLYAMATÁBRA



34

PIEZOREZISZTÍV GYORSULÁSMÉRŐ



Gyorsulás hatására a súly meggörbíti a piezoellenállást így megváltozik az ellenállása.

Előnye a piezoelektromos gyorsulásmérőhöz hasonlítva, hogy a gyorsulás nagyon lassú változásai is pontosan kimutathatók vele.
5g-10000g max. gyorsulás között gyártják.

JELLEMZŐK

Kis gyorsulások és lassulások mérésére használják (< 2g)

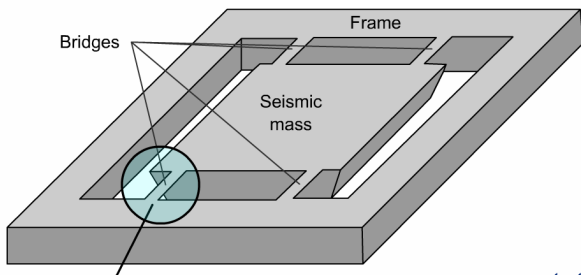
Mérési frekvencia nagyon alacsony, a statikus méréstől általában párszor 100 Hz-ig terjed

"two chip" koncepció (külön van a szenzor-IC, és külön egy CMOS kiértékelő és jelátalakító áramkör)

Ütésállóságuk nagyon jó

36

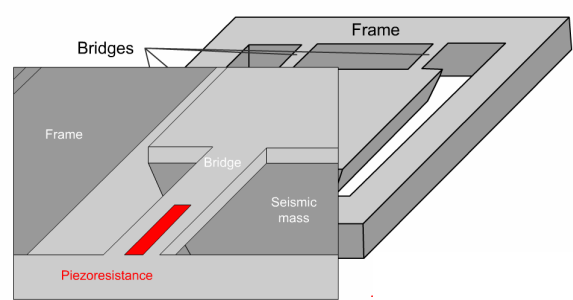
Si Gyorsulásérzékelő



Si piezoresistive acceleration sensor fabricated by bulk micromachining

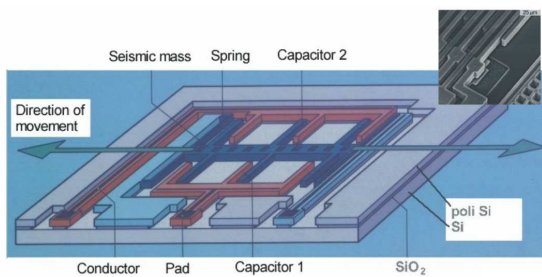
37

Si Gyorsulásérzékelő



38

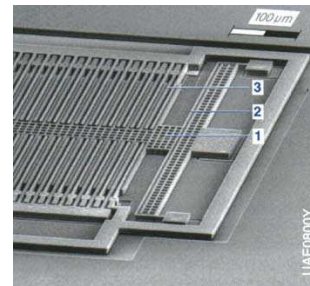
Si Kapacitív Gyorsulásérzékelő



Accelerometer based on Si surface micromachining

39

A Szenzor Kialakítása



1. Rugóztattottan felfüggesztett szeizmikus tömeg az elektródákkal
2. Rugó
3. Rögzített elektródák

40

Jellemzők

Nagyobb gyorsulás illetve lassulásértékek (50 ... 100 g) mérésére használják

Mérési frekvencia 0 Hz-től (azaz lehetőség van statikus mérésre is) akár több kHz-ig

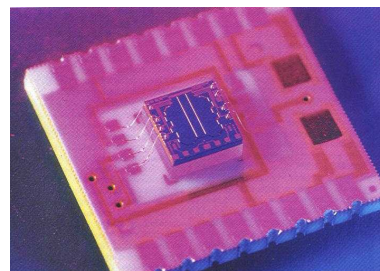
Tipikus élhosszúságuk 100 és 500 mikron közötti

"one-chip" design

Olcsó

41

Mikroelektronikai Gyorsulásérzékelő

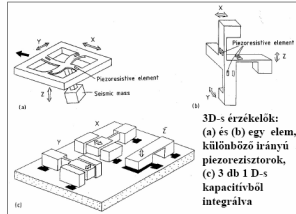
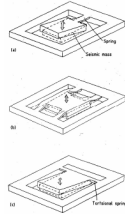


Szilíciumon kialakított, gépkocsiban (légszák) alkalmazott mikroelektronikai gyorsulásérzékelő

42

1D-S ÉS 3D-S GYORSULÁSÉRZÉKELEK

1D-s érzékelők:



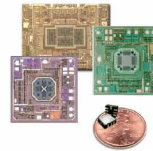
3D-s érzékelők:
(a) és (b) egy elem, különböző irányú piezorezisztorok, (c) 3 db 1 D-s kapacitívól integrálva

MEMS INERCÁLIS SZENZOROK

MEMS Inertial Sensors

Single, Dual and Tri Axis Accelerometers

Angular Rate Gyroscopes



Functional Applications:

- Acceleration and Velocity
- Position and Tilt
- Shock and Vibration

Functional Applications:

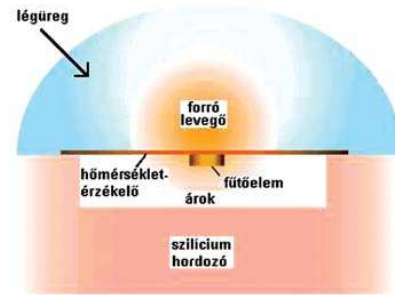
- Angular Rate of Rotation

SZABAD HŐÁRAMLÁS ELVÉN MŰKÖDŐ SZENZOR

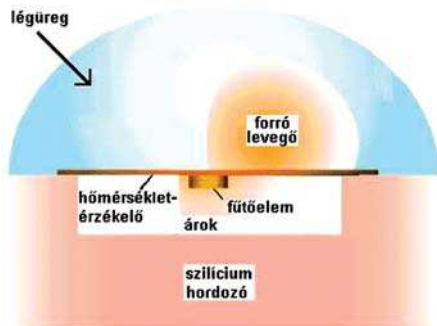
Ezen szenzorok működési elve a természetes hőáramlás fizikáján alapszik

Kialakításának köszönhetően alkalmas statikus (DC) gyorsulások mérésére is

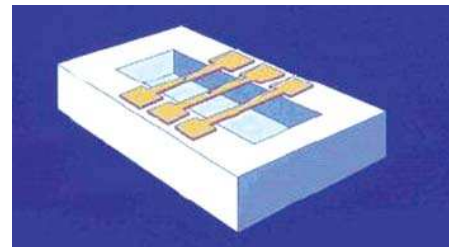
A rendszer tulajdonképpen mozgó alkatrész nélkül működik (az egyetlen mozgó „elem” maga a levegő)



Nyugalmi állapot, amikor a rendszerre nem hat gyorsulás



A szenzorra vízszintes gyorsulás hat (balra)



A valóságos kialakítás rajza

VÉGE

49

50

FÉLÉVKÖZI DOLGOZAT: VÁLASZTHATÓ TÉMÁK

Piroelektromos detektor	FET alapú kémiai detektor (egy konkrét példa)
Infravörös optikai gáزدetektálás	Képkotó sugárzásdetektálás (Rtg. vagy infra)
Nukleáris detektorok (egy kiválasztott detektor)	LED/fototranzisztor pár mint érzékelő
pn-átmenetes hőérzékelő	Magnetotranzisztoros vagy mágneses ellenállás-változású érzékelők (klasszikus félvezető, vagy GMR magnetorezisztor)
Gyorsulásérzékelő (gépkocsibiztonság, légszák)	Veszélyes vagy tiltott anyagok (drog, robbanószer, stb.) detektálása (egy konkrét példa)
Mikrohullámú mozgásérzékelő	Mozgásérzékelők (biztonságtechnika)
Orvosi vagy ipari hőtérvérzés érzékelés	Infravörös érzékelők alkalmazása (kémia, élelmiszeripar, stb.)
Bolométeres detektorok	Elektronikus orr (szagérzékelés)
Mikroelektronikai SnO ₂ gáزدetektor	Szenzor és mikroprocesszor kapcsolata (konkrét példa alapján)
Peltier effektus és hűtés	Áramérzékelés mágneses érzékelővel ⁵¹
Orvosbiológiai érzékelők (vényomás, vércukor, stb.)	
Magnetotranzisztoros érzékelő	
MEMS technológia (egy érzékelő példáján)	
Folyadék- vagy gázáramlás érzékelő	
Radiometria és távérzékelés	

FÉLÉVKÖZI DOLGOZAT

Témaválasztás vagy kijelölés	november 11
Konzultáció (egy alkalom kötelező)	november 17-től kezdve
Beadás	december 2

52

VIZSGA

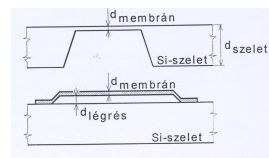
Vizsgaidőpontok:

2008 december 17	szerda	9h-12h
2009 január 7	szerda	9h-12h
2009 január 14	szerda	9h-12h
2009 január 21	szerda	9h-12h

Hely:

A 105

53



54