

# ÉRZÉKELŐK I

**Dr. Pődör Bálint**

Óbudai Egyetem KVK Mikroelektronikai és Technológia Intézet

## 8. ELŐADÁS: AKUSZTIKUS HULLÁMÚ (PIEZOELEKTROMOS) ÉRZÉKELŐK



2010/2011 tanév 1. félév

1

## AKUSZTIKUS HULLÁMOK TERJEDÉSÉN ÉS PIEZOELEKTROMOS JELENSÉGEN ALAPULÓ ESZKÖZÖK

Piezoelektromosságon alapuló eszközök.  
Tömbi, illetve felületi akusztikus hullámok.

Rezonátor típus: állóhullám, a rezonanciafrekvencia eltolódása mérhető.

Hullámvezető típus: hullámterjedési tulajdonságok megváltozása fázistolás révén mérhető.

Váltakozó feszültség → mechanikai hullám

Mechanikai hullám → elektromos polarizáció

3

## 8. ELŐADÁS

1. Piezoelektromos érzékelők
2. Piezoelektromosság fizikája
3. Kvarc mikromérleg
4. Akusztikus felületi hullám (AFH) érzékelő
5. Piezoelektromos gyorsulásérzékelő

2

## PIEZOELEKTROMOSSÁG ÉS ÉRZÉKELÉS

Piezoelectricity refers to the generation of electricity or of electric polarity in dielectric crystals when subjected to mechanical stress and conversely, the generation of stress in such crystals in response to an applied voltage. In 1880, the Curie brothers found that quartz changed its dimensions when subjected to an electrical field and generated electrical charge when pressure was applied. Since that time, researchers have found piezoelectric properties in hundreds of ceramic and plastic materials.

Many piezoelectric materials also show electrical effects due to temperature changes and radiation. This report is limited to piezoelectricity. More detailed information on particular sensors can be found by contacting the manufacturer.

4

## ELŐNYÖK ÉS HÁTRÁNYOK

The rise of piezoelectric technology is directly related to a set of inherent advantages. The high modulus of elasticity of many piezoelectric materials is comparable to that of many metals and goes up to  $10^5 \text{ N/m}^2$ . Even though piezoelectric sensors are electromechanical systems that react to compression, the sensing elements show almost zero deflection. This is the reason why piezoelectric sensors are so rugged, have an extremely high natural frequency and an excellent linearity over a wide amplitude range. Additionally, piezoelectric technology is insensitive to EM fields and radiation, enabling measurements under harsh conditions. Some materials used (especially gallium phosphate or tourmaline) have an extreme stability even at high temperature, enabling sensors to have a working range of up to  $1000^\circ\text{C}$ .

5

## ELŐNYÖK ÉS HÁTRÁNYOK

One disadvantage of piezoelectric sensors is that they cannot be used for truly static measurements. A static force will result in a fixed amount of charges on the piezoelectric material. While working with conventional readout electronics, imperfect insulating materials, and reduction in internal sensor resistance will result in a constant loss of electrons, and yield a decreasing signal. Elevated temperatures cause an additional drop in internal resistance and sensitivity. The main effect on the piezoelectric effect is that with increasing pressure loads and temperature, the sensitivity is reduced due to twin-formation. While quartz sensors need to be cooled during measurements at temperatures above  $300^\circ\text{C}$ , special types of crystals like  $\text{GaPO}_4$  gallium phosphate do not show any twin formation up to the melting point of the material itself.

## PIEZOELEKTROMOS ÉRZÉKLÉS

Principle	Strain Sensitivity [ $\text{V}/\mu\text{r}^2$ ]	Threshold [ $\mu\text{r}^2$ ]	Span to threshold ratio
Piezoelectric	5.0	0.00001	100,000,000
Piezoresistive	0.0001	0.0001	2,500,000
Inductive	0.001	0.0005	2,000,000
Capacitive	0.005	0.0001	750,000

Átalakítási mechanizmusok érzékenységeinek összehasonlítása

6

## FONTOSABB ALKALMAZÁSOK

Sonar

Hearing Aids. Low frequency

Ultrasound. Ultrasonic actuator

Night vision. Pyroelectric sensor effect

Traffic Sensors

Music Pickups

Machine Monitoring

Bearing Wear Sensors

Thread Break Sensor

Accelerometers

Aerospace. Modal testing, wind tunnel, and shock tube instrumentation;

Ballistics. Combustion, explosion, and detonation

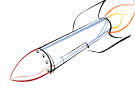
Engine Testing. Combustion and dynamic stressing

Shock/Vibration

Implantables: Pacemaker Activity Monitor, Implantable Switch, Ve

Monitor, Micropower Source

And many, many more!



## ALKALMAZÁSI PÉLDÁK

To detect sound, e.g. piezoelectric microphones (sound waves bend the piezoelectric material, creating a changing voltage) and piezoelectric pickups for electrically amplified guitars.

Piezoelectric elements are also used in the generation of sonar waves.

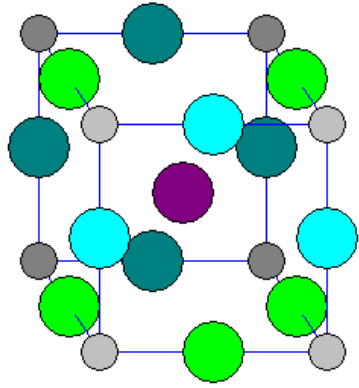
Piezoelectric microbalances are used as very sensitive chemical and biological sensors.

Piezoelectric elements are used in electronic drum pads to detect the impact of the drummer's sticks.

9

## PIEZOELEKTROMOS KRISZTÁLYOK

Piezoelektromosság csak alacsonyabb szimmetriájú kristályszerkezetekben (pl. kvarc, perovszkit, stb. léphet fel.

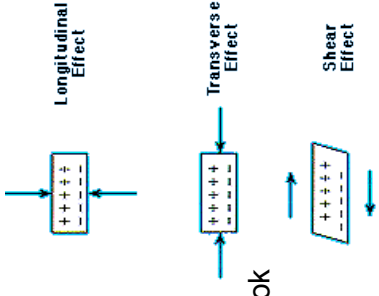


Perovszkit szerkezet: kocka sarkaiban Ti vagy Nb, az élek felezőpontjaiban O, II. oszlopbeli fém (Ba, Li, stb.) a kocka közepén. Az anionok és kationok különböző elmozdulása polarizációt hoz létre.

11

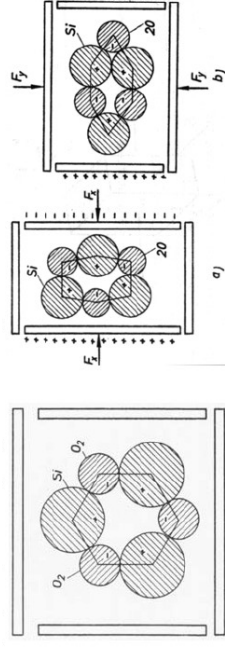
## PIEZOELEKTROMOSSÁG

Piezoelektromosság (görög  $\pi\epsilon\iota\zeta\omicron$  össze- nyom): kristályelektromosság, nyomás v. húzás (mechanikai feszültség) hatására fellépő töltésszétválasztódás (polarizáció). Anizotrop kristályokban a nyomás (húzás) hatására a szemközti felületen ellentétes előjelű elektromos töltések lépnek fel. A mechanikai igénybevétel hatására dipólusok keletkeznek (töltésszétválasztás, a pozitív és negatív töltések súlypontjai eltolódnak), illetve a meglévő dipólusok iránya megváltozik (pl. elfordulnak), így a felületek feltöltődnek. A töltések előjele megváltozik, ha a nyomófeszültséget húzófeszültségre váltják át.



10

## PIEZOELEKTROMOS POLARIZÁCIÓ KVARC ( $\text{SiO}_2$ ) EGYKRISZTÁLYBAN



Terhelés hatására a kvarckristály hexagonális szerkezete deformálódik.

a. longitudinális, b. transzverzális piezoelektromos effektus.

12

## PIEZOELEKTROMOS EGYÜTTTHATÓ

A  $d$  piezoelektromos együtttható (definíció)

$$d = \delta P / \delta F \text{ [As/N]}$$

$P$  [As/m<sup>2</sup>] - elektromos polarizáció  
 $F$  [N/m<sup>2</sup>] - mechanikai feszültség

$F$  - 3x3 tenzor,  $P$  - 3x1 vektor,  $d$  - 27 elemű harmadrendű tenzor. Kőbős kristályrács - csak egy eleme van.

A  $d$  piezoelektromos állandó nagyságrendje (1-100)x10<sup>-12</sup> As/N.

13

## PIEZOELEKTROMOSSÁG: ELEKTROSTRIKCIÓ

Elektrostrikió: fordított jelenség (ultrahangkeltés!).

Ha a megfelelő kristálylapok között elektromos potenciálkülönbséget hozunk létre, a kristályban mechanikai feszültségek keletkeznek, illetve a kristály méretei megváltoznak. Ezen alapul a piezoelektromos beavatkozók (aktuátorok működése).

A jellemző itt is a  $d$  együtttható, mely egyben a fajlagos deformáció mértéke is.

Dimenzió: As/N = m/V !!!

Piezoelektromos kerámiáknál ez néhány x 10<sup>-4</sup> ∞cm/V.

Alkalmazás: mikropozicionálók, ultrahangkeltés (több 10 MHz-ig).

15

## PIEZOELEKTROMOS EGYÜTTTHATÓ

Illusztrációs példa:

$$F = 10^5 \text{ N/m}^2 \text{ (1 bar),}$$

$$d = 10^{-11} \text{ As/N,}$$

$$\text{dielektromos állandó } \epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \approx 10 \times 9 \times 10^{-12} \text{ Am/Vs}$$

a mechanikai feszültség által létrehozott elektromos tér

$$E = P/\epsilon = Fd/\epsilon = 10^{-11} \times 10^5 / (10 \times 9 \times 10^{-12}) \approx 10^4 \text{ V/m}$$

Azaz egy 1 mm vastag lapka két oldala között a piezoelektromos feszültség kb. 10 V.

14

## ELEKTROMECHANIKAI CSATOLÁSI TÉNYEZŐ

A piezoelektromos hatás révén akusztikus hullámok kelthetők, illetve az akusztikus hullámok és az elektromos hullámok csatolhatók.

A csatolás mértéke az elektromechanikus csatolási tényezővel adható meg ( $c$  - rugalmas állandó):

Elektromechanikus csatolási tényező

$$d^2/\epsilon c$$

16

## PIEZOELEKTROMOS ANYAGOK

Egykristályok  
Piezoelektromos kerámiák  
Polikristályos vagy amorf anyagok: előállítási technológiával hozzák létre az elemi dipólusok rendezettségét.

Kvarc ( $\text{SiO}_2$ )  
 $\text{AlN}$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{CdS}$  (félvezető/félszigetelő ionos kristályok)

$\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$  (PZT) vékonyréteg, kerámia  
 $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{LiNbO}_3$

Húzott-polarizált poli(vinilidén-fluorid) PVDF

17

## PIEZOELEKTROMOSSÁG: MAKROSKÓPIKUS EGYENELETEK

A piezoelektromos anyagok makroszkopikus tulajdonságai két egyenlet segítségével írhatók le

$$T = c S - e E$$
$$D = \varepsilon E + e S$$

$T$  [N/m<sup>2</sup>] - mechanikai feszültség,  
 $S$  [1] - deformáció (relatív érték)  
 $c$  [N/m<sup>2</sup>] - rugalmas együttható  
 $e$  [As/m<sup>2</sup>] - piezoelektromos állandó,  
 $E$  [V/m] - elektromos térerő,  
 $D$  [As/m<sup>2</sup>] - elektromos eltolás.

19

## PIEZOELEKTROMOS ANYAGOK

Paraméter	PVDF	Kvarc	PZT	BaTiO <sub>3</sub>
$d_{31}$ $10^{-12}$ As/N	23	2,25	110	78
$\varepsilon_r$	12	4,58	1200	1700
Sűrűség kg/dm <sup>3</sup>	1,78	2,6	7,5	5,7

A piezoelektromos kerámiák PE állandója/érzékenysége durván két nagyságrenddel nagyobb mint az egykristályoké.

18

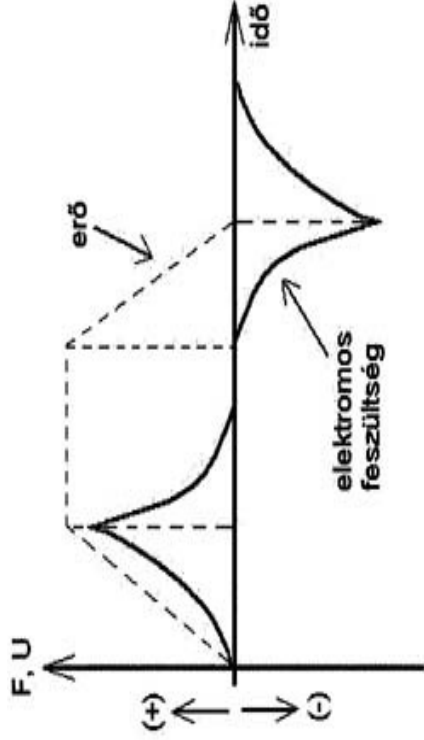
## PIEZOELEKTROMOSSÁG: MAKROSKÓPIKUS EGYENELETEK

$$T = c S - e E$$
$$D = \varepsilon E + e S$$

Az  $e$  piezoelektromos együttható hozzá létre a csatolást az elektromos és a mechanikai mennyiségek között.  
Ha  $e = 0$ , nincs csatolás a két jelenségkör között, a két egyenlet  $T = c S$  Hooke-törvényre (rugalmassági egyenlet) és a  $D = \varepsilon E$  összefüggésre redukálódik.  
Ha  $e \neq 0$  akkor  $D$  és így az elektromos polarizáció zérus elektromos tér esetén is véges értékű lehet, ha az anyag deformációnak van alávetve. Fordítva is igaz, az elektromos tér mechanikai változást (deformációt) idézhet elő anélkül, hogy mechanikai feszültséget alkalmaznánk.

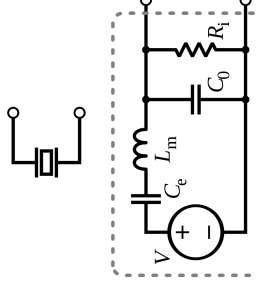
20

## PIEZOELEKTROMOS JEL IDŐFÜGGÉSE



A piezoelektromos eszközökben keltett jelek időbeli lefutása

## ELEKTROMOS HELYETTESÍTŐ KÉP



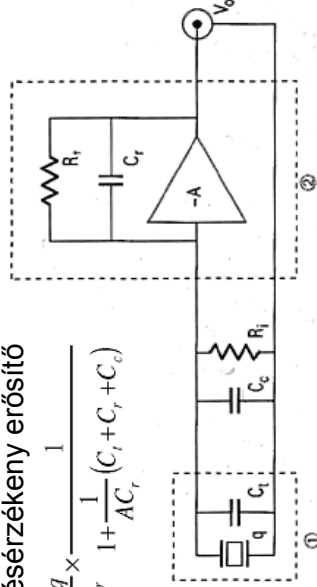
A piezoelectric transducer has very high DC output resistance and can be modeled as a proportional voltage source and a filter network.  $L_m$  is due to the seismic mass and inertia of the sensor itself.  $C_e$  is inversely proportional to the mechanical elasticity of the sensor.  $C_0$  represents the static capacitance of the transducer,  $R_i$  is the insulation resistance of the transducer element.

22

## ILLESZTŐ ÁRAMKÖR

Töltésérzékelő erősítő

$$V_o = \frac{-q}{C_r} \times \frac{1}{1 + \frac{1}{AC_r}(C_i + C_r + C_c)}$$

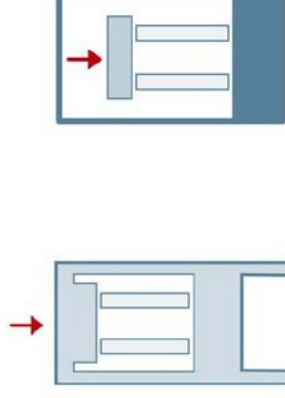


Szokásos közelítésekkel illetve elhanyagolásokkal

$$V_o = \frac{-q}{C_r}$$

23

## ERŐNYOMÁS ÉS GYORSULÁS



Piezoelektromos erő/nyomás és gyorsulás érzékelő szerkezete

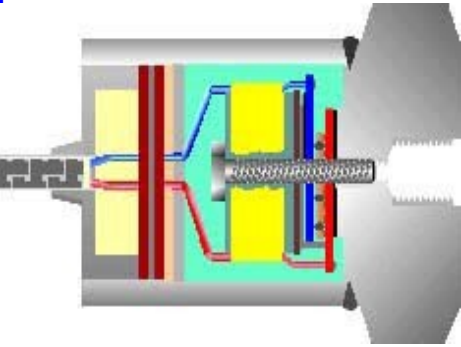
24

# THE PIEZOELECTRIC ACCELEROMETER

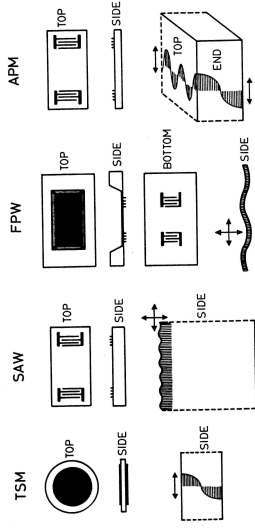
## (COMPRESSION TYPE)

The sensing element is a crystal which has the property of emitting a charge when subjected to a compressive force.

In the accelerometer, this crystal is bonded to a mass such that when the accelerometer is subjected to a 'g' force, the mass compresses the crystal which emits a signal. This signal value can be related to the imposed 'g' force



# Hullám-és rezgési modulusok akusztikus hullámú érzékelő eszközökben

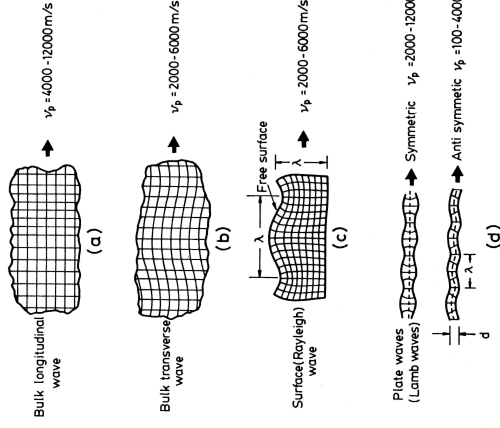


TSM - thickness shear mode: tömbi transzverzális módus (más elnevezés: BAW - bulk acoustic wave, tömbi akusztikus hullám)  
 SAW - surface acoustic wave: AFH - akusztikus felületi hullám  
 FPW - flexural plate wave: Lamb-hullám ("meghajló" módus)  
 APM - acoustic plate mode: akusztikus "lemez" módus

# RUGALMAS HULLÁMOK ÉS FÁZISSEBESÉG

Atomcsoportok mozgása rugalmas síkhullám terjedésekor.

- a. Tömbi longitudinális hullám (*bulk longitudinal wave*) végtelen kiterjedésű anyagban.
- b. Tömbi transzverzális hullám (*bulk transverse wave*) végtelen kiterjedésű anyagban.
- c. Felületi akusztikus (Rayleigh-) hullám (*surface (Rayleigh) wave*) fél-végtelen mintában. A behatolási mélység  $\sim \lambda$  nagyságrendű.
- d. Lemez (Lamb-) hullámok (*plate waves (Lamb waves)*),  $d < \lambda$ .



# KVARCKRISTÁLY OSZCILLÁTOR

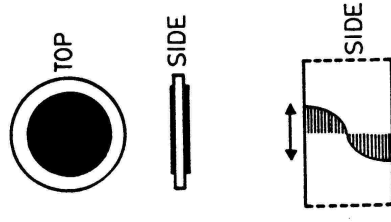
A kvarc oszillátorban, mely tömbi akusztikus hullámú eszköz (*bulk acoustic wave, BAW*), a visszacsatolás a kvarc-kristályon keresztül történik, elektromechanikus módon. Mechanikai rezgéseinek alammódusa  $\lambda / 2 = d$ , (d a kvarclemez vastagsága).

A rezgési frekvencia  $f = v_p / \lambda = v_p / 2d$

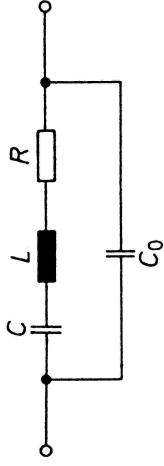
( $v_p$  a hangsebesség a kristályban).

Kvarcban ez  $3,5 \times 10^3$  m/s, így pl.  $d = 0,25$  mm esetén  $f = 7$  MHz.

Kvarc kristály oszillátorral  $\Delta f / f = 10^{-6} - 10^{-10}$  stabilitás érhető el.



## ELEKTROMOS HELYETTESÍTŐ KÉP



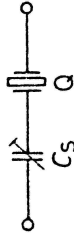
Rezgőkvarc helyettesítő képe

A helyettesítő kép elemei:

$C$  és  $L$  a kvarc mechanikai jellemzői;

$R$  a veszteségeket reprezentálja;

$C_0$  az elektródák és kivezetések kapacitása.



Kvarc eredő soros rezonanciafrekvenciájának beállítása

29

## ELEKTROMOS HELYETTESÍTŐ KÉP

Soros rezonancia ( $Z = 0$ )  $f_s = 1/2\pi(LC)^{1/2}$

Párhuzamos rezonancia ( $1/Z=0$ )  $f_p = f_s(1 + C/C_0)^{1/2}$

$f_s$  csak a jól definiált  $LC$  szorzattól függ,  $f_p$ -t a bizonytalan értékű  $C_0$  erősen befolyásolja.

Finombeállítás: soros  $C_s$  kondenzátor alkalmazásával ( $C_s > C$ ). Ekkor a párhuzamos rezonanciafrekvencia változatlan, a soros pedig módosul

$$f_s' = f_s(1 + C/(C_0 + C_s))^{1/2} \cong f_s(1 + C/2(C_0 + C_s))$$

A soros rezonanciafrekvencia  $C_s$  változtatásával legfeljebb<sup>30</sup> a párhuzamos rezonanciafrekvencia és a soros

## PIEZOELEKTROMOS ESZKÖZÖK SZENZOROKBAN

Két fontosabb eszköz a kvarckristály oszcillátor/rezonátor és a piezoelektromos-hullámszűrő/felületi-hullám eszköz.

A kvarckristály oszcillátor (két szembenlévő lapján fémelektrodával ellátott kvarckristály lapka).

Rezoanciafrekvenciája néhány MHz, a jóssági tényező nagyobb mint  $n \times 10^4$  (!), a frekvenciastabilitás  $10^{-6}$ - $10^{-10}$ . Az alapfrekvencián az akusztikus (mechanikai) rezgés fél hullámhossza a kristálylapka vastagságával egyenlő.

31

## PIEZOELEKTROMOS ESZKÖZÖK SZENZOROKBAN

A piezoelektromos hullámszűrő, vagy akusztikus felületi hullámú (AFH) szűrő (surface acoustic wave (SAW) filter) illetve AFH eszköz. A működése a felületi akusztikus hullámok terjedésén alapul. Az elektromos rezgéseket interdigitális elektródarendszerekkel lehet be- és kicsatolni. A működési frekvenciatartomány néhány 10 MHz – kb. 300 MHz.

A piezoelektromos hatást a mechanikai érzékelőkben lehet jelkeltésre felhasználni, leginkább dinamikusan változó mennyiségek mérésére, illetve éppen a változás detektálására. Egy igen fontos példa a gyorsulásmérés illetve érzékelés.

32



## PIEZOELEKTROMOS SZENZOROK

A piezoelektromos hatást a mechanikai érzékelőkben lehet jelekké alakítani, leginkább dinamikus változó mennyiségek mérésére, illetve éppen a változás detektálására.

Egy igen fontos példa a gyorsulásmérés illetve érzékelés. További alkalmazások: rezgés, erő és nyomásmérés, elsősorban dinamikus effektusok.

33

## MIÉRT A KVARC?

Of the large number of piezoelectric materials available today, quartz is employed preferentially in transducer designs because of the following excellent properties:

- high material stress limit, around 100 MPa (~ 14 km water depth)
- temperature resistance (up to 500C)
- very high rigidity, high linearity and negligible hysteresis
- almost constant sensitivity over a wide temperature range
- ultra high insulation resistance ( $10^{+14}$  ohms) allowing low frequency measurements (<1 Hz)

35

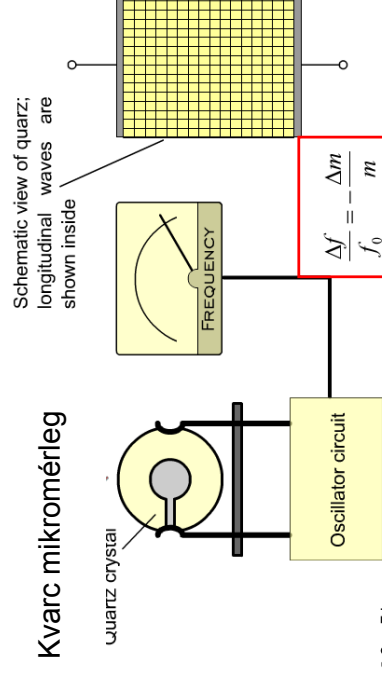
## TÖMEG(VÁLTOZÁS) ÉRZÉKELŐ: KVARC MIKRO- ÉS NANOMÉRLEG

A kvarc oszcillátor (BAW) és az AFH (SAW) eszköz egyaránt használható tömegváltozás érzékelésére. Különböző részecskék megkötődése a felületen tömegváltozást és így frekvenciaváltozást eredményez. Ha a felületen adszorbens réteg van, akkor a kvarc mikromérleg (quartz microbalance, QMB) vagy az AFH eszköz mint kémiai- vagy gázérzékelő funkcionál.

34

## KVARC MIKRO- ÉS NANOMÉRLEG (QMB)

Tömegérzékenység:  $S_m = \frac{\Delta f}{f_0} \frac{1}{\Delta m}$



36

## QMB ÉRZÉKENYSÉGE

QMB tömegérzékenysége ( $\Delta m$  - egységnyi felületre eső tömegváltozás)

$$S_m = \frac{\Delta m}{\Delta f} = \frac{\rho \cdot d}{f_0 \cdot \Delta m}$$

n a félhullámok száma, d a kristálylapka vastagsága, d' az adszorbeált réteg vastagsága,  $\rho$  és  $\rho'$  a megfelelő sűrűségek)

$$\Delta f = \frac{\rho d}{f_0} \left( 1 + \frac{\rho' d'}{\rho d} \right)^{-1} \approx -n \frac{\rho' d'}{\rho d}$$

Mivel  $\rho' d' = \Delta m$ , az érzékenység  $S_m = -n/\rho d = -2/\rho \lambda$ .

Példa: Lapka tömege M = 100 mg,

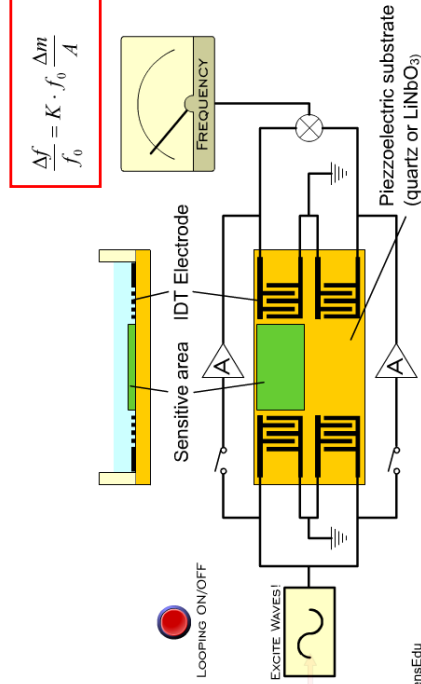
$$f_0 \approx 5 - 10 \text{ MHz,}$$

legkisebb mérhető frekvencia-eltolódás  $\Delta f = 0,1 - 1 \text{ Hz,}$

$\Delta f/f = -\Delta M/M$  alapján becslve a legkisebb detektálható abszorbeált názmennyiség  $\Delta M = 10^{-20} \text{ ng}$

37

## SAW TÍPUSÚ SZENZOR



© SensEdu

Felületi akusztikus hullámok (surface acoustic wave)

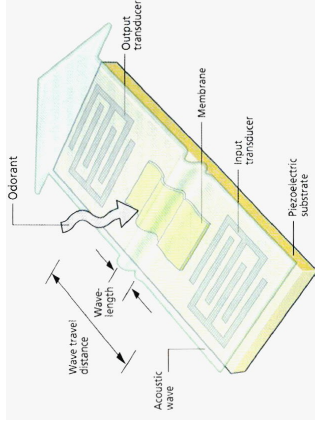
terjedésén alapuló szenzor.

39

## AKUSZTIKUS FELÜLETI HULLÁMÚ (SAW) TÖMEG VAGY GÁZÉRZÉKLEŐ

Egy szelektív gázadszorbens réteggel bevont és egy bevonat nélküli eszköz egy-egy RF oszcillátort alkot. Az adszorbeált gáz mennyiségétől függően megváltoznak felületi akusztikus hullámok terjedési tulajdonságai (sebessége) és ez elhangelja az oszcillátort. A két oszcillátor jeléből egy keverővel a

különbbségi frekvenciával arányos jelet állítanak elő, mely egyben arányos az érzékelőrétegen adszorbeált gáz mennyiségével.



38

## SAW/SAW ÉRZÉKENYSÉGE

A relatív frekvenciaváltozás arányos az eszköz alapfrekvenciájával és az egységnyi felületre adszorbeált gáz tömegével, de ellentétben a QMB-al, független az eszköz saját tömegétől (mind a hullámterjedés és mind a szenzor működését meghatározó kölcsönhatás felületi jelenség).

$$\Delta f/f = \text{const} \times f \cdot \Delta m/A$$

$$S_m = (\Delta f/f)/\Delta m = \text{const} \times f$$


Az  $S_m$  érzékenység növelhető az f működési frekvencia növelésével.

40

Példa:

Pd-bevonattal ellátott hidrogénérzékélőben (a bevonat vastagsága néhány száz nm, mely kb. (5-15)-szöröse a felületen terjedő akusztikus hullámok hullámhosszának), a hidrogén-nitrogén gázkeletyben lévő 1 ppm-nyi hidrogén az adszorbens réteg vastagságától függően  $(1-10) \times 10^{-6}$  relatív frekvenciaváltozást okoz, mely pl. már 100 MHz-es alappfrekvenciánál is jelentős mértékű, 0,1-1 kHz frekvenciaváltozást jelent.

41



Contents lists available at ScienceDirect

**Sensors and Actuators B: Chemical**

Journal homepage: [www.elsevier.com/locate/snb](http://www.elsevier.com/locate/snb)



Development of handheld SAW vapor sensors for explosives and CW agents

A.T. Nimal<sup>a,\*</sup>, Upendra Mittal<sup>a</sup>, Mohan Singh<sup>a</sup>, Mamta Khaneja<sup>a</sup>, G.K. Kannan<sup>b</sup>, J.C. Kapoor<sup>b</sup>, Vinita Dubey<sup>c</sup>, P.K. Gutch<sup>c</sup>, Gobardhan Lal<sup>c</sup>, K.D. Vyas<sup>c</sup>, D.C. Gupta<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Solid State Physics Laboratory, Lucknow Road, Thapar University, Patiala-151 054, India  
<sup>b</sup> Center for Fire, Explosive and Environmental Safety, Thapar University, Patiala-151 054, India  
<sup>c</sup> Defence Research and Development Establishment, Coimbatore-474 002, India

**ARTICLE INFO**

**Article history:**  
 Received 10 October 2007  
 Received in revised form 17 June 2008  
 Accepted 6 August 2008  
 Available online 10 September 2008

**Keywords:**  
 SAW chemical sensors  
 Explosives and CW sensing  
 SAW oscillator  
 Reciprocal frequency counting  
 Allan variance  
 Sensor stability

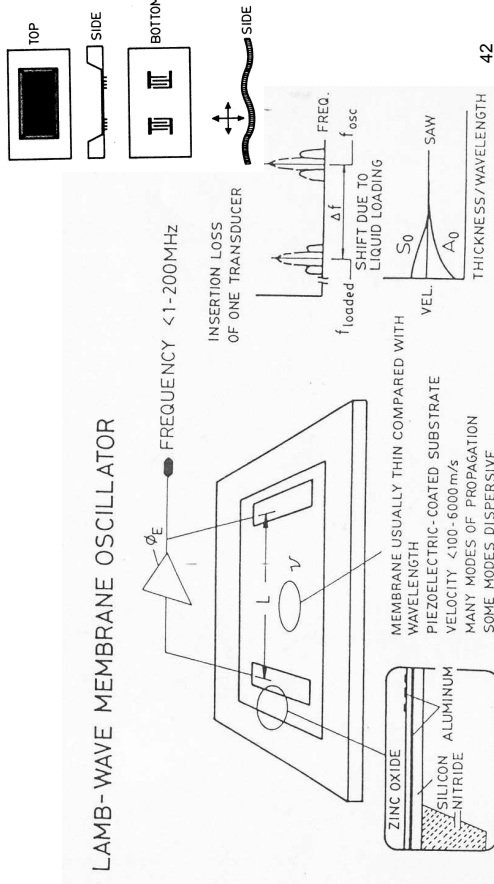
**A B S T R A C T**

This article reports about the development of various discrete (single sensor) surface acoustic wave (SAW) handheld sensor systems, for detection and quantification of explosives and chemical warfare agents (CWA). The sensing element is a SAW device of delay line, resonator or dispersive delay line type with frequency of operation ranging from 36 MHz to 434 MHz. The SAW devices are coated with various polymers having good selectivity to explosives and CWA. Oscillator with the SAW device in the feedback loop as a frequency determining element is used. Dual oscillator configuration with one coated and one uncoated SAW device is used. The outputs of the oscillators are mixed and signal conditioned before frequency measurement. The frequency measurement is carried out by a high-speed high-resolution reciprocal counting method using microcontroller-based readout circuitry. Data acquisition software written in Visual Basic performs online display and storage. The performance of various parts and the sensor systems is analyzed for their stability, resolution, accuracy and sensitivity.

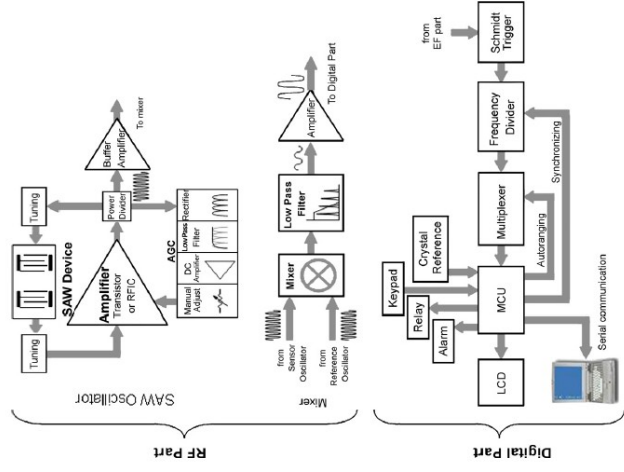
© 2008 Elsevier B.V. All rights reserved.

43

FPW



42



44

**Table 1**  
The sensor systems and the SAW devices used in the systems.

Sensor system	Frequency of sensor operation (MHz)	SAW device	Substrate	Center frequency (MHz)	3dB bandwidth (MHz)	Insertion loss (unburned) (dB)
I 1	60	In-house made dispersive delay line	Quartz	60	0.5	-52
I 2	47.5	In-house made dispersive delay line	LiNbO <sub>3</sub>	47.5	1.0	-6
I 3	106	Commercial filter	ZnO/glass	106	1.8	-25
II 1	150	In-house made delay line	Quartz	150	0.3	-22
II 2	433.82	Commercial resonator filter	Quartz	433.82	0.12	-9

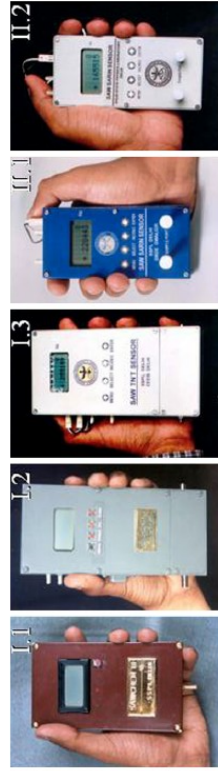


Fig. 2. Photographs of the five systems listed in Table 1.

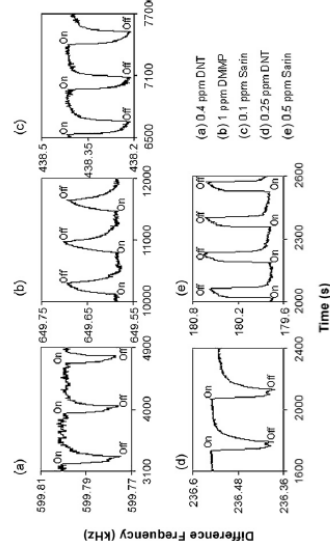


Fig. 12. Few representative sensing cycles of the sensor systems for explosive and chemical warfare agent vapors. The frequency of operation, type of device, coating thickness and main line (a) 60 MHz, dispersive delay line, 250 nm, photoresistor; (b) 47 MHz, delay line, 400 nm, fluoropoly; (c) band harmonic of 36.7 MHz, filter, 75 nm, fluoropoly; (d) 150 MHz, delay line, 25 nm, carbonax and (e) 433.82 MHz, resonator filter, 3 nm, BaPbTiO<sub>3</sub>.

Thus handheld discrete SAW chemical sensor systems have been developed and being used for sensing explosives and chemical warfare agents. Some of the sensor systems are used for more than 3 years, and show reproducible results. The sensor systems are miniaturized in size and the power consumption is brought down to <0.3 W. By changing the polymer coating these sensor systems can be adapted to sense other vapors and gas contaminants at very low concentrations.