



## MIKROELEKTRONIKAI ÉRZÉKELŐK I

Dr. Pődör Bálint

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

### 10. ELŐADÁS: PIEZOELEKTROMOS ÉRZÉKELŐK

2008/2009 tanév 1. félév

1

## 10. ELŐADÁS

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

2

## AKUSZTIKUS HULLÁMOK TERJEDÉSÉN ALAPULÓ ESZKÖZÖK

Piezoelektromosságon alapuló eszközök.  
Tömbi, illetve felületi akusztikus hullámok.

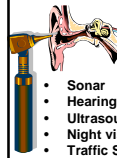
Rezonátor típus: állóhullám, a rezonanciafrekvencia eltolódása mérhető.

Hullámvezető típus: hullámterjedési tulajdonságok megváltozása fázistolás révén mérhető.

Váltakozó feszültség → mechanikai hullám

Mechanikai hullám → elektromos polarizáció

3



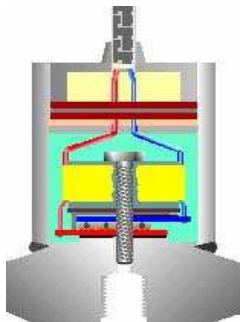
## Major applications

- **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, Vascular Graft Monitor, Micropower Source



• **And many, many more!**

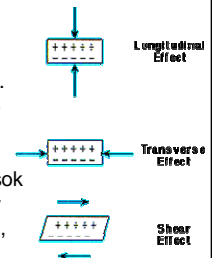
## THE PIEZOELECTRIC ACCELEROMETER (Compression Type)



- 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

## PIEZOELEKTROMOSSÁG

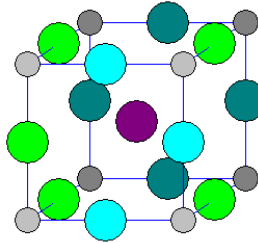
Piezoelektromosság (görög πιεζο össze- nyom): kristályelektromosság, nyomás v. húzás (mechanikai feszültség) hatására fellépő töltésszétválasztódás (polarizáció). Anizotrop kristályokban a nyomás (húzás) hatására a szemközti felületen ellentétes előjelű elektromos töltések lépnek fel. A mechanikai igénybevétel 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.



6

## PIEZOELEKTROMOS KRISTÁLYOK

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

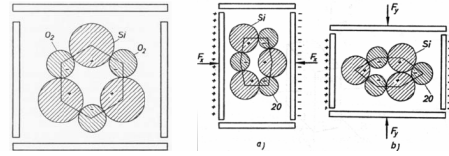


Perovskite  $\text{CaTiO}_3$

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.

7

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



Terhelés hatására a kvarckristály hexagonális szerkezete deformálódik. a. longitudinális, b. transzverzális piezoelektromos effektus.

8

## PIEZOELEKTROMOS EGYÜTTHATÓ

A  $d$  piezoelektromos együttható (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  $(1-100) \times 10^{-12}$  As/N.

9

## PIEZOELEKTROMOS EGYÜTTHATÓ

Illusztrációs példa:

$F = 10^5 \text{ N/m}^2$  (1 bar),  
 $d = 10^{-11} \text{ As/N}$ ,  
 dielektromos állandó  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \cong 10 \times 9 \times 10^{-12} \text{ Am/Vs}$

a mechanikai feszültség által létrehozott elektromos tér

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

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

10

## PIEZOELEKTROMOSSÁG: ELEKTROSTRIKCIÓ

**Elektrostrikción:** 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 beavatkozó (aktuátorok működése).

A jellemző itt is a  $d$  együttható, mely egyben a fajlagos deformáció mértéke is.  
 Dimenzió:  $\text{As/m} = \text{m/V}$  !!!

Piezoelektromos kerámiáknál ez néhány  $\times 10^{-4} \mu\text{m/V}$ .  
 Alkalmazás: mikropozicionálók, ultrahangkeltés (több 10 MHz-ig).

11

## 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

$$d^2/\epsilon c$$

12

## PIEZOELEKTROMOS ANYAGOK

Paraméter	PVDF	Kvarc	PZT	BaTiO <sub>3</sub>
d <sub>31</sub> 10 <sup>-12</sup> As/N	23	2,25	110	78
ε <sub>r</sub>	12	4,58	1200	1700
Sűrűség kg/dm <sup>3</sup>	1,78	2,6	7,5	5,7

Egykristályok

Polikristályos vagy amorf anyagok: előállítási technológiájával hozzák létre az elemi dipólusok rendezettségét.

Kvarc (SiO<sub>2</sub>)

Aln, ZnO, CdS (félvezető/félszigetelő ionos kristályok)

Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub> (PZT) vékonyréteg, kerámia

BaTiO<sub>3</sub>, LiNbO<sub>3</sub>

Húzott-polarizált poli(vinilidén-fluorid) PVDF

13

## PIEZOELEKTROMOSSÁG: MAKROSKÓPIKUS EGYENELETEK

A piezoelektrikus anyagok makroszkopikus tulajdonságai két egyenlet segítségével írhatók le

$$T = cS - eE$$

$$D = \epsilon E + eS$$

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> ]	- piezoelektrikus állandó,
E [V/m]	- elektromos térerő,
D [As/m <sup>2</sup> ]	- elektromos eltolás.

14

## PIEZOELEKTROMOSSÁG: MAKROSKÓPIKUS EGYENELETEK

$$T = cS - eE$$

$$D = \epsilon E + eS$$

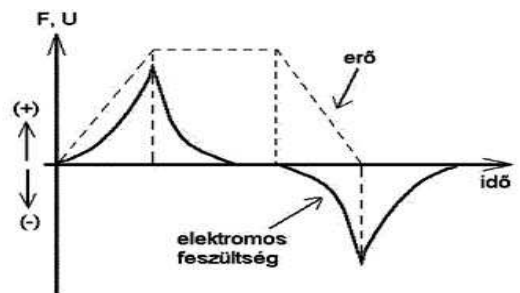
Az **e** piezoelektrikus együttható hozzá létre a csatolást az elektromos és a mechanikai mennyiségek között.

Ha **e = 0**, nincs csatolás a két jelenségkör között, a két egyenlet **T = cS** Hooke-törvényre (rugalmassági egyenlet) és a **D = εE** összefüggésre redukálódik.

Ha **e ≠ 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.

15

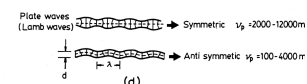
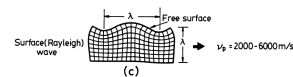
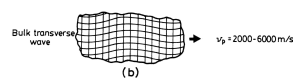
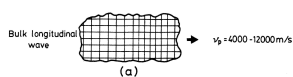
## PIEZOELEKTROMOS JEL IDŐFÜGGÉSE



A piezoelektrikus eszközökben keltett jelek időbeli lefutása

## RUGALMAS HULLÁMOK ÉS FÁZISSEBESÉG

Atomcsoportok mozgása rugalmas síkhullám terjedésekor.



a. Tömbi longitudinális hullám (*bulk longitudinal wave*) végtelen kiterjedésű anyagban.

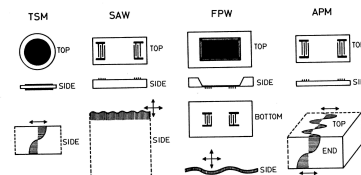
b. Tömbi transzverzális hullám (*bulk transverse wave*) végtelen kiterjedésű anyagban.

c. Felületi akusztikus (Rayleigh-) hullám (*surface (Rayleigh) wave*) fél-*végtelen* mintában. A behatolási mélység ~λ nagyságrendű.

d. Lemez (Lamb-) hullámok (*plate waves (Lamb waves)*),  $d < \lambda$ .

17

## Hullám-és rezgési módusok 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

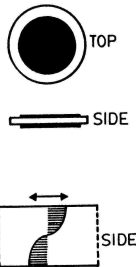
FPW - *flexural plate wave*: Lamb-hullám ("meghajló" módus)

APM - *acoustic plate mode*: akusztikus "lemez" módus

18

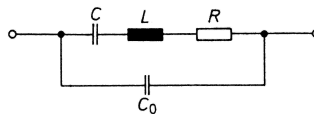
## KVARCKRISTÁLY OSZCILLÁTOR

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



19

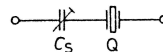
## ELEKTROMOS HELYETTESÍTŐ KÉP



Rezgőkvarc helyettesítő képe

A helyettesítő kép elemei:

**C** és **L** a kvarc mechanikai jellemzői;  
**R** a veszteségeket reprezentálja;  
**C<sub>0</sub>** az elektródák és kivezetések kapacitása.



Kvarc eredő soros rezonanciafrekvenciájának beállítása

20

## 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 ( $C_s \gg C$ ). Ekkor a párhuzamos rezonanciafrekvencia változatlan, a soros pedig módosul

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

A soros rezonanciafrekvencia  $C_s$  változtatásával legfeljebb a párhuzamos rezonanciafrekvencia és a soros rezonanciafrekvencia közötti távolság felével hangolható. <sup>21</sup>

21

## PIEZOELEKTROMOS ESZKÖZÖK SZENZOROKBAN

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

A kvarckristály oszillátor (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.

22

## 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 alapu. 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 dinamikus változó mennyiségek mérésére, illetve éppen a változás detektálására. Egy igen fontos példa a gyorsulásmérés illetve érzékelés. <sup>23</sup>

23

## PIEZOELEKTROMOS SZENZOROK

A piezoelektromos hatást a mechanikai érzékelőkben lehet jelkeltésre felhasználni, 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.

24

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

A kvarc oszillátor (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.

25

## MIÉRT A KVARC?

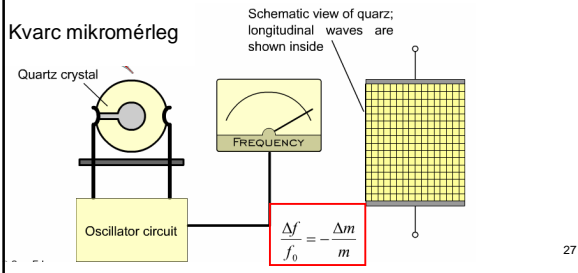
Of the large number of piezoelectric materials available today, quartz is employed preferentially in transducer designs because of the following excellent properties:

- 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)

26

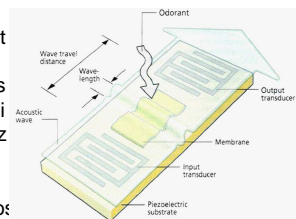
## KVARC MIKRO- ÉS NANOMÉRLEG (QMB)

Tömegérzékenység:  $S_m = \Delta f / (f_0 \Delta m)$



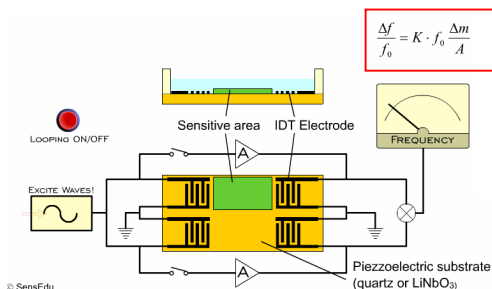
## AKUSZTIKUS FELÜLETI HULLÁMÚ (AHF) TÖMEG VAGY GÁZÉRZÉKLEŐ

Egy szelektív gázadszorbens réteggel bevont és egy bevonat nélküli eszköz egy-egy RF oszillátort alkot. Az abszorbeált gáz mennyiségétől függően megváltoznak felületi akusztikus hullámok terjedési tulajdonságai (sebessége) és ez elhangolja az oszillátort. A két oszillátor jeléből egy keverővel a különbségi frekvenciával arányos jelet állítanak elő, mely egyben arányos az érzékelőrétegen abszorbeált gáz mennyiségével.



28

## SAW TÍPUSÚ SENZOR



Felületi akusztikus hullámok (surface acoustic wave) terjedésén alapuló szenzor.

29

## AFH ÉRZÉKELŐ

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).

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

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

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

30

## AFH GÁZÉRZÉKELŐ

Példa:

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

31

**VÉGE**  
**(AZ ELSŐ RÉSZNEK)**

32