

# A folyamatműszerezés érzékelői

## Energiaátalakulások szilárd testekben – piezo- és piroelektromos átalakítók – 1.

Dr. Fock Károly

**Az érzékelők működésének alapjait az energiaátalakulások képezik. A cikksorozat most kezdődő témaköre a speciális, szilárd halmazállapotú szigetelőanyagoknak azokkal a típusaival foglalkozik, amelyeket összefoglaló néven piezoelektromos, illetve piroelektromos anyagoknak neveznek, és belőlük igen gyakran használt erő-, nyomás-, gyorsulás-, illetve hőmérséklet-érzékelőket készítenek.**

### A piezoelektromos hatás elméleti alapjai

Az „Energiaátalakulások szilárd testekben” című cikksorozat bevezető része<sup>1,2</sup> termodinamikai alapokon, deduktív módon foglalja össze négy energiafajta – a termikus, a villamos, a mechanikai és a mágneses energia – változásából levezethető hatásokat anélkül, hogy bármelyik energiafajta kiemelte vagy előnyben részesítette volna. A termodinamikai potenciálokból levezethető lineáris állapotegyenletek, illetve anyagjellemzők egyszerűen kezelhető módon írják le a vizsgált energiaváltozáson belüli, illetve a különböző energiaváltozások közötti hatásokat.

### Bevezetés

A praktikus szempontok figyelembevételével, de önkényesen kiválasztott, négyfajta energiaváltozás – mint látható – már eléggé terjedelmes módon tárgyalható, és esetenként nehezen is áttekinthető. A részletesebb vizsgálatokat már csak úgy érdemes elvégezni, ha az energiafajta számát szűkítjük. Ez természetesen drasztikusan csökkenti a szóba jöhető anyagok fajtáit és a belőlük kialakítható érzékelők típusait is.

A szisztematikus tárgyalásmód, és annak következetes végigvitele azzal az előnnyel jár, hogy ha helyesek voltak a kiindulási feltételek, akkor automatikusan megjelenítik összefoglalva az ismert eszközöket, illetve azok működési feltételeit, továbbá definiálnak néhány olyan átalakítási, érzékelési módot is, amelyre esetleg korábban kevesebb figyelem fordítódott, vagy éppen kimaradt a vizsgálatok lehetséges köréből.

Minden bizonnyal így járnánk, ha a felsorolt energiaváltozások helyett vagy azok kibővítésével a vizsgálatokba új energiafajta is bevonnánk. Gondoljunk csak például a különböző spektrumú sugárzási energiák számos fajtájára vagy a kémiai energiaátalakulásokra. A két új energiafajta kiegészítő figyelembevétele az eddig tárgyalt 16 fajta hatást máris 36-ra emeli, közte feltételezhetően egy sor újabb érzékelőtípus rendszerbe állítását, de minden bizonnyal néhány olyat is, amelynek műszaki megvalósítása napjainkban nincs megoldva, vagy műszakilag talán még sürgős is. Tehát a rendszerezésben célszerű egy józan mértéktartás, mert ha bizonyos jelenségeket részletesebben meg kívánunk vizsgálni, akkor a lehetséges változások számát szűkíteni kell.

1 Dr. Fock Károly: A folyamatműszerezés érzékelői. Energiaátalakulások szilárd testekben – 1. Magyar Elektronika 2011/4. 40 – 44. old.

2 Dr. Fock Károly: A folyamatműszerezés érzékelői. Energiaátalakulások szilárd testekben – 2. Magyar Elektronika 2011/5. 52 – 56. old.

Ez történik akkor is, amikor a szilárd halmazállapotú szigetelőanyagoknak azt a speciális körét vizsgáljuk, amihez elegendő a mechanikai és a villamos energiák kölcsönhatásának az elemzése. Ezeknél az anyagoknál a mágneses energia hatástalan, a hőenergia változása viszont zavaró tényezőként hat. Tehát formailag a mágneses teret a vizsgálatból kihagyjuk, a termikus energia változásától pedig – a tárgyalás egyszerűsítése érdekében – a hőmérséklet, illetve az entrópiásűrűség állandó értéken tartásával eltekintünk.

Marad tehát a mechanikai és a villamos energia kölcsönhatásának a vizsgálata. Az energiafajta állapotváltozói – mint ismeretes – villamos energiánál az  $E_i$  villamos térerősség [ $\text{Vm}^{-1}$ ] és a  $D_j$  villamos eltolás [ $\text{Asm}^{-2}$ ], a mechanikai energiánál pedig a  $T_{\mu}$  feszültségtenzor [ $\text{Nm}^{-2}$ ], illetve az  $S_{pq}$  deformációtenzor [1]. Az állapotváltozók közül mindegyik energiafajtanál egyet-egyet függetlennek tekinthetünk, a másik kettő ilyenkor a függő változó.

Praktikus szempontok alapján a cikksorozat bevezető részében független változónak az  $E_i$  villamos térerősséget és a  $T_{\mu}$  feszültségtenzort választottuk, és ilyen választás mellett a Gibbs-féle potenciálfüggvényből vezettük le a lineáris állapotegyenleteket és az anyagjellemzőket. De említettük, hogy a független állapotváltozók más csoportosítása is lehetséges. Ebben az esetben más potenciálfüggvényből kell kiindulnunk, és ugyanazt a fizikai jelenséget ilyenkor más anyagjellemzők segítségével jellemezzhetjük.

### A piezoelektromos hatás lineáris matematikai modelljei

Tekintettel a választott energiafajta alacsony számára, megpróbáljuk a tárgyalást teljessé tenni. A négyféle állapotváltozóból négyféle módon tudunk 2 – 2 független párt kiválasztani (mind-egyik energiafajtaból egyet-egyet). A szakirodalomban szokásos módon<sup>3</sup> a bevezetőben ismertetett gondolatmenet alapján az 1. táblázatban összefoglaltuk az energiaváltozásokból kialakítható matematikai modelleket, a 2. táblázatban pedig a lineáris közelítéshez tartozó anyagjellemzőket. Természetesen mind a négy lineáris állapotegyenlet-pár ugyanazt a fizikai jelenséget fejezi ki, vagyis:

- az  $\epsilon_{ij}$  dielektromos állandóval, illetve a  $\beta_{ij}$  impermittivitással (a dielektromos állandó reciprokával) a szigetelőanyag tulajdonságát,

| Független állapotváltozók | A termodinamikai potenciálok neve és definíciója                      | Lineáris állapotegyenletek (állandó hőmérsékleten)                        |  | Peremfeltételek |            |
|---------------------------|---|---|--|-----------------|------------|
|                           |   | Direkt piezoelektromos hatás  | Indirekt piezoelektromos hatás   | Villamos        | Mechanikai |
| $E_i, T_\mu$              | Gibbs-féle potenciál<br>$G = U - D_i \cdot E_i - S_{pq} \cdot T_{pq}$ | $D_i = \varepsilon_{ij} \cdot E_j + d_{i\lambda\mu} \cdot T_{\lambda\mu}$ | $S_{pq} = d_{i\lambda\mu} \cdot E_i + s_{pq\lambda\mu} \cdot T_{\lambda\mu}$ | Szabad          | Szabad     |
| $D_i, T_\mu$              | Rugalmas enthalpia<br>$\dot{H} = U - S_{pq} \cdot T_{pq}$             | $E_i = \beta_{ij} \cdot D_j + g_{i\lambda\mu} \cdot T_{\lambda\mu}$       | $S_{pq} = g_{i\lambda\mu} \cdot D_i + s_{pq\lambda\mu} \cdot T_{\lambda\mu}$ | Zárt            | Szabad     |
| $E_i, S_{pq}$             | Villamos enthalpia<br>$\dot{H} = U - D_i \cdot E_i$                   | $D_i = \varepsilon_{ij} \cdot E_j + e_{ipq} \cdot S_{pq}$                 | $T_{\lambda\mu} = e_{ipq} \cdot E_i + c_{pq\lambda\mu} \cdot S_{pq}$         | Szabad          | Befogott   |
| $D_i, S_{pq}$             | Belső energia<br>$U$  | $E_i = \beta_{ij} \cdot D_j + h_{ipq} \cdot S_{pq}$                       | $T_{\lambda\mu} = h_{ipq} \cdot D_i + c_{pq\lambda\mu} \cdot S_{pq}$         | Zárt            | Befogott   |

1. táblázat A piezoelektromos hatás matematika modelljei

| Anyagjellemzők (állandó hőmérsékleten) |                                      |  |  |
|--|--------------------------------------|--|--|
| Anyagtulajdonság                       | Anyagálladó                          | Szimbólum és definíció   | SI-egység                              |
| Dielektromos                           | Dielektromos állandó (Permittivitás) | $\varepsilon_{ij} = \frac{\partial D_j}{\partial E_i}$   | $\text{AsV}^{-1}\text{m}^{-1}$         |
|  | Impermittivitás                      | $\beta_{ij} = \frac{\partial E_i}{\partial D_j}$   | $\text{A}^{-1}\text{s}^{-1}\text{Vm}$  |
| Rugalmas                               | Rugalmassági együttható              | $s_{pq\lambda\mu} = \frac{\partial S_{pq}}{\partial T_{\lambda\mu}}$                                     | $\text{m}^2\text{N}^{-1}$              |
|  | Rugalmassági modul                   | $c_{pq\lambda\mu} = \frac{\partial T_{\lambda\mu}}{\partial S_{pq}}$                                     | $\text{Nm}^{-2}$                       |
| Piezoelektromos                        | Piezoelektromos együttható           | $\frac{\partial D_j}{\partial T_{\lambda\mu}} = \frac{\partial S_{pq}}{\partial E_i} = d_{j\lambda\mu}$  | $\text{AsN}^{-1}$                      |
|  |                                      | $-\frac{\partial E_i}{\partial T_{\lambda\mu}} = \frac{\partial S_{pq}}{\partial D_j} = g_{i\lambda\mu}$ | $\text{A}^{-1}\text{s}^{-1}\text{m}^2$ |
|  | Piezoelektromos modul                | $-\frac{\partial E_i}{\partial S_{pq}} = -\frac{\partial T_{\lambda\mu}}{\partial D_j} = h_{ipq}$        | $\text{A}^{-1}\text{s}^{-1}\text{N}$   |
|  |                                      | $\frac{\partial D_j}{\partial S_{pq}} = -\frac{\partial T_{\lambda\mu}}{\partial E_i} = e_{jpq}$         | $\text{Asm}^{-2}$                      |

2. táblázat Piezoelektromos anyagok anyagjellemzőinek definíciói állandó hőmérsékleten

- az  $s_{pq\lambda\mu}$  rugalmassági együtthatóval, illetve a  $c_{pq\lambda\mu}$  rugalmassági modullal (a rugalmassági együttható reciprokával) az anyag rugalmassági tulajdonságát,
- a független változópár megválasztásától függő  $d_{j\lambda\mu}$  vagy  $g_{i\lambda\mu}$  piezoelektromos együtthatókkal, illetve a  $h_{ipq}$  és  $e_{jpq}$  piezoelektromos modulokkal pedig az anyag piezoelektromos tulajdonságát írja le a legegyszerűbb lineáris közelítéssel.

Ismételten hangsúlyozzuk, hogy az állapotegyenletek és az anyagjellemzők állandó hőmérsékleten érvényesek, és más külső energia hatásától (mágneses, sugárzási, kémiai) eltekintünk.

Az anyag villamos és mechanikai tulajdonságának jellemzésén túlmenően a figyelmet most azokra a jelenségekre összpontosítjuk, amelyek mindegyik állapotegyenletben a mechanikai és villamos energia kölcsönhatását jelentik.

Az állapotegyenletek egyik csoportjában (1. táblázat, 3. oszlop) a  $T_{\lambda\mu}$  mechanikai feszültség vagy az  $S_{pq}$  mechanikai alakváltozás a villamos tér, illetve a villamos polarizáció megváltozásához vezet. Ezt **direkt piezoelektromos hatásnak** nevezzük.

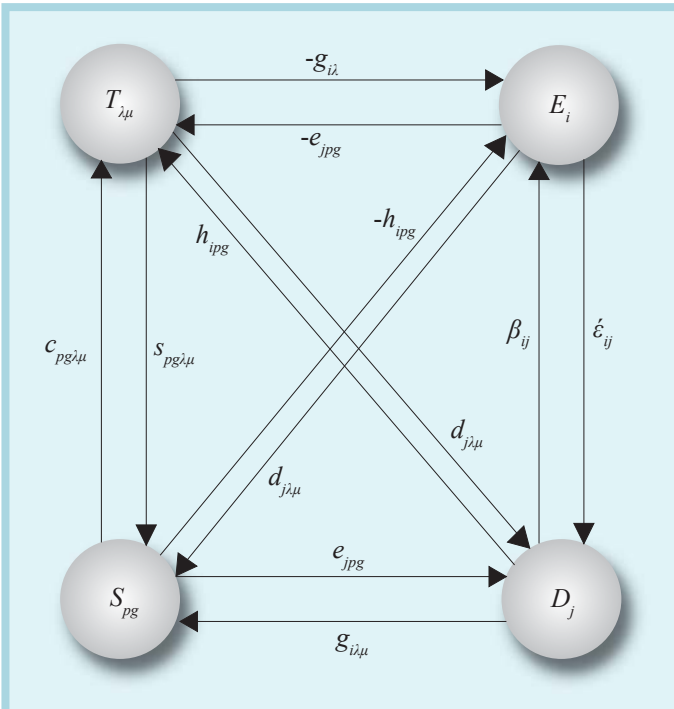
Az állapotegyenletek másik csoportja (1. táblázat, 4. oszlop) az  $E_i - D_j$  vektorokkal jellemzett villamos tér hatására bekövet-

kező mechanikai deformáció, illetve mechanikai feszültség megváltozását, az **inverz piezoelektromos hatást** írja le.

Bebizonyítható, hogy az azonos változópárhoz tartozó egyenletpárban a direkt és az inverz piezoelektromos hatást leíró anyagjellemzők egyenlők, tehát az állapotegyenletekben ezt az egyenlőséget az indexek jelöléseinél már figyelembe vettük. A jobb áttekinthetőség érdekében a villamos és a mechanikai állapotváltozók közötti – az állapotegyenletekben lerögzített – kapcsolatokat az 1. ábrán még egyszer ábrázoltuk. Az állapotváltozókat körök, a közöttük lévő kapcsolatokat nyilak jelzik, és a nyíl iránya mindig a függetlennek választott állapotváltozótól a függő irányába mutat<sup>4</sup>.

A többféle függő – független változópár választásának műszaki jelentősége van. Ez a teljesen elméleti megközelítés után már a gyakorlati kivitelezés irányába is mutat, mivel különböző mechanikai és villamos peremfeltételeket kell létrehozni annak érdekében, hogy az egyenletekben lerögzített kapcsolatokkal leírt változások a valóságban is létrejöjjenek.

4 J. Tichy – G. Gautschi: Piezoelektrische Messtechnik, Springer Verlag, Berlin – Heidelberg – New York 1980.



1. ábra Lineáris elektromechanikai kapcsolatok és anyagjellemzők

- Ha a piezoelektromos elem például mechanikailag és villamosan is szabad (1. táblázat, 1. sor), akkor a független változópár az  $E_i$  és  $T_{\lambda\mu}$  lesz, és a piezoelektromos hatást a  $d_{j\lambda\mu}$  együtthatók írják le. Ez a változat azért fontos, mert a piezoelektromos mérés technikában gyakran adódnak olyan esetek, amelyek teljesítik ezt a feltételt. Ha a villamos térerősséget állandó értéken tartjuk (villamosan szabad állapot), akkor a direkt piezoelektromos hatás egyszerűen a

$$D_j = d_{j\lambda\mu} T_{\lambda\mu}$$

egyenletrendszerrel írható le. Kísérleti úton a villamosan szabad állapot a legegyszerűbben az elektródák rövidre záráásával valósítható meg. A polarizációs töltések a vezetőben a szabad töltések mozgásával kompenzálódnak, ezek után a villamos térerősség a piezoelektromos elemekben zérus marad.

- A mechanikailag szabad állapot, vagyis a mechanikai feszültséggel akadálytalanul deformálható működésmód kissé nehezebben valósítható meg. Ennek az az oka, hogy a piezoelektromos elemre ható erő egy nyomóelem közvetítésével adódik át, aminek az erő hatására történő deformációja egy általános feszültségállapotot hoz létre az érzékelő felületén. Ezt kell a működés során mechanikailag szabad állapotnak tekinteni. Az inverz hatás során egyszerűbb a helyzet, amikor is az  $S_{pg}$  deformációt mérjük  $E_i$  függvényében. Megfelelő befogás alkalmazásával ilyenkor könnyen teljesíthető a feszültségmentes állapot.
- Az 1. táblázat 2. sorában  $D_j$  és  $T_{\lambda\mu}$  a független változópár, miközben elő kell állítani a villamosan zárt és mechanikailag szabad állapotot. A piezoelektromos hatást ez esetben a  $g_{i\lambda\mu}$  együtthatók írják le. Ha az  $E_i$  térerősséget a  $T_{\lambda\mu}$  függvényében szeretnénk vizsgálni, akkor a  $D_j$  villamos eltolást kell állandóvá tenni. Ennek megfelelően a szabad töltéseket a piezoelektromos elem környezetében állandó értékben kell tartani. Erre akkor nyílik lehetőség, ha a piezoelektromos elem környeze-

tében nincs vezető anyag, ha a piezoelektromos elem nincs elektróda. Ekkor ugyanis feltételezhető, hogy a piezoelektromos polarizációs töltések a felületen egy depolarizáló teret hoznak létre, ezáltal  $D_j$  a piezoelektromos elemekben zérus marad. Meghatározott feltételek esetén a mechanikai feszültség hatására ez a feltétel akkor is elérhető, ha az elektródák egymástól elszigeteltek. Az inverz hatás során a mechanikailag szabad állapotban lévő elemet a felületen megjelenő,  $D_j$ -ből származó szabad töltések deformálják.

- Az  $E_i - S_{\lambda}$  változópárost tartalmazó harmadik egyenletpár (1. táblázat, 3. sor) befogott mechanikai, de villamosan szabad piezoelektromos elemet feltételez. A piezoelektromos hatást az  $e_{jpg}$  piezoelektromos modulok írják le. A villamosan szabad állapot megvalósítása már ismert. A mechanikailag befogott állapotot úgy lehet elérni, hogy a piezoelektromos elemet légrés nélkül egy végtelenül merev környezetbe helyezzük.
- A negyedik és egyben utolsó állapotegyenlet-páros (1. táblázat, 4. sor) a  $D_j - S_{pg}$  változópárral – a  $h_{ipg}$  piezomodulok segítségével – a mechanikailag befogott, villamosan zárt kombinációt írja le.

A különböző egyenletekben feltüntetett anyagjellemzők egymásba átszámíthatók, ezek közlését terjedelmi okok miatt mellőzzük.

Legnagyobb műszaki jelentősége az 1. táblázat 1. sorának van, mivel a gyakorlatban kivitelezett piezoelektromos elven működő erő-, nyomás- és gyorsulásmérők, valamint az ultrahangforrások is általában ilyen körülmények között működnek. Megjegyezzük, hogy a különböző állapotegyenletek és a hozzájuk tartozó mechanikai és villamos peremfeltételek az anyagjellemzők mérésel történő meghatározásához is fontosak<sup>5</sup>.

### A piezoelektromos hatás típusai

Az 1. táblázat négy pár állapotegyenlete az anyag dielektromos és rugalmas tulajdonságainak leírásán kívül tartalmazza a direkt és az indirekt piezoelektromos hatást is, amelynek lehetséges variációit tovább vizsgáljuk. Az már ismeretes, hogy mind a direkt, mind az indirekt hatás ugyanazokkal a piezoelektromos együtthatókkal, illetve piezoelektromos modulokkal írható le.

### Direkt piezoelektromos hatás

A részletesebb elemzést a direkt hatás elemzésével kezdjük. Független változópárnak tekintjük az  $E_i - T_{\lambda\mu}$  változópárost (1. táblázat, 1. sor). Ha a villamos térerősséget állandó értéken tartjuk, akkor a piezoelektromos hatás – mint már láttuk – egyszerűen a

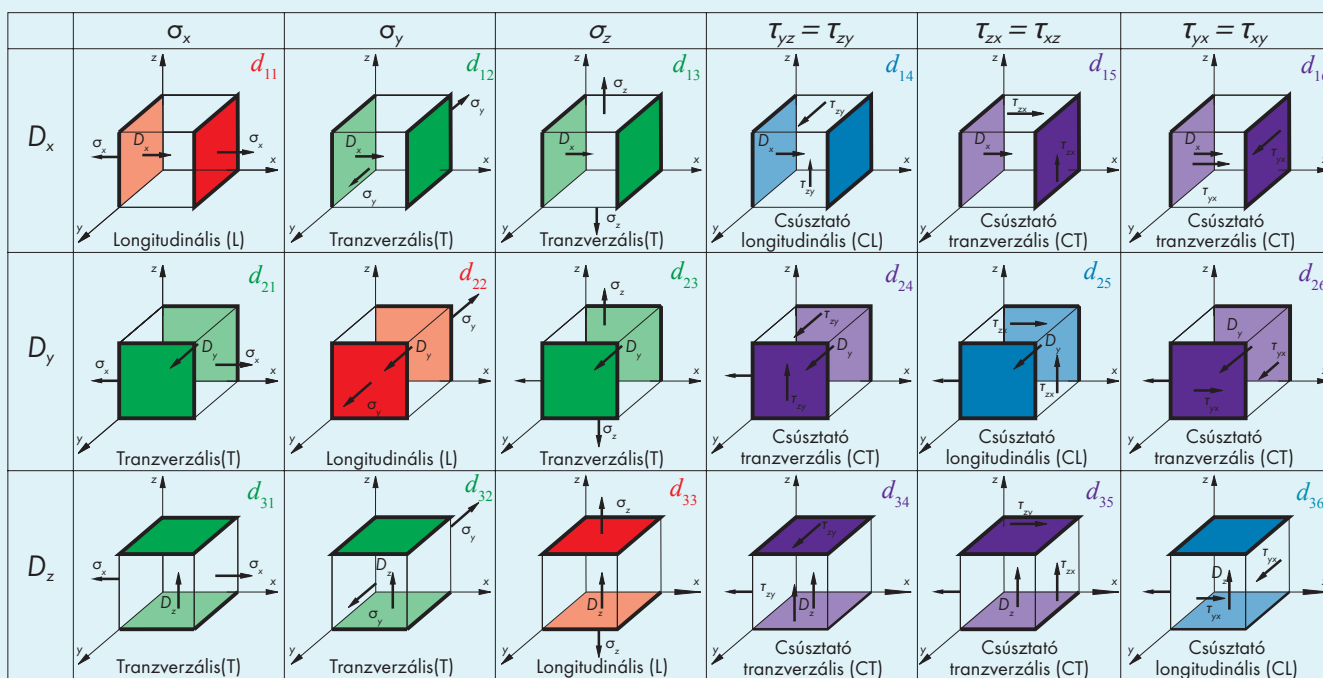
$$D_j = d_{j\lambda\mu} T_{\lambda\mu}$$

egyenletrendszerrel írható le, amelynek komponensekre bontott alakja a 3. táblázatban látható.

3. táblázat A direkt piezoelektromos hatás típusai

|       | $\sigma_x$      | $\sigma_y$      | $\sigma_z$      | $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ | $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ | $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ |
|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $D_x$ | $d_{11}$<br>$L$ | $d_{12}$<br>$T$ | $d_{13}$<br>$T$ | $d_{14}$<br>$CL$        | $d_{15}$<br>$CT$        | $d_{16}$<br>$CT$        |
| $D_y$ | $d_{21}$<br>$T$ | $d_{22}$<br>$L$ | $d_{23}$<br>$T$ | $d_{24}$<br>$CT$        | $d_{25}$<br>$CL$        | $d_{26}$<br>$CT$        |
| $D_z$ | $d_{31}$<br>$T$ | $d_{32}$<br>$T$ | $d_{33}$<br>$L$ | $d_{34}$<br>$CT$        | $d_{35}$<br>$CT$        | $d_{36}$<br>$CL$        |

5 A. Lenk: Elektromechanische Systeme, Band 2: Systeme mit verteilten Parametern, VEB Verlag Technik Berlin, 1974.



2. ábra A direkt piezoelektromos hatás lehetséges változatai (a villamos töltések a kiemelt felületeken keletkeznek)

|              | $E_x$    | $E_y$    | $E_z$    |
|--------------|----------|----------|----------|
| $\epsilon_x$ | $d_{11}$ | $d_{21}$ | $d_{31}$ |
| $\epsilon_y$ | $d_{12}$ | $d_{22}$ | $d_{32}$ |
| $\epsilon_z$ | $d_{13}$ | $d_{23}$ | $d_{33}$ |
| $\gamma_x$   | $d_{14}$ | $d_{24}$ | $d_{34}$ |
| $\gamma_y$   | $d_{15}$ | $d_{25}$ | $d_{35}$ |
| $\gamma_z$   | $d_{16}$ | $d_{26}$ | $d_{36}$ |

4. táblázat Az indirekt piezoelektromos hatás lineáris matematikai modellje

**Megjegyzés:** a  $d_{j\mu}$  piezoelektromos együtthatók indexeit az irodalomban szokásos tenzoriális írásmód helyett a gyakorlatban elterjedt mátrixos alakban tüntettük fel.

- A  $d_{11}, d_{22}, d_{33}$  a felületre merőleges polarizációnak és a vele párhuzamos  $\sigma$  mechanikai feszültségnek a kapcsolatát jelenti, amelyet **longitudinális** hatásnak ( $L$ ) nevezünk.
- A  $d_{12}, d_{13}, d_{21}, d_{23}, d_{31}, d_{32}$  együtthatókkal jelzett kapcsolat közös jellemzője, hogy a polarizáció és a  $\sigma$  mechanikai feszültség egymásra merőleges. Ez a **tranzverzális** hatás ( $T$ ).
- A  $d_{14}, d_{25}, d_{36}$  együtthatókkal leírt kapcsolatban a  $\tau$  csúsztató feszültségek síkja és a polarizáció vektora egymásra merőleges. Elnevezésük: **csúsztató longitudinális** hatás ( $CL$ ).
- A  $d_{15}, d_{16}, d_{24}, d_{26}, d_{34}, d_{35}$  együtthatók esetében a  $\tau$  csúsztató feszültségek síkja párhuzamos a villamos polarizációval. Ennek a jelenségnek a neve: **csúsztató tranzverzális** hatás ( $CT$ ).

A lehetséges változatokat a 2. ábra teszi szemléletessé.

**Indirekt piezoelektromos hatás**

Az indirekt piezoelektromos hatást (mechanikailag feszültségmentes állapotban) az 1. táblázat 1. sora szerint az

$$S_{pq} = d_{j\mu} \cdot E_j$$

egyenletrendszer írja le, amelynek komponensekre bontott alakja a 4. táblázatban látható, míg a 3. ábrán a lehetséges deformációkat tüntettük fel. A könnyebb áttekinthetőség érdekében az egyes típusokat eltérő színnel jelöltük, amelyeket a későbbiekben is megtartunk, ami segít majd a különböző, piezoelektromos anyagok értékelésében.

**A piezoelektromos hatás és a kristályszimmetriák kapcsolata**

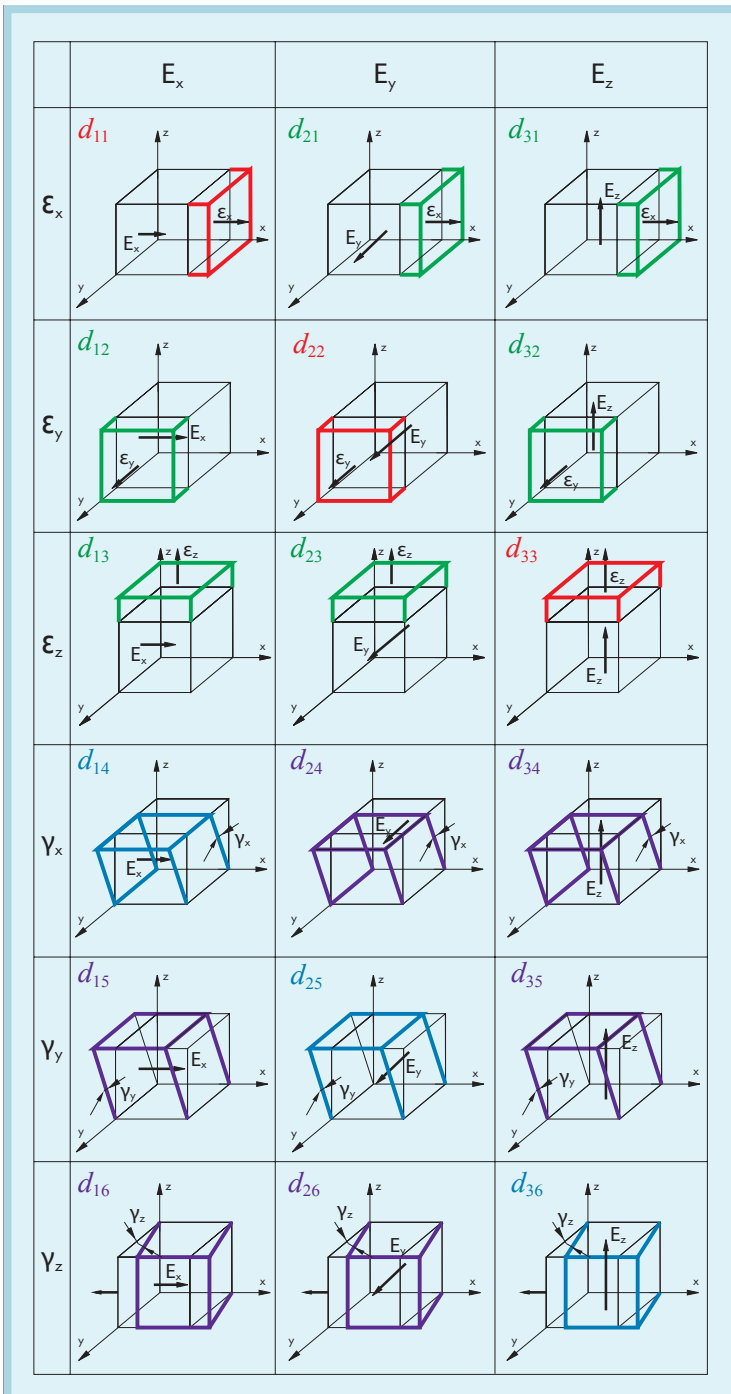
A piezoelektromos hatás szoros kapcsolatban áll az anyagok kristályszerkezetével. A cikksorozat bevezető részében<sup>6,7</sup> részletesen összefoglaltuk a legfontosabb kristálytani alapfogalmakat, amelyek közül jelen esetben az a legfontosabb, kiemelendő megállapítás, hogy a kristályokat felépítésük és szimmetriatulajdonságaik alapján 32-féle kristályosztályba lehet besorolni. Terjedelmi okok miatt ezeket korábban sem részleteztük (és most sem tesszük meg). Az érdeklődők az osztályba sorolás módját és adatait a szakirodalomban megtalálhatják<sup>8</sup>.

A kristályszerkezet és a piezoelektromos hatás kapcsolatában döntő szerepet játszó szimmetriatulajdonságaik alapján megállapítható, hogy piezoelektromos hatást kizárólag olyan kristályszerkezetű anyagoknál lehet észlelni, amelyek felépítése *nem* centroszimmetrikus. Ennek az a magyarázata, hogy a centroszimmetrikus kristályrácsok a mechanikai deformáció után is centroszimmetrikus felépítésűek maradnak, emiatt bennük polarizáció nem jön létre.

A lehetséges 32-féle kristályosztályból felépítését tekintve mindössze 20 db *nem* centroszimmetrikus. Ezt a csoportot is két-felé lehet választani, amely szétválasztás a piezoelektromos hatáson kívül más jelenségek kialakulásánál is jelentőséggel bír (piezoelektromos hatás, ferroelektromosság stb.). Vagyis a szimmetriaközponthall nem rendelkező kristályok két csoportja lehet:

6 Dr. Fock Károly: A folyamatműszerezés érzékelői. Energiaátalakulások szilárd testekben – 2. Magyar Elektronika 2011/5. 52 – 56. old.  
 7 J. Tichy – G. Gautschi: Piezoelektrische Messtechnik, Springer Verlag, Berlin – Heidelberg – New York 1980.  
 8 H. Breuer: SH atlasz, Fizika, Springer Verlag, Budapest Berlin, 1993.





3. ábra Az indirekt piezoelektromos hatás során bekövetkező deformációk

- poláros és
- polárosan semleges.

A **poláros** kristályoknak (10 kristályosztály) szinguláris polarizációs irányai vannak, bennük spontán villamos polarizáció alakul ki, és a piezoelektromos hatás miatt jön létre, hogy a mechanikai igénybevétel hatására ez a spontán polarizáció megváltozik. Ilyen tulajdonsággal rendelkezik pl. a turmalin.

A **polárosan semleges** kristályokban (további 10 kristályosztály) kompenzált polarizációs irányok vannak, a deformáció következtében a kristály szimmetriája úgy változik meg, hogy ezáltal szingulárisan polarizált irányok jönnek létre, és a kristály ebben az irányban piezoelektromosan polarizált lesz. Ebbe a csoportba tartozik pl. a nagy mérés-technikai jelentőséggel bíró  $\alpha$ -kvarc kristály.

**Hidrosztatikus piezoelektromos hatás**

Szinguláris polarizációs irányokkal bíró kristályosztályokban a piezoelektromos hatással egy különleges piezoelektromos hatás is párosul. Ezeket a kristályokat hidrosztatikus nyomással lehet polarizálni. A hidrosztatikai nyomásnál csúsztató feszültségek nem lépnek fel, és a normál-feszültségek azonos nagyságúak. A  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = -p$  helyettesítéssel (ahol  $p$  a hidrosztatikai nyomást, a negatív előjel pedig a mechanikában megszokott módon a húzással ellentétben a nyomóirányt jelenti) állandó  $\Theta$  hőmérsékleten  $E=0$  térforrésnéél a töltéssűrűségekre a

$$D_x = -(d_{11} + d_{12} + d_{13}) \cdot p$$

$$D_y = -(d_{21} + d_{22} + d_{23}) \cdot p$$

$$D_z = -(d_{31} + d_{32} + d_{33}) \cdot p$$

egyenletrendszerben kapjuk. Ha az egyenletrendszerben található piezoelektromos együtthatók közül legalább egy a zérustól különböző, akkor megfigyelhetjük a hidrosztatikus piezoelektromos hatást. Pl. turmalin kristály esetén csak a  $d_{33}$  és a  $d_{31} = d_{32}$  piezoelektromos együtthatók léteznek, és a kristály  $p_h$  hidrosztatikai piezoelektromos együtthatója

$$p_h = 2 \cdot d_{31} + d_{33} = 2,43 \text{ pC/N}$$

nagyságú. Ily módon hidrosztatikai nyomások dinamikus mérésére nyílik lehetőség.

**Megjegyzés:** Fontos hangsúlyozni, hogy a piezoelektromos, piezoelektromos hatások mindegyikénél csak dinamikus mérések elvégzésére nyílik lehetőség, ugyanis statikus esetben a keletkezett villamos töltések a kristály saját, véges belső ellenállásán keresztül kisülnek.

(Folytatjuk!)

editor@magyar-elektronika.hu

www.magyar-elektronika.hu

MAGYAR

**ELEKTRONIKA**

ALAPÍTVÁ: 1984

PROFESSZIONÁLIS ELEKTRONIKAI ÉS AUTOMATIZÁLÁSI SZAKFOLYÓIRAT