

A folyamatműszerezés érzékelői

Energiaátalakulások szilárd testekben – 1.

Dr. Fock Károly

A következő cikksorozatban áttekintjük a szilárd testekben végbemenő olyan átalakulásokat, amelyek a mechanikai, villamos, termikus és mágneses energia hatására következnek be. A tárgyalás megadja a szilárd anyagokból készült aktív érzékelők működésének fenomenológiai leírását. A tárgyalásmód szisztematikus módszert mutat be a működést leíró anyagjellemzők definíciójához, és több módon is igyekszik szemléletessé és átláthatóvá tenni az energia-kölcsönhatásokat. Közelítendő a konkrét hatásmechanizmusok és az anyagi tulajdonságok kapcsolatához, az elméleti összefoglaló kitér a kristálytani alapfogalmak ismertetésére is. Ezt követően sorra vesszük a megismert kölcsönhatásokat, és megvizsgáljuk, hogy milyen feltételek teljesülése esetén lehet azokból mérés-technikai igényű átalakítókat létrehozni.

Bevezetés

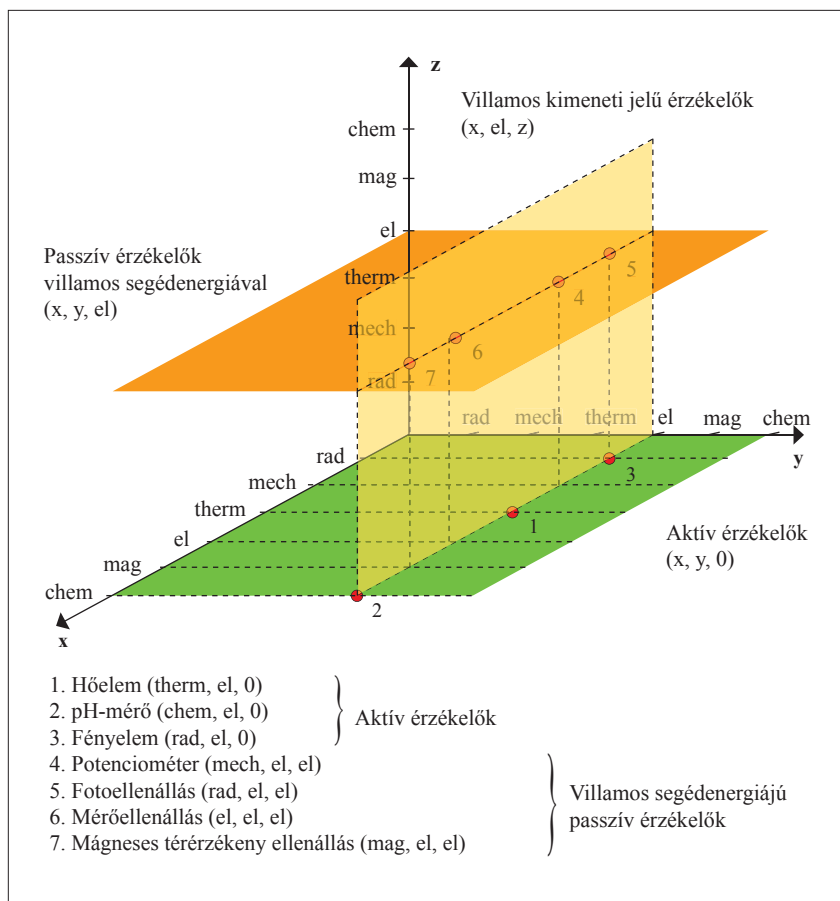
Az érzékelők csoportosításának tárgyalásánál¹ két lényeges szempontra is felhívtuk a figyelmet. Az egyik az, hogy az érzékelők belsejében a mérés során mindig energiaátalakulás megy végbe – még akkor is, ha információátviteli szempontból nincs is szükségünk ezen energiákra és megelégszünk valamely változópár kapcsolatának az ismeretével –, a másik pedig annak a vizsgálata, hogy az érzékelők működéséhez szükség van-e segédenergiára, vagy nincs.

Ezekből a megfontolásokból született az a – ma már klasszikusnak számító – csoportosítási rendszer, amely az energiafajtákat 6 csoportba osztotta (sugárzási, mechanikai, termikus, villamos, mágneses és kémiai), valamint feltételezte, hogy az érzékelők bemenő- és kimenőjelei, továbbá az esetenként szükségessé váló segédenergiák is ezen csoportok valamelyikébe sorolhatók. A csoportok jellemzésére így jött létre az energiafajták Miller-indexével jellemzett csoportosítási rendszer (1. ábra²).

Áttekintve a lehetséges variációkat (az elméletileg lehetséges 252-féle érzékelőcsaládot), látható, hogy 36 db olyan érzékelőtípus definiálható, amelynek működéséhez nincs szükség segédenergiára (az 1. ábra zölddel színezett x - y -síkjá).

Megjegyzés

A kristálytanban bevezetett – síkok és irányok jelölésére használt – Miller-indexek (lásd később a „Kristálytani alapfogalmak” c. fejezetet) és az érzékelők csoportosításánál alkalmazott jelölésrendszer elnevezésének azonosságára az ad formai alapot, hogy a kristálytanhoz hasonlóan az érzékelők csoportosításánál a módszer minden egyes érzékelőhöz az x bemeneti-, az y kimeneti- és a z segédenergiából álló jelölésrendszert rendel. Számok helyett az energiafajták angol nyelvű rövidítéseit használják (rad, mech,



1. ábra Energiafajták Miller-indexeinek szemléltetése villamos kimeneti jelű érzékelőkkel

therm, el, mag, chem). A szóbanforgó aktív érzékelők összefoglaló jelölésére az $(x, y, 0)$ szimbólum használatos (mivel a segédenergiára nincs szükség). Ha az energiafajtákat egy derékszögű koordináta-rendszer x , y és z tengelyeire jelöljük, akkor érthető, hogy az aktív érzékelők az x - y síkon találhatók.

Működésük részletesebb vizsgálatából kiderül, hogy az ide tartozó érzékelők az átalakításhoz szükséges energiát a mérendő rendszerből nyerik, és a bemenő oldal energiáját a kimenő oldal energiájává alakítják át. Az átalakítás folyamata azonban reverzibilis. Ezek az aktív érzékelők.

¹ Dr. Fock Károly: A folyamatműszerezés érzékelői, Az érzékelők csoportosítása – 1. Magyar Elektronika 2009/4. 23-24. old.

² Dr. Fock Károly: A folyamatműszerezés érzékelői, Az érzékelők csoportosítása – 2. Magyar Elektronika 2009/5. 30-31. old.

Ezek az energiaátalakulások az érzékelők belsejében játszódnak le, és a műszaki fejlődés mérés-technikai vonatkozású egyes lépései éppen azt szemléltetik, hogy milyen módon lehetséges ezt a folyamatot a mérés-technikai elvárásoknak (reprodukálóképesség, pontosság, stabilitás, érzékenység, zavarérzékletlenség stb.) megfelelően kialakítani és kézben tartani. A fejlődés töretlen.

Természetesen a Miller-indexes rendszerezés aktív érzékelőkre vonatkozó 36-féle csoportja csak az elvi lehetőségeket vázolja fel, nem biztos, hogy a műszaki fejlődés mai szintjén mindegyik csoportban találunk legalább 1 db érzékelőt. Fordítva azonban igaz a megállapítás, hogy bármelyik aktív érzékelő elhelyezhető a fenti rendszerben. Az is tény – és az a Miller-indexes csoportosítás hátrányára írandó –, hogy esetenként az egy-egy csoportba tartozó érzékelőtípusok száma viszont túlságosan nagy lehet, és az átlátható rendszerezéshez további alrendszer kialakítására van szükség.

A mérés-technikai gyakorlat fejlődésének eredményeképpen az időrendi sorrendben megjelenő érzékelők kezdetben mechanikai kimeneti jellel rendelkeztek, majd megjelentek és egyeduralgoddá váltak a villamos kimenőjelű érzékelők (a villamosjel könnyű feldolgozása és távadhatósága miatt). Ez egyáltalában nem jelenti azt, hogy más típusú átalakítókra nincs is szükség. Előfordul – egyre gyakrabban –, hogy a mérés során nem sikerül egy lépésben a mérendő mennyiségből villamosjelet előállítani. Ilyenkor az átalakítások láncolatára van szükség, amelyből ilyenkor nem hiányoznak a többi csoportba tartozó érzékelők sem. Emiatt hasznos az a kérdésfeltevés, hogy ismerjük meg a lehetséges összes átalakítási módozatot, és keressük meg azok lehetséges alkalmazási lehetőségeit. Ez a gondolkodás előremutató, és megfelelő rendszeresség esetén deduktív úton segít a kiutkeresésben.

Nem érdektelen azonban az a célkitűzés sem, hogy a ma ismert, igen nagy számú – még az aktív érzékelők családjában is számottevő – érzékelőcsoportot egységes rendezőelv szerint rendszerezzük és tárgyaljuk, hiszen az egyes eszközökre vonatkozó – az elméletileg általában korrekt – ismertetés igen heterogén lehet, mivel a működésmódok leírása a fizika (és kémia) igen nagy területét fedik le, és ezek tárgyalásából is alkalmanként hiányzik a konformitás.

Természetesen felmerül a kérdés, hogy mekkora legyen azon hatások száma, amelyet ebbe a körbe bevonunk. Az érzékelők működésének elméleti alapjait a szilárd, cseppfolyós és gáznemű halmazállapotú anyagok tulajdonságainak a vizsgálatával kell kidolgozni, elméletileg mind a 36 esetben (ha csak az aktív érzékelőkre gondolunk). Az ésszerűség azt diktálja, hogy ezt a sokféleséget szűkítsük.

1. táblázat Az érzékelő működését meghatározó energiafajták és az állapotváltozók

Energiafajták	Állapotváltozók		
Termikus	θ	Abszolút hőmérséklet	[K]
	σ	Entrópia sűrűség	[$Jm^{-3}K^{-1}$]
Villamos	E_i	Villamos térerősség	[Vm^{-1}]
	D_j	Villamos eltolás	[Cm^{-2}]
Mechanikai	$T_{\lambda\mu}$	Feszültségtenzor	[Nm^{-2}]
	S_{pq}	Deformációtenzor	[mm^{-1}]
Mágneses	H_k	Mágneses térerősség	[Am^{-1}]
	B_l	Mágneses indukció	[Vsm^{-2}]

Ennek érdekében ezen cikksorozat keretében a továbbiakban csak a szilárd halmazállapotú testekben végbemenő olyan energiaátalakulásokkal foglalkozunk, amelyekben a mechanikai, termikus, villamos és mágneses energiaváltozások fordulnak elő. Ezek alapján nem kerül most sor pl. a mérőperek (a cseppfolyós vagy gáz halmazállapotú mérendő közeg miatt), a pH-mérők, a fényelemek (a kémiai vagy a sugárzási bemenő energia miatt) tárgyalására. Azonban mint látni fogjuk, a megmaradt 16-féle – a szilárd testekben előforduló – energiakölcsönhatás egységes szempontok szerinti tárgyalása is rendkívül tanulságos a – ma már alkalmanként klasszikusnak számító – érzékelők vizsgálatára. Arra is hasznos útmutatásul szolgál, hogy melyek lehetnek a kutatás azon területei, amelyek a jövőben esetleg a mérés-technikában alkalmazott érzékelők típusait gyarapítják. (Gondolunk itt pl. a félvezetőkből készült érzékelők rohamos elterjedésére.)

Termodinamikai alapok

A bevezetőben tett egyszerűsítések értelmében abból indulunk ki, hogy az érzékelőt képező szilárd testben termikus, villamos, mechanikai és mágneses energiaváltozások mennek vége. A potenciáleméleti megfontolásokból következik, hogy egy rendszer belső energiája általában azon egymástól független energiafajták összegéből adódik, amely energiákat a rendszer környezetével kicserélheti. Csak azok az energiafajták függetlenek egymástól, amelyek állapotváltozói függetlenek. Minden rendszer tehát ugyanannyi, egymástól független energiafajttal rendelkezik, ahány független változópárja van – amelyekkel az energiaállapotokat jellemezni lehet. Ezeknek a változópároknak a számát a rendszer szabadságfokának nevezzük.

A figyelembe vett energiafajtákat az 1. táblázat foglalja össze. Mindegyik energiafajttát 2 db állapotváltozóval lehet leírni. Az állapotváltozók szorzata energiasűrűség.

A vizsgálat legelején általánosságban feltételezhetjük, hogy az 1. táblázat 8 db állapotváltozója közül energiafajttánként 1 – 1 változót függetlennek tekinthetünk, míg a megmaradt 4 db a függő állapotváltozó. Ez mérés-technikai szempontból azt jelenti, hogy az érzékelők anyagát képező szilárd testre a vizsgálatba bevont négyféle energia a kiválasztott független állapotváltozóiin keresztül hat, és a függő változók képezik a kimenőjel(ek)e)t.

A gyakorlatban ez a kötetlen, független változéválasztás lehetősége természetesen nem áll fenn; a megvalósítási korlátok praktikus választási lehetőséget diktálnak, amint azt később – a piezoelektromos érzékelők tárgyalásánál – látni is fogjuk.

Tehát az általános megközelítés jelenlegi szintjén megállapíthatjuk, hogy a felsorolt 8 db állapotváltozóból 16-féle kombinációban tudunk kiválasztani 4 db független változót. E változókvarterek mindegyikéhez tartozik egy-egy potenciálfüggvény, ami az érzékelő anyagában végbemenő energiaváltozások kapcsolatát leírja. Ezen lehetséges választási lehetőségek közül – praktikus szempontok figyelembevételével a további tárgyaláshoz jelöljük ki független változóknak a θ , E_i , $T_{\lambda\mu}$, H_k mennyiségeket. Ezzel a független változéválasztással az energiaviszonyokat a Gibbs-féle potenciálfüggvény írja le:

$$G = U - \sigma\theta - D_j E_i - S_{pq} T_{\lambda\mu} - H_k B_l \quad .$$

(A képletben U jelöli a belső energiát, a változók elnevezéseit az 1. táblázat tartalmazza.)

$\Delta\sigma$	$=$	$\left(\frac{\partial\sigma}{\partial\theta}\right)_{E,T,H}$	θ	$+$	$\left(\frac{\partial\sigma}{\partial E_i}\right)_{\theta,T,H}$	E_i	$+$	$\left(\frac{\partial\sigma}{\partial T_{\lambda\mu}}\right)_{\theta,E,H}$	$T_{\lambda\mu}$	$+$	$\left(\frac{\partial\sigma}{\partial H_k}\right)_{\theta,E,T}$	H_k
D_j	$=$	$\left(\frac{\partial D_j}{\partial\theta}\right)_{E,T,H}$	θ	$+$	$\left(\frac{\partial D_j}{\partial E_i}\right)_{\theta,T,H}$	E_i	$+$	$\left(\frac{\partial D_j}{\partial T_{\lambda\mu}}\right)_{\theta,E,H}$	$T_{\lambda\mu}$	$+$	$\left(\frac{\partial D_j}{\partial H_k}\right)_{\theta,E,T}$	H_k
S_{pq}	$=$	$\left(\frac{\partial S_{pq}}{\partial\theta}\right)_{E,T,H}$	θ	$+$	$\left(\frac{\partial S_{pq}}{\partial E_i}\right)_{\theta,T,H}$	E_i	$+$	$\left(\frac{\partial S_{pq}}{\partial T_{\lambda\mu}}\right)_{\theta,E,H}$	$T_{\lambda\mu}$	$+$	$\left(\frac{\partial S_{pq}}{\partial H_k}\right)_{\theta,E,T}$	H_k
B_l	$=$	$\left(\frac{\partial B_l}{\partial\theta}\right)_{E,T,H}$	θ	$+$	$\left(\frac{\partial B_l}{\partial E_i}\right)_{\theta,T,H}$	E_i	$+$	$\left(\frac{\partial B_l}{\partial T_{\lambda\mu}}\right)_{\theta,E,H}$	$T_{\lambda\mu}$	$+$	$\left(\frac{\partial B_l}{\partial H_k}\right)_{\theta,E,T}$	H_k

2. ábra Lineáris állapotegyenlet-rendszer

A potenciálfüggvény kifejezéséből a független változók szerinti parciális differenciálással kifejezhetők a függő változók azzal a megkötéssel, hogy a differenciálás során a többi független változót állandó értékben tartjuk:

$$\sigma = -\left(\frac{\partial G}{\partial\theta}\right)_{E,T,H},$$

$$D_j = -\left(\frac{\partial G}{\partial E_i}\right)_{\theta,T,H},$$

$$S_{pq} = -\left(\frac{\partial G}{\partial T_{\lambda\mu}}\right)_{\theta,E,H},$$

$$B_l = -\left(\frac{\partial G}{\partial H_k}\right)_{\theta,E,T}.$$

A parciális differenciálhányadosok mellett látható alsó indexek jelölik a számítás során állandó értéken tartott független állapotváltozókat.

Általában feltételezhető, hogy a függő változók mindegyike minden egyes független változótól függ, és a jelenségek nagy többségénél feltételezhető a kis változásokra felírt lineáris közelítés. Az egyszerűbb írásmód érdekében a továbbiakban a kis jelváltozásokat külön nem jelöljük a matematikában vagy a fizikában szokásos Δ -jellel (2. ábra).

A függő és független változók között felírt lineáris egyenlet-rendszert lineáris állapotegyenletnek nevezik. Az egyenletrendszer egyes tagjaiban feltüntetett parciális differenciálhányadosok az érzékelők alábbi tulajdonságait írják le (a felsorolás sorrendjében és azonos háttérszínnel jelölve, 3. ábra):

Vegyük észre, hogy az állapotegyenlet parciális differenciálhányadosai anyagjellemzők, amelyeket a többi független változó állandó értékeinél (a referenciafeltételek betartásával) kell – általában mérésrel – meghatározni³. Mint láhattuk, ezek az anyagjellemzők a potenciálfüggvényből származtathatók, azok másodrendű parciális differenciálhányadosai.

A definícióból levonható nagyon lényeges következtetés, hogy az állapotegyenlet melléktáblájában szereplő – azonos szín-

nel jelölt – parciális differenciálhányadosok egymással egyenlők, vagyis pl. az elektroklorikus és a piroelektromos (kék szín), vagy a direkt és reciprokt piezoelektromos hatás (piros szín) stb. azonos anyagállandóval jellemezhető.

Az anyagállandók bevezetése a jelenség fenomenológikus leírására alkalmas módszer. Matematikai jelentésük a függvénykapcsolatok sorfejtéssel történt közelítésének értelmezéséből származtatható, a sor egyes tagjainak együtthatóit definiálják. Kis változásokra, ill. közel lineáris függvényekre gyakran elegendő a lineáris közelítés, de a pontosabb vizsgálatokhoz vagy a lineáristól erősen eltérő függvényekre magasabb fokszámú tagok figyelembevételére is szükség lehet, és ebben az esetben az anyagállandók száma is bővül (gondoljunk pl. a termoelemek statikus karakterisztikájának nagypontosságú – szabványokban is rögzített – analitikus közelítésére).

A fent ismertetett lineáris állapotegyenlet-rendszer a független változók kis megváltozását tételezi fel, és ezért jogos a lineáris közelítés. Vegyük sorra az egyes anyagjellemzőket!

Főhatások

Elsőként az egyenletrendszer jobb oldalán (a bal felső sarokból a jobb alsó felé haladó) főátló mentén található, ún. főhatásokat tekintsük át. Ezek rendre:

$$\left(\frac{\partial\sigma}{\partial\theta}\right)_{E,T,H} = \frac{\rho c^{E,T,H}}{\theta},$$

ahol $c^{E,T,H}[Jkg^{-1}K^{-1}]$ jelenti az állandó villamos télerősség, az állandó mechanikai feszültség és az állandó mágneses tér esetén érvényes fajlagos hőkapacitást ($\rho[kgm^{-3}]$ pedig az anyag sűrűsége).

$$\left(\frac{\partial D_j}{\partial E_i}\right)_{\theta,T,H} = \epsilon_{ij}^{\theta,T,H} \quad [AsV^{-1}m^{-1}]$$

jelenti izoterm körülmények között, állandó mechanikai feszültség és állandó mágneses télerősség esetén mért dielektromos állandó tenzorkomponenseit.

$$\left(\frac{\partial S_{pq}}{\partial T_{\lambda\mu}}\right)_{\theta,E,H} = S_{pq\lambda\mu}^{\theta,E,H} \quad [m^2N^{-1}]$$

jelenti az izoterm állapotban, állandó villamos és mágneses tér esetén mért rugalmassági együtthatókat.

³ Az atomi szerkezet viselkedéséből levezethető anyagjellemzők csak kivételes esetben adnak a mérés-technikai gyakorlat számára használható eredményt. A gyakorlati megfontolások eredményezik a választott – fenomenológikus – leírási módot, és definiálnak igen nagy számú – a referenciafeltételek szigorú betartása mellett érvényes – anyagjellemzőt.

Termikus tulajdonságok	Elektrokalorikus hatás	Piezokalorikus hatás	Magnetokalorikus hatás
Piroelektromos hatás	Villamos tulajdonságok	Direkt piezo-elektromos hatás	Direkt magneto-elektromos hatás
Hőtágulás	Reciprok piezo-elektromos hatás	Rugalmas tulajdonságok	Direkt piezo-mágneses hatás
Piromágneses hatás	Reciprok magneto-elektromos hatás	Reciprok piezo-mágneses hatás	Mágneses tulajdonságok

3. ábra A lineáris állapotegyenlet-rendszer együtthatói anyagi tulajdonságokat és fizikai kölcsönhatásokat jelölnek

Végül

$$\left(\frac{\partial B_l}{\partial H_k} \right)_{\theta, E, T} = \mu_{kl}^{\theta, E, T} \quad [VsA^{-1}m^{-1}]$$

jelenti az izoterm állapotban, állandó villamos térben és állandó mechanikai feszültségállapotban mért mágneses permeabilitástenzor komponenseit. (A referenciatételek állandóságára ismételten felhívjuk a figyelmet, mivel pl. az érzékelők jelentős családjának – a magnetoelasztikus átalakítóknak – éppen az a működési alapja, hogy a mágneses permeabilitás a T mechanikai feszültség függvénye.)

A lineáris állapotegyenlet által definiált főhatásoknak is van mérés-technikai jelentősége. Ne felejtjük el, hogy az erő-, nyomás- és nyomatékmérők nagy többségénél a jelátalakítási lánc első eleme egy gondosan kialakított, jó minőségű, rugalmas elem, amelynek mechanikai terhelés hatására bekövetkező deformációját további érzékelőkkel (pl. nyúlásmérő-ellenállásokkal, induktív vagy kapacitív érzékelőkkel) alakítjuk villamos jellé.

Az előbb ismertetett magnetoelasztikus átalakítók mellett – amelyek passzív érzékelők – fontos megemlíteni pl. azokat a villamos rendszerbe tartozó – szintén passzív – érzékelőket is, amelyek pl. gázok nedvességtartalmát mérik a dielektromos állandó változásán alapuló kapacitív átalakítókkal (kapacitív higrométerek).

Kereszthatások

A cikk elsődleges célkitűzése azonban az aktív érzékelők működésének az összefoglalása, amihez az állapotegyenlet további – a mellékátlóban szereplő – anyagjellemzőinek az ismeretére van szükség. Megkülönböztetésül a mellékátlóban feltüntetett kapcsolatokat kereszthatásnak nevezzük.

Terjedelmi okok miatt a részletezésétől eltekintünk, de bebizonyítható, hogy a kereszthatásokban a parciális differenciálhányadosok az előbb említett főátlóra szimmetrikusan egymással egyenlők. Ez a felismerés azzal egyenértékű, hogy a választott energiapár kölcsönösen átalakulhat egymásba, az átalakulást ugyanazzal az anyagjellemzővel lehet leírni – más szóval az érzékelőben lejátszódó energiaátalakulási folyamatok reverzibilisek, a ki-és bemenetek felcserélhetők. Mielőtt példákat sorolnánk fel, tekintsük át ezeket a kapcsolatokat, ismerjük meg az anyagjellemzőket, adjuk meg ezek definícióit!

A könnyebb azonosítás érdekében az állapotegyenletben az egymással egyenlő parciális differenciálhányadosokat azonos háttérszínnel jelöltük.

Az **elektrokalorikus** és a **piroelektromos hatás** anyagjellemzőjét definiálja a következő, állandó mechanikai feszültség és mágneses tér esetén felírható egyenlet:

$$\left(\frac{\partial \sigma}{\partial E_i} \right)_{\theta, T, H} = \left(\frac{\partial D_j}{\partial \theta} \right)_{E, T, H} = p_i^{T, H} \quad [Asm^{-2}K^{-1}]$$

A **piezokalorikus hatás** és a **termikus hőtágulás** anyagjellemzője állandó villamos és mágneses térben:

$$\left(\frac{\partial \sigma}{\partial T_{\lambda\mu}} \right)_{\theta, E, H} = \left(\frac{\partial S_{pq}}{\partial \theta} \right)_{E, T, H} = \alpha_{\lambda\mu}^{E, H} \quad [K^{-1}]$$

A **piromágneses** és a **magnetokalorikus hatás** anyagjellemzőjét kapjuk állandó villamos térben állandó mechanikai feszültségnél az alábbi egyenletből:

$$\left(\frac{\partial B_l}{\partial \theta} \right)_{E, T, H} = \left(\frac{\partial \sigma}{\partial H_k} \right)_{\theta, E, T} = m_k^{E, T} \quad [Vsm^{-2}K^{-1}]$$

A felsorolásból minden bizonnyal a legjobban ismert **direkt és reciprok piezoelektromos hatás** anyagjellemzőjének a definícióját adja állandó hőmérsékleten és állandó mágneses térben a következő egyenlet:

$$\left(\frac{\partial D_j}{\partial T_{\lambda\mu}} \right)_{\theta, E, H} = \left(\frac{\partial S_{pq}}{\partial E_i} \right)_{\theta, T, H} = d_{j\lambda\mu}^{\theta, H} \quad [AsN^{-1}]$$

A **reciprok és a direkt magneto-elektromos hatás** anyagjellemzőjének definíciója állandó hőmérsékleten és állandó villamos térben:

$$\left(\frac{\partial B_l}{\partial E_i} \right)_{\theta, T, H} = \left(\frac{\partial D_j}{\partial H_k} \right)_{\theta, E, T} = e_{ik}^{\theta, T} \quad [sm^{-1}]$$

Végül a

$$\left(\frac{\partial S_{pq}}{\partial H_k} \right)_{\theta, E, T} = \left(\frac{\partial B_l}{\partial T_{\lambda\mu}} \right)_{\theta, E, H} = q_{kpq}^{\theta, E} \quad [mA^{-1}]$$

egyenlet a **reciprok és a direkt piezomágneses hatás** anyagjellemzőjének definíciója állandó hőmérsékleten és állandó villamos térben.

Az elmondottakat a 4. ábrán foglaltuk össze. Az egyenletrendszer mátrixos formában történő felírásához *Descartes*-koordináta-rendszerben felírt vektorkomponenseket és tenzorkomponenseket tüntettünk fel a független és függő változók jelölésére. A koordinátákat 1, 2 és 3 jelöli. Mivel a termikus folyamatok 1–1 skalárral, a vektorok 3–3 rendezőjűkkel, a mechanikai feszültség-, ill. deformációtenzorok 6–6 független adattal adhatók meg, a független és függő változók száma egyaránt 13.

$\Delta\sigma$ D_1 D_2 D_3 S_{11} S_{12} S_{13} S_{22} S_{23} S_{33} B_1 B_2 B_3	1	max. 3	max. 6	max. 3	θ E_1 E_2 E_3 T_{11} T_{12} T_{13} T_{22} T_{23} T_{33} H_1 H_2 H_3
	$\frac{\rho c^{E,T,H}}{\theta}$	$p_i^{T,H}$	$\alpha_{\lambda\mu}^{E,H}$	$m_k^{E,T}$	
	Hőkapacitás	Elektrokalorikus hatás	Piezokalorikus hatás	Magnetokalorikus hatás	
	max. 3	6	max. 18	max. 9	
	$p_j^{T,H}$	$\varepsilon_{ij}^{\theta,T,H}$	$d_{j\lambda\mu}^{\theta,H}$	$e_{jk}^{\theta,T}$	
	Piroelektromos hatás	Permittivitás	Direkt piezoelektromos hatás	Direkt magneto-elektromos hatás	
	max. 6	max. 18	21	max. 18	
	$\alpha_{pq}^{E,H}$	$d_{\lambda\mu}^{\theta,H}$	$S_{\rho q\lambda\mu}^{\theta,E,H}$	$q_{kpq}^{\theta,E}$	
	Termikus hőtágulás	Reciprok piezoelektromos hatás	Rugalmassági együtthatók	Piezomágneses hatás	
	max. 3	max. 9	max. 18	6	
	$m_l^{E,T}$	$e_{li}^{\theta,T}$	$q_{\lambda\mu}^{\theta,E}$	$\mu_{kl}^{\theta,E,T}$	
	Píromágneses hatás	Inverz magneto-elektromos hatás	Reciprok piezomágneses hatás	Mágneses permeabilitás	

ahol: $(\alpha_{\lambda\mu}^{E,H})^t = \alpha_{pq}^{E,H}$ $(m_k^{E,T})^t = m_l^{E,T}$ $(d_{j\lambda\mu}^{\theta,H})^t = d_{ipq}^{\theta,H}$
 $(e_{jk}^{\theta,T})^t = e_{li}^{\theta,T}$ $(q_{kpq}^{\theta,E})^t = q_{\lambda\mu}^{\theta,E}$ $(p_i^{T,H})^t = p_j^{T,H}$
t a transzponáltat jelöli

4. ábra Az energiakomponensek és az anyagjellemzők kapcsolata

A változók közötti fő- és kereszthatásokat a színesen ábrázolt aldeterminánsok jelölik, amelyekben az előírt definíciós referenciatételekkel feltüntettük az anyagjellemzők jelöléseit, valamint az energiaátalakulások elnevezéseit. A főátló felett a direkt, alatta az inverz vagy reciprok hatások láthatók.

A színjelzés megegyezik az állapotegyenlet-rendszerben alkalmazott jelöléssel.

A folytatásban elemezzük az állapotegyenlet-rendszerből levonható következtetéseket, kitérünk az anyag izotróp, ill. anizotróp tulajdonságaira, valamint a későbbiekben ismer-

tetésre kerülő érzékelők tárgyalásához elengedhetetlen kristálytani alapfogalmak összefoglalására.

IRODALOM

[1.] R. Magerl - C. Riedel: Technische Anwendungen von Festkörpereffekten, ELEKTRIE 29 (1975) H 6
 [2.] J. Tichý - G. Gautschi: Piezoelektrische Meßtechnik, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York 1980

(Folytatjuk!)

editor@magyar-elektronika.hu