

A folyamatműszerezés érzékelői

Energiaátalakulások szilárd testekben – piezo- és piroelektromos átalakítók – 5.

Dr. Fock Károly

A piezoelektromos és piroelektromos hatás felhasználásához a korábbi lapszámokban összefoglalt anyagismertetőket a piezokerámiákkal folytatjuk, majd a piezopolimerekkel fejezzük be. Az ismertett anyagok mérés technikai értékelése során definiálásra kerül a piezo- és piroelektromos csatolási tényező fogalma, amelynek figyelembevétele az átalakítás energetikai oldaláról könnyíti meg az alkalmazható anyagok kiválasztását.

Piezoelektromos kerámiák

Az előző folytatásban (Magyar Elektronika, 2013. 7-8) elkezdett bevezető után a részletesebb vizsgálatok alapján megállapítható, hogy az összetevők arányának a változtatásával és különböző adalékanyagok hozzáadásával a jellemző elektromechanikai tulajdonságok adatai változtathatók, és ezáltal a kerámiákat különféle célú speciális feladatokra teszik alkalmassá (erő-, nyomás-, gyorsulásmérők, szélessávú vevők, teljesítménysugárzók, szűrők stb.). Nem célunk mindegyik változat anyagának részletes ismertetése, illusztrációként a southhamptoni Brush-Clevite Comp. által gyártott – szélessávú vevőkhöz kifejlesztett – PZT 5A-típusú piezokerámia adatait közöljük (1. táblázat). A különböző célokra előállított anyagok egyes anyagjellemzői egymástól igen nagy mértékben eltérhetnek.

Érdekességként megjegyezzük, hogy a piezoelektromos kerámiák előnyösen használhatók dinamikus hidrosztatikai nyomások mérésére is (az 1. táblázatban d_h értéke). Ne feledjük, hogy ezek az anyagok piroelektromos tulajdonsággal is rendelkeznek.

A különböző cégek gyártmányai és a különböző célokra készült anyagok adatai között – elsősorban a piezoelektromos és dielektromos tulajdonságok vonatkozásában – jelentős szórások tapasztalhatók. Emiatt a közölt adatokat csak tájékoztató jelleggel szabad elfogadni. Az összehasonlításnál elsősorban az egykristályok adataival szembeni nagyságrendi eltérések a döntőek.

A kerámiákkal elérhető piezoelektromos érzékenység például olyan nagy, hogy a piezoelektromos hatást gáztüzelésű fűtő- és főzőkészülékek gyújtására, öngyújtók működtetésére is fel lehet használni. Ilyenkor a kerámiaelemre ható mechanikai ütéssel akkora villamos feszültség keletkezik, hogy az szikraképződéshez vezet. Robbanómotorok gyújtásához élettartam és megbízhatósági problémák miatt egyelőre még nem alkalmasak.

A piezokerámiák hátrányai közé tartozik az egykristályokkal szembeni erősebb utóhatási és öregedési jelenség, valamint a piezoelektromos együtthatók nagyobb mértékű hőmérsékletfüggése. Megfelelő összetételválasztással a PZT 5A-típusú anyag 365 °C-os Curie-hőmérséklete 520 °C-ra is növelhető.

Az utóbbi évtizedekben a technológia lehetőségeiben bekövetkező fejlődések 10 MHz alatti frekvenciatartományban a piezokerámiákat más kristályos anyagokkal szemben szinte egyeduralgokká tették. Ez elsősorban a mechanikai és akusztikai alkalmazásokban mind az ultrahangadók, mind a -vevők kialakítására is igaz. Szűrők esetében azonban a piezoelektromos jellemzők öregedési és hőmérséklet-függési tulajdonságai miatt – a lényegesen kisebb piezoelektromos együtthatói ellenére – a kvarc maradt az egyeduralgoló. 10 és 100 MHz között – mint már említettük – a félvezető piezoelektromos anyagok alkalmazása került előtérbe.

Piezoelektromosság polimerekben

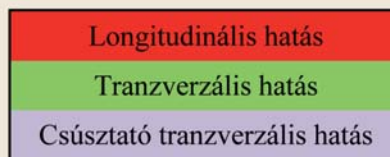
1969-ben fedezték fel a polivinyliden-fluorid (PVDF) piezoelektromos tulajdonságát Japánban, és az 1970-es évek közepén már a kereskedelmi forgalomban is megjelentek a belőle készült átalakítók¹. A vékony piezoelektromos polimereket vastagságuk szerint két csoportra osztjuk: piezolapokra (200 µm és 2 mm között) és piezofilmekre (200 µm-nél vékonyabb).

A PVDF egy félkristályos anyag, nagy molekulásúlyú, hosszú láncú polimeregységekből áll, amelyek a polivinyliden-diklorid műanyagra hasonlítanak azzal az eltéréssel, hogy a klóratomokat fluoratomokra cserélték ki. Az 1. ábra a hosszú vegyületlánc egy (ismétlődő) egységét ábrázolja.

A PVDF-anyagot vékony filmként vagy lapkaként 5 µm és 2 mm közötti vastagságban gyártják. 60...80 °C hőmérsékleten a polimert egy- vagy kéttengelyűen nyújtják. Ez a folyamat elősegíti a szénláncok sorba rendeződését. A gyártástechnológia következő fázisa a termikus polarizáció, aminek első lépéseként vákuumgőzöléssel Al-, Al-Ni-, Ag-, Au- vagy Cr-réteget visznek fel a fólia felületére, majd 100 °C körüli hőmérsékleten 500...800 kV/cm nagyságú villamos tér hatására megtörténik a dipólusok rendeződése. Végezetül a polimert lehűtik, miáltal a polarizált struktúra „befagy”.

¹ J. C. Santamarina – T. N. Wakin – A. G. Talkin – F. Rab – J. Wong: Piezo Film Technology and Application in Geotechnical Testing, Geotechnical Testing Journal, Vol.14. No. 4. 1991. December, pp 363-370

s_{11}^E	s_{12}^E	s_{13}^E	0	0	0	0	0	d_{31}
s_{12}^E	s_{11}^E	s_{13}^E	0	0	0	0	0	d_{31}
s_{13}^E	s_{13}^E	s_{33}^E	0	0	0	0	0	d_{33}
0	0	0	s_{44}^E	0	0	0	d_{15}	0
0	0	0	0	s_{44}^E	0	d_{15}	0	0
0	0	0	0	0	$2(s_{11}^E - s_{12}^E)$	0	0	0
0	0	0	0	d_{15}	0	ϵ_{11}^T	0	0
0	0	0	d_{15}	0	0	0	ϵ_{11}^T	0
d_{31}	d_{31}	d_{33}	0	0	0	0	0	ϵ_{33}^T



s_{11}^E	s_{33}^E	s_{12}^E	s_{13}^E	s_{44}^E	$2(s_{11}^E - s_{12}^E)$	d_{15}	d_{33}	d_{31}	d_h	$\epsilon_{11}^T / \epsilon_0$	$\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$
$10^{-12} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$						$10^{-12} \text{ As N}^{-1}$				-	
16,4	18,8	-5,74	-7,22	47,5	44,3	584	374	-171	32	1730	1700

1. táblázat PZT 5A-típusú kerámia mechanikai, piezoelektromos és dielektromos anyagállandói (az állapotmátrix struktúrája a 6mm-jelű szimmetriaosztály állapotmátrix struktúrájával egyezik meg)

A piezofilmekek mechanikailag tartósak, nagyon flexibilisek, rugalmasak, könnyűek, vegyileg semlegesek, akusztikai ellenállásuk a vízhez közel álló (ezzel kapcsolatosak a különböző víz alatti alkalmazások). 5...15 μm hullámhossz-tartományban abszorbeálják az infravörös sugárzást, emiatt előnyösen alkalmasak humán infravörös sugárzás érzékelésére. Az UV-sugárzásra azonban érzékenyek.

A PVDF működési hőmérséklet-tartománya -40...+80 °C, magasabb hőmérsékleten piezoelektromos tulajdonságát elveszti. 60 °C alatt az öregedési folyamatok jelenlétkelnek. Rugalmassági együtthatója 1500...2500 MPa tartományban változik, szakítószilárdsága 50...150%-os nyúlásértékeknél 60 és 200 MPa között van.

Piezoelektromos tulajdonságai függetlenek a formázás módjától, a kristályok formájától, a nyújtás mértékétől és arányától, a polarizáció módszerétől és annak hőmérsékletétől. Mindezek figyelembevételével a piezoelektromos együtthatók értékei:

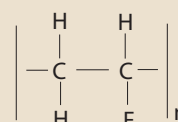
$$d_{31} = d_{32} = 7 \dots 8 \cdot 10^{-12} \text{ AsN}^{-1} \text{ és}$$

$$d_{33} = 14 \dots 16 \cdot 10^{-12} \text{ AsN}^{-1} .$$

Bár a PZT-típusú piezoelektromos kerámiák érzékenysége ezen értékeknél lényegesen nagyobb, mégis a PVDF-átalakítókkal az inverz piezoelektromos hatás alkalmazásánál sokkal nagyobb deformációt lehet elérni, mivel a működtető villamos tér sokkal nagyobb lehet. A PVDF-film – mint említettük – piroelektromos is, piroelektromos együtthatója $p = 25 \cdot 10^{-6} \text{ Asm}^{-2} \text{ K}^{-1}$, ϵ_r relatív dielektromos együtthatója pedig 12. A legismertebb gyártó cégek Japánban, Belgiumban és Pennsylvania államban (USA) találhatóak.

A piezo- és piroelektromos anyagok mérés-technikai értékelése

Az előző fejezetekben részletesen foglalkoztunk a piezoelektromos (ezen belül a piro- és ferroelektromos) tulajdonsággal rendelkező, a műszaki gyakorlatban leggyakrabban használt anyagokkal. Az



1. ábra A PVDF vegyületláncának egy tagja

alábbiakban sorra veszünk néhány olyan mérés-technikai jellemzőt, ami az alkalmazás miatt fontos, és ezek tárgyalása során mérés-technikai szempontból végzünk összehasonlításokat.

Átalakítási hatások, csatolási tényező

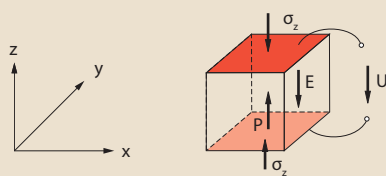
A piezo- és piroelektromos érzékelők működésének kvantitatív értékelésére nyílik lehetőség, ha megvizsgáljuk az átalakítási hatások kérdését. A piezo- és piroelektromos, valamint a termoelasztikus hatásokra meghatározható ugyanis egy olyan arányszám, amelyik megadja, hogy a bevezetett energia mekkora hányada áll rendelkezésre az átalakítás után.

Piezoelektromos csatolási tényező

A fogalom definíciójához induljunk ki a 2. ábrán látható z-irányú, longitudinális, direkt piezoelektromos hatásból.

Homogén, egytengelyű, σ_z mechanikai feszültséget feltételezve a mechanikai energiának villamos energiává történő átalakítása egy körfolyamattal határozható meg. A tárgyalás egyszerűsítése érdekében a vizsgálatot a nyomóterhelés határesetében villamos rövidzárnál ($E=0$) és üresjárásnál ($D=0$) végezzük el. A lineáris állapotegyenlet alapján rövidzárnál ($E=0$) és állandó hőmérsékleten ($\Delta T=0$) a villamos eltolásra a

$$D_z = d_{33} \sigma_z ,$$



2. ábra z-irányú, longitudinális, piezoelektromos hatás

üresjárásban ($D=0$) a villamos térerősségre pedig az

$$E_z = \frac{d_{33}}{\epsilon_{33}} \sigma_z$$

eredményt kapjuk. A mennyiségekből képezhető a $D_z E_z$ szorzat, ami az $\epsilon_z s_z$ Hooke-törvény figyelembevételével a

$$D_z E_z = -\frac{d_{33}^2}{\epsilon_{33} s_{33}} \epsilon_z \sigma_z$$

alakban is felírható. Az egyenletben felismerhető, hogy az $1/2 D_z E_z$ a w_{el} villamos energiasűrűség, az $1/2 \epsilon_z \sigma_z$ pedig a mechanikailag bevezetett w_o összenergia-sűrűség. A kettő hányadosából megkaphatjuk a piezoelektromos átalakítási hatásfokot:

$$\eta = \frac{w_{el}}{w_o} = \frac{d_{33}^2}{\epsilon_{33} s_{33}} = k_{33}^2,$$

amelyet más kifejezéssel a z-irányú, longitudinális, piezoelektromos csatolási tényezőnek is neveznek. A k_{33}^2 piezoelektromos esetben a piezoelektromos körfolyamat η átalakítási hatásfokával azonos jelentésű. A levezetésből látható, hogy függ a terhelés módjától (longitudinális, tranzverzális, csúsztató) és az irányától. Mivel a piezoelektromos anyagok anizotrópok, emiatt ugyanarra az anyagra különböző alkalmazásoknál igen eltérő eredményeket kaphatunk.

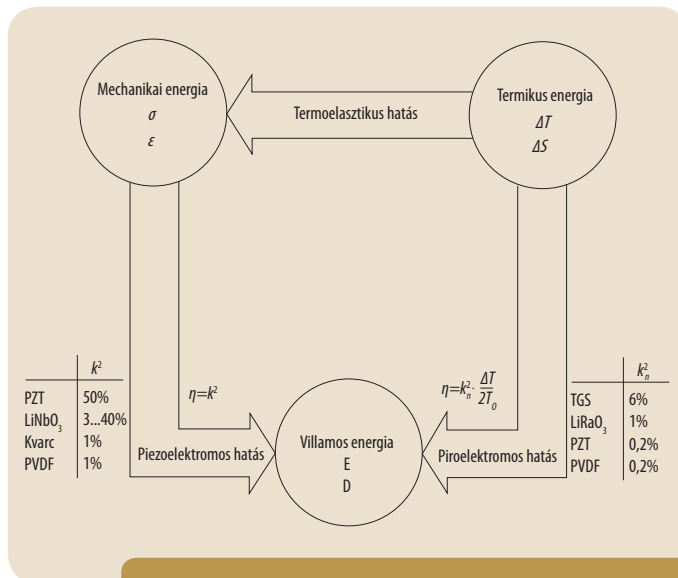
Piroelektromos csatolási tényező

Az η és k^2 fogalmakat piroelektromos hatások jellemzésére is alkalmazni lehet. Az előbbi gondolatmenethez hasonlóan a villamos és termikus energia piroelektromos érzékelők által létrehozott kapcsolatából (a termikus energia $w_{th} = \rho c \Delta T$ kifejezésének felhasználásával, ahol ρ a sűrűséget, c pedig a fajhőt jelenti) képezhetők például a z-irányú villamos térjellemező vektorokkal a

$$D_z E_z = p^2 \Delta T \frac{w_{th}}{\epsilon_{33} \rho c},$$

illetve az

$$\eta = \frac{w_{el}}{w_{th}} = \frac{1}{2} \frac{p^2 \Delta T}{\epsilon_{33} \rho c}$$



3. ábra Piezo- és piroelektromos csatolási tényezők összehasonlítása

kifejezések. Egy ideális Carnot-gépnél ilyen „fél körfolyamatnál” a maximálisan átalakítható energiahányad az

$$\eta_c = \frac{1}{2} \frac{\Delta T}{T_0} \quad (T_0 \text{ a környezeti hőmérséklet})$$

kifejezéssel számítható, amelynek felhasználásával felírható, hogy

$$\eta_\pi = \eta_c \frac{p^2 T_0}{\epsilon_{33} \rho c},$$

ahol $\frac{p^2 T_0}{\epsilon_{33} \rho c} = k_\pi^2$ behelyettesítésével

$$\eta_\pi = \eta_c k_\pi^2.$$

Az így módon definiált k_π^2 azt adja meg, hogy a piroelektromos csatolási tényező milyen mértékben kisebb, mint a Carnot-határérték.

Anyagok értékelése a csatolási tényezők alapján²

A fentiekben definiált piezo- és piroelektromos csatolási tényezők nagyságrendi összehasonlítására alkalmas a 3. ábra.

Megállapítható, hogy a legnagyobb piezoelektromos hatással a piezokerámiák rendelkeznek. A bevezetett mechanikai energia 50%-a alakítható át villamos energiává. Mechanikai rezonancia esetén ez az érték akár a 95%-ot is elérheti. Egykristályokban (litium-niobát vagy α -kvarc) ez a hatás lényegesen kisebb, de a linearitás, a kisebb hőmérsékletfüggés és a hiszterézismentesség ezeket az anyagokat előnyben részesíti. A PVDF-polimer piezoelektromos hatását tekintve az α -kvarccal hasonlítható össze, de kiemelendő, hogy annál 30-szor hajlékonyabb, és elsősorban folyadékokban akusztikailag rendkívül kedvező. Ezen túlmenően a PVDF erősen piroelektromos is, amely tulajdonság a piezoelektromos kerámiákkal teszi azokat összehasonlíthatóvá.

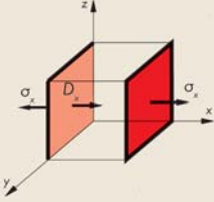
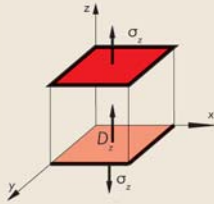
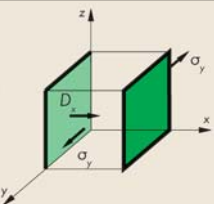
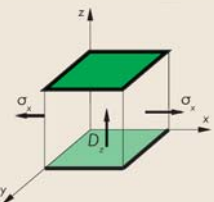
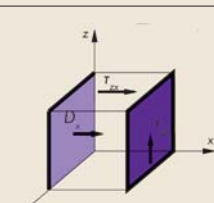
2 W. Heywang: Sensorik, Springer Verlag, Berlin – Heidelberg – New York – Tokio, 1984

	Rugalmissági együttható	Dielektromos együttható	Piezoelektromos tulajdonságok adatai		Curie-hőmérséklet	Piezoelektromos hatás
Egység	$10^{-12} \cdot \text{mN}^{-1}$	–	–	$10^{-12} \cdot \text{CN}^{-1}$	°C	
Szimbólum	s^E	ϵ_r^T	k	d	Θ_c	
Egykristály						
α -kvarc	$s_{11}^E=12,8$	$\epsilon_{11}^T=4,52$	$k_{11}=0,10$	$d_{11}=2,3$	573	Longitudinális
	$s_{22}^E=12,8$	$\epsilon_{11}^T=4,52$	$k_{12}=0,10$	$d_{12}=-2,3$		Tranzverzális
Litium-niobát	$s_{11}^E=5,78$	$\epsilon_{11}^T=84$	$k_{22}=0,34$	$d_{22}=21$	1150	Longitudinális
	$s_{33}^E=5,02$	$\epsilon_{33}^T=30$	$k_{33}=0,17$	$d_{33}=6$		Longitudinális
	$s_{44}^E=17,0$	$\epsilon_{11}^T=84$	$k_{15}=0,64$	$d_{15}=68$		Csúsztató tranzverzális
Cink-oxid	$s_{33}^E=6,94$	$\epsilon_{33}^T=8,5$	$k_{33}=0,45$	$d_{33}=12$		Longitudinális
	$s_{11}^E=7,86$	$\epsilon_{33}^T=8,5$	$k_{31}=0,33$	$d_{31}=-4,7$		Tranzverzális
Kerámia						
PZT 5A	$s_{33}^E=18,8$	$\epsilon_{33}^T=1700$	$k_{33}=0,69$	$d_{33}=374$	330	Longitudinális
	$s_{44}^E=47,5$	$\epsilon_{11}^T=1730$	$k_{15}=0,68$	$d_{15}=584$		Csúsztató tranzverzális
	$s_{11}^E=16,4$	$\epsilon_{33}^T=1700$	$k_{31}=0,33$	$d_{31}=-171$		Tranzverzális
Bárium-titanát	$s_{33}^E=8,9$	$\epsilon_{33}^T=1900$	$k_{33}=0,49$	$d_{33}=374$	120	Longitudinális
	$s_{44}^E=18,4$	$\epsilon_{11}^T=1620$	$k_{15}=0,47$	$d_{15}=392$		Csúsztató tranzverzális
	$s_{11}^E=8,5$	$\epsilon_{33}^T=1900$	$k_{31}=0,20$	$d_{31}=-150$		Tranzverzális
Polimer						
PVDF	$s_{11}^E=400$	$\epsilon_{33}^T=12$	$k_{31}=0,10$	$d_{31}=8$	80	Tranzverzális
	$s_{33}^E=400$	$\epsilon_{33}^T=12$	$k_{33}=0,15$	$d_{33}=16$		Longitudinális

2. táblázat Piezoelektromos anyagok mechanikai, villamos és piezoelektromos tulajdonságainak összehasonlítása

	Piroelektromos együttható	Relatív dielektromos együttható	Hőkapacitás-sűrűség	Piroelektromos csatolási tényező	Curie-hőmérséklet
Szimbólum	p	ϵ_r	ρc	k_π^2	Θ_c
Egység	$10^{-4} \text{ Asm}^{-2} \text{ K}^{-1}$	–	$10^6 \cdot \text{Wsm}^{-3} \text{ K}^{-1}$	%	°C
Egykristály					
TGS	3,5	30	2,5	7,5	49
LiTaO ₃	2	45	3,2	1	618
Kerámia					
BaTiO ₃	4	1900	3	0,2	120
PZT 5A	4,2	1700	2,7	0,14	330
Polimer					
PVDF	0,4	12	2,3	0,2	80

3. táblázat Piroelektromos anyagok tulajdonságainak összehasonlítása

Piezoelektromos hatás		Anyagjellemzők			k^2
		d_{iq}	ε_{ij}^T	S_{pq}^E	
Longitudinális		d_{11}	ε_{11}^T	S_{11}^E	$k_{11}^2 = \frac{d_{11}^2}{\varepsilon_{11}^T S_{11}^E}$
		d_{33}	ε_{33}^T	S_{33}^E	$k_{33}^2 = \frac{d_{33}^2}{\varepsilon_{33}^T S_{33}^E}$
Transzverziális		d_{12}	ε_{12}^T	S_{12}^E	$k_{12}^2 = \frac{d_{12}^2}{\varepsilon_{11}^T S_{22}^E}$
		d_{31}	ε_{31}^T	S_{31}^E	$k_{31}^2 = \frac{d_{31}^2}{\varepsilon_{33}^T S_{11}^E}$
Csúsztató transzverziális		d_{15}	ε_{15}^T	S_{15}^E	$k_{15}^2 = \frac{d_{15}^2}{\varepsilon_{11}^T S_{44}^E}$

4. ábra A k_{iq}^2 csatolási tényezők meghatározása különböző piezoelektromos hatásokra

A legnagyobb piroelektromos érzékenysége a triglicin-sulfátnak (TGS) van, de egy piroelektromos TGS-generátor áramelőállító képessége még így is több, mint 10-szer rosszabb egy ideális Carnot-gépnél. Rendkívül hátrányos az alacsony Curie-hőmérséklete, ami gyakorlatilag csak +40 °C-ig teszi lehetővé alkalmazását. Az alacsony dielektromos veszteségei miatt a LiTaO₃ ideális piroelektromos anyag magas határérzékenységgel.

Bár az anyagjellemzők tárgyalása során rendre kitértünk a mechanikai, a villamos és a piezo-, illetve piroelektromos tulajdonságok számszerű értékeinek ismertetésére, feltehetően nem érdektelen ezek összefoglaló összehasonlítása, amelybe belefoglaltuk az imént ismertetett átalakítási hatásfokokat is. Ezeket az értékeket tartalmazza a 2. és 3. táblázat.

A piezoelektromos anyagoknál bevezetett k_{iq}^2 csatolási tényezőt természetesen nemcsak a longitudinális esetekre lehet kiszámítani, hanem a piezoelektromos esetek összes variánsára is. Az összehasonlítást szemléltető 2. táblázatban természetesen csak azokat az értékeket számítottuk ki, amelyeket az anizotróp anyagi tulajdonságok lehetővé tesznek. A könnyebb megértés kedvéért a 4. ábrában ismét feltüntettük azokat a piezoelektromos hatásokat és a hozzájuk tartozó k_{iq}^2 csatolási tényezők kifejezéseit, amelyek a megismert anyagoknál egyáltalán szóba kerültek.

Folytatjuk!

editor@magyar-elektronika.hu