

Aktuátorok korszerű anyagai

Készítette: Tomozi György

Aktuátorok korszerű anyagai

Tartalomjegyzék

1.Bevezetés.....	2
2.Ferroelektromos kerámiák.....	2
2.1 Piezoelektromos tulajdonságok és ferroelektromos vékonyfilm alkalmazások.....	3
2.1.1 A ferroelektromos vékonyfilmek piezoelektromos tulajdonságai.....	4
3.Piezoelektromos félvezetők.....	5
3.1 Nitridek (GaN, AlN).....	5
3.2 Arzenidek (GaAs, AlGaAs).....	5
3.3 ZnO anyagok.....	5
3.4 Összefoglalás – piezoelektromos félvezetők.....	6
4.Magnetostriktív vékony filmek.....	7
4.1 Óriás magnetostriktív vékonyfilmek.....	7
5.Mágneses emlékező fémek (Magnetic Shape Memory).....	8
5.1 MSM előállítás.....	9
5.2 MSM aktuátorok.....	9
6.Emlékező anyagok (Shape Memory Alloys, Shape Memory Polimers).....	11
6.1 SMA anyagok.....	11
6.2 SMP anyagok.....	12
6.3 SMA, SMP aktuátorok.....	13
7.Növelhető méretű mikrogömb kompozitok.....	14
8.Elektro-aktív polimerek (EAP).....	15
8.1 EAP aktuátorok.....	15

1. Bevezetés

Egy anyagot addig nevezhetünk újdonságnak, míg meg nem teremti magának a technológiát, amin keresztül eljut a végfelhasználókhoz és mindennapos használatba kerül. A következőkben bemutatásra kerülő anyagokat elsősorban a mikro-technológiában alkalmazzák, ahol az utóbbi években jelentős áttörést értek el az ilyen és ehhez hasonló anyagok bevezetésével mind az aktuátorok, mind pedig a szenzor alkalmazások körében.

2. Ferroelektromos kerámiák

A PZT kerámiák (Polycrystalline lead zirconate titanate) a mikrotechnológia legfontosabb alkotói. Használják a szenzor és aktuátor alkalmazásoknál a kedvező piro- és piezo elektromos tulajdonságaik miatt és a nagy dielektromos állandójuk miatt [1]. Ilyen alkalmazások például a mikropumpák, szelepek, ultrahang motorok, hőmérő szenzorok, gyorsulásmérők, kapcsolók, memória elemek, orvosi eszközök, roncsolásmentes mérőeszközök stb.

Két teljesen különböző megközelítés létezik, melyek különböző előállítási technikát követelnek. Az egyik a vékonyfilm technika (forgatva történő bevonatolás szórással). Ez a technika lényegesen

kiseb kőmőrsékletet igényel (600-800 fok), mint a szokásos szinterelési technológia, melyhez 1100-1400 fokos hőmőrséklet szükséges. Egy réteg vastagsága általában 0,1um. Annyi réteget visznek fel a hordozóra egymás után, hogy a kívánt vastagságot elérjék. A tipikus piezoelektromos alkalmazásokban 10-80 um-es filmet használnak. A gyakorlatban a kifejtett erő válik lényegessé, ez pedig a film vastagságának növekedését vonja magával.

A másik megközelítés, hogy az egyes rétegeket ragasztással kötik egymáshoz, így csökkenve a filmek készítésénél használt magas hőmőrséklet okozta anyagi feszültségeket. Ennél a gyártási eljárásnál, nagyon fontos, az egymásra ragasztott rétegek illeszkedése. A ragasztásos eljárás előnye, hogy ki tudják használni a hordozó anyag elektromos tulajdonságait, lehet készíteni akár 20-50 um-es filmvastagságot is, amelyet más eljárással nem tudnak. [2] A hagyományos technikákat is használhatóak, mint a fotolitográfia, valamint az ilyen vastagságú PZT filmek kibírják a 100V-os feszültséget is.

A ferroelektromos kerámiák kiemelt fontosságú kutatási területét három részterületre oszthatjuk: Az egyik a gépjárműveknél használt üzemanyag befecskendező rendszerben alkalmazott eszközök, ahol magas nyomáson és hőmőrsékleten kell működniük a többretegű kerámiáknak. Itt a rétegvastagság általában 50 um és még kialakítanak egy fémes fősűs szerkezetet, hogy a film a kisebb fezsűlttség hatására is nagy elektromos téreőrség jőjjön létre a kerámiában [3]. Ugyanennek a területnek a másik része a nagyfrekvenciás ultrahangos orvosi alkalmazások (terápiás kezelések és képkészítő eljárások). Ezek általában nagy teljesítményű berendezések, ahol törekedni kell a határfok javításra. Ugyanis az így keletkezett veszteségű a teljesítmény rovására mehet és stabilitási problémák forrása is lehet [4-6].

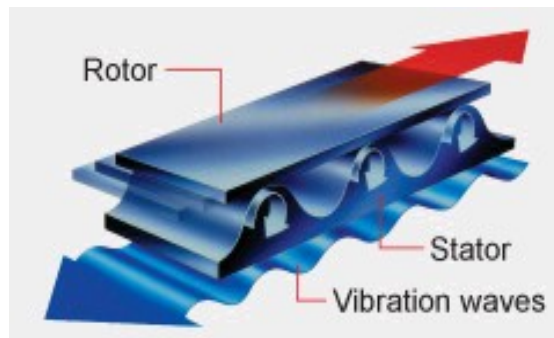
A második terület a ferroelektromos egykristályokon alapszik. Ezek a kristályok úgynevezett relaxációs ferroelektromos anyagok, melyek ólom-magnézium-niobát vagy ólom-titanát anyagok felhasználásával készül, bár jelenleg is több kutatás van ilyen jellegű anyagok iránt. Ezek a relaxorok egy diffúziós dielektromos fázisátmenettel jellemezhetőek, mely megadja a dielektromos permittivitásukat bármely frekvencián és hőmőrsékleten. A fizikai viselkedésük még nem teljesen világos a kutatók számára, de nagyon nagy elektromos permittivitásuk és piezoelektromos egyűtthathójuk. Az alkalmazásokban a viselkedésük leginkább elektrostriktív viselkedést mutat, miközben magas frekvencián is csak kicsi a hiszterézis okozta veszteségük. Az elektro-akusztikai alkalmazásokban nagyon nagy fölényben vannak, azonban az egyéb aktuátorokban történő alkalmazásuk még nagyon kezdetleges. Működésük felső határa valahol 50-80 fok körül lehet – ez elég alacsony hőmőrséklet – ez a tervezésűknél sok megszorítást kíván. Mindazonáltal ezek az anyagok egy nagyon érdekes új tulajdonságot mutatnak, és ezért nagyon fontosak a tudomány számára. [7-13].

A kutatások harmadik fókuszpontja az ipar aggodalma az ólmot tartalmazó vegyűletek mérgező hatásával szemben. Világméretű törekvés olyan ekvivalens anyagot találni, mely nem tartalmaz ólmot. A mai napig nagyon kevés előrehaladás látszik ebben a témában, így még a hagyományos PZT kerámiákat nem tudták kiszorítani, bár néhány ötvözetet már sikerűlt azonosítani és úgy tűnik ez hamarosan folytatódik [14-18].

2.1 Piezoelektromos tulajdonságok és ferroelektromos vékonyfilm alkalmazások

Vékonyfilmekről akkor beszélhetűnk, ha vastagságuk 1 mikron körül van. Az elműlt 20 évben a ferroelektromos vékonyfilmek iránt az érdeklődés nagy volt, amit a nem felejtő memóriák és a mikroelektro-mechanikus alkalmazások (MEMS) inspiráltak. Ezek az alkalmazásoknál nagy elmozdulásokra van szükség, amiket nagy energia sűrűséggel kell véghezvinni, vagy éppen nagy érzékenységű szenzorokra van szükség dinamikus határokkal és alacsony fogyasztással [19].

Ezek a piezoelektromos MEMS eszközök legalább két elemet tartalmaznak: szilícium hordozót és a rá épített piezoelektromos deformálódó elemet, melyre a kontaktusokat szerelnek. A szilícium



hordozó határozza meg a mechanikus tulajdonságot, míg a rá applikált anyag (piezoelektromos vékonyfilm) teremt kapcsolatot a jel és az elmozdulás között.

Ilyen technikát használó alkalmazások például a ultrahangos mikromotorok [20-22], aktuátorok az atomi mikroszkópiában [23], mikropumpák [24] stb.

2.1.1 A ferroelektromos vékonyfilmek piezoelektromos tulajdonságai

Egy ferroelektromos anyag piezoelektromos tulajdonsága, mint például a $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ nagyon függ az anyag összetételétől. Az alábbi ábrán látható az ólom-cirkonát (PZ) – ólom-titanát (PT) fázisdiagrammja.

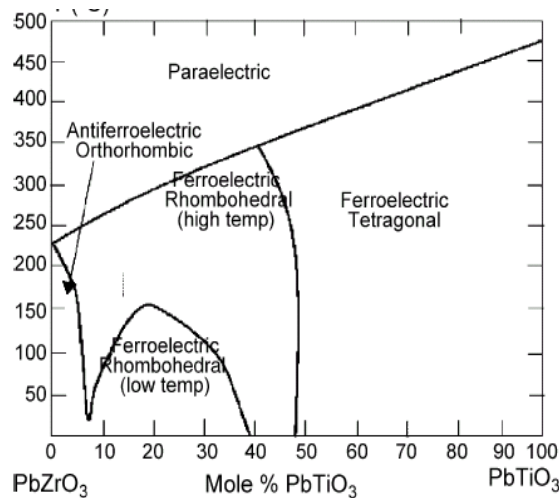


Fig. 1. Phase diagram of the PbZrO_3 - PbTiO_3 system [48].

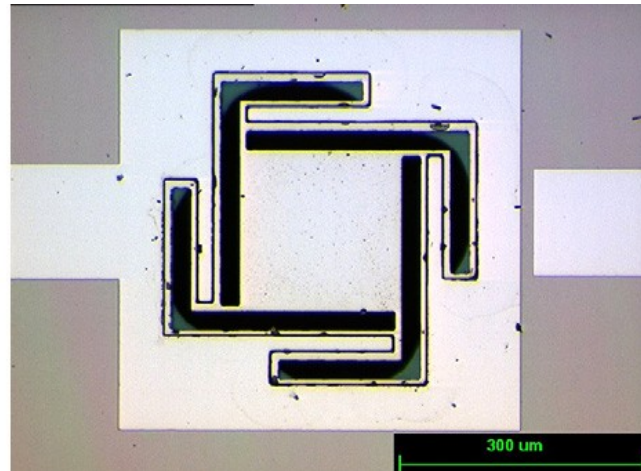
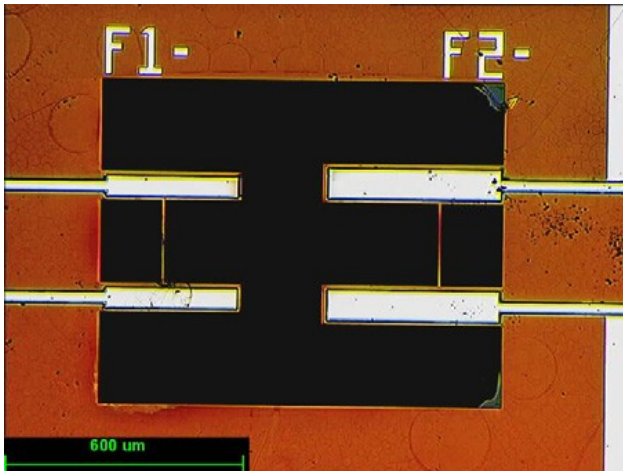
A PZT-nek két ferroelektromos fázisa is van a maximális piezoelektromos tényező a két fázist elválasztó határvonalon érhető el.

A MEMS technológiában a legtöbb vékonyfilm a polikristályos technológiával készül ezekben az egyes kristályok piezoelektromos tulajdonsága kiátlagolódik.

A mechanikus kapcsolódás a hordozóval, a film orientációja, a polarizáció szintje és még sok minden más befolyásolja a kialakuló piezoelektromos hatást. Ezeken kívül vannak még nem tisztázott hatások is.

A kialakuló piezoelektromos hatást jelentős mértékben befolyásolja a film orientációja [25]. Ez akkor a legnagyobb, ha a film pontosan merőleges a polarizációs tengelyre. A legtöbb MEMS

alkalmazásban a film egy szerkezet része, például egy rugalmas anyagra kerül. Az összekapcsoló erő nem csak az anyagi paramétereiktől függ, hanem a filmben kialakuló feszültségek is szerepet játszanak, amik a hőmérséklet függvényében is változnak. Az így kialakuló feszültség akár a 100 MPa-t is elérheti [26] és a szerkezetre visszahatva előfeszítést hoz létre, melyet a tervezés során figyelembe kell venni.



A fenti ábrán egy sávszűrő és egy hangolható síkkondenzátor látható, ahol a kondenzátor lemezeket PZT aktuátorok mozgatják.

Az utóbbi években jelentős fejlődés volt megfigyelhető ezen a területen, bár a jó minőségű filmek létrehozása még mindig nagy erőfeszítést igényel. A fent említett vastag réteg technológiát általában a szenzor iparban használják, ezért a vékonyfilm technikának nagy jövője lehet az aktuátorok körében.

3. Piezoelektromos félvezetők

3.1 Nitridek (GaN, AlN)

Sok MEMS alkalmazásban kiemelt figyelmet fordítanak a piezoelektromos félvezetőkre, mint például a GaAs, melynek különös előnye a megszokott integrált áramkör gyártási technológiákkal való kompatibilitása. Az egyes nitridek, mint például a GaN azért élvez nagy érdeklődést, mert a FET tranzisztorok, vagy a LED-ek viselkedésére lehet hatással. [27] Azért érdeklődnek fokozottan ezen anyagok tulajdonságai iránt, mert ki szeretnék használni a széles energiasávot (3,4 eV) illetve a magas hőmérséklettűrő képességüket (180-300 fok). Szintén érdekes tulajdonságuk a vegyi hatásokkal, valamint az egyes sugárzásokkal szembeni ellenálló képességük, amit az előbb említett nagy energiasávnak köszönhetnek [27]. Ezekből az anyagokból leginkább érzékelőket készítenek, ezért ezt ebben a dolgozatban nem tárgyaljuk részletesebben.

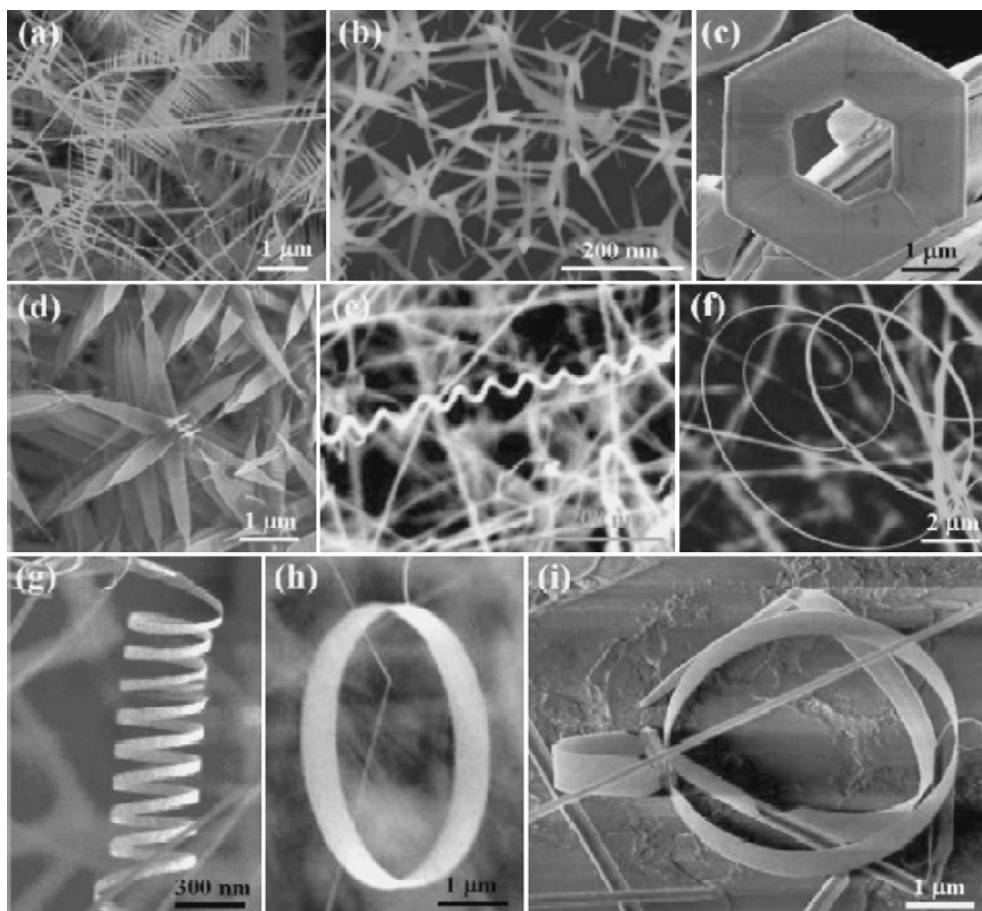
3.2 Arzenidek (GaAs, AlGaAs)

A fentiekhez hasonló tulajdonságokkal rendelkeznek a szintén magas energiasávnak köszönhetően (1,4 eV). Szintén leginkább a szenzorgyártásban elterjedtek.

3.3 ZnO anyagok

A cink-oxid is egy félvezető piezoelektromos anyag, melyet szenzorok és aktuátorok elkészítésénél is gyakran alkalmaznak. Szintén nagy a kiürített energiasáv (3,4 eV). Nagyon

egyszerűen kialakítható belőle bonyolultabb nanostruktúra is, mint például gyűrűk, spirálok, rugók. Ezt mutatja a következő ábra is.



A relatívan magas piezoelektromos tényezőjük teszi lehetővé elektromechanikus szenzor, vagy aktuátorként történő alkalmazásukat a nanovilágban. Érdekessége, hogy egy vékony nanoszalag körülbelül háromszor jobb piezoelektromos tulajdonságot mutat, mint egy buga [28].

Többfajta megszokott vékonyfilm technológiánál is használják:

- felhordják egy 1,5 mikrométeres szilikon-nitrid membránra, így kialakítva egy mikroakusztikai elemet (például: mikrofon, hangszóró mobiltelefonokban) [29]
- konzolokat készítenek belőle (például egy 500 μm-es ZnO aktuátor kb. 400 nm-t képes elhajolni) [30]
- atomi erőmikroszkópiában használják 4 μm-es elmozdulások létrehozására [31]

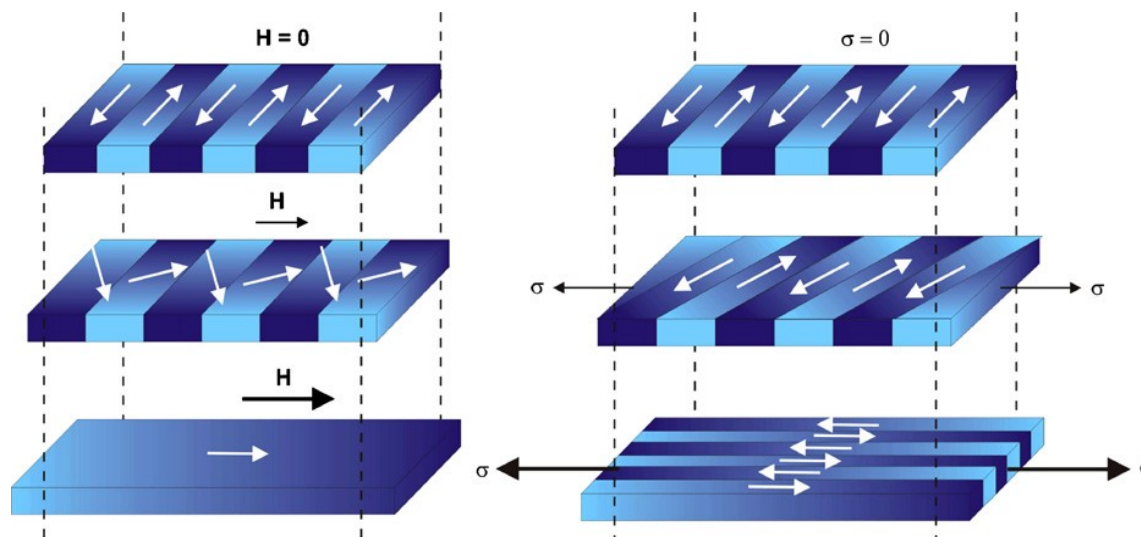
3.4 Összefoglalás – piezoelektromos félvezetők

A fenti piezoelektromos anyagok előnye a meglévő integrált áramkörüi gyártástechnológiával való kompatibilitása. Ugyan a piezoelektromos együtthatójuk kisebb, mint sok más ferroelektromos anyagnak, és ezért aktuátorként még soká fogják használni őket. Az alacsony permittivitásuk miatt inkább szenzorként alkalmasak, de később a ZnO nano-csövek, szalagok a bio-mechanika építőkövei lehetnek.

4. Magnetostruktív vékony filmek

Körülbelül 10 éve érdeklődnek már a kutatók a magnetostruktív filmek iránt. Szintén a nanovilágban látják jövőjüket, mint aktuátor vagy szenzor.

A magnetostruktív hatás két fajta lehet az egyik a direkt (Joule) a másik pedig az indirekt (Villari) effektus. A következő ábra mutatja a különbséget a két típus között.

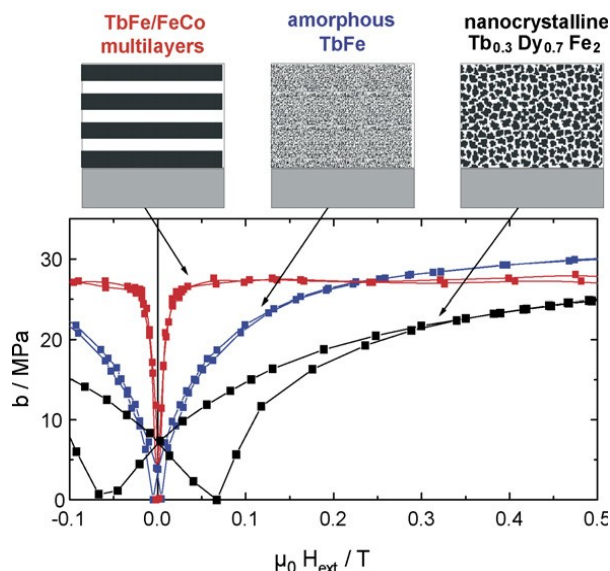


Amíg a közvetlen effektus a mágneses domain elrendeződés változásakor bekövetkező méretváltozáson alapul, addig az indirekt esetben sokkal bonyolultabb dologról van szó. Ekkor egy külső feszültség hatására következik be a domáinok elfordulása és az ezzel együtt jelentkező hosszváltozás. Ahhoz hogy a jelenséget szenzorként tudják használni az inverz hatást kell alkalmazni és kombinálni kell egy másik magnetorezisztív hatással, különben az eredő mágneses térerősség nem mutatható ki.

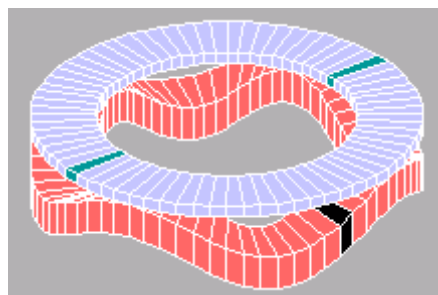
4.1 Óriás magnetostruktív vékonyfilmek

Ezeket az anyagokat úgynevezett ritka-földfémekből készítik, ugyanis ezek az ötvözetek tudnak produkálni szobahőmérsékleten a legnagyobb magnetostruktív hatást, mivel ezeknek van a legdeformáltabb elektronpályájuk a 4f héjon, ami a hatás gyökere, és ami megmarad akkor is, ha erős kötással kapcsolódnak egy vas vagy egy kobalt atomhoz. A legnehezebb feladat, hogy optimalizálják a mágneses anizotrópiát (mágneses momentumok adott irányú beállítása), mely segítségével egyre kisebb mágneses térerősségre nagyobb méretváltozást tudnak elérni. Ezt úgy érik el, hogy köbös atomstruktúrát készítenek, amelyben a földfém-Fe₂ elemek másodlagos anizotrópiáját Tb-Dy ötvözetekkel kompenzálják. [32] Ilyenek a TbFe/FeCo többrétegek is, ahol a magnetostruktív hatást kombinálják a mágneses hatással. Mivel a működésük egyenes arányos az anizotrópiával és a mágneses telítéssel, ezért az előbbi két lehetőség kínálkozik a magnetostruktív javításra. Az anizotrópia csökkentésére és a mágneses telítődési szint növelésére amorf mágneses anyagokat alkalmaznak.

A fenti ábra mutatja néhány anyag magnetoelasztikus csatolási tényezőjét (b).

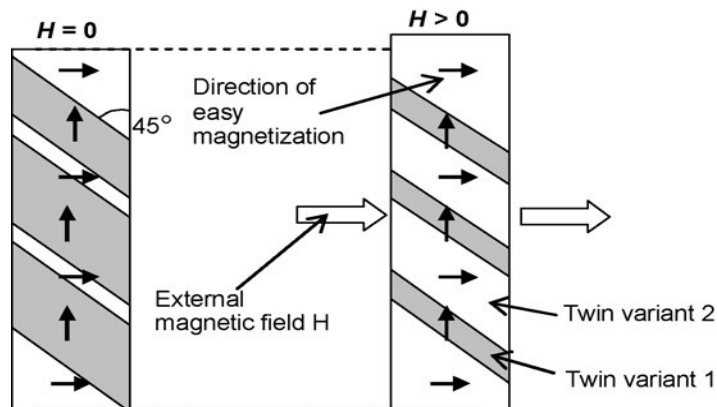


Ezek az anyagok a mikroaktuátorok készítéséhez is felhasználhatóak. Főleg konzolokat (mikrotükrök mozgatása), membránokat (szelepek, pumpák), lemezeket készítenek belőlük (ultrahang motorok) [33].



5. Mágneses emlékező fémek (Magnetic Shape Memory)

A mágneses emlékező ötvözeteknek azért tulajdonítanak nagy figyelmet, mert viszonylag kis mágneses télerősségre ($<1\text{T}$) nagy alakváltozást produkálnak (kb. 10%) és 100Hz fölötti frekvencia tartományban is alkalmazhatóak. Visszatértésükhöz vagy rugóerő szükséges, vagy a mágneses mezőt kell elforgatni 90 fokkal. Ezek tipikusan egykristályos anyagok, melyek az elektromos energiát mechanikus energiává alakítják és viszont. Az anyag visszafordítható működését még pontosan nem értik, ez valami martenzites átalakulás lehet.



Egy elmélet szerint kétfajta orientációjú és mágneses tulajdonságú kristály elem létezik az

anyagban, ezek a kristályhatárok mágneses mező hatására eltolódnak, egymásba alakulnak és a különböző kristályszerkezet miatt a térfogatot máshogy töltik ki [34]. Ezt mutatja a fenti ábra.

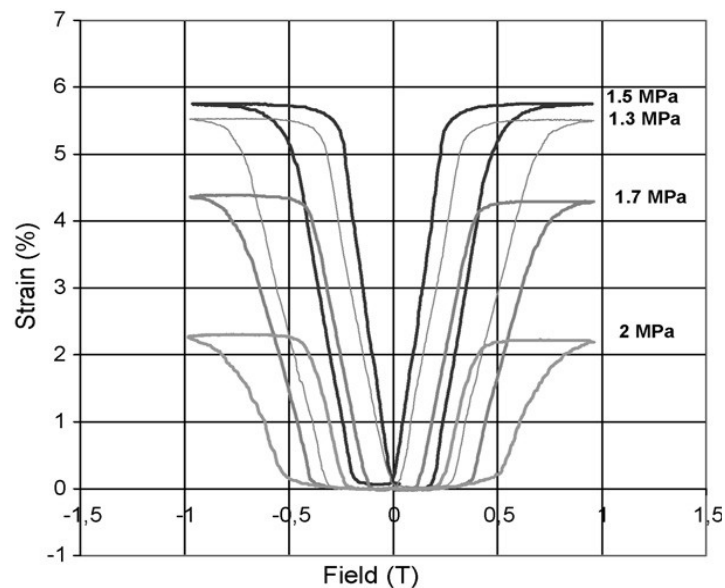
A magnetokristályok anizotrópiája itt is nagy szerepet játszik a folyamatban kialakuló alakváltozás nagyságában.

5.1 MSM előállítása

Jelenleg a mágneses emlékező fémeket az egykristálynövesztési technológiákkal készítik. A gyártási eljárás részleteit ritkán fedik fel. A kész egykristályokat 1000 fokon homogenizálják 24 órán keresztül, majd újabb 20 órát 800 fokon feszültségmentesítik. Ezután röntgennel állítják be a mágneses orientációhoz szükséges kristályszerkezetet. A kristálytájolást követően az anyagot darabolják. A nagy mechanikai deformáció eléréséhez az anyagot az orientációs síkkal 45 fokos szöveget bezáróan kell darabolni. A legjobb igénybevételi értékeket az úgynevezett Heusler ötvözetekkel érték el (Ni₂MnGa) [35].

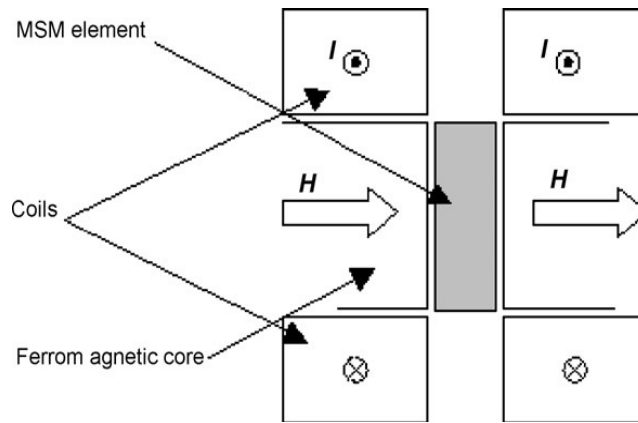
Az MSM effekt az anyag martenzites állapotában alakul ki. Az előbbi anyagnál többfajta kristálystruktúra alakul ki, ami a kémiai összetételtől (vegyérték elektronok) erősen függ. Azt is megfigyelték, hogy a martenzit átalakulás hőmérséklete lineárisan függ a vegyértékelektronok számától. Eleinte az MSM effekt csak 65 fok alatti hőmérsékleten tudták létrehozni, holott sok alkalmazás ennél nagyobbat kívánt [36-39].

A következő ábra a mágneses térerősség hatására létrejövő mechanikai feszültségeket mutatja.



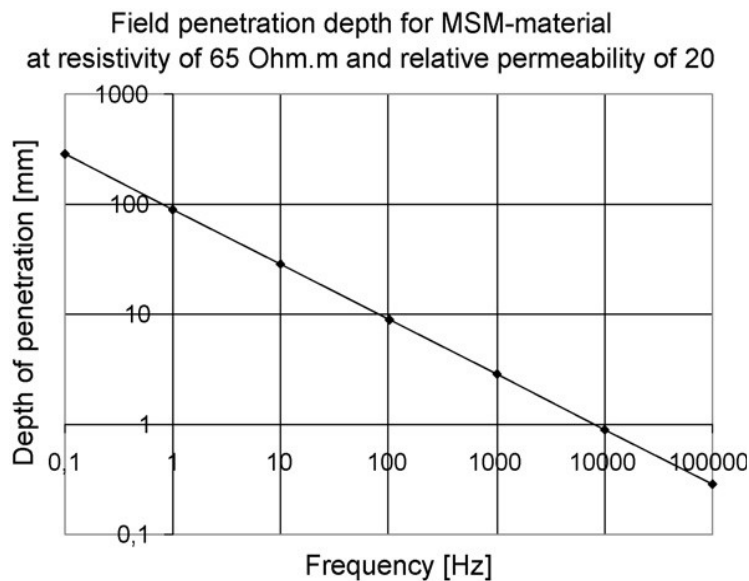
5.2 MSM aktuátorok

Az MSM ötvözeteket tipikusan az aktuátorok alkalmazások részére fejlesztették ki. Az ábra az MSM fémek tipikus alkalmazását mutatja, az előfeszítő szerkezet (rugó) nem látszik a képen. Amikor a tekercsekbe áramot vezetnek a kialakuló mágneses tér hatására a kristályorientációk megváltoznak és az anyag mérete változik. Ha a mágneses térerősség megszűnik, akkor az előfeszítő szerkezet az MSM-et visszaállítja az eredeti alakra.



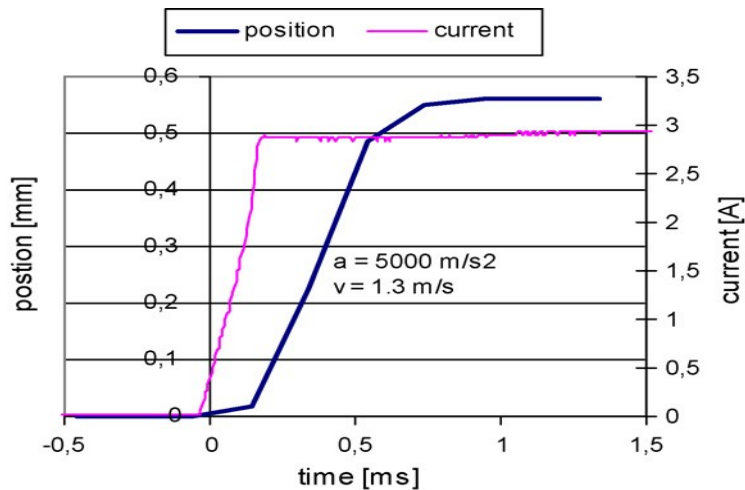
A mágneses körben a légrés méretét a lehető legkisebbre kell választani, hogy a veszteség minél kisebb legyen. A fentihez hasonló szerkezet működtetéséhez kb. 300-500 kA/m-es térerősség szükséges, ez körülbelül 0,6T mágneses fluxusnak felel meg [40]. Előfordul hogy nagy mágneses tér estén egy állandó mágnest építenek a mágneses körbe, ami még nem deformálja az anyagot, így a váltakozó mágneses mezőt előállító teljesítmény kisebb lehet. A mechanikai konstrukciónak mindig része egy előfeszítő rugó és egy mozgató tömeg. A periodikus mozgás növelhető, ha a mechanika sajátfrekvenciáján gerjesztjük az MSM anyagot.

Tekintettel arra, hogy a kialakuló örvényáram nagy frekvenciás, számolni kell a szkin-hatással. Célszerű a melegedések lekerülése érdekében erre ügyelni, vagy lemezeltelektrodat készíteni. A következő ábra mutatja a szkin-hatást az anyagban.

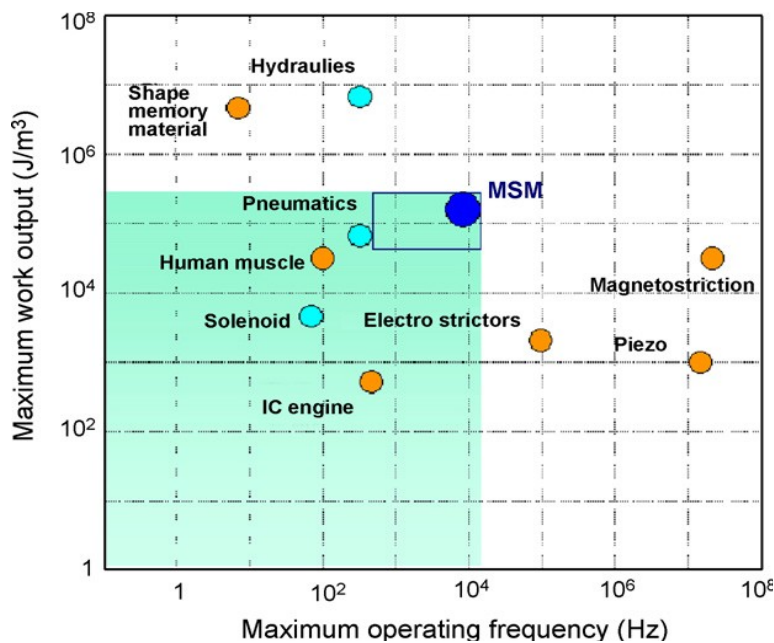


Célszerű a mágneses mezőt áramgenerátorral előállítani, így csökkentve a tekercs transzienseit. Mivel a mágneses mező befolyásolja az MSM mozgását, ezért szükségszerűen a tekercs áramával kontrollálható a mozgás gyorsulása. Pozíció szabályozáshoz intelligens berendezés szükséges, mely algoritmus kapcsolatot tud teremteni a mozgás és az alkalmazott áramerősség között.

A következő ábra mutatja egy 0,7ms válaszidejű aktuátor áramát és a hozzá tartozó elmozdulást [41]. Az MSM fémek működési sebességét az örvényáram, a mozgató elemek inercia nyomatéka határozza meg. A számítások szerint az elérhető legnagyobb gyorsulás 10^5 m/s². Az ábrán szereplő aktuátoron 5×10^3 m/s² gyorsulást mértek.



Az eddig mért legnagyobb sebesség az ilyen aktuátoroknál 1,5m/s volt. Mivel a méretváltozás viszonylag nagy ezért nincs szükség mechanikai erősítőkre, áttételekre. Tehát viszonylag egyszerű struktúrájú, gyors, nagy alakváltozásokat képesek elérni vele. Ezért is alkalmazzák leginkább az aktuátorok megvalósításában.



Az ábrán látható az MSM-ek által elfoglalt hely.

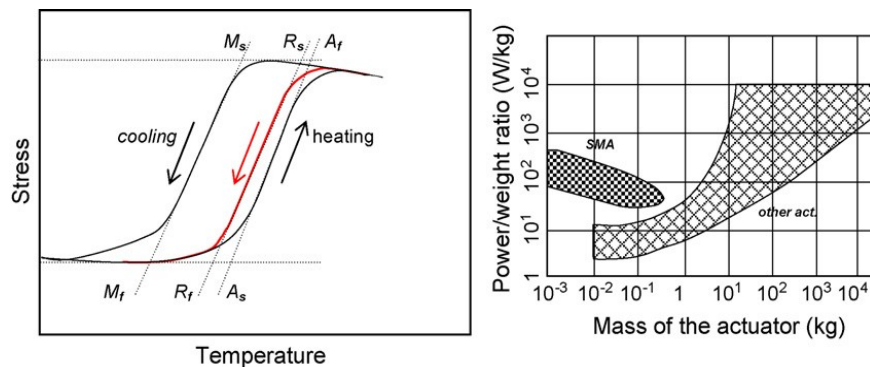
6. Emlékező anyagok (Shape Memory Alloys, Shape Memory Polimers)

Talán a mikro-aktuátorok és a korszerű fémek legismertebb típusa. A piezoelektromos hatás után ez a legismertebb effektus. Ezek az ötvözetek a hőmérséklet hatására változtatják meg méretüket vagy formájukat. Két típusát ismerik, az egyik fémekből áll (SMA), a másik pedig polimer (SMP).

6.1 SMA anyagok

Az SMA anyagok olyan tulajdonsággal rendelkeznek, hogy külső hőmérséklet változás hatására egyik kristálystruktúrából a másikba alakulnak át. Az alacsonyabbik hőmérsékleten (M_f)

martenzites kristályszerkezetet vesznek fel, ebben a fázisban lágyak és könnyen deformálhatóak. Amikor a hőmérséklet emelkedik és eléri az ausztenit hőfokot (A_s), akkor megkezdődik a fázisátalakulás egy ausztenites kristályszerkezetbe. Ekkor az anyag más tulajdonságokat nyer, keményebb lesz és a beprogramozott alakját veszi fel. Ezt az állapotot az újabb deformáció kezdetéig képes tartani. Ez látható a következő ábrán.



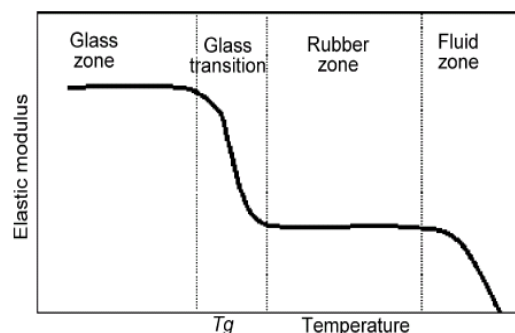
Ezt az átalakulást akár több milliószor is képesek elvégezni. Ezekkel az anyagokkal képesek akár 800MPa-os feszültséget, vagy 5J/g fajlagos munkát is létrehozni. Talán ez a legerősebb aktuátor alkalmazás az összes közül. Az anyaggal közölt hőmérséklet a fázisátalakulás segítségével mechanikai munkává alakul. A későbbiekben talán ezekből készítenek majd a gőzturbinák helyett termo-motorokat [42].

Az ausztenites fázisban amikor a deformáció eléri a 8%-ot akkor átalakul a martenzit fázisba. Amikor a deformáló erő megszűnik az anyag azonnal visszaalakítható a martenzites fázisba. Az M_s és az A_f hőmérséklet között lép csak fel a memória effektus. Az előbbi tartományon kívül az anyag úgynevezett szuperelasztikus tulajdonságú.

A legismertebb SMA anyagok egyike a NiTi ötvözet, míg a másik a rézbázisú fémek. A NiTi-nak van a legnagyobb memória effektusa, hajlékonysága, és a legstabilabb transzformációs hőmérséklete [43]. A nemrégiben felfedezett FeMnSiCrNi rozsdamentes anyagoknak is nagy figyelmet tulajdonítanak a jó memória effektusa, mechanikai tulajdonságai és rozsdálló tulajdonságai miatt [44].

6.2 SMP anyagok

Ezek az anyagok is külső behatás hatására megváltoztatják az alakjukat. A legtöbbjük a hőmérséklet hatására teszi ezt. Ezek az anyagok két polimer komponensből állnak, melyeknek mindegyike más olvadási tulajdonsággal rendelkezik. A T_g hőmérséklet a referencia pont, ahol a magasabb olvadáspontú anyag olvadni kezd. E hőmérséklet felett lágy és nyúlékony anyagot kapunk, aminek könnyű megváltoztatni az alakját. Ha a T_g hőmérséklet alá megyünk, akkor megőrzi az előbbi hőmérsékleten beállított alakját. Egy új melegítés esetén az anyag visszanyeri az eredeti alakját [45-47]. Ezt mutatja a következő ábra.



A polimerek fizikája különbözik az SMA-k tól. A polimer fázisban T_g felett a nagyobb olvadáspontú komponens érvényesül. Ebben az esetben a fizikai kötés, ami felelős az állandó alakért. A másik komponens ekkor mint egy molekuláris kapcsoló, úgy segít befagyasztani az éppen aktuális állapotot az átmeneti hőmérsékleten. A T_g hőmérséklet néhány száz fok lehet [47].

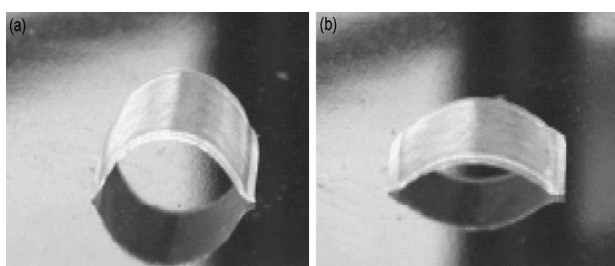
Az első ilyen anyagot 1960-ban találták meg, ez volt a polietilén. Később a 90-es években, mikor elterjedt az aktuátorként való alkalmazásuk egyre több ilyen anyagot ismertek fel: polisztrén, poliuretán, polietilén oxid stb [47]. Általában a forma változást a hőmérséklettel érik el, azonban van olyan típus is, melynél ugyanez fényel, vagy vízzel történik [48-49]. A következő táblázat az SMA és SMP anyagokat hasonlítja össze

Table 8
Comparison of the main properties of the SMA and SMP

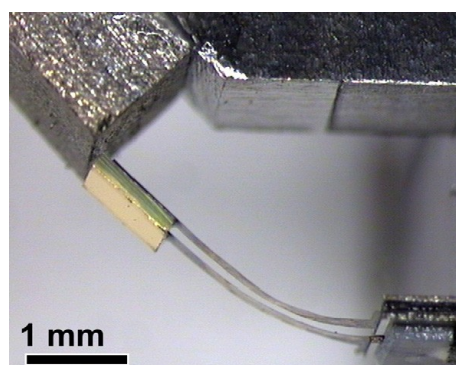
Actuator type	Max. strain (%)	Max. stress (MPa)	Specific elastic energy density (J/g)	Elastic energy density (J/cm ³)	Maximum efficiency (%)	Specific density (g/cm ³)
NiTi	>5	>200	>15	>100	<10	6.5
Polymer	100–400	4	2	2	<10	1

6.3 SMA, SMP aktuátorok

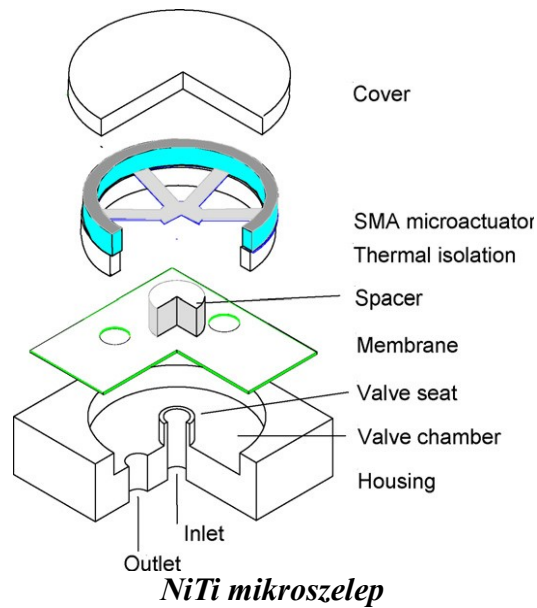
A következőkben néhány SMA vagy SMP anyagból készült aktuátort láthatunk.



Bistabil aktuátor

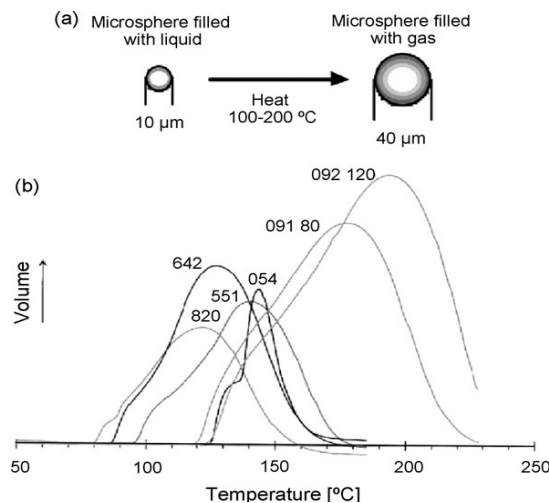


Mikro tükör mozgató aktuátor

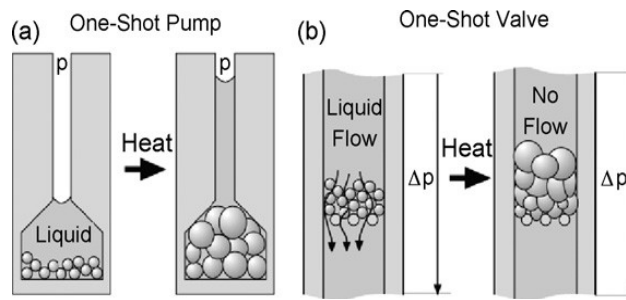


7. Növelhető méretű mikrogömb kompozitok

Ezek a kompozitok kicsi méretű műanyag gömbök, melyek megnövelik térfogatukat ha a hőmérséklet növekedik. Működésük lényege, hogy az eleinte folyékony anyaggal (szénhidrogén pl. izobután, izopentán) töltött gömböcskében a melegítés hatására gáz képződik, mely a térfogatot megnöveli a nyomásnövekedése miatt. A külsőjüket monomerekből (vinilidén-klorid) készítik. Átmérőjük tipikusan 10-40µm.



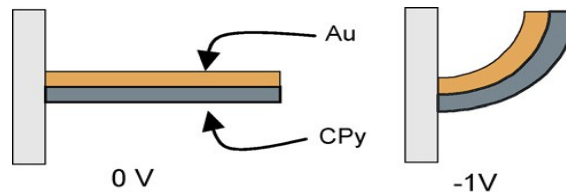
Amikor elérik végleges méretüket kb. 60-szor nagyobbak lesznek, mint kezdetben. A térfogat növekedés irreverzibilis. Néhány aktuátoros alkalmazás mellett főként a műanyagiparban használják térfogatonövelőként, illetve sűrűség csökkentőként.



8. Elektro-aktív polimerek (EAP)

Az elektro-aktív polimernek két fő csoportja létezik: elektromos EAP és az ionos EAP. Az elektromos EAP kategóriába a dielektromos elasztomerek és a elektrostruktív polimerek tartoznak. Ezek általában száraz anyagok és a működési feszültségükkel jellemezhetőek. Az ionos EAP-ok működése a szabad ionokon alapul, nedves közegben vannak és a relatív alacsony feszültség szükséges a működtetésükhöz [50].

A legtöbb EAP mikroaktuátor aktív része vezető polimereket (Conductive Polymer) használ, ami az utóbbi csoportba tartozik. Előnyük, hogy viszonylag alacsony feszültségen működnek kis teljesítmény mellett, biokompatibilisek és könnyen előállíthatóak [51-53]. Ezen anyagok térfogatváltozása az oxidációtól illetve a redukciótól függ. Általában egy passzív szubsztrát rétegre (arany) viszik fel az elektro-aktív anyagot (polypyrrole, polyaniline). Az oxidáció következtében az aktív rétegben történő méretváltozásból jön létre az elhajlás. Ezt mutatja a következő ábra.



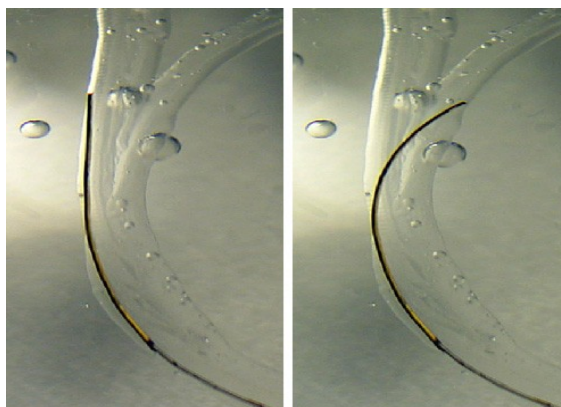
Mivel a kilépő ionokat tárolni kell, amire elektrolit folyadékot használnak, ezért használhatóak csak nedves környezetben. Ez lehet akár egy sóoldat is (NaCl), de az emberi vér is alkalmas erre a feladatra.

8.1 EAP aktuátorok

Az ábrán egy 0,5mm vastag vezetőket megfogó mikroaktuátor látható.



Azonban a legjobban az ilyen anyagokat szelepekhez tudják felhasználni. Ezt mutatja a következő ábra, ahol egy néhány mikrométeres szelep látható



A legfontosabb irány, ahol ezeket az aktuátorokat használni tudják az az orvostudomány. Különböző keringési zavarok befolyásolására, diagnosztizálására használják.

Irodalomjegyzék

- [1] N. Setter, *J. Eur. Ceram. Soc.* 21 (2001) 1279–1293.
- [2] S.A. Wilson, R. Jourdain, R.W. Whatmore, P. Morantz, J. Corbett, M.J. Hucker, C. Warsop, in: *Proceedings of Actuator 2006, 10th International Conference on New Actuators, Bremen, Germany, 14–16th June, (2006)*, pp. 748–751.
- [3] K. Uchino, in: *Proceedings of Actuator 2006 10th International Conference on New Actuators, Bremen, Germany, 14–16th June, (2006)*, pp. 48–57.
- [4] C.A. Randall, A. Kelnberger, G.L. Yanmg, R.E. Eitel, T.R. Shrout, *J. Electroceram.* 14 (2005) 177–191.
- [5] S. Zhang, R. Xia, L. Lebrun, D. Anderson, T.R. Shrout, *Mater. Lett.* 59 (2005) 3471–3475.
- [6] K.A. Snook, T.R. Shrout, K.K. Shung, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Control* 53 (2) (2006) 300–308.
- [7] S. Zhang, C.A. Randall, T.R. Shrout, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Control* 52 (4) (2006) 564–569.
- [8] L.E. Cross, *Jpn. J. Appl. Phys.* 34 (5B) (1995) 2525–2532.
- [9] G. Xu, Z. Zhong, Y. Bing, Z.-G. Ye, G. Shirane, *Nat. Mater.* 5 (2006) 134–140.
- [10] Z. Kutznjak, J. Petzelt, R. Blinc, *Nat. Lond.* 441 (7096) (2006) 956.
- [11] P. Marin-French, S. Cochran, K. Kirk, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 15 (2004) 715–720.
- [11] S. Park, T.R. Shrout, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Control* 44 (September 1997) 1140–1147.
- [12] J.-S. Park, J.-H. Kim, *Smart Mater. Struct.* 14 (2005) 745–753.
- [13] S. Zhang, T.R. Shrout, *US Navy Workshop on Acoustic Transduction Materials and Devices, Penn State University, State College Pennsylvania, 9–11th May, 2006.*
- [15] Y. Saito, H. Takao, T. Tani, T. Nonoyama, K. Takatori, T. Homma, T. Nagaya, M. Nakamura, *Nat. Lond.* 432 (7013) (2004) 84–87.
- [16] Y. Guo, K. Kaikamoto, H. Ohsato, *Appl. Phys. Lett.* 85 (18) (2004) 4121–4123.
- [17] E. Hollenstein, M. Davis, D. Damjanovic, N. Setter, *Appl. Phys. Lett.* 87 (18) (2005) 182905.
- [18] T. Takenaka, H. Nagata, *J. Eur. Ceram. Soc.* 25 (12) (2005) 2693–2700.
- [19] S. Trolier-Mckinstry, P. Muralt, *J. Electroceram.* 12 (2004) 7–17.
- [20] P. Muralt, M. Kohli, T. Maeder, A. Kholkin, K. Brooks, N. Setter, R. Luthier, *Sens. Actuators A* 48 (2) (1995) 157–165.
- [21] M.A. Dubois, P. Muralt, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Control* 45 (5) (1998) 1169–1177.
- [22] Muralt, in: B.M. Kulwicki, A. Amin, A. Safari (Eds.), *Proceedings of ISAF '96, IEEE, Piscataway, (1996)*, p. 145.
- [23] Y. Miyahara, T. Fujii, S. Watanabe, A. Tonoli, S. Carabelli, H. Yamada, H. Bleuler, *Appl. Surf. Sci.* 140 (3–4) (1999) 428–431.
- [24] M. Koch, N. Harris, R. Maas, A.G.R. Evans, N.M. White, A. Brunnschweiler, *Meas. Sci. Technol.* 8 (1997) 49–57.
- [25] N. Ledermann, P. Muralt, J. Baborowski, S. Gentil, K. Mukati, M. Cantoni, A. Seifert, N. Setter, *Sens.*

- Actuator A 105 (2003) 162.
- [26] G.A.C.M. Spierings, J.M. Breed, M.J.E. Ulenaers, P.J. van Veldhoven, P.K. Larsen, *Microelectron. Eng.* 29 (1995) 235.
- [27] M.S. Shur, A.D. Bykhovski, R. Gaska, *MRS Internet J. Nitride Semicond. Res.* 4S1 (1999) G1.6.
- [28] M.H. Zhao, Z.L. Wang, S.X. Mao, *Nano Lett.* 5 (2004) 587.
- [29] S.C. Ko, Y.C. Kim, S.S. Lee, S.H. Choi, S.R. Kim, *Sens. Actuators A* 103 (2003) 130.
- [30] S.C. Minne, S.R. Manalis, C.F. Quate, *Appl. Phys. Lett.* 67 (1995) 3918.
- [31] S. Trolier-McKinstry, P. Muralt, *J. Electroceram.* 12 (2004) 7.
- [32] A.E. Clark, in: E.P. Wohlfarth (Ed.), *Ferromagnetic Materials*, vol. 1, Amsterdam, North-Holland, 1980, p. 531.
- [33] F. Claeysen, N. Lhermet, J. Betz, K. Mackay, D. Givord, E. Quandt, H. Kronmüller, *Proc. Actuator* 98, Bremen, 1998, p. 375.
- [34] A. Steuwer, T. Mori, H. Kato, T. Wada, *J. Appl. Phys.* 94 (2003) 2761.
- [35] A. Sozinov, A.A. Likhachev, N. Lanska, K. Ullakko, *Appl. Phys. Lett.* 80 (2002) 1746.
- [36] V.A. Chernenko, *Scripta Mater.* 40 (1999) 523.
- [37] A.N. Vasil'ev, A.D. Bozhko, V.V. Khovailo, I.E. Dikshtein, S.G. Shavrov, V.D. Buchelnikov, M. Matsumoto, S. Suzuki, T. Takagi, J. Tani, *Phys. Rev. B* 59 (1999) 1113.
- [38] K. Yamaguchi, S. Ishida, S. Asano, *Mater. Trans. JIM* 44 (2003) 204.
- [39] P. Entel, V.D. Buchelnikov, V.V. Khovailo, A.T. Zayak, W.A. Adeagbo, M.E. Gruner, H.C. Herper, E.F. Wassermann, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 39 (2006) 865.
- [40] S. Chikazumi, *Physics of Ferromagnetism*, second ed., Clarendon Press, Oxford, 1997.
- [41] M. Marioni, R.C. O'Handley, S.M. Allen, S.R. Hall, D.I. Paul, M.L. Richard, J. Feuchtwanger, R. Techapiesancharoenkji, *J. Magn. Magn. Mater.* 290–291 (2005) 35.
- [42] M.R. von Spakovsky, B. Olsommer, *Energy Convers. Manage.* 43 (2002) 1249.
- [43] A. Leppaniemi, *Shape Memory Alloys—Applications and Commercial Aspects*, available from: <http://www.ad.tut.fi/aci/courses/76527/seminars2000/sma.pdf>.
- [44] C. Zhao, *Adv. Mater. Process.* (2001) 33.
- [45] B. Sillion, *Acta Chim.* 3 (2002) 182.
- [46] Y. Osada, A. Matsuda, *Nature* 376 (1995) 219.
- [47] A. Lendlein, S. Kelch, *Angew Chem. Int. Ed.* 41 (2002) 2034.
- [48] A. Lendlein, H. Jiang, O. Junger, R. Langer, *Nature* 434 (2005) 879.
- [49] W.M. Huang, B. Yang, L. An, C. Li, Y.S. Chan, *Appl. Phys. Lett.* 86 (2005) 105.
- [50] R. Pelrine, R. Kornbluh, Q. Pei, J. Joseph, *Science* 287 (2000) 836.
- [51] X. Wang, X. Gu, C. Yuan, S. Chen, P. Zhang, T. Zhang, J. Yao, F. Chen, G. Chen, *J. Biomed. Mater. Res.* 68A (2004) 411.
- [52] P.M. George, A.W. Lyckman, D.A. LaVan, A. Hegde, Y. Leung, R. Avasare, C. Testa, P.M. Alexander, R. Langer, M. Sur, *Biomaterials* 26 (2005) 3511.
- [53] E.W.H. Jager, E. Smela, O. Inganäs, *Science* 290 (2000) 1540.
- [54] <http://www.wikipedia.com>