

Microactuatoarii piezoelectricei bimorfi

Materialele piezoelectrice sunt materiale cristaline speciale care manifestă o proprietate unică: polarizarea electrică apare ca răspuns la aplicarea unei tensiuni mecanice, iar invers, o tensiune mecanică este generată atunci când materialele sunt supuse unui câmp electric. Această proprietate, denumită piezoelectricitate, rezultă din simetria specifică și aranjamentul atomic al rețelei cristaline.

Piezoelectricitatea este un fenomen legat de structura internă a materialelor. În cristalele piezoelectrice, ionii sunt aranjați într-o manieră asimetrică, ceea ce creează momente de dipol electric. Atunci când o tensiune mecanică este aplicată asupra unui astfel de material, aceasta modifică poziția relativă a ionilor din rețea, schimbând distribuția sarcinilor electrice și generând un câmp electric măsurabil. În mod similar, aplicarea unui câmp electric asupra cristalului provoacă o redistribuire a ionilor și generează deformări mecanice.

Semnul polarizării electrice depinde direct de direcția tensiunii mecanice aplicate: o compresiune poate genera un semnal electric de polaritate opusă față de o întindere. În mod similar, tensiunile mecanice generate sunt proporționale și opuse semnului câmpului electric aplicat.

Cel mai cunoscut material piezoelectric este cuarțul (a se vedea figura de mai jos). Cuarțul (sau silicatul de siliciu - SiO_2) este un material cu proprietăți piezoelectrice, ceea ce înseamnă că poate genera o tensiune electrică atunci când este supus unui stres mecanic. Deși cuarțul nu este un material piezoelectric extrem de puternic comparativ cu altele, cum ar fi turmalina sau chiar alte cristale piezoelectrice, el este totuși utilizat în diverse aplicații datorită caracteristicilor sale unice.

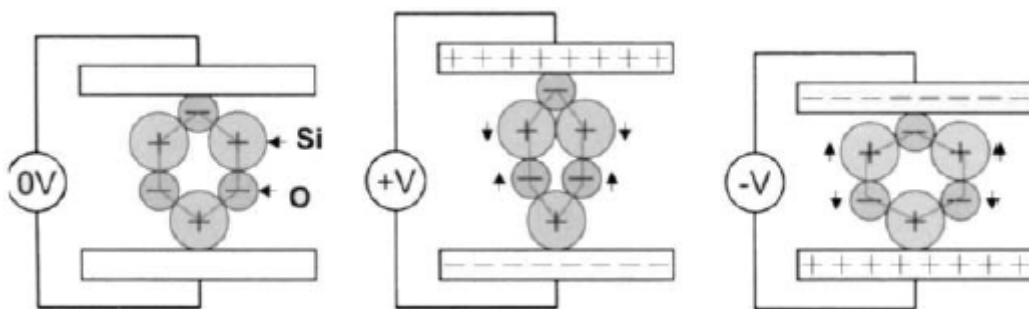


Fig. Reteaua ionică asimetrică a cuarțului (SiO_2), care supusă unei tensiuni mecanice dă naștere unei tensiuni mecanice. Dacă se aplică o tensiune electrică, apare o tensiune mecanică în material.

La tensiuni mecanice aplicate, semnul polarizației induse se va schimba, iar valoarea ei va depinde aproximativ liniar de tensiunea mecanică, ceea ce este util pentru senzori.

Ecuatiile constitutive ale materialelor piezoelectrice sunt:

$$S_{ij} = s_{ijkl}^E T_{kl} + d_{kij} E_k,$$

unde s_{ijkl}^E [m²/N] este coeficientul de deformare elastică în câmp electric constant și d_{kij} [C/N

= V/m] este coeficientul de cuplaj piezoelectric. Relația dintre inducția electrică D_i , tensiunea mecanică T_{kl} și câmpul electric E_k este dată de:

$$D_i = d_{ikl} T_{kl} + \varepsilon_{ik}^T E_k,$$

unde ε_{ik}^T [F/m] este permitivitatea la tensiune mecanică constantă. Mărimile implicate sunt tensori 6 x 6.

În domeniul microactuatorilor, configurațiile de dispozitiv cele mai des utilizate sunt cele în care, câmpul electric E_3 este aplicat după axa Oz de-a lungul grosimii materialului sub formă de strat subțire, iar fețele materialului sunt în planul xOy. Tensiunea mecanică T_1 este orientată după axa Ox sau Oy. În acest caz relațiile precedente se simplifică:

$$S_1 = s_{111}^E T_1 + d_{31} E_3,$$

$$D_3 = d_{31} T_1 + \varepsilon_{33}^T E_3,$$

unde S_1 , respectiv T_1 sunt deformarea respectiv tensiunea mecanică, orientate după axa Ox; s_{11}^E este coeficientul de deformare elastică după axa Ox, în câmp electric constant; d_{31} este coeficientul de cuplaj piezoelectric dinspre axa Oz spre axa Ox; ε_{33}^T permitivitatea electrică după axa Oz la tensiune mecanică constantă; D_3 inducția electrică după axa Oz; E_3 câmpul electric după axa Oz. Pentru câteva materiale piezoelectrice cunoscute, valorile acestor mărimi sunt date în tabelul de mai jos.

Iată câteva detalii esențiale despre cuarțul piezoelectric:

1. **Structura cristalină:** Cuarțul are o structură cristalină trigonală (în forma unei piramide de bază hexagonală), iar cristalele de cuarț sunt adesea utilizate pentru proprietățile lor piezoelectrice. Aceste cristale pot produce o tensiune electrică atunci când sunt comprimate sau deformate, proces cunoscut sub numele de efect piezoelectric.
2. **Proprietăți piezoelectrice:** Când o forță mecanică (cum ar fi presiunea sau vibrațiile) este aplicată pe un cristal de cuarț, atomii din structura sa sunt deplasați, ceea ce provoacă o separare a sarcinilor electrice și, prin urmare, se generează o tensiune electrică pe suprafețele cristalului. Aceasta este caracteristica piezoelectrică esențială a cuarțului.

| Materialul | Coeficienții piezoelectrice | | Coeficientul de deformare elastică | Permitivitatea relativă |
|--------------------------|-----------------------------|-----------------|-------------------------------------|-------------------------|
| | d_{31} [pC/N] | d_{33} [pC/N] | $\frac{1}{E_3}$ [m ² /N] | ϵ_r |
| ZnO | -4.7 | 12 | 6 | 8.2 |
| Sol-gel PZT ² | -88.7 | 220 | - | 1300 |
| PVDF ³ | -23 | -35 | - | 4 |
| PZT-5 | -171 | 80 ÷ 593 | 16.4 | 1700 |

Tab. Valorile mărimilor caracteristice efecului piezoelectric pentru câteva materiale piezoelectrice cunoscute.

Microactuatoarii piezoelectrice pot fi clasificați în două grupuri:

- actuatoarii liniari, la care forțele acționează pentru a întinde sau contracta materialul piezoelectric liniar;
- actuatoarii bimorfi, la care sunt formate structuri compozite pentru a genera mișcări de încovoiere și forțe laterale sau în afara planului stratului de material.

Microactuatoarii piezoelectrice liniari sunt reprezentați schematic în figura de mai jos. Sunt alcătuiți dintr-un strat de material piezoelectric pus între doi electrozi subțiri și ușori, care să nu împiedice mișcarea materialului, în care apar tensiuni mecanice la aplicarea unei tensiuni electrice. Stratul piezoelectric este subțire pentru a nu fi necesare tensiuni prea mari pentru a determina deplasări sau forțe mecanice substanțiale la nivelul materialului piezoelectric. Materialul se poate întinde sau contracta funcție de natura sa, de orientarea axelor cristaline și de polaritatea tensiunii aplicate.

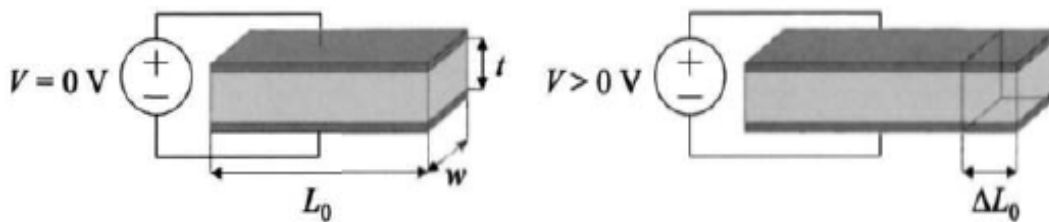
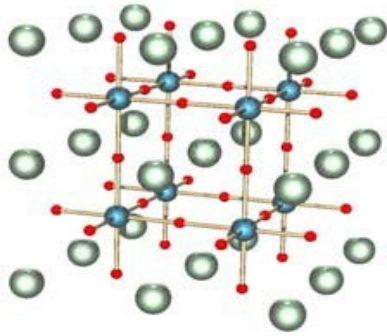


Fig. Reprezentare schematică a microactuatoarii piezoelectrice liniari; **(a)** fără tensiune electrică aplicată; **(b)** cu tensiune electrică aplicată, care determină extinderea materialului piezoelectric.

Deplasamentul total la un strat cu lungimea L_0 este:

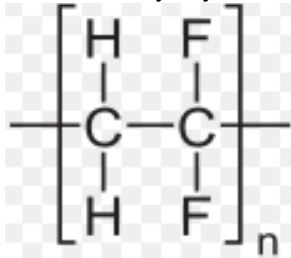
$$\Delta L = S_1 L_0 = d_{31} E_3 L_0.$$

² PZT = Lead zirconate titanate ($\text{Pb}[\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$ $0 < x < 1$) - titanatul de zirconiu și plumb - este un material ceramic de tip perovskite, cu structura tipică:



(ioni: roșii= O^{2-} ; albaștri= Zr^{4+} sau Ti^{4+} ; verzi= Pb^{2+})

³ PVDF = Polyvinylidene Fluoride, este un fluoro-polimer termoplastic foarte stabil chimic și pur, cu structura:



De exemplu, la un strat subțire de PZT cu lungimea de $100 \mu\text{m}$ și gros de $1 \mu\text{m}$ va avea o mișcare liniară de 17 nm/V . La o tensiune aplicată de 10 V , deplasamentul liniar este de numai $0.17 \mu\text{m}$, ceea ce reprezintă o valoare destul de mică pentru microactuatori. Dacă statul piezoelectric este blocat să se deformeze, dispozitivul exercită presiune mecanică. Pentru un strat piezoelectric de PZT cu grosimea de $1 \mu\text{m}$, tensiunea mecanică, care apare în material este:

$$T_1 = \frac{d_{31}E_3}{s_{11}^E} = \frac{(-171 \frac{\text{pC}}{\text{N}})(1 \frac{\text{V}}{\mu\text{m}})}{(16.4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N})} = 10 \text{ MPa/V}$$

Dacă stratul piezoelectric are grosimea de $10 \mu\text{m}$, forța exercitată de dispozitiv este de $104 \mu\text{N/V}$. Astfel, chiar la aplicarea unor tensiuni electrice relativ mici (10 V), sunt generate presiuni ridicate (100 MPa) și forțe relativ mari (1 mN) pentru un dispozitiv cu astfel de dimensiuni (de exemplu actuatorii electrostatici de tip pieptene cu arii mult mai mari generează forțe mai mici). eci, actuatorii piezoelectrici generează forțe mai dar deplasamente mici. Este important și caracterul reversibil al efectului piezoelectric prezentat de material, ceea ce mărește aria de aplicabilitate.

Microactuatorii piezoelectrice bimorfi sunt dispozitive utilizate pentru a transforma forțele electrice generate în materialele piezoelectrice în deplasamente mecanice semnificative, fiind esențiali în aplicațiile care necesită mișcări precise și controlabile. Aceștia au o structură bimorfă, formată din două sau mai multe straturi, dintre care cel puțin unul este piezoelectric și se extinde sau se contractă liniar în funcție de tensiunea aplicată. Celelalte straturi pot fi fie materiale nepiezoelectrice pasive, fie un alt strat piezoelectric cu polarizare electrică opusă, care generează o tensiune mecanică și o forță de semn opus celei din stratul piezoelectric principal. Această structură permite actuatorului să efectueze deplasamente mari chiar și la tensiuni electrice mici. Electrozii sunt foarte subțiri și flexibili, pentru a nu împiedica mișcarea plăcilor piezoelectrice, asigurând astfel o funcționare eficientă și precisă a dispozitivului.

Structura unui microactuator piezoelectric bimorf este alcătuită din două sau mai multe straturi, fiecare având un rol specific în comportamentul mecanic și piezoelectric al dispozitivului. Cele două straturi principale dintr-un actuator bimorf sunt:

- **Stratul piezoelectric activ:** Acest strat este de obicei realizat dintr-un material piezoelectric, cum ar fi cristale de cuarț, PZT (titanat de plumb și zirconiu) sau alt material piezoelectric ceramic sau polimeric. Când o tensiune electrică este aplicată pe acest strat, acesta se deformează mecanic, provocând o expansiune sau contracție liniară a materialului. Această deformație este direct proporțională cu tensiunea aplicată și poate fi folosită pentru a induce mișcări precise ale actuatorului.

Un strat subțire cu grosimea de $1\ \mu\text{m}$ de material piezoelectric (PZT de exemplu), cu lungimea de $100\ \mu\text{m}$ și cu un strat pasiv de $5\ \mu\text{m}$ se poate arcui cu $0.2\ \mu\text{m}/\text{V}$, deci de 10 ori mai mult ca în cazul unui microactuator liniar cu același dimensiuni.

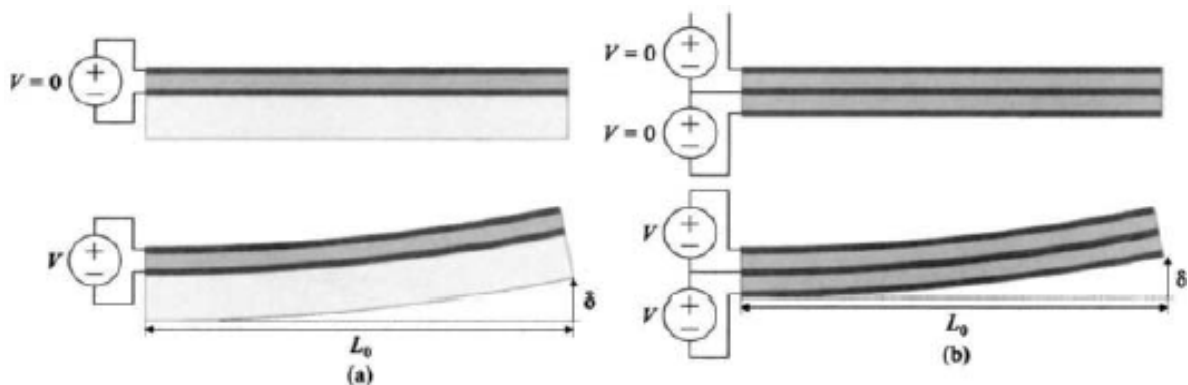


Fig. Reprezentarea schematică a microactuatorilor piezoelectrice bimorfi cu un strat de material piezoelectric și (a) un strat mecanic pasiv, respectiv (b) un alt strat piezoelectric.

- **Stratul pasiv:** Celelalte straturi care completează structura sunt de obicei materiale nepiezoelectrice, adică pasive, care nu răspund la tensiunea electrică aplicată. Aceste straturi sunt folosite pentru a stabili structura și pentru a ajuta la controlul comportamentului mecanic al actuatorului. În unele cazuri, un al doilea strat piezoelectric poate fi folosit, dar cu o polarizare electrică opusă față de primul strat. În această configurație, deformația din stratul pasiv este generată de forțele mecanice și tensiunea induse de semnul opus al polarizației electrice din stratul piezoelectric activ.

Ambele straturi din structura bimorfă sunt piezoelectrice și au aceeași grosime. Pe ele se aplică polarități opuse. De exemplu, dacă grosimea straturilor piezoelectrice este de $1\ \mu\text{m}$ și lungimea de $100\ \mu\text{m}$, vârful benzii bimorfe atinge deflexii de $0.6\ \mu\text{m}/\text{V}$, mult mai mari decât o structură bimorfă construită cu un material pasiv. În plus, banda bimorfă poate realiza și altfel de mișcări, ca în figura de mai jos, se poate lungi/contracta, curba și arcui, dacă este alcătuită din două benzi dublu-strat paralele.

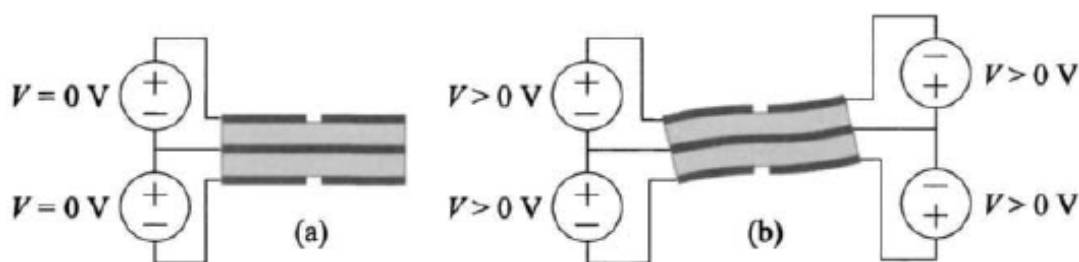


Fig. Reprezentare schematică a unui microactuator piezoelectric bimorf compozit alcătuit din două benzi dublu-strat paralele din materiale piezoelectrice. Dispozitivul se poate lungi/contracta, curba (*a*) și arcui (*b*).

Principiul de funcționare

Când se aplică o tensiune electrică asupra stratului piezoelectric activ, materialul piezoelectric se deformează datorită efectului piezoelectric direct (adică, materialul piezoelectric se dilată sau se contractă în funcție de semnul și valoarea tensiunii). Aceasta provoacă o curbare a structurii bimorfe, iar stratul pasiv (nepiezoelectric) se mișcă în tandem cu stratul activ. Deformarea globală a întregii structuri poate duce la deplasamente mari, chiar și în condiții de tensiune electrică mică. În cazul în care există un al doilea strat piezoelectric cu polarizare opusă, forțele generate de cele două straturi piezoelectrice vor crea o mișcare mai complexă, cu caracteristici de acționare bidirecțională.

Această curbare este mai evidentă datorită diferenței de comportament între materialele piezoelectrice și cele pasive. Stratul piezoelectric se extinde sau se contractă semnificativ, în timp ce stratul pasiv, care nu este piezoelectric, va rămâne relativ constant, iar rezultatul combinat va fi o mișcare de curbare a întregii structuri.

Rolul electrozilor

Electrozii sunt elemente esențiale ale actuatorilor piezoelectrice bimorfi. Acestea sunt plasate pe suprafețele stratului piezoelectric pentru a asigura aplicarea unui câmp electric uniform. Electrozii sunt de obicei foarte subțiri și flexibili pentru a nu împiedica mișcarea plăcilor piezoelectrice și pentru a permite deformarea liberă a structurii. În plus, grosimea redusă a electrozilor minimizează impedența electrică, astfel încât tensiunea aplicată să fie distribuită eficient și să inducă o deformare maximă a stratului piezoelectric. Electrozii flexibili permit, de asemenea, menținerea unui contact stabil cu stratul piezoelectric în timpul mișcărilor, asigurând astfel o performanță optimă a actuatorului.

Actuatorii piezoelectrice bimorfi au numeroase avantaje în comparație cu alte tipuri de actuatori:

- **Deplasamente mari la tensiuni mici:** Datorită structurii bimorfe, acești actuatori pot genera deplasamente semnificative chiar și la tensiuni electrice relativ mici. Acest lucru le face eficiente din punct de vedere energetic și utile în aplicațiile care necesită precizie și eficiență.
- **Controlul fin al mișcării:** Datorită capacității de a controla deformația piezoelectrică, actuatorii bimorfi permit un control fin și precis al mișcării, fiind utilizați frecvent în sisteme care necesită acționare cu mare precizie, cum ar fi microsistemele mecanice (MEMS), senzori sau instrumente optice.
- **Ușurință în integrarea în sisteme microelectromecanice:** Actuatorii piezoelectrice bimorfi sunt ideali pentru utilizarea în aplicații miniaturizate, datorită dimensiunilor lor reduse și a performanței excelente la scară mică.
- **Răspuns rapid și stabilitate termică:** Aceștia au un răspuns rapid la semnalele electrice și pot funcționa într-o gamă largă de temperaturi, fiind stabili în fața variațiilor de temperatură.

Dezavantaje ale actuatorilor piezoelectrice bimorfi

- **Limitări în generarea de forțe mari:** Actuatorii piezoelectrice bimorfi sunt capabili de deplasamente mari cu tensiuni mici, ceea ce este un avantaj în aplicațiile care necesită

mişcări precise și mici. Totuși, când se dorește o forță mare, acești actuatori nu sunt la fel de eficienți și necesită soluții suplimentare pentru a obține forțe mari.

- **Controlul nelinear la tensiuni mari:** Deși actuatorii piezoelectrice bimorfi sunt excelenți în controlul precis al mișcării, comportamentul lor poate deveni nelinear atunci când tensiunea aplicată crește sau când sunt solicitate deplasamente mari. Acesta poate fi un dezavantaj în anumite aplicații, dar nu în toate cazurile, mai ales când tensiunea și mișcarea rămân în intervale controlate.
- **Durabilitate și oboseala materialului:** Actuatorii piezoelectrice sunt ideali pentru miniaturizare și integrare în sisteme mici, dar, în timp, expunerea la cicluri repetate de mișcare poate duce la uzura materialului piezoelectric. Acesta poate fi considerat un dezavantaj în aplicațiile pe termen lung, în special în condiții de solicitări intense.
- **Sensibilitatea la temperatură:** Un avantaj al actuatorilor piezoelectrice bimorfi este că aceștia au un răspuns rapid și pot funcționa într-o gamă largă de temperaturi. Totuși, materialele piezoelectrice pot suferi o scădere a performanței la temperaturi extreme. Deși stabilitatea termică este bună în majoritatea aplicațiilor, există condiții în care schimbările mari de temperatură pot afecta performanța.
- **Costuri mai mari:** Acest punct nu se află în contradicție cu avantajele, ci subliniază faptul că tehnologia piezoelectrică, deși extrem de eficientă, poate fi mai scumpă decât alternativele, ceea ce poate reprezenta o barieră pentru utilizarea la scară largă în anumite aplicații, în ciuda performanțelor superioare în anumite contexte.

În concluzie, avantajele și dezavantajele actuatorilor piezoelectrice bimorfi sunt strâns legate și depind în mare măsură de aplicarea specifică. De exemplu, dacă un sistem necesită mișcări foarte precise, avantajele pot depăși dezavantajele, în timp ce într-un sistem unde sunt necesare forțe mari sau stabilitate pe termen lung, dezavantajele pot deveni mai semnificative.

Aplicații

Microactuatorii piezoelectrice bimorfi sunt folosiți în multiple domenii, cum ar fi:

- **Sisteme de precizie:** În instrumente de măsură sau microsisteme care necesită deplasamente foarte mici și precise, precum micromanipulatoare sau actuatore pentru schimbări fine de poziție.
- **Sisteme optice:** În echipamente precum scanerele de imagini sau microscopie, pentru mișcarea precisă a lentilelor sau a altor componente optice.

- **Sisteme de ajustare:** În tehnologia de ajustare a frecvenței (de exemplu, în filtrele piezoelectrice sau în aplicațiile de telecomunicații).
- **Robotica și microrobotica:** În aplicațiile de microrobotizare, unde actuarea precisă și mică este crucială.

Aplicatie: Sistem de micro-poziționare pentru optică fină

Descriere:

Un sistem bazat pe microactuatori piezoelectrice bimorfi activi ar putea fi utilizat pentru:

- Ajustarea poziției unui element optic (de exemplu, o lentilă sau o oglindă) cu o precizie nanometrică.
- Sistemele de aliniere fină în domeniul opticii și fotonicii.

Cum funcționează?

1. **Microactuatorul bimorf activ** constă dintr-un strat dublu piezoelectric. Prin aplicarea unei tensiuni electrice diferite pe fiecare strat, se creează o îndoire mecanică controlată.
2. Această îndoire este folosită pentru deplasarea controlată a unui element montat pe microactuator.
3. Prin alternarea rapidă și controlată a tensiunii, se poate genera un control foarte precis asupra mișcării.

Beneficii:

- Precizie extremă datorită răspunsului rapid al materialelor piezoelectrice.
- Lipsa vibrațiilor parazitare, caracteristică mecanismelor piezoelectrice.
- Poate fi utilizat în aplicații miniaturizate, cum ar fi microscopul confocal sau dispozitivele MEMS (sisteme miniaturale care integrează componente mecanice, electronice și, uneori, componente optice sau chimice pe un singur substrat, de obicei realizate din silicon).

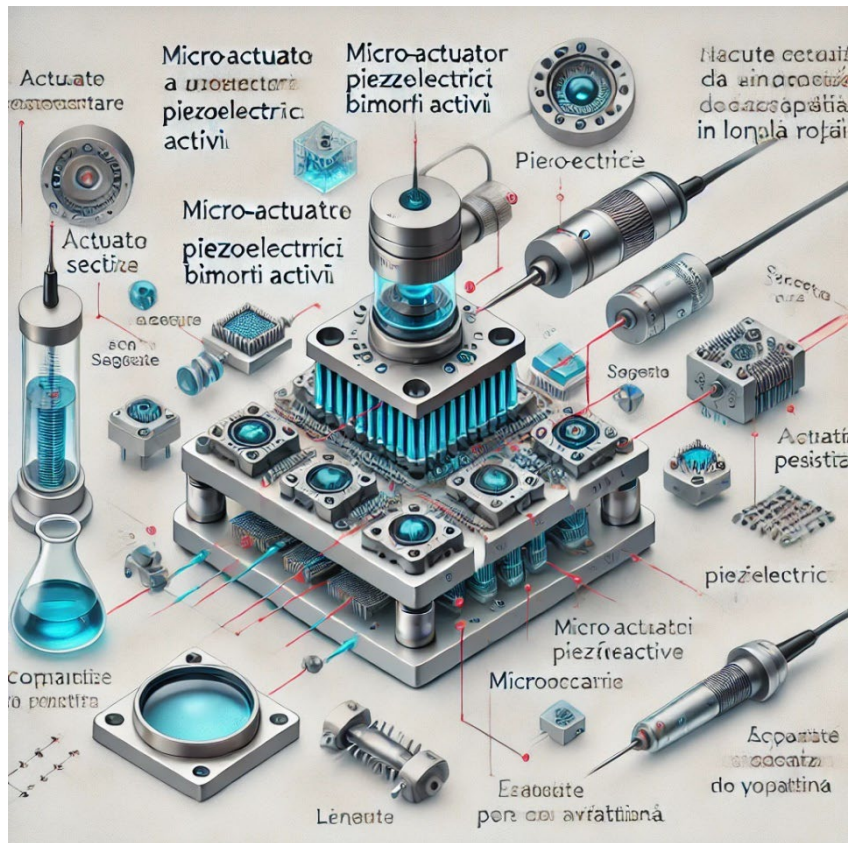


Fig. Sistem de micro-poziționare bazat pe microactuatoarea piezoelectrici bimorfi activi

Microattuatorii piezoeletrici

Materialele piezoelectrice sunt materiale cristaline speciale care manifestă o proprietate unică: polarizarea electrică apare ca răspuns la aplicarea unei tensiuni mecanice, iar invers, o tensiune mecanică este generată atunci când materialele sunt supuse unui câmp electric. Această proprietate, denumită piezoelectricitate, rezultă din simetria specifică și aranjamentul atomic al rețelei cristaline.

Cel mai cunoscut material piezoelectric este cuarțul, un material cu proprietăți piezoelectrice, ceea ce înseamnă că poate genera o tensiune electrică atunci când este supus unui stres mecanic. Deși cuarțul nu este un material piezoelectric extrem de puternic el este totuși utilizat în diverse aplicații datorită caracteristicilor sale unice.

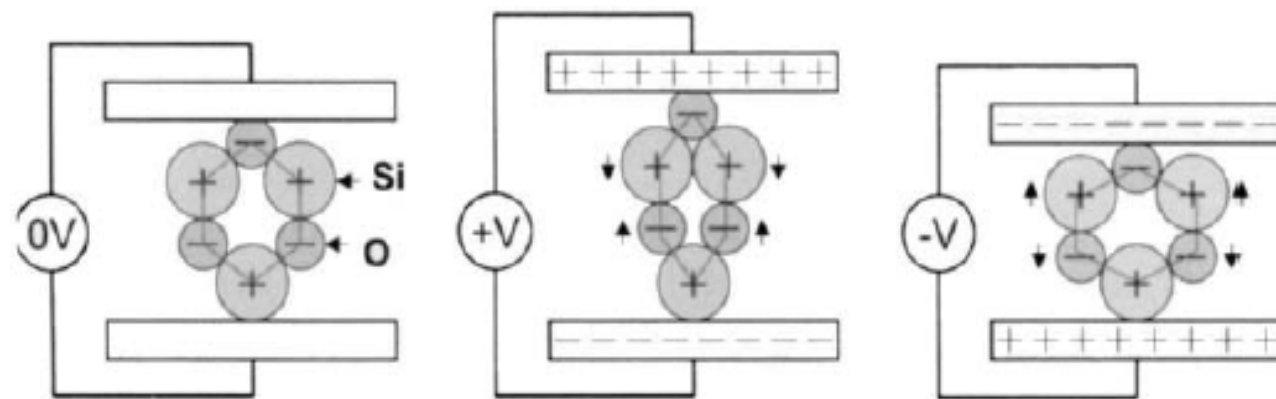


Fig. Reteaua ionică asimetrică a cuarțului (SiO₂), care supusă unei tensiuni mecanice dă naștere unei tensiuni mecanice. Dacă se aplică o tensiune electrică, apare o tensiune mecanică în material.

La tensiuni mecanice aplicate, semnul polarizației induse se va schimba, iar valoarea ei va depinde aproximativ liniar de tensiunea mecanică, ceea ce este util pentru senzori.

Microactuatoarii piezoelectrice pot fi clasificați în două grupuri:

Microactuatoarii piezoelectrice liniari sunt alcătuiți dintr-un strat de material piezoelectric pus între doi electrozi subțiri și ușori, care să nu împiedice mișcarea materialului, în care apar tensiuni mecanice la aplicarea unei tensiuni electrice. Stratul piezoelectric este subțire pentru a nu fi necesare tensiuni prea mari pentru a determina deplasări sau forțe mecanice substanțiale la nivelul materialului piezoelectric. Materialul se poate întinde sau contracta în funcție de natura sa, de orientarea axelor cristaline și de polaritatea tensiunii aplicate.

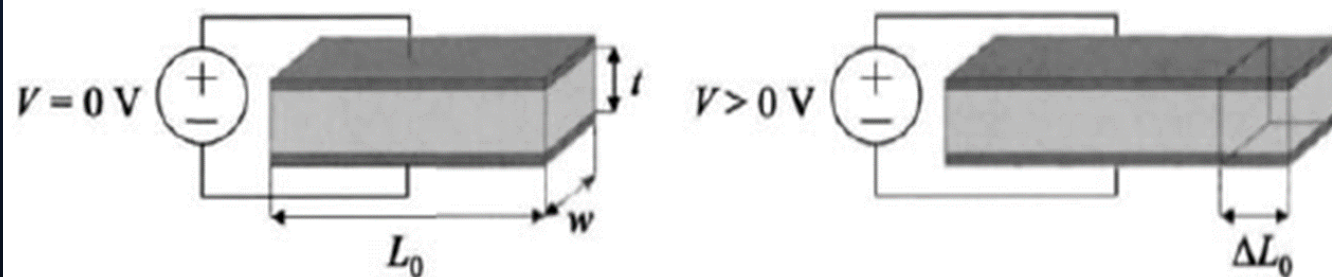


Fig. Reprezentare schematică a microactuatoarelor piezoelectrice liniari; **(a)** fără tensiune electrică aplicată; **(b)** cu tensiune electrică aplicată, care determină extinderea materialului piezoelectric.

Microactuatoorii piezoelectricei bimorfi sunt dispozitive utilizate pentru a transforma forțele electrice generate în materialele piezoelectrice în deplasamente mecanice semnificative, fiind esențiali în aplicațiile care necesită mișcări precise și controlabile. Aceștia au o structură bimorfă, formată din două sau mai multe straturi, dintre care cel puțin unul este piezoelectric și se extinde sau se contractă liniar în funcție de tensiunea aplicată.

Cele două straturi principale dintr-un actuator bimorf sunt:

Stratul pasiv: care nu răspunde la tensiunea electrică aplicată. Aceste straturi sunt folosite pentru a stabili structura și pentru a ajuta la controlul comportamentului mecanic al actuatorului.

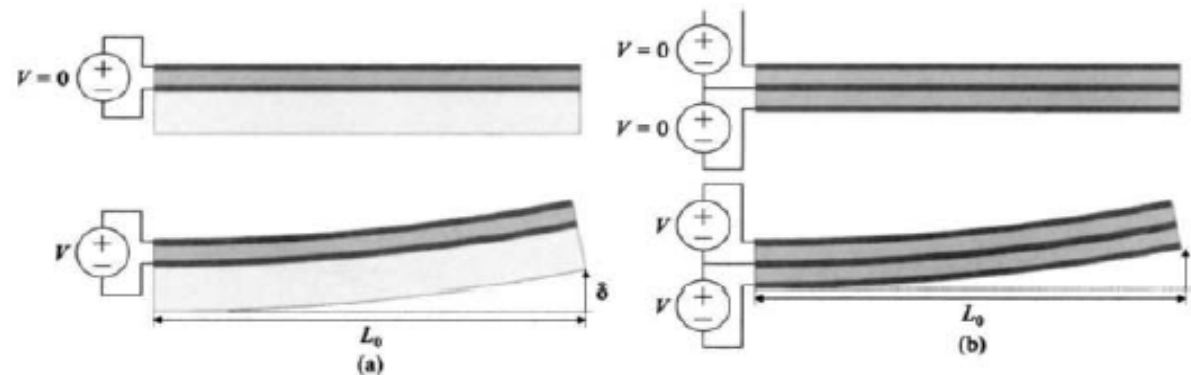


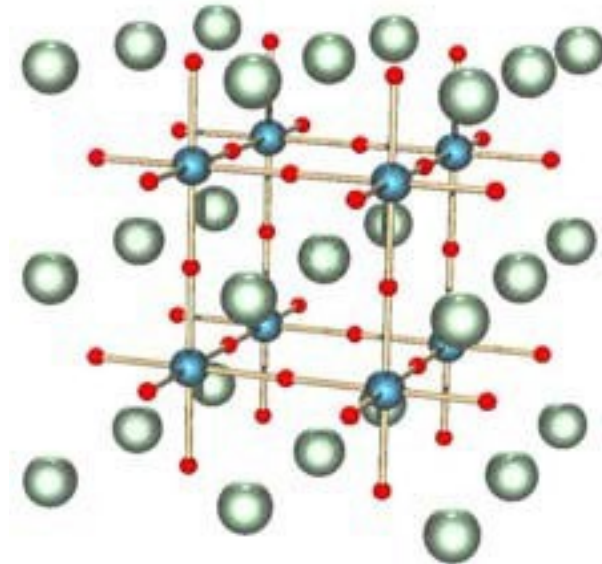
Fig. Reprezentarea schematică a microactuatorilor piezoelectrice bimorfi cu un strat de material piezoelectric

(a) un strat mecanic pasiv, respectiv (b) un alt strat piezoelectric.

Stratul activ: Acest strat este de obicei realizat dintr-un material piezoelectric, cum ar fi cristale de cuarț, PZT (titanat de plumb și zirconiu) sau alt material piezoelectric ceramic sau polymeric.

Principiul de funcționare

Când se aplică o tensiune electrică asupra stratului piezoelectric activ, materialul piezoelectric se deformează datorită efectului piezoelectric direct (adică, materialul piezoelectric se dilată sau se contractă în funcție de semnul și valoarea tensiunii). Aceasta provoacă o curbare a structurii bimorfe, iar stratul pasiv (nepiezoelectric) se mișcă în tandem cu stratul activ. Deformarea globală a întregii structuri poate duce la deplasamente mari, chiar și în condiții de tensiune electrică mică.





Va multumesc pentru
atentie!