



MEMS

komponente

Prof. dr Vesna Paunović

Prof. dr Dragan Pantić



Tehnike senzorisanja

Senzorisanje predstavlja pretvaranje određenog fizičkog ili hemijskog parametra u električnu energiju, uz što je moguće manji uticaj drugih spoljnih veličina.

Najčešće korišćene tehnike senzorisanja baziraju se na efektima:

- piezootpornosti
- piezoelektriciteta
- termoelektriciteta
- magnetootpornosti

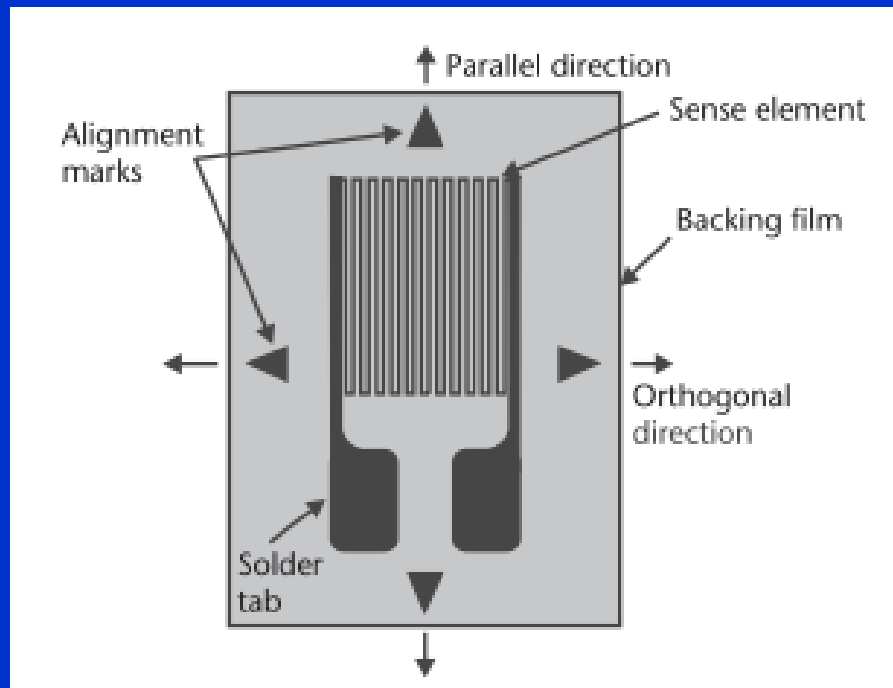


Piezootpornost

Efekat otkrio lord Kelvin 1856. god.

Sastoji se u promeni električne otpornosti pod dejstvom mehaničkog stresa.

Prvu primenu našao u meraču naprezanja na bazi metala koji je omogućio da se mere sledeće veličine: sila, težina i pritisak.



Tipičan merač naprezanja na bazi tanke metalne folije montirane na podlogu. Istezanje ostljivog elementa dovodi do promene njegove otpornosti



Piezootpornost

C.S. Smith je 1954. god. otkrio da poluprovodnici Si i Ge imaju znatno veći piezoelektrični efekat od metala.

Prvi senzor pritiska na bazi difundovanog (dopiranog primesama) otpornika na tankoj silicijumskoj dijafragmi demonstriran je 1969. god.

Piezootporni efekat u poluprovodnicima javlja se zbog deformacije energetske zone pod dejstvom stresa. Sa druge strane, deformisane zone utiču na efektivnu masu i pokretljivost elektrona i šupljina, zbog čega se menja otpornost.

- Sensori pritiska konvertuju spoljašnji pritisak u električni izlazni signal.
- Da bi se ovo ostvarilo, poluprovodnički senzor pritiska koristi monolitni piezootpornik.
- Otporni element, koji predstavlja senzorski element nalazi se u tankoj silicijumskoj dijafragmi. Primenjujući pritisak na silicijumsku dijafragmu dolazi do njenog uvijanja i promene u naprezanju kristalne rešetke. To utiče na mobilnost slobodnih nosilaca i rezultuje u promeni otpornosti pretvarača ili piezootpornosti.
- Debljina dijafragme, kao i geometrijski oblik otpornosti su određeni opsegom tolerancije pritiska.
- Prednosti ovakvih pretvarača su:
 - Velika osetljivost;
 - Dobra linearnost;
 - Mali histerezis;
 - Kratko vreme odziva.
- Izlazni parametri piezootpornosti su temperaturno zavisni i zahtevaju kompenzaciono kolo u slučaju da se senzor koristi u širokom opsegu temperatura.
- Većina savremenih MEMS pretvarača pritiska sastoji se od Vitstonovog mosta sa četiri otpornika, koja se napravljena na monolitnom kristalu.
- Piezootporni elementi integrisani su u senzor nalaze se duže periferije dijafragme u tačkama koje se koriste za merenje deformacije.



Piezootpornost

Relativna promena specifične električne otpornosti:

$$\Delta\rho/\rho = \pi_{//}\sigma_{//} + \pi_{\perp}\sigma_{\perp}$$

$$\sigma_{//} \quad \sigma_{\perp}$$

Paralena i normalna komponenta stresa σ
odnosu na pravac otpornika

$$\pi_{//} \quad \pi_{\perp}$$

Paraleni i normalni piezootporni koficijenti

Pravac otpornika definiše pravac protoka struje



Piezootpornost

Piezootporni koeficijenti zavise od orijentacije kristala, vrste (n- i p-tip) i koncentracije primesa.

Table 2.4 Piezoresistive Coefficients for *n*- and *p*-Type {100} Wafers and Doping Levels Below 10^{18} cm^{-3}

| | $\pi_{//}$ ($10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$) | π_{\perp} ($10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$) | |
|----------------|---|--|--------------------|
| <i>p</i> -type | 7 | -1 | In <100> direction |
| | 72 | -66 | In <110> direction |
| <i>n</i> -type | -102 | 53 | In <100> direction |
| | -31 | -18 | In <110> direction |

Note: The values decrease precipitously at higher doping concentrations.

Za (100) pločice p-tipa koeficijenti su najveći u <110> pravcu, što znači da piezootpornici moraju da budu duž tog pravca, tj. paralelni ili normalni primarnom zaravnjenju pločica. Pozitivni znak paralelnog koeficijenta ukazuje na povećanje otpornosti sa stresom u paralelnom pravcu (izduženje otpornika). Negativni znak normalnog koeficijenta ukazuje na smanjenje otpornosti sa stresom normalnim na otpornik (sužavanje otpornika).



Piezootpornost

Piezootporni efekat jako zavisi od temperature. Za slabodopirani Si ($<10^{18} \text{ cm}^{-3}$) p- i n-tipa temperaturni koeficijent piezootpornih koeficijenata iznosi 0.25% po °C.

Polikristalni i amorfni Si takodje pokazuju piezootporni efekat (5 puta manji nego u monokristalnom Si) slabije osetljiv na promene temperature.

Otpornici koji imaju negativni temperaturni koeficijent otpornosti koriste se za kompenzaciju pozitivne temperaturene zavisnosti piezootpornih koeficijenata.



Piezoelektricitet

Efekat su otkrili braća Pierre i Jacques Curie 1880. god.

Sastoji se u sposobnosti određene klase kristala da proizvedu električno polje kada se podvrgnu dejstvu spoljašnje sile (direktni efekat), kao i šire ili skupljaju kada se primeni spoljašnji napon (indirektni efekat).

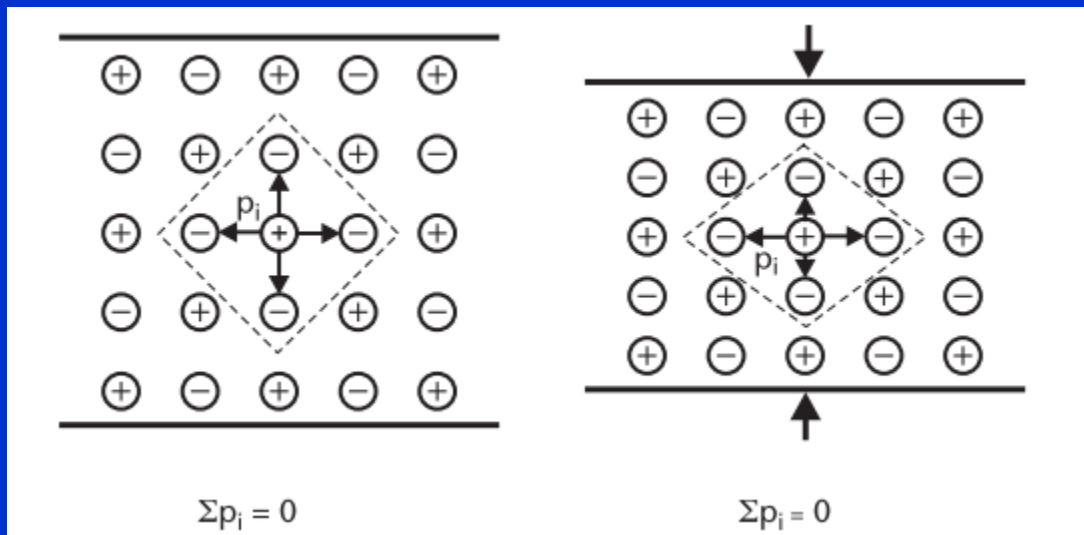
Piezoelektricitet potiče od asimetrije naelektrisanja u jediničnoj ćeliji kristala, zbog čega se javlja neto dipolni moment. Zbir individualnih dipolnih momenata u celom kristalu daje neto polarizaciju i efektivno električno polje unutar materijala.



Piezoelektricitet

Kristali sa centrom simetrije kristalne rešetke (npr. kubni kristali) ne ispoljavaju piezoelektrični efekat. Kod njih je neto dipolni momenat jednak nuli, bez obzira da li je primenjen spoljašnji stres ili ne.

Silicijum nije piezoelektrik jer ima kubnu kristalnu rešetku i kovaltnu vezu atoma.

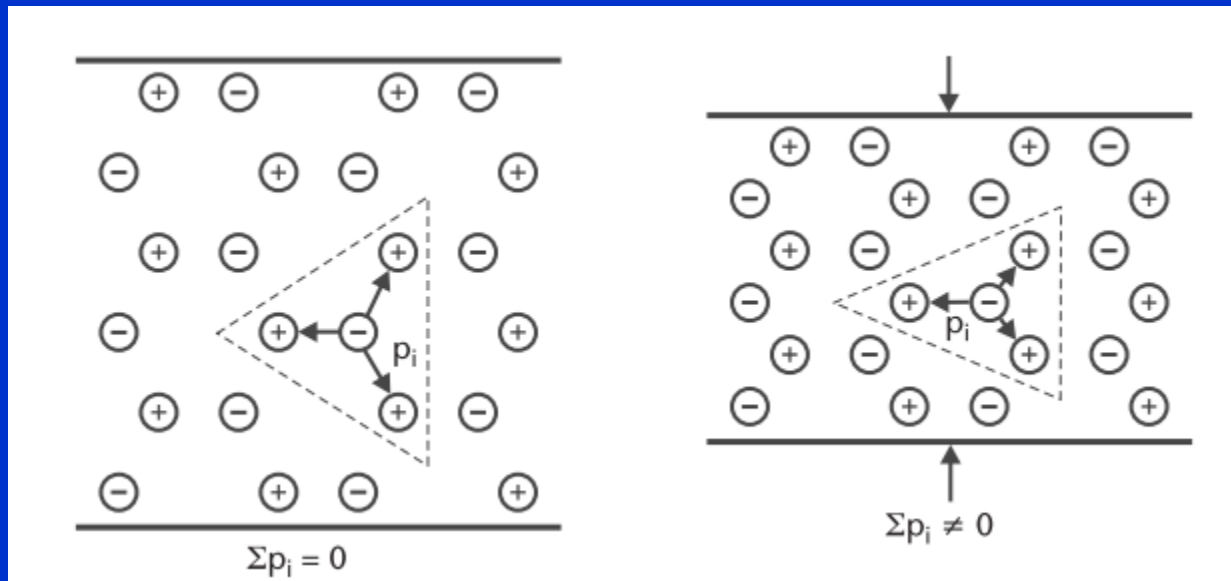


Kristal sa centrom simetrije nema piezoelektrični efekat jer se dipolni momenti u jediničnoj ćeliji poništavaju. Primenom spoljnjeg naprezanja ne menja se centar simetrije kristala.



Piezelektricitet

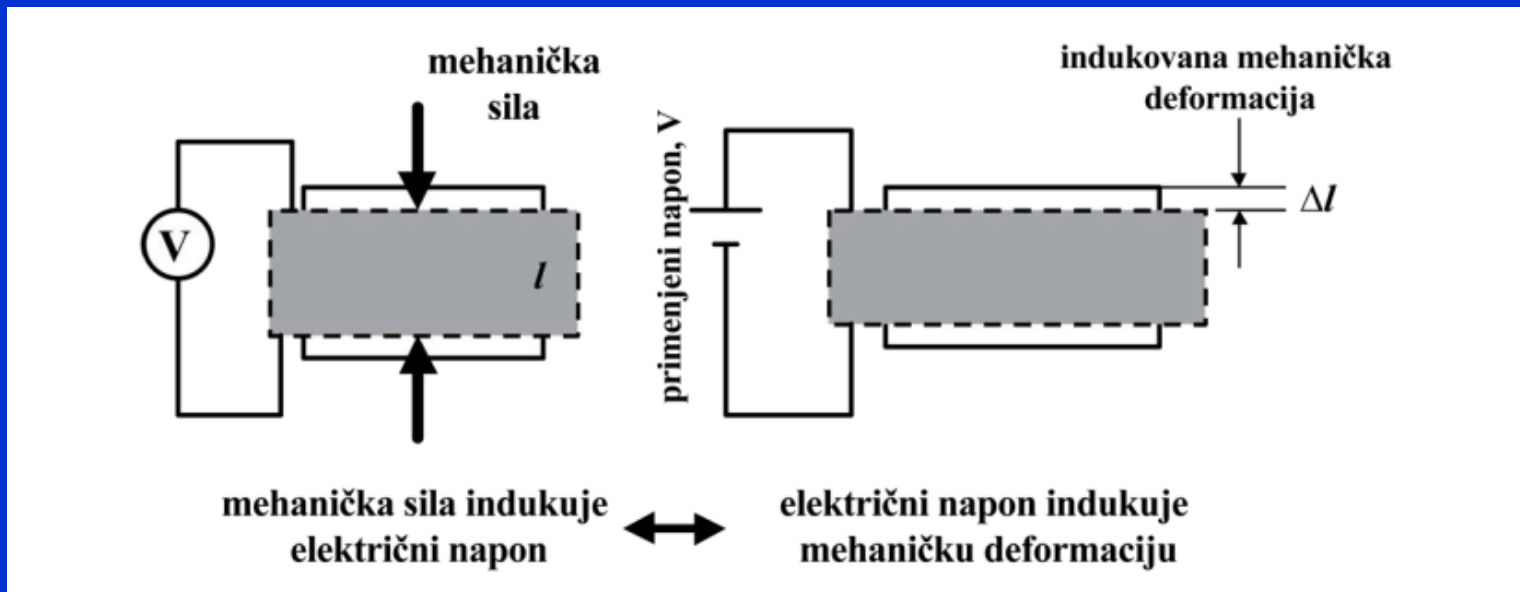
Jonski kristali bez centra simetrije kristalne rešetke (npr. ZnO) poseduju neto dipolne momente jedino kada se izlože dejstvu spoljašnje sile (direktni piezoelektrični efekat).



Pod dejstvom sile menjaju se relativne pozicije pozitivnog i negativnog naelektrisanja.

Piezelektricitet

- Piezoelektrični material izložen dejstvu mehanične sile na svoji površini indukuje naelektrisanje koje je proporcionalno primenjenoj sili
- Merenjem potencijalne razlike koja postoji na suprotnim stranama komada materijala može se odrediti vrednost primenjene sile

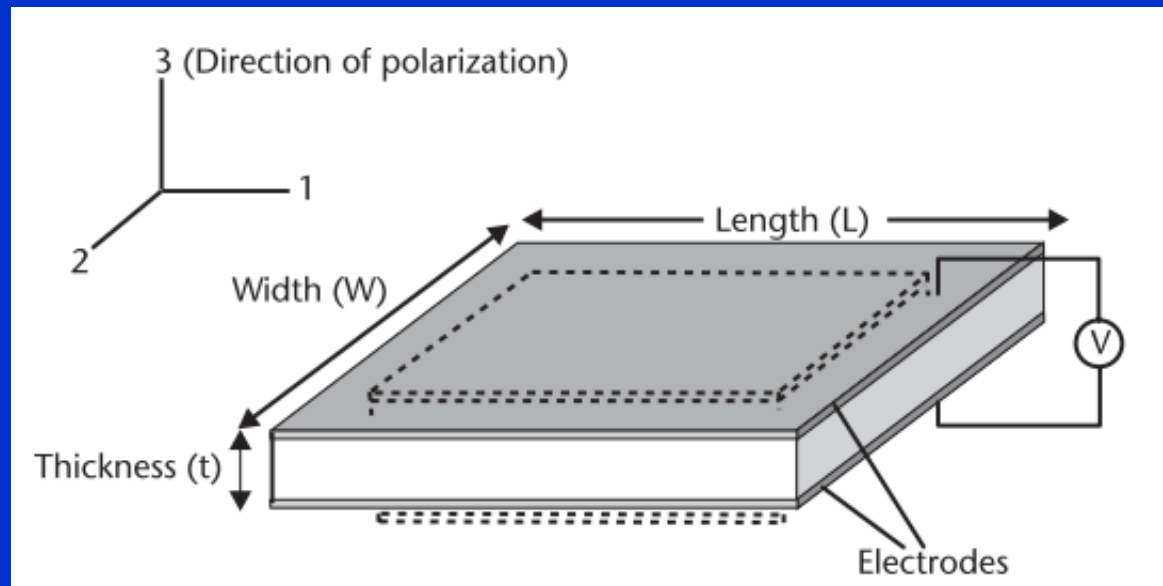




Piezelektricitet

Kada se jonski kristali izlože dejstvu spoljašnjeg električnog polja dolazi do preusmeravanja unutrašnjih dipolnih momenata, što dovodi do pomeranja jona i rezultujuće deformacije kristala (indirektni piezoelektrični efekat).

Kada temperatura predje kritičnu vrenost (Curie-jevu temperaturu), kristal postaje kubni i gubi piezoelektrična svojstva.





Piezoelektricitet

Piezoelektrični efekat se opisuje preko koeficijenata piezoelektričnog naelektrisanja d_{3n} (jedinica C/N) koji povezuju statički napon sa promenom dimenzija ili primenjenom silom.

Ukoliko se kroz debljinu kristala primeni napon V_a , promena dužine ΔL , širine ΔW i debljine Δt izražavaju se sledećim relacijama:

$$\Delta L = d_{31} \cdot V_a \cdot L/t \quad \Delta W = d_{31} \cdot V_a \cdot W/t \quad \Delta t = d_{33} \cdot V_a$$

Suprotno, ukoliko se sila F primeni bilo u pravcu dužine, širine ili debljine, izmereni napon u pravcu debljine V_m se izražava sledećim relacijama:

$$V_m = d_{31} \cdot F/(\varepsilon \cdot W) \quad V_m = d_{31} \cdot F/(\varepsilon \cdot L) \quad V_m = d_{33} \cdot F \cdot t/(\varepsilon \cdot L \cdot W)$$

ε – dielektrična propustljivost materijala

Piezoelektrični efekti se koriste i u tehnikama aktuacije.



Piezelektricitet

Piezoelectric Coefficients and Other Relevant Properties for a Selected List of Piezoelectric

Materials

| <i>Material</i> | <i>Piezoelectric Constant (d_{ij})</i> (10^{-12} C/N) | <i>Relative Permittivity</i> (ϵ_r) | <i>Density</i> (g/cm^3) | <i>Young's Modulus</i> (GPa) | <i>Acoustic Impedance</i> (10^6 kg/m ² ·s) |
|--------------------------------|--|--|--------------------------------|---------------------------------|---|
| Quartz | $d_{33} = 2.31$ | 4.5 | 2.65 | 107 | 15 |
| Polyvinylidene-fluoride (PVDF) | $d_{31} = 23$ $d_{33} = -33$ | 12 | 1.78 | 3 | 2.7 |
| LiNbO ₃ | $d_{31} = -4, d_{33} = 23$ | 28 | 4.6 | 245 | 34 |
| BaTiO ₃ | $d_{31} = 78, d_{33} = 190$ | 1,700 | 5.7 | | 30 |
| PZT | $d_{31} = -171, d_{33} = 370$ | 1,700 | 7.7 | 53 | 30 |
| zinc oxide (ZnO) | $d_{31} = 5.2, d_{33} = 246$ | 1,400 | 5.7 | 123 | 33 |



Termoelektricitet

Termoelektrični efekti (interakcije elektriciteta i temperature) su intenzivno proučavani od 19. veka.

Postoje 3 vrste efekata: Seebeck-ov, Peltier-jev i Thomson-ov efekat.

Seebeck-ov efekat se koristi u termoparovima za merenje razlike u temperaturama.

Peltier-jev efekat se koristi u termoelektrčnim kulerima i frižiderima.

Thomson-ov efekat još uvek nije našao primenu u MEM komponentama.



Termoelektricitet

Peltier-jev efekat se sastoji u tome da protok struje kroz spoj dva različita materijala stvara fluks toplote usled čega se jedna strana hladi, a druga zagreva.

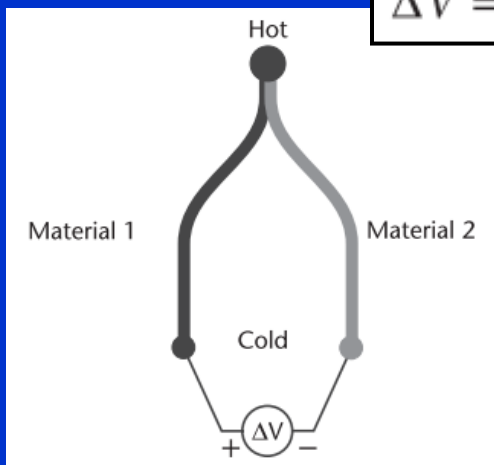
Peltier-jeve komponente se proizvode od bizmut telurida n- i p-tipa i koriste se za hladjenje mikroprocesora, laserskih dioda i senzora infracrvene svetlosti

Seebeck-ov efekat se sastoji u tome da temperaturni gradijent u nekom materijalu stvara električno polje koje teži da spreči protok naelektrisanja usled temperaturnog debalansa. Napon koji se meri proporcionalan je razlici temperatura, tj.

$$\Delta V = \alpha_1 \cdot (T_{cold} - T_{hot}) + \alpha_2 \cdot (T_{hot} - T_{cold}) = (\alpha_2 - \alpha_1) \cdot (T_{hot} - T_{cold})$$

$\alpha_{1,2}$ – Seebeck-ovi koeficijenti materijala 1 i 2

Termospojevi se mogu izradjivati na Si supstratu korišćenjem kombinacije tankih metalnih filmova i poli-Si





Elekromagnetne tehnike

Koriste elektromagnetne signale za detekciju i merenje fizičkih parametara.

Senzori na bazi magnetootpornosti na glavi za očitavanje disk drajvera računara mere promenu otpornosti materijala sa promenom magnetnog polja bitova.

Senzori na bazi Hall-ovog efekta mere magnetno polje na taj način što ono indukuje napon u pravcu normalnom na tok struje. Koriste se za merenje brzine točkova kod vozila.

Senzori na bazi Faraday-evog zakona detektuju kretanje provodnika sa protokom struje kroz magnetno polje



Poredjenje nekih tehnika senzorisanja

| Piezootporna | Kapacitivna | Elektromagnetna |
|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Jednostavna izrada | Jednostavne strukture | Kompleksnost strukture varira |
| Mala cena | Mala cena | Kompleksno pakovanje |
| Naponska ili strujna pobuda | Naponska pobuda | Strujna pobuda |
| Jednostavna merna kola | Zahteva prateću elektroniku | Jednostavna kontrolna kola |
| Mala izlazna impedansa | Podložna EMI | Podložna EMI |
| Visoka temperaturna zavisnost | Mala temperaturna zavisnost | Mala temperaturna zavisnost |
| Mala osetljivost | Veliki dinamički opseg | Osetljivost \propto magnetnom polju |
| Neosetljiva na parazitne otpornosti | Osetljiva na parazitne kapacitivnosti | Neosetljiva na parazitne induktanse |
| Otvorena petlja | Otvorena ili zatvorena petlja | Otvorena ili zatvorena petlja |
| Srednja potrošnja snage | Mala potrošnja snage | Srednja potrošnja snage |



Tehnike aktuacije

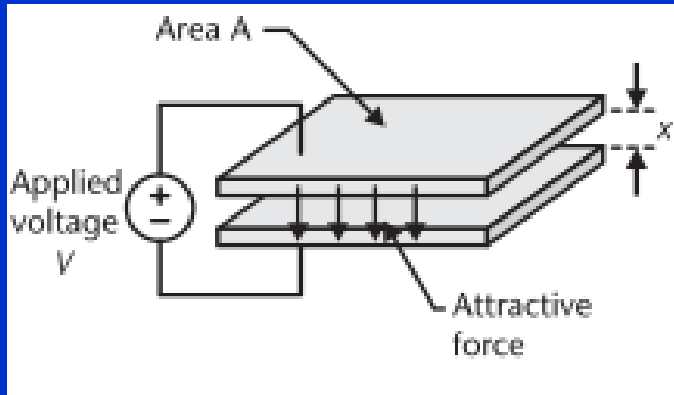
Postoje sledeće tehnike aktuacije:

- elektrostatička
- piezoelektrična
- termička
- magnetna
- na bazi legura koje pamte oblik



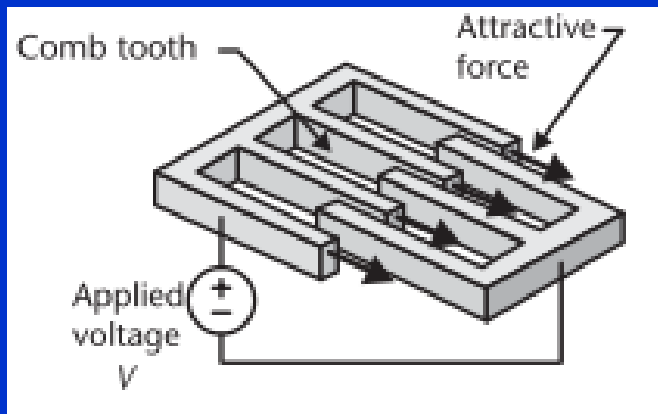
Elektrostatička aktuacija

Bazira se na elektrostatičkoj privlačnoj sili između dve ploče koje nose suprotno naelektrisanje.



Ako je C kapacitivnost, x rastojanje između dve ploče i V spoljašnji napon onda je elektrostatička sila $1/2CV^2/x$. EkspONENT u izrazu obezbeđuje da je sila uvek pozitivna, tj. privlačna, bez obzira na polaritet napona.

Elektrostatički češljasti aktuator ima prednost zbog: većeg pomeraja ploča i relativne nezavisnosti sile od pomeraja.



Elektrostatička aktuacija se koristi kao povratna sprega u sistemima sa kapacitivnim senzorisanjem. Kada senzorsko kolo detektuje da se dve ploče kondenzatora odvajaju pod uticajem neke spoljašnje sile, povratni elektrostatički napon se dovodi na kontrolno kolo da bi se poništilo dejstvo spoljašnje sile i održala konstantna kapacitivnost. Veličina povratnog napona je mera sile koja dejstvuje spolja. Ova osobina je iskorišćena kod mnogih akcelorometara i senzora promene pravca kretanja.



Piezoelektrična aktuacija

Piezoelektrična aktuacija se bazira na indirektnom piezo efektu. Omogućava znatno veće sile, posebno ako se koriste deblji piezoelektrični filmovi. Komercijalno dostupni piezokeramički cilindri daju sile vrednosti nekoliko N sa primenjenim potencijalima reda nekoliko stotina V. Piezoelektrični aktuatori sa tankim filmovima ($< 5\mu\text{m}$) daju silu koje je reda samo nekoliko mN.



Termička akcija

Postoje tri metoda termičke akcije.

Prvi se zasniva na razlici koeficijenata termičkog širenja 2 različita materijala u spoju (primer bimetalnog termostata). Kako temperatura raste jedan sloj se širi više od drugog što stvara naprezanje na spoju i njegovo krivljenje. Veličina krivljenja zavisi od razlike koeficijenata širenja i temperature.

U drugom metodu, poznatom kao termopneumatska akcija, greje se tečnost unutar zatvorene šupljine. Pritisak usled širenja ili isparavanja tečnosti generiše silu na zidove šupljine koji se savijaju ukoliko su popustljivi.

Treći metod koristi viseći štap od homogenog materijala sa jednim krajem pričvršćenim za ram od istog materijala. Zagrevanje štapa iznad temperature rama prouzrokuje različitu elongaciju slobodnog kraja štapa u odnosu na ram. Držanjem slobodnog kraja stacionarnim, stavra se sila proporcionalna dužini štapa i razlici temperature. Ovakav aktuator daje maksimalnu silu kada je pomeraj jednak nuli, i analogno tome, minimalnu silu kada je pomeraj maksimalan.



Magnetna aktuacija

Električna struja u provodnom elementu koji se nalazi unutar magnetnog polja stvara elektromagnetnu (Lorencovu) silu koja deluje u pravcu normalnom na pravac prostiranja struje i magnetnog polja. Ona je proporcionalna struji, magnetnom polju i dužini provodnika. Lorencove sile su iskorišćene i kod sistema elektromagnetnog senzorisanja.

Aaktuacija na bazi legura koje pamte oblik

Pamćenje oblika je jedinstvena osobina specijalne klase legura koje se vraćaju u prethodno definisani oblik iznad kritične temperature prelaza. Materijali “pamte” originalne oblike nakon što se izvrši njihova deformacija. Legure sa memorijom oblika su: Au-Cd, Ti-Ni, Cu-Al-Ni, Fe-Ni, Fe-Pt, itd.



Poredjenje tehnika aktuacije

| Pobudivač | Max gustina energije | Fizički parametri materijala | Prepostavlje ni uslovi | Približni poredak (J/cm ³) |
|----------------------------|-----------------------------------|--|---|--|
| Elektrostatički | $\frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$ | E = električno polje ϵ_0 = dielektrična konstanta | 5 V/ μ m | ~0.1 |
| Termički | $\frac{1}{2} Y(\alpha\Delta T)^2$ | α = koeficijent širenja ΔT = promena temperature Y = Jungov modul | 3×10^{-6} /°C 100°C 100 GPa | ~5 |
| Magnetni | $\frac{1}{2} B^2/\mu_0$ | B = magnetno polje μ_0 = magnetna permeabilnost | 0.1 T | ~4 |
| Piezelektrični | $\frac{1}{2} Y(d_{33}E)^2$ | E = električno polje Y = jungov modul elastičnosti d_{33} = piezelektrična konst. | 30 V/ μ m 100 GPa 2×10^{-12} C/N | ~0.2 |
| Legure koje pamte oblik | - | Kritična temperatura | | ~10 |