

Dumitru Olaru, Ciprian Vasile Stamate

MICROSISTEME MECATRONICE

Principii de bază, tehnologii de fabricație și soluții constructive

Capitolul I MECATRONICA

Tehnologie si educatie in societatea informationala

1. Mecatronica - tehnologie compatibila cu societatea informationala

Revolutia informatica (a doua revolutie industrială) a marcat saltul de la societatea industrializata la societatea informationala, generand un val de innoiri in tehnologie si educatie. Japonezii au definit sensul acestor miscari de innoire, brevetand termenul de *mecatronica*, la inceputul deceniului al 8-lea al secolului trecut. Termenul a fost utilizat pentru a descrie fuziunea tehnologica: *mecanica-electronica-informatica*. Conceptul de mecatronica este sugestiv ilustrat in figura 1.

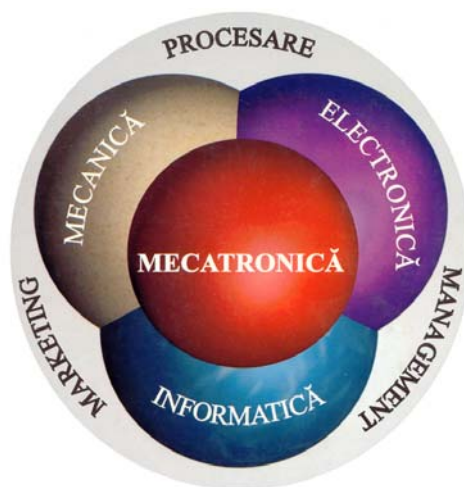


Fig. 1.1 Conceptul de mecatronica

Continutul termenului s-a imbogatit constant ca urmare fireasca a evolutiei in dezvoltarea tehnologica. Foarte curand mecatronica a devenit filozofie, stiinta masinilor inteligente si mediu de proiectare si fabricatie integrata, pe fundalul careia s-a dezvoltat conceptul de proiectare pentru control.

Pentru practica inginereasca filozofia mecatronica a marcat saltul de la ingineria traditionala, secventiala, la ingineria simultana sau concurenta. Principiile mecatronice in educatie vizeaza dezvoltarea gandirii sistemice si formarea deprinderilor de a lucra in echipa. Mecatronica a deschis orizonturi nebanuite in toate domeniile de cercetare, datorita promovarii interdisciplinaritatii si stimulării efectului de sinergie.

Puterea interdisciplinaritatii abordarilor pe care le presupune mecatronica nu poate fi exploatata fara un management performant al cunostintelor si resurselor in domeniu. Cadrul specific acestor abordari este ilustrat in figura 2.

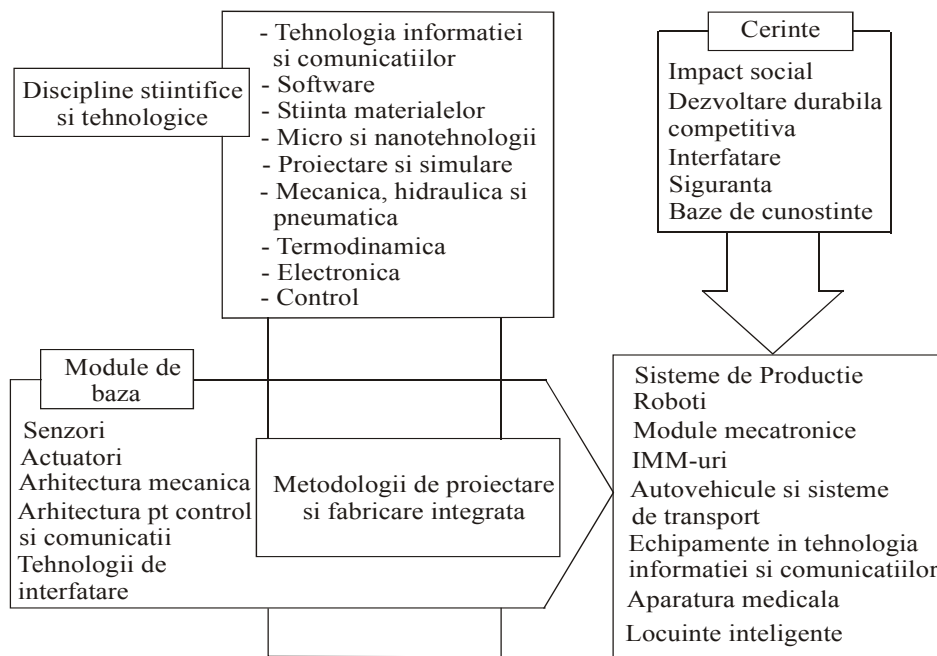


Fig. 2.1 Interdisciplinaritatea mecatronicii

Mecatronica este rezultatul evolutiei firesti in dezvoltarea tehnologica. Tehnologia electronica a stimulat aceasta evolutie. Dezvoltarea microelectronicii a permis integrarea electromecanica. In urmatoarea etapa, prin integrarea microprocesoarelor in structurile electromecanice, acestea devin inteligente si, astfel s-a ajuns la mecatronica, asa cum se arata in figura 3.

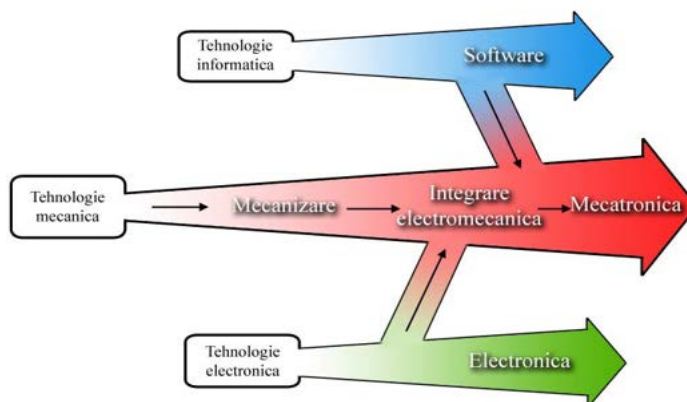


Fig. 3.1 Fluxul catre integrarea mecatronica

Tehnologia mecatronica aduce in centrul atentiei problema informatiei, componenta datoare de ton in raport cu materialul si energia. Promovarea legaturilor informationale in structura produselor si sistemelor mecatronice asigura flexibilitate si reconfigurabilitate. Astfel de produse ca: automobilul modern, sistemele de transport inteligente, robotii, tehnica de calcul, tehnica de telecomunicatii, aparatura biomedicala, aparatura electrocasnica, masinile agricole moderne etc., rod al conceptiei, proiectarii si fabricarii integrate se deosebesc esential de cele traditionale.

Practic, mecatronica este prezenta in toate domeniile de activitate. Sunt deja consacrate extinderi in alte domenii ca: hidronica, pneutonica, termotronica, autotronica sau agromecatronica.

Evolutia in dezvoltarea tehnologica inseamna micromecatronica, nanomecatronica si biomecatronica.

Evaluarea cantitativa si calitativa a informatiei constituie o problema esentiala in educatie, cercetare si in activitatile de productie. Informatia este deopotrivă importanta in medicina, literatura, arta, muzica, sport etc. Comparatia: material-energie-informatie se prezinta in figura 4. Din aceasta comparatie rezulta ca mecatronica este o tehnologie nedisipativa si mai puțin poluanta

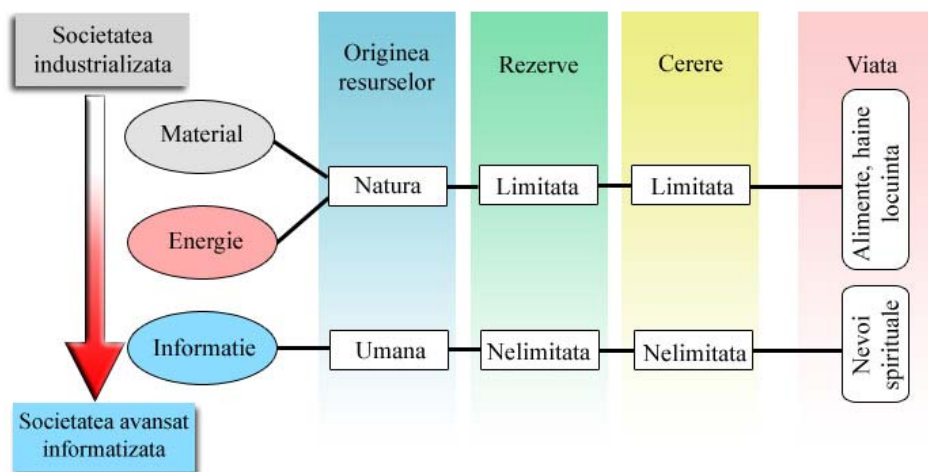


Fig. 4.1 Relatia material-energie-informatie

2. Sistemul mecatronic

Un sistem mecatronic cuprinde două componente principale: **sistemul controlat** și **sistemul de control**, fig. 5.

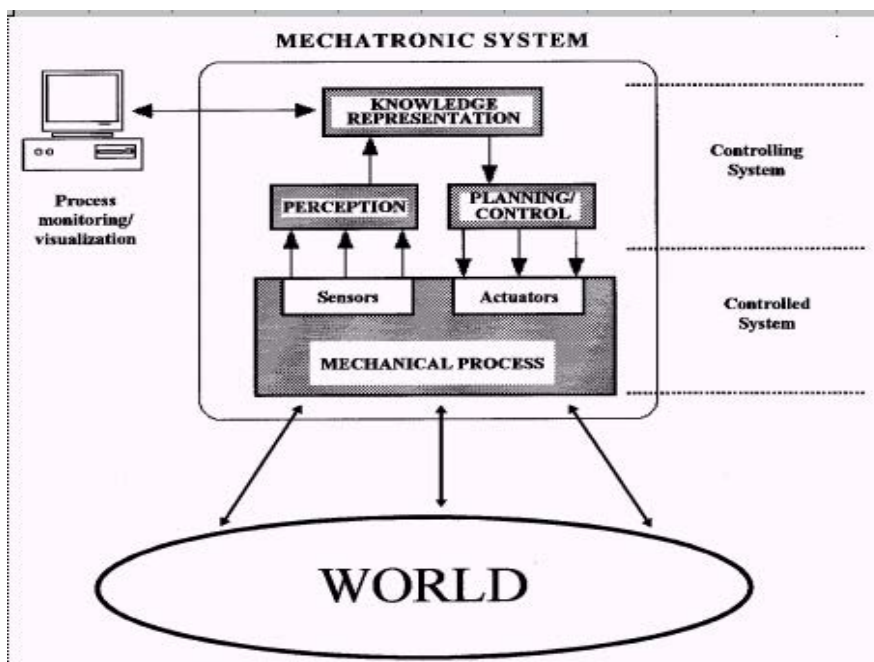


Fig. 5.1 Sistemul mecatronic

Sistemul controlat este constituit din totalitatea proceselor mecanice cu care sistemul mecatronic vine în contact nemijlocit prin intermediul sensorilor și a actuatorilor. Actuatorii sunt sisteme complexe care transforma diverse forme de energie în energie mecanică. Sistemul de control diferențiază sistemul mecatronic de oricare alt sistem tehnic și este constituit din trei subsisteme distincte: **subsistemul de percepție, subsistemul de cunoaștere și subsistemul de planificare și control**. Astfel, pe baza informației primite prin senzori (subsistemul de percepție), se prelucrează în microprocesoare, în rețele artificiale neuronale (subsistemul de cunoaștere) un raspuns adecvat care este transmis la subsistemul de planificare și control. Acest subsistem, prin intermediul actuatorilor, pune în aplicație acțiunile adecvate asupra sistemului mecanic (deplasari, modificări de poziție, apucare de piese etc.),

Din punct de vedere energetic, un sistem mecatronic cuprinde două subdomenii distincte, așa cum este reprezentat în fig. 6: **subdomeniul puterilor mari, acolo unde se execută operațiile fizice sau mecanice și subdomeniul puterilor slabe, unde se realizează procesarea informației.**

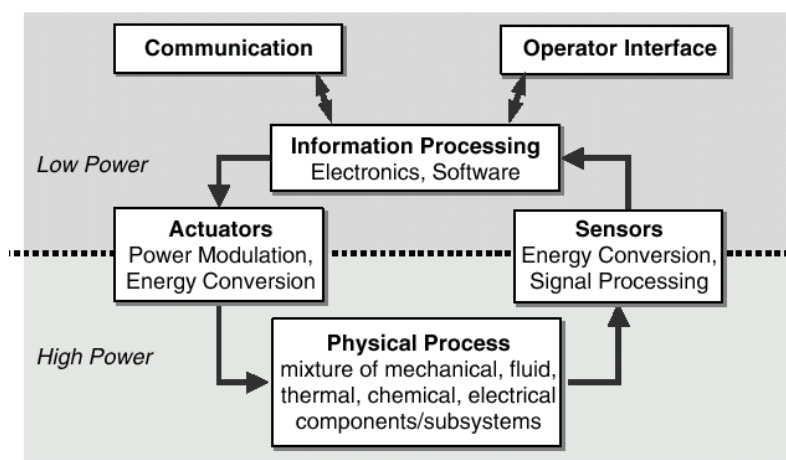


Fig. 6.1 Structura energetica a unui system mecatronic

3. Sisteme microelectromecanice - MEMS

În ultimii ani s-au dezvoltat o serie de sisteme microelectromecanice, denumite generic **MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)**. MEMS-urile sunt fabricate cu tehnologiile specifice circuitelor integrate și cuprind sisteme mai mici de 100 micrometri. Intră în această categorie: microsensori, microactuatori, micromotoare, micropompe, microtrenuri cu roți dințate, micromanipulatoare, etc.

În fig. 7 se prezintă un micromotor fabricat la MIT-UC Berkeley, cu rotorul de 120 micrometri, cu un joc dintre rotor și stator de 2 micrometri, capabil să se rotească până la 2500 rot/min și să dezvolte un cuplu de 12pNm. Rezistența la uzare și frecarea dintre rotor și stator sunt esențiale în asigurarea fiabilității unui asemenea micromotor.

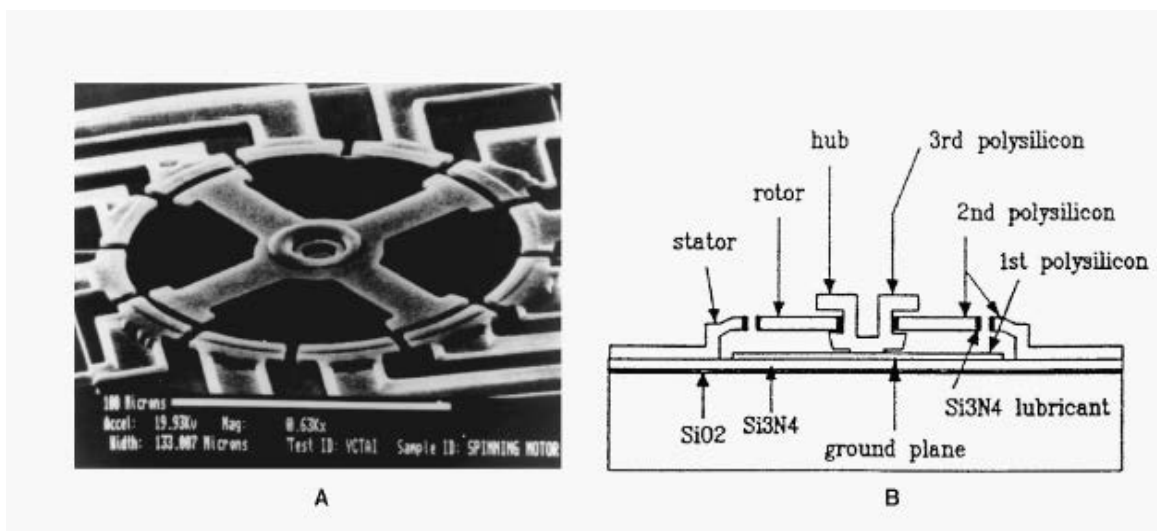


Fig. 7.1 Micromotor

4. Aplicatii ale mecatronicii

Practic tot ceea ce numim produs de înaltă tehnicitate este produs mecatronic. Automobilul modern, roboții, tehnica de calcul, tehnica de telecomunicații, aparatura biomedicală, sistemele de transport inteligent, aparatura de cercetare, aparatura electrocasnică, aparatura cine-foto și audio-video, mașinile agricole moderne etc., sunt exemple reprezentative de produse mecatronice.

Un domeniu spectaculos al aplicațiilor mecatronice îl reprezintă cel al microroboților. Microroboți pășitori, microroboți pentru inspecții în zone greu accesibile, microroboți pentru aplicații militare etc, sunt astăzi într-o continuă cursă de miniaturizare pe plan mondial.

În fig.8 sunt prezentate 4 tipuri de roboți realizați în ultimii ani de către rețeaua de institute Fraunhofer din Germania: roboții SCORPION și GINGIS pentru deplasări autonome pe sol accidentat, în condiții vitrege (similare cu cele de pe Lună sau de pe Marte), microrobotul KURT 2 destinat inspecțiilor la sistemele mecatronice, microrobotul MAKRO destinat inspecției țevelor etc.



Fig. 8.1 Microroboti

Un alt domeniu dezvoltat în ultimii ani îl constituie micromotoarele, microturbinele, micropompele realizate prin tehnologii de microfabricație. O serie de soluții moderne de micropompe, microturbine cu rezemare a microrotorului pe lagăre cu alunecare sau pe pagăre cu microrulmenți sunt prezentate în fig. 9.1, Fig. 10.1, Fig. 11.1.

Scoala de Microtehnologii dezvoltată în ultimul deceniu de profesorul Reza Ghodssi de la Maryland University din SUA este recunoscută prin realizările de microturbine și micromotoare cu rezemare pe microrulmenți cu bile [<http://www.ece.umd.edu/~ghodssi/>].

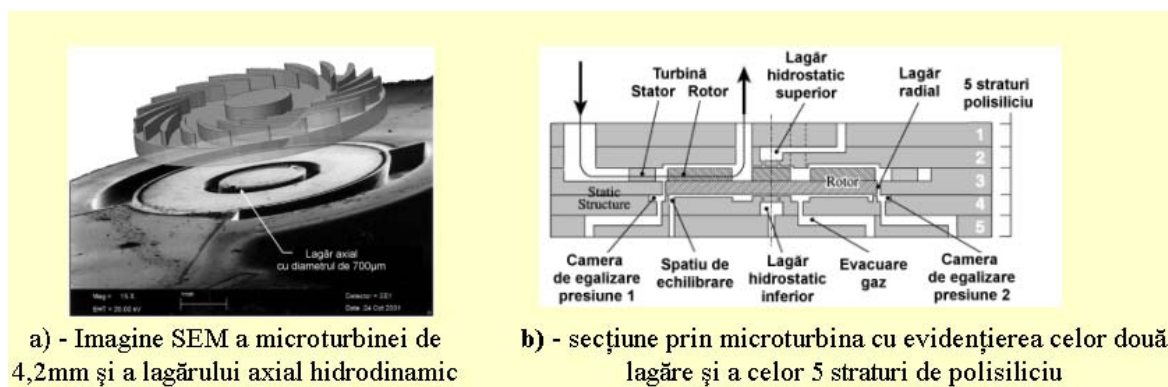


Fig. 9.1 Microturbină cu rezemare pe microlagăre hidrostatice

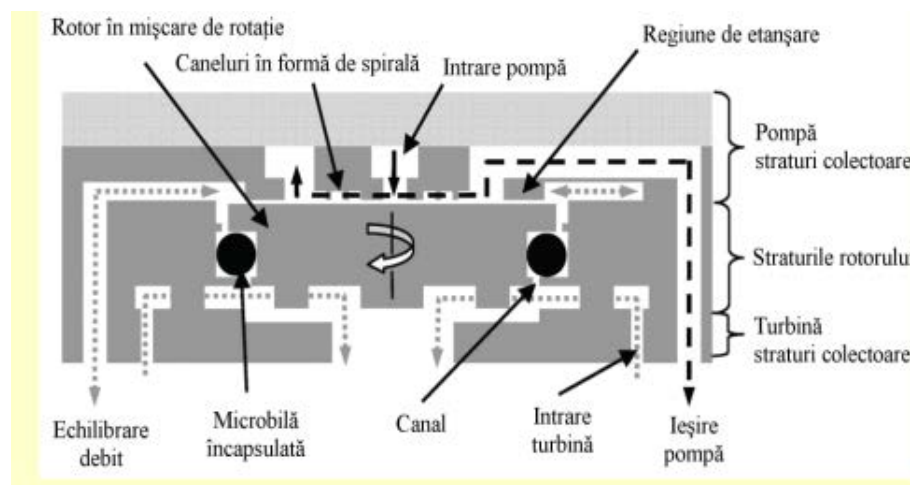


Fig. 10.1 Microturbopompă cu rezemare pe microrulmenți cu bile de diametrul 0.285mm [Waits,2010]

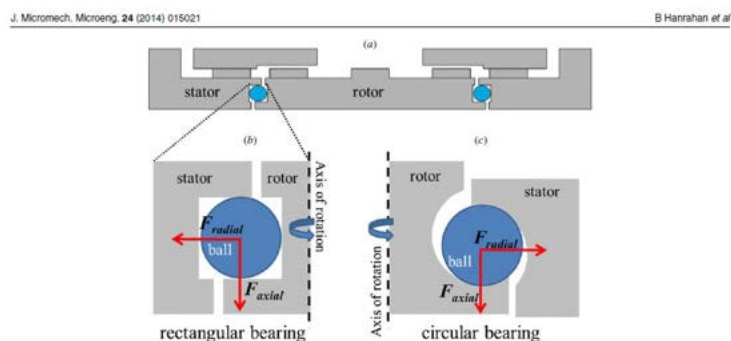


Fig. 11.1 Microturbină cu rezemare pe microrulmenți cu bile de diametrul 0.285mm [Hanrahan,2014]

Capitolul II

CONCEPTUL DE MICROSISTEM

Microsistem: sistem tehnic realizat cu ajutorul microtehnologiilor și care poate îndeplini funcții multiple într-un spațiu redus.

Structura unui microsistem este determinată de funcțiile sale și anume:

- detectarea, prelucrarea și evaluarea semnalelor externe;
- luarea unor decizii pe baza informațiilor receptate;
- transformarea deciziilor în comenzi corespunzătoare pentru actuatori.

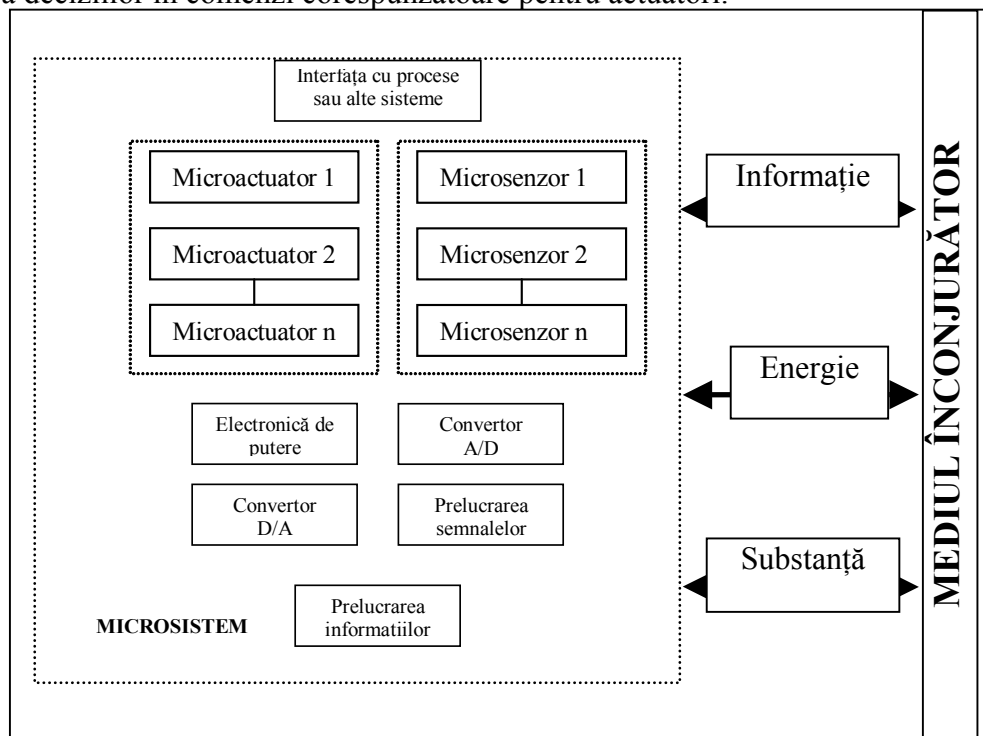


Fig. 1.2 Componentele unui microsistem

Componentele unui microsistem

Senzorii se realizează în prezent pe un substrat, integrați într-o matrice senzorială. În funcție de aplicația acestora, pot utiliza principii mecanice, termice, magnetice, chimice sau biologice.

Actuatorii sunt elemente active ale unui microsistem care permit acestuia să reacționeze la un stimul (de exemplu: micromotoare, micropompe, supape, întrerupătoare, relee). Spre deosebire de miniaturizarea senzorilor care este posibilă în prezent, miniaturizarea actuatorilor este o direcție de cercetare care trebuie să rezolve aspecte multiple privind atât materialele cât și tehnologiile de realizare ale acestora.

Modulul de prelucrare a informațiilor și control al sistemelor are funcții complexe și este limitat din punct de vedere al dimensiunilor și al consumului de putere. Algoritmii de control trebuie adaptați la necesitățile și specificul microsistemelor.

Interfața cu alte procese sau sisteme asigură schimbul de energie, informație și substanță. Se consideră că fezabilitatea și succesul pe piață a viitoarelor microsisiteme depinde de dezvoltarea interfețelor practice micro-macro.

În prezent, se bucură de un mare interes interfața electrică (pentru transmiterea informațiilor și energiei). Sunt studiate diverse posibilități de realizare a interfețelor pe cale optică, termică, acustică etc. Până în prezent, singura metodă utilizată pentru transferul de substanță este cea cu ajutorul unor elemente specifice micro-fluidicii.

Convertoarele A/D și D/A fac deseori parte integrantă din interfața electrică. Ele permit conversia semnalelor analogice date de senzori în semnale ce pot fi prelucrate digital precum și controlul analog al actuatorilor utilizând comenzi digitale generate de microcontroler. În cazul microsisitemelor cu structură descentralizată, echipate cu senzori și actuatori inteligenți (cu propriile microcontrolere), convertoarele A/D și D/A pot fi integrate direct pe chip-urile microsenzorilor sau microactuatorilor.

Componentele pentru *electronica de putere* sunt esențiale pentru orice microsisitem, ele ridicând deseori probleme electromagnetice sau termice de care trebuie să se țină seama în faza de proiectare.

Componentele de prelucrare a informației generează semnale electrice pentru controlul actuatorilor utilizând datele de la senzori: Un ciclu de prelucrare a informațiilor cuprinde: *captarea lor, transformarea, stocarea, evaluarea și generarea de semnale*.

Semnalele de la diferiți senzori sunt digitalizate cu un convertor A/D și amplificate; semnalele prelucrate servesc ca și semnale de control pentru actuatori.

Microsisitemele pot fi auto-monitorizate și testate de propriile unități de control și pot comunica cu alte sisteme și microsisiteme, dacă este necesar.

Modul de prelucrare a informațiilor de către un microsisitem este ilustrat în (Fig.2)

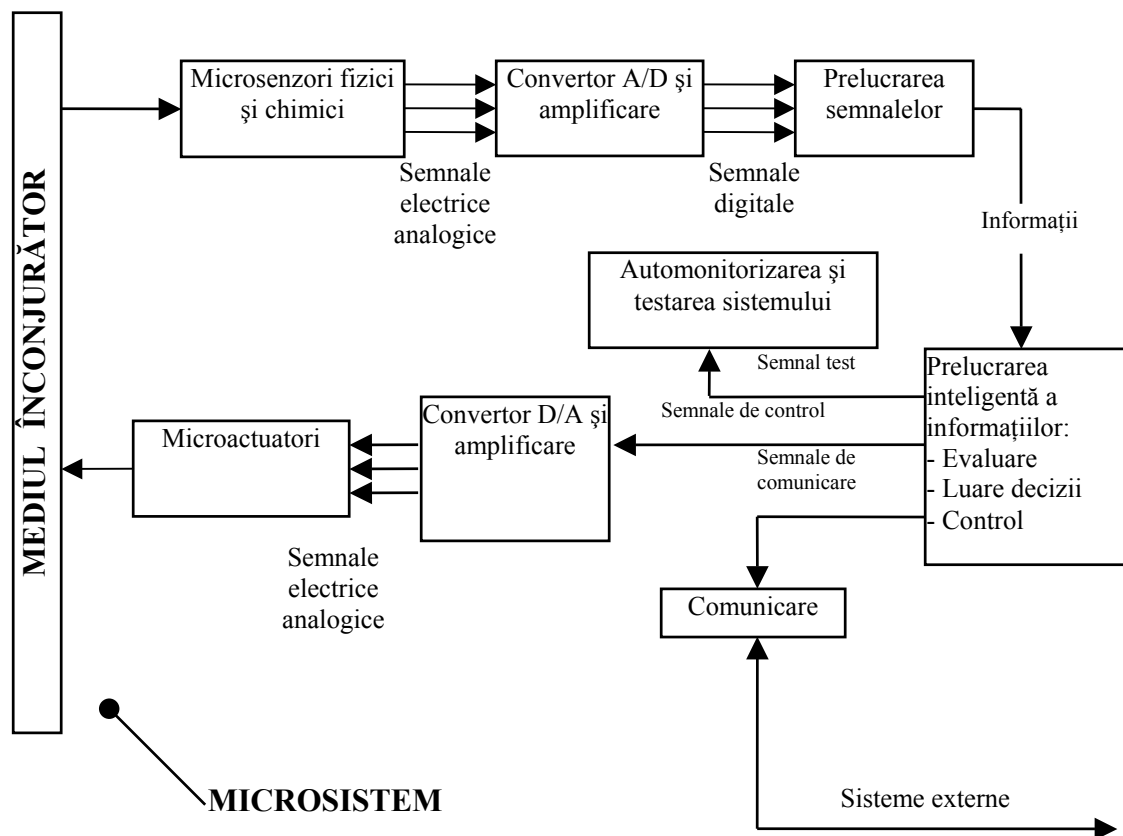


Fig. 2.2 Procesarea semnalului și a informației într-un microsisitem

În tabelul 1.2 se prezintă spectrul microsisitemelor și metodele corespunzătoare de fabricație.

Tabelul 1.2

Tabelul 1.1

10 mm	Metode de observare/măsurare	Elemente componente	Tehnologii de realizare
Milimașini 1 mm	<i>Vizibile cu ochiul liber</i>	Componenete miniaturizate	Prelucrări de precizie
Micromasini 1 μ m	<i>Microscop optic</i>	Micro-componente	Microtehnologii specifice (ex.: LIGA, etc.)
Nanomașini 1 nm	<i>Microscop electronic</i>	Componente moleculare	Ingineria proteinelor. biotehnologie

Această clasificare acoperă o scară dimensională de la 10 mm la câțiva nanometri incluzând toate mecanismele relevante. Cele mai importante aplicații ale *tehnologiei microsistemelor (TMS)* sunt prezentate în (Fig. 3.2).

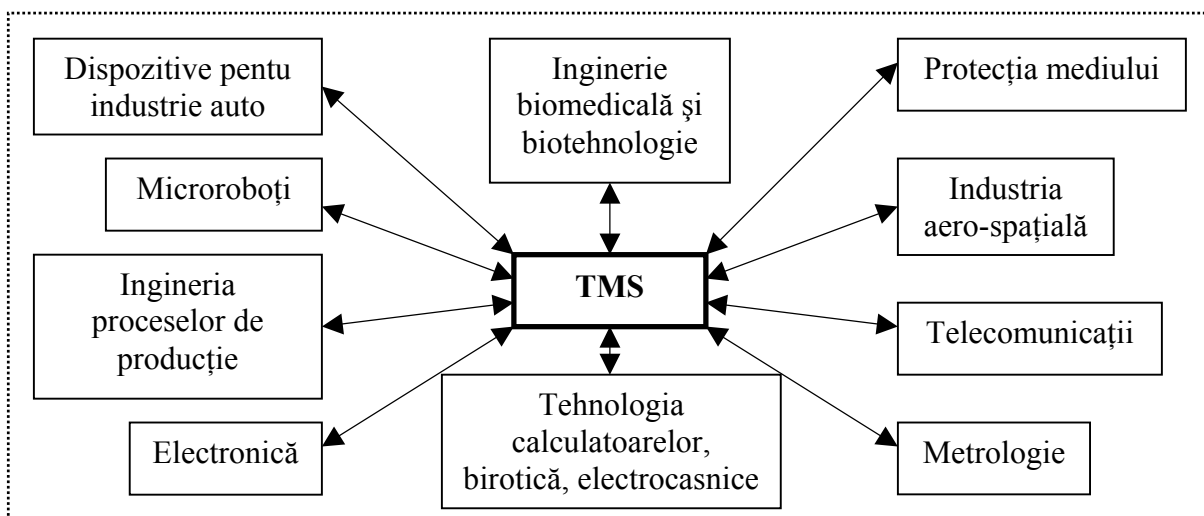


Fig. 3.2 Aplicații ale tehnologiei microsistemelor

TMS reprezintă soluția actuală de rezolvare a multiplelor probleme legate de performanțele deosebite ce se impun componentelor unui sistem: senzori, actuatori, module de prelucrare a informațiilor.

Microroboții sunt reprezentanți importanți ai microsistemelor. Microroboții sunt microsiseme ce au volumul sub 1 cm³. Dimensiunile diferite ale roboților miniaturizați, ale mini și microroboților sunt determinate de aplicațiile lor diferite și implică tehnologii de realizare, metode de măsurare, control și de asamblare diferite. Din punct de vedere tehnologic este dificil de delimitat o tipologie specifică mini și microroboților, totuși se pot identifica *două clase distincte*:

a) *microroboții de tip clasic* la care arhitectura este cea a roboților industriali și manipulatorilor, fiind obținută prin miniaturizarea sau integrarea elementelor componente. Performanțele lor funcționale depind nemijlocit de progresele tehnologice în direcția miniaturizării senzorilor și actuatorilor.

b) *microroboții neconvenționali* ce se bazează pe principii fizice particulare (piezoelectricitate, magnetostricțiune, memoria formei, electroreologie). Aceștia utilizează proprietățile mecanice, electrice sau magnetice ale așa-numitelor materiale "inteligente", ceea ce permite, în final, realizarea unor funcții specifice roboților de tip clasic. Cel mai adesea se obține o mobilitate ce determină deplasarea întregului sistem sau a unei părți a acestuia pe suprafața unui solid, în mediu lichid sau în aer.

Asamblarea microsistemelor, însoțită de transportul nedistructiv, manipularea precisă și poziționarea precisă a microcomponentelor sunt aplicații dintre cele mai importante ale microsistemelor.

Microsistemele electromecanice – MEMS

Sunt sisteme integrate de dimensiuni mici și foarte mici (de la câțiva micrometri până la milimetri) care combină în structura lor elemente electrice și mecanice.

Acronim: MEMS – în SUA; MST (Microsystems technology) – în Europa; Micromachines – în Japonia.

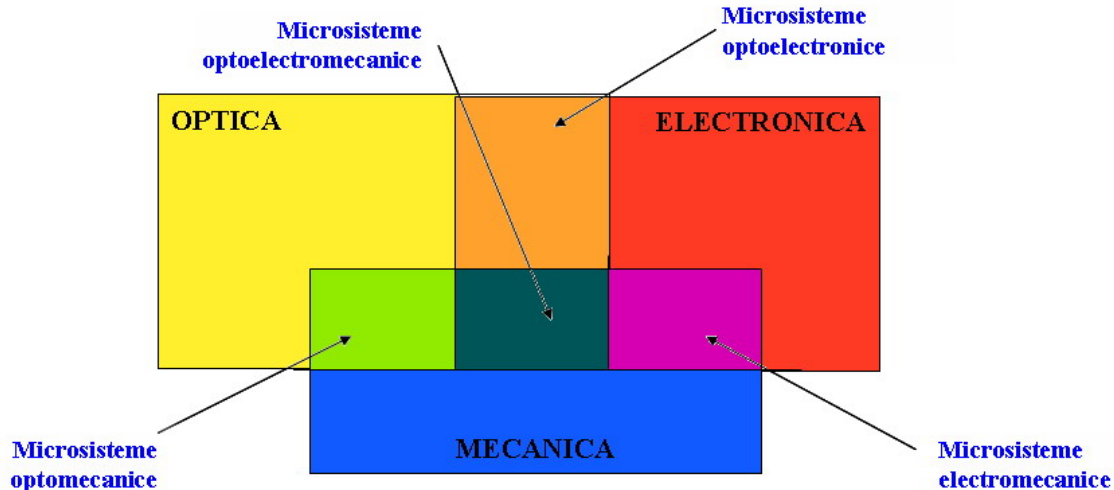
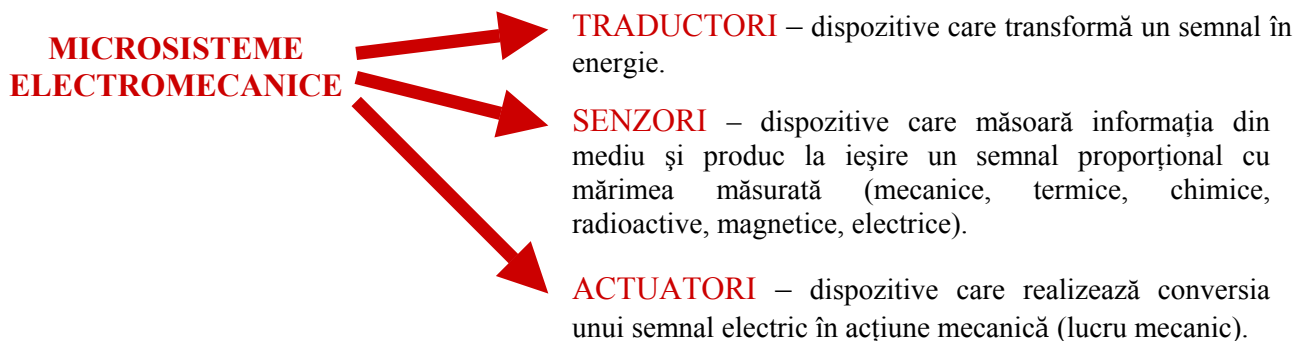


Fig. 4.2 Domenii de interferență

MEMS-urile sunt fabricate utilizând tehnica de realizare a circuitelor integrate combinată cu microprelucrări ale suportului respectiv materialelor utilizate. **În timp ce circuitele integrate sunt proiectate exploatând proprietățile electrice ale siliciului, MEMS-urile utilizează atât proprietățile electrice cât și proprietățile mecanice ale acestuia.**

Într-o formă generală, MEMS-urile constau în microstructuri mecanice, microsenzori, microactuatore și microelectronică, toate integrate pe același cip.

MEMS se constituie ca un mod de proiectare și creare a unor dispozitive mecanice și sisteme complexe integrând electronica aferentă la nivel micro și nano.



Capitolul III

Materiale pentru construcția MEMS - urilor

MEMS-urile sunt microsisteme obținute prin integrarea de elemente mecanice, de senzori, actuatori și componente electronice pe un substrat comun (de regulă o plăcuță de siliciu), prin tehnologii de microfabricație specifice.

Componentele electronice se realizează prin tehnologiile specifice circuitelor integrate în timp ce componentele micromecanice se realizează prin tehnologii de microfabricație constând din succesiuni de operații de corodare, adăugare de straturi, înlăturare de straturi de sacrificiu etc.

Principalele materiale utilizate în realizarea MEMS-urilor și exemple de aplicații sunt prezentate în Tabelul 1.3.

Tabelul 1.3: Tipuri de materiale utilizate în realizarea MEMS

Material	Caracteristici distincte	Exemple de aplicații
Siliciu monocristalin (Si)	Material electronic de înaltă calitate cu anizotropie selectivă	Senzori piezorezistivi
Siliciu policristalin (polisilice)	Filme de sacrificiu utilizate în fabricarea MEMS	Suprafața micromasinelor, Actuatori electrostatici
Dioxid siliciu (SiO ₂)	Suprafețe insulare compatibile cu polisiliciu	Straturi de sacrificiu utilizate la realizarea micromasinelor, straturi de pasivare
Azotati de siliciu (Si ₃ N ₄ , Si _x N _y)	Suprafețe insulare, rezistent chimic, durabilitate mecanică	Straturi de izolație pentru dispozitive electrostatice, straturi de pasivare pentru dispozitive
Germaniu policristalin (poli Ge), Siliciu cu germaniu policristalin (poli Si-Ge)	Depozitat la temperaturi joase	Suprafețe integrate MEMS
Aur (Au), Aluminiu (Al)	Filme fine conductive	Straturi interconectante, straturi de mascare, întrerupătoare mecanice
Nichel –fier (NiFe)	Aliaj magnetic	Actuatori magnetici
Titan-nichel (TiNi)	Aliaj cu memoria formei	Actuatori termici
Carbură de siliciu (SiC) Diamant	Stabilitate electrică și mecanică la temperatură înaltă, inerție chimică	MEMS de înaltă frecvență
Galium arsenid (GaAs), Indium fosfid (InP), Indium arsenid (InAs)	Fante pentru trecerea luminii	Dispozitive optoelectronice
Titanat zirconat (PTZ)	Material piezoelectric	Senzori mecanici și actuatori
Poliamide	Rezistență chimică, polimer cu temperatură înaltă	MEMS flexibile, bioMEMS
Parilen	Polimer biocompatibil, depozitat la temperatura camerei	Straturi de acoperire, structuri polimerice moi

O listă a tuturor materialelor utilizate este dată în Tabelul 2 <http://www.memsnet.org/material/>

Tabelul 2.3.

<ul style="list-style-type: none"> • Aluminum (Al), bulk • Aluminum (Al), film • Aluminum Nitride (AlN), bulk • Aluminum Nitride (AlN), film • Aluminum Oxide (Al₂O₃), bulk • Amorphous Carbon (a-C:H), film • Amorphous Silicon (a-Si), film • Amorphous Silicon Dioxide (a-SiO₂), film • Amorphous hydrogenated silicon (a-Si:H), film • Antimony (Sb), bulk • Arsenic (As), bulk • Barium Titanate (BaTiO₃), bulk • Beryllium Oxide (BeO), bulk • Bismuth (Bi), bulk • Boron (B), bulk • Boron Carbide (B₄C), bulk • Boron Nitride (BN), bulk • Boron Nitride (BN), film • Cadmium (Cd), bulk • Carbon (C), bulk • Carbon Nitride (CN_x), film • Chromium (Cr), bulk • Chromium (Cr), film • Chromium Boride (CrB₂), bulk • Chromium Carbide (Cr₃C₂), bulk • Chromium Nitride, film • Chromium Oxide (Cr₂O₃), bulk • Cobalt (Co), bulk • Copper (Cu), bulk • Copper (Cu), film • Copper-Molybdenum (Cu-Mo), film • Diamond (C), bulk • Diamond (C), film • Diamond-like carbon (DLC), film • Fullerite (C₆₀), film • Fullerite (C₇₀), film • Gallium (Ga), bulk • Gallium Arsenide (GaAs), bulk • Germanium (Ge), bulk • Glass (SiO₂), bulk • Glass7059, film • Gold (Au), bulk • Gold (Au), film • Graphite (C), bulk • Indium (In), bulk 	<ul style="list-style-type: none"> • Molybdenum Silicide (MoSi₂) • Molybdenum Silicide (MoSi₂), bulk • Molybdenum Silicide (MoSi₂), film • Mullite (3Al₂O₃ 2SiO₂), bulk • Nickel (Ni), bulk • Nickel (Ni), film • Niobium Oxide (Nb₂O₅), film • Nitride coatings, film • Oxide induced layer in polysilicon, film • PI 2611D (Dupont polyimide), film • PVDF-TrFE (Copolymer of vinylidene fluoride&trifluoroethylene), film • Palladium (Pd), bulk • Phosphor bronze metal, bulk • Phosphorus (P), bulk • Piezoelectric sheet element • Piezoresistors (diffused) • Plastic, bulk • Platinum (Pt), bulk • Platinum (Pt), film • Poly Vinylidene Flouride (PVDF), film • Polyimide Hinges • Polyimide, film • Polysilicon, bulk • Polysilicon, film • Porosilicon (Si), film • Sapphire (1012), bulk • Silicon (Si), bulk • Silicon (Si), film • Silicon (Si), membrane • Silicon Carbide (SiC), • Silicon Carbide (SiC), bulk • Silicon Carbide (SiC), film • Silicon Dioxide (SiO₂) • Silicon Dioxide (SiO₂), bulk • Silicon Dioxide (SiO₂), film • Silicon Nitride (Si₃N₄), • Silicon Nitride (Si₃N₄), bulk • Silicon Nitride (Si₃N₄), film • Silicon Nitride (SiN), film • Silicon Nitride (SiN_x), film • Silicon Nitride (Si_xN_y), film • Silicon Nitride Hydrogen (SiN_xH_y), film • Silicon Oxide (SiO_x), film • Silicon whiskers (Si) • Sillimanite (Al₂O₃ SiO₂), bulk
---	--

<ul style="list-style-type: none"> • Iron (Fe), bulk • LTO (planarizing low temperature oxide), film • Lead (Pb), bulk • Lead Zirconate Titanate (PZT) • Lead Zirconate Titanate (PZT), bulk • Lead Zirconate Titanate (PZT), film • Lithium (Li), bulk • Magnesium (Mg), bulk • Molybdenum (Mo), bulk • Molybdenum (Mo), film • Titanium (Ti), film • Titanium Aluminum (Ti3Al), bulk • Titanium Aluminum (TiAl), bulk • Titanium Aluminum (TiAl), film • Titanium Boride (TiB2), bulk • Titanium Carbide (TiC), Bulk • Titanium Carbide (TiC), film • Titanium Carbide (TiCz), film • Titanium Nickel (NiTi), fiber • Titanium Nitride (TiN), bulk • Titanium Nitride (TiN), film • Titanium Nitride (TiNx), film • Titanium Oxide (TiO2), bulk • Titanium Oxide (TiO2), film 	<ul style="list-style-type: none"> • Silver (Ag), bulk • Sodium Silicate (Na2O:SiO2 ~ 1:3), film • Stainless steel, bulk • Stainless steel, film • Tantalum (Ta), bulk • Tellurium (Te), bulk • Thallium (Tl), bulk • Tin (Sn), bulk • Titanium (Ti), bulk • Tool steel • Tungsten (W), bulk • Tungsten (W), film • Tungsten Carbide (WC), bulk • Tungsten Silicide (WSi2), bulk • Zinc (Zn), bulk • Zinc Oxide (ZnO), bulk • Zinc Oxide (ZnO), film • Zircon (SiO2 ZrO2), • Zircon (SiO2 ZrO2), bulk • Zirconium Oxide (ZrO2), • Zirconium Oxide (ZrO2), film
---	---

Materialele utilizate în fabricația MEMS-urilor sunt de două feluri:

- **Materiale utilizate ca substrat**
- **Materiale de depunere**

A. Materiale utilizate ca substrat in fabricatia MEMS-urilor

Materialul de baza utilizat ca substrat este Siliciu (Silicon în Lb. Engleză). Prezinta urmatoarele avantaje:

- larg raspandit in fabricatia IC (circuitelor integrate);
- bine studiat si exista posibilitatea de a i se controla proprietatile electrice;
- este economic de produs in forma cristalina;
- are proprietati mecanice foarte bune (sub forma de cristal este elastic ca oțelul si mai usor decat aluminiu).

Siliciul utilizat in constructia MEMS-urilor se prezinta sub 3 forme:

- **Siliciu cristalin,**
- **Siliciu amorf**
- **Siliciu policristalin.**

Siliciu sub forma cristalina de inalta puritate se fabrica sub forma de placute circulare cu diametrul de 100, 150, 200 si 300 mm si cu grosimi diferite.

Siliciu sub forma amorfa nu are structura regulata cristalina si contine numeroase defecte. Impreuna cu siliciul policristalin se poate depune in straturi subtiri de pana la 5 micrometri.

Siliciu sub forma cristalina are urmatoarele caracteristici fizice:

- limita de curgere = $7 \times 10^9 \text{ N/m}^2$;
- modulul de elasticitate $E = 1.6 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$

- densitatea = 2,33 g/cm³
- temperatura de topire = 1410°C.

Exista si alte materiale care se utilizeaza ca substrat in constructia MEMS-urilor: quartz, sticla, materiale ceramice, materiale plastice, polimeri, metale.

Quartzul se utilizeaza in constructia MEMS-urilor, in primul rand datorita efectului piezoelectric pe care-l posedă. Este un mineral natural dar, de regula, se utilizeaza quartzul produs sintetic. Quartzul are urmatoarele caracteristici principale:

- modulul de elasticitate $E = 1.07 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
- densitatea = 2,65 g/cm³

B. Materiale de depunere utilizate in constructia MEMS-urilor

Exista mai multe tipuri de materiale care se depun sub forma de straturi pe plăcuțele de siliciu:

- siliciu policristalin, siliciu amorf, biooxid de siliciu (SiO_2), nitrura de siliciu (Si_3N_4), oxinitrura de siliciu (SiON);
- metale (Cu, W, Al, Ti, Au, Ni), compusi metalici (TiN , ZnO) sau aliaje (TiNi);
- materiale ceramice (alumina);
- polimeri.

Se prezintă mai jos particularitățile principalelor materiale utilizate ca substrat și ca strat de depunere

1. Siliciul

Siliciul se utilizeaza la fabricarea microsensurilor inca din anul 1950. Atunci s-a descoperit ca Si are coeficienti piezorezistivi foarte inalti fata de cei ai traductoarelor tensometrice metalice ceea ce-l face primul material din categoria celor utilizate la fabricarea MEMS-urilor.

1.1 Siliciul monocristalin

In constructia MEMS-urilor siliciul monocristalin are functii cheie fiind unul dintre cele mai versatile materiale combinand anizotropia cu bune caracteristici mecanice. Avind un modul al lui Young de 190GPa siliciul monocristalin se compara din punct de vedere mecanic cu otelul care are un modul al lui Young de 210GPa. Proprietatile mecanice favorabile au facut siliciul monocristalin utilizabil ca material pentru membrane, lamele si alte structuri. Siliciul monocristalin este utilizat in primul rind la fabricarea structurilor mecanice.

1.2 Siliciu policristalin

Pentru MEMS- uri si circuite integrate (IC) filmele din siliciu policristalin sunt depuse utilizind un proces cunoscut ca depunere chimica de vapori la presiune joasa (LPCVD = low-pressure chemical vapor depositon). Procesul are loc intr-un interval de temperatura cuprins intre 580°C si 650° si o presiune de 100 pina la 400 mtorr. Atmosfera gazoasa cea mai utilizate este gazul silan (SiH_4). Filmele fine de siliciu policristalin constau intr-o colectie de mici monocristale a caror microstructura si orientare depind de conditiile modului de depunere. Pentru un proces tipic LPCVD temperatura de tranzitie de la starea amorfă la cea cristalina este de 570°C, cu depunerea stratului amorf in jurul temperaturii de tranzitie. La 600°C, grauntii cristalini sunt mici si egali pe cind la 625°C grauntii sunt mari si alungiti. Rezistivitatea siliciului policristalin poate fi modificata prin saturare si se practica in general la filmele subtiri folosind fosforul ca saturant la saturarea componentelor MEMS din siliciu policristalin deoarece acesta are o mare viteza de difuzie. Difuzibilitatea in filmele subtiri este de $1 \times 10^{12} \text{ cm}^2/\text{s}$.

Conductivitatea termica este o alta caracteristica importanta a siliciului policristalin si depinde de conditiile de depunere. Pentru filmele cu granulatie fină conductivitatea termica este de 25% din cea a siliciului monocristalin iar pentru filmele cu granulatie mare conductivitatea termica este de 50% sau 85%

din valoarea celei specifice siliciului monocristalin. Ca și proprietățile termice și cele electrice ale siliciului policristalin și tensiunile reziduale înmagazinate în filmele de siliciu policristalin depind de condițiile de depunere ale filmelor. Pentru filmele depuse în condiții tipice (200 mtorr, 625°) tensiunea reziduală este nesemnificativă, tensiuni reziduale mari întâlnindu-se în filmele amorfe și cele de siliciu cu structura alungită a graunților.

1.3 Siliciul poros

Siliciul poros este produs la temperatura camerei prin gravare electrochimică a Si în acid hidrofluoric (HF). Dacă este configurat sub forma unui electrod într-un circuit electrochimic bazat pe (HF), sarcinile pozitive de la suprafața Si facilitează schimbul atomilor de fluor cu atomii de hidrogen de la marginile suprafeței de Si. Calitatea suprafeței este dată de densitatea porozității de la suprafața, care este controlată prin aplicarea unei densități de curent. Pentru densități de curent înalte, densitatea porozității este înaltă iar suprafața gravată va fi netedă. Pentru densități de curent mai mici, densitatea porozității este scăzută și concentrează numeroase defecte de suprafața în anumite regiuni. Defectele de suprafața debutează prin mărirea gravurii ce guvernează procesul de producere a porozității. Mărirea porilor și densitatea sunt relative în funcție de tipul de Si folosit și de condițiile electrochimice. Ambele tipuri de siliciu atât cel monocristalin cât și cel policristalin pot fi transformate în siliciu poros.

Creșterea suprafeței de schimb a siliciului poros îl face un material atractiv pentru aplicații de tipul celor lichide sau gazoase, incluzând membranele de filtrare și straturile de absorbție chimică, cînd este folosit siliciul monocristalin ca substrat.

1.4 Dioxidul de siliciu

Dioxidul de siliciu (SiO_2) este unul dintre cele mai utilizate materiale pentru realizarea MEMS-urilor. În acoperirile de suprafața a micromasinelor, SiO_2 este utilizat ca material de sacrificiu, deoarece este ușor de dizolvat pentru a fi înlăturat fără ca dizolvantul să atace polisiliciul din strat. Dioxidul de siliciu mai poate fi utilizat și ca strat mască pentru filmele subțiri din polisiliciu, deoarece este rezistent chimic sau ca strat de pasivare pe suprafețele dispozitivelor de mediu foarte sensibile.

Cel mai utilizat procedeu de obținere a straturilor subțiri de dioxid de siliciu este oxidarea termică și LPCVD. Oxidarea termică a Si este realizată la temperatura de 900°C-1,200°C în prezența oxigenului pur. Chiar dacă oxidarea termică este un proces limitat termic, grosimea maximă a filmului ce poate fi obținută este de 2 μm, grosime ce este suficientă pentru numeroase aplicații. Oxidarea termică a siliciului poate fi realizată numai pe substrat de siliciu. Filmele din dioxid de siliciu pot fi depozitate pe o mare varietate de materiale ca substrat prin procesul LPCVD. În general, prin LPCVD se obțin straturi de o grosime > 2 μm la temperatura mult mai scăzută decât cea termică. Cunoscute ca și oxidări la temperatura joasă, aceste filme sunt utilizate ca straturi de sacrificiu.

1.5 Nitrura de Si (Si_3N_4)

Nitrura de Si este utilizată în MEMS-uri ca material pentru izolații electrice, pasivarea suprafețelor, suprafețe de mascare și ca material mecanic. Două metode de depunere sunt cunoscute pentru nitrura de Si la depunerea în straturi subțiri: LPCVD și respectiv PECVD. Utilizarea procedurii PECVD în aplicațiile straturilor pe micromasini este limitată de conținutul crescut în fluorohidrați dar este un procedeu în urma căruia se obțin filme de siliciu cu proprietăți atractive pentru încapsulare. Materialul obținut prin procedeul LPCVD este foarte rezistent la atacul chimic și ca urmare este foarte utilizat la realizarea straturilor de suprafața ale micromasinelor. Nitrura de siliciu obținută prin LPCVD este utilizată sub forma insulară deoarece are o rezistivitate de $10^6 \Omega \times \text{cm}$. Depunerea se realizează în mod tipic la temperaturi și presiuni cuprinse între 700°C-900°C și 200 mtorr-500 mtorr. Sursele de gaz sunt diclorosiliciul (SiH_2Cl_2) și amoniacul (NH_3). Microstructura filmului astfel produs este amorfă. Datorită acestor proprietăți filmele de Si_3N_4 au fost utilizate ca structuri mecanice de suport sau ca straturi insulare pentru senzorii de presiune piezoelectrice.

2. Materiale bazate pe germaniu

Ca si siliciu, germaniu este un material utilizat la realizarea materialelor semiconductoare iar studii recente il considera materialul ideal pentru realizarea tranzistoarelor si semiconductoarelor. Exista un interes crescut pentru utilizarea Ge la realizarea dispozitivelor micromasinelor datorita temperaturii scazute de depunere a materialului pe suprafetele realizate.

2.1 Germaniul policristalin

Filmele fine de Ge policristalin pot fi depuse prin LPCVD la temperatura mai mica de 325°C pe substrat Si, Ge si pe SiO₂. Filmele de Ge pot fi folosite ca si straturi de sacrificiu. Tensiunea reziduală acumulată in filmele formate poate fi redusă la aproape zero dupa o usoara calire la temperaturi modeste de (30-600°C). Ge policristalin este impermeabil la KHO si de aceea este utilizat la realizarea membranelor de Ge pe substrat de Si. Proprietatile mecanice ale G policristalin sunt comparabile cu cele ale polisiliciului avind un modul de elasticitate de 132 GPa iar rezistenta la rupere este cuprinsa intre 1,5 GPa si 3 GPa. Ge policristalin poate fi utilizat ca strat de sacrificiu pe suprafate de polisiliciu la realizarea straturilor de acoperire micromasini. Utilizind acest procedeu, dispozitive ca termistori bazati pe Ge policristalin si senzori cu membrane de presiune pe baza de Si₃N₄ folosesc drept straturi de sacrificiu i timpul fabricarii Ge policristalin.

2.2 SiGe policristalin

La fel ca si Ge policristalin, SiGe policristalin este un material care poate fi depus la temperaturi mai scazute ca cele ale siliciului. Procedeu de depunere se face prin metodele LPCVD, APCVD si RTCVD (rapid thermal CVD) utilizind ca gaze precursori Si H₄ si GeH₄. Temperatura de depunere este cuprinsa in intervalul 450°C pentru LPCVD si 625°C RTCVD. In general temperatura de depunere depinde de concentratia Ge in filmul respectiv, cu cit concentratia Ge este mai crescuta cu atit temperatura de depunere este mai scazuta. Ca si polisiliciul, poli-SiGe poate fi saturat cu bor si fosfor pentru modificarea conductivitatii. In situ suprasaturarea cu bor poate fi realizata la temperaturi mai mici de 450°C ceea ce demonstreaza ca temperatura de depunere a filmelor conductive saturate cu bor poate fi redusa la 400°C daca continutul de Ge este mentinut la o concentratie de 70%. Pentru filmele imbogatite cu Ge se foloseste un strat fin de polisiliciu sau uneori SiO₂. Ca si majoritatea materialelor compuse, variatia compozitiei filmelor poate schimba proprietatile fizice ale materialului. De exemplu gravarea Poli-SiGe pe H₂O₂ la concentratii ale Ge de peste 70% face ca proprietati cum sunt microstructura, tensiunile remanente, conductivitatea filmului si gradientul tensiunilor remanente sa depinda in mod direct de concentratia Ge in materialul dat. In ce priveste tensiunea remanenta in situ s-au produs filme saturate cu bor al caror tensiune remanenta este mai mica de 10MPa. La realizarea MEMS-urilor Poli SiGe este utilizat la realizarea starturilor de acoperire ale componentelor MEMS avind ca strat de sacrificiu Ge policristalin. Un avantaj al acestei tehnici este acela ca stratul de acoperire este depus direct pe structura de interes ceea ce reduce aparitia capacităților parazite si rezistenței de contact caracteristice.

3. Metale

Dintre toate materialele asociate cu realizarea MEMS metalele sunt cel mai utilizate. Filmele fine metalice sunt utilizate in medii cu capacitati diferite pentru confectionarea mastilor microsenzorilor si microactuatorilor. Filmele metalice pot fi depuse utilizind o multime de tehnici cum sunt: evaporarea, pulverizarea, CVD, si electroacoperiri. Metalele cel mai utilizate in microfabricatele electronice sunt Au si Al si de regula sunt utilizate la realizarea conectorilor. Un exemplu in acest sens il reprezinta utilizarea Au la realizarea intrerupatoarelor micromecanice. Aceste intrerupatoare sunt construite folosind un strat de sacrificiu din dioxid de siliciu. Straturile din nitru de siliciu si dioxidul de siliciu sunt depuse prin metoda PECVD iar Au este depus prin electrodepunere dintr-o solutie de sulfat de sodiu. Un multistrat din Ti si Au este pulverizat inainte de a fi electrodepus. Structurile tristrat sunt alese pentru a minimiza

efectele daunatoare ale gradientilor de temperatura si tensiune din timpul proceselor de realizare ale componentelor microelectronice.

Un alt metal utilizat la realizarea MEMS este Al, de exemplu la fabricarea microintrerupatoarelor pe baza de Al. Aceste intrerupatoare utilizeaza diferentele dintre tensiunile remanente din filmele fine de Al si Cr pentru a crea o consola comutatoare ce capitalizeaza aceste diferente de tensiune din materiale. Fiecare intrerupator este alcatuit din o serie de console bimorfe astfel incit structura rezultata sa se plieze mult peste planul real generind diferentele de tensiune in structura bimorfa. Intrerupatoarele de acest gen sunt in general lente 10 ms, dar voltajul de activare de numai 26V poate determina inchiderea acestora.

Alt material utilizat in realizarea MEMS este aliajul metalic cu memoria formei utilizat la realizarea microactuatorilor. Aceasta proprietate de momorare a formei rezulta din transformarea reversibila a martensitei ductile intr-o faza austenitica utilizata in aplicatia data. Acest efect reversibil este utilizat ca mecanism acuator, fara ca materialul sa sufere modificari in timpul tranzitiei. La impulsuri rezonabile pot fi obtinute forte si tensiuni inalte in aceste metale cu memoria formei ceea ce face ca actuatorii cu memoria formei sa fie utilizati in MEMS-uri bazate pe microdispozitive microfluidice ca microvalvele sau micropompele. Cel mai popular aliaj cu memoria formei este **Ti Ni sau nitinolul** care lucreaza la o densitate de 50 MJ/m^3 si o banda de frecventa de 0,1 kHz. Si acest tip de material este utilizat in realizarea microvalvelor.

CAPITOLUL IV

Tehnologii de fabricatie pentru MEMS-uri

În proiectarea și realizarea MEMS-urilor trebuie avute în vedere următoarele:

- Frecările sunt mai mari decât forțele inerțiale; forțele capilare, electrostatice și atomice la nivel micro sunt semnificative.
- Căldura dezvoltată în astfel de sisteme are valori relativ ridicate, ceea ce poate pune probleme în ceea ce privește transportul și disiparea căldurii.
- Pentru microsistemele hidraulice, spațiile mici de lucru și transport ale fluidului sunt predispuse la blocaje, dar în același timp pot regulariza curgerea fluidului.
- Proprietățile de material (modulul Young, coeficientul Poisson etc) și teoria mecanicii la nivel micro.
- Utilizarea MEMS-urilor pe structura unui circuit integrat este complexă și specifică fiecărui microsistem în parte.
- Realizarea și testarea MEMS-urilor nu este ușoară; anumiți microsenzori necesită contactul direct cu mediul, ceea ce presupune asigurarea protecției acestora la perturbații exterioare, iar testarea este mai costisitoare decât în cazul circuitelor integrate clasice.

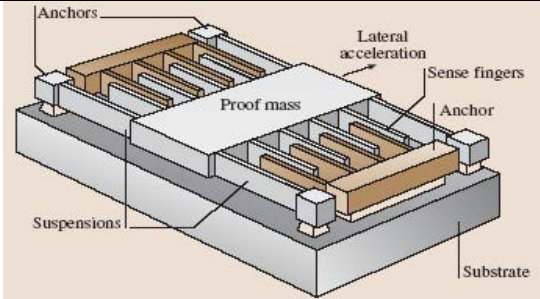
Fabricatia structurilor de tip MEMS este similara cu fabricatia conventionala a microcircuitelor integrate la care se adauga o serie de tehnologii specifice. Astfel, structurile MEMS sunt, în general structuri multistrat realizate prin succesiuni de procedee de depunere pe o structură de bază și de corodare cu diverse tehnologii, tehnologii numite generic „**micromachining**”.

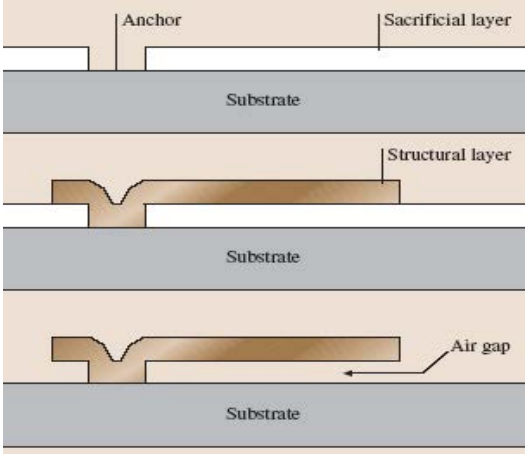
Există două mari categorii de tehnologii de prelucrare: **Surface micromachining** și **Bulk micromachining**.

1. Surface micromachining – presupune prelucrarea la nivelul straturilor depuse și se bazează pe procese de corodare a acestor straturi numite straturi de sacrificiu, realizându-se astfel structuri mecanice **suspendate** (de tip lamele, bride – întâlnite la microsenzori) sau **mobile** (roți, discuri, balamale etc) întâlnite la micromotoare, microactuatori etc.

În Tabelul 1.4 sunt prezentate câteva tipuri de MEMS-uri realizate prin aceste tehnologii:

Tabelul 1.4

	<p>A vertical mirror erected on an rotary indexing stage. The vertical mirror is held in place via hinges and snap springs</p>
	<p>Torsional Ratcheting Actuator. A high torque rotary electrostatic actuator</p>
	<p>Indexing Motor - 2nd View The indexing teeth on both sides of the gear are clearly visible. These teeth are key to the gear indexing forward one unit at a time.</p>
	<p>Accelerometru capacitiv</p>

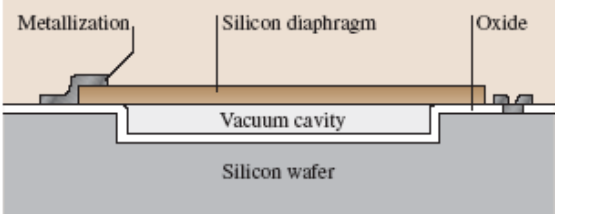
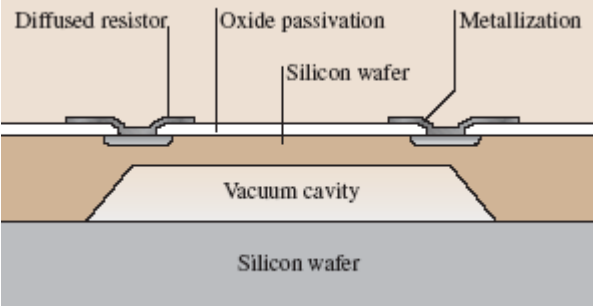
	<p>Schema simplificata a fabricarii MEMS-urilor tehnologia Surface micromachining</p>
---	--

2. Bulk micromachining – Prelucrare în interiorul materialului – în volum.

Aceste tehnologii presupun prelucrarea prin corodare a structurii de bază realizându-se structuri mecanice suspendate peste structura de bază.

În tabelul 2.4 sunt prezentate unele tipuri de MEMS-uri fabricate prin aceste tehnologii.

Tabelul 2.4

	<p>Senzor capacitiv de presiune</p>
	<p>Senzor de presiune piezorezistiv</p>

Ambele tehnologii de prelucrare au la bază trei procedee distincte:

- A. Depunerea de straturi,**
- B. Litografia**
- C. Corodarea.**

DEPUNEREA DE STRATURI SUBTIRI

Exista doua grupe de tehnologii de depunere:

- A1. **Depuneri care au la baza reactii chimice ;**
- A2. **Depuneri care se bazeaza pe procedee fizice.**

A.1 Depuneri bazate pe reactii chimice

Se utilizeaza urmatoarele tipuri de depunere:

- Chemical Vapor Deposition (CVD)
- Epitaxy
- Electrodeposition
- Thermal oxidation

Aceste procedee se bazeaza pe formarea unor straturi solide direct prin reactii chimice intr-un mediu gazos sau intr-un mediu lichid. Straturile astfel formate (cu grosimi de cativa nanometri pana la 0,1 mm) pot constitui elemente solide in structurile MEMS sau pot fi depozitate pe substrat de siliciu.

A.2 Depuneri bazate pe procedee fizice:

- Physical Vapor Deposition (PVD)
- Casting

In aceste cazuri straturile depuse nu formeaza reactii chimice cu materialul de substrat.

A.1.1 Chemical Vapor Deposition (CVD)

Placutele care realizeaza substratul sunt introduse intr-un reactor care este alimentat cu mai multe gaze. Principiul de baza consta in dezvoltarea de reactii chimice intre gazele introduse si condensarea produselor de reactie pe suprafetele placutelor din reactor.

Se utilizeaza 3 tehnologii CVD pentru MEMS:

- Low Pressure CVD (LPCVD);
- Plasma Enhanced CVD (PECVD);
- Atmospheric Pressure CVD (APCVD)

Metoda LPCVD produce straturi uniforme dar necesita temperaturi ridicate, de peste 600°C iar viteza de depunere este relativ mica.

Metoda PECVD necesita temperaturi scazute (pana la 300°C) ca urmare a aportului de energie dat de plasma introdusa in reactor.

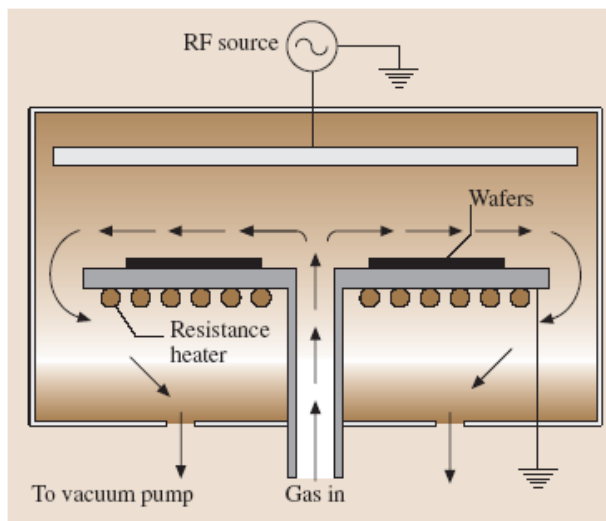


Fig. 1.4: Schema de principiu pentru procedeul PECVD

Tehnologiile CVD se utilizeaza pentru depunerea straturilor de siliciu amorf si siliciu policristalin folosind silanul ca gaz de baza. Pentru obtinerea de impuritati in stratul depus se adauga si alte gaze. Functie de gazele utilizate si de temperatura la care se face depunerea pot apare tensiuni reziduale de intindere sau de compresiune in straturile depuse. **Utilizand depuneri succesive de siliciu amorf si siliciu cristalin in grosimi diferite se poate controla starea de tensiuni in straturile depuse.** Se depun prin tehnologiile CVD si straturile de nitrura de siliciu (Si_3N_4) sau de bioxid de siliciu (SiO_2). La aceste depuneri pot apare tensiuni in straturi de pana la 1 GPa in cazul Si_3N_4 si de pana la 0,3 GPa in cazul SiO_2 .

A. 1.2 Epitaxy

Tehnologia **epitaxy** presupune depunerea unui strat cu **mentinerea orientarii cristalografice** a substratului pe care s-a facut depunerea. Daca se utilizeaza ca substrat siliciu amorf sau policristalin stratul depus prin tehnologia **epitaxy** va avea o structura amorfa sau, respectiv, policristalina.

Cea mai raspandita este tehnologia **Vapor Phase Epitaxy (VPE)** care presupune introducerea unor gaze intr-un reactor cu incalzire prin inductie in care sunt incalzite numai placutele pe care urmeaza sa se depuna.

Prin aceasta tehnologie se pot depune straturi ce pot depasi 100 μm . Tehnologia se utilizeaza pentru realizarea straturilor de siliciu cu grosimi cuprinse intre 1 micron si 100 micrometri. Schema de principiu este data in fig. 2.4.

Fig. 2.4: Schema de principiu pentru tehnologia VPE.

A. 1.3 Electrodeposition – electroplating

Procedeul se aplica doar la materialele bune conductoare de electricitate. Procedeul se bazeaza pe formarea si depunerea de straturi ca urmare a unor procese chimice ce au loc in solutia lichida (electrolit) sub influenta potentialului electric dintre suprafata de depunere si electrod.

Procedeul se utilizeaza pentru depuneri de straturi de metal (Cu, Au sau Ni) cu grosimi cuprinse intre 1 si 100 micrometri. Schema de principiu este prezentata in fig. 3.4.

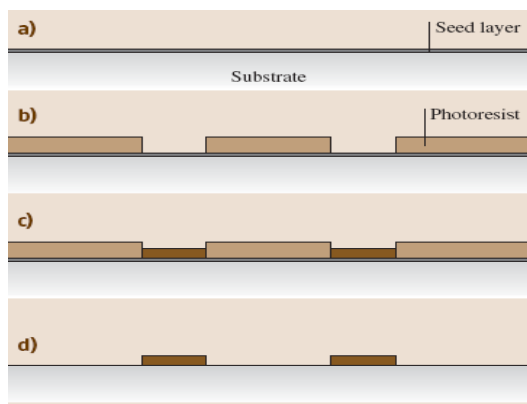


Fig. 3.4: Formarea de structuri metalice prin electrodeposition si schema de principiu pentru procedeul *Electrodeposition*.

A. 1.4 Oxidarea termica

Este o tehnologie de baza care consta in simpla oxidare a substratului intr-un mediu bogat in oxigen si la temperaturi de 800°C - 1100°C . Procesul de oxidare si depunere a stratului de oxid se face prin consumarea substratului (de exemplu, pentru 1 micron de strat de SiO_2 format si depus se consuma 0,45 microni de siliciu din substrat). Pe masura ce stratul de oxid creste, procesul de oxidare devine mai lent. Prin acest procedeu se obtin straturile de SiO_2 . Sxhema de principiu este prezentata in fig. 4.

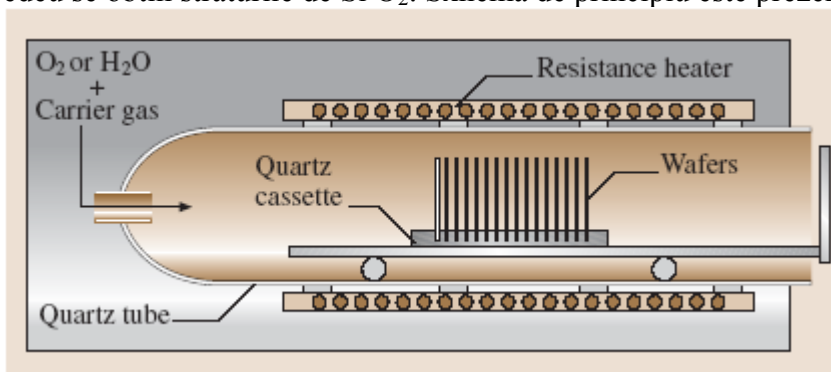


Fig. 4.4: Schema de principiu pentru oxidarea termica.

A. 2.1 Physical Vapor Deposition (PVD)

Tehnologiile de depuneri de straturi de tip PVD presupun transferul de material dintr-o sursa si depozitarea lui pe un substrat. Calitativ, straturile depuse prin tehnologia PVD sunt inferioare celor depuse prin CVD (astfel pentru metale depuse rezistenta electrica creste iar la straturile depuse cu rol de izolator electric creste numarul de defecte din strat). Sunt doua tehnologii mai importante: **evaporation** si **sputtering**.

a) Evaporation

Substratul pe care se face depunerea precum si materialul din care se realizeaza stratul de depunere sunt plasate in interiorul unei incinte vidate. Materialul de depunere este incalzit pana la temperatura de fierbere cand incepe sa se evaporeze si se depune prin condensare pe suprafetele placutelor de substrat. In functie de metoda de incalzire exista **e-beam evaporation** si **resistive evaporation**. Metoda **e-beam evaporation** consta in incalzirea materialului cu un fascicol de electroni pana la evaporare, conform schemei din fig.5. Metoda evaporarii rezistive presupune incalzirea pana la evaporare a materialului de depunere ca urmare a trecerii curentului electric.

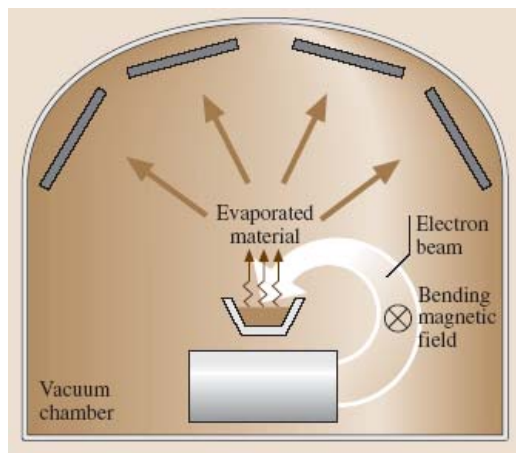


Fig. 5.5: Schema de principiu pentru metoda E-beam evaporation

b) Sputtering

Tehnologia Sputtering presupune scoaterea materialului de depunere din sursa la o temperatura mult mai scazuta decat evaporarea. Principial, metoda presupune introducerea placutei de substrat si a materialului de depunere intr-o incinta vidata si in prezenta unui gaz inert. Cu ajutorul unei surse de putere gazul este adus in stare de plasma. Ionii astfel formati sunt accelerati inspre suprafata materialului de depunere cauzand eliberarea de atomi care vor condensa pe suprafata placutei realizand stratul de depunere. In fig. 6.4 este prezentat schematic acest procedeu.

Fig. 6.4: *Schema de principiu a tehnologiei de depunere prin sputtering.*

A. 2.2 Casting

Prin acest procedeu stratul de depunere se obtine astfel: materialul de depus se dizolva intr-un solvent si se toarna pe suprafata substratului. Dupa evaporarea solventului, materialul de adaos ramane aderat la suprafata sub forma de strat. Acest procedeu se utilizeaza de regula pentru depunerea materialelor de tip polimer.

LITOGRAFIA

Litografia ca metoda de realizare a MEMS-urilor reprezinta, in esenta, transferul unui sablon pe un strat de material fotosensibil depus pe un substrat. Materialul fotosensibil isi schimba proprietatile in zona unde a fost afectat de fasciculul de radiatie. Schema de principiu este prezentata in fig. 7.4.

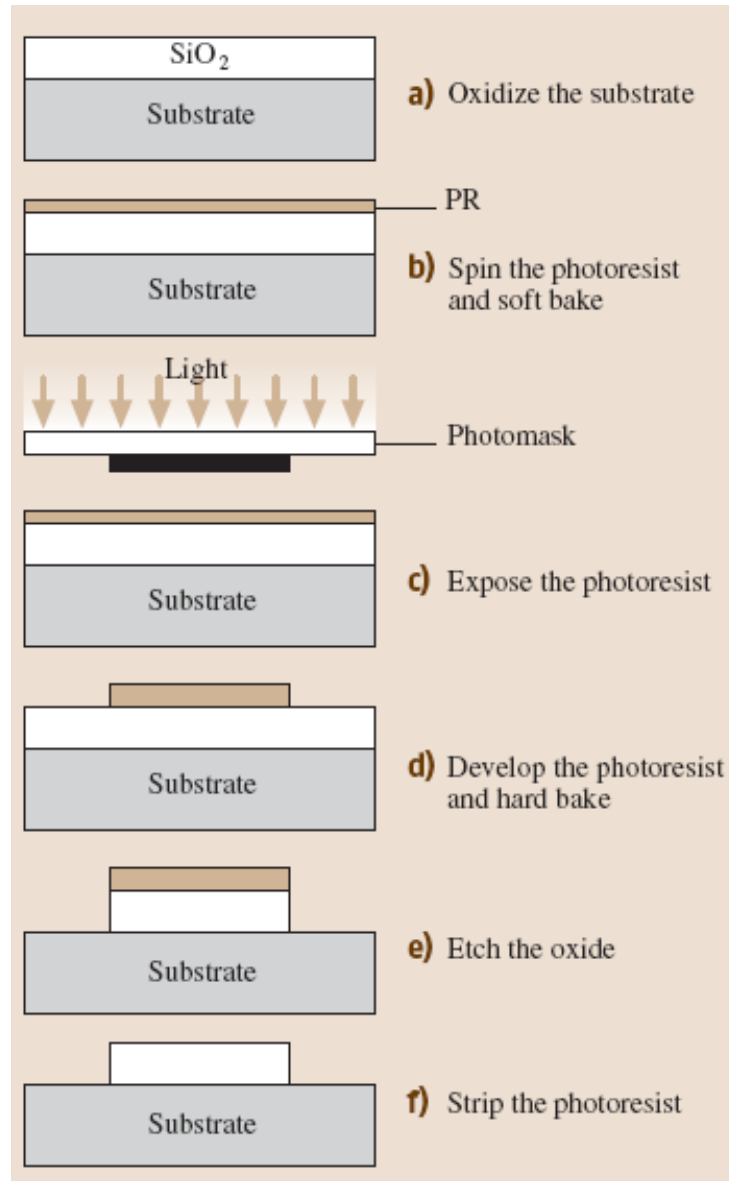


Fig. 7.4: Straturi obținute prin litografiere

Materialul fotosensibil (**photoresist** sau **resist**), atunci când este expus unei radiații își modifică rezistența chimică față de soluția de dezvoltat. Funcție de modul în care se face dezvoltarea pot rezulta două categorii de straturi litografiate: **straturi pozitive** care păstrează configurația șablonului și **straturi negative** când zonele afectate de radiație sunt mai rezistente la substanța de dezvoltare ca în fig. 8.4.

Tehnica litografiei este principala tehnologie de realizare a formelor în microprelucrarea sistemelor.

Straturile fotosensibile sunt utilizate drept șablon pentru obținerea diverselor configurații fie prin eroziune, fig. 8.4-a, fie prin depunere, fig. 8.4-b.

Dupa obtinerea configuratiei dorite, straturile de fotorezist se indeparteaza.

Litografierea impune operatii importante de aliniere a sablonului peste placuta de siliciu, conditii speciale de timp de expunere si tip de radiatie.

a) b)
Fig. 8.4: a) Transfer de model prin corodare (etching), b) Transfer de model prin depunere

CORODAREA (ETCHING)

Atât straturile depuse cât și materialul de substrat pot fi modelate prin procedeul de corodare in vederea obținerii unor configurații dorite. Se utilizeaza doua tipuri de corodare:

C. 1. Corodare într-un mediu umed (Wet Etching), când microstructura este introdusa intr-o solutie chimica. Uzual se utilizează acidul fluorhidric (pentru corodarea bioxidului de siliciu), acid fosforic (pentru corodarea nitrurii de siliciu), amestecuri de acid azotic, acid fluorhidric sau acid acetic (pentru corodarea siliciului monocristalin). Forma obținută prin corodare depinde de viteza de corodare pe diverse direcții, existând astfel **corodare anisotropică** - când se obține o formă de trunchi de piramida/dreptunghiulara, fig. 9.b, și corodare isotropica, cu aceeași viteză pe toate direcțiile și se obține o formă sferică, fig. 9.a.

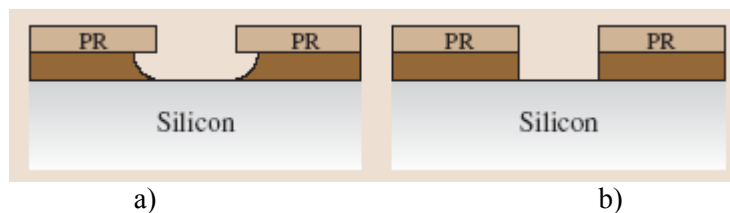


Fig. 9.4: Corodare umeda isotropică și anisotropică

C. 2. Corodare uscata (Dry Etching), când procesul de corodare se realizează la presiune scazută si prin bombardarea cu ioni sau cu electroni se produc reactii chimice locale cu degajare de compusi volatili. In funcție de tipul de reactor utilizat există trei tipuri principale de corodare uscată:

- Corodare cu ioni reactivi (RIE).

Plăcuțele de corodat sunt introduse în reactor împreună cu o serie de gaze. Cu ajutorul unei surse de energie înaltă (RF) se produc ioni care bombardează suprafețele plăcuțelor. O parte

din ioni, având suficientă energie pot scoate atomii din materialul corodat fără reacții chimice (similar ca la procesul de depunere de tip PVD). O altă parte din ioni produc reacții chimice și se corodează zonele dorite. Procesul este complex și presupune o combinație de efecte chimice și fizice.

- **Corodare fără ioni reactivi – Sputter etching** este apropiată de tehnologia de depunere PVD – sputtering. Diferența constă în aceea că se urmărește corodare și nu depunere.

- **Corodare cu vapori reactivi** . Procedeul presupune corodarea zonelor într-un mediu cu gaz sau cu amestec de gaz coroziv.

Procedeele de corodare a straturilor stau și la baza tehnologiei “**straturilor de sacrificiu**”. În esență, procedeul presupune depunerea și configurarea unor straturi care reprezintă negativul unor spații sau cavități. În final, aceste straturi se îndepărtează rezultând configurația dorită.

În fig. 10 este prezentată o schemă simplificată de obținere a unui micro-arc lamelar din siliciu policristalin, unde se pot vedea succesiuni de procedee de depunere, de litografiere și corodare.

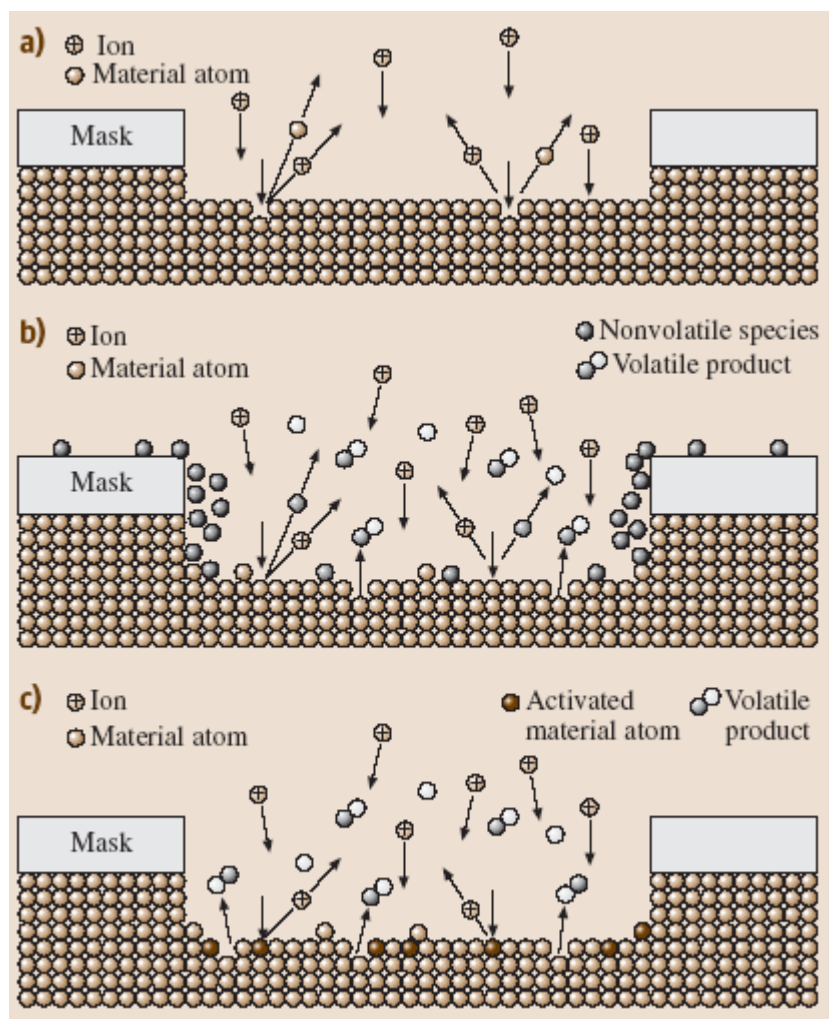


Fig. 10.4 Reprezentarea shematica a corodarii uscate: a) corodare cu ioni reactivi; b) corodare fara ioni reactivi; c) corodare cu vapori reactivi.

Asamblare și integrare de sistem

De-a lungul anilor s-au dezvoltat diferite moduri de abordare în ceea ce privește integrarea de sistem a MEMS-urilor:

- Primă variantă constă în realizarea și integrarea elementelor de microelectronică, după care se trece la realizarea elementelor mecanice prin metodele prezentate anterior. Este o metodă relativ simplă, dar în produsul final apar o serie de tensiuni interne reziduale. Pentru a evita tratamentele termice de coacere pentru îndepărtarea tensiunilor interne se preferă folosirea metalelor refractare în componentele circuitelor integrate.
- A doua variantă se referă la realizarea concomitentă a microelectronicii și a microelementelor mecanice, variantă utilizată în cazul accelerometrelor pentru aibag-uri. Procesarea monolit, ca și numărul redus de elemente permit obținerea unei structuri compacte de fiabilitatea sporită și preț redus. Problema constă în complexitatea dispozitivului ceea ce determină un flux tehnologic rigid. Pentru o eficiență economică mare este deci necesar un volum mare de produse.
- A treia variantă apelează la realizarea microelementelor mecanice înaintea microelectronicii. În SUA a fost dezvoltată tehnologia iMEMS (Integrated Microelectromechanical Systems), patentată de Sandia National Laboratories, care presupune fabricarea MEMS utilizând una din metodele prezentate anterior, urmând ca elementele de microelectronică să fie procesate pe aceeași plachetă de siliciu.

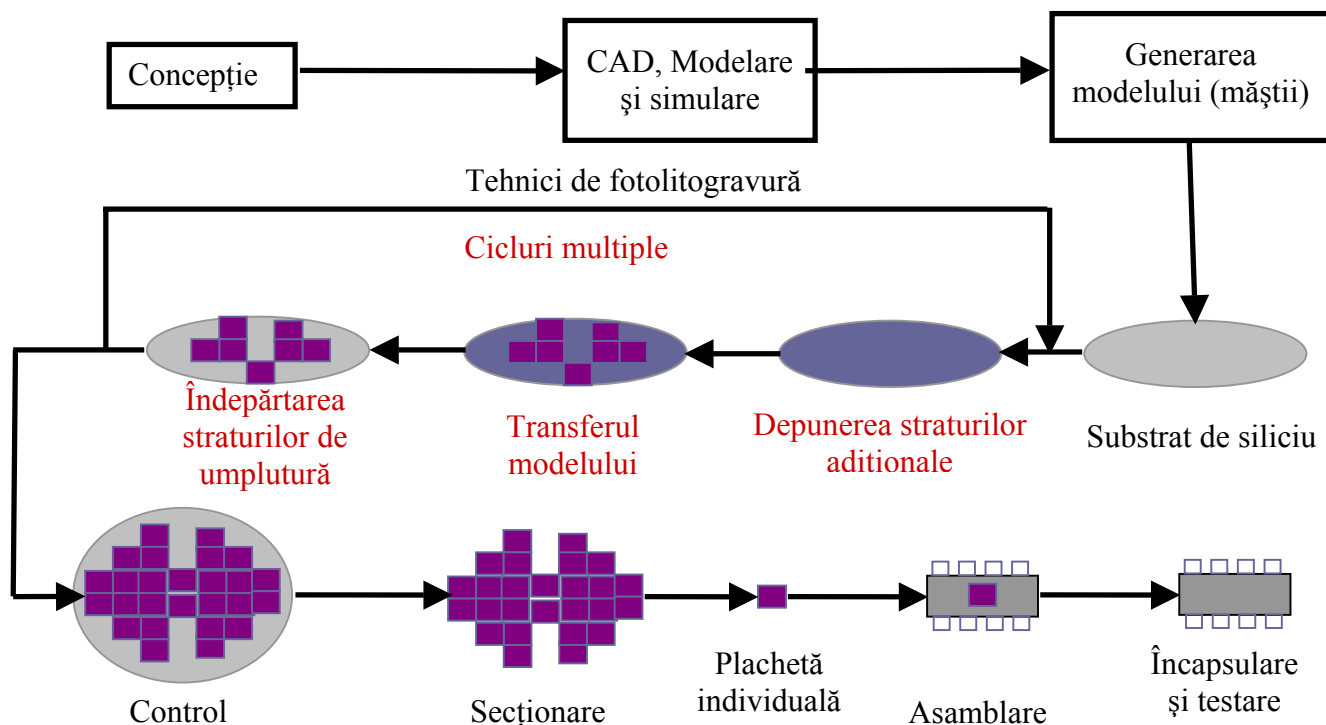


Fig. 11.4 Ciclul complet de fabricație a MEMS

CAPITOLUL V

FORTE DE SUPRAFATA ÎN MICROSISTEME MECATRONICE

În microsisteme, dimensiunile sunt de ordinul de mărime 10^{-9} - 10^{-3} m, masele elementelor sunt de ordinul 10^{-6} – 10^{-3} grame iar forțele sunt de ordinul a 10^{-6} – 10^{-3} N. Uzura este practic nulă în aceste microsisteme iar procesele de frecare și de ungere prezintă legi cu totul diferite ca cele din domeniul macrosistemelor.

Dacă în macrosisteme forțele de suprafață dominante sunt cele date de frecarea (uscată, limită sau mixtă) sau de frecarea fluidă din straturile de lubrifiant, în cazul microstemelor, prezintă importanță numeroase forțe de interacțiune la scară atomică, neglijate în macrosisteme: **forte de adeziune; forte capilare; forte electrostatice, forte de dispersie ca urmare a electronilor fluctuanti; forte Van der Waals ; forte electromagnetice.**

1. Forțe de adeziune

Două elemente aflate în contact direct se atrag reciproc, contactul fiind o stare de energie minimă. Pentru desfacerea contactului este necesară o forță numită **forță de adeziune**.

Se poate demonstra ca raportul dintre forța de adeziune și forța de greutate a unei sfere de rază R pe o suprafață plană este proporțională cu $1/R^2$. Prin urmare, între o sferă de 100 microni și una de 1 micron, raportul forțelor de adeziune crește de 10 000 de ori.

Forțele de adeziune pot fi pe direcție normală la suprafețele aflate în contact atunci când suprafețele se îndepărtează sau pot fi pe direcție tangențială atunci când suprafețele sunt în mișcare de alunecare.

Schematic, determinarea celor două tipuri de forțe de adeziune se prezintă în figurile 1.5 și 2.5

Modelul de bază este de tip bilă pe suprafață plană.

Astfel, în fig. 1.5, prin apăsarea plăcii asupra bilei se produce o deformare elastică a resortului iar forța de apăsare F_n poate fi exprimată cu relația:

$$F_n = -k \cdot \Delta z \quad (1.5)$$

unde k este constanta de elasticitate a arcului iar Δz reprezintă deformarea elastică a arcului. Deplasând în sens invers placa, arcul revine la poziția inițială și este întins suplimentar cu deformarea $(z_{\max} - z_0)$ ca urmare a forței de adeziune exprimată de relația:

$$F_{ad} = k(z_{\max} - z_0) \quad (2.5)$$

În fig. 2.5 suprafața plană se deplasează tangențial în raport cu bila. Ca urmare a adeziunii dintre bilă și suprafața plană, bila se deplasează odată cu placa și arcul se întinde cu o anumită deformare, până când

se atinge o valoare maximă a forței tangențiale F_{fs} numită forță de frecare statică sau forță de frecare de adeziune,

$$F_{fs} = k \cdot x_s \quad (3.5)$$

După atingerea valorii limită F_{fs} bila se desprinde de pe suprafața plăcii căpătând o viteză v_2 diferită de viteza plăcii v_1 , bila alunecând astfel peste placă. În aceste condiții arcul este tensionat cu o forță mai mică F_{fd} , numită forță de frecare dinamică.

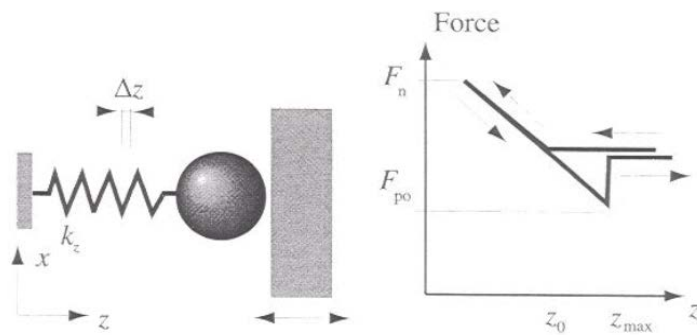


Fig. 1.5

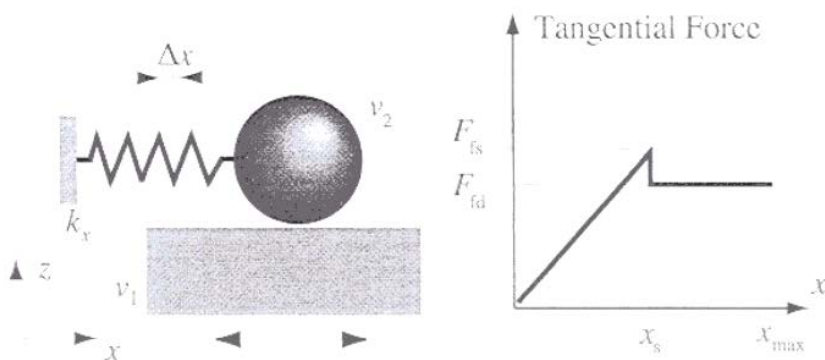


Fig. 2.5

Alunecările și de aderențele se pot repeta succesiv în cazul vitezelor mici de alunecare generându-se fenomenul de Stick – Slip (alunecare sacadată).

În fig.3.5 este prezentată schema utilizată de Scherge pentru măsurarea forței normale de adeziune

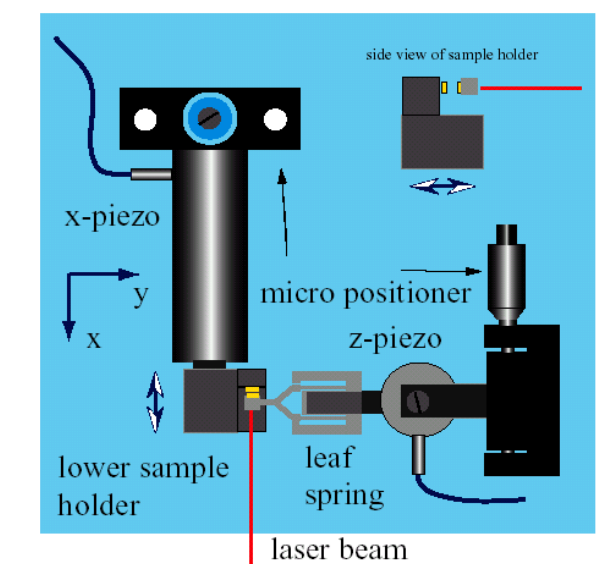


Fig.3.5

Dispozitivul utilizat cuprinde doi traductori piezoelectrice, unul pentru deplasarea pe direcția axei x (x- piezo) cu o deplasare maximă de $20\ \mu\text{m}$ și unul pentru poziționarea pe direcția axei z (z -piezo). Dispozitivul măsoară forța de adeziune dintre două plăcuțe de silicon cu suprafața de $3\ \text{mm}^2$, cu o rugozitate de $R_a = 1\ \text{nm}$. Una din plăcuțe este fixată la capătul traductorului x-piezo iar cealaltă plăcuță este fixată pe brațul unui arc dublu lamelar, de mare precizie, confecționat din sticlă. În spatele acestei plăcuțe este fixată o oglindă pentru reflectarea razei de laser utilizată pentru măsurare. Forța de adeziune dintre cele două plăcuțe determină deformarea elastică a lamelelor de sticlă iar prin sistemul de măsurare cu oglindă și rază de laser se obține o precizie dimensională a deformăției arcului de până la $1\ \text{nm}$, ceea ce înseamnă o precizie a forței de adeziune de $5\ \text{nN}$

În fig. 4.5 este prezentată dependența forță – deformăție la nivelul arcului dublu lamelar. Astfel, în zona (a) cele două plăcuțe se apropie, în zona (b) – (c) plăcuțele vin în contact direct și sunt apăsate, în zona (c) – (d) plăcuțele sunt îndepărtate. Prin îndepărtarea celor două plăcuțe, ca urmare a aderenței se produce încovoiere în sens invers a lamelelor elastice până la desprinderea completă a celor două plăcuțe. Forța de sens invers astfel măsurată reprezintă forța de aderență și este notată în figură cu F_a .

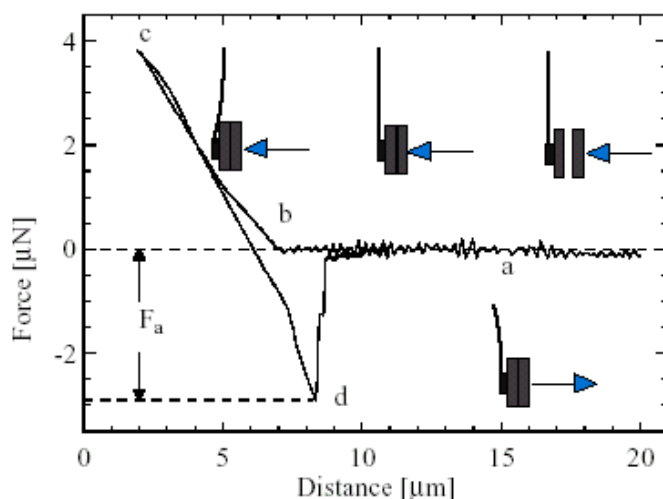


Fig. 4.5 Dependența forță – deformăție în determinarea forței de adeziune

Pentru un contact de tip bilă-suprafață plană, ca în fig. 5.5, adeziunea se manifestă prin dezvoltarea unei forțe F_a de atragere a bilei de suprafața plană. Dacă asupra bilei acționează și o forță suplimentară de apăsare Q , raza cercului de contact dintre bilă și suprafața sferică a se mărește ca urmare a acțiunii forței de adeziune. Există mai multe modele de calcul a adeziunii la un contact de tip microbilă – suprafață plană. Modelele Johnson–Kendall–Roberts (JKR) și Derjaguin–Muller–Toporov (DMT) sunt cele mai răspândite. În tabelul 1 sunt prezentate relațiile de calcul pentru raza cercului de contact precum și pentru calculul forței de adeziune pentru cele două modele de adeziune JKR și DMT la care s-a adăugat și modelul clasic de contact Hertzian, fără adeziune.

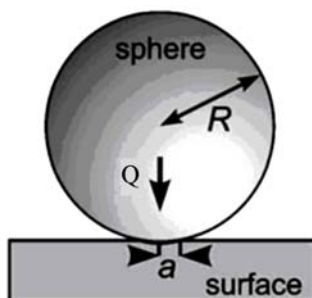


Fig. 5.5

Tabelul 1.5.

	Hertz	DMT	JKR
a	$\sqrt[3]{\frac{RQ}{E_{tot}}}$	$\sqrt[3]{\frac{R}{E_{tot}} \cdot (Q + 2\pi RW)}$	$\sqrt[3]{\frac{R}{E_{tot}} \cdot (Q + 3\pi RW + \sqrt{6\pi RWQ + (3\pi RW)^2})}$
F_{ad}	0	$2\pi RW$	$\frac{3\pi RW}{2}$

Semnificația termenilor este următoarea:

- Q = forța normală, N;
- R = raza bilei, în m;
- A = raza suprafeței de contact bilă-plan, în m;
- $E_{tot} = \frac{4}{3} \left[\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right]^{-1}$, unde E_1 și E_2 reprezintă modulele de elasticitate pentru bilă și plan, în Pa iar ν_1 și ν_2 sunt coeficienții Poisson;
- W = lucru mecanic de adeziune la nivelul suprafețelor în contact ca o sumă dintre lucrul mecanic dat de forțele moleculare Van der Waals și lucrul mecanic dat de forțele de interacțiune chimică, în N/m.

Pentru o bilă din oțel pe o suprafață de siliciu, $W = 0.070$ N/m.

Ex. de calcul: Pentru o bilă din oțel cu raza de 1 mm, în contact cu o plăcuță de siliciu se va dezvolta o forță de adeziune de $F_{ad} = 2\pi RW$ și rezultă: $F_{ad} = 4.39 \cdot 10^{-4}$ N = 0,439 mN.

Dacă se consideră greutatea acestei bile: $G = \frac{4\pi R^3 \cdot \rho \cdot g}{3}$, unde ρ este densitatea oțelului în kg/m^3 iar $g = 10 \text{ m/s}^2$, accelerația gravitațională, rezultă: $G = 0,326 \text{ mN}$. Prin urmare, o microbilă din oțel cu raza de 1 mm poate fi ținută lipită de o plăcuță de siliciu datorită forței de adeziune.

În fig. 6.5 se prezintă o comparație între greutatea unei microbile și forțele de adeziune care pot ține bila lipită de suprafață: forțe de adeziune moleculară (Van der Waals), forțe de adeziune capilare, date de tensiunea superficială a apei care aderă pe suprafețe și forțele electrostatice.

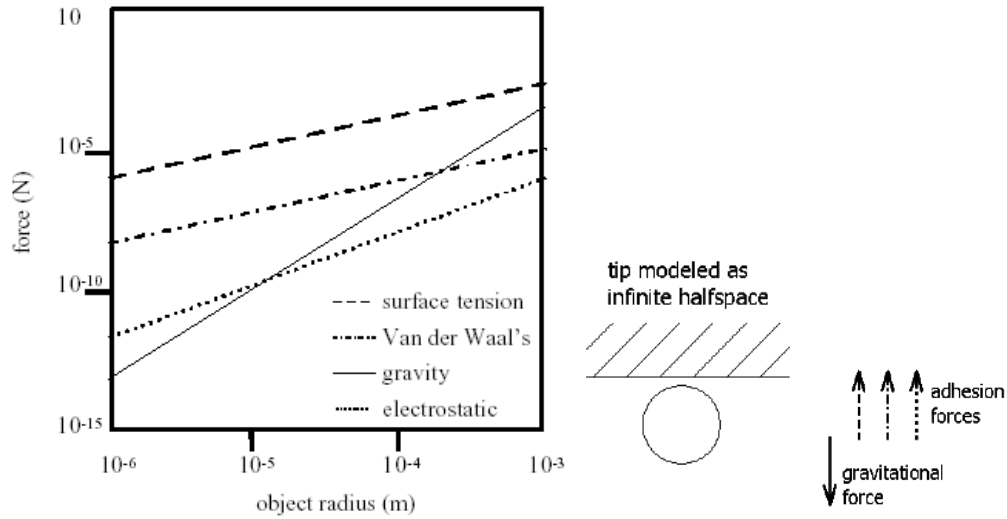


Fig. 6.5

Într-un micro sau nanosistem de tip bilă/plan, încărcat cu o forță normală Q_0 , ca urmare a forțelor de adeziune, aria de contact A_c este dată de relația Johnson-Kendall-Roberts (JKR):

$$A_c = \pi \cdot \left[\frac{R}{E_{tot}} \cdot \left(Q_0 + 6 \cdot \pi \cdot W \cdot R + \sqrt{12 \cdot \pi \cdot W \cdot R \cdot Q_0 + (6 \cdot \pi \cdot W \cdot R)^2} \right) \right]^{2/3} \quad (4.5)$$

unde E_{tot} reprezintă modulul de elasticitate echivalent.

În absența unei forțe normale de apăsare, bila aderă pe suprafața plană și pentru a o putea desprinde trebuie acționat asupra ei cu o forță:

$$F_{ad} = -3\pi \cdot W \cdot R \quad (5.5)$$

Prezența adeziunii modifică relația clasică a lui Amontons pentru forța de frecare ($F_f = \mu \cdot Q$).

Astfel, forța de frecare în prezența adeziunii se poate exprima cu ajutorul relației:

$$F_f = \tau_c \cdot A_c + \mu \cdot Q \quad (6.5)$$

unde τ_c reprezintă o tensiune de forfecare critică (considerată a fi constantă) iar $A_c = \pi r^2$ este aria de contact.

Astfel, relația (6.5) sugerează că frecarea este **controlată atât de adeziune cât și de sarcină**.

Pentru zona micro și nanometrică, deci pentru sarcini mici, forța de frecare este dată numai de componenta de adeziune:

$$F_f = \tau_c \cdot \pi \cdot \left[\frac{R}{E^*} \cdot \left(Q + 6 \cdot \pi \cdot W \cdot R + \sqrt{12 \cdot \pi \cdot W \cdot R \cdot Q + (6 \cdot \pi \cdot W \cdot R)^2} \right) \right]^{2/3} \quad (7.5)$$

Pentru zona macro, la solicitări mari, forța de frecare este dată de legea lui Amontons:

$$F_f = \mu \cdot Q \quad (8.5)$$

2. Forțe capilare

Apa din atmosferă condensează pe suprafețele elementelor în contact în straturi de grosime de până la zeci de nanometri. Suprafețele ajunse în contact sunt atrase de presiunea **Laplace** cauzată de efectul de capilaritate. Astfel, pentru cazul unei sfere pe o suprafață plană, fig.7.5, presiunea **Laplace** este dată de relația:

$$\Delta p = \gamma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (9.5)$$

unde γ este energia superficială, pentru apă $\gamma = 72 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$ iar razele r_1 și r_2 sunt indicate în fig. 7.5.

Aria acoperită de lichid este: $A_l = \pi \cdot r_2^2$ iar forța capilară poate fi scrisă :

$$F_c = \Delta p \cdot A_c \quad (10.5)$$

Dacă h_l este grosimea meniscului de apărazele r_1 și r_2 pot fi exprimate în funcție de h_l iar relația (10.5) devine:

$$F_c = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \gamma \cdot \left(2 + \sqrt{\frac{h_l}{2 \cdot R}} \right) \quad (11.5)$$

În aplicațiile practice $h_l \ll R$, iar forța capilară capătă expresia simplificată:

$$F_c = 4 \cdot \pi \cdot R \cdot \gamma \quad (12.5)$$

Pentru cazul a două bile în contact, cu razele R_1 și R_2 , forța capilară este dată de relația:

$$F_c = 4 \cdot \pi \cdot R^* \cdot \gamma \quad (13.5)$$

unde R^* este raza de curbura echivalentă $R^* = \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right]^{-1}$.

Așa cum se poate vedea din fig. 6.5, efectul de capilaritate domină adeziunea între suprafețe la scară micro și nanometrică.

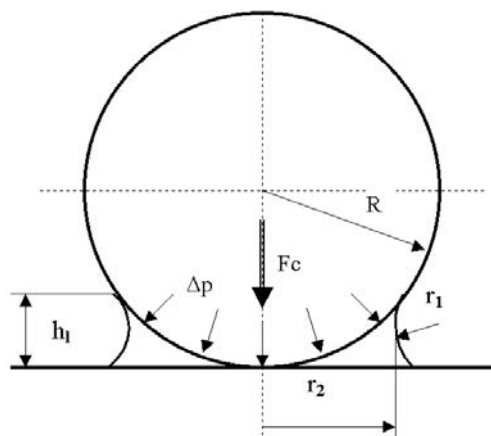


Fig.7.7

3. Influenta apei asupra frecarii in micro si nanosisteme

În funcție de natura suprafețelor elementelor în contact, **hidrofile** – capabile să absoarbă apa din atmosferă **sau hidrofobe** – cu capacitate redusă de a absorbi apa din atmosferă, straturile de apă depuse variază de la zeci de nanometri grosime până la câteva rânduri de molecule de apă (un strat de molecule de apă are aprox. 0,25 nanometri. Masuratori făcute de Opiz pe suprafețele unui microtribosistem de alunecare de tip sferă/plan, confecționat din Si(100) au pus în evidență influența presiunii aerului, a temperaturii și a umidității asupra straturilor de apă depuse din atmosferă pe suprafețe hidrofile și hidrofobe. În fig. 8.5 este prezentată influența presiunii aerului.

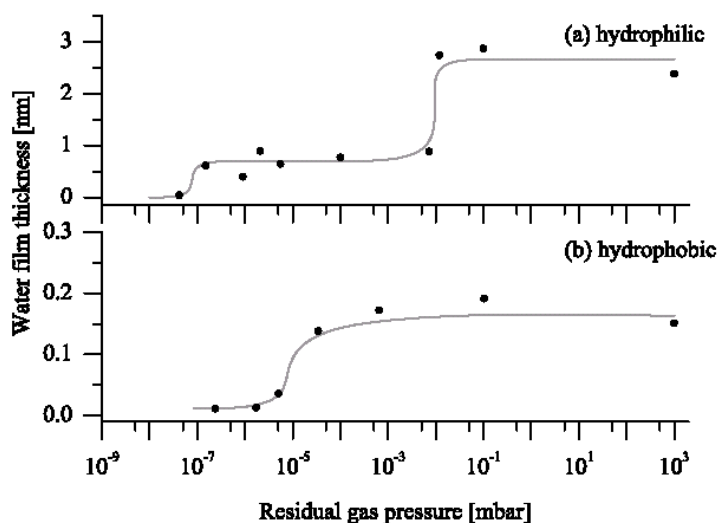


Fig. 8.5 Influenta presiunii asupra straturilor de molecule de apă depuse pe suprafețe hidrofile și hidrofobe

În condiții de presiune normală atmosferică, pe suprafețele hidrofile se depun cel puțin 10 rânduri de molecule de apă (ajungând și la 50 de straturi de molecule sau chiar mai mult) în timp ce pe suprafețele hidrofobe se depune doar unul sau două straturi de molecule de apă.

Prezența straturilor de molecule de apă influențează puternic frecarea la scară micro și nanometrică. Astfel, după cum se poate vedea în fig. 8.5, când microtribosistemul bilă/plan este încărcat cu forța normală de **60nN**, la presiune normală, atmosferică, forța de frecare este de aprox. 20 de ori mai

mare în cazul suprafețelor hidrofile, cu straturi groase de apă depusă, decât în cazul suprafețelor hidrofobe pe care sunt depuse doar câte un rând de molecule de apă.

Raportând forța de frecare la forța de apăsare se obțin valori ale coeficientului de frecare cu mult peste 1 ($\mu = 5...7$).

Valorile mari ale forțelor de frecare se explică prin dominanța efectelor capilare, atunci când pe suprafețe există depuse mai multe rânduri de molecule de apă. În fig. 9.5 se prezintă existența a trei zone distincte de frecare în microtribosisteme, atunci când presiunea scade de la valoarea normală la valoarea de 10^{-10} bar.

Astfel, la grosimi de câteva straturi de molecule de apă (peste 0,7 nm) dominante sunt forțele capilare. Pentru grosimi mai mici de 2-3 rânduri de molecule de apă (sub 0,7 nm) frecarea este dominată de efectele de vâscozitate iar pentru presiuni sub 10^{-10} bar, frecarea este practic uscată, de tip solid-solid.

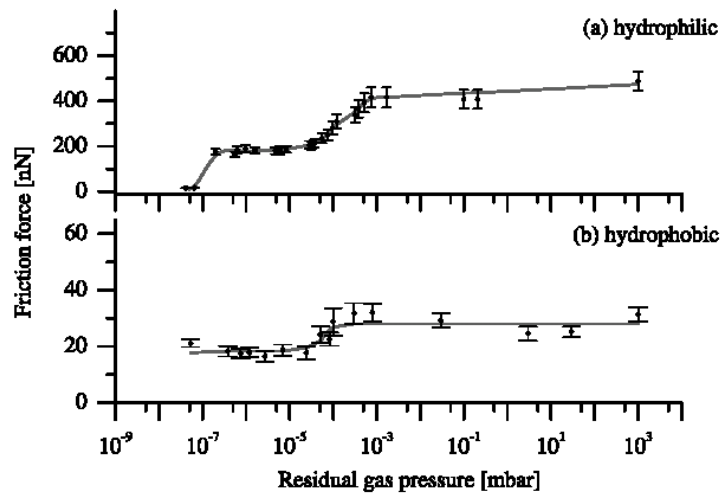


Fig. 9.5 Variația forței de frecare în funcție de presiunea aerului pentru suprafețe hidrofile și hidrofobe

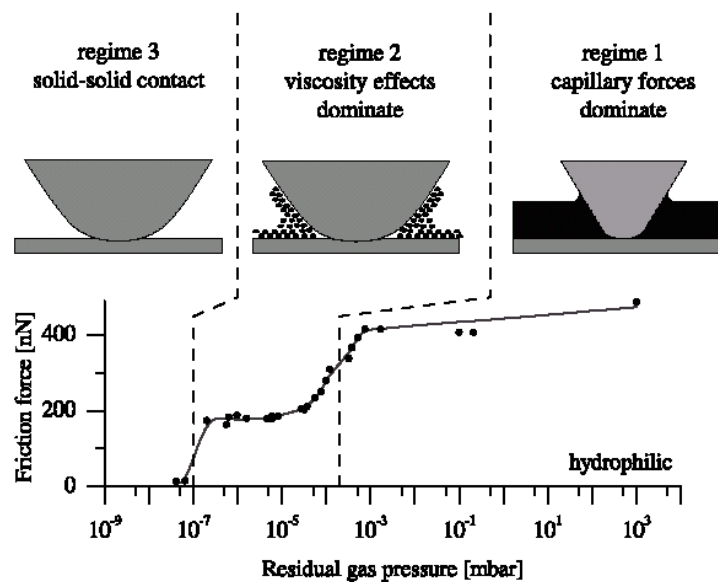


Fig. 10.5 Evoluția forței de frecare în funcție de grosimea stratului de apă condensată

Influența capilarității asupra forței de frecare se poate vedea și din fig. 11.5. Astfel, în zona a) suprafețele sunt depărtate astfel încât efectul capilarității nu se manifestă iar forța de frecare este zero.

În zona b), apropierea bilei de suprafața plană face să se dezvolte punți de capilaritate între cele două suprafețe, cu creșterea accentuată a forței de atracție și, implicit, cu creșterea forței de frecare.

Apropierea în continuare a celor două suprafețe, zona c), înseamnă o creștere mult mai mică a forței de frecare până la contactul direct solid/solid. Zona d) sugerează variația forței de frecare atunci când suprafețele sunt îndepărtate.

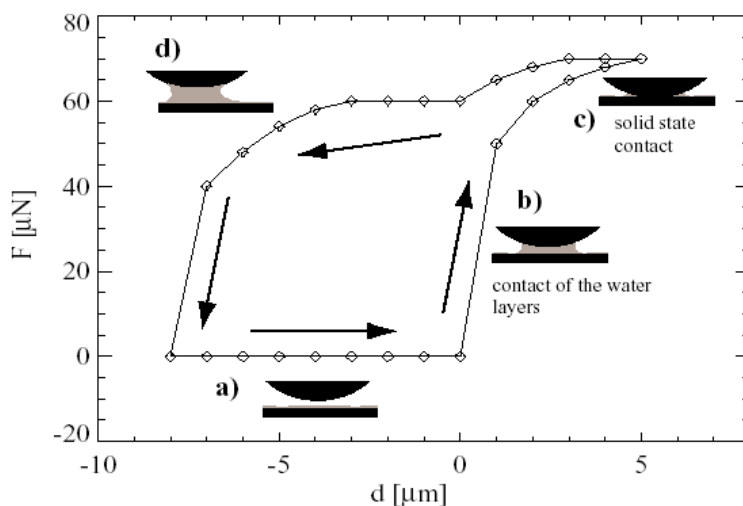


Fig. 11.5 Influența capilarității asupra forței de frecare

Straturile de apă depuse pe suprafețele hidrofile, la presiune normală, atmosferică, sunt mai mari sau mai mici, funcție de temperatura și umiditatea mediului. Determinări ale forțelor de frecare în funcție de temperatură și de umiditate pun în evidență variații mari ale grosimii straturilor depuse, așa cum se vede în fig.12.5.

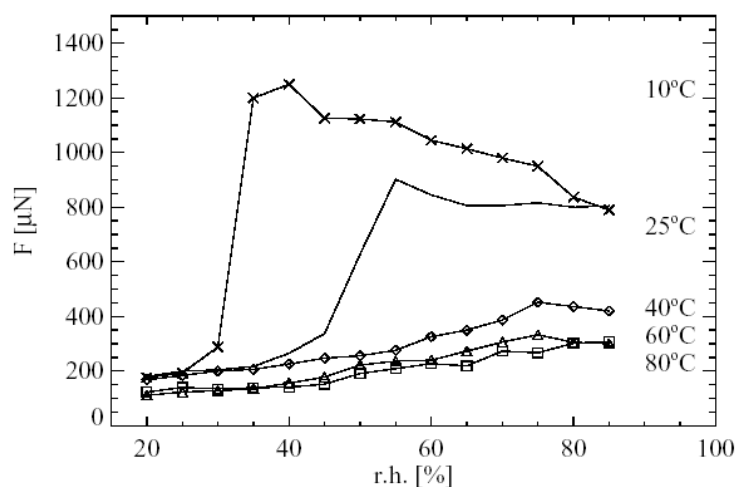


Fig. 12.5 Variația forței de frecare în funcție de umiditatea atmosferică și de temperatură

Două concluzii importante se desprind:

1. La temperaturi de până la 20 – 25 de grade, umiditatea din atmosferă influențează puternic frecarea în micro și nanosisteme atunci când depășește (30-35)%. Se pot observa creșteri de 5-6 ori ale forțelor de frecare.

2. La temperaturi mai mari de 40°C, creșterea umidității aerului influențează în mică măsură creșterea frecării în micro si nanosisteme. La suprafețele hidrofobe temperatura și umiditatea influențează nesemnificativ frecarea în micro și nanosisteme.

O prezentare schematică a evoluției forței de frecare în funcție de distanța dintre suprafețe (măsurată în unități atomice) este făcută în fig. 13.5.

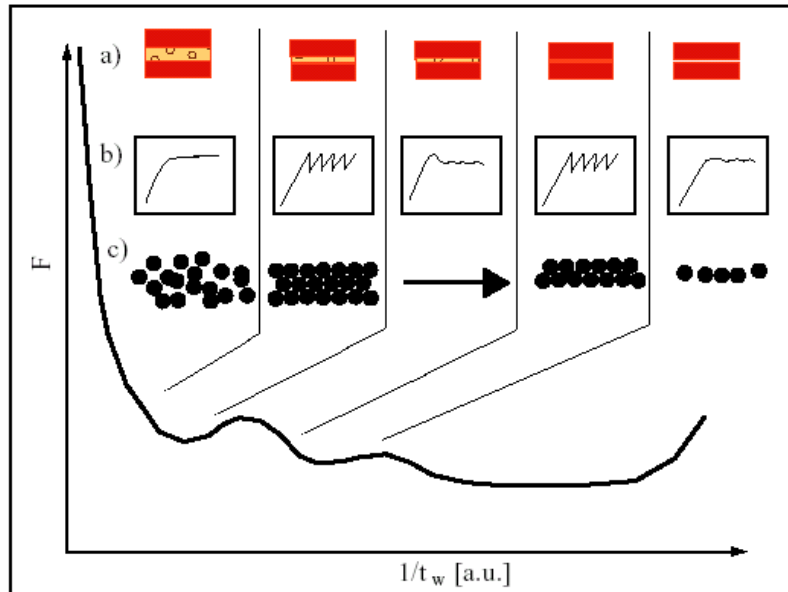


Fig. 13.5 Evoluției forței de frecare în funcție de distanța dintre suprafețe

La straturi groase de apă aderată pe suprafețe frecarea este mare și este dictată de efectele capilare. Reducerea straturilor de molecule de apă aderente la suprafețele în contact are ca efect reducerea forțelor de frecare până la o valoare minimă corespunzătoare unor straturi limită de câte 2 rânduri de molecule pe fiecare suprafață.. Reducerea în continuare a straturilor de molecule de apă duce la creșterea frecării și trecerea în zona frecării uscate.

4. Forțe electrostatice

Se dezvoltă între o sferă cu rază r încărcată cu sarcina electrică q și o suprafață plană și poate fi estimată cu relația:

$$F_{ae} = \frac{q^2}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot (2r)^2} \quad (14.5)$$

unde ε este permitivitatea electrică a mediului ce separă bila de suprafața plană.

Pentru cazul a două suprafețe plane separate de un spațiu d , fig. 14.5, forța electrostatică se determină cu relația:

$$F_{ae} = \frac{\varepsilon \cdot A \cdot V^2}{2d^2} \quad (15.5)$$

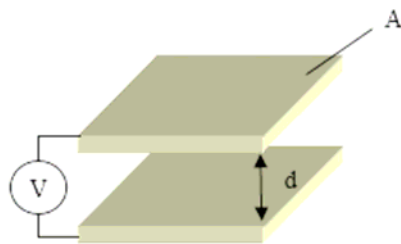


Fig. 14.5

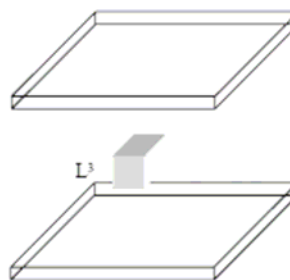


Fig. 15.5

Pentru un microcub aflat în câmp electrostatic, forța electrostatică este dată de relația:

$$F_{ae} = \frac{\varepsilon \cdot L^2 \cdot E^2}{2d^2} \quad (16.5)$$

Punând condiția ca greutatea cubului elementar să fie echilibrată de forța electrostatică rezultă dimensiunea maximă a microcubului care poate fi menținut între cele 2 plăci:

$$L \leq \frac{\varepsilon \cdot V^2}{2 \cdot g \cdot \rho \cdot d^2} \quad (17.5)$$

5. Metode de măsurare a forțelor în microsisteme

AFM - Microscopul de forta atomica

Microscopul de forta atomica functioneaza utilizind procedeul de microscopie tunelara si microscopie a stilului suprafetei. Microscopia tuneala presupune doi elactrozi intre care se formeaza un cimp electric. Unul din electrozi este virful palpatorului iar al doilea electrod se gaseste la nivelul probei.

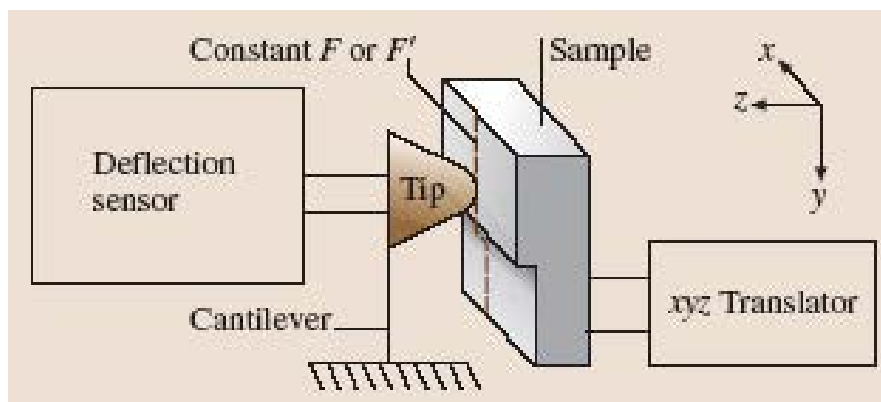


Fig 16.5. Principiul de operare al AFM.

Principiul AFM constă în apropierea unui electrod metalic de o suprafata de studiat la o distanta de cca (0.3–1 nm). Pe suprafata de studiat se gaseste cel de al doilea electrod, intre cei doi elctrozi se formeaza un current de (10 mV–1 V), acest current se numeste “curent tunelar”, variaza de la 0.2 la 10 nA si este

masurabil. Scannarea se realizeaza la o distanta de 0.3–1 nm, iar curentul de la nivelul probei este si el masurat in mod continuu.

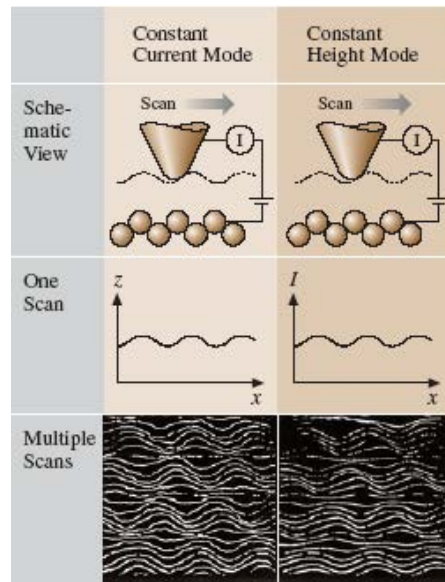


Fig 17.5.Preluarea imaginilor de palpatorul microscopului

Curentul se metine constant prin feed-back. Palpatorul scanneaza pe directia Z, mai multe scannari formind cartografierea suprafetei respective. O imagine tridimensionala a unei suprafete consta in multiple scanari ale planului (x,y) dispuse lateral fiecare pe directia Z. Forma suprafetei determina deflexia palpatorului in directie verticala si laterala. O raza laser provenita de la o laser dioda (5mW max output la 670 nm) este transmisa printr-o prisma pe spatele palpatorului. Raza reflectata este transmisa spre oglinda unui fotodetector cu patru cadrane (denumit detector sensibil de pozitie PSD) ca în fig. 18.5

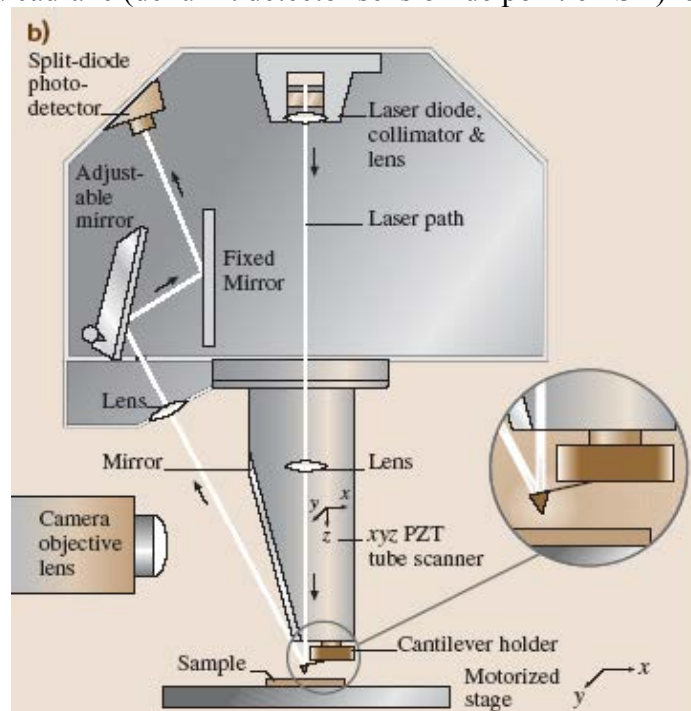


Fig 18.5 Reprezentarea schematica a functionarii microscopului de forta atomica (AFM)

FFM microscopul pentru masurarea fortelor de frecare

Microscopul pentru masurarea fortelor de frecare FFM sau altfel denumit microscop de forta laterala LFM exploreaza interactiunea dintre vârful unui palpator care aluneca pe suprafata de studiat cuantificând procesele disipative de la nivel atomic. Miscarea relativa pe suprafata se realizeaza de catre un scanner format din actuatori piezoelectrice care misca suprafata perpendicular pe virf cu o anumita periodicitate. Cu ajutorul unei fotodiode segmentată în 4 (ABCD) se pot detecta deformățiile elastice ale consolei (sub forma unei lamele cu grosime de ordinul micronilor) pe două direcții – pe direcția forței normale si pe direcția forței tangențiale.

Scannerul poate astfel sa se extinda sau sa se retraga in functie de cum variaza forta normala, F_N , care este aplicata pe suprafata. Aceasta forta este responsabila de deflectiona consolei pe direcția verticală iar spotul de fascicul laser va impresiona fotodiodele AB. Apariția unei forțe tangențiale F_t duce la răsucirea consolei și dirijarea spotului pe fotodiodele laterale AC sau BN.

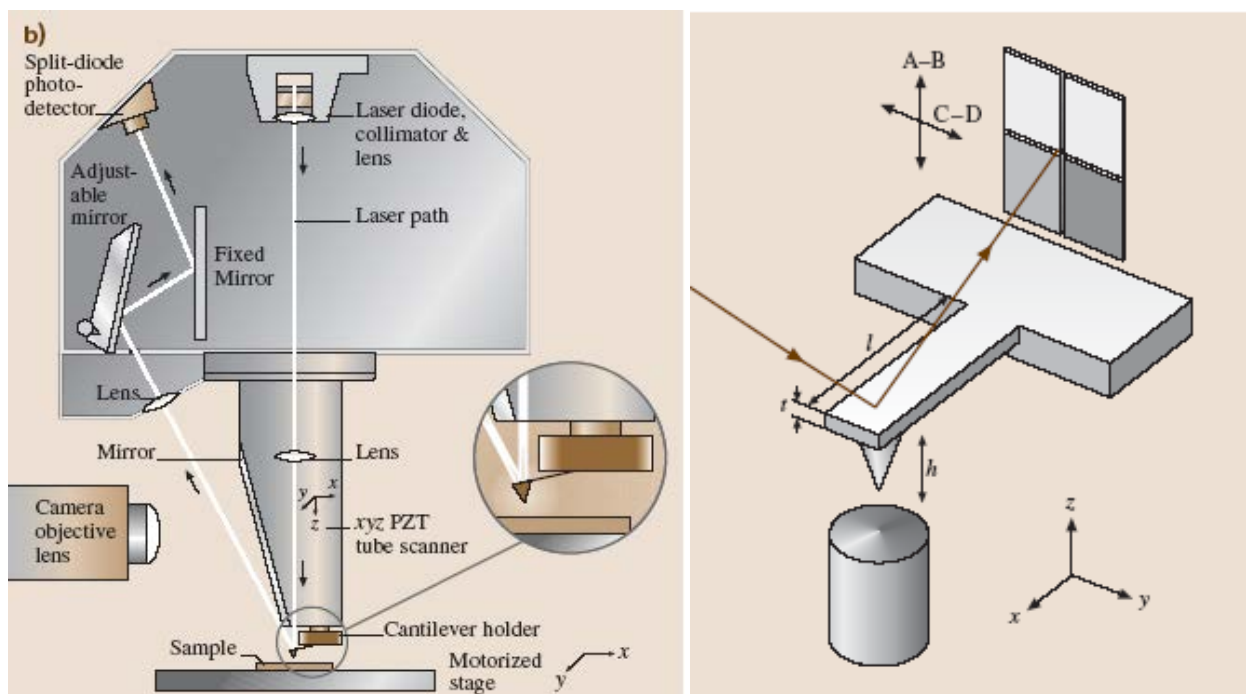


Fig. 16.5 Microscopul pentru masurarea fortelor de frecare FFM

CAPITOLUL VI

MICROSENZORI

A. Principii de bază în funcționarea microsenzorilor

Interacțiunea sistemelor mecatronice cu mediul înconjurător se realizează prin intermediul a două tipuri distincte de subsisteme: **senzori** pentru funcția de percepție și **actuatori** pentru funcția de execuție. La nivelul microsistemelor mecatronice funcția de percepție este realizată de microsenzori iar funcția de execuție este realizată de microactuatori.

Sensor:



Actuators:



Schematic, senzorul transformă o mărime ne-electrică (presiune, forță, temperatură, debit, accelerație, viteză, etc.) într-un semnal electric, în timp ce actuatorul transformă un semnal electric într-o mărime ne-electrică (deplasare, viteză, lucru mecanic, forță etc.).

Funcționarea microsenzorilor se bazează pe o serie de efecte de natură fizică sau chimică prin care unele mărimi ne-electrice se transformă în mărimi electrice sau produc modificări în circuitele electrice în care sunt legați microsenzorii/

1. Efectul de piezorezistivitate

Piezorezistivitatea este o caracteristică a unor materiale de a-și schimba rezistența electrică atunci când asupra lor se exercită o presiune. Cuvântul *piezorezistivitate* derivă din cuvântul grecesc *piezin* care înseamnă *a presa*.

Efectul a fost descoperit pentru prima dată de Lord Kelvin în anul 1856 când a observat că rezistența electrică a firelor de cupru și de oțel crește atunci când firele sunt supuse unor tensiuni de tracțiune.

Dacă se consideră o bară (fig. 1.6) de secțiune dreptunghiulară de lățime w , înălțime y și lungime l , atunci rezistența electrică a acestei bare este dată de relația:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{w \cdot y} \quad (1.6)$$

unde ρ reprezintă rezistivitatea materialului (exprimată în Ωm).

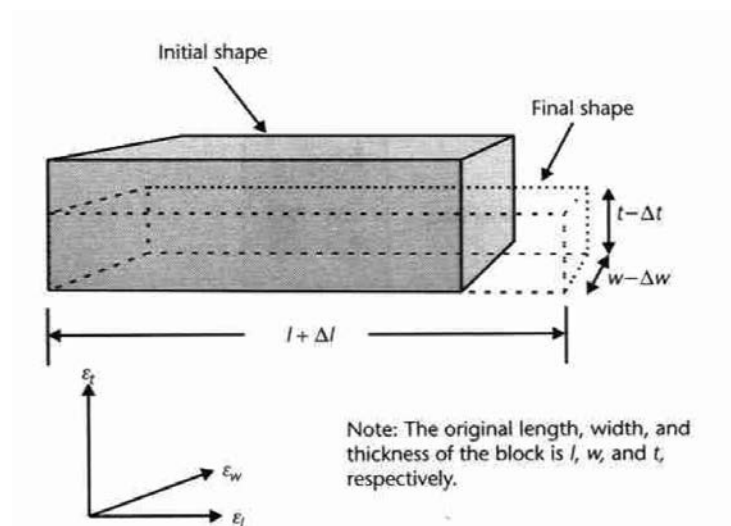


Fig. 1.6 Deformațiile unei bare metalice de secțiune dreptunghiulară

Când bara este solicitată la tracțiune se produce o alungire dl iar lățimea și înălțimea barei se reduc, respectiv cu dw și dy .

Relația (1.6) se diferențiază și rezultă:

$$dR = \frac{l}{wy} d\rho + \frac{\rho}{wy} dl - \frac{\rho l}{w^2 y} dw - \frac{\rho l}{wy^2} dy \quad (2.6)$$

Din rel.(2.6) și (1.6) rezultă:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dw}{w} - \frac{dy}{y} \quad (3.6)$$

Semnificația termenilor din relația (3.6) este următoarea:

- $\frac{dl}{l} = \varepsilon_l$ și reprezintă alungirea specifică;
- $\frac{dw}{w} = \varepsilon_w = -\nu \varepsilon_l$ și reprezintă reducerea specifică a lățimii barei;
- $\frac{dy}{y} = \varepsilon_y = -\nu \varepsilon_l$ și reprezintă reducerea specifică a înălțimii barei.

unde ν reprezintă coeficientul Poisson cu valori în jur de 0,3.

Relația (3.6) conduce la următoarea relație:

$$\frac{dR/R}{\varepsilon_l} = \frac{d\rho/\rho}{\varepsilon_l} + (1 + 2\nu) \quad (4.6)$$

Termenul $\frac{dR/R}{\varepsilon_l}$ reprezintă factorul de sensibilitate și este format din două componente: efectul de piezorezistivitate ($\frac{d\rho/\rho}{\varepsilon_l}$) și factorul geometric ($(1 + 2\nu)$).

Efectul de piezorezistivitate stă la baza măsurării tensiunilor cu ajutorul mărcilor tensometrice.

Factorul de sensibilitate variază în funcție de materialul utilizat pentru construcția mărcilor tensometrice:

- fire din metal $\frac{dR/R}{\varepsilon_l} = 2 \dots 5$;

- monocristal de siliciu $\frac{dR/R}{\varepsilon_l} = -125 \dots 200$;
- polisiliciu $\frac{dR/R}{\varepsilon_l} = -30 \dots +30$

Semnul – la factorul de sensibilitate sugerează că rezistența scade odată cu solicitarea în resistor.

2. Efectul piezoelectric

Efectul *piezoelectric* a fost descoperit în anul 1880 de către frații Pierre și Jacques Curie și a fost pus în evidență prin apariția unei diferențe de potențial electric la capetele unui dielectric sau feroelectric, atunci când asupra lui acționează o forță de compresie mecanică. Diferența de potențial se datorează polarizării electrice a materialului piezoelectric sub acțiunea deformatoare a solicitării mecanice externe. Polarizarea electrică constă în apariția unor sarcini electrice pe suprafața materialelor piezoelectrice supuse acțiunii forțelor de compresie sau de întindere. Materialele monocristaline sau policristaline supuse acțiunii unei presiuni mecanice generează o tensiune electrică, acesta este *efectul piezoelectric direct*, iar sub acțiunea unui câmp electric suferă o deformare mecanică (distorsiune mecanică numită electrostricțiune) acesta corespunde *efectului piezoelectric indirect* (fig.2.6). Piezoelectricitatea este caracterizată printr-o relație directă între cauză și efect.

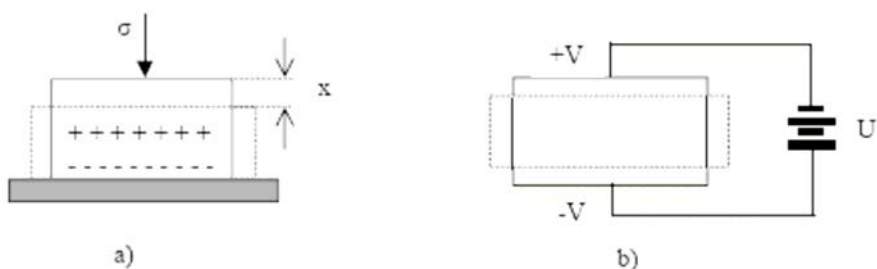


Fig. 2.6: Efectul piezoelectric direct (a) și efectul piezoelectric invers (b)

Pentru structurile cristaline reprezentate bidimensional în planul xOy (fig.3.6.a.), lipsa acțiunii mecanice exterioare, pune în evidență polarizarea rezultantă cu valoare nulă ca urmare a structurii simetrice a cristalului.

În cazul în care se acționează din exterior asupra cristalului, are loc deformarea structurii interne a rețelei (fig.3.6.b), ionii se deplasează, polarizare internă nu mai este în echilibru și are loc polarizarea cristalului prin efect direct, deci polarizarea rezultantă este diferită de zero.

În figura 3.6. efectul de polarizare este pus în evidență prin momentul dipolar al celulelor unitare, moment încadrat cu linie punctată.

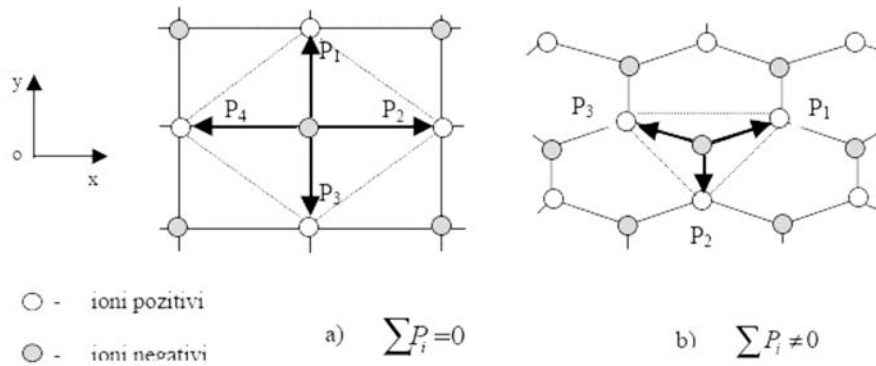


Fig. 3.6 Efectul de polarizare într-o structură cristalină

Sarcina electrică Q indusă în materialul cristalin este direct proporțională cu tensiunea mecanică σ aplicată din exterior conform relației (5.6.), care reprezintă *expresia efectului piezoelectric direct*.

$$Q = d \cdot \sigma \cdot A = d \cdot F \quad (5.6)$$

unde A este aria secțiunii materialului pe direcția forței de compresiune F , iar d este factorul de proporționalitate dintre sarcina electrică și forța de comprimare, se exprimă în pC/N și poartă numele de *piezomodul* cu valori ce depind de natura materialului piezoelectric.

Tensiunea electrică ce apare între cele două suprafețe supuse compresiunii este dată de relația:

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{d \cdot F}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A/h} \quad [V] \quad (6.6)$$

unde C este capacitatea electrică între cele două suprafețe, ε_0 este permitivitatea electrică a vidului ($\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$), ε_r este permitivitatea relativă a materialului iar h este grosimea de material cuprins între cele două suprafețe.

De exemplu, pentru o plăcuță din material ceramic piezoelectric tip PZT, cu dimensiunile de 10x10 mm și cu grosimea de 1 mm, dacă se aplică o forță de compresiune de 100 N pe direcția înălțimii se obține o tensiune electrică de 22,6 volți. Astfel, la materialul ceramic PZT permitivitatea relativă

$\varepsilon_r = 3000$, iar piezomodulul $d = 600 \text{ pC/N}$.

$$U = \frac{600 \cdot 10^{-12} \cdot 100}{\frac{8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 3000 \cdot 0,01 \cdot 0,01}{0,001}} = 22,6 \text{ V}$$

Valori pentru piezomodulul d și pentru permitivitatea relativă ε_r la diverse materiale piezoelectrice sunt prezentate în tabelul 1.6.

Tabelul 1.6

Materialul	Piezomodulul d , pC/N	Permitivitatea relativă, ε_r
Quartz	2	4
Polimer PVDF	20	12
Oxid de zinc	12	12
Titanat de bariu (material ceramic)	190	2000
PZT (material ceramic)	300 - 600	400 - 3000

Fenomenul piezoelectric are și un efect invers prin aceea că asigurarea unei polarizări electrice a materialului cristalin determină la acesta o deformare elastică x . Deformarea x este direct proporțională cu polarizarea P prin intermediul unui coeficient piezoelectric g , conform relației (7.6).

$$x = g \cdot P \quad (7.6)$$

Intre polarizare și câmpul electric E există relația:

$$P = \varepsilon_0(\varepsilon - 1)E \quad (8.6)$$

unde $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$.

Din rel. (7.6) și (8.6) rezultă *expresia piezomodulului d* , care depinde de mărimea coeficientului piezoelectric g , permitivitatea electrică absolută a vidului ε_0 și permitivitatea relativă electrică a materialului piezoelectric ε_r (care depinde de permitivitatea electrică relativă a materialului piezoelectric, ε_r).

$$x = g \cdot P = g \cdot \varepsilon_0(\varepsilon - 1) \cdot E = d \cdot E \quad (9.6)$$

Rezultă:

$$d = \varepsilon_0(\varepsilon - 1) \quad (10.6)$$

În cazul unei sollicitări complexe a unui cristal, cu trei tensiuni de compresiune – tracțiune $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ și cu trei sollicitări deforfecare τ_x, τ_y, τ_z , fig. 4.6, pe fiecare suprafață se definesc polarizările P_x, P_y, P_z , polarizări care apar în urma *solicitărilor mecanice* la care este supus monocristalul (fig. 4.).

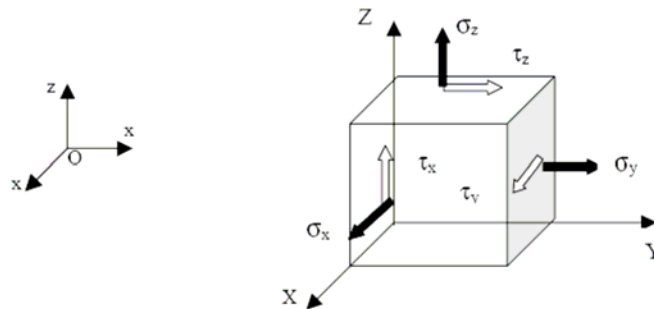


Fig.4.6 Cristal sollicitat complex

$$\begin{aligned} P_x &= d_{11}\sigma_x + d_{12}\sigma_y + d_{13}\sigma_z + d_{14}\tau_y + d_{15}\tau_z + d_{16}\tau_x \\ P_y &= d_{21}\sigma_x + d_{22}\sigma_y + d_{23}\sigma_z + d_{24}\tau_y + d_{25}\tau_z + d_{26}\tau_x \\ P_z &= d_{31}\sigma_x + d_{32}\sigma_y + d_{33}\sigma_z + d_{34}\tau_y + d_{35}\tau_z + d_{36}\tau_x \end{aligned} \quad (11.6)$$

Coeficienții piezoelectrice d_{ij} , din cadrul relațiilor (11.6) se determină experimental pentru fiecare cristal în funcție de materialul care se află la baza compoziției sale. Pentru principalele materiale piezoelectrice, valoarea piezomodulului este dată în tabelul 2.6.

Tabelul 2.6

Nr. Crt.	Denumirea materialului piezoelectric	Valori piezomodul d_{ij} [pC/N]
1	Cuarț SiO_2	$d_{11} = 2,31$; $d_{14} = 0,7$
2	Sulfură de Cadmiu CdS	$d_{15} = -14$; $d_{33} = 10,3$; $d_{31} = -5,2$
3	Oxid de Zinc ZnO	$d_{15} = -12$; $d_{33} = 12$; $d_{31} = -4,7$
4	Titanat de Bariu BaTiO_3	$d_{15} = 400$; $d_{33} = 100$; $d_{31} = -35$
5	Niobat de Lithiu LiNbO_3	$d_{31} = -1,3$; $d_{33} = 18$; $d_{22} = 20$; $d_{15} = 70$
6	Sarea Rochelle la 34°C	$d_{14} = 345$; $d_{25} = 54$; $d_{36} = 12$

3. Efectul capacitiv

Se bazează pe modificarea capacității electrice între 2 suprafețe atunci când se modifica distanța dintre suprafețe, aria comună celor două suprafețe sau dielectricul dintre cele două suprafețe, în conformitate cu relația:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A}{d} \quad [\text{F}] \quad (12.6)$$

unde: ε_0 este permitivitatea electrică a vidului ($\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$), ε_r este permitivitatea relativă a dielectricului introdus între plăci, d este distanța dintre cele două suprafețe iar A este aria comună celor două suprafețe.

În fig. 5.6 sunt prezentate cele 3 variante de modificare a capacității: modificarea distanței dintre armături (a), modificarea ariei comune (b) și modificarea permitivității electrice prin introducerea unui dielectric ε_r (c).

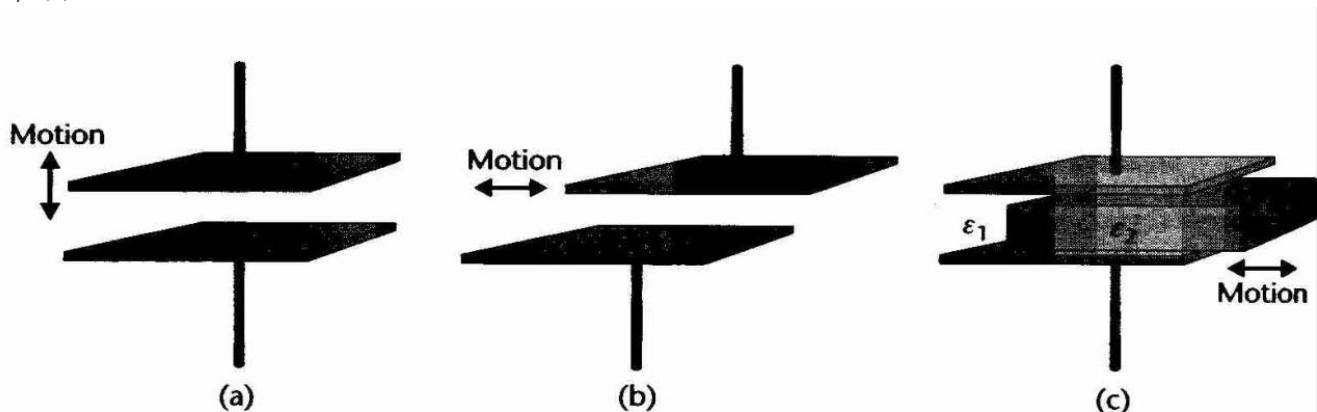


Fig. 5 Metode de modificare a capacității electrice între două plăci

4. Efecte optice

Lumina, ca undă electromagnetică poate influența un senzor prin următoarele marimi caracteristice:

- Intensitate;
- Poziție spațială;
- Fază;
- Frecvență;
- Lungime de undă;
- Polarizare.

Intensitatea luminoasă poate fi sesizată cu ajutorul unor detectori optici (fotodiode, fototransistori).

Sursa de lumina poate fi o dioda emițătoare de lumină (LED) fig. 6.6, rază de laser sau lumină de la un bec cu incandescență. Principalul dezavantaj al utilizării intensității luminoase constă în variația intensității luminoase ca urmare a numeroși factori (timp, temperatură etc.).

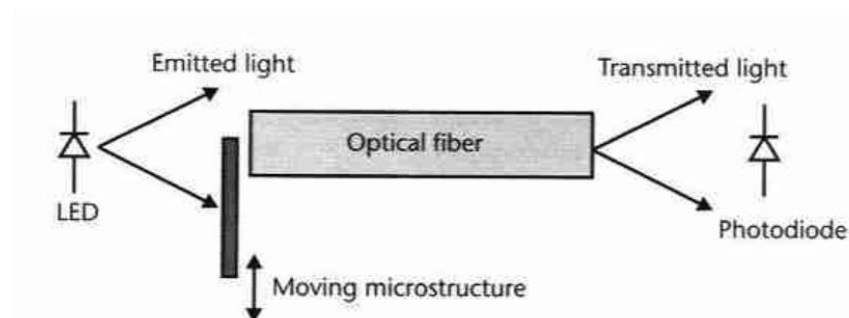


Fig. 6.6 Modificarea intensității luminoase prin obturarea parțială sau totală

Poziția spațială (sau **metoda triunghiulației**) se bazează pe utilizarea razelor de lumină reflectate ca în fig. 7.6. Această metodă prezintă avantajul că nu depinde de intensitatea luminoasă.

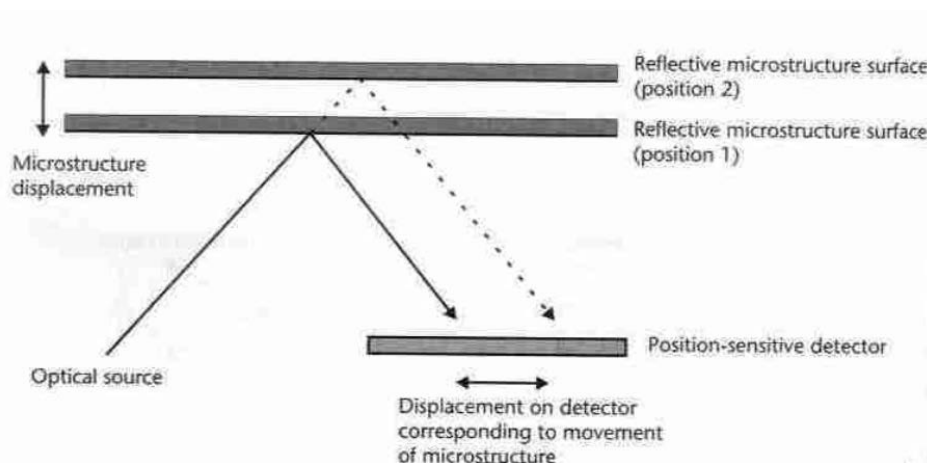


Fig. 7.6 Metoda triunghiulației

Variațiile de fază a undelor luminoase nu pot fi sesizate direct de către fotodetector. Pentru sesizarea variațiilor de fază se utilizează un interferometru care combină raze luminoase ce au interacționat cu microsenzorul cu raze luminoase care nu au interacționat cu microsenzorul.

Modificarea frecvenței razei de lumină poate fi utilizată pentru microsenzori pentru sesizarea vitezei de deplasare a unui obiect. Astfel, conform efectului Dopler, frecvența unei raze de lumină reflectate de un obiect aflat în mișcare cu viteza v este dată de relația:

$$f_1 = f \cdot \left(1 - \frac{v}{c}\right)^{-1} \quad (13.6)$$

unde f_1 este frecvența luminii reflectate, f este frecvența luminii incidente iar c este viteza luminii în vid.

B. SOLUTII CONSTRUCTIVE DE MICROSENZORI

Microsenzori de presiune

Pentru sesizarea presiunii, microsenzorii au la bază următoarele procese:

- deformarea elastică a unei membrane sub acțiunea presiunii și măsurarea tensiunilor în membrană prin efect de piezorezistivitate;
- modificarea capacității electrice prin deplasarea relativă a două suprafețe;
- efect piezoelectric.

1. Microsenzor de presiune bazat pe efect piezorezistiv

Microsenzorul de presiune cu efect piezorezistiv este prezentat schematic în fig. 8.6.a . Schematic, tehnologia de fabricație este dată în fig. 8.6.b.

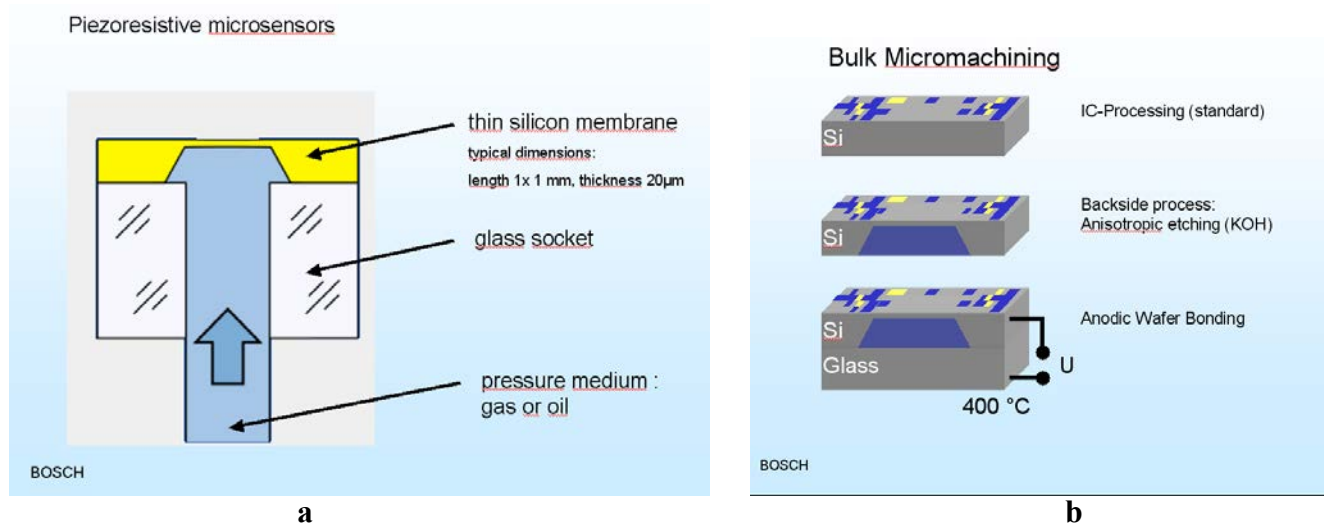


Fig. 8.6 Microsenzor de presiune

Membrana elastică este realizată din plăcuță de siliciu (cu dimensiunile 1x1x0,020 mm) în care s-a corodat forma de trunchi de piramidă. Plăcuța de siliciu este fixată pe un suport. Pe suprafața plăcuței din siliciu sunt implantate 4 microrezistențe (2 rezistențe laterale R_l și 2 rezistențe transversale R_t) ce joacă rol de traductori piezorezistivi (fig.9.6). Traductorii piezorezistivi sunt așezați la marginea zonei corodate, unde tensiunile create de presiune sunt maxime.

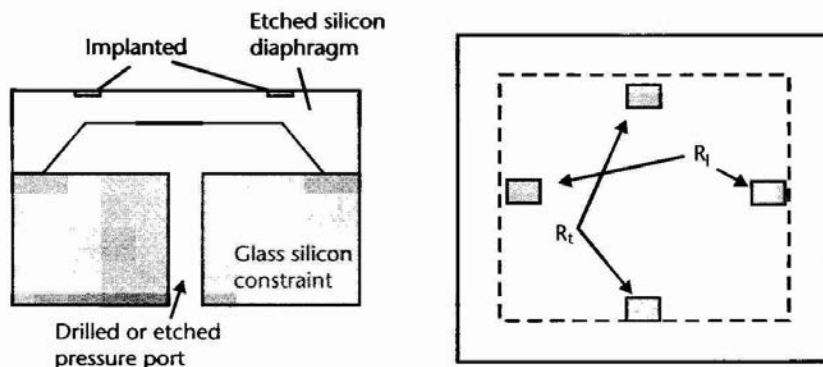


Fig. 9.6 Montarea traductorilor piezorezistivi pe membrana elastică

Microsenzorul este introdus într-o carcasă metalică vidată, așa cum se poate vedea în fig. 10.6, unde este prezentat schematic senzorul de presiune realizat pentru automobile de firma Bosch – Germania.

Working Principle

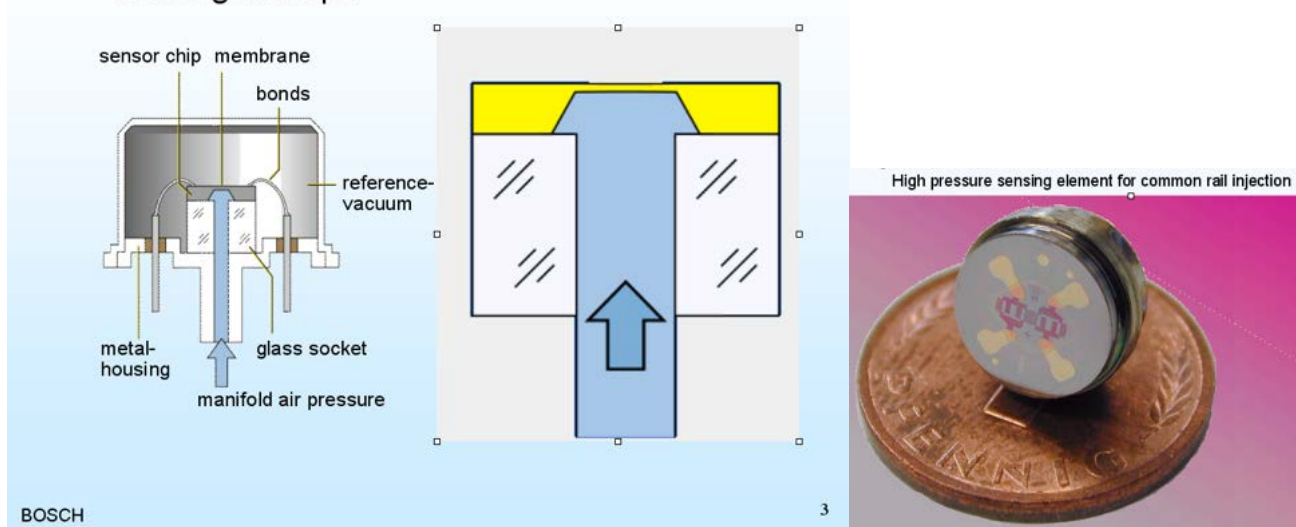


Fig. 10.6 Senzor de presiune produs de firma Bosch

2. Microsenzorii de presiune capacitivi

Microsenzorii de presiune capacitivi au la bază modificarea distanței (și implicit a capacității electrice) dintre 2 microelectrozi dintre care unul este fix iar celălalt este montat pe o membrană flexibilă ce se deformează atunci când acționează presiunea, fig. 11.6

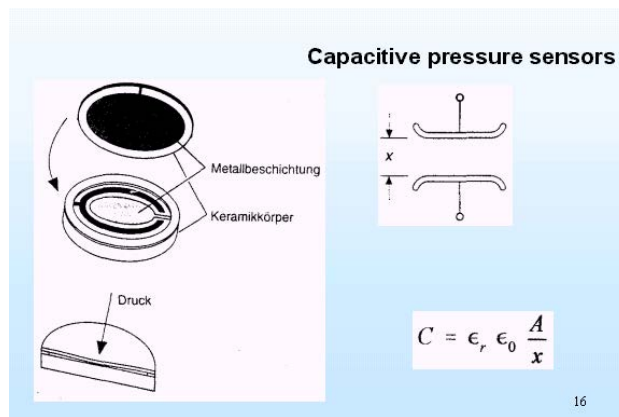


Fig. 11.6 Microsenzor de presiune capacitiv

Un model performant de microsenzor capacitiv este prezentat în fig. 12.6 a, pentru presiuni de 0 – 8 bar (realizat la University of Southampton Institute of Transducer Technology- Anglia). Microsenzorul cuprinde două plăcuțe din siliciu, una plată și cea superioară ondulată prin procedeul de corodare anisotropă. Între cele două plăcuțe se poziționează un strat de SiO₂, strat a cărui grosime dictează spațiul dintre cele două plăcuțe și, implicit, capacitatea electrică. Dimensiunile acestui microsenzor sunt indicate în fig. 12.6-b, cu următoarele valori: H_t=200μm, E_l=200μm, E_d=100μm, R=750μm, H_l=800μm, H_g=100μm, D_l=1500μm, G=2μm. Cele două plăcuțe au forma pătrată iar cele două canale sunt tot sub formă de pătrate concentrice, așa cum se poate vedea în fig. 13.6.

a)

b)

Fig. 12.6 Microsenzor de presiune capacitiv

Fig. 13.6 Microsenzor de presiune capacitiv în stare montată

Microsenzori inerțiali

Sunt destinați sesizării accelerației în mișcare liniară după una sau mai multe direcții (accelerometru) precum și pentru sesizarea mișcării unghiulare după una sau mai multe axe (giroscop).

Au numeroase aplicații în industria automobilului (airbeg, suspensii active, controlul tracțiunii), în industria militară și aerospațială pentru ghidarea inerțială, în monitorizarea pacienților bolnavi de Parkinson, etc.

Microsenzorul de accelerație se bazează principal pe schema din fig. 14.6. O masă m este legată de suport prin intermediul unui element elastic având constanta de elasticitate k_m și prin intermediul unui sistem de amortizare având constanta de amortizare b_m .

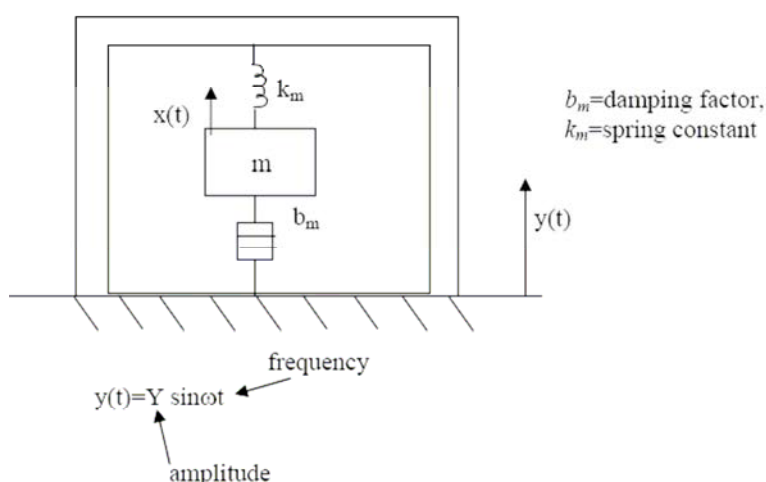


Fig. 14.6 Schema de principiu a unui microsenzor de accelerație

Orice modificare a vitezei sistemului, pe direcția de oscilație a masei m va induce o forță de inerție

$$\mathbf{F} = \mathbf{m} \cdot \mathbf{a}, \text{ forță care va scoate din echilibru masa } \mathbf{m}.$$

Sesizarea forței de inerție poate fi făcută prin diverse procedee:

- ◆ Capacitiv, prin modificarea unui interstitiu dintre masă și un reper fix.
- ◆ Piezoresistiv prin măsurarea tensiunilor din elementul elastic;
- ◆ Piezoelectric pe baza comprimării elementului elastic;

În fig. 15.6 sunt prezentate schematic două variante de senzori de accelerație: unul care utilizează metoda piezorezistivității și un alt microsenzor care utilizează metoda capacitivă.

Metoda piezorezistivității presupune utilizarea unor traductori piezorezistivi în zona sollicitată mecanic a elementului elastic.

Metoda capacitivă presupune utilizarea a două capacități (C_1 și C_2 în fig. 15.6) astfel încât mișcarea de vibrație a masei inerțiale modifică diferențial cele 2 capacități, în timp ce distanța d_1 dintre plăcile condensatorului C_1 se micșorează, distanța d_2 dintre plăcile condensatorului C_2 se mărește ca în fig. 16.6.

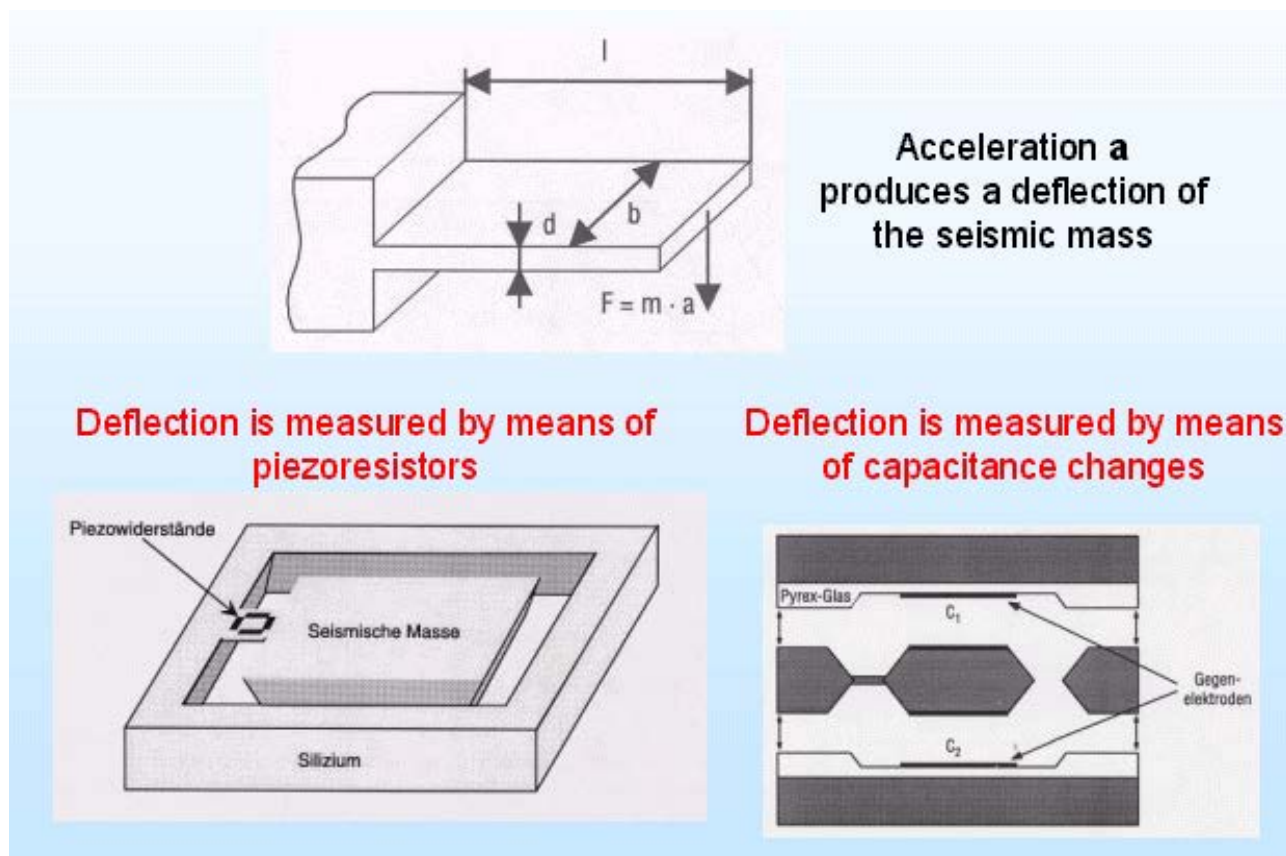


Fig. 15.6 Schemele de principiu pentru doi senzori de accelerație : unul funcționând prin efect piezoresiv și altul funcționând prin modificarea capacității

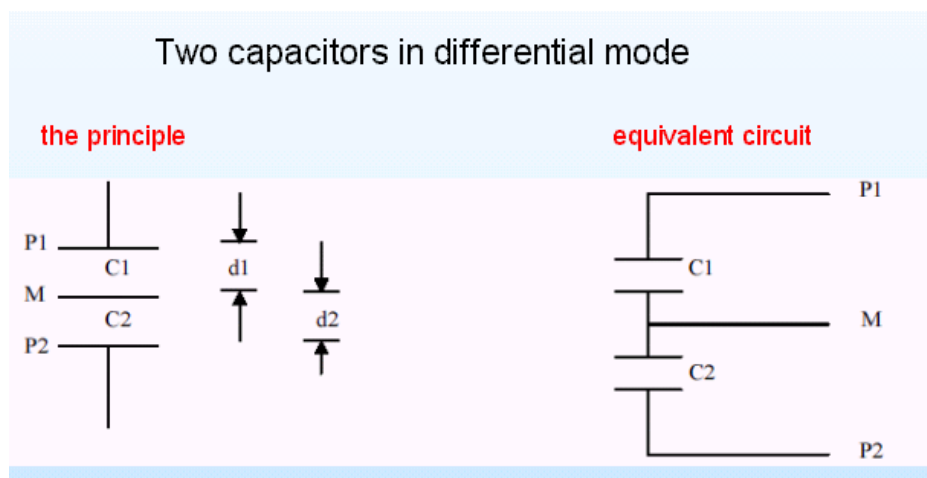


Fig.16.6 Schema de funcționare a microsenzorului de accelerație capacitiv

Un microsenzor de accelerație realizat de firma Bosch – Germania și care utilizează metoda capacitivă este prezentat în fig. 17.6.

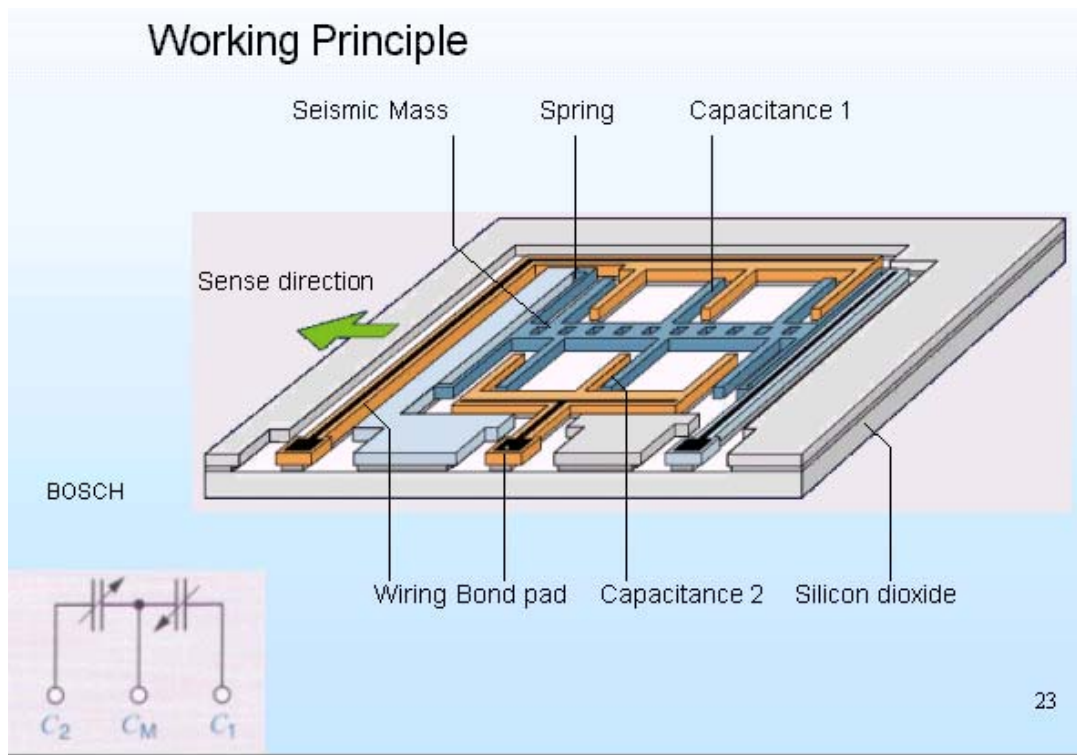


Fig. 17.6 Microsenzor de accelerație realizat de firma Bosch

Masa seismică centrală este rezemată la capete pe lamele elastice iar în zona centrală se realizează cei doi condensatori C_1 și C_2 . Întreaga structură este realizată prin tehnologia de prelucrare a plăcuțelor de siliciu, cu depuneri și corodări adecvate forme finale impuse.

Pentru creșterea sensibilității se pot utiliza mai mulți condensatori sub formă de lamele paralele realizate prin tehnologii specifice de microfabricație a plăcuțelor de siliciu.

De asemenea, așezarea condensatoarelor pe două direcții permite detectarea accelerației pe două direcții, așa cum este prezentat microsenzorul de accelerație bidirecțional din fig. 18.6.

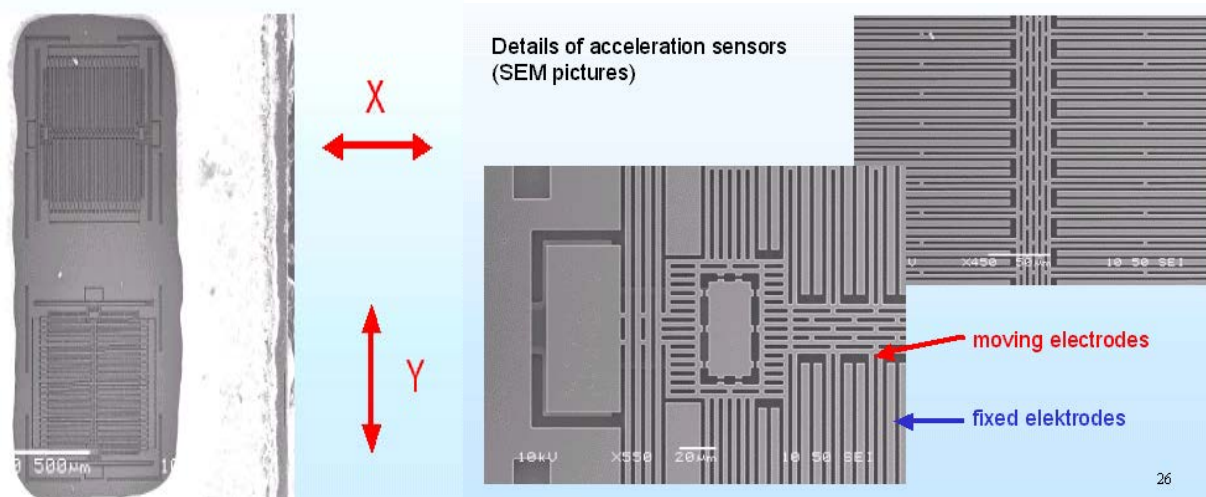


Fig. 18.6 Microsenzori inerțiali pe două direcții

CAPITOLUL VII

MICROACTUATORI

Funcția de execuție într-un sistem (microsistem) mecatronic constă din inițierea, controlul și realizarea interacțiunii mașinii cu mediul, pe baza instrucțiunilor primite de la funcția de cunoaștere. Funcția de execuție se realizează prin intermediul actuatorilor (microactuatorilor).

Acționarea are la bază, în general, trei tipuri de interacțiuni: interacțiunea câmpurilor, interacțiunea mecanică și deformații limitate ale unor materiale.

1. Microactuatori funcționând pe baza interacțiunii câmpurilor se bazează pe interacțiuni ale câmpurilor magnetice, ale câmpurilor electrice cu câmpuri magnetice, ale sarcinilor electrice: micromotoare rotative de curent continuu, de curent alternativ asincrone și sincrone, micromotoare electrostatice, micromotoare liniare de curent continuu, microelectromagneți, microîntrerupătoare etc.

2. Microactuatorii care se bazează pe deformații limitate ale unor materiale au în componența lor, ca element activ un material “inteligent”- material care are capacitatea de a se deforma controlat (lamele, discuri, membrane, arcuri elicoidale și spirale etc.). Deformațiile limitate ale acestor materiale inteligente pot fi transformate în mișcări continue cu ajutorul unor mecanisme (mecanisme cu clichet, cu roți dințate, șurub - piuliță etc.).

În funcție de semnalul de intrare, deformațiile limitate pot fi realizate prin mai multe procedee:

- prin flux termic, în cazul bimetalelor și a aliajelor cu memoria formei;
- prin comandă electrică, în cazul microactuatorilor piezoelectrice și a microactuatorilor electroreologici;
- prin comandă magnetică, în cazul microactuatorilor magnetorestrictivi și a microactuatorilor pe bază de ferrofluide;
- prin comandă optică, în cazul microactuatorilor termo-electro-fotorezistivi și a microactuatorilor piro-piezoelectrice;
- prin comandă chimică.

3. Microactuatorii funcționând pe baza interacțiunilor mecanice au la bază transmiterea energiei pe baza unui fluid sau gaz care acționează asupra unor elemente mecanice (pistonase, membrane, tuburi flexibile etc.) asigurând realizarea unui lucru mecanic: micropompe, micromotoare cu palete, microcilindri etc.

1. Micromotoare electrice

Principiul de funcționare este cel întâlnit la motoarele electrice clasice cu circuit de curent electric în câmp magnetic.

Elementele componente (rotor, stator, lagăre pentru rezemare) sunt realizate din structuri pe bază de siliciu, fabricate cu tehnologiile specifice. În fig. 1.7 se prezintă schema de fabricație a unui micromotor electric iar în fig. 2.7 și 3.7 se prezintă două scheme de micromotoare.

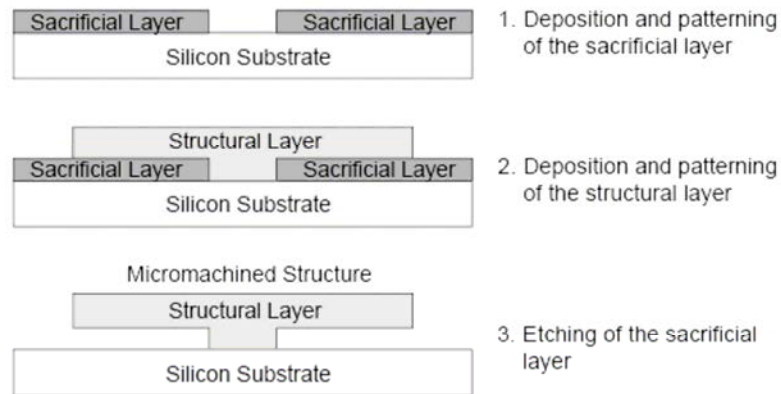


Fig. 1.7 Schema de fabricație pentru un micromotor electric cu elemente pe bază de siliciu

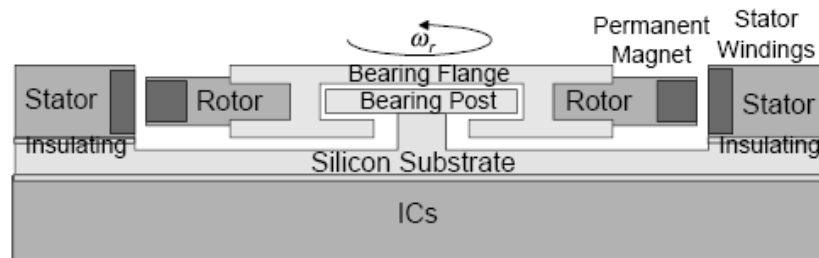


Fig. 2.7 Secțiune printr-un micromotor

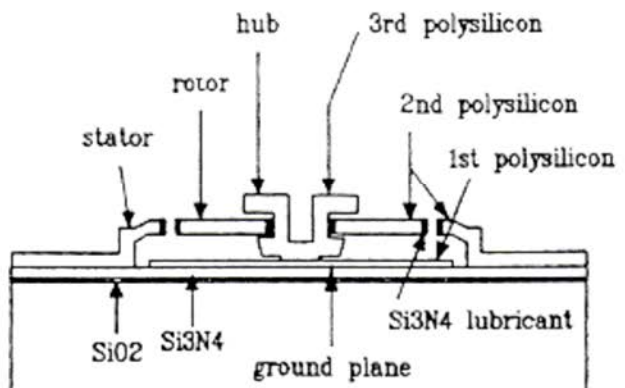
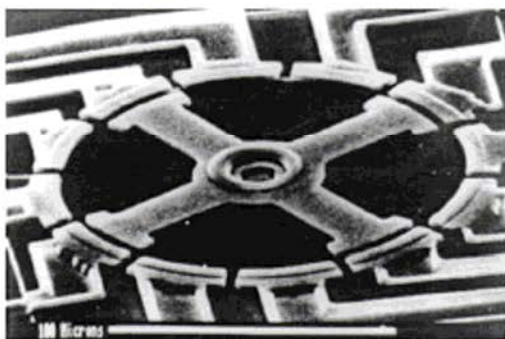


Fig. 3.7 Micromotor cu capacitate variabilă cu elemente pe bază de siliciu

Pe lângă micromotoarele rotative există o diversitate de microactuatori acționați prin **câmp magnetic**, care realizează mișcări limitate. Un microactuator magnetostatic este prezentat în fig.4.7.

Magnetostatic Actuator

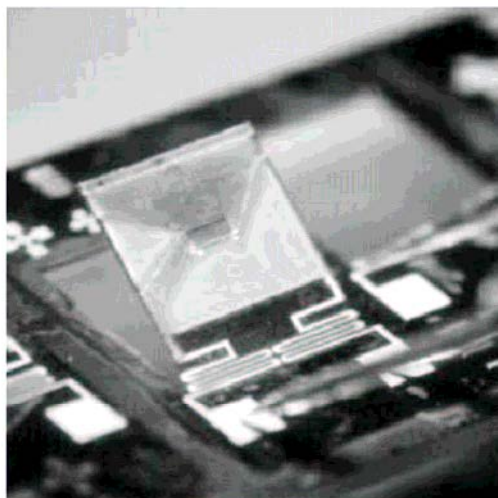
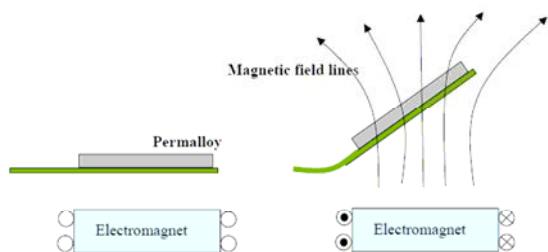


Fig. 4.7 Microactuator magnetostatic

O altă soluție constructivă de microactuator magnetostatic este prezentată în fig. 5.7, cu deformarea elastică a unei membrane.

Magnetostatic Actuator

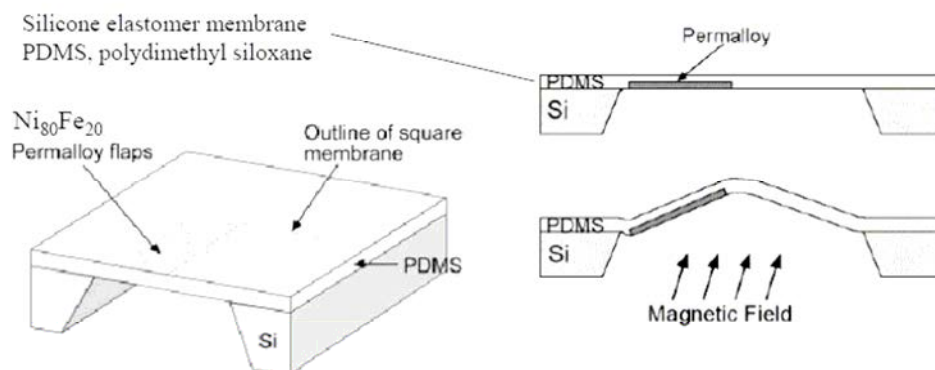


Fig. 5.7 Microactuator magnetostatic cu membrană

Un alt exemplu de microactuator magnetic este motorul liniar din figura 6. Magnetul rămâne în canal, el fiind ridicat și mișcat în față și în spate schimbând direcția curentului prin înfășurările rotorului de aceeași parte în timp util.

Fig. 6.7 Actuator liniar cu câmp electromagnetic

La dispozitivul din figura 6.7 o problema comuna care poate sa apara in cazul actuatorilor magnetici este faptul ca infasurarile sunt supradimensionate (este foarte greu de miniaturizat trei infasurari considerabile ca dimensiuni). Dezavantajul actuatorilor magnetici este acela ca au dimensiuni mari si sunt mari consumatori de energie.

2. Microactuatori electrostatici

Au la bază forțele electrostatice ce se dezvoltă între două suprafețe aflate la distanță foarte apropiată una de alta, fig. 7.7

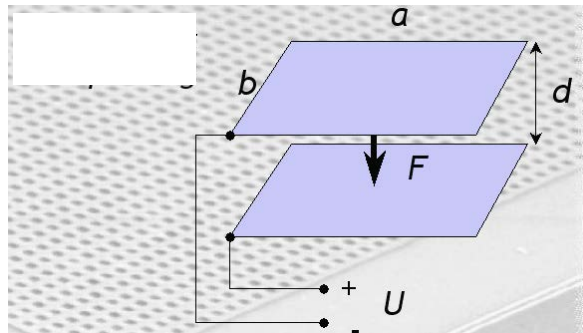


Fig. 7.7 Principiul de dezvoltare a forței electrostatice între două plăcuțe supuse unei tensiuni electrice

Astfel, între 2 placuțe cu dimensiunile $a \times b$, aflate la distanța d una față de cealaltă și supuse unei tensiuni electrice U se dezvoltă o energie potențială W dată de relația:

$$W = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{a \cdot b}{d} \cdot U^2$$

în care termenul $\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{a \cdot b}{d}$ reprezintă capacitatea electrică C dintre cele două plăci, ϵ_r este permitivitatea relativă a materialului dintre plăci iar ϵ_0 este permitivitatea electrică a vidului ($\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m).

Pe direcția normală la cele două suprafețe acționează o forță de atragere F dată de relația:

$$F = -\frac{\partial W}{\partial d} = \frac{1}{2} \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{a \cdot b}{d^2} \cdot U^2$$

Exemplul 1 :

$$a = b = 2 \text{ mm}$$

$$d = 5 \text{ } \mu\text{m}$$

$$U = 12 \text{ V}$$

$$\epsilon_r = 1$$

Rezultă o forță de atracție $F = 0.1 \text{ mN}$.

Pe direcția laterală, conform fig. 8.7, acționează o forță F^* dată de relația:

$$F^* = -\frac{\partial W}{\partial a} = -\frac{1}{2} \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{b}{d} \cdot U^2$$

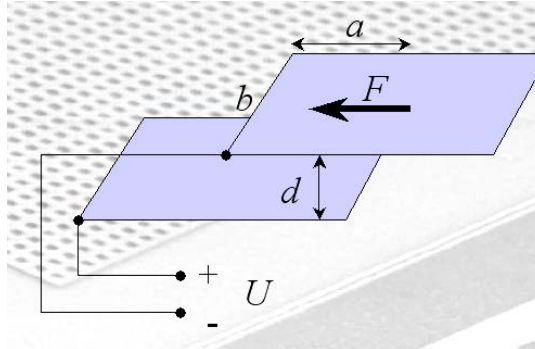


Fig. 8.7 Principiul de dezvoltare a forței electrostatice laterale

Exemplul 2:

$a = 1 \text{ mm}$

$b = 2 \text{ mm}$

$d = 5 \text{ }\mu\text{m}$

$U = 12 \text{ V}$

$\epsilon_r = 1$

Rezultă o forță laterală $F^* = 0.3 \text{ }\mu\text{N}$

3. Microactuatori electrostatici interdigitali

Pe principiul forței electrostatice laterale funcționează microactuatorii electrostatici tip “**pieptene**” sau microactuatori interdigitali (**Comb micro actuators**). Acești microactuatori cuprind două structuri de tip pieptene, una staționară și una mobilă cu electrozi ce se întrepătrund ca în fig. 9.7-a. Structura mobilă este ancorată printr-un sistem de lamele elastice care permit deplasarea laterală (fig. 9.7-b).

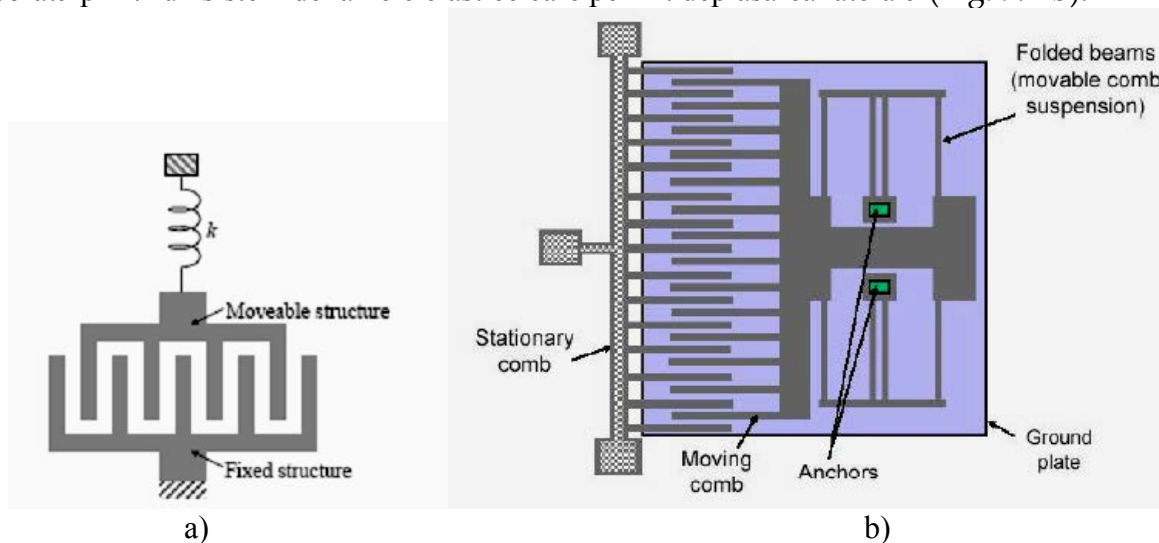


Fig. 9.7 Microactuator electrostatic tip pieptene

În cazul microactuatoarelor tip pieptene cu N electrozi, forța laterală generată de câmpul electrostatic (F_E) este dată de relația:

în care b reprezintă lăţimea electrozilor iar d reprezintă distanţa dintre electrozi.



Aşa cum este prezentată în fig. 10.7, forţa electrostatică tinde să atragă electrozii mobili iar acestei forţe i se opune forţa elastică F_M dată de relaţia:

unde k este constanta de elasticitate a elementului elastic iar X reprezintă apropierea electrozilor.

La echilibru cele două forțe devin egale și din această egalitate se poate determina deplasarea relativă a electrozilor pentru o geometrie dată și pentru o tensiune electrică impusă:

Fig. 11.7 Funcționarea unui microactuator de tip pieptene

În cazul unei structuri elastice realizată din două lamele încastrate, ca în fig. 11.7, constanta de elasticitate k este dată de relația:

$$k = \frac{E \cdot b^3 \cdot h}{L^3}$$

unde E este modulul de elasticitate al lamelelor elastice, b este lăţimea lamelelor, h este grosimea lamelelor iar L este lungimea lamelelor.

Microactuatoarii electrostatici de tip pieptene pot funcţiona **uni- sau bidirecţional**, ultimul caz fiind prezentat schematic în fig. 12.7. Astfel, în funcţie de polaritatea aplicată la electrozii ficeşi (pozitivă în stânga şi negativă în dreapta) şi de polaritatea la electrozii mobili se poate obţine *staţionare* (polaritate zero pe electrozii mobili, fig. 12.7-a, *deplasare la stânga*, fig. 12.7-b (polaritate negativă la electrozii mobili) sau *deplasare la dreapta*, fig. 12.7-c (polaritate pozitivă pe electrozii mobili).

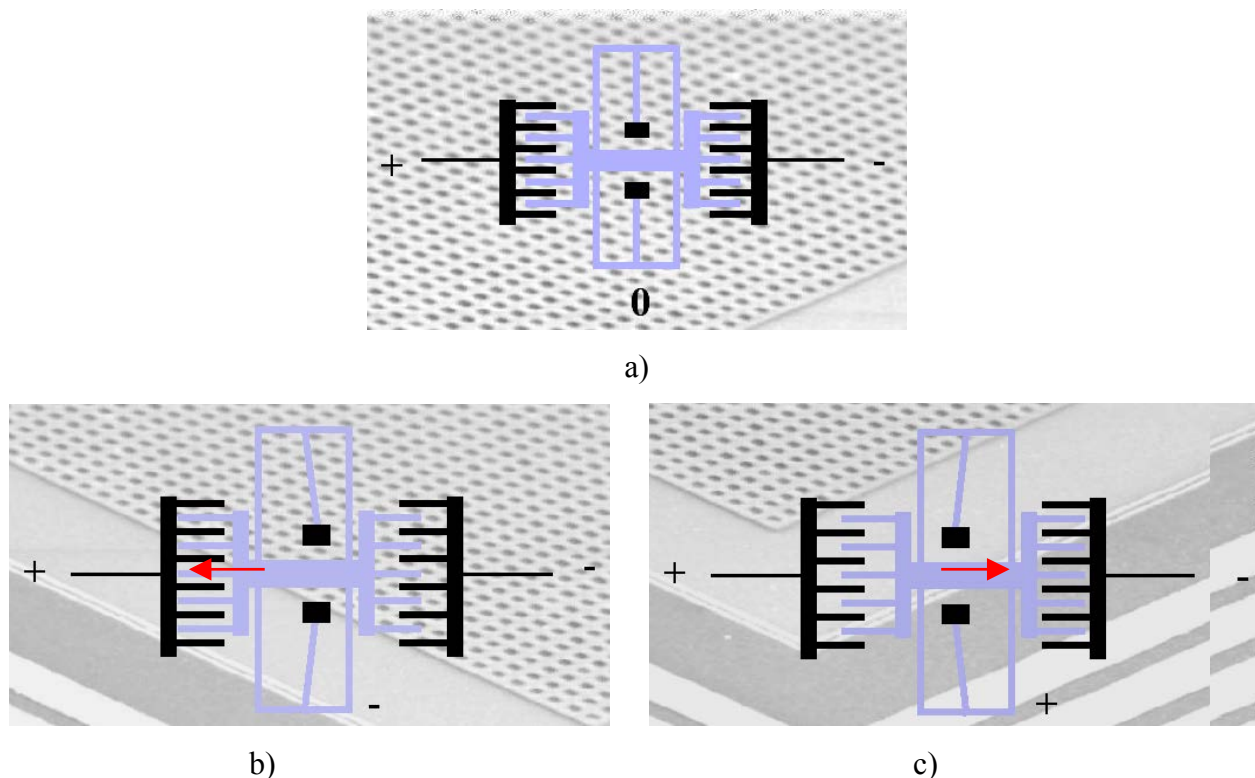


Fig. 12.7 Principiu de funcționare a unui microactuador tip pieptene bidirecțional

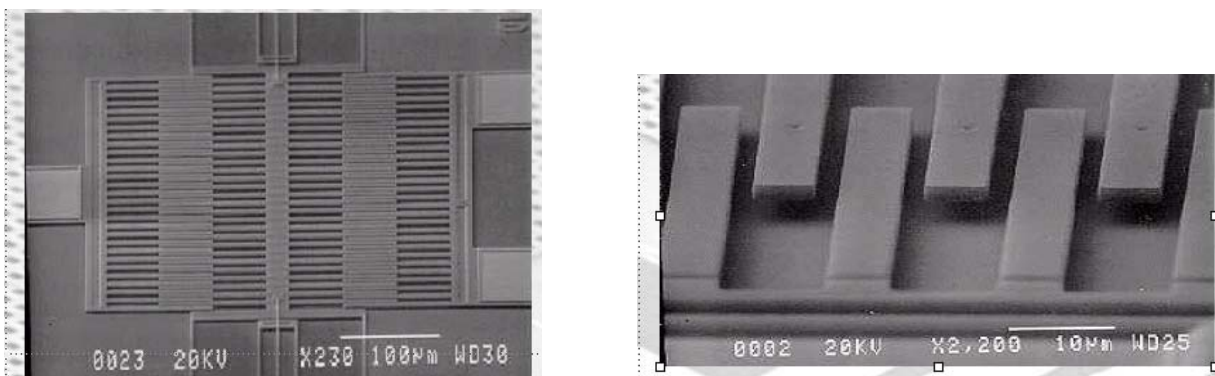


Fig. 13.7 Imagine la microscop cu evidențierea dimensiunilor lamelelor interdigitale

În fig. 13.7 este prezentat un microactuador electrostatic tip pieptene, bidirecțional realizat de firma **Cronos Integrated Mikrosystems Inc.** cu următoarele caracteristici tehnice:

Deplasarea maximă $X = 4 \cdot 10^{-2} \cdot U^2 [\mu m]$;

Forța dezvoltată $F = 50 \cdot U^2 [pN]$, unde tensiunea U este dată în volți.

4. Micromotoare rotative electrostatice

Micromotorul rotativ electrostatic prezentat în fig. 14.7 are rotorul cu diametrul de 0,13 mm și este pus în mișcare de rotație de forțele de atracție electrostatice dezvoltate între rotor și stator.

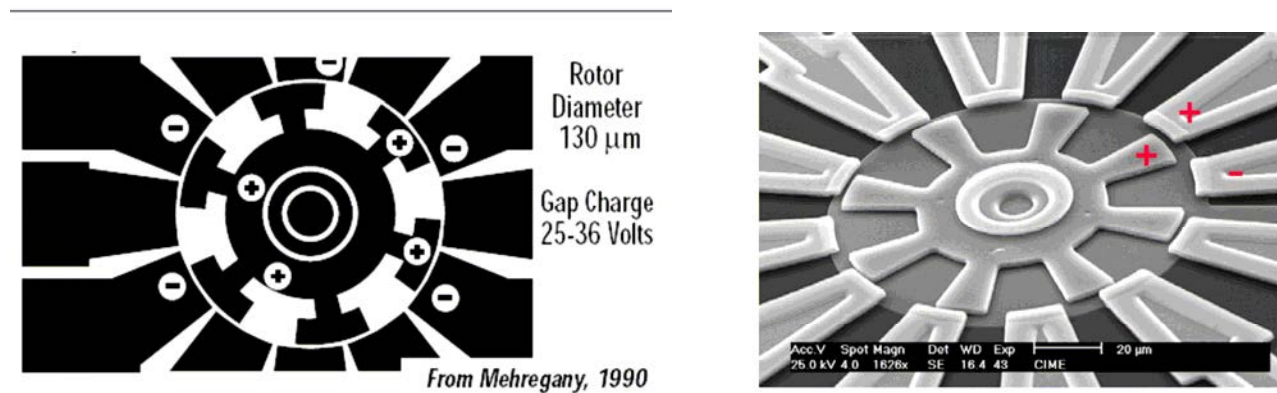


Fig. 14.7 Micromotor rotativ electrostatic

Frechete et.al, 2001 au dezvoltat un micromotor electrostatic cu rezemarea rotorului pe un microlagăr axial cu gaz. Rotorul are diametrul de 4,2mm iar micromotorul a fost realizat prin tehnologia de microfabricație multistrat cu 5 straturi de polisiliciu, ca în figura 15.7

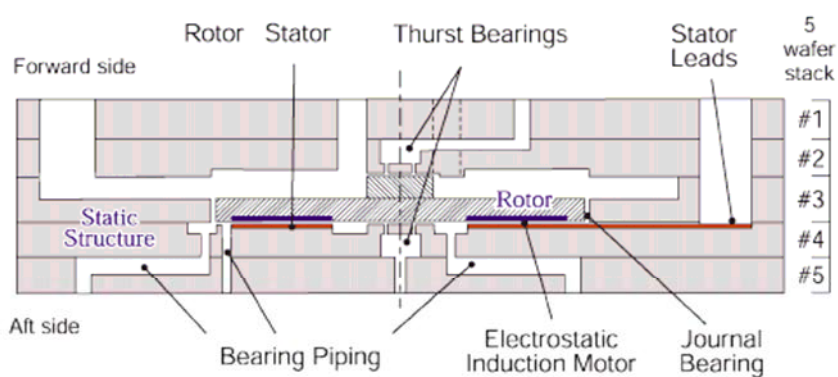


Fig.15.7 Secțiune prin micromotorul electrostatic construit de Frechete et al 2001

5. Microturbine rotative

Chee et. al, 2004 dezvoltă o microturbină cu un sistem de rezemare compus dintr-un lagăr axial autoportant (hidrodinamic sau gazodinamic) cu diametrul de 0,7 mm și un lagar radial. Microturbina a fost realizată prin tehnologia de microfabricație multistrat pe plăcuțe de siliciu, are un rotor cu diametrul de 4,2mm și este prezentată în fig.16.7

Microturbina poate dezvolta o turație de până la 450 000 rot/min și lagărul axial poate suporta o sarcină de până la 0,03 N.

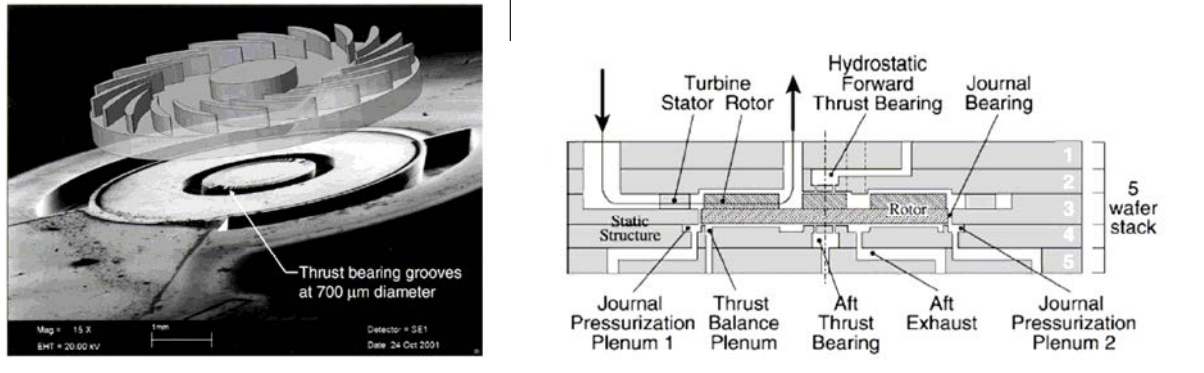


Fig.16.7 a) Vedere mărită la microscop a microturbinei; b) secțiune prin microturbină cu evidențierea celor două lagăre și a celor 5 straturi de polisiliciu rezultate din microfabricație

Waits M.C., et al. [Waits M.C., 2010] au realizat o **microturbopompă** constând dintr-o **microturbină** combinată cu o **micropompă** unde rotorul este rezemat în stator prin intermediul unui microrulment. În figura 17.7 se prezintă o secțiune prin microturbopompă, iar în figurile 18.7,19. sunt prezentate schematic microturbină și micropompa cu canale spirale. Microrulmentul de dimensiuni identice cu cele utilizate de Waits în 2009 a permis realizarea unor turații de până la 87000rot/min, asigurându-se o durabilitate de 3,8 milioane de rotații.

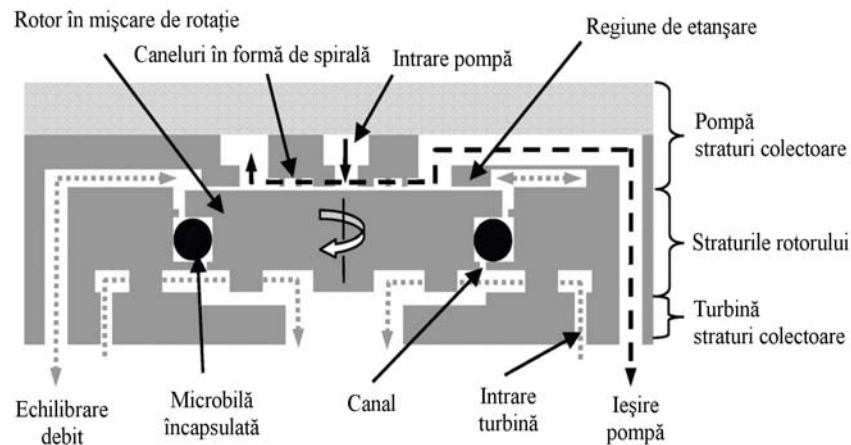


Fig. 17.7 microturbopompa cu reținare pe microtuburi [watts M.C., 2010]

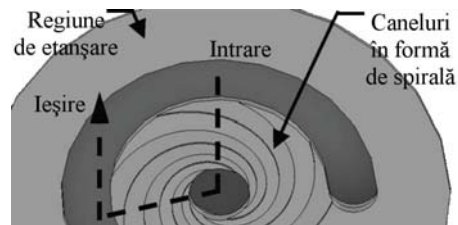
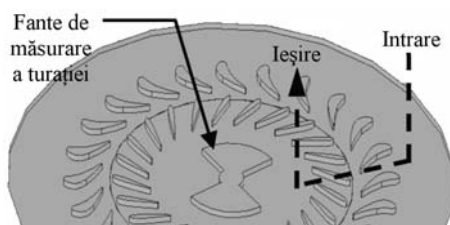


Fig.18.7 Microturbină [Waits, 2010]

Fig.19.7 Micropompă cu caneluri în formă de spirală [Waits, 2010]

6. Microîntrerupătoare electrostatic.

În fig.20.7 se prezintă schema de principiu și o imagine a unui microîntrerupător electrostatic iar în fig. 21.7 este prezentată tehnologia de fabricație.

Fig. 20.7 Microîntrerupător electrostatic

Fig. 21.7 Tehnologia de fabricație a unui microîntrerupător electrostatic

7. Microactuator electrostatic cu frecare

Conform schemei din fig.22.7 sub acțiunea câmpului electrostatic electrodul mobil este atras spre electrodul fix și, ca urmare a deformatiilor elastice și a frecării, apare o microdeplasare x a electrodului mobil. Operația se repetă rezultând în final o deplasare sacadată cu pasul x a electrodului mobil.

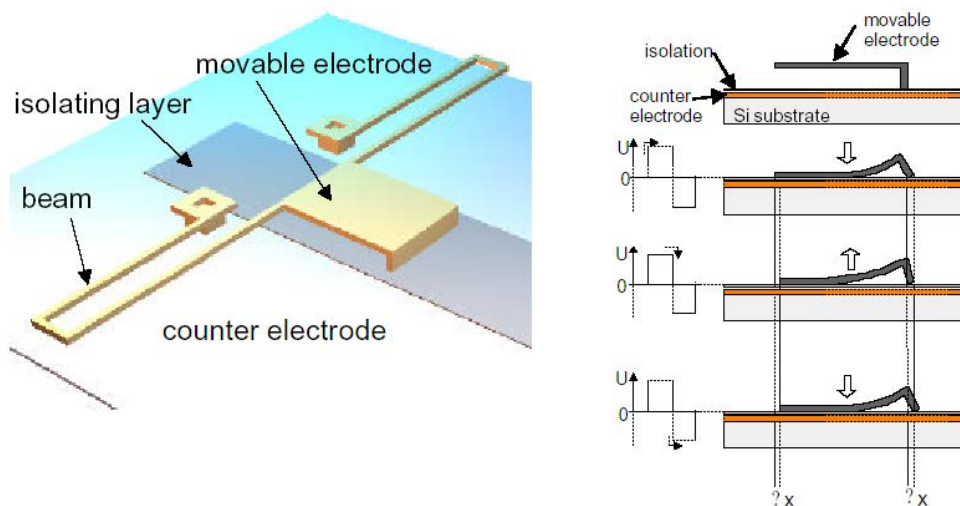


Fig. 22.7 Schema și principiul de funcționare a unui microactuator electrostatic cu frecare

8. Valve micro-pneumatice (FhG-IFT).

Sunt valve miniaturizate din polisiliciu ce au acționare electrostatică, utilizate în ventilația aerului. În fig. 23.7 este prezentată o soluție constructivă realizată de Fraunhofer IFT - Germania. Funcționarea se bazează pe deformarea elastică a diafragmei sub acțiunea forței electrostatice și deschiderea ventilului de intrare a fluidului în microcameră. Schimbarea polarității la electrozi conduce la îndepărtarea membranei și crearea unei presiuni în microcameră, cu deschiderea ventilului de ieșire.

Fraunhofer IFT

•Jahr:1995

•Medium: Flüssigkeit

•Systemgröße: 7*7*2 mm³

•Betriebsspannung:200 V

•Frequenz:1..1000 Hz

•Druckaufbau:31 kPa

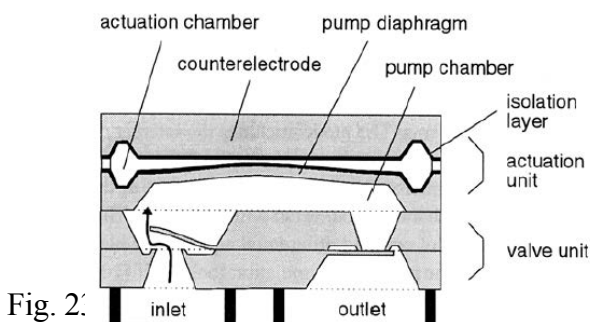


Fig. 23.7

În fig. 24.7 se prezintă un microventil de gaz acționat electrostatic și realizat de firma **Honeywell Inc.**

Anul de fabricație:1999

Mediu: Gaz

Dimensiuni 3.6*3.6 mm

Dimensiunile membranei: 350*390 μm²

Tensiunea de alimentare: 30V

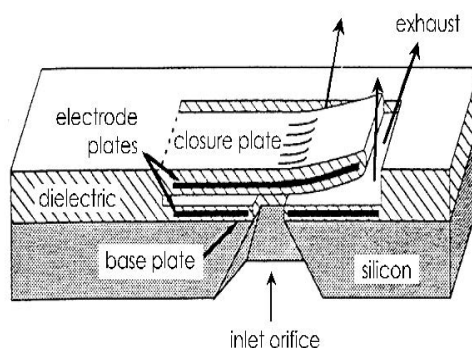


Fig. 24.7

9. Micro-Pompa piezoelectrică (FhG-IFT)

Membrane cu strat de material piezoelectric stau la baza realizării unor microvalve ce sunt folosite pentru a pompa fluide în sisteme microfluidice: **Micro-Pompa piezoelectrică (FhG-IFT)** realizată la Institutul Festkoerperstechnik (IFT) din Munich, figura 24.7. O piesă din material piezoelectric este atașată membranei fine de siliciu ce constituie mecanismul de acționare a pompei. Debitul micropompei poate fi ajustat de frecvența și amplitudinea tensiunii aplicate stratului de material piezoelectric.

a)

b)

Figura 24.7 a) Micropompa piezoelectrică (Sursa: FhG-IFT). b) Principiu de funcționare: o piesă din material piezoelectric ce acționează asupra diafragmei pompei de siliciu

Micropompa este folosită pentru diferite lichide (pe bază de apă, organice) și gaze. Are o mare aplicabilitate în domeniul medical, în special la dozarea medicamentelor din sânge. Prototipul are o dimensiune de 7x7x1 mm și poate pompa mai bine de 1 ml/min de lichid sau 3 ml/min de gaz.

10. Microactuatori hidraulici

În pofida problemelor asociate cu supapele neetanșe și garnituri (cazul numeroaselor sisteme microfluidice), actuatorii hidraulici sunt micromotoare acționate hidraulic și au un potențial considerabil, acela că pot genera destul de multă putere la o sursă externă în interiorul tuburilor capilare cu diametru foarte mic.

Figura 27.7 Exemple constructive de microactuatori hidraulici

Acești actuatori hidraulici au aplicații în domeniul instrumentarului de microchirurgie și sunt folosiți fixați în vârful unor tuburi catetere. La actuatorii hidraulici de tip turbină; structurile pot fi create folosind tehnologiile LIGA pentru fabricarea turbinelor (figura 28.7), care poate furniza putere la instrumentele de tăiere.

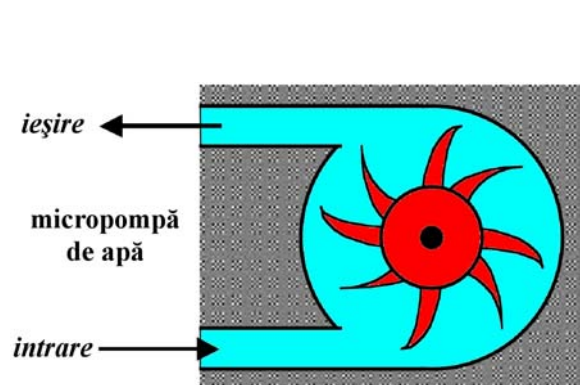


Figura 28.7 Actuatori hidraulici de tip turbină

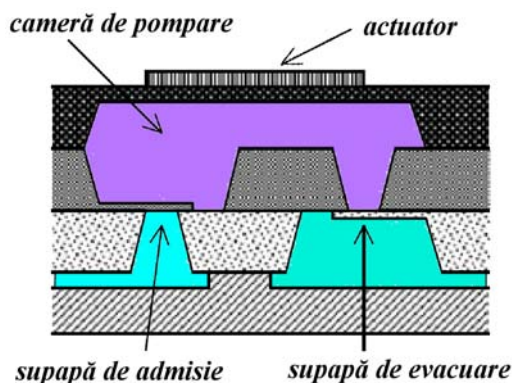


Figura 29.7 Dispozitiv microfluidic

În figura 29.7, dispozitivul microfluidic este construit prin lipirea a patru straturi prelucrate și formarea unui pachet (secțiune transversală); supapele de admisie și de ieșire sunt formate din grinzi de tip consolă, iar pompa (actuatoarea) creează o deformare a membranei pentru a modifica volumul din camera de pompare.

11. Microsisteme cu oglinzi mobile (Spatial Light Modulator – SLM)

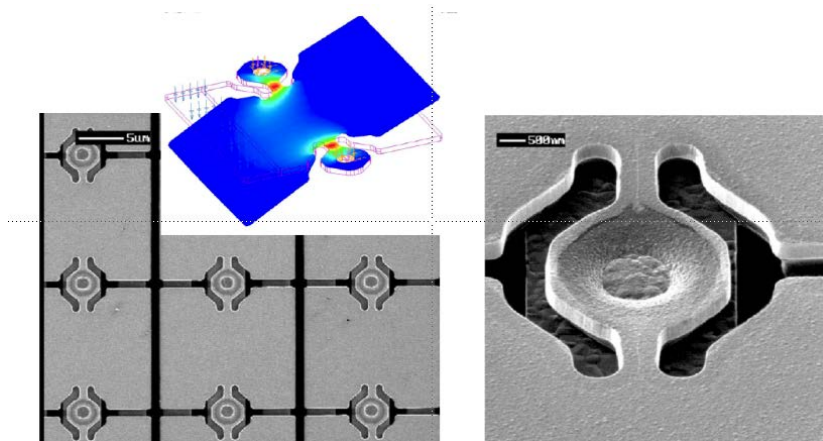


Fig. 30.7 Microsistem cu oglinzi mobile acționate electrostatic

În fig. 20 este prezentat un sistem Spatial Light Modulator, în care microplăcuțele cu rol de oglinzi sunt articulate elastic astfel încât se pot înclina cu un anumit unghi, funcție de forțele electrostatice care se dezvoltă. În funcție de polaritatea realizată plăcuțele sunt pot fi orientate diferențiat, reflectând razele luminoase (laser) în direcții prestabilite, ca în fig. 31.7.

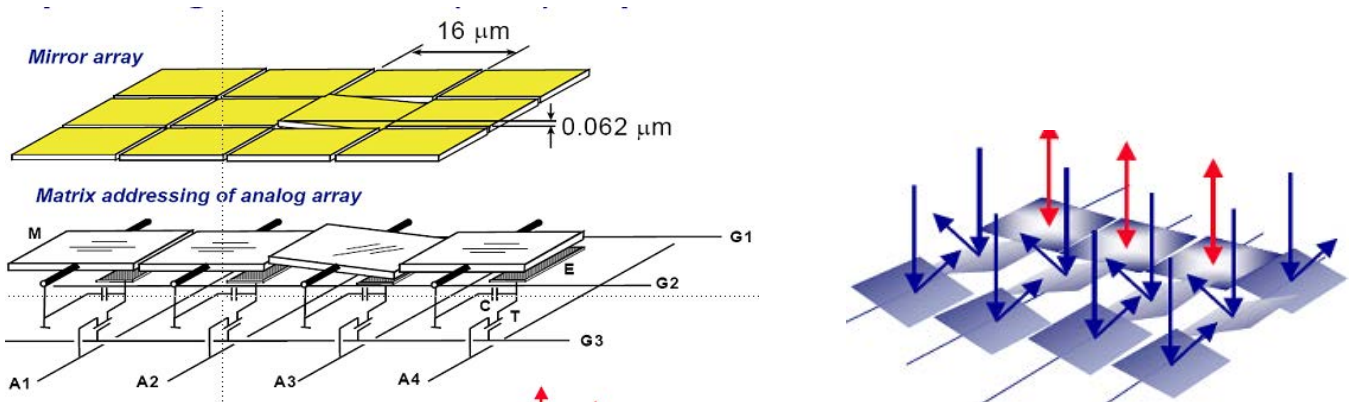


Fig. 31.7

12. Microactuatori termici.

Se bazează pe expansiunea termică liniară / expansiunea volumului sau schimbarea de fază. Microactuatoarii termici bimorfi utilizează diferențele dintre coeficienții de dilatare termică a materialelor din care sunt realizați.

12.1. Microactuatori tip Cilia

Sunt de tip bimorf, realizați în sisteme de câte 4 lamele de forma celei prezentate în fig.32.7-a. Fiecare lamelă este compusă din două straturi de poliamidă cu coeficienți diferiți de dilatare termică (Low – CTE polyimide și High – CTE Polyimide). Cele două straturi sunt depuse pe o plăcuță electrostatică din aluminiu și o microrezistență electrică TiW, fig. 32.7-b.

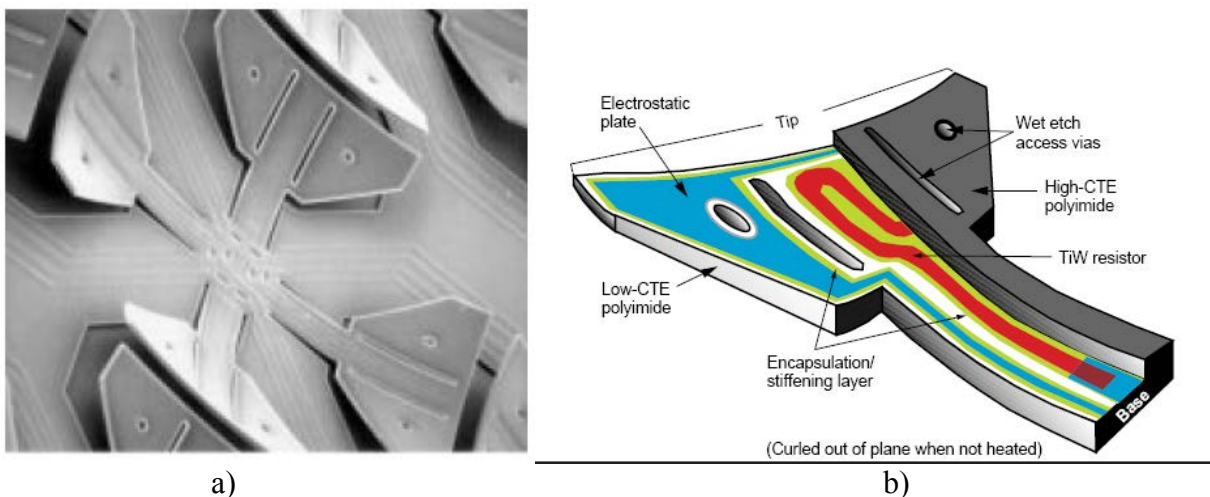


Fig. 32.7 Microactuator tip **Cilia**

Aționarea celor 4 lamele așezate ortogonal se face atât prin efect electrostatic cât și prin efect termic – prin încălzirea microrezistenței electrice cele două straturi de poliamidă se dilată diferențiat, rezultând modificarea poziției lamelor.

Constructiv există mai multe structuri cu câte 4 lamele ca în fig. 33.7 și 34.7. Modificarea controlată a pachetelor de 4 plăcuțe (notate simbolic N,E,W,S sau n, e, w,s după cum sunt ridicate sau culcate) permite deplasarea unei micropiese în diverse direcții. Astfel, în fig.33.7 este prezentată schema de mișcare a lamelor pentru o deplasare de la stânga la dreapta. Inițial plăcuțele sunt de tip **news** (adică, toate sunt culcate). În faza a II-a se ridică doar plăcuțele din direcția vest și se obține configurația **neWs** cu deplasarea spre dreapta. Urmează ridicarea lamelor din dreapta :**nEWs**, coborârea lamelor din stânga :**nEws** și în final, coborârea lamelor din dreapta **news**, cu o nouă deplasare spre dreapta.

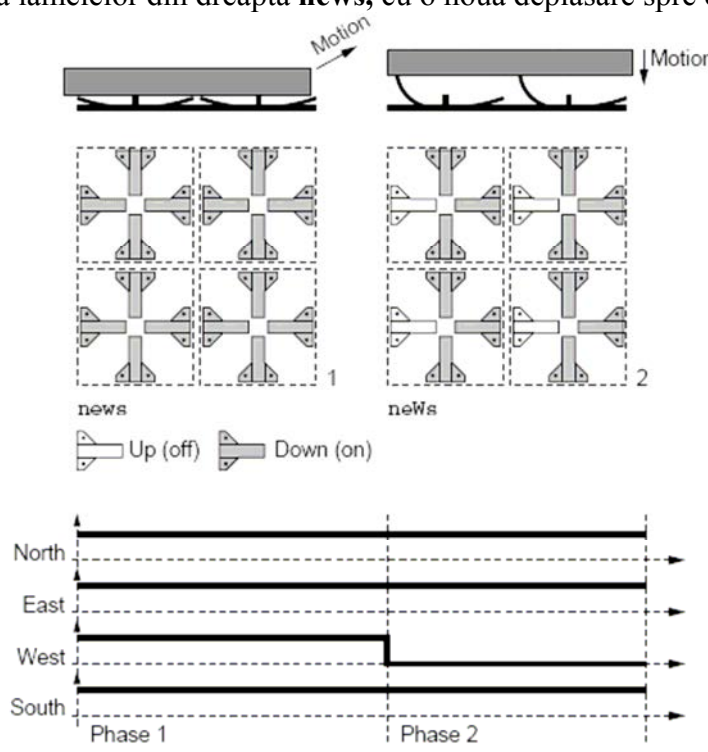


Fig. 33.7 Schema de deplasare a unei piese cu microactuatori de tip Cilia

În fig. 34.7 sunt prezentate cele 4 faze pentru o deplasare în diagonală: **news**, **neWS**, **NEWS**, **News**.

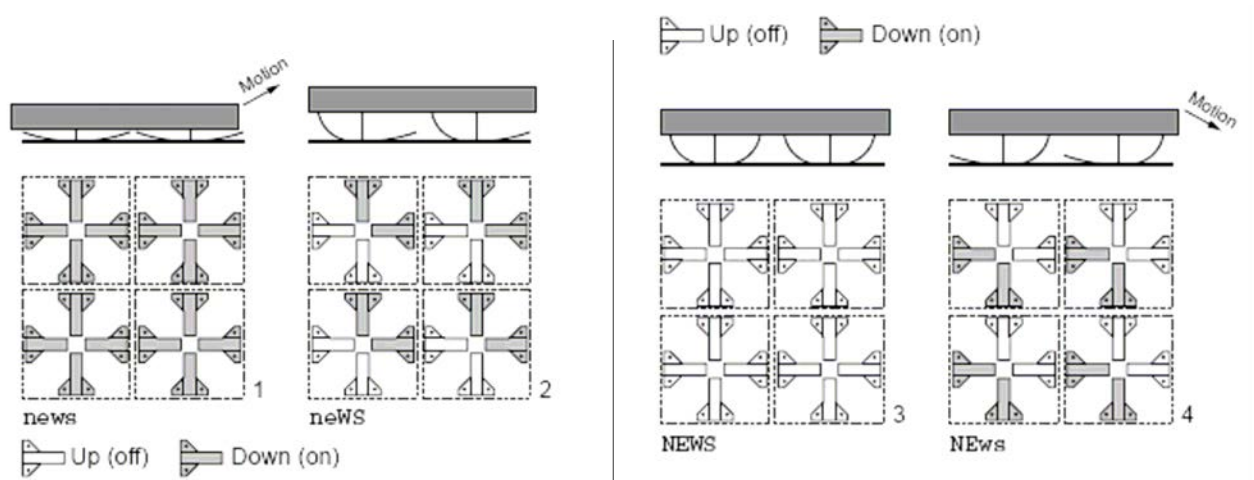


Fig. 34.7 Schema de deplasare a unei piese cu microactuatori de tip Cilia

12.2 Microactuatori care se bazează pe schimbarea de fază

Sunt cei mai răspândiți și sunt actuatorii bazati pe aliaje cu memoria formei ce utilizează aliaje care-și pot modifica dimensiunile prin tranziția materialului de la o formă a unei faze cristaline la alta. Aliaje cu aceste proprietăți sunt: Ni/Ti, Au/Cu, In/Ti.

În fig. 35.7 este prezentat un microactuator cu memoria formei. La trecerea curentului prin lamelele realizate din aliaje cu memoria formei, ca urmare a creșterii temperaturii în lamele apar tensiuni care le deformează într-opoziție prestabilită inițial.

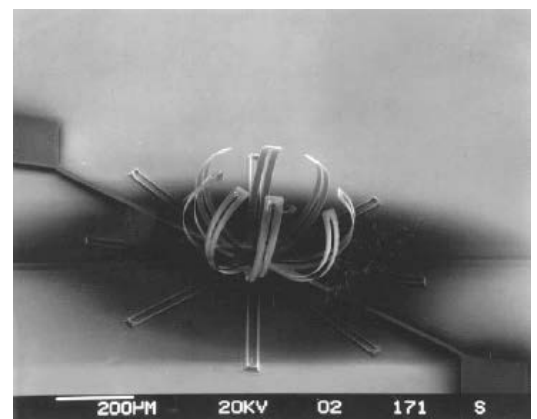
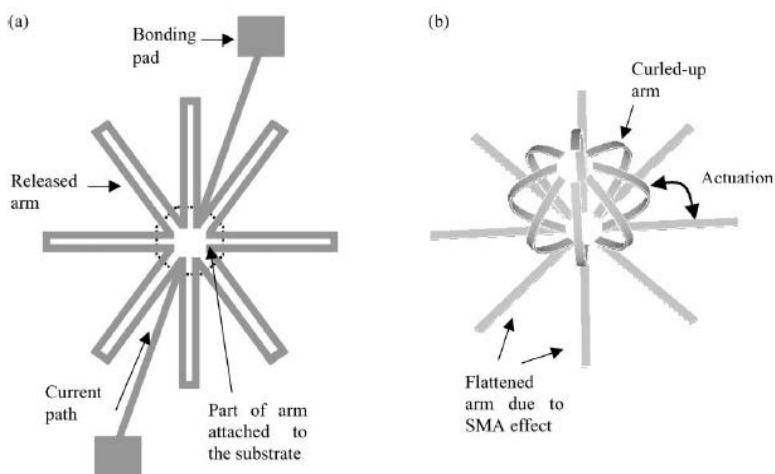


Fig. 35.7 Microactuatori cu memoria formei

Soluția constructivă a acestor microactuatori cu memoria formei este prezentată în fig. 36.7, aliajul utilizat fiind NiTi, depus pe strat de siliciu policristalin.

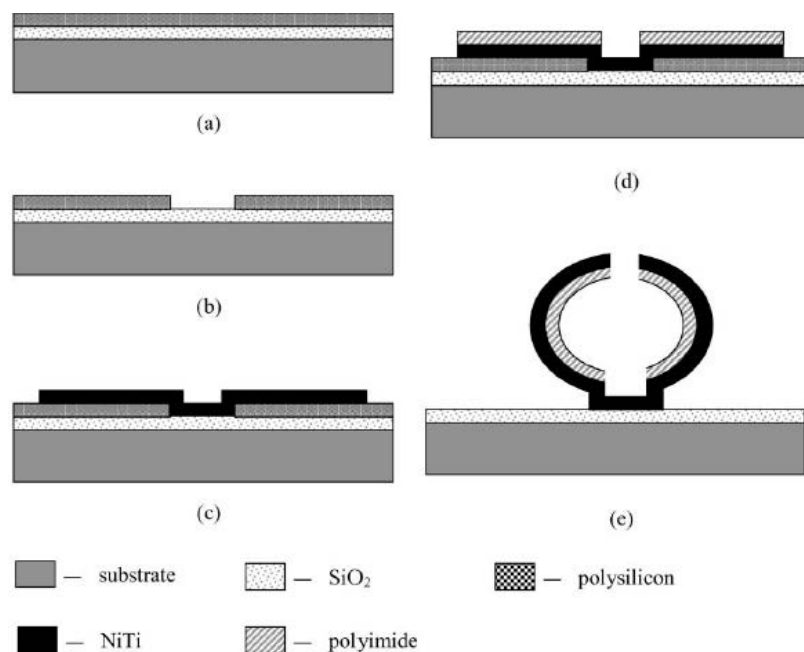


Fig. 36.7 Tehnologia de execuție a unui microactuator cu memoria formei

13. Microroboti

Se admite, denumirea de minirobot pentru sistemele robotizate cu volumul de ordinul a câțiva cm^3 , iar pentru microroboți, pentru volumul sub lcm^3 . Dimensiunile diferite ale roboților miniaturizați, ale mini și microroboților sunt determinate de aplicațiile lor diferite și implică tehnologii de realizare, metode de măsurare, control și de asamblare diferite. Din punct de vedere tehnologic este dificil de delimitat o tipologie specifică mini și microroboților, totuși se pot identifica *două clase distincte*:

a) *microroboții de tip clasic* la care arhitectura este cea a roboților industriali și manipuletoarelor, fiind obținută prin miniaturizarea sau integrarea elementelor componente. Performanțele lor funcționale depind nemijlocit de progresele tehnologice în direcția miniaturizării senzorilor și actuatorilor.

b) *microroboții neconvenționali* ce se bazează pe principii fizice particulare (piezoelectricitate, magnetostricțiune, memoria formei, electroreologie). Aceștia utilizează proprietățile mecanice, electrice sau magnetice ale așa-numitelor materiale "inteligente", ceea ce permite, în final, realizarea unor funcții specifice roboților de tip clasic. Cel mai adesea se obține o mobilitate ce determină deplasarea întregului sistem sau a unei părți a acestuia pe suprafața unui solid, în mediu lichid sau în aer.

Asamblarea microsistemelor, însoțită de transportul nedistructiv, manipularea precisă și poziționarea precisă a microcomponentelor sunt aplicații dintre cele mai importante ale microroboților.

Un microrobot poate fi de la un simplu cateter pînă la cele mai complicate dispozitive de mișcare is între aceste două extreme se găsesc microgrippers și microtools de diferite tipuri la fel ca și microconvertoarele și microrobot platforma de mișcare.

Microgrippers

Primul prototip de microrobot a fost o platforma bazată pe acționare electrostatică în plan. Acest microrobot are două brațe foarte fine dintr-un film subțire de polisilicon. O problemă acută a acestor roboți este mișcarea destul de limitată doar într-un singur plan de aceea s-au realizat variante constructive

care sa aiba o mare arie de deplasare in spatiu si care sa aiba capacitatea de a exercita forte. Astfel actuatorii termici sunt cunoscuti pentru abilitatea lor de a genera forte mari. Un actuator termic fiind facut dintr-un singur material este relativ usor de realizat dar extinderea unui singur tip de material la temperaturi este destul de mica.

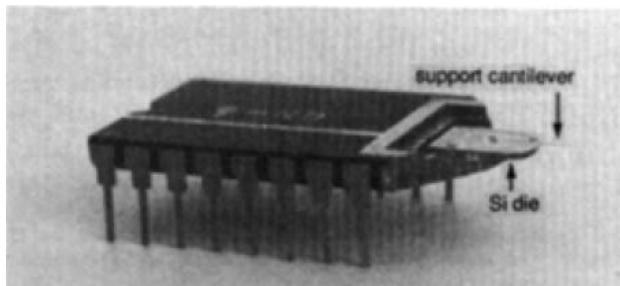


Fig.37.7.Microgripper.

Microroboti pasitori

In principiu acest tip de roboti sunt platforme prevazute cu elemente de miscare picioruse care pot efectua simple deplasari sau chiar sarituri. Ei sunt prevazuti cu un dispozitiv care genereaza o forta de levitatie ce ii ajuta la deplasarea pe suprafata. Deoarece aceste dispozitive sunt greu de realizat s-a recurs la realizarea unor dispozitive robot care sa se deplaseze fara ajutorul fortei de levitatie folosind deplasarea pe suprafata a picioruselor.

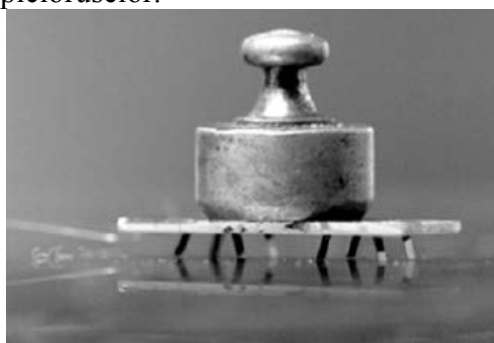


Fig 38.7.Microrobot platforma utilizat pentru deplasarea pe parcursul testului de incarcare. Incarcarea este de, 2500 mg is este echivalenta cu maxim 625 mg/leg pentru fiecare piciorus

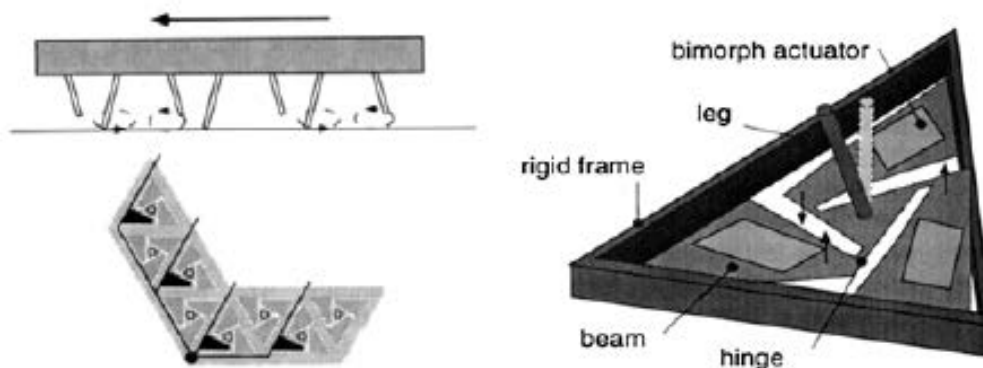


Fig 39.7.Principiul de deplasare prin rotatie a unui picior de robot-se bazeaza pe dispunerea in hexagonala a citorva sute de celule in interiorul unui cadru triunghiular.

Miscarea realizata de aceste tip de roboti este inspirata din lumea animala is avem in acest caz urmatoarele tipuri de miscare ce pot fi realizate de microroboti:

Miscarea ciliara utilizata inca din 1999 de catre Ebefors si al. (1999) in cazul unui robot cu opt picioare.

• **Miscarea eliptica** inspirata din lumea animala a fost propusa de catre Ruffieux si al. In anii 1999 si 2000. Similar acestui concept este principiul de deplasare al robotului propus de Simu si Johansson (2001). Conceptul lor de microrobot consta in deplasarea individuala a robotului dar si gidarea lui printr-un sistem foarte flexibil care poate fi actionat din exterior. In acest scop microrobotul are picioare din silicon pe care s-au depus straturi foarte subtiri de material piezoceramic fixate pe un corp de sticla.

• Un alt tip de miscare inspirata de lumea animala este **miscarea crabilor** propusa de Zill si Seyfarth inca din 1996 cind au produs un robot cu sase picioare.

• **Inch-worm robots** [Thornell, 1998] sau **slip-and-stick robots** [Breguet si Renaud, 1996] imita **miscarea viermilor**, principiu de miscare destul de atractiv pentru multi cercetatori acesta avind avantajul fortelor de frecare. Robotii de acest tip au o zona centrala „coloana vertebrala” pe care sunt prinse piciorusele. Miscarea se realizeaza prin deplasarea primelor picioruse in fata prin intindere, apoi se pliaza si trag corpul robotului dupa ele inainte sa mai intinda al doilea set de picioruse astfel producindu-se miscarea.

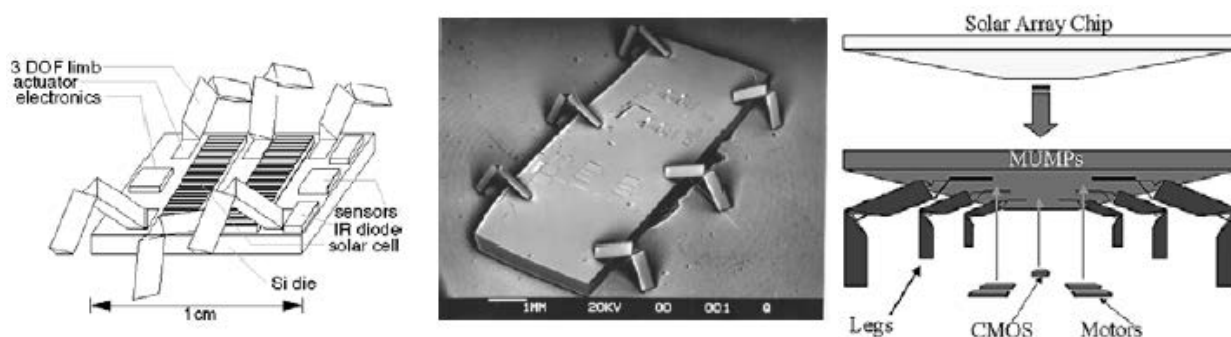


Fig 40.7. Prima versiuna a unui microrobot pasitor ale carui picioare au trei grade de libertate si au o lungime de 1.2-mm-, fiind confectionate din polisilicon rigid si au la baza actionarea electrostatica

În fig. 41.7 sunt prezentate 4 variante de deplasare a microrobotilor utilizând fenomenul de stick-slip.

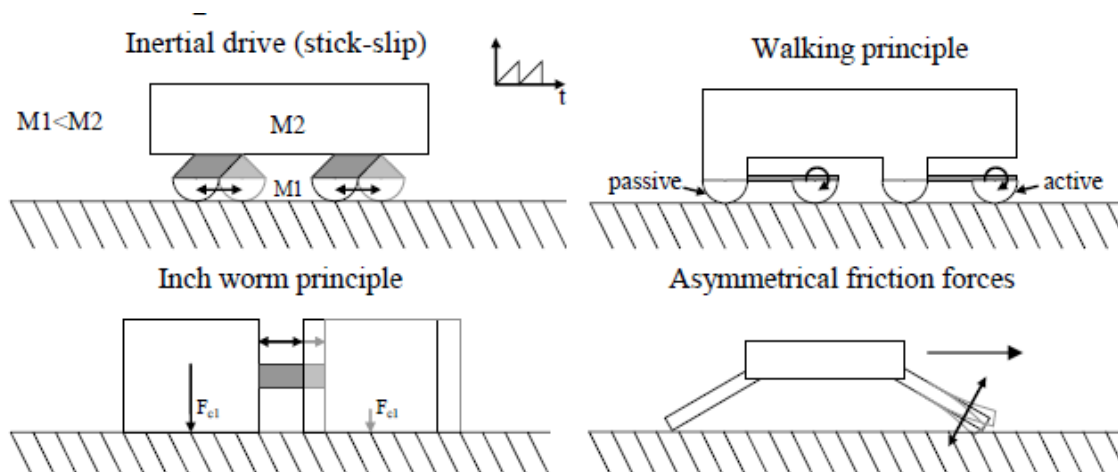


Fig. 42.7 Variante de deplasare ale microrobotilor de tip Inch-worm

Capitolul VIII

APLICATIE

TEHNOLOGIE DE FABRICATIE PENTRU MEMS PolyMUMPs

Tehnologia PolyMUMPs reprezintă o tehnologie de microfabricație ce se caracterizează prin realizarea unor microstructuri de tip MEMS cu multiple straturi de depunere dintre care trei sunt straturi de siliciu policristalin.

Se exemplifică această tehnologie pentru realizarea unui micromotor electrostatic prezentat schematic în fig. 1.8

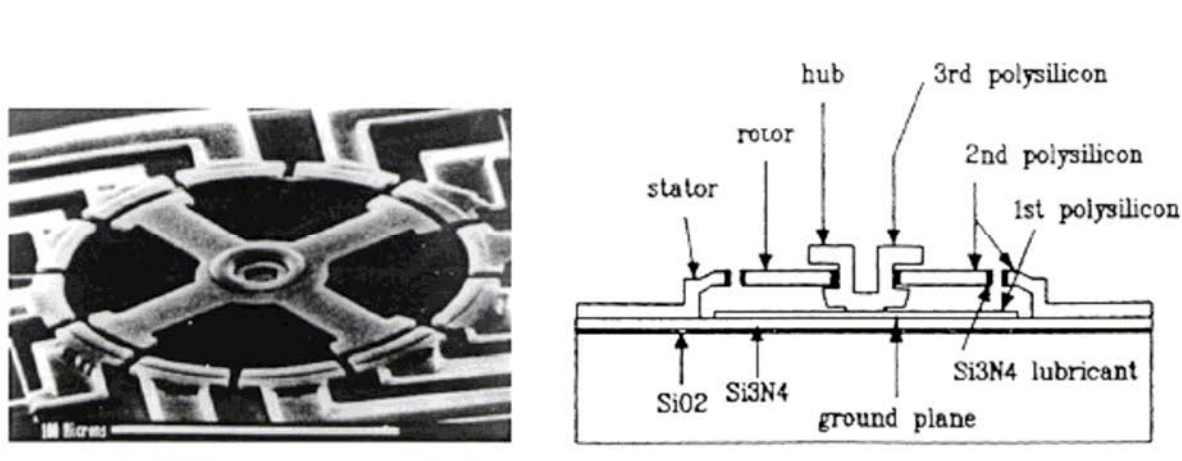


Fig. 1.8

Sucesiunea operațiilor de depunere, de formare a structurilor geometrice prin litografiere și de îndepărtare a straturilor de sacrificiu este prezentată în Tabelul 1.8.

TABEL 1.8 Succesiunea operațiilor pentru realizarea unui micromotore prin tehnologia multistrat conform manualului: [PolyMUMPs Design Handbook](#) a MUMPs® process Jim Carter, Allen Cowen, Busbee Hardy , Ramaswamy Mahadevan, Mark Stonefield, and Steve Wilcenski MEMSCAP Inc. 2006



FIGURE 1.2. The surface of the starting n-type (100) wafers are heavily doped with phosphorus in a standard diffusion furnace using a PSG film as the dopant source. After removal of this PSG film, a 600 nm blanket layer of low stress silicon nitride (Nitride) is deposited followed by a blanket layer of 500 nm polysilicon (Poly 0). The wafers are then coated with UV-sensitive photoresist.



FIGURE 1.3. The photoresist is lithographically patterned by exposing it to UV light through the first level mask (POLY0) and then developing it. The photoresist in exposed areas is removed leaving behind a patterned photoresist mask for etching.

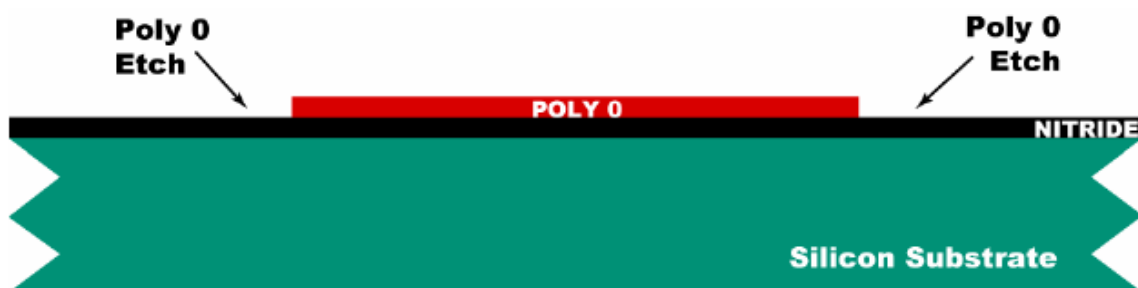


FIGURE 1.4. Plasma etching is used to remove the unwanted polysilicon. After the etch, the photoresist is chemically stripped in a solvent bath. This method of patterning the wafers with photoresist, etching and stripping the remaining photoresist is used repeatedly in the PolyMUMPs process.

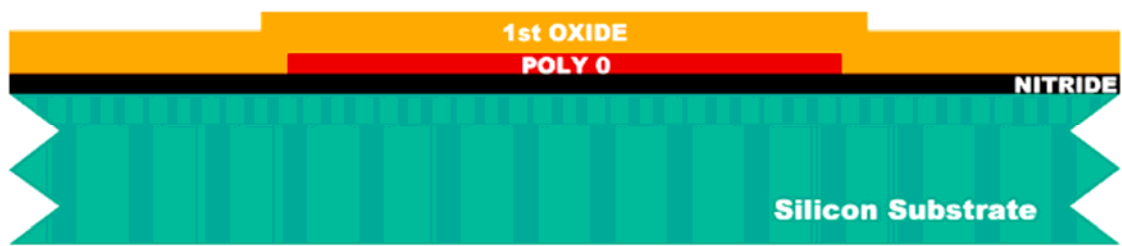


FIGURE 1.5. A $2.0\text{ }\mu\text{m}$ layer of PSG is deposited on the wafers by low pressure chemical vapor deposition (LPCVD). This is the first sacrificial layer.

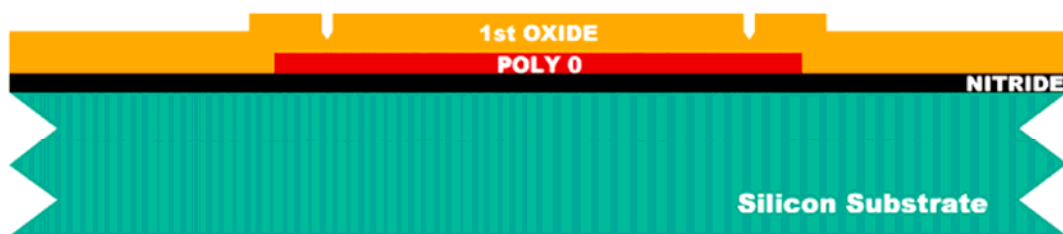


FIGURE 1.6. The wafers are coated with photoresist and the second level (DIMPLE) is lithographically patterned. The dimples, 750 nm deep, are reactive ion etched (RIE) into the first oxide layer. After the etch, the photoresist is stripped.

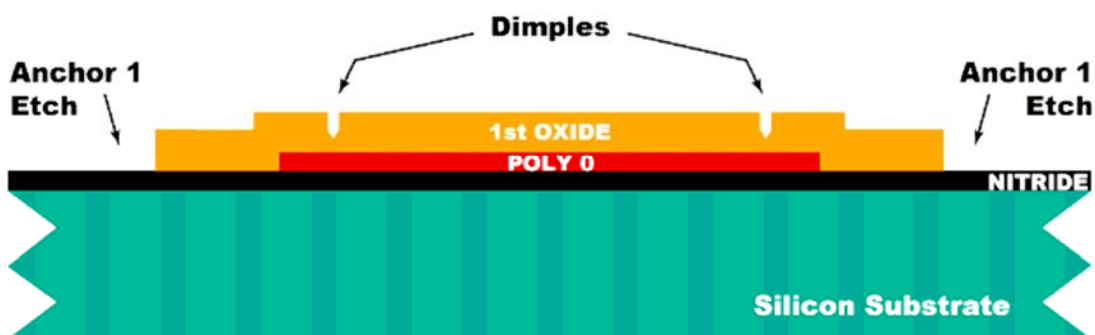


FIGURE 1.7. The wafers are re-coated with photoresist and the third level (ANCHOR1) is lithographically patterned. The unwanted oxide is removed in an RIE process and the photoresist is stripped.

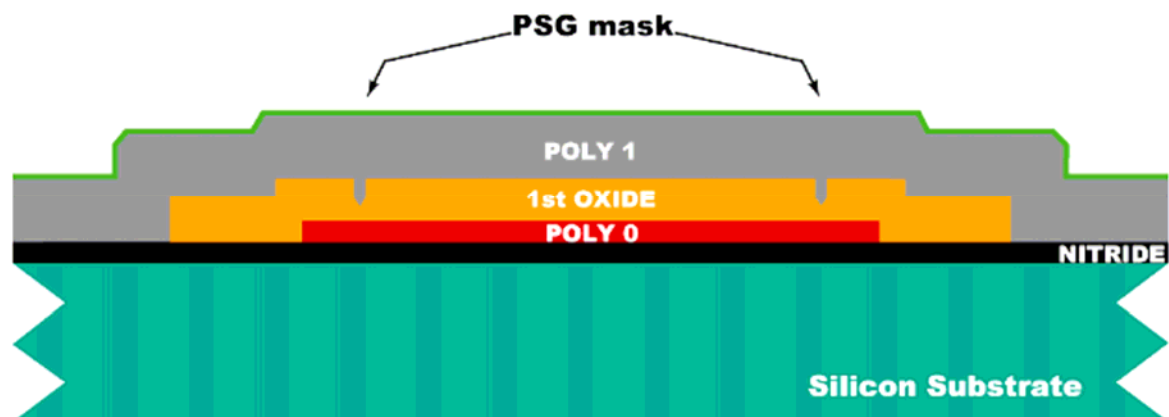


FIGURE 1.8. A blanket 2.0 μm layer of un-doped polysilicon is deposited by LPCVD followed by the deposition of 200 nm PSG and a 1050°C/1 hour anneal. The anneal serves to both dope the polysilicon and reduce its residual stress.

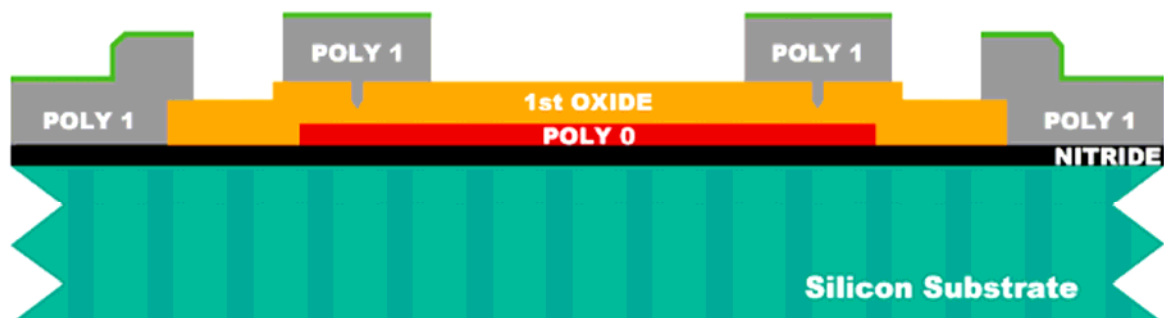


FIGURE 1.9. The wafer is coated with photoresist and the fourth level (POLY1) is lithographically patterned. The PSG is first etched to create a hard mask and then Poly 1 is etched by plasma processing. After the etch is completed, the photoresist and PSG hard mask are removed.

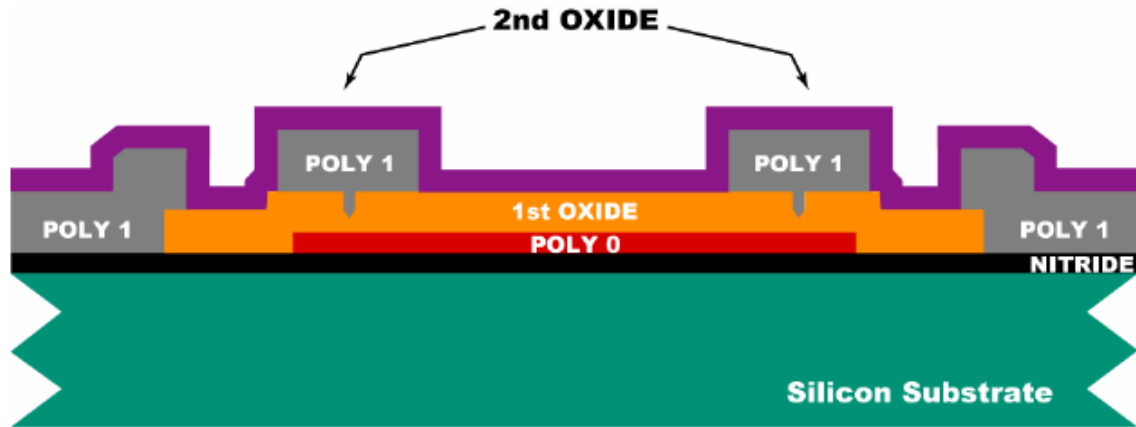


FIGURE 1.10. The Second Oxide layer, 0.75 μm of PSG, is deposited on the wafer. This layer is patterned twice to allow contact to both Poly 1 and substrate layers.

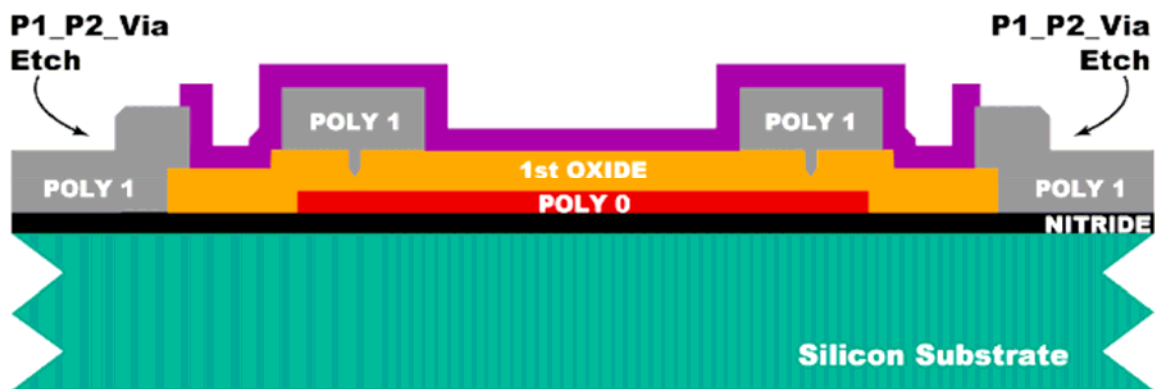


FIGURE 1.11. The wafer is coated with photoresist and the fifth level (POLY1_POLY2_VIA) is lithographically patterned. The unwanted Second Oxide is RIE etched, stopping on Poly 1, and the photoresist is stripped.

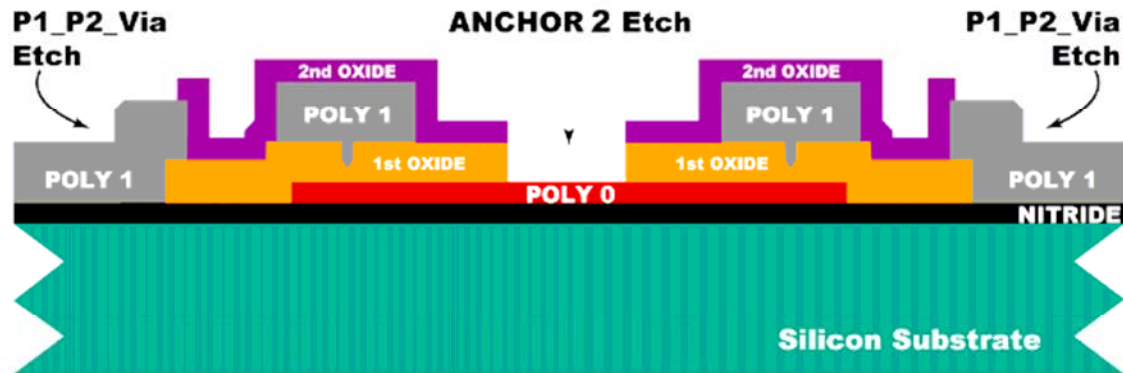


FIGURE 1.12. The wafer is re-coated with photoresist and the sixth level (ANCHOR2) is lithographically patterned. The Second and First Oxides are RIE etched, stopping on either Nitride or Poly 0, and the photoresist is stripped. The ANCHOR2 level provides openings for Poly 2 to contact with Nitride or Poly 0.

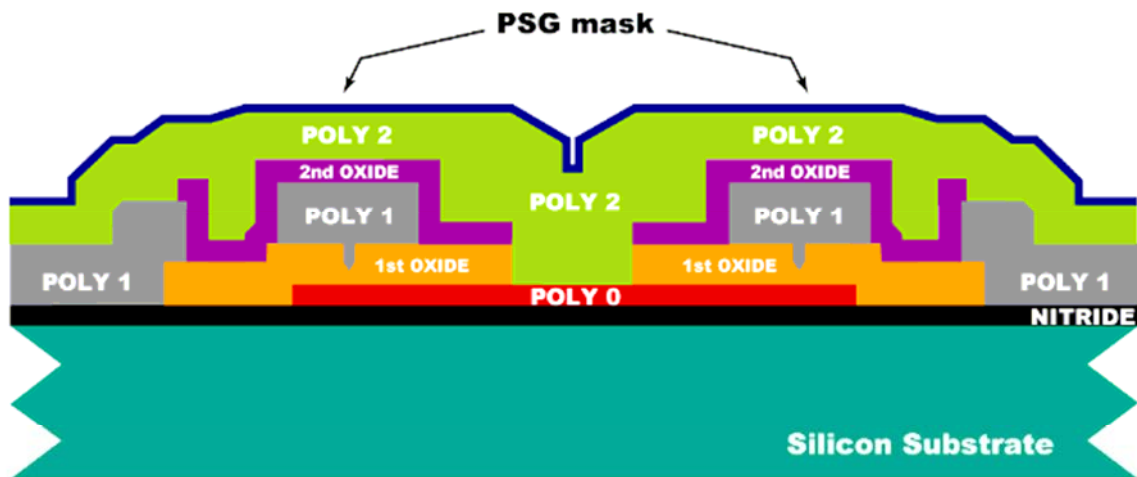


FIGURE 1.13. A 1.5 μm un-doped polysilicon layer is deposited followed by a 200 nm PSG hardmask layer. The wafers are annealed at 1050°C for one hour to dope the polysilicon and reduce residual stress.

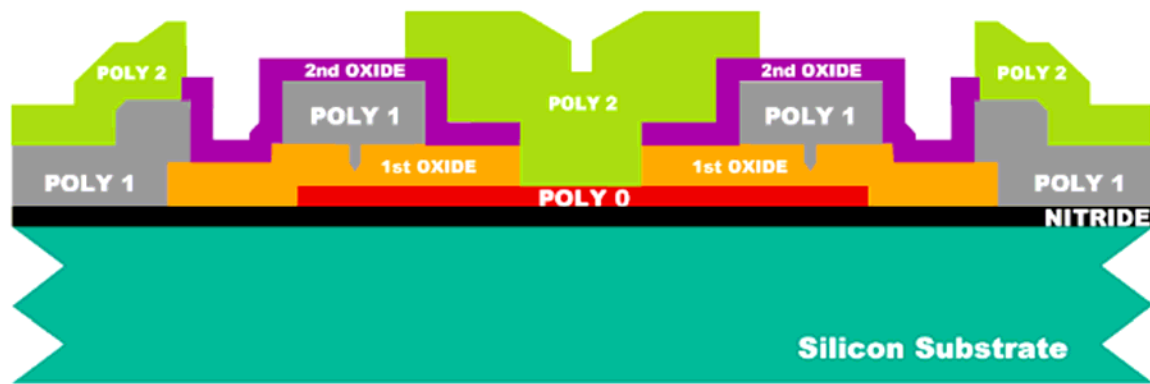


FIGURE 1.14. The wafer is coated with photoresist and the seventh level (POLY2) is lithographically patterned. The PSG hard mask and Poly 2 layers are etched and the photoresist and hard mask are removed. All mechanical structures have now been fabricated. The remaining steps are to deposit the metal layer and remove the sacrificial oxides.

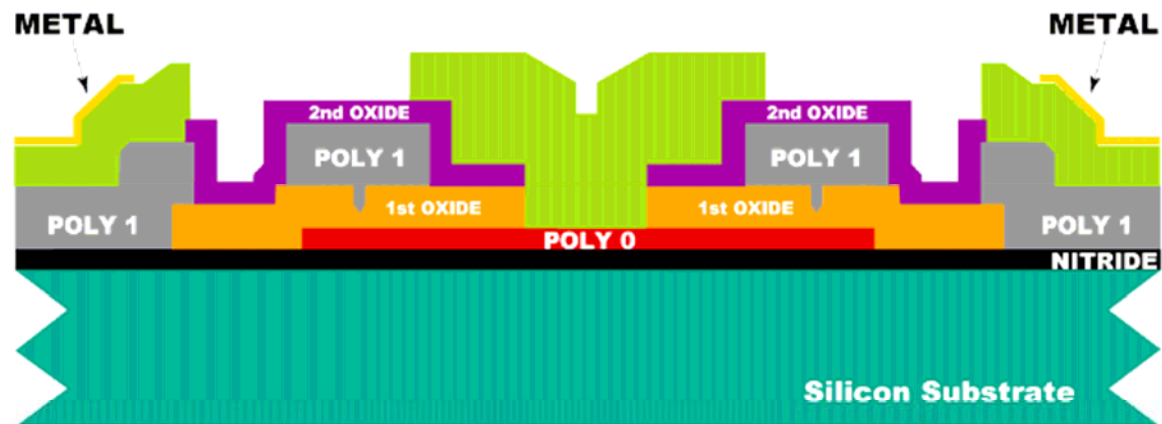


FIGURE 1.15. The wafer is coated with photoresist and the eighth level (METAL) is lithographically patterned. The metal (gold with a thin adhesion layer) is deposited by lift-off patterning which does not require etching. The side wall of the photoresist is sloped at a reentrant angle, which allows the metal to be deposited on the surfaces of the wafer and the photoresist, but provides breaks in the continuity of the metal over the photoresist step. The photoresist and unwanted metal (atop the photoresist) are then removed in a solvent bath. The process is now complete and the wafers can be coated with a protective layer of photoresist and diced. The chips are sorted and shipped.

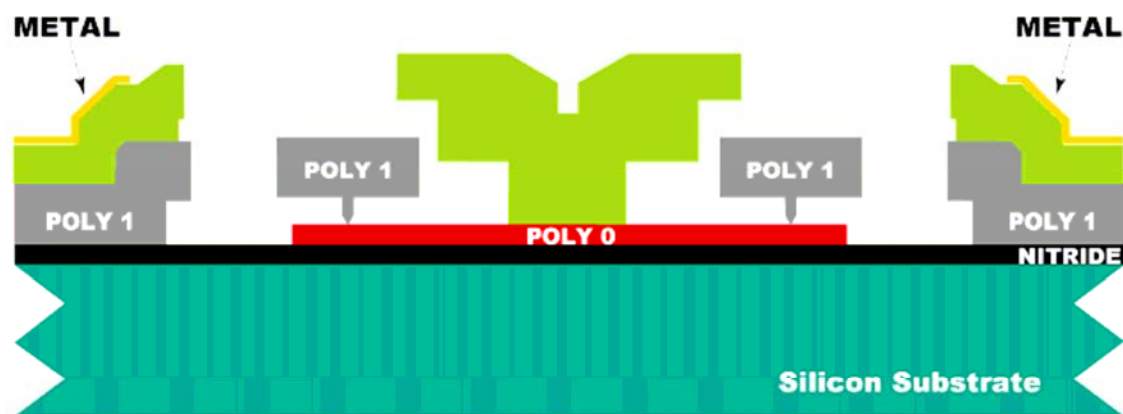


FIGURE 1.16. The structures are released by immersing the chips in a 49% HF solution. The Poly 1 “rotor” can be seen around the fixed Poly 2 hub. The stacks of Poly 1, Poly 2 and Metal on the sides represent the stators used to drive the motor electrostatically.

Bibliografie selectiva

MĂTIEȘ, V., MÂNDRU, D., BĂLAN, R., TĂTAR, O., RUSU, C., 2001, Tehnologie și educație mecatronică, Ed. Todesco, Cluj-Napoca.

MĂTIEȘ, V., MIRESCU, C., MÂNDRU, D., BĂLAN, R., TĂTAR, O., RUSU, C., 2002, Tehnologie și educație mecatronică. Auxiliar curricular, Ed. Economică, București.

MĂTIEȘ, V., MÂNDRU, D., TĂTAR, O., MĂTIEȘ, M., CSIBI, V., 2000, Actuatori în mecatronică, Editura Mediamira, Cluj-Napoca.

<http://zeus.east.utcluj.ro/mec/mmfm/revista/coperta.htm>

<http://www.memsnet.org/material/>

Lin, T.W., Modafe, A., Shapiro, B. and Ghodssi R., 2004, Characterization of Dynamic Friction in MEMS – Based Microball Bearings, IEE Transaction of Instrumentation and Measurement, vol.53, N0.3, June 2004, pp.839-845.

Bhushan B., 1999, *Handbook of Micro/Nano Tribology*, Ed.2, CRC Press LLC.

Scherge, M. and Gorb, S., 2001, *Biological Micro- and Nano- tribology. Nature's Solution*, Springer, Berlin.

Hild W, Schaefer J.A. and Scherge M., 2002, Microhydrodynamical studies of hydrophilic and hydrophobic surfaces, Proc. of 13 th International Colloquium Tribology, T.A.Esslingen, January 13 –15, 2002.

Opiz, A., Ahmed, S., Schaefer, J.A. and Scherge, M., 2002, Friction of the thin water film: a nanotribological study, Surface Science vol.504, pp.199-207.

Hild W, Schaefer J.A. and Scherge M., 2002, Microhydrodynamical studies of hydrophilic and hydrophobic surfaces, Proc. of 13 th International Colloquium Tribology, T.A.Esslingen, January 13 –15, 2002..

Schwarz U.D., A generalized analytical model for the elastic deformation of an adhesive contact between a sphere and a flat surface. Journal of Colloid and Interface Science 261 (2003) 99–106

A. Modafe, N. Ghalichechian, A. Frey, J. H. Lang, and R. Ghodssi, "Microball-Bearing-Supported Electrostatic Micromachines with Polymer Dielectric Films for Electromechanical Power Conversion," *Journal of Micromechanics and Microengineering (JMM)*, vol. 16, pp.S182-S190, September 2006..

CSM Instruments Application Bulletin, No. 20 October 2003 (www.csm-instruments.com)

Butt H.J., Cappella B., Kappl M., Force measurements with the atomic force microscope: Technique, interpretation and applications. Surface Science Reports 59 (2005) 1–152.

Lin Chuang-Chia, Reza Ghodssi, Arturo A. Ayon, Dye-Zone Chen, Stuart Jacobson, Kenneth Breuer, Alan H. Epstein and Martin A. Schmidt - *Fabrication and Characterization of a Micro Turbine/Bearing*

Rig, Microsystems Technology Laboratories and Gas Turbine Lab., Cambridge, MA 02139, USA, Twelfth IEEE International Conference on Volume, Issue , 17-21 Jan 1999 Page(s):529 – 533, <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=ADA447928>

McCarthy Matthew, C. Mike Waits and Reza Ghodssi - *Dynamic Friction and Wear in a Planar-Contact Encapsulated Microball Bearing Using an Integrated Microturbine*, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 18, No. 2, pp. 263-273, April 2009, DOI: 10.1109/JMEMS.2009.2013407, http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?isnumber=4808224&arnumber=4787025

MEMScAP © – <http://www.memscap.com>.

MEMScAP © – MEMSPro V3 Overview, http://arri.uta.edu/acs/jmireles/MEMScap/MEMS_Pro_Overview.pdf.

MEMScAP © – MEMSPro V3 Tutorial, http://arri.uta.edu/acs/jmireles/MEMScap/MemsPro_V3.pdf <http://www.memsnet.org/material/>

Olaru D.N., Stamate C., Prisăcaru Gh. - *New Microtribometers for Sliding and Rolling Friction. Experimental Investigations*, Proceedings of 9th International Conference on COMEFIM'9, 12-14 June 2008, Buletin I.P. Iași, Tomul LIV (LVIII), Fasc. 4, June 2008, Section: Machine Construction, pp. 477-486, ISSN 1011-2855. Rated as C by CNCSIS.

Olaru D., Stamate C., Dumitrașcu Alina, Prisăcaru Gh. - *Experimental investigations of rolling friction in mechatronics Microsystems*, 2 ADEMS'09, Cluj-Napoca, 4-25 September 2009, ACTA TECHNICA NAPOCENSIS - Series: APPLIED MATHEMATICS AND MECHANICS, Vol. III, No. 52, pp. 329-332, ISSN 1221-5872. BDI, <http://journals.indexcopernicus.com>, Rated as B+ by CNCSIS.

Olaru D., Stamate C., Dumitrașcu Alina, Ianuș G. - *Friction in the microtribosystems. influence of the condensed water*, The Annals of University „Dunărea de Jos” of Galați, Fascicle VIII (XIII), October 2009, pp. 46-50, ISSN 1221-4590. Paper present at International Conference on Diagnosis and Prediction in Mechanical Engineering Systems (DIPRE'09), 22-23 October 2009.

Olaru D.N., Stamate C., Prisăcaru Gh. - *Rolling Friction in a Micro Tribosystem*, **Tribology Letters**, Vol. 35, No. 3, September 2009, pp. 205-210, DOI 10.1007/s11249-009-9449-z, ISSN 1023-8883 (Print) 1573-2711 (Online). ISI Springer Netherlands, IF 1.664. Rated as A by CNCSIS.

Olaru D.N., Stamate C., Dumitrașcu Alina, Prisăcaru Gh. - *New micro tribometer for rolling friction*, **Wear**, Vol. 271, No. 5-6, 22 June 2011, pp. 842-852, DOI 10.1016/j.wear.2011.03.007, ISSN 0043-1648. ISI Elsevier, ScienceDirect, IF 1.771, Rated as A by CNCSIS.

Olaru D., Dumitrașcu Alina, Stamate C., Prisăcaru Gh. - *Dynamic model to determine the rolling friction torques in Microsystems for dry and lubricated conditions*, Proceedings of ROTRIB'10, Iași, 4-6 November 2010, RO-075, CD-ROM ISSN 2069-1718., 24 pagini.

Olaru D.N., Stamate C., Dumitrașcu A., Prisăcaru Gh. - *Rolling friction torque in microsystems*, Proceedings of 15th International Conference on EHD Lubrication and Traction, VAREHD'15, 6-8 May 2010, Suceava, pp. 170-177, ISSN 1844-8917, ACTA TRIBOLOGICA Journal, Suceava, Vol. 18, May 2010, pp. 106-112, CD-ROM ISSN 1220-8434. Rated as B by CNCSIS.

Olaru D., Stamate C., Prisăcaru Gh., Ianuș G. - *New micro tribometers for sliding and rolling friction*, Viennano '09, Vienna, Austria, 18-20 March 2009, pp. 495-499, CD-ROM ISBN 978-3-901657-33-7.