



**Universitatea Tehnica “Gheorghe Asachi”  
Facultatea de Electronica, Telecomunicatii si  
Tehnologia Informatiei  
Iasi**

**Micromotoare realizate în tehnologie MEMS.  
Descriere, funcționare, caracteristici, tehnologii  
utilizate pentru realizare, aplicații**

Îndrumător,  
Șef lucrări dr. ing. Daniela Ionescu

Disciplina: MEMS  
Specializarea: Master Radiocomunicații Digitale  
Masterand: Balint Daniel

Micromotoare realizate în tehnologie MEMS. Descriere, funcționare, caracteristici, tehnologii utilizate pentru realizare, aplicații

În aplicațiile tehnologiei moderne, uneori este mai bine mai mic - și microscopic este și mai bine. Sistemele microelectromecanice (MEMS) s-au mutat din arena principală de cercetare pentru a deveni o tehnologie utilizabilă.

### Ce înseamnă MEMS?

Răspunsul scurt este **“mașini microscopice”**; cu toate acestea, ele sunt mult mai mult de atât.

**MEMS**-urile sunt sisteme integrate de dimensiuni mici (de la câțiva micrometri la câțiva milimetri) care sunt alcătuite din elemente electrice și mecanice.

MEMS-urile sunt fabricate utilizând tehnica de realizare a circuitelor integrate combinată cu micro-prelucrări ale materialelor utilizate și a suportului. În timp ce circuitele integrate sunt proiectate astfel încât să utilizeze proprietățile electrice ale siliciului, la proiectarea MEMS-urilor sunt exploatate atât proprietățile electrice cât și cele mecanice ale acestui material semiconductor.

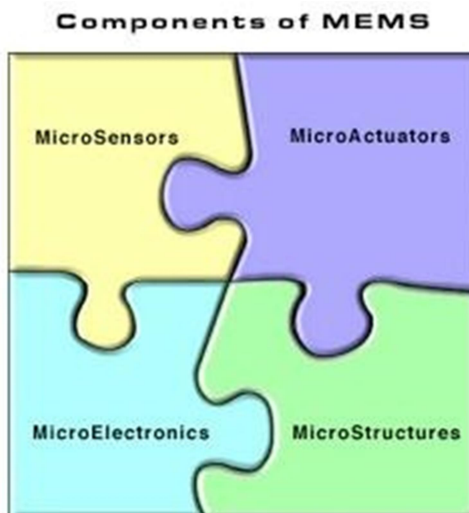
MEMS-urile reprezintă sisteme complexe, care pot fi privite ca dispozitive mecanice de dimensiuni foarte mici, integrând electronica aferentă. De asemenea, tipurile de dispozitive MEMS pot varia de la structuri relativ simple care nu au elemente în mișcare, la sisteme electromecanice extrem de complexe, cu multiple elemente în mișcare sub controlul microelectronice integrate.

Caracteristica principală a MEMS este că există cel puțin câteva elemente care au un fel de funcționalitate mecanică chiar dacă aceste elemente se pot deplasa sau nu. Termenii folosiți pentru a defini MEMS variază în diferite părți ale lumii.

În Statele Unite, acestea sunt numite predominant MEMS, în timp ce în alte părți ale lumii sunt numite "Microsystems Tehnologie" sau "dispozitive microprelucrate" ("micromachined devices").

În timp ce elementele funcționale ale MEMS sunt structuri miniaturizate, senzori, elemente de acționare, și microelectronice, elementele cele mai importante (și probabil, cele mai interesante) sunt microsenzorii și microactuatorii.

Microsenzorii și microactuatorii sunt corect clasificați ca "traductoare", care sunt definite ca dispozitive care transformă energia dintr-o formă în alta. În cazul microsenzorilor, dispozitivul transformă de obicei, un semnal mecanic măsurat într-un semnal electric.



În ultimele decenii cercetătorii MEMS și dezvoltatorii au descoperit un număr extrem de mare de microsenzori pentru aproape orice modalitate de a simți posibilă inclusiv senzori de temperatură, presiune, forțe de inerție, specii chimice, câmpuri magnetice, radiații, etc. Remarcabil, mulți dintre acești senzori microprelucrați au demonstrat performanțe care le depășesc pe cele ale omologilor lor la scară macro. Aceasta deoarece, versiunea microprelucrată, de exemplu, un traductor de presiune, depășește de obicei din punct de vedere al performanței un senzor de presiune construit utilizând cele mai precise tehnici de prelucrare la nivel macroscopic

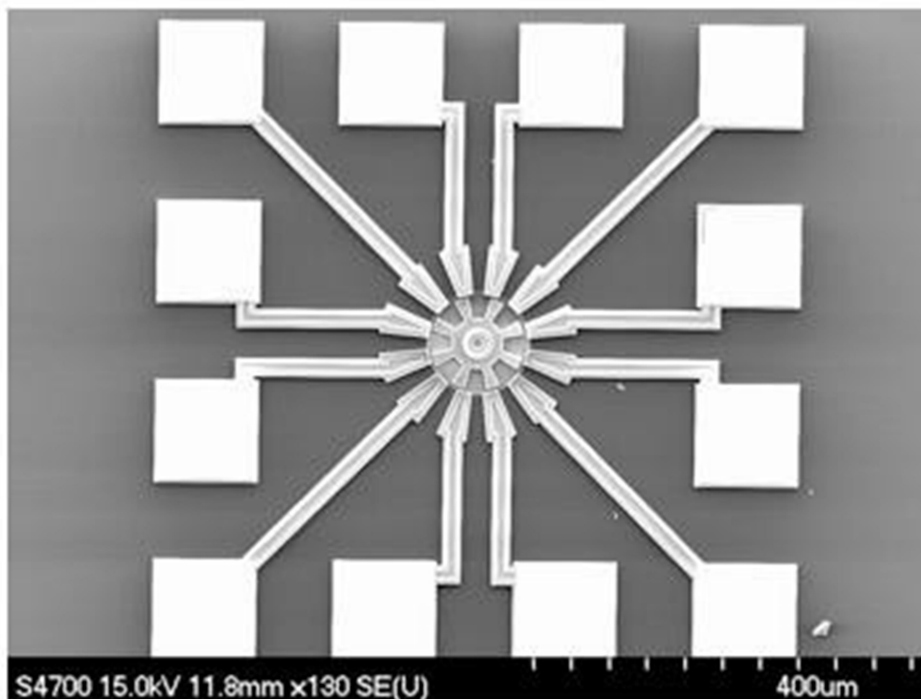
Nu sunt doar performanțele dispozitivelor MEMS excepționale, ci și metodele lor de producție folosind aceleași tehnici de fabricație utilizate în industria circuitelor integrate – ceea ce se poate traduce prin costuri de producție reduse pe dispozitiv, precum și multe alte beneficii. Prin urmare, este posibil nu doar să se realizeze performanțe excelente ale dispozitivelor, ci și să se realizeze acest lucru la un nivel de cost relativ scăzut. Nu este surprinzător, microsenzorii discreți pe

Micromotoare realizate în tehnologie MEMS. Descriere, funcționare, caracteristici, tehnologii utilizate pentru realizare, aplicații

bază de siliciu au fost rapid exploatați în scopuri comerciale și piețele pentru aceste dispozitive continuă să crească într-un ritm rapid.

Mai recent, comunitatea de cercetare și de dezvoltare MEMS a descoperit o serie de microactuatori, precum : microvalve pentru controlul fluxului de gaz și lichid; comutatoare optice și oglinzi pentru a redirecționa sau ajusta fasciculele de lumină; micromatricile controlate independent pentru display-uri, microrezonatori pentru un număr de aplicații diferite, micropompe care să dezvolte presiuni pozitive asupra fluidului, microclape pentru a ajusta jeturile de aer pe aripi, precum și multe altele. Surprinzător, chiar dacă acești microactuatori sunt extrem de mici, pot provoca frecvent reacții la nivel macroscopic; acești actuatori mici pot efectua acțiuni mecanice mult mai mari decât ar implica mărimea lor.

De exemplu, cercetătorii au pus micii microactuatori pe marginea aripii unei aeronave și au fost în măsură să orienteze aeronava folosind numai aceste dispozitive microminiaturizate.



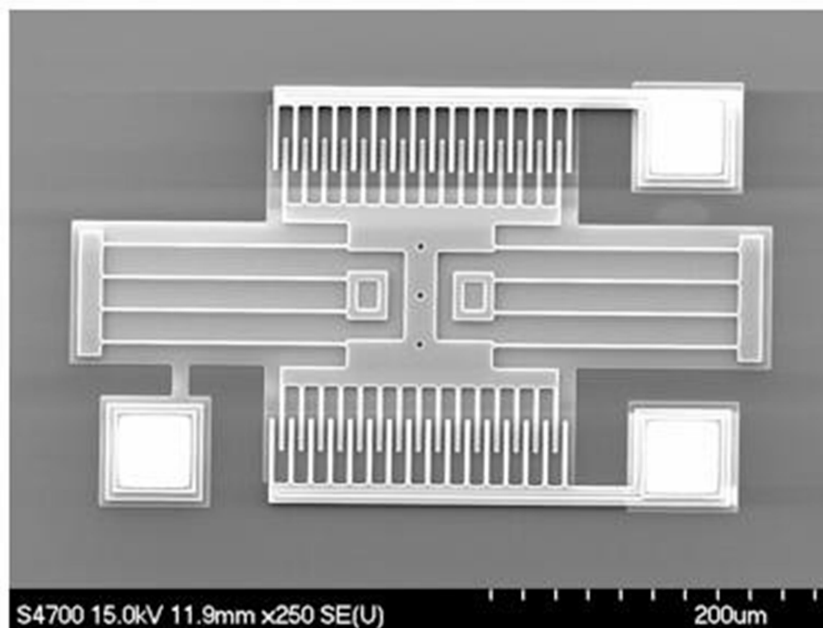
O suprafață microprelucrată a unui micromotor acționat electrostatic fabricat de MNX. Acest dispozitiv este un exemplu de microactuator bazat pe MEMS.

Potențialul real al MEMS începe să devină împlinit atunci când acești senzori, actuatori, și structuri miniaturizate, pot fi îmbinate toate pe un substrat comun de siliciu, împreună cu circuite integrate (de exemplu, microelectronicele). În timp ce electronicele sunt fabricate folosind secvențele procesului circuitelor integrate (CI) (de exemplu, CMOS, bipolar, sau procese BICMOS), componentele micromecanice sunt fabricate folosind procese "microtehnologice" compatibile care îndepărtează în mod selectiv părți din plăcuța de siliciu sau adaugă noi straturi structurale pentru a forma dispozitive mecanice și electromecanice.

Este chiar mai interesant dacă MEMS pot fi unite, nu numai cu microelectronice, dar și cu alte tehnologii, cum ar fi fotonica, nanotehnologia, etc. Acest lucru este uneori numit "integrare eterogenă". Evident, aceste tehnologii sunt pline de numeroase oportunități de comercializare.

În timp ce mai multe niveluri complexe de integrare sunt tendințele tehnologiei MEMS pe viitor, nivelul de dezvoltare prezent este mult mai modest și implică de obicei, un singur microsenzor discret, un singur microactuator discret, un singur microsenzor integrat cu electronice, o multitudine de senzori identici în esență integrați cu electronice, un singur microactuator integrat cu electronice, sau o multitudine de microactuatori identici în esență, cu electronice integrate. Cu toate acestea, odată cu dezvoltarea metodelor de fabricare MEMS, promisiunea este o libertate de design enormă în care orice tip de microsenzor și orice tip de microactuator pot fi unite cu ajutorul microelectronicii, precum fotonica, nanotehnologia, etc, pe un singur substrat.

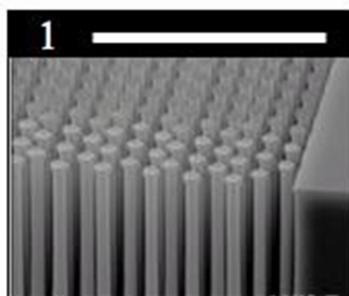
Micromotoare realizate în tehnologie MEMS. Descriere, funcționare, caracteristici, tehnologii utilizate pentru realizare, aplicații



Rezonator realizat prin microprelucrarea suprafeței fabricat de MNX. Acest aparat poate fi utilizat atât ca microsenzor precum și ca microactuato.

Această perspectivă a MEMS prin care microsenzorii, microactuatoarii, microelectronicele și alte tehnologii, pot fi integrate pe un singur microcip este de așteptat să fie una dintre cele mai importante descoperiri tehnologice ale viitorului. Acest lucru va permite dezvoltarea produselor inteligente sporind capacitatea de calcul a microelectronicelelor cu posibilitățile de percepție și control ale microsenzorilor și microactuatoarii. Circuitele microelectronice integrate pot fi considerate drept "creierul" unui sistem și MEMS amplifică această capacitate de luare a deciziilor cu "ochi" și "brațe", pentru a permite microsistemelor să simtă și să controleze mediul înconjurător. Senzorii adună informații din mediu prin măsurarea fenomenelor mecanice, termice, biologice, chimice, optice și magnetice. Electronicele procesează apoi informațiile obținute de la senzori și folosind capacitatea de luare a deciziilor comandă actuatoarii să răspundă, prin mutare, poziționare, reglementare, pompare, și filtrare, controlând astfel mediul pentru a obține rezultatul dorit sau a-și atinge scopul. În plus, deoarece dispozitivele MEMS sunt fabricate folosind tehnici de fabricație în serie, similar cu circuitele integrate, niveluri fără precedent de funcționalitate, fiabilitate, și sofisticare pot fi plasate pe un cip de siliciu mic la un cost relativ scăzut. Tehnologia MEMS este extrem de diversă și bogată, atât în zonele sale de aplicare așteptate, precum și în modul în care dispozitivele sunt proiectate și fabricate. Deja MEMS revoluționează mai multe categorii de produse permițând realizarea sistemelor complete pe un singur cip.

Nanotehnologia este abilitatea de a manipula materia la nivel atomic sau molecular pentru a face ceva util, la scară nano-dimensională. În principiu, există două abordări de implementare : de sus în jos și de jos în sus. În abordarea **de sus în jos**, dispozitivele și structurile sunt realizate folosind multe din tehnicile utilizate în MEMS cu excepția faptului că acestea sunt realizate în dimensiuni mai mici, de obicei prin utilizarea unor metode mai avansate de fotolitografie și gravură. Abordarea **de jos în sus** implică de obicei tehnologii de depunere, de creștere, sau de auto-asamblare. Avantajele dispozitivelor nano-dimensionale față de MEMS implică beneficii derivate în special din legile de scalare, care pot prezenta, de asemenea, unele provocări.

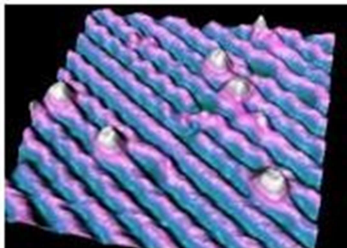


O serie de posturi submicronice realizate folosind metode nanotehnologice de fabricare de sus in jos

Micromotoare realizate în tehnologie MEMS. Descriere, funcționare, caracteristici, tehnologii utilizate pentru realizare, aplicații

Unii experți cred că nanotehnologia promite să :

- a) ne permite să punem în esență, fiecare atom sau moleculă în locul și poziția dorită acesta este controlul exact al poziției pentru asamblare;
- b) ne permite să facem aproape orice structură sau material în concordanță cu legile fizicii, care pot fi specificate la nivel atomic sau molecular și
- c) ne permite să avem costuri de producție care nu depășesc cu mult costul materialelor prime necesare și al energiei utilizate la fabricare (de exemplu, paralelism masiv).



O imagine colorată a unei suprafețe observată cu un microscop de scanare-tunel, care este o tehnica de imagistica comună utilizată în domeniul nanotehnologiei.

Deși MEMS și nanotehnologia sunt uneori citate ca tehnologiile separate și distincte, în realitate distincția dintre cele două nu este atât de clară. De fapt, aceste două tehnologii sunt extrem de dependente una de alta. Bine-cunoscutul microscop de scanare tunel-vârf (STM), care este folosit pentru a detecta atomi și molecule individuale pe scara nanometrică este un dispozitiv MEMS. În mod similar, microscopul de forță atomică (AFM), care este folosit pentru a manipula plasarea și poziția atomilor individuali și moleculelor pe suprafața unui substrat este un dispozitiv MEMS, de asemenea. De fapt, o varietate de tehnologii MEMS sunt necesare pentru a interfața cu domeniul nano-scală.

De asemenea, numeroase tehnologii MEMS devin dependente de nanotehnologii pentru noi produse de succes. De exemplu, accelerometrele airbag-ului în caz de accident, care sunt fabricate folosind tehnologia MEMS pot avea fiabilitatea lor pe termen lung degradată din cauza efectelor dinamice de frecare în uz dintre masa probei și substrat. O nanotehnologie numită acoperirea monostraturilor auto-asamblate (SAM) este acum folosită regulat pentru a trata suprafețele elementelor MEMS în mișcare astfel încât să prevină apariția efectelor frecării pe durata de viață a produsului.

Mulți experți au ajuns la concluzia că MEMS și nanotehnologia sunt două etichete diferite pentru ceea ce este în esență, o tehnologie ce cuprinde lucruri miniaturizate extrem de mici care nu pot fi văzute cu ochiul uman. Rețineți că o definiție la fel de generală există în domeniul circuitelor integrate, care este frecvent menționată ca tehnologia microelectronică chiar dacă tehnologiile de dezvoltare a IC au de obicei dispozitive cu dimensiuni de zeci de nanometri. Dacă este așa sau nu MEMS și nanotehnologia sunt una în alta, este de necontestat faptul că există interdependențe covârșitoare între aceste două tehnologii, care vor crește în timp. Poate că ceea ce este cel mai important sunt beneficiile comune oferite de aceste tehnologii, precum : capacitățile de informare ridicate; miniaturizarea sistemelor; materiale noi care rezultă din științe noi cu dimensiuni la scară miniaturală; funcționalitate sporită și autonomie pentru sisteme.

În prezent, cea mai importantă în aplicațiile MEMS este abilitatea de a face un dispozitiv existent de dimensiuni microscopice, sau de a crea un nou dispozitiv, care nu ar funcționa dacă ar avea dimensiuni de câțiva centimetri, dar care funcționează bine la scară micro.

De asemenea, dispozitivele MEMS pot fi fabricate la prețuri mici în cantități mari, oglindind industria semiconductorilor pe care se bazează. MEMS reprezintă o tehnologie inovatoare, o piatră de temelie pentru rezolvarea problemelor în aproape orice domeniu tehnic.

Ele sunt deseori utilizate pentru a face senzori, incluzând senzorul pentru airbag în cele mai moderne automobile. În alte aplicații ele interacționează cu mediul lor, să-l schimbe într-un fel. De exemplu, un dispozitiv cu propulsie pe bază de ion care poate deplasa mici sateliți în spațiu sau un sistem optic care redirecționează fasciculele de lumină. Uneori, interacționează cu ele însele, cum este cazul mecanismului temporizat de blocare pe un focos nuclear.

Un astfel de mecanism conține unelte și legături care pot deschide un comutator cu intrarea electrică corectă. Deoarece sunt microscopici, pot fi instalați în spații mici. De asemenea, pot interacționa cu molecule, deschizând un nou univers al aplicațiilor chimice, biologice și medicale posibile.

Micromotoare realizate în tehnologie MEMS. Descriere, funcționare, caracteristici, tehnologii utilizate pentru realizare, aplicații

Micromotoarele și microgeneratorii ocupă un subset al MEMS, care transformă energia dintre domeniile electric și mecanic. Cu progresele în domeniul tehnologiilor de microfabricare pentru circuite integrate (IC) și MEMS, precum și progresele înregistrate în folosirea materialelor noi, un micromotor fiabil și eficient poate fi construit pentru a oferi puterea mecanică diferitelor micro sisteme.

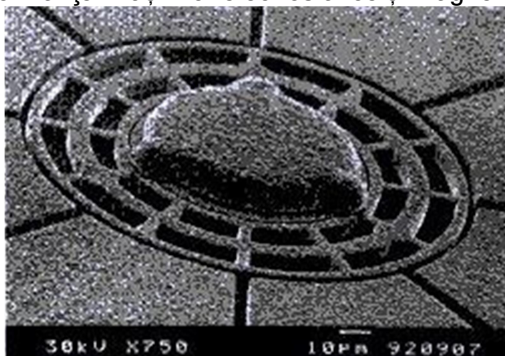
Micromotoarele pot fi utilizate pentru dezvoltarea de instrumente folosite în microchirurgie, cum ar fi endoscoape, tăietori, și apucători, precum și dezvoltarea micropompelor și microvalvelor cu numeroase aplicații de la livrare de combustibil și probe biologice, până la răcire și instrumente analitice. Micromotoarele pot fi, de asemenea, utilizate în micro asamblare, propulsie și acționare.

### Mașinile electrice

Mașinile electrice sunt echipamente pentru conversia continuă de energie între domeniile electric și mecanic prin mișcare de rotație sau liniară. Conversia electromecanică a energiei are loc printr-un câmp magnetic sau electrostatic.

În ciuda faptului că mașinile electrostatice s-au dezvoltat istoric mult mai devreme decât mașinile magnetice, comercializarea de mașini electrostatice a fost foarte limitată. În practică, toate motoarele la scară macro, generatoarele, și actuatorii sunt bazate pe conversia energiei între domeniile mecanic și magnetic; mașinile magnetice au fost o tehnologie dominantă pe scara macro. Acest lucru se datorează faptului că macromașinile electrostatice au o densitate energetică scăzută în comparație cu mașinile magnetice.

Densitatea de energie într-un câmp electric (electrostatic) și în câmpul magnetic sunt date de formulele  $W_E = 1/2 * \epsilon * E^2$  și  $W_M = B^2 * (1/2 * \mu)$  respectiv, în cazul în care  $\epsilon$  este permitivitatea materialului,  $E$  este magnitudinea câmpului electrostatic,  $\mu$  este permeabilitatea materialului, iar  $B$  este magnitudinea densității fluxului magnetic. Densitatea energiei golului de aer este indicator de calitate pentru evaluarea performanței mașinilor electrostatice și magnetice.



Micromotor electrostatic

Densitatea mare de energie a mașinilor magnetice (în comparație cu mașinile electrostatice) le-a făcut să fie tehnologia dominantă pe scară macro. Mai mult, mașinile electrostatice au tensiune înaltă de operare și necesită fabricare geometrică precisă (în special la golul de aer), care este un dezavantaj.

La scară micro, mașinile magnetice au mai multe dezavantaje, necesitând utilizarea unor materiale feromagnetice și a unor straturi groase de metal, care sunt foarte provocatoare pentru fabricare și necesită procese care nu sunt compatibile cu fabricarea tradițională a IC. Aceste mașini sunt conduse de curent și necesită, de obicei, curenți mari de conducere. Curentul disipă foarte multă energie în microînfășurările foarte rezistive metalice și miezul magnetic al mașinii.

În schimb, mașinile electrostatice sunt realizate din conductoare și dielectricilor, care sunt frecvent utilizate în procesele de fabricație a IC convenționale. În scopul de a crește viteza și funcționalitatea circuitelor integrate, proprietățile conductorilor și ale dielectricilor au fost optimizate în ultimele decenii, procesul de fabricație a micromașinilor electrostatice este mult mai ușor decât a omoloagelor magnetice.

Din punct de vedere al performanței, mașinile electrostatice la scară micro sunt comparabile cu omoloagele magnetice și în cazurile în cazuri speciale mașinile electrostatice pot fi superioare.

Mai multe tipuri de micromotoare și microgeneratori au fost intens studiate : micromașinile cu electret permanent, piezo-electrice, și cu ultrasunete sunt câteva exemple.

Rezistența variabilă (variable-reluctance) și mașinile cu inducție magnetică, sunt echivalentul magnetic al capacității variabile (variable-capacitance) și mașinile cu inducție electrică, împreună cu mașinile cu magnet permanent sunt principalele tipuri de micromașini magnetice. Micromotoarele cu capacitate variabilă, care au fost printre primele dispozitive microelectromecanice fabricate sunt discutate în detaliu în secțiunea următoare.

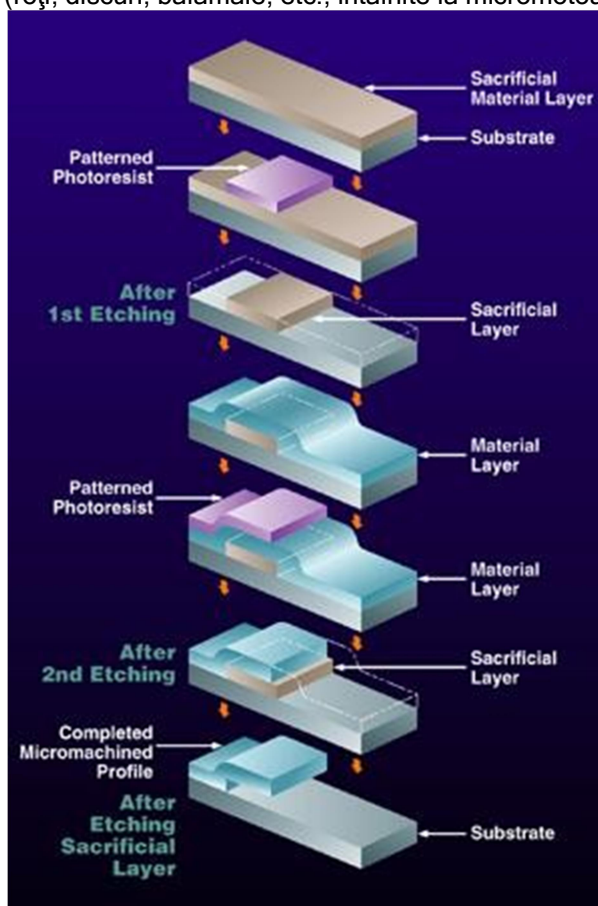


Micromotoare realizate în tehnologie MEMS. Descriere, funcționare, caracteristici, tehnologii utilizate pentru realizare, aplicații

### Micromașinile cu capacitate variabilă

Acestea sunt mașini sincrone care produc un cuplu din cauza nealinerii spațiale dintre electrozii de pe stator și polii aparenti de pe rotor. Trimmer și Gabriel au propus conceptul de micromotoare liniare și rotative cu capacitanță variabilă (VCM) în 1987. Au fost construite motoare sincrone fabricate folosind procese semi-standard de fabricație a IC cunoscute sub numele de "microprelucrări de suprafață".

**Microprelucrările de suprafață** presupun prelucrarea la nivelul straturilor depuse pe un substrat și se bazează pe procese de corodare selectivă a unor straturi, supranumite și straturi de sacrificiu, realizându-se astfel structuri mecanice *suspendate* (de tip lamele, bride, etc., întâlnite la microsenzori) sau *mobile* (roți, discuri, balamale, etc., întâlnite la micromotoare, microactuatori, etc.).



Etapele utilizate în procesul de microprelucrări de suprafață. Un proces de stratificare este utilizat pentru a crea componente MEMS și de a obține golurile de aer dintre straturi care permit mișcarea componentelor.

Prin tehnica microprelucrărilor de suprafață se pot realiza cât de multe straturi este nevoie, fiecare start având o configurație diferită. Numărul uzual de straturi realizate în cazul MEMS-urilor este de cca. 5 - 6 straturi.

Deoarece structurile active sunt realizate deasupra substratului și nu în interiorul acestuia, proprietățile substratului nu sunt atât de importante aici, de aceea substraturile mai scumpe de siliciu pot fi înlocuite cu substraturi mai ieftine din materiale amorphe (sticlă) sau mase plastice. Exemple de utilizare: la producerea TFT-urilor (thin-film transistor, care sunt tranzistori cu efect de câmp realizați prin depunerea stratului activ semiconductor, a stratului dielectric și a contactelor metalice pe un substrat amorf) utilizate la ecranele plate; la fabricarea celulelor solare cu straturi subțiri, etc.

Dezvoltarea micromotoarelor cu capacitate variabilă s-a bazat inițial pe încercările lui Lober și Howe de fabricație a structurilor de polisiliciu pasiv, împreună cu un top-drive VCM. Rotorul în aceste tipuri de VCM ar sta fie pe centură, fie pe un pin central. În aceste procese, filme subțiri de nitru de siliciu și dioxid de siliciu au fost folosite ca un izolator electric și strat de sacrificiu, în timp ce un film de polisiliciu a fost folosit ca material structural.

Design-ul top-drive a fost inițial estimat a avea frecare mai mică (altitudine rotor) și un cuplu mai mare (zonă activă mai mare), cu toate acestea suferă de un fenomen cunoscut sub numele de "prindere rotor", care oprește rotorul din rotație. Acest lucru se datorează faptului că statorul

Micromotoare realizate în tehnologie MEMS. Descriere, funcționare, caracteristici, tehnologii utilizate pentru realizare, aplicații

și rotorul au două potențiale diferite, făcând rotorul să tragă (pull-in) spre stator datorită câmpului electric diferit de zero. Rezultatul este un scurt-circuit. În mod similar, o diferență de potențial între rotor și substrat este responsabilă de provocarea prinderii rotorului pe substrat pentru ambele modele : side-drive și top-drive. În a doua generație de VCM, problema aceasta a fost abordată prin conectarea electrică a acului rotorului la substrat pentru a păstra rotorul legat la masă (în loc să plutească). Conexiunea electrică nu a fost întotdeauna posibilă din cauza oxidării bucșei de polysiliciu.

Motorul top-drive nu a fost niciodată complet testat datorită problemelor de stabilitate și de prindere. Problema majoră cu aceste mașini (atât top-drive cât și side-drive) a fost lipsa de fiabilitate, stabilitate, și cuplul mic.

La motoarele obișnuite side-drive, rotorul a fost susținut pe pini (ace). Aceste ace sunt în contact direct cu statorul care are ca rezultat frecare mare, uzură, și, prin extensie, durată de viață limitată. Rezultatele testelor au arătat că efectele frecării joacă un rol dominant în dinamica micromotorului. Aceste motoare ar funcționa bine pentru aproximativ o săptămână înainte de a se opri. În plus, zona activă a motorului folosit pentru a produce un cuplu a fost mică și limitată de grosimea stratului de polisiliciu (side-drive design). Grosimea polisiliciului a fost limitată de constrângerile din cadrul proceselor de fabricație. Deoarece straturile de polisiliciu au fost extrem de stresate, raza motorului a fost limitată de curbura maximă admisibilă a rotorului eliberat. Prin urmare, cuplul motor, care, depinde direct de mărimea motorului, a fost limitat.

Mai mult, din cauza toleranțelor geometrice în proiectare și fabricare, stratul de aer nu a fost egal între cele două părți a motorului și, ca urmare, forțele radiale electrostatice nu au fost echilibrate, iar motorul nu a fost simetric. În plus, din cauza nealinierii verticale stator-rotor, rotorul se va ridica de la poziția sa de repaus, introducând instabilitate și limitând viteza maximă. În ambele modele, variația cu o forță normală, respectând poziția unghiulară a rotorului, ar provoca instabilitate în rotor și ar rezulta distrugerea rotorului.

Cuplul acestor masini a fost în intervalul de câțiva pico-newtoni metru ( $\text{pN}\cdot\text{m}$ ). Un cuplu mai mare în intervalul de la micro până la mili  $\text{N}\cdot\text{m}$  cu viteze de zeci de mii de rot / min este, în general, necesar pentru pompare, acționare, sau o intervenție chirurgicală.

Pe scurt, VCM side-drive discutate aici au mai multe dezavantaje:

1. frecarea și uzura datorită designului cu ax central sau cu centură
2. cuplu mic, datorită dimensiunilor mici ale zonei active
3. fiabilitate și stabilitate, datorită designului cu ax central sau cu centură, precum și oxidarea polisiliciului
4. stabilitatea rotorului din cauza forței normale dezechilibrate rezultate din proiectarea electrozilor.

Folosind o nouă abordare, este posibilă proiectarea și fabricarea unui micromotor rotativ pentru a minimiza aceste neajunsuri.

Oscilatoarele VCM, au fost dezvoltate în colaborare cu motoare obișnuite side-drive de Mehregany. În acest design, rotorul se balansează în jurul axului central. Forța care acționează între stator și rotor în acest model este forța normală, în timp ce, în partea de motoare obișnuite side-drive, forța care acționează este forța tangențială. Forța normală ar putea fi aproximativ un ordin de mărime mai mare decât forța tangențială. Astfel, aceste motoare produc un cuplu mai mare decât motoarele obișnuite side-drive. Principalul avantaj al acestui model este faptul că, cuplul este proporțional cu raportul motoreductor (raportul dintre frecvența excitației electrice la frecvența mecanică a rotorului în proiectarea axului central). Din cauza frecării și uzurii, raportul de transmisie s-ar schimba în timpul funcționării; prin urmare, funcționarea prelungită nu a fost posibilă. Mișcarea oscilatorie a rotorului este un alt dezavantaj al acestui tip de motor și limitează aplicațiile.

Posibilitatea de operare a unui micromotor oscilator într-un mediu lichid (apă sau siliciu), a fost investigată de către Dhuler. Constanta dielectrică mai mare din aceste medii, în comparație cu cea a aerului sau azotului, ar putea duce eventual la o schimbare mai mare a capacității și în consecință, un raport de transmisie mai mare și un cuplu electromecanic mare. Utilizarea unei aproximări simple a unei plăci paralele, poate arăta că rata de schimbare a capacității, în orice mașină cu capacitate variabilă este proporțională cu constanta dielectrică a vidului. În timp ce lubrifianți ca siliciul și apa pot reduce frecarea, s-ar introduce pierderi mari de viscozitate. Cuplul net inferior și viteza (120 rpm) au fost raportate pentru dispozitivele testate de Dhuler.

Odată cu progresul tehnicilor de fabricare și dezvoltarea de noi materiale, noua generație de VCM a fost fabricată folosind gravarea cu ion extrem de reactiv (deep reactive ion etching=DRIE) și procesele LIGA. Yasseen a arătat un micromotor side-drive cu poli de 200 micrometri înălțime și o viteză maximă de 300 rpm. Golul de aer a fost de 17 micrometri și rotorul a fost susținut de un pin central. Creșterea grosimii polului păstrând constant golul de aer ar duce la o creștere în zona activă. În mod similar, un stator împletit oscilator (twine stator wobble) VCM a



Micromotoare realizate în tehnologie MEMS. Descriere, funcționare, caracteristici, tehnologii utilizate pentru realizare, aplicații

fost fabricat printr-un proces LIGA cu poli de 200 micrometri înălțime, care ar putea fi utilizați împreună cu un circuit în buclă închisă. Motoarele side-drive obținute prin microprelucrări de suprafață folosind carbura de siliciu (SiC) ca strat structural au fost, de asemenea, dezvoltate. Aceste tipuri de motoare, potrivite pentru operarea în medii dure, au avut viteze reduse de exploatare de 37 - 317 rpm. Nici cuplul și nici puterea pentru aceste motoare nu au fost raportate.

Una dintre problemele majore ale micromotoarelor obținute prin microprelucrări de suprafață este suportul mecanic care susține rotorul pe stator. Mecanismul de sprijin ar trebui să conducă în mod ideal, la frecare minimă, stabilitate ridicată, de înaltă robustețe. Modelul pinului central, folosit la micromotoarele convenționale, conduce la frecare, uzura, fractura, stiction, și moduri de eroare bazate pe contaminare. În prezent se lucrează pentru a profita de materiale cu coeficient de frecare mic (coeficient of friction=COF), cum ar fi diamond-like-carbon (DLC), pentru a reduce frecarea în modelele cu pin central sau cu centură. COF pentru DLC este raportat a fi  $\sim 0.001$  în comparație cu 0.01 până la 0.08 la siliciu.

O încercare de a reduce frecarea făcând rotorul să plutească electrostatic a fost demonstrată de Jeon. Acest motor ar putea atinge o viteză maximă de 60 rpm, cu un gol de aer de 300 micrometri și tensiunea aplicată de aproximativ 500 V la electrozii de susținere. Pentru a reduce tensiunea de operare, un gol de aer mai mic este necesar. Cu toate acestea, menținerea stabilității cu un gol de aer mai mic este o provocare și necesită sisteme complexe de control; prin urmare, un astfel de motor nu a fost construit la scară micro. Un dezavantaj suplimentar al acestui model este faptul că anumite zone ale motorului sunt dedicate electrozilor care susțin rotorul și statorul. Prin urmare, acest motor are forță mai mică de conducere pe unitatea de suprafață decât micromotoarele convenționale.

Suspensia magnetică a rotorului, ca susținerea electrostatică, poate duce la frecare redusă și vibrații scăzute în comparație cu rulmenții de contact. Magnetii pasivi și activi au fost folosiți la motoarele în miniatură pentru susținerea sau ghidarea rotorului. Punerea în aplicare a levitației magnetice într-un micromotor a fost introdusă pentru prima oară de către Shearwood. Wu a demonstrat levitația rotorului de 300  $\mu\text{m}$  și a atins viteza de 1400 rpm pentru un micromotor cu bobine de susținere, rotative și de stabilitate fabricate pe stator. În prezent micromotoarele liniare și cele rotative au fost proiectate cu levitație magnetică. Rezultatele testului suplimentare sunt necesare pentru a caracteriza performanța sistemelor de astfel de suspendări.

### Testarea și caracterizarea

În timp ce se derula o mare cercetare asupra modului de proiectare și fabricare a micromașinilor, au fost publicate o serie de articole despre conducerea, controlul, și caracterizarea acestor mașini. Micromotoarele electrostatice, în general, necesită unități cu tensiune ridicată multifază. În funcție de amplitudinea tensiunii, de frecvență, ciclu, diferența de fază, numărul de faze, și de tipul formei de undă, un sistem electronic de putere este necesar. Menținerea integrității formei de undă livrate la sarcini capacitive (cu constrângeri de timp stricte) face designul circuitului provocator. Un exemplu de astfel de sistem dezvoltat de Neugebauer este capabil să funcționeze până la 300 V și 2 MHz.

În unele mașini, conducerea optimă necesită informații despre poziția instantanee a rotorului. Prin urmare, un sistem de control mult mai robust și de încredere pentru cele mai micromotoare este un control în buclă închisă. Acest lucru este mai important în motoare cu capacitate variabilă, deoarece acestea sunt mașini sincrone. Cu un circuit de feedback, un micromotor poate fi controlat să opereze la o viteză și la un cuplu dorit (de echilibru). Senzorul de poziționare optic poate fi folosit; cu toate acestea, integrarea surselor și detectoarelor optice cu un micromotor este o provocare. Aceasta cercetare este în curs de desfășurare la Universitatea din Maryland (UMD). S-a arătat că unitatea electronică poate fi integrată cu un micromotor monolitic pe un singur chip cu ajutorul proceselor specifice semiconductorului complementar cu oxid metalic (CMOS).

Caracterizarea micromotoarelor este efectuată de obicei prin măsurarea vitezei, cuplului, și puterii de ieșire. Eficiența este, de asemenea, un parametru cheie care determină performanța micromotorului. Bart a caracterizat comportamentul dinamic al VCM side-drive prin utilizarea unui dinamometru stroboscopic și a estimat parametrii cuplului motor și de fricțiune. Măsurarea directă a cuplului a fost efectuată pentru motoare oscilatoare măsurând deformările unui fascicul de console lung fixat la un capăt și conectat la rotorul motorului prin intermediul unei structuri obținute prin microprelucrări de suprafață la celălalt capăt. În timp ce puterea de ieșire a motoarelor electrostatice poate fi estimată folosind metode similare, măsurarea puterii de intrare nu este comună tuturor și implică măsurarea curenților în gama de câțiva pico-amperi sau mai puțin. Un ampermetru pentru curent alternativ (AC) este necesar, deoarece motorul este o sarcină capacitivă. Pe scurt, cerințele

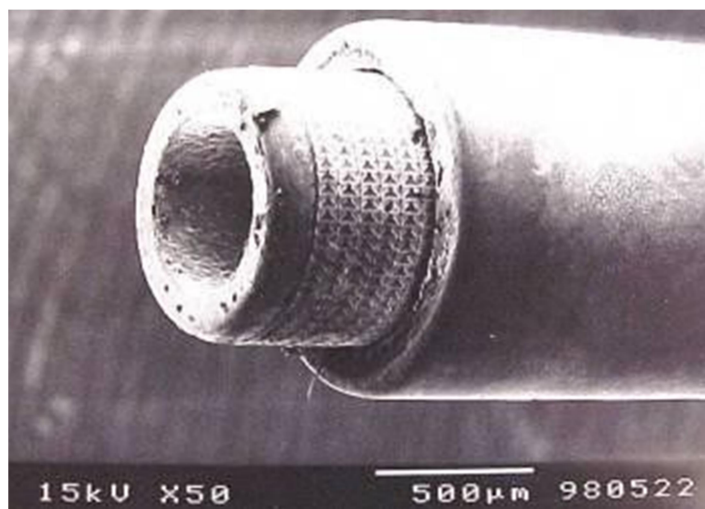
Micromotoare realizate în tehnologie MEMS. Descriere, funcționare, caracteristici, tehnologii utilizate pentru realizare, aplicații  
stricte de conducere și dimensiunea redusă a aparatului face ca testul și caracterizarea micromotoarelor să fie provocatoare.

### Aplicații

După ce primul micromotor în stare de funcționare pe siliciu a fost prezentat în anul 1989, mai multe alte grupuri de cercetare au construit micromotoare similare, dar aceste dispozitive au fost întotdeauna de sine stătătoare, fără electronice CMOS sau alte componente pe același cip. S-a încercat construirea unui micromotor integrat complet compatibil CMOS obținut prin microprelucrări de suprafață, care este integrat monolitic împreună cu circuitul CMOS necesar, care conține un oscilator, un divizor de frecvență, un divizor cu trei, și tranzistoare DMOS pentru circuitul de conducere de pe un cip de siliciu. Procesul de fabricație pentru a genera micromotoarele și circuite CMOS monolitice pe un singur cip de siliciu este ușor transferabil la orice altă linie de proces CMOS și folosește numai pași standard. Acesta poate fi utilizat ca bază pentru multe alte aplicații MEMS pentru senzori inteligenți și sisteme de acționare.

Un micromotor nou, extrem de scalabil și cu un cuplu foarte mare pentru aplicații MEMS și MOEMS folosind rectificarea mecanică a mișcării de oscilație. Un nou micromotor care este alimentat de rectificarea mecanică a mișcării de oscilație este conceput, proiectat și fabricat. Caracteristica sa de funcționare este destul de bogată și scoate la iveală diferite moduri de excitație. Ideea explorată în proiectarea acestui nou dispozitiv este complet diferită de alte micromotoare prezentate în literatura de specialitate. Acesta constă dintr-un rotor cu aripioare elastice și actuatori liniari situați pe perimetrul său și funcționează după cum urmează. Când actuatorii se deplasează spre aripioare, frecarea dintre marginea servomotorului și vârful înălțătoarelor le face să se deformeze. Această deformare aplică o forță asupra rotorului care are ambele componente tangențiale și normale. Componentele tangențiale conduc la o acțiune de răsucire pe rotor, făcându-l să se rotească.

Un microsemnal sinusoidal trifazat de conducere a micromotorului fără perii. Sistemul de conducere permite reglarea precisă a cuplului și viteza de ieșire a micromotorului, fără nici un feedback.



Motor tubular

Alte aplicații sunt în biotehnologie (amplificarea și identificarea AND, electroforeză), medicină (senzori de presiune a sângelui, de presiune a aerului pentru inhalatoare, dializă), comunicații și senzori de inerție (accelerometre, giroscopuri), industrie (airbag-uri).

### Concluzii

MEMS au capacitatea de a impacta aproape orice domeniu tehnic. Dimensiunile lor mici, volumul mare și prețul redus permit crearea unei serii de senzori de unică folosință și dispozitive. Ele pot interacționa cu mediul la nivel molecular pentru a atinge noi obiective.

Cu toate acestea, tehnologia MEMS este încă în faza de început a dezvoltării. Este capabilă de revoluționarea multor tehnologii și poate aduce multe beneficii în toate domeniile.