

RAPORTUL STIINTIFIC SI TEHNIC

Tema: „Actuatori electromagnetici și electrodinamici procesați prin tehnologie LIGA”

Etapa de executie nr. 1: Studii privind actuatorii electromagnetici de tip MEMS și micro sisteme de scanare

1. Obiectivele generale. Dezvoltarea unui nou Sistem ElectroMecanic (MEMS), prin utilizarea unei tehnologii LIGA.

2. Obiectivul etapei de examinat. Dezvoltarea unor „Studii privind actuatorii electromagnetici de tip MEMS și micro sisteme de scanare”.

Activitatea 1.1.: Studii privind standardizarea micro sistemelor. Studii privind modelele matematice (analitice și FEM) utilizabile pentru proiectarea MEMS.

In cadrul acestui obiectiv, în activitatea 1.1, a fost prevăzut ca:

- partenerul CER să dezvolte un studiu privind: Standardizarea micro sistemelor;
- partenerul UPB să realizeze două studii:
 - studiu privind metodele de modelare și simulare a sistemelor MEMS (elaborarea unor modele fizico-matematice și implementarea lor FEM pentru analiza proceselor și interacțiunilor electro-mecanice pentru familia de dispozitive MEMS de interes pentru proiect);
 - studiul privind proprietățile de material în domeniul MEMS.
- partenerul INCDMTM să realizeze un studiu privind arhitecturi pentru sistemele de comanda ale MEMS;
- partenerul ApelLaser să realizeze un studiu privind sistemele de scanare cu laser.

În plus față de cele propuse initial pentru această etapă, consorțiul a decis proiectarea și executia unui prototip la scară macroscopică. Concluziile studiului privind principiile de modelare și simulare au fost aplicate pentru studiul acestui model. Acest model este în faza de execuție și va fi testat privind caracteristicile mecanice și electro-magnetice. Compararea rezultatelor experimentale și de simulare va permite optimizarea modelelor matematice și o mai bună înțelegere a fenomenelor (realizarea la scara macroscopică permite un mai bun control al parametrilor de material, dimensiunilor, o analiză experimentală cu mijloace conventionale) și implicit reducerea numărului de variabile dificil de controlat, cu șanse sporite de a identifica problemele de înțelegere fenomenologică ce au condus la diferențe teorie-structură reală.

Activitatea 1.2. Studiu privind principiile de control de inalta precizie a scannerelor optice - p a r t e a 1 . A c h i z i t i a echipamentelor/licentelor software esentiale.

In cadrul acestui obiectiv, în activitatea 1.2, a fost prevăzut ca:

- partenerul UPB să înceapă un studiu privind comanda și controlul MEMS și să realizeze achiziția unor echipamente necesare evoluției proiectului. Acest studiu va fi definitivat în etapa a aII-a împreună cu alți parteneri. Achiziția a constat în tehnică de calcul necesară grupului din UPB ce este implicat în activitatea de modelare electro-magnetică a MEMS cu acționare electromagnetică (laptop, două sisteme de calcul – stații de lucru; software pentru proiectare CAD și simulare tip SolidWorks).

- partenerul Apel Laser să înceapă un studiu privind principiile de control de înaltă precizie a scannerelor optice - partea 1 și să realizeze achiziția unor echipamente și software necesare în etapele ulterioare de proiectare a structurilor MEMS dar și a standurilor de testare.

Cele două studii sunt complementare, primul urmărind analiza metodelor de comanda a actuatorilor electromagnetici tip MEMS iar al doilea urmărind analiza nivelului ierarhic superior de comandă – comanda scannerului pentru a obține deflexiile dorite ale fasciculului laser – în regim static și dinamic.

Aceste studii vor fi definitive în etapa a 2-a, din 2015.

Studiile actuale privitoare la principiile de comandă, după actualizarea cu noi informații științifice, vor fi completate și cu soluții de circuite electrice și algoritmi pentru programele de comandă, ce vor fi proiectate, simulate și executate în etapele ulterioare (primul va fi destinat prototipului macroscopic, pentru a fi validate conceptele de bază).

Activitatea 1.3. Inițiere - proiectarea, simularea și fabricarea unor structuri de test cu elemente de cuplare/aliniere

În cadrul acestui obiectiv, în activitatea 1.3, a fost prevăzut ca:

- partenerul UPB să înceapă proiectarea unor structuri de aliniere la nivel mini (pentru prototipul inițial de lucru care validează modelul matematic și modelul folosit la simulare) dar și la nivel micro pentru sistemul final;
- partenerul Apel Laser să înceapă proiectarea standului de testare a soluțiilor de aliniere a MEMS.

Cele două studii sunt legate deoarece standul de probă va necesita realizarea unor elemente care să permită evaluarea exactă a poziției relative a componentelor de aliniere (unor marcaje) ce sunt fi luate în considerare la proiectarea structurilor de test.

Structurile de test proiectate au urmărit limitele tehnologice ale tehnologiei LIGA, disponibilă la partenerul ICPE-CA. S-a decis realizarea unor structuri de probă cu diferite configurații și la diferite scale. Dimensiunile și performanțele necesare deduse din simularea efectuată de partenerul UPB (a fost analizată influența impreciziilor de aliniere – de orientare în plan/rotație și de poziție relativă a componentelor) sta la baza stabilirii performanțelor de măsurare a alinierii pentru standul de probă.

În acest moment (04. Decembrie 2014) sunt disponibile:

- proiectele pentru 5 soluții de aliniere și proiectele pentru instalația de prelucrare LIGA bazate pe elementele geometrice din soluții;
- o schemă de stand de probă.

În continuare sunt prezentate extrase din studiile menționate:

Standardizarea microsystemelor

Studiul și-a propus să analizeze stadiul standardizării în acest domeniu cu semnalarea cerințelor specifice impuse de caracterizarea unui material care intră în structura unui sistem MEMS, tehnologiile de testare și cerințele impuse de standarde pentru un prototip. Elementele semnalate sunt de mare utilitate atât în faza de proiectare a sistemului MEMS -caracterizarea materialelor- cât și în etapa de validare a caracteristicilor oferite de prototip –performanțe-, asigurate prin încercări riguroase și posibilitatea trasabilității activităților.

Complexitatea și marea varietate de dispozitive MEMS existente astăzi pe piață se reflectă și asupra tehnologiilor de încercare, unele comune diverselor tipuri de dispozitive, altele specifice tipului ce urmează a fi dezvoltat. De aici și explicația numărului relativ redus de standarde elaborate de Comisia Electrotehnică Internațională – CEI. Studiul a analizat

conținutul acestor standarde, tipurile de încercări, extrăgând elemente utile atât pentru faza inițială cât și pentru faza de prototip; s-a considerat util să se prezinte „bune practici în testări și normalizare” întâlnite la firme din domeniu.

Un alt capitol al studiului dezvoltat, este rezervat abordării „în oglindă” *a modului în care prevederile tehnice din standarde pot fi asigurate de echipamentele de măsură specifice acestor încercări existente la parteneri*. Analiza făcută la parteneri a arătat că există echipamentele necesare pentru determinarea Modulului Young și coeficient Poisson a materialelor, aparatură pentru încercări mecanice în domeniul micro-nano (oboseală, tracțiune, rugozitate, flexiune, forfecare, tensiuni interne), optice sau încercări climatice.

În ideea utilizării unui limbaj adecvat și dat fiind noutatea domeniului MEMS -cu multe concepte încă neclarificate- *s-a prezentat un glosar de termeni extrași din standardele CEI și glosarele unor firme recunoscute, o terminologie a domeniului care rămâne deschisă pentru completări viitoare*.

Studiul dezvoltat, este organizat pe 8 capitole la care se adaugă bibliografia de bază,

Capitolul 1. Sistemele MEMS. Elemente caracteristice

Capitol introductiv al Studiului, el prezintă elementele specifice ale unui sistem MEMS și varietatea soluțiilor constructive, de unde și nevoia unei atente standardizări a metodelor de caracterizare a unui material utilizat și a testării unui sistem realizat.

Diversitatea aplicațiilor și specificitatea lor, se reflectă atât în proiectarea sistemelor MEMS, cât și în realizarea și testarea lor, *sesizându-se unele elemente comune care recomandă standardizarea lor dar și elemente care satisfăcând doar unele cerințe ale acestor sisteme, sunt particularizate la specificul unui anumit MEMS. Această constatare explică și motivul pentru care dispozitivele MEMS realizate sub formă de senzori și actuatori -dimensiunile acestora încadrându-se în gama 100 nm–1000 micrometri-, sunt fabricate astăzi utilizând atât procedee specifice tehnologiei circuitelor integrate cât și a unora specifice MEMS, la realizarea unui MEMS întâlnindu-se tehnologii de natură optică, mecanică, termică și fluidică (în special pentru actuatorii din medicină)*.

Prezentul studiu își propune ca din analiza acestor reglementări, să extragă acele tehnologii de încercare specifice dispozitivului MEMS care urmează a fi dezvoltat în cadrul Proiectului -tehnologii de încercare aflate în standardele existente și normele practice de firme activând în domeniu- specifice dispozitivului MEMS care urmează a fi elaborat și apte de a da informații privind performanțele.

Capitolul 2. Tipuri de încercări ale MEMS, practice astăzi în laboratoare din lume

Sunt analizate bune practici din experiența unor mari firme, cu scopul de a utiliza aceste date în realizarea sistemului MEMS ce face obiectul Proiectului.

În practica marilor laboratoare din lume, încercarea unui dispozitiv MEMS -senzor sau actuator- nu se face doar în faza finală de verificare a performanțelor de asigurat, ci pe întreg procesul de realizare: de la definirea caracteristicilor de material utilizate și comportarea într-un ansamblu impus de construcția dispozitivului, la modul în care aceste caracteristici pot fi afectate de tehnologia folosită și caracterizarea dispozitivelor. /4-7/

Tipurile de încercări întâlnite la dezvoltarea unui dispozitiv MEMS sunt de natura: electrică, mecanică, optică, condiționări climatice, funcție de specificitatea aplicației: Metodele de încercare a MEMS și instrumentația aferentă, depind dacă încercările sunt la nivel de plachetă/structură, material sau în dispozitivul încapsulat (static sau în funcționare).

Se prezintă tipuri de încercări practice în domeniul testării sistemelor MEMS.

Incercări optice /13-16/, Incercări electrice /13, 14, 18/, Incercări mecanice și măsurarea caracteristicilor de material, încercări climatice.

Capitolul 3. De ce standardizare în dispozitivele MEMS

Abordează problema necesității standardizării sistemelor MEMS din punct de vedere al competitivității și al interesului firmelor în asigurarea unor sisteme de calitate care să asigure *evaluarea corectă a performanțelor, fiabilitatea tot mai ridicată a sistemelor*. /19-25/

Există conturată tot mai pregnant o opinie a specialiștilor /34/ că este nevoie de standardizare în MEMS: „Is need of standardization” în dezvoltarea elementelor comune întâlnite la MEMS, a metodelor de determinare a parametrilor și cerințelor, a caracteristicilor pe care trebuie să le asigure echipamentele de testare, trasabilitatea operațiunilor constructiv/tehnologice, *politici de care Proiectul trebuie să țină seama.*

O analiză a literaturii de specialitate arată însă ca acest domeniu datorită complexității lui și a particularităților constructive a dispozitivelor din familia MEMS (optice, magnetice, electrostatice, giro, sa) -rezultat al unor participări interdisciplinare precum mecanica, optica, fizica materialelor, electronica și TIC- standardizarea este într-o fază de început, de unde interesul actual al firmelor de accelerare a acestei activități. Există multe opinii ale specialiștilor care apreciază că tehnologia MEMS este mult mai complexă decât a circuitelor integrate de unde și dificultățile de a stabili un standard.

Corelat cu dezvoltarea dispozitivului MEMS, colectivul își propune ca din analiza standardelor existente să selecteze acele încercări care pot defini performanța, elaborarea programului de încercări propus.

Capitolul 4. Analiza standardelor CEI elaborate până la această dată în domeniul dispozitivelor microelectromecanice (MEMS)

Acest capitol este important pentru că, din studierea standardelor dezvoltate în cadrul CEI, rezultă o anumită grupare /19-24/ și anume:

* *Standarde privitoare la terminologia domeniului* -importante pentru că definesc conceptele cu care se va opera

* *Standarde destinate metodelor de încercări* menite a caracteriza o proprietate de material, realizarea epruvetei, procedura de testare a straturilor subțiri utilizate în dispozitivele MEMS (tracțiune, oboseală, flexiune, rezistența la colaj, s.a.).

* *Standarde care se referă la un anumit dispozitiv MEMS* (RF MEMS, Filtre și duplexoare BAW, întrerupătoare MEMS, accelerometre, giroscopae).

Studiul prezintă elementele esențiale cuprinse în aceste standarde -22 apărute până la această dată -până în anul 2014- semnalând acele prevederi și tehnologii de testare care pot fi luate în considerare la realizarea dispozitivului MEMS prevăzut a se dezvolta în cadrul Proiectului, definirea unor regimuri de încercare și dimensionarea epruvetelor pentru încercarea la tracțiune, specificații generice pentru MEMS, proceduri de încercare și măsurare, trasabilitate și manipularea materialelor, Standarde produs MEMS microîntrerupătoare, MEMS giro Radiofrecvență, filtre și duplexoare, încapsulare.

Capitolul 5. Prezentarea standardelor CEI care se prevede că se vor elabora de CEI, în perioada anilor 2014–2016, atrage atenția asupra unor tendințe care se semnalează în domeniul MEMS rezultat al activității grupelor de lucru ale CEI–CT 47 (Terminologie, metode de măsurare a tensiunilor reziduale în filme, plachete, măsurarea încovoierii cantileverului, determinarea tensiunilor reziduale, metode de deflecție, măsurarea proprietăților mecanice a filmelor, metode de testare a fritelor de sticlă, dispozitive semiconductoare, MEMS cu electreți (harvesting)).

O a doua grupă de standarde care trebuie luate în considerare -în special după finalizarea prototipului- este cea elaborată de CT 104: Condiții de mediu, clasificare și metode de încercare, în cadrul căreia au fost elaborate un număr de 128 standarde și are în pregătire pentru următorii ani, încă 7.

Capitolul 6. Echipamente și aparatura de testare a performanțelor unui dispozitiv MEMS, existente la partenerii din Proiect

Un al doilea principal obiectiv pe care Proiectul și-a propus să-l abordeze a fost acela legat de *capacitatea partenerilor de a cunoaște cum cerințele standardelor menționate anterior pot fi satisfăcute de către echipamentele existente la parteneri. În realizarea acestui obiectiv au fost dezvoltate analize la parteneri, constatându-se existența unor echipamente care pot asigura o gamă deosebit de largă de testări.*

Capitolul 7. Terminologia MEMS

Domeniu relativ nou, cu participări a numeroase discipline tehnice în dezvoltarea dispozitivelor MEMS, el nu dispune de o terminologie standardizată care să acopere toate direcțiile de dezvoltare a domeniului.

În prezentul glosar de termeni dezvoltat în proiect, s-a căutat să se ofere celui care lucrează în acest domeniu un instrument util, impus a fi făcut datorită unui standard care nu cuprinde termenii noi aparuți în ultimii ani.

Capitolul 8. Concluzii

- Studiul realizat, a răspuns unui obiectiv important al Proiectului acela de a asigura că la baza proiectării sistemului MEMS stau date existente în standardele internaționale CEI privind caracterizarea unor parametri, metodele de testare și validare ale rezultatelor, care să confere prototipului competitivitate.

- Studiul comunică date privind tehnicile de caracterizare a proprietăților de material care intră în structura unui MEMS, tehnologiile specifice de control, validate și permițând o comparație corectă a rezultatelor.

- Finalizarea acestui studiu -vizând stadiul standardizării în domeniu- este însoțită de o altă contribuție și anume aceea, că identificând echipamentele de testare existente la parteneri, asigură și condițiile ca încercări existente în standarde să poată fi realizate.

- Un glosar de termeni în domeniul MEMS este realizat, el urmând ca pe parcurs să fie completat cu noi concepte care apar.

- Se poate aprecia că obiectivele etapei de execuție au fost îndeplinite.

BIBLIOGRAFIE

- /1/ R Feynman : Infinitesimal Machinery. Journal of Microelectromechanical Systems Vol 2, Nr 1 March 1993. p 4-44
- /2/ Titus Bajenesc: Microcomutatoaren RF MEMS: Fiabilitate. Moduri si mecanici de defectare
- /3/ TongGio s.a MEMS Characterisation Based on Optical Measuring Methods / Cap 5 www.interchopen.com.
- /4/ *** Reliability, Testing & Characterisation, Sandia National Laboratories, [http:// www.mems.sandia.gov](http://www.mems.sandia.gov)
- /5/ W Piyawattanametha, Zhen Qin Optical MEMS capit.12; In Microelectromechanical Systems and Devices, Editor Nazmul Islan, Ed Intech, Croatia, 2012
- /8/ Tashiyuki Tsuchiya : Evaluation of Mechanical Properties of MEMS Materials and their Standardisation
- /10/ N Randall: Characterisation of the Mechanical Properties of MEMS Devices using nanoscale techniques .www.astm.org/COMMIT/images/C28Presentati
- /12/ Bruker 3 D Static and Dynamic MEMS Characterisation , apr 2013 In www.bruker.com/improving_yields_3D_Static_and_dynamic_MEMS_characterisation-april_2013.pdf
- /17/ *** Roger Traynor Non contact Vibration Measurement of Microstructures www.lamdaphpto.co.uk calc mare smems 07
- /19/ Seria de standarde de încercări climatice. 60068-1; 60068-2; 60068-3.
- /20/ *** Microsysteme Technology Standardisation Roadmap. Project IST -2001- 37682. MEMSTAND /
- /30/ *** Glossary of MEMS Technology http://www.inems.com/Student_area/Glossary/MEMS_terminology.htm
- /33/ *** Vocabularul CEI – Electropedia www.iec.ch
- /34/ Fischer - Labossiere: MEMS Fatigue Testing tu Study Nanoscale Materials Response

Metodele de modelare și simulare a sistemelor MEMS - exemplificare

În această etapă s-a studiat un concept de actuator de tip consolă care este prevăzut cu o matrice de magneți permanenți la capătul liber al unei lamele elastice, care este construită dintr-un material de tip Polyimide (PI) (super)paramagnetică. Alternativ, lamela poate dintr-un material nemagnetizabil (permanent sau temporar), însă atunci între magneți și lamelă este inserată o plachetă de tip Permalloy. Magneții interacționează cu câmpul magnetic produs de curentul electric care circulă printr-o bobină de excitație, palanară, spiralată, plastă pe o placă suport construită din siliciu. Fig. 1 prezintă cele două variante constructive care au fost analizate. Curentul electric este reglabil, și asigură ajustarea deflexiei lamelei PI flexibile.

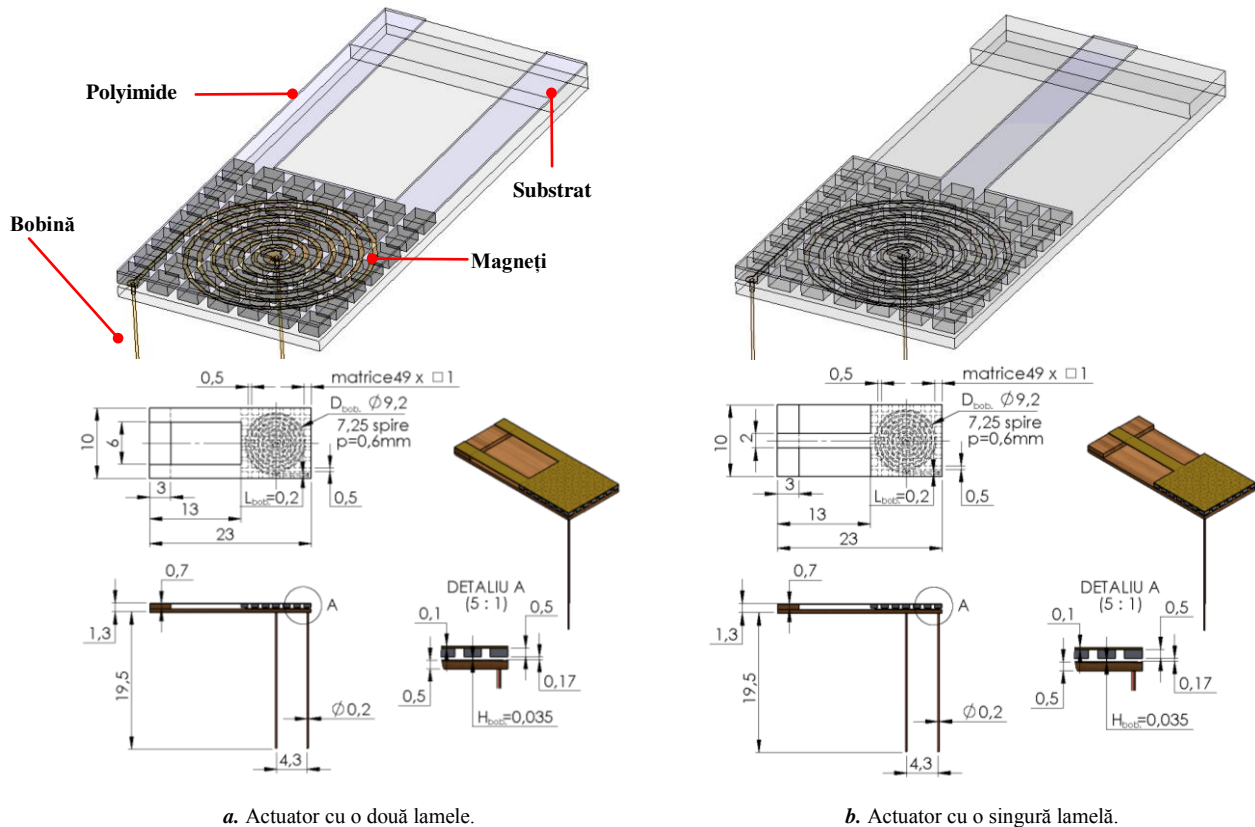


Fig. 1 — Modelele CAD ale actuatorilor cu lamele de tip consolă.

Analiza funcționării actuatorilor, prezentată în acest raport, necesită rezolvarea unor probleme de câmp electric staționar (electrocinetic), magnetic staționar și de rezistența materialelor, cuplate: curentul electric, soluție a problemei de câmp electric, este (împreună cu magneții permanenți) sursa de câmp magnetic, ce produce forțele electrodinamice care acționează asupra sistemului actuator.

În această etapă, modelele matematice care descriu fenomenele fizice sunt cuplate într-un singur “sens” – câmpul magnetic nu modifică distribuția curentului electric în bobină, iar deformările structurale nu modifică distribuția câmpului magnetic în sistem. Considerarea cuplajului câmp magnetic – structură în ambele sensuri necesită, în rezolvarea numerică, utilizarea unor rețele de discretizare deformabile. Aceste aspecte vor fi considerate în etapa următoare.

Acest studiu cuprinde și o analiză modală structurală, care permite determinarea primelor șase frecvențe proprii (structurale) ale actuatorilor și deformările asociate.

În ultima parte este propus un model de câmp electrostatic, necesar pentru determinarea capacității electrice echivalente a actuatorului – un parametru important în proiectarea electronicii de comandă.

2. Modelul matematic

2.5 Materiale și proprietăți

Substratul actuatorilor este construit din silicon, înfășurările sunt din cupru, lamelele elastice sunt din polyimide (PI), iar magneții permanenți sunt de tip NdFeB [3-6] – Tabelul 1.

Tabelul 1 — Proprietăți electrice, magnetice și mecanice ale componentelor actuatorilor

Materialul	E [GPa] ⁽¹⁾	ν ⁽²⁾	ρ_M [kg/m ³] ⁽³⁾	μ_r ⁽⁴⁾	B_r [T] ⁽⁵⁾	ϵ_r ⁽⁶⁾	σ [S/m] ⁽⁷⁾
Lamelele elastice (polyimide)	2.94	0.35	1410	1	—	3.4	6700
Suport (silicon)	170	0.28	2329	1	—	12.1	—
Înfășurarea (cupru)	110 – 128	0.35	8700	1	—	1	$5.998 \cdot 10^7$
Magneții permanenți (NdFeB)	150...245	0.24 – 0.281	7500	1.1	1.2 – 1.4	1.05	$7.143 \cdot 10^5$

(1) Modulul lui Young; (2) Raportul Poisson; (3) Densitatea de masă; (4) Permeabilitatea magnetică relativă; (5) Inducția remanentă; (6) Permitivitatea electrică; (7) Conductibilitatea electrică.

Magneții sunt orientați cu inducția remanentă, B_r , în planul xOy , paralel cu axa Ox , Fig. 1. Se presupune că interfața dintre ei și lamela PI este o folie (super)paramagnetică, pentru care s-a presupus $\mu_r = 10$. Prezența ei este modelată atribuind lamelei PI proprietățile magnetice ale foliei. O analiză mai detaliată a acestei interfețe (permeabilitate, dimensiuni) și a dispunerii magneților permanenți vor fi întreprinse în următoarea etapă.

Câmpul magnetic produs de magneții permanenți interacționează cu câmpul magnetic produs de curentul de acționare, rezultatul fiind o forță care produce deformarea lamelelor PI. Este necesar ca această forță să fie de repulsie. Deformarea lamelelor este analizată în condiții de lucru staționare.

3. Modelarea numerică

3.1 Un model 2D cartezian simplificat

Analiza acțiunilor pondero-motoare poate fi, într-o primă instanță, efectuată pe un model simplificat, 2D, care reprezintă planul de secțiune vertical (xOz), median ($y = 0$), al actuatorului cu o lamelă – Fig. 2.

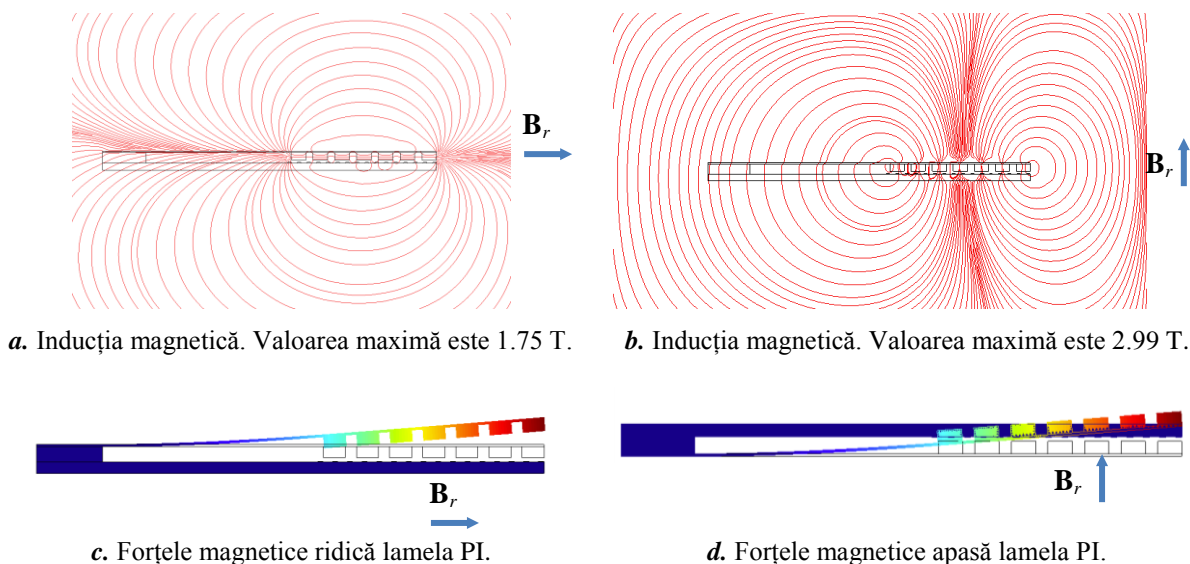


Fig. 2 — Rezultate de simulare numerică pentru modelul 2D cartezian – inducția magnetică și deformarea. B_r trebuie orientat în sensul lui Ox .

Este rezolvată problema de câmp magnetic (1)-(2) și sunt calculate forțele care acționează asupra magneților. Fig. 2,a,b prezintă spectrul inducției magnetice: linii de câmp pentru două orientări ale B_r : după axa Ox respectiv după axa Oy . Densitatea de volum a forțelor este calculată din densitatea de energie, folosind teorema forțelor generalizate (lucrul mecanic virtual) [1,2].

Apoi, folosind forțele magnetice calculate în urma rezolvării problemei de câmp, se rezolvă problema structurală. Fig. 2,c,d prezintă deformările determinate prin simulare numerică.

Forța totală care acționează asupra matricei magnetice este de 520.78 N/m, pentru \mathbf{B}_r orientat în direcția Ox , și -352.809 N/m pentru \mathbf{B}_r orientat în direcția Oy . În aceste împrejurări, soluția constructivă ce trebuie adoptată este alinierea magneților cu inducția remanentă orientată orizontală, în sensul axei Ox – Fig. 2,c.

3.2 Modelarea 3D

Domeniile de calcul utilizate în modelarea 3D sunt arătate în Fig. 1 – volumul care conține actuatorii și închide problema de câmp magnetic este eliminat (se poate observa în Fig 3).

În prima etapă se rezolvă o problemă de câmp electrocineatic pentru determinarea distribuției densității curentului electric de conducție din bobină. Apoi, similar modelării 2D, se rezolvă problema de câmp magnetic (se determină forțele de volum magnetice) și, în a treia etapă, se integrează problema structurală. Pentru rezolvarea FEM a problemei electrocinetice au fost utilizate elemente Lagrange pătratice, pentru câmpul magnetic elemente vectoriale liniare, iar pentru deformări elemente Lagrange pătratice.

Câmpul magnetic

Fig. 3 arată câmpul magnetic prin benzi de flux fascicular de inducție magnetică.

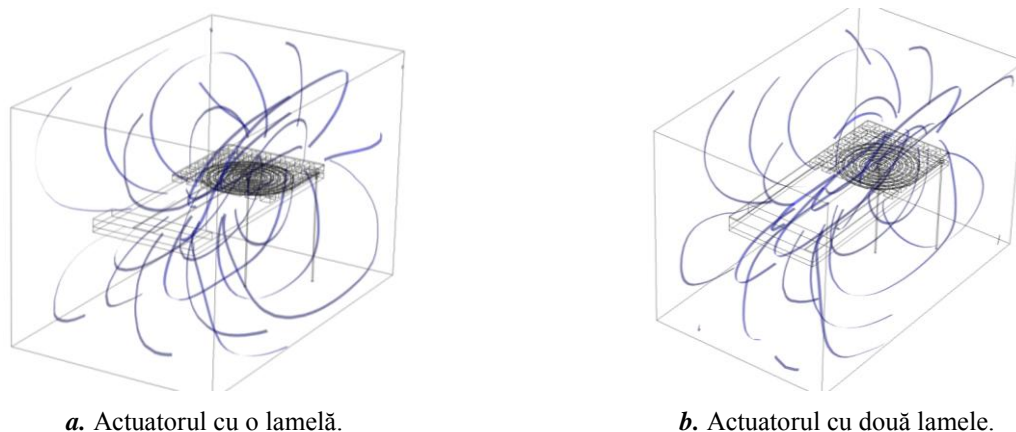


Fig. 3 — Inducția magnetică în modelele 3D.

Liniile de câmp \mathbf{B} sunt în principal în direcția Ox între magneți și bobină (a se vedea și Fig. 2, a), ceea ce explică efectul de repulsie al lamelei PI.

Actuația

Fig. 4 prezintă prin hărți de culoare deformările pentru cei doi actuatori, pentru $B_r = 1.3$ T, și densitatea curentului electric $J_n = 5$ A/mm². Comparând rezultatele, modelarea 2D poate da o estimare a actuației în sensul ordinului de mărime.

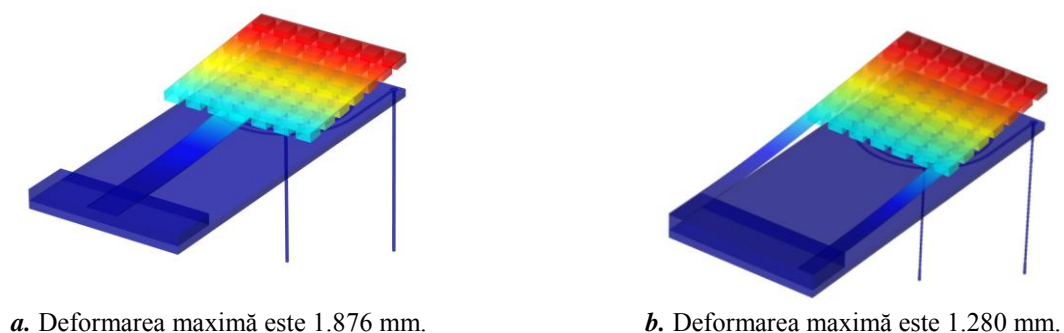


Fig. 4 — Deformări, în condiții de lucru staționare.

Analiza sensibilității deflecției în raport cu diferiți parametri (curent de excitație, numărul, dimensiunile și proprietățile magneților matricei) este un obiectiv al etapei următoare.

3.3 Analiza electrostatică

Capacitățile electrostatice utilizate în schemele de circuit cu parametri concentrați ai actuatorilor se determină din energia electrică obținută rezolvând o problemă de regim electrostatic, (3). Fig. 6 arată rezultatele simulării numerice prin hărți de culoare ale potențialului electrostatic (0...1 V) într-un plan de secțiune xOy , și tuburi de flux de intensitate de câmp electric. În acest studiu, bobinele nu sunt parcurse de curenți, iar lamelele se află în pozițiile de repaos.

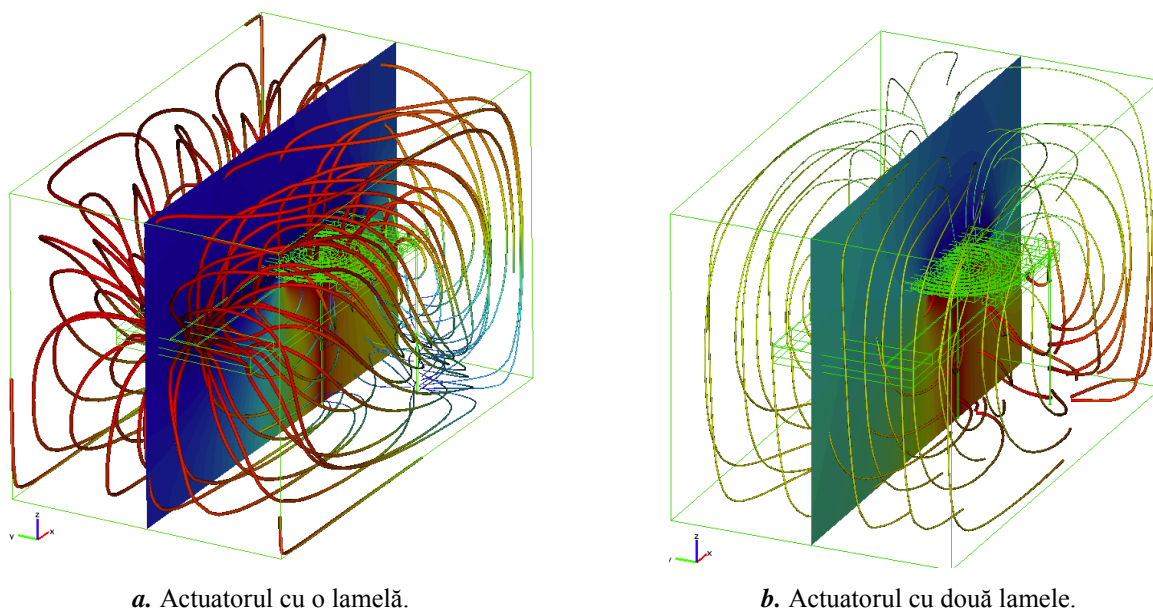


Fig. 6 — Câmpul electrostatic reprezentat prin tuburi de \mathbf{E} (culoare și dimensiuni proporționale cu V) și hartă de culoare (proporțională cu V) în actuatorii din Fig. 1. Bobinele și magneții sunt armături.

Capacitățile electrostatice determinate energetic sunt $C = 3.483$ pF, pentru actuatorul cu o lamelă, și $C = 3.1798$ pF, pentru actuatorul cu două lamele. Diferența este atribuită contribuției lamelei / lamelelor, ca medii dielectrice. În etapa următoare se vor considera variațiile acestor capacități în raport cu deflexiile lamelelor (pentru diferiți curenți electrici de acționare).

3.5 Parametrii circuitului electric echivalent

Soluțiile numerice ale distribuției câmpului magnetic staționar permit determinarea inductivităților actuatorilor, L , utilizând definiția energetică $L = 2 \left(\int_{\Omega} w_m dv \right) / I^2$ [H], unde w_m [J/m³] este densitatea energiei magnetice, I [A] este curentul electric la borne, iar Ω este domeniul de calcul.

Folosind această metodă rezultă $L = 2.846$ μ H pentru actuatorul cu o lamelă și $L = 2.3413$ μ H pentru actuatorul cu două lamele.

Rezistența de curent continuu pentru cei doi actuatori este $R = 0.3272$ Ω .

Tabelul 2 — Parametrii circuitului electric echivalent al actuatorilor

Parametrul de circuit	Actuatorul cu lamelă	Actuatorul cu două lamele
R [Ω]	0.3272	0.3272
L [μ H]	2.846	2.3413
C [pF]	3.483	3.1798

Tabelul 2 sintetizează parametrii de circuit pentru cei doi actuatori, Fig. 7.

Identificarea parametrilor de circuit permite tratarea acestor dispozitive ca elemente de circuit electric cu efecte de câmp electromagnetic, și includerea lor în schemele electrice de comandă –

etapă necesară în proiectarea electronicii de comandă.

4. Concluzii

În această etapă s-au realizat modelarea matematică și simularea numerică a interacțiunilor în câmp electromagnetic care au loc în două variante constructive de actuatori de tip consolă (grindă), lamelari, în condiții de lucru staționare, și au fost stabilită o modalitate de determinare a capacităților electrice proprii ale acestor sisteme.

Modelele de câmp electromagnetic staționare și structurale (eforturi-deformare) statice sunt cuplate univoc: forțele electromagnetice sunt date de intrare utilizate în analiza structurală.

Unghiurile de deflexie ale lamelor flexibile PI pot fi controlate prin reglarea curentului electric, de acționare, din bobine.

Modelarea 2D poate da o estimare a acțiunii în sensul ordinilor de mărime ale forțelor electrodinamice și deformărilor mecanice.

În acest studiu este propus și un model pentru analiza câmpului electrostatic în scopul determinării capacității electrice utilizată în proiectarea circuitelor cu parametri concentrați pentru actuatori. Eventualele efecte pondero-motoare de natură electrică fac obiectul următoarei etape.

Referințe bibliografice

- [1] C.I. Mocanu, *Electromagnetic Field Theory*, 2nd ed. (in Romanian), Ed.D.P., București, 1982.
- [2] COMSOL A.B. v. 3.5a – 5.0.
- [3] B. M. Dutoit, et.al., “High performance micromachined Sm₂Co₁₇ polymer bonded magnets”, *Sensors and Actuators*, vol. 77, pp. 178-182, 1999.
- [4] KATCO, *Performance Materials*, <http://www.katco.eu/index.htm>
- [5] <http://www.ndfeb-info.com/characteristics.aspx>
- [6] http://www.intemag.com/magnetic_properties.html
- [7] <http://www.mit.edu/~6.777/matprops/polyimide.htm>

ASPECTE ALE MATERIALELOR UTILIZATE ÎN STRUCTURILE MEMS

1. INTRODUCERE

În ultimul deceniu al secolului XX, s-a observat o dezvoltare rapidă a microsistemelor electromecanice (MEMS), creștere ce se preconizează să continue. Premisa de bază din spatele conceptului MEMS este aceea că beneficiul unei producții de volum mare la un cost unitar relativ scăzut, al industriei microelectronice din ultimii 50 de ani, poate fi translatat către dispozitive în care componentele mecanice și electrice sunt integrate pe un singur cip de siliciu (sau structură echivalentă). Pe lângă beneficiile economice potențiale, o asemenea integrare poate permite obținerea unei productivități unice prin realizarea de dispozitive la o scară foarte mică, cum ar fi senzori [1, 2], actuatori [3], dispozitive generatoare de energie [4], reactoare chimice [5] și dispozitive biomedicale [6, 7]. Posibilitatea integrării caracteristicilor funcționale mecanice, biologice sau chimice cu electronica necesară circuitelor de putere și control într-un singur dispozitiv permite utilizarea conceptelor precum rețele cu distribuție înaltă folosite pentru monitorizarea stării unor sisteme și structuri de mari dimensiuni [8] sau în scheme chimice de producție și putere distribuite.

Structura lucrării, în continuare, este următoarea: în secțiunea 2 se discută efectele reducerii dimensiunilor (efectele de „scară”) asupra proiectării dispozitivelor MEMS; în secțiunea

3 se revăd, pe scurt, trei procese de fabricație predominante utilizate la realizarea dispozitivelor MEMS; în secțiunea 4 sunt prezentate materialele pentru structurile MEMS care apar în cele trei procese de fabricație; în secțiunea 5 se discută aspectele materialelor asociate cu etapele cheie de fabricație; în secțiunea 6 sunt discutate aspectele materialelor asociate cu proiectarea dispozitivelor MEMS și rolul caracterizării lor; în secțiunea 7 sunt prezentate direcții viitoare de dezvoltare în domeniul MEMS și rolul materialelor privind această dezvoltare.

2. EFECTUL REDUCERII DIMENSIUNILOR (EFECTUL DE SCARĂ)

Înainte de a ne concentra asupra caracteristicilor materialelor folosite în dispozitivele MEMS, este important să menționăm pe scurt influența efectului de scară asupra proiectării, fabricării și a performanțelor dispozitivelor micromecanice.

Efectul de scară este important în proiectarea dispozitivelor MEMS și are implicații asupra comportamentului materialelor utilizate în cadrul acestor dispozitive. În acest context, este utilă împărțirea efectului de scară asupra proiectării și performanțelor dispozitivelor MEMS în trei categorii: cvasi-fundamental, dependent de mecanismul de scară și extrinsec (sau indirect). Exemple ale acestor efecte de scară sunt furnizate în următoarele trei secțiuni.

2.1. Scalare cvasi-fundamentală

2.2. Scalarea dependentă de mecanismul de scară

Pentru metalele ductile există o literatură extinsă despre influența efectului de scară asupra rezistenței, rezumată în Ref. [10]. Introducerea constrângerilor, cum sunt particulele dure sau frontierele de granulație, sau suprafețele și interfețele care lipesc (prin care aderă) un strat subțire pe un substrat, determină restrângerea formării și propagării dislocațiilor, având ca rezultat durități foarte mari la scara mică.

Tabelul 1. Dependentele cheie cvasi-fundamentale ale parametrilor de proiectare, de scara lungimilor, pentru MEMS

Nr. crt.	Parametrul	Scara	Observații
1	Lungimea (L)	L^1	Fundamentală
2	Aria (A)	L^2	Fundamentală
3	Volumul (V)	L^3	Fundamentală
4	Aria suprafeței/Volum (A/V)	L^1	Fundamentală
5	Masa (M)	L^3	Se presupune densitatea independentă de scară
6	Forța de inerție (F)	L^3	Variază (se scalează) cu masa
7	Tensiunea de inerție max. (σ)	L^{-1}	Pt. un sistem masă-arc cu accelerație max.
8	Tensiunea centrifugală max. (σ)	L^0	Pt. viteza max. la marginea unui disc rotitor
9	Puterea (W)	L^2	În ipoteza (5)
10	Puterea/volum (W/V)	L^{-1}	În ipoteza (5), de asemenea puterea/masă
11	Frecvența naturală structurală (ω)	L^{-1}	Modul și densitate independente de scară
12	Timpul de difuzie caracteristic (t)	$L^{1/2}$	Pt. un coeficient de difuzie constant
13	Forța electrostatică (F_{EI})	L^2	Se presupun independente de scară permitivitatea și tensiunea de străpungere a dielectricului
14	Accelerația max. datorată forței electrostatice (a_{EI})	L^{-1}	În ipoteza (13) și (5)
15 _a	Forța magnetică (electromagnet) (F_{emag})	L^4	Se presupune densitatea max. de curent independentă de scară
15 _b	Forța magnetică (magnet permanent) (F_{pmag})	L^3	Se presupune rezistența magnetică independentă de scară

16	Forța piezoelectrică (F_{piezo})	L^2	Se presupun independente de scară constantele piezo-mecanice și tensiunea de străpungere
17	Pierderile termice (q_{Th})	L^2	Pt. un coeficient de transfer de căldură independent de scară
18	Rezistența la șoc termic (ΔT_{crit})	$\sim L^{-1}$	Variază (se scalează) cu numărul lui Biot
19	Tensiunea superficială	L^1	Se presupune independența de scară

Modelele pentru restricționarea dislocațiilor în straturile subțiri cu grosimi între 0.2-2.0 μm amintesc de rezistențe de curgere care variază invers proporțional cu grosimea stratului [18,19], și acest comportament previzionat a fost demonstrat experimental [20]. În cazul dispozitivelor MEMS, această creștere a rezistenței poate avea atât consecințe negative, cât și pozitive. Pe de o parte, aceasta permite o creștere a capabilității în transmiterea forțelor, însă pe de altă parte, pot să rezulte tensiuni reziduale mult mai mari decât cele care ar fi normale la scară mare.

2.3. Scalarea extrinsecă (indirectă)

Unele dintre cele mai importante efecte ale scalării asupra proiectării și performanțelor dispozitivelor MEMS nu pot fi atribuite unui singur factor fizic. De exemplu, traseele (procese) tehnologice care sunt apte să asigure toleranțele dimensionale necesare sunt restrictive în ceea ce privește formele ce pot fi obținute. Ca atare, dispozitivele MEMS constau, în general, din elemente electro-mecanice care sunt fie plane, sub forma unor straturi suprapuse, fie prismatice sau cilindrice. Această restricție duce MEMS în zone ale proiectării ce nu ar fi niciodată luate în calcul în cazul elementelor macroscopice. Similar, valoarea mare acordată funcționalității microsystemelor MEMS, ca dispozitive microelectronice, permite utilizarea unor materiale ce nu ar fi folosite niciodată în aplicațiile la scară macro. Costurile de fabricație ale unui cip pentru unitatea de procesare centrală a calculatoarelor de înaltă performanță se ridică la 10^5 U.S.\$/kg, cu mai mult de două ordine de mărime decât costul specific al structurilor aerospațiale avansate.

Factorii de scalare extrinsecă au deseori origini cvasi-fundamentale. De exemplu, restricția asupra formelor geometrice poate fi discutată în legătură cu procesele tehnologice disponibile. La rândul său, utilizarea acestor procese, precum depunerea, corodarea și doparea limitată în cazul difuziei, poate fi discutată în legătură cu argumentul scalării că procesele care acționează pe suprafețe sunt mult mai atractive din punct de vedere economic la scară mică datorită scalării cub-pătrat a volumului la aria suprafeței.

3. TEHNOLOGII DE FABRICAȚIE SPECIFICE MEMS

3.1. Microprelucrarea de suprafață – dezvoltat în studiu

3.2. Microprelucrarea de volum – dezvoltat în studiu

3.3. Procedul LIGA

Cea de-a treia tehnologie specifică MEMS o reprezintă realizarea componentelor micromecanice ale dispozitivului prin depunerea galvanică de material metalic într-o formă microfabricată, utilizând procedeul LIGA (acronimul provine din expresiile germane ale etapelor principale ale procedurii: litografie (LITHOGRAPHIE), galvanizare / electroformare (GALVANOFORMUNG) și turnare (ABFORMUNG)) [29, 30]. Procedul constă în obținerea unei forme din polimer (PMMA – polimetilmetacrilat) prin litografie adâncă (litografie cu raze X), pentru a crea structuri cu raport înalt de aspect (raportul dintre înălțime și dimensiunea în plan a structurii) [31, 32], urmată de depunerea galvanică a unui metal în cavitățile formeii.

Un exemplu tipic de aplicație a procedurii LIGA, cu parcurgerea primelor două etape, litografie și galvanizare, în combinație cu tehnica stratului de sacrificiu, este prezentat în Fig. 6, și o microfotografie a unei structuri de acționare de tip pieptene fabricată prin acest procedeu este prezentată în Fig. 7, care ilustrează cât de mici pot fi dimensiunile și toleranțele ce pot fi obținute. Procedul nu se limitează doar la depunerea galvanică. Etapa de turnare este aplicabilă altor

materiale, cum ar fi siliciul policristalin și carbura de siliciu, care pot fi depuse prin depunere chimică de vapori [33, 34], iar structuri ceramice refractare au putut fi obținute prin procese specifice tehnologiei pulberilor – depunere din suspensii urmată de sinterizare, utilizând, din cauza temperaturilor mari, forme din material metalic realizate la etapa de galvanizare. Avantajul procedurii LIGA este că permite o varietate mult mai largă de materiale care pot fi luate în considerare pentru construcția dispozitivelor MEMS, față de cele întâlnite tradițional în microelectronică.

Din punct de vedere al dimensiunilor considerate, procedeul LIGA are aceleași avantaje ca și în cazul componentelor microprelucrate în volum, cu toate acestea, utilizarea de materiale și procese incompatibile CMOS limitează capacitatea de a obține nivele înalte de integrare a funcțiilor mecanice și electrice. Deși a fost acumulată o experiență notabilă în domeniul plăcii metalice, există o nevoie semnificativă de a rafina capacitățile acestei tehnologii, astfel încât să fie capabilă să realizeze controlul foarte precis al dimensiunilor și proprietăților de material necesare pentru aplicațiile MEMS.

Clasificarea convențională a microfabricației în cele trei tehnologii principale este oarecum simplistă și există exemple de abordări hibride ce pot depăși restricțiile menționate anterior. Exemplele includ utilizarea procedurii LIGA în combinație cu tehnica stratului de sacrificiu (SLIGA/sacrificial LIGA) [35] pe plăchete de siliciu, precum și lipirea plachetelor pentru a combina traseele tehnologice pe un singur dispozitiv. Astfel, se poate considera că lipirea/sudarea plachetelor, reprezintă un proces de microfabricație distinct, de sine stătător, în măsura în care acesta asigură capacitatea de a transfera o anumită funcționalitate, care în mod tradițional ar fi realizată printr-o încapsulare de nivel primar, dispozitivului microfabricat în integralitatea sa.

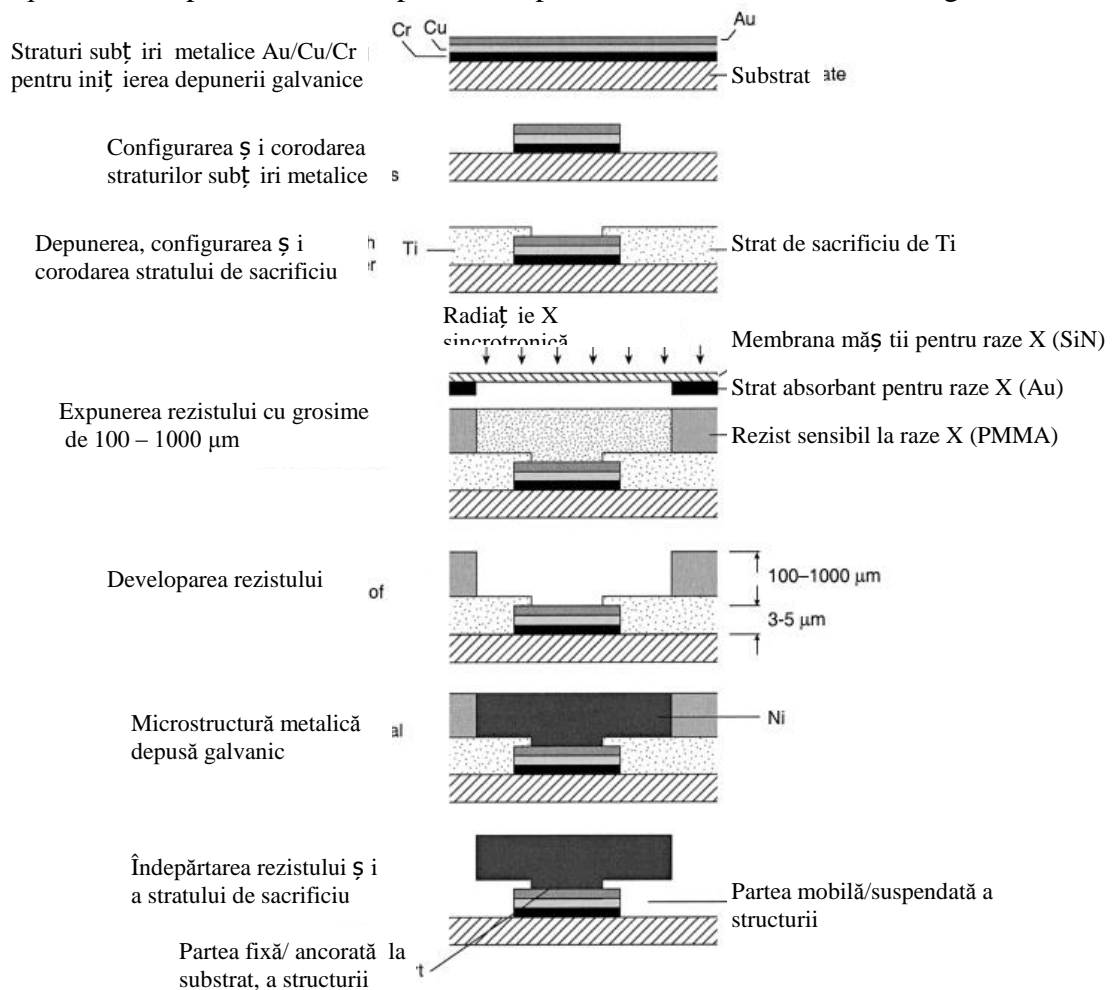


Fig. 6. Etapele procesului tehnologic pentru un dispozitiv obținut prin procedeul LIGA.

4. Gama de materiale folosite în dispozitivele MEMS

Cele trei tehnologii de fabricație descrise mai sus au definit până acum, în mare parte, materialele ce pot fi utilizate de către proiectanții MEMS. Una dintre soluțiile utilizate pentru atingerea unui nivel ridicat de fiabilitate și a unui cost unitar redus pentru dispozitivele microelectronice este aceea că este utilizat un set limitat de materiale și componența acestora este foarte atent controlată pentru a asigura o performanță reproductibilă. Principalele materiale folosite în dispozitivele VLSI includ: plachete de siliciu monocristalin dopat ca substrat semiconductor și straturi depuse de siliciu policristalin pentru elementele rezistive, aluminiu și cupru ca material conductor principal și oxid de siliciu, nitruură de siliciu și nitruură de titan pentru izolare electrică și pasivare/protecție. Această selecție limitată de materiale a constituit, totodată, baza pentru majoritatea dispozitivelor MEMS microprelucrate pe suprafață și în volum. Siliciul monocristalin, siliciul policristalin și nitruura de siliciu sunt utilizate, în general, ca material de structurare pentru componentele micromecanice, aluminiul ca și conductor electric de putere și transmisie a semnalului, iar oxidul de siliciu ca strat de sacrificiu, pentru a permite eliberarea structurilor mobile sau suspendate.

Limitarea la acest set de materiale asigură compatibilitatea cu procesele folosite pentru a realiza componentele microelectronice și permite astfel un grad ridicat de integrare pe un singur cip. Din punct de vedere mecanic, aceste materiale sunt, de asemenea, atractive. Siliciul, oxidul de siliciu și nitruura de siliciu sunt materiale elastice care nu prezintă fenomenul de curgere sau histerezis la temperatura camerei, o cerință cheie pentru senzorii de mare precizie și actuatorii care folosesc componente micromecanice. Deși aceste materiale au o tenacitate scăzută, rezistența înaltă a materialelor fragile la scară mică mărește nivelele de deformare ce pot fi atinse și reduce posibilitatea de degradare și rupere, care împiedică utilizarea acestor materiale pentru dispozitive la scară macro.

Cu toate că s-a demonstrat utilitatea materialelor CMOS pentru realizarea componentelor micromecanice, setul de materiale din microelectronică bazate pe siliciu pare să fie restrictiv, dacă se consideră întregul potențial al dispozitivelor MEMS ce ar putea fi realizat și gama largă de alte materiale posibile de cercetat. Astfel, materialele pentru MEMS ar putea fi împărțite în materiale care permit obținerea de componente micromecanice cu performanțe superioare și materiale necesare elementelor sensibile, care permit conversia puterii sau a semnalelor dintr-un domeniu fizic într-altul.

4.1. Materiale pentru componentele micromecanice

Măsurarea performanțelor materialelor destinate componentelor micromecanice este bine cunoscută [37]. Aceste principii de selecție a materialelor se aplică în mod egal dispozitivelor MEMS. Trei dintre componentele micromecanice de bază, care sunt frecvent utilizate în dispozitivele MEMS, sunt diafragmele/membranele pentru senzorii de presiune, elemente vibratoare de înaltă frecvență pentru giroscopice și discuri rotative pentru pompe și turbine de producere a energiei. Indicatorii de performanță pentru aceste aplicații sunt prezentați ca [37]: $\sigma_f^{3/2}/E$, E/ρ , σ_f/ρ , unde σ_f reprezintă rezistența la rupere, E este modulul lui Young și ρ este densitatea. Tabelul 2 prezintă sintetic acești indicatori de performanță pentru mai multe materiale din domeniul microfabricației. Siliciul este un material foarte atractiv pentru aplicațiile de înaltă rezistență, cum sunt microsenzorii de presiune și microdispozitivele cu turbine, însă pentru dispozitivele pentru care este necesară o anumită rigiditate/duritate, diamantul, carbura de siliciu și oxidul de aluminiu pot oferi îmbunătățiri semnificative ale performanțelor.

Cea mai bine organizată încercare de a extinde gama de materiale disponibile pentru proiectanții MEMS este utilizarea procedurii LIGA. Acesta permit considerarea oricărui material care poate fi depus galvanic din soluție. Nichelul și aliajele de nichel sunt cele mai frecvent utilizate materiale, dar un set mult mai larg este disponibil, incluzând cupru, crom, fier și cobalt. În plus, este posibilă depunerea galvanică a anumitor aliaje [38] și a materialelor durificate prin încorporarea particulelor dure în matricea placată [39]. Capacitatea de a microfabrica metale cu mare precizie este atractivă pentru dispozitivele în care sunt necesare forțe mecanice mari și nivele

înalte de putere. Ductilitatea relativă a metalelor reduce riscul de degradare prin rupere, inevitabilă în cazul utilizării materialelor fragile din setul de materiale de bază CMOS, în principiu, acest lucru permite fabricarea unor dispozitive semnificativ mai mari.

Carbura de siliciu a prezentat un interes considerabil ca material pentru dispozitivele MEMS [40]. SiC monocriatalină este un semiconductor cu lățime de bandă mare, capabil să funcționeze la temperaturi ridicate și nivele de putere mare, comparativ cu siliciul [41, 42]. În plus, oferă o rigiditate, duritate, tenacitate și rezistență la uzură mult mai mare decât materialele de bază din setul CMOS. Acestea sunt caracteristici deosebit de atractive pentru aplicațiile MEMS.

Dorița de a produce dispozitive care utilizează aceste proprietăți, pentru a obține o performanțe superioare în aplicațiile din microelectronică și din domeniul microsenzorilor, s-a concentrat asupra dezvoltării tehnicilor de obținere a monocristalelor cu dimensiuni mai mari din SiC [43] și asupra îmbunătățirii proceselor de microfabricație similare celor disponibile pentru Si.

Aceste eforturi sunt îngreunate de reactivitatea chimică relativ scăzută a SiC, de temperatura sa de topire extrem de ridicată și de tendința de a forma mai multe tipuri de structuri cristaline și defecte de cristalizare. Cu toate acestea, un progres considerabil a fost realizat prin crearea unor monocristale fără defecte, iar dispozitivele semiconductoare au început să devină disponibile în comerț, cel puțin un senzor de presiune MEMS din SiC fiind dezvoltat [44].

Dispozitivele MEMS din SiC au demonstrat, de asemenea, tehnicile de turnare în care carbura de siliciu este depusă chimic din vapori în forme sau matrițe de siliciu microprelucrate. Un exemplu de astfel de dispozitiv este atomizorul de combustibil prezentat în Fig. 8. Metoda utilizată a fost crearea de forme sau matrițe de siliciu prin microprelucrare de volum, care sunt apoi acoperite cu SiC [45, 46]. Această abordare folosește posibilitățile de fabricație disponibile pentru siliciu, putând fi realizate dispozitive cu performanțele cerute.

Până acum, utilizarea SiC în dispozitivele MEMS nu a fost foarte dezvoltată, în comparație cu microprelucrarea de suprafață și de volum a siliciului, și cu materialele LIGA. În consecință, aspectele materialelor sunt numeroase, variind de la prelucrarea substraturilor de SiC, tehnologiile de mascare și corodare, precum și problemele asociate cu tensiunile reziduale ale straturilor depuse.

Monocristalul din oxid de aluminiu (safir), oxidul de aluminiu amorf, silica (SiO₂) topită (cuarțul) și diamantul [47] sunt disponibile sub formă de plachete și ultimul dintre aceste materiale poate fi depus chimic din vapori pentru a crea dispozitive MEMS [48].

Tabelul 2. Indicatorii de performanță ai materialelor pentru componentele micromecanice și valorile acestora, dependente de tehnologia de microprelucrare aplicată. Dintre acestea, rezistența la rupere prezintă cea mai mare dependență de procesele utilizate

Material	Desitatea, ρ (kg/m ³)	Modulul Young, E (GPa)	Rezistența la rupere, σ_f (MPa)	E/ρ (GN/kg m)	σ_f/ρ (MN/kg m)	$\sigma_f^{3/2}/E$ (MPa) ^{1/2}
Siliciu	2330	129-187	4000	72	1.7	1.5
Oxid de siliciu	2200	73	1000	36	0.45	0.43
Nitruță de siliciu	3300	304	1000	92	0.30	0.10
Nichel	8900	207	500	23	0.06	0.54
Aluminiu	2710	69	300	25	0.11	0.75
Oxid de aluminiu	3970	393	2000	99	0.50	0.228
Carbură de siliciu	3300	430	2000	130	0.303	0.208
Diamant	3510	1035	1000	295	0.28	0.31

Așa cum se arată în Tabelul 2, aceste materiale oferă o rigiditate specifică superioară, și de aceea se obțin frecvențe de rezonanță mai mari decât în cazul siliciului (diamantul având cea mai mare rigiditate specifică cunoscută pentru un material, fiind, totodată transparent optic). De asemenea, trebuie remarcat faptul că în aplicațiile MEMS diferite tipuri de sticlă sunt folosite, în principal, ca izolatori sau ca straturi de încapsulare în dispozitivele microprelucrate în volum, mai degrabă decât din motive de performanță mecanică.

Pentru dispozitivele MEMS, unde performanța structurală nu reprezintă o problemă, sunt disponibile alte tipuri de materiale, în special polimerii. Folosirea directă a litografiei în modelarea/configurarea polimerilor, pentru a crea canale de curgere [49, 50] sau alte componente micromecanice este foarte atractivă din punct de vedere economic, deoarece elimină multe dintre etapele de fabricație specifice materialelor mai dure. Utilizarea unor astfel de materiale pentru MEMS oferă, de asemenea, posibilitatea de a crea structuri MEMS flexibile și încapsulări care ar putea fi deosebit de utile pentru sistemele integrate cu structuri îngropate.

De asemenea, în categoria performanțelor mecanice non-structurale apare problema creării barierelor termice. Au fost propuse diferite scheme pentru motoarele cu microîncălzire [51], iar randamentul termodinamic al acestui tip de dispozitive necesită ca diferența de temperatură maxim posibilă să fie menținută pe întreg ciclul de funcționare. Acest lucru solicită materiale sau structuri cu o rezistență termică ridicată. Cu toate acestea, strategiile de izolare termică care funcționează la scară microscopică, cum ar fi straturile barieră sau separarea fizică, sunt mai greu de implementat în domeniul MEMS din cauza dimensiunilor mici, care diminuează în mare măsură beneficiile ce pot fi obținute prin utilizarea de materiale cu o conductivitate termică redusă.

4.2. Materiale pentru elementele sensibile ale dispozitivelor MEMS

Senzorii și actuatorii MEMS necesită mijloace de conversie a intrărilor mecanice în ieșiri electrice și invers. După cum s-a menționat în Secțiunea 2, principiul de detecție utilizat în mod uzual este cel electrostatic, în care sunt utilizate modificări de capacitate pentru a măsura deplasările în senzorii de presiune și accelerometre, sau sunt utilizate forțele electrostatice pentru a realiza deplasările în cadrul actuatorilor, ca în cazul actuatorilor de tip pieptene [52, 53] sau micromotoarelor [54, 55].

Pentru dispozitivele macroscopice, forțele electromagnetice sunt mijloacele dominante de conversie a energiei electrice în energie mecanică, însă acest principiu a fost utilizat destul de puțin la scară microscopică. După cum s-a menționat în Secțiunea 2, aceasta provine din scalarea favorabilă și ușurința în implementarea funcționării electrostatice, și dificultățile relative de microfabricare a bobinelor pentru inductoare și motoare. A fost înregistrat un recent succes în utilizarea depunerii galvanice pentru a crea magneți permanenți microprelucrați, care oferă unele promisiuni pentru dispozitivele electromagnetice [56, 57]. Având în vedere capacitatea în domeniul microfabricației dispozitivelor electromagnetice, se poate observa că performanța lor va fi în mare măsură comparabilă cu cea a dispozitivelor electrostatice, și, probabil, superioară pentru dimensiunile mai mari ale dispozitivelor MEMS [58].

Materialele piezoelectrice sunt capabile de densități de energie și putere foarte mari la scară mică. Frecvența mare de funcționare specifică dispozitivelor MEMS se potrivește bine cu capacitatea materialelor piezoelectrice de a dezvolta frecvențe înalte, iar scalarea favorabilă a rezistenței în domeniul scărilor mici depășește unele dintre limitările întâlnite în utilizarea piezoceramicii pentru dispozitive macroscopice. Cele mai frecvent utilizate materiale piezoelectrice în dispozitivele MEMS sunt titanatul zirconat de plumb (PZT) [59], oxidul de zinc (ZnO) [60] și nitrura de aluminiu (AlN). Acestea sunt, de obicei, depuse sub formă de straturi subțiri prin pulverizare catodică cu magnetron sau metoda sol-gel, în unele cazuri, pe componentele microprelucrate de siliciu [61]. În plus, tehnicile de turnare pot fi utilizate împreună cu procesarea convențională a materialelor ceramice - procese specifice tehnologiei pulberilor - depunere din suspensii urmată de sinterizare, pentru a crea componente piezoelectrice mai mari, integrate cu procedeul LIGA [62]. Unele progrese au fost, de asemenea, realizate cu polimeri piezoelectrice, în special polifluorură de viniliden (PVDF) [63].

Este de remarcat faptul că siliciul este un material piezorezistiv și această proprietate a fost folosită în mulți senzori de presiune. Alte fenomene au fost, de asemenea, folosite pentru a realiza traductoare MEMS, inclusiv aliaje cu memoria formei [64, 65], și materiale magnetostrictive [66].

Proiectarea, simularea si fabricatia unor structuri de test cu elemente de cuplare/aliniere

Înainte de realizarea dispozitivului la scară miniaturală sunt necesare o serie de teste la scară macro pentru a putea stabili cu o precizie cât mai bună limitele tehnologice ale echipamentelor ce vor fi utilizate pentru manufacturarea elementelor componente.

De asemenea, testarea macro în cadrul sistemelor microelectromecanice (MEMS – Micro Electro Mechanic Systems) ajută și la verificarea unor ipoteze, ipoteze ce pot fi mai greu validate la scară micro din cauza erorilor ce pot apărea în cadrul măsurătorilor parametrilor electrici, mecanici și altele.

Într-o primă fază se intenționează crearea unei versiuni de test a sistemului microelectromecanic la scară macro, dimensiunile aproximative fiind 23 x 10 x 1,7mm (L x l x Î).

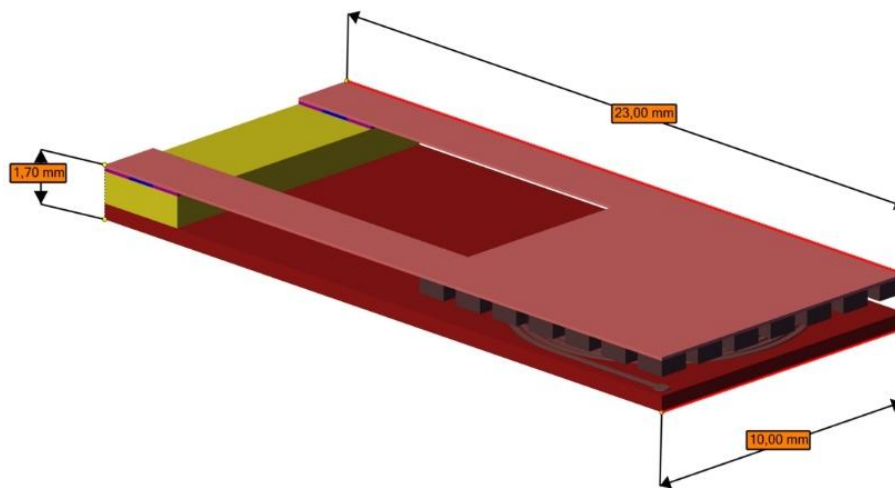


Fig. 1 Dimensiuni versiune test a sistemului microelectromecanic

Elementele componente ale sistemului microelectromecanic de testare la scară macro sunt: placă suport; parte fixă; bobină; matrice magneti permanenți; lamelă bronz-beriliu; sistem centrare.

O vedere în secțiune parțială se poate observa mai jos, pentru una din soluții. Sistemul de centrare, respectiv bobina nu a fost sectionat.

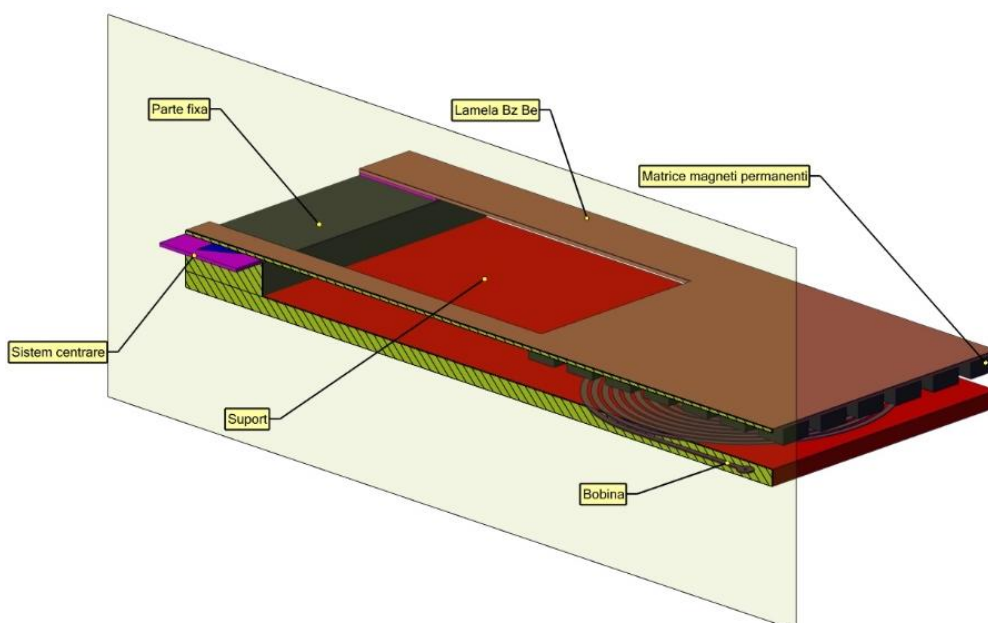


Fig. 2

Sistemul de centrare se va realiza prin procedeul LIGA – raze ultraviolete. Acest procedeu permite realizarea unor matrite temporare ce pot fi folosite pentru crearea unor elemente metalice. Matrita este apoi eliminată rezultând componenta finală dorită.

Se vor realiza mai multe forme conjugate de pad-uri ce vor avea drept rol alinierea cât mai facilă a lamelei de partea fixă, respectiv a părții fixe de placa suport. În figuri este evidentiat doar sistemul de centrare situat la nivelul lamelei, respectiv al părții fixe. Un rol aditional al sistemului de centrare este acela de evitare a rotatiei lamelei elastice în planul orizontal. Dimensiunile pad-ului suport sunt de 2 x 3 mm

SCANNERE LASER

În cadrul acestui studiu s-a realizat o documentare legate de realizarea și folosirea unor scanner opto-galvanice ca un prim pas în realizarea unor scanner cu microactuatori în vederea obținerii de scannere optice de foarte mici dimensiuni. MEMS-urile optice s-au dezvoltat mult în ultimii ani, mai ales în domeniul telecomunicațiilor înlocuind componentele active tradiționale (laseri, detector, modulatori) și pasive (multiplexori, izolatori, polarizori, cupluri). Se include mai nou comutatori cu selecție spectrală, filtre acordabile, etc.

Pentru început s-a făcut o prezentare a scannerelor optice “clasice” urmând să tratăm apoi problema folosirii microactuatorilor în aplicații de scanare laser.

Cerinte pentru oglinzile laser – dimensiuni, reflectivitate, prag de distrugere;

Oglinzile laser folosite la scannerele opto-galvanice pot fi de dimensiuni relative mari (de ordinul centimetrilor) întrucât puterea motoarelor este suficient de mare. Aceasta înseamnă că secțiunea transversală a fasciculului laser poate fi suficient de mare astfel încât densitatea de putere laser pe oglinda să fie mult sub pragul de distrugere. Este esențială folosirea unor oglinzi cu reflectivitate cât mai mare (peste 99%) deoarece ceea ce nu este reflectat de oglinda se absorbe și aceasta duce la încălzirea oglinzii și la modificarea proprietăților ei. Pentru a avea o reflectivitate cât mai bună se folosesc oglinzi specific fiecărei lungimi de undă. De exemplu, se folosesc oglinzi cu depuneri de aur pentru laserii în infraroșu (cu CO₂), oglinzi cu depuneri de dielectrice pentru domeniul vizibil și infraroșu apropiat.

Pentru laserii în impulsuri pragul de distrugere al unei oglinzi depinde și de durata impulsului. Cu cât impulsul este mai scurt cu atât pragul de distrugere este mai coborât conform unor nomograme care sunt folosite în astfel de situații.

SCANNERE MEMS ÎN AFISAJE - INTRODUCERE

Încă de la prima publicatie a unei oglinzi-scanner din silicon în 1980, sistemele microelectromecanice (MEMS) pentru scanarea optică, au participat la foarte multe aplicații. Primele modele de scanner MEMS s-au focalizat pe aplicații de imagistică precum microscopia confocală, citirea codurilor de bare și senzori de amprentă. La începutul mileniului, tehnologia “optical cross-connects” (OXC) a reprezentat motorul de antrenare al scanner-elor 2D. A fost înlocuit ulterior de afisajele de proiectie miniaturizate cu cerințele sale pretentioase în ceea ce privește frecvența, unghiul de scanare și gabaritul. Alte aplicații include her applications include spectroscopie optică coerentă, și afisajul cu scanare de retina - retinal scanning display (RSD), imprimarea, afisajele “head up” precum și tehnologia LIDAR pentru industria auto.

Pentru aplicații de imagistică, cerințele cu privire la scanner-ele laser nu sunt la fel de mari ca la afisaje. Performanțele sistemelor de scanare imagistică sunt de obicei limitate de optica, care implică un spot focalizat de dimensiuni reduse și focalizare dinamică și nivele scăzute ale semnalelor care implică timp de integrare mai mare și viteze de scanare mici. Astfel, majoritatea scanner-elor de mare performanță care vor fi discutate în acest articol sunt destinate dezvoltării aplicațiilor în domeniul afisajelor.

A. Scannere MEMS în afisaje

Pentru aplicatii in domeniul afisajelor, exista 3 tipuri de arhitecturi unde tehnologia MEMS a fost folosita:

(1) matrici 2D care actioneaza ca un modulator optic spatial - *spatial light modulators* (SLM). Cea mai dezvoltata tehnologie in acest sens este oferita de catre Texas Instrument's, respective Procesorul Optic Digital - Digital Light Processor (DLP), folosind Dispozitive Digitale cu Micro-oglinzi - Digital Micromirror Devices (DMD) unde component MEMS este o matrice de dimensiuni mari formata din micro-oglinzi bistabile. Aceste dispozitive au o dependenta directa intre numarul de oglinzi si numarul de pixeli. Matrici unidimensionale, unde o matrice 1D este scanata pentru a genera o imagine 2D complete. Doua implementari foarte cunoscute, folosind componente optice de difractie, sunt tehnologia "grating light valve technology (GLV)" si tehnologia modulatorului interferometric - interferometric modulator technology (iMoD) [1]. Aceste tehnologii sunt detinute azi de catre Silicon Light Machines si Qualcomm, respectiv dispozitive 2D de scanare laser – dispozitive flying spot 2, unde o singura sursa laser modulata este scanata simultan in 2 dimensiuni, precum este detaliat in acest. O prezentare exhaustiva a dispozitivelor MEMS este data in [3].

B. Laserii in tehnologia afisajelor

Primul afisaj laser a fost propu deja din anii 1960, dar disponibilitatea comerciala a tehnologiei, in special a implementarii miniaturizate, a fost limitata datorita gabariturii si al costului ridicat al surselor laser. Primele exemple ale scanner-elor laser compacte au aparut in anii 90. Primul display disponibil comercial, care utilizeaza scanarea laser cu ajutorul unui MEMS a fost RSD, care proiecta o imagine virtuala direct pe ochiul utilizatorului, folosind o scanare laser de tip raster. Sistemele RSD au existat pentru o decada, insa acum interesul este acordat sistemelor de afisaje de proiectie mobile. Totodata, dezvoltarea proiectoarelor miniaturizate cu un spectru cromatic complet a fost ingreunata de sistemele complexe utilizate pentru dublarea frecventei, care erau utilizate pentru obtinerea radiatiei laser verde. In 2010, disponibilitatea comerciala a diodelor laser cu emisie directa in verde a determinat obtinerea unor surse compacte RGB (red-green-blue). Acest lucru a determinat obtinerea proiectoarelor laser portabile si cu adevarat miniaturizate, reprezentand inceputul a ceea ce vedem acum.

C. Proiectoare pico

Cele trei tehnologii disponibile pentru proiectoare miniaturizate sunt: scanare laser cu MEMS, DMD si afisaje cu cristale lichide. DLP and LCoS sunt amandoua exemple ale tehnologiei SLM. LCoS este similar cu DLP ca si principiu de functionare, dar lumina reflectata este modulate de cristale lichide, in loc de oglinzi bistabile. Avantajul principal a scanarii laser sunt: gama larga de culori, scalabilitatea rezolutiei la acelasi gabarit, si o imagine intotdeauna focusata. Cele doua din urma sunt importante in special pentru afisajele miniaturizate. Comparativ cu sistemele SLM, modularea directa a laserilor pentru fiecare pixel conduce la o mutare a complexitatii arhitecturale de la optomecanice la electronica. Modularea directa faciliteaza o eficienta energetica ridicata si in mod inerent, un contrast ridicat. Dezavantajul principal al scanarii laser este distributia neuniforma a fasciculului laser datorata propagarii luminii laser prin aer.

D. Scannere laser

Tehnicile traditionale pentru scanarea laser include scanner-ele acusto-optice, scanner-ele poligon si cele galvanometrice. Scanner-ele MEMS sunt dorite pentru a permite miniaturizarea, consumul scazut de energie, precum si o performanta ridicata la actionari cu frecvente ridicate de rezonanta. O clasificare a scannerelor cu MEMS este data in [2]. O forma simplificata de clasificare a scanner-elor MEMS se poate face in functie de urmatoarele 3 categorii: (1) principiu de functionare (oglinza reflectanta, lentila de refractie, retea de difractie), (2) principiu de actionare (in principiu electrostatic, electromagnetic, piezoelectric, si electrotermic), (3) tehnologia de fabricatie (e.g. microprelucrare din bloc de material, microprelucrare de suprafata, si metode hibride de fabricatie).

Totusi, marea majoritate a scanner-elor pentru afisaje sunt formate din oglinzi de torsiune realizate din microprelucrare de siliciu, cu o singura modalitate de actionare.

IV. PRINCIPII DE ACTIONARE

Aplicatiile de afisaj laser de mare performanta necesita deplasari mari a unor oglinzi cu o apertură mare cuplate cu o deplasare de mare precizie. Scanner-ele rezonante utilizeaza factorul de calitate mecanic (Q) pentru a ajunge la unghiul cerut. La presiunea atmosferică un cuplu de actionare foarte mare este necesar pentru a învinge air damping. Problema poate fi rezolvată prin folosirea unui pachet în vid care este costisitor și conduce la alte probleme tehnice [7]. În plus, masa suspendată devine grea datorită gabariturii oglinzii și cerințelor de planeitate dinamică. Operarea non rezonantă a scanării verticale necesită la fel un cuplu ridicat pentru a învinge rigiditatea la încovoiere, care nu poate fi redusă datorită necesității de rezistență la socuri și a unei manipulari robuste. Cele trei principii de actionare discutate în acest articol pot fi: actionarea electrostatică (ES), actionarea electromagnetică (EM) și actionarea piezoelectrică (PE). Multe cercetări au fost realizate în sensul actionării electrotermale (ET). Datorită unui timp de răspuns ridicat a dispozitivelor ET, scanner-ele bazate pe această tehnologie nu sunt potrivite pentru folosirea în tehnologii de afisaj, mai degrabă folosite în a acționa scanner mai lente în combinație cu un scanner rapid, care folosește altă metodă de actionare. Atunci când comparăm scannere pentru uz comercial, cel mai critic aspect care trebuie luat în considerare sunt: rezoluția activată, simplitatea constructivă, eficiența energetică, cerințele de alimentare, robustețea, compactitatea și stabilitatea pe termen lung. Fiecare principiu de actionare are avantaje în anumite direcții în timp ce în alte direcții prezintă dezavantaje.

Actionare electromagnetica

Există 2 arhitecturi principale în ceea ce privește actionarea EM: magnet mobil și bobina mobilă. Primul folosește o bobină externă împreună cu un magnet sau un film magnetic subțire depozitat pe dispozitiv. Oferă o fabricare simplă și elimină necesitatea unor contacte electrice, dacă deplasarea este realizată cu o bobină-cip on/off. În cazul bobinei mobile, o bobină este fabricată pe un scanner și magnetii externi sunt folosiți pentru a asigura un câmp magnetic static, așa cum este ilustrat în figura 3.

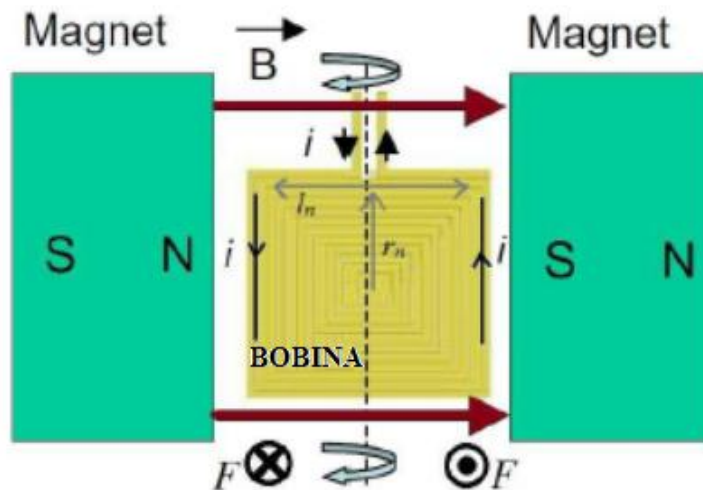


Figura 3

BIBLIOGRAFIE

- [1] A. Londergan, E. Gousev, and C. Chui, "Advanced processes for MEMS-based displays," in Proc. Asia Displays, Shanghai, China, 2007, pp. 107–112.
- [3] H. Urey, S. Madhavan, and M. Brown, "MEMS microdisplays", Handbook of Visual Display Technology, J. Chen, W. Cranton, and M. Fihn, Eds. Bristol, U.K.: Springer-Verlag, 2012, pp. 2067–2080.
- [5] H. Urey, D. W. Wine, and T. D. Osborn, "Optical performance requirements for MEMS-scanner based microdisplays," Proc. SPIE, vol. 4178, pp. 176–185, Aug. 2000.
- [7] U. Hofmann, J. Janes, and H. J. Quenzer, "High-Q MEMS Resonators for Laser Beam Scanning Displays," Micromachines, vol. 3, no. 2, pp. 509–528, Jun. 2012.