

STUDIUL PROPRIETĂȚILOR ELASTICE ALE MATERIALELOR DIN APLICAȚIILE MEMS ȘI AL INFLUENȚEI ACESTORA ASUPRA COMPORTĂRII MICRO-COMPONENTELOR MECANICE

NAZÎRU Andrei¹, VĂSESCU Lidia²

Conducători științifici: Prof.dr.ing. **Adriana SANDU**, Prof.dr.ing. **Georgeta IONAȘCU**

REZUMAT : În lucrare se realizează o simulare numerică, cu metoda elementelor finite, a comportamentului microgrinzilor din componența senzorilor MEMS, cu scopul determinării frecvențelor proprii și a modurilor proprii de vibrație. S-au considerat mai multe posibilități de modelare a proprietăților elastice ale Si, materialul din care sunt fabricate microgrinzile. Rezultatele obținute sunt comparate cu cele analitice, folosind relații din Teoria vibrațiilor și cu valori obținute experimental. Se evidențiază comportamentul ortotrop al Si pentru aplicații de acest fel.

CUVINTE CHEIE: modul de elasticitate, ortotropie structurală, microgrinzi, senzori MEMS.

1 INTRODUCERE

Sistemele MicroElectroMecanice (MEMS) reprezintă integrarea elementelor mecanice, a senzorilor, actuatorilor și electronicii pe un substrat comun (din siliciu), procesate prin tehnologii de microfabricație.

În structura senzorilor MEMS, se întâlnesc frecvent microgrinzi în consolă, figura 1, ele fiind cele mai simple elemente sensibile rezonante, cu aplicații în domeniul microscopiei de forță atomică (AFM). Microgrinda (Cumpson Ș.a., 2004), cu un vârf de dimensiuni nanometrice, vibrează și interacționează cu o suprafață datorită forțelor intermoleculare.

Materialul utilizat cel mai frecvent pentru realizarea microgrinzilor din componența senzorilor MEMS este siliciul, un material anizotrop cu proprietăți elastice diferite în funcție de direcțiile de cristalizare și tehnologia de obținere a microstructurii.

Din acest motiv, simularea numerică a comportamentului mecanic, static și dinamic al acestor structuri, este dificilă privind modelarea proprietăților elastice ale siliciu (Kim J. Ș.a., 2001; Hopcroft A. M. Ș.a., 2010).

În lucrare se realizează o simulare numerică, cu metoda elementelor finite, a comportamentului unor microgrinzi în consolă din componența senzorilor MEMS, cu scopul determinării frecvențelor proprii și a modurilor proprii de vibrație.

Siliciul a fost modelat ca un material *izotrop* cu valori ale modului de elasticitate corespunzătoare direcțiilor cristaline Si [100], [010], [001] – axele de coordonate ale celulei cubice elementare ($E_x = E_y = E_z$).

Siliciul a fost modelat și ca un material *ortotrop* pentru Si [110], [$\bar{1}10$], [001], reprezentând direcțiile cristaline din planul plachetei de siliciu (paralelă cu flat-ul și perpendiculară pe flat/teșitura de orientare a plachetei în dispozitivele de lucru) și, respectiv, direcția perpendiculară pe suprafața plachetei de siliciu ($E_x = E_y \neq E_z$).

Rezultatele obținute au fost comparate cu cele analitice, folosind relații din Teoria vibrațiilor și cu cele obținute experimental, prin două metode diferite, prin Vibrometrie Doppler cu Laser (LDV) și prin Microscopie de Forță Atomică (AFM).

2 MODELAREA SILICIULUI CA MATERIAL IZOTROP

Comportamentul elastic al siliciului depinde de orientarea structurii și, de aceea, alegerea celei mai potrivite valori a modului de elasticitate pentru o anumită aplicație are consecințe majore asupra preciziei rezultatelor obținute.

¹ Anul III, Specializarea Mecanică fină și nanotehnologii, Facultatea Inginerie Mecanică și Mecatronică ;

E-mail: andrei.naziru@gmail.com

² Anul III, Specializarea Ingineria securității în Industrie, Facultatea IMST;

E-mail: lidiavasescu@yahoo.com

STUDIUL PROPRIETĂȚILOR ELASTICE ALE MATERIALELOR DIN APLICAȚIILE MEMS ȘI AL INFLUENȚEI ACESTORA ASUPRA COMPORTĂRII MICRO-COMPONENTELOR MECANICE

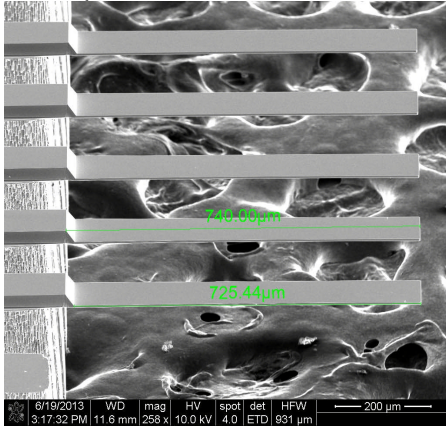


Fig. 1 Imaginea SEM (microscop electronic cu baleiaj) a microgrinzii studiate

În literatură, valorile modului de elasticitate pentru siliciu variază în domeniul 130 - 188 GPa (Hopcroft A. M. Ș.a., 2010). Unii autori (Kim J. Ș.a., 2001) recomandă pentru aplicațiile MEMS Si (111), cu modulul de elasticitate 169 GPa.

Microstructura studiată are forma din figura 2 și este realizată din Si cu densitatea $\rho = 2330 \text{ kg/m}^3$ și coeficientul lui Poisson $\nu = 0.22$.

Dimensiunile microgrinzii sunt lungimea $l = 727 \mu\text{m}$, lățimea $b = 90 \mu\text{m}$, grosimea $t = 5 \mu\text{m}$.

Pentru modulul de elasticitate longitudinal au fost considerate două valori:

- a) $E = 130 \text{ GPa}$, corespunzător Si (100);
- b) $E = 169 \text{ GPa}$, corespunzător Si (111).

2.1 Calculul analitic al frecvențelor proprii

Pentru modurile de încovoiere, expresiile frecvențelor proprii sunt următoarele (RadeȘ M., 2006):

$$f_i = \frac{n_i^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI_y}{\rho A}} \quad (1)$$

S-au utilizat notațiile:

l - lungimea microgrinzii, E - modulul de elasticitate al materialului, I_y - momentul de inerție al secțiunii transversale, ρ -densitatea materialului, A -aria secțiunii.

Pentru primele trei moduri de încovoiere, valorile n_i sunt:

- $n_1 = 1.875$;
- $n_2 = 4.694$;
- $n_3 = 7.855$.

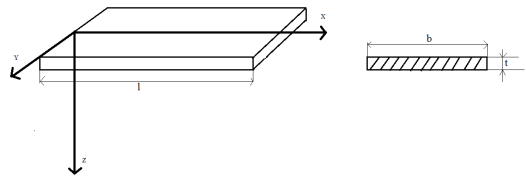


Fig. 2 Schița microgrinzii din siliciu

Formula utilizată este valabilă pentru modurile de încovoiere, pentru care s-au obținut trei valori diferite în funcție de n_i , modurile de torsiune și cel în plan fiind analizate doar experimental și cu metoda elementelor finite.

2.2 Calculul numeric al frecvențelor proprii

S-a efectuat un calcul cu metoda elementelor finite, utilizând programul CosmosM și au fost determinate valorile primelor cinci frecvențe proprii și modurile proprii corespunzătoare.

Modelul de calcul este reprezentat în figura 3. Structura a fost discretizată în 4000 de elemente de placă subțire cu 4 noduri pe element (SHELL 4). Au rezultat 4221 de noduri.

Rezultatele obținute pentru cele două valori ale modului de elasticitate sunt prezentate în tabelul 1, comparativ cu cele analitice.

Se constată buna concordanță a valorilor obținute pentru modurile proprii de încovoiere. Prin metoda elementelor finite se pot identifica și modurile proprii de torsiune și cele în planul barei microgrinzii.

Modelul de calcul numeric este astfel validat.

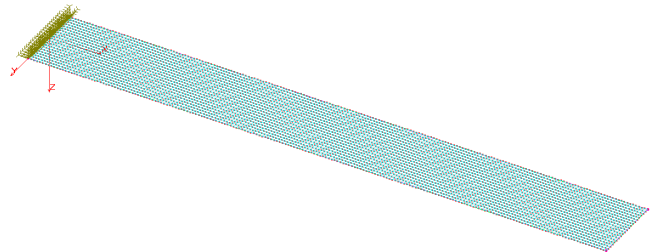


Fig. 3 Modelul de calcul numeric

Tabel 1.

		E=130GPa		E=169GPa	
f_i	mod	analitic	MEF	analitic	MEF
kH					
z					
f_1	încovoiere	11,41	11,46	13,010	13,07
f_2	încovoiere	71,53	71,83	81,559	81,90
f_3	torsiune	-	187,48	-	213,76
f_4	încovoiere	200,31	201,24	228,39	229,45
f_5	în plan	-	203,31	-	231,81

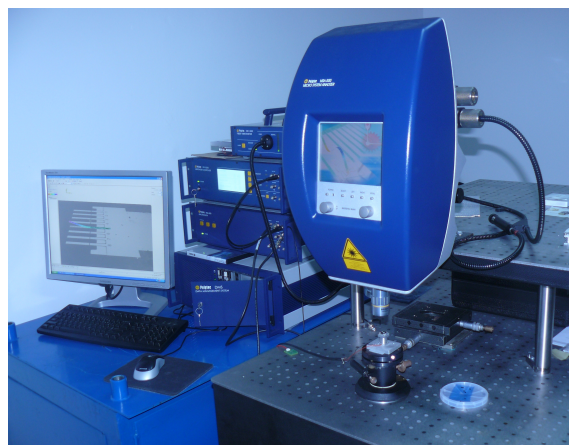


Fig. 4 Sistemul Polytec MSA-500

3 STUDIUL EXPERIMENTAL

3.1 Determinarea experimentală a frecvențelor proprii

Rezultatele obținute prin calcul analitic și simulare numerică sunt apoi comparate prin două metode diferite, prin Vibrometrie Doppler cu Laser (LDV) și prin Microscopie de Forță Atomică (AFM).

Un Vibrometru Doppler cu Laser (LDV) este un instrument științific care este utilizat pentru a face măsurători de vibrații fără contact ale unei suprafețe. Fasciculul laser din LDV este direcționat pe suprafața de interes, iar amplitudinea vibrațiilor și frecvența sunt extrase din modificarea frecvenței fasciculului laser reflectat, datorită mișcării suprafeței. Rezultatul unei măsurători LDV este, în general, o tensiune analogică continuă care este direct proporțională cu componenta vitezei țintei (suprafeței) de-a lungul direcției fasciculului laser.

Avantajele unui astfel de aparat față de dispozitive de măsurare similare, cum ar fi un accelerometru, sunt că LDV poate fi folosit pentru obiecte greu accesibile sau care sunt prea mici pentru a se atașa un traductor fizic. De asemenea, LDV face măsurarea vibrațiilor fără încărcarea țintei cu masă, ceea ce este deosebit de important pentru dispozitivele MEMS.

În figura 4 se prezintă sistemul Polytec MSA-500 utilizat pentru determinarea frecvențelor proprii prin metoda LDV. Rezultatele obținute sunt redată în tabelul 2. Prin această metodă, nu se poate evidenția modul în plan (modul 5 de vibrație).

Pentru frecvența proprie fundamentală a fost determinată valoarea de 13.28 KHz.

În figura 5 se prezintă o înregistrare prin metoda AFM pentru prima frecvență proprie.

S-au obținut două valori 12.5 KHz și 14.3 KHz, valoarea medie a acestora 13.4 KHz, fiind apropiată de cea determinată prin cealaltă metodă, LDV.

Tabel 2.

f_i	LDV	AFM
f_1	13,28	13,4
f_2	82,54	
f_3	202,7	
f_4	230,6	
f_5	-	

Valorile determinate experimental diferă de cele numerice pentru E=130GPa. Pentru prima frecvență proprie, eroarea determinată în raport cu valoarea măsurată prin LDV este de aproximativ 13.65% (pentru E = 130 GPa) și de aproximativ 1.5% (pentru E = 169 GPa). Comparativ cu valoarea măsurată prin AFM, erorile sunt de aproximativ 14.4% (E = 130 GPa) și de aproximativ 2.4% (E = 169 GPa).

În concluzie, dacă se adoptă pentru siliciu un model de material izotrop, valoarea potrivită pentru modulul de elasticitate este de 169 GPa, corespunzând Si (111).

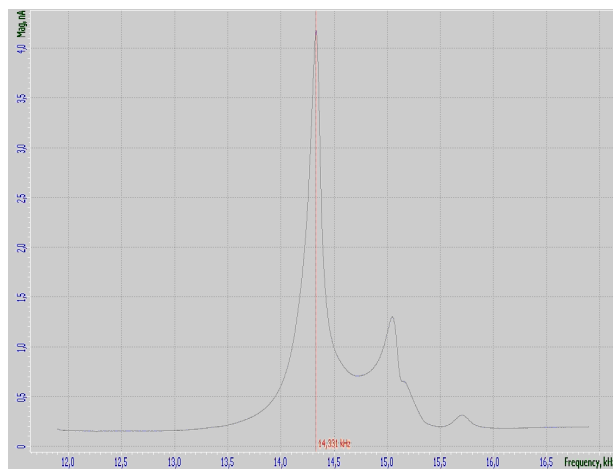


Fig. 5 Valoarea primei frecvențe de rezonanță măsurată cu AFM

3.2 Măsurarea modului de elasticitate al microgrinzii prin metoda nanoindentării

Această metodă este una modernă utilizată pentru determinarea proprietăților elastice ale materialelor din structurile MEMS.

Indentarea presupune apăsarea unui vârf în probă. Adâncimea și suprafața amprente de indentare sunt corelate cu duritatea suprafeței.

Cel mai uzual vârf pentru indentare este cel piramidal din diamant, Berkovich.

În figura 6 sunt prezentate curbele corespunzătoare apăsării și ridicării vârfului în timpul nanoindentării. Histerezisul indică faptul că deformarea nu este doar elastică, ci parțial plastică. Modulul de elasticitate Young se calculează din panta curbei corespunzătoare ridicării (retragerii) vârfului, curba de descărcare fiind întotdeauna în domeniul elastic.

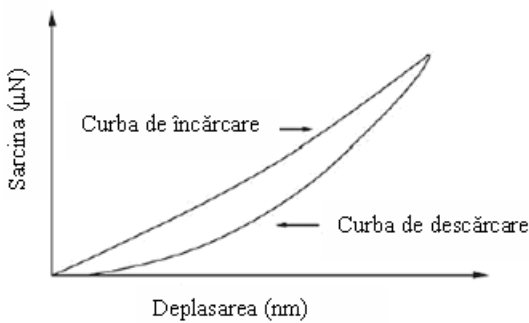


Fig. 6 Curbe de nanoindentare

A fost utilizat sistemul Agilent Nano Indenter G200. Valoarea rezultată pentru modulul de elasticitate a fost $E = 173.7$ GPa, apropiată de cea corespunzătoare Si (111).

Valorile obținute pentru primele cinci frecvențe proprii sunt date în tabelul 3 și sunt foarte apropiate de cele determinate experimental.

4 MODELAREA SILICIULUI CA MATERIAL ORTOTROP

Deoarece siliciul nu este un material izotrop, s-a considerat că este utilă simularea numerică, considerând un material ortotrop pentru Si [110], $[\bar{1}\bar{1}0]$, [001], reprezentând direcțiile cristaline din planul plachetei de siliciu (paralelă cu flat-ul și cea perpendiculară pe flat/teșitura de orientare a plachetei în dispozitivele de lucru), respectiv, direcția perpendiculară pe suprafața plachetei de siliciu ($E_x = E_y \neq E_z$).

Valorile numerice considerate pentru proprietățile elastice sunt:

$$E_x = E_y = 169 \text{ GPa}; E_z = 130 \text{ GPa}; \nu_{yz} = 0.36; \nu_{zx} = 0.28; \nu_{xy} = 0.064; G_{yz} = G_{zx} = 79.6 \text{ GPa}; G_{xy} = 50.9 \text{ GPa}.$$

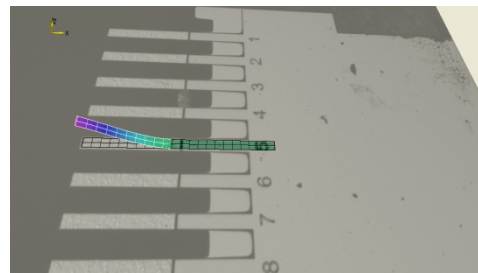
Rezultatele sunt prezentate în tabelul 3.

Tabelul 3.

f_i	Model Izotrop (E măsurat prin nanoindentare)	Model Ortotrop(MEF)
f_1	13,255	13,019
f_2	83,039	81,58
f_3	216,71	184,051
f_4	232,27	228,410
f_5	235,01	230,922

Se constată că rezultatele obținute pentru frecvențele proprii sunt confirmate experimental, erorile fiind sub 3% în cazul modurilor de încovoiere.

În figurile 7-10 sunt prezentate formele primelor patru moduri proprii de vibrație, vizualizate experimental și calculate numeric.



$f_1 = 13,28 \text{ kHz}$

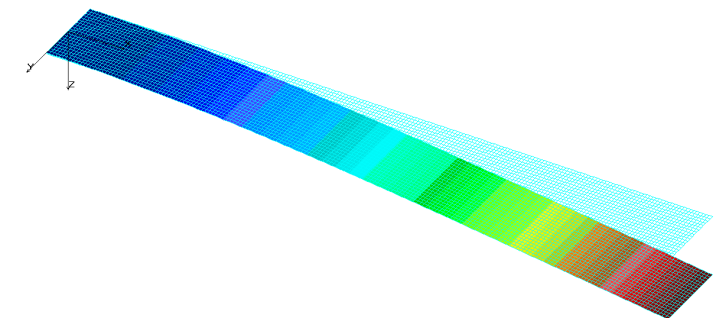
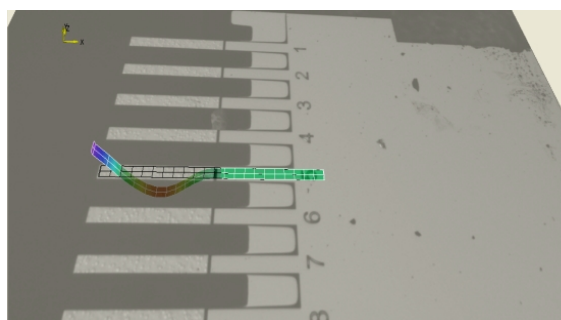


Figura 7. Mod 1.



$f_2=82.54\text{kHz}$

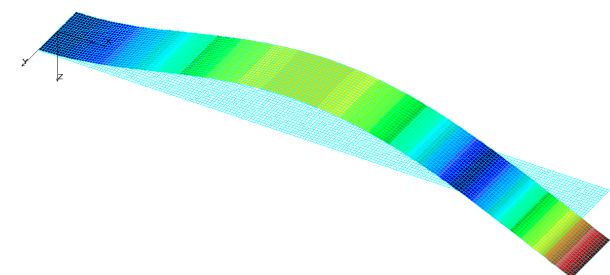
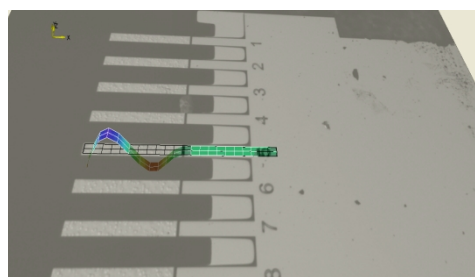


Figura 8. Mod 2.



$f_4=230.6\text{kHz}$

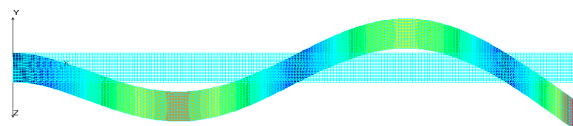
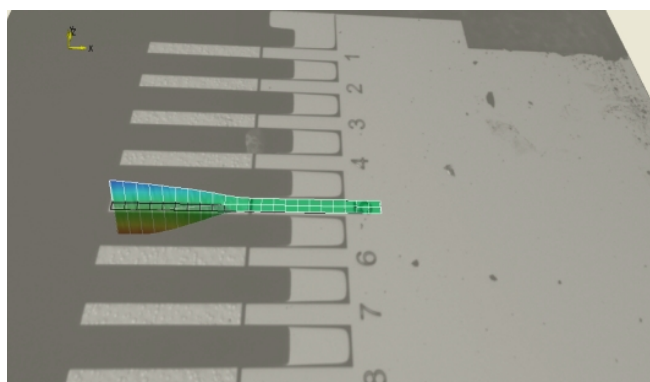


Figura 10. Mod 4.



$f_3=202.7\text{kHz}$

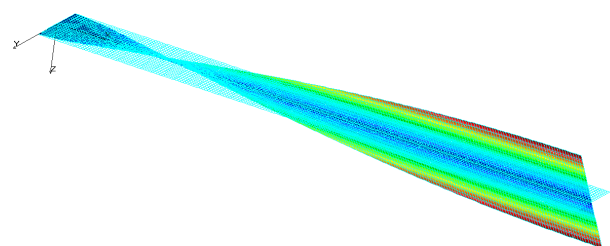


Figura 9. Mod 3.

5 CONCLUZII

În simulările numerice ale comportamentului dinamic al microstructurilor din siliciu se obțin rezultate confirmate experimental în două moduri de descriere a proprietăților elastice ale materialului:

1. material izotrop cu modulul de elasticitate $E_x = E_y = E_z = 169\text{GPa}$, cea mai apropiată valoare de cea determinată pe structura reală pe nanoidentare;
2. material ortotrop cu valori diferite ale proprietăților elastice având valorile prezentate în paragraful 4.

6 BIBLIOGRAFIE

- [1]. Cumpson P.J., Clifford A. C., Hedley J. (2004), "Quantitative analytical atomic force microscopy: a cantilever reference device for easy and accurate AFM spring-constant calibration", volume 15, pp 1337-1346.
- [2]. Kim J., Cho D., Muller R.S., (2001) "Why is (111) Silicon a better mechanical material for MEMS?"
- [3]. Hopcroft A. M., Nix D. W. and Thomas W. K. (2010), "What is the Young's Modulus of Silicon?", Journal of Microelectromechanical Systems, volume 19, pp 229-237.
- [4]. Radeș M., "Mechanical Vibrations", vol. 1, PRINTECH, București, 2006.