

Titlul proiectului:

MODELARE 3D PENTRU PROIECTAREA ROBUSTICA A MICROSENZORILOR DE VIBRAȚIE

Universitatea Tehnica din Cluj-Napoca

Masurarea adeziunii la console încastate la un capăt și libere la celălalt

Console testate sunt din polisiliciu cu dimensiunile: grosimea $t=2\mu\text{m}$, lățime $w=20\mu\text{m}$, lungimi diferite $C_1 - L_1=140\mu\text{m}$ și $C_2 - L_2=150\mu\text{m}$.

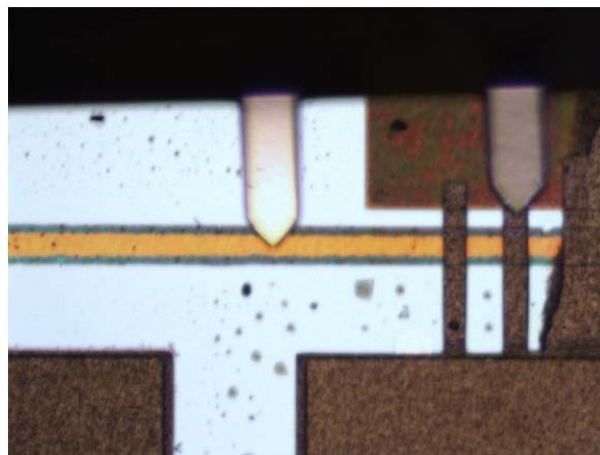


Fig.1 Palpatorul AFM în contact cu probele investigate (în figură palpatorul AFM este în contact cu consola C2).

Raspunsul în zona de
contact consola - substrat

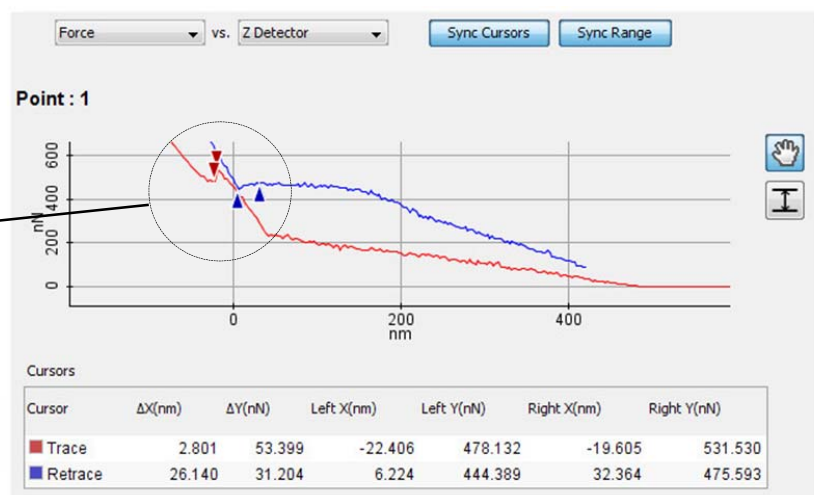
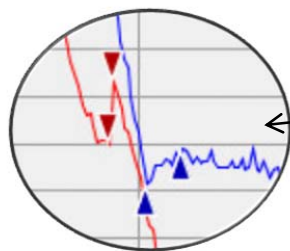


Fig.2 Forța de atracție (pe curba de încărcare - roșie) și forța de adeziune (pe curba de descărcare - albastră) pe perioada de apropiere și de revenire a consolei C1 față de substrat.

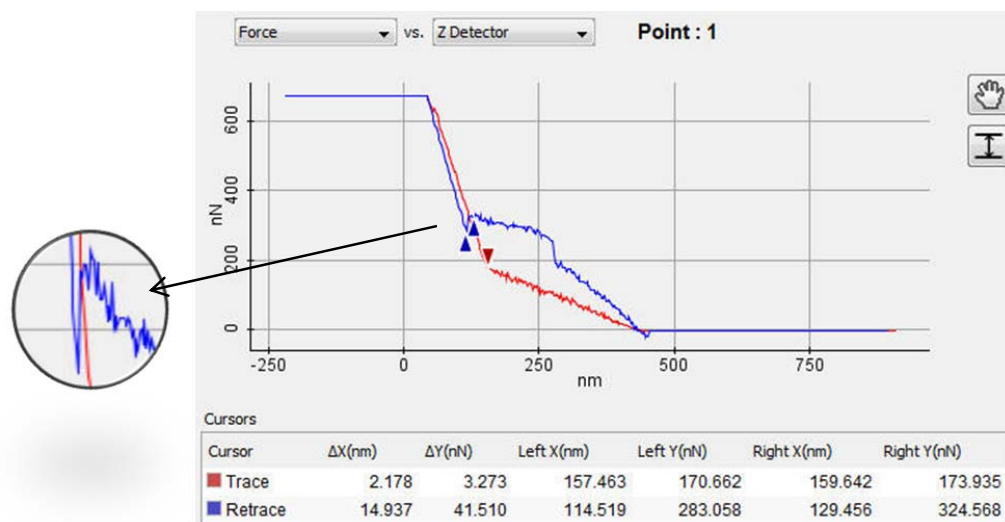


Fig.3 Forța de atracție (pe curba de încărcare - roșie) și forța de adeziune (pe curba de descărcare - albastră) pe perioada de apropiere și de revenire a consolei C2 față de substrat.

Utilizând instrumentele oferite de softul de interpretare, prin poziționarea cursorilor pe curba de încărcare respectiv de descărcare se determină valoarea forței de atracție (pull-in) precum și a celei de adeziune (pull-of). Așa cum se prezintă în Fig. 2, pentru consola C1 se obține o forță de adeziune cu substratul de 31.204nN. Același experiment a fost realizat și pentru consola C2 cu lungimea de 150 μ m iar curba experimentală este prezentată în Fig.3. Forța de adeziune (pull-of force) este egală cu 45.51nN. În comparație cu consola C1, aria de contact dintre C2 și substrat crește deoarece lungimea consolei C2 este mai mare cu 10 μ m decât cea a consolei C1. Acest lucru duce și la creșterea forței de adeziune, care este direct proporțională cu aria de contact.

Desprinderea de reazem a consolei incastrate la un capăt și întoarcerea acesteia cu suprafața de contact în sus în vederea măsurării rugozității

Un alt obiectiv important al cercetării realizate a fost tăierea consolei flexibile din dreptul reazemului și întoarcerea acesteia în vederea măsurării rugozității suprafeței de contact. Pentru realizarea acestei operații, s-a utilizat un indenter cu vârf de diamant în modul de scanare laterală în contact a microscopului AFM (Fig.4). Varful AFM a zgâriat consola pe perioada scanării iar forța de apăsare a fost crescută secvențial până la 200 μ N. După debitare, utilizând palpatorul AFM s-a realizat întoarcerea consolei. Această etapă este prezentată secvențial în Fig.5.

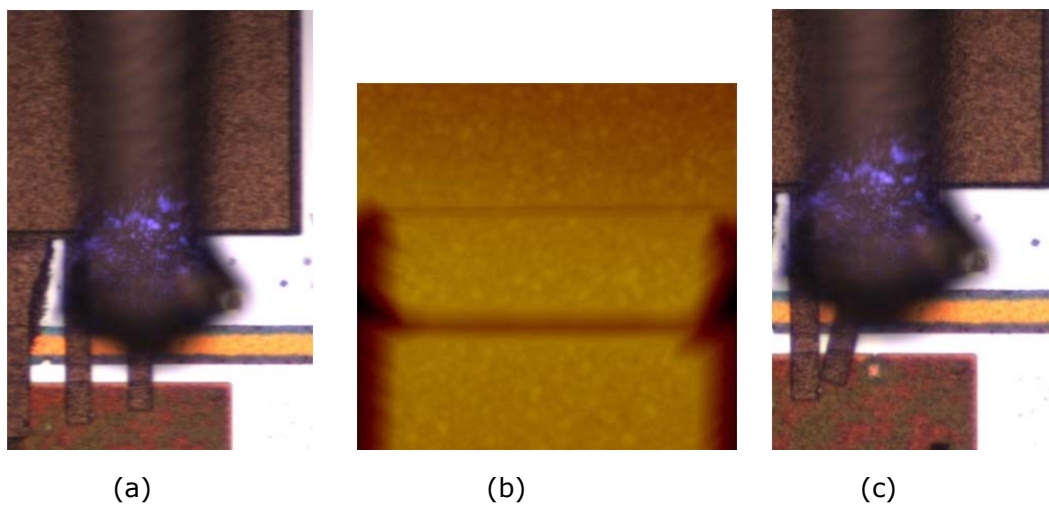


Fig.4 Procesul de debitare al unei console: (a) poziția inițială a palpatorului; (b) urma lăsată de indenter pe perioada zgârierii; (c) consola desprinsă.

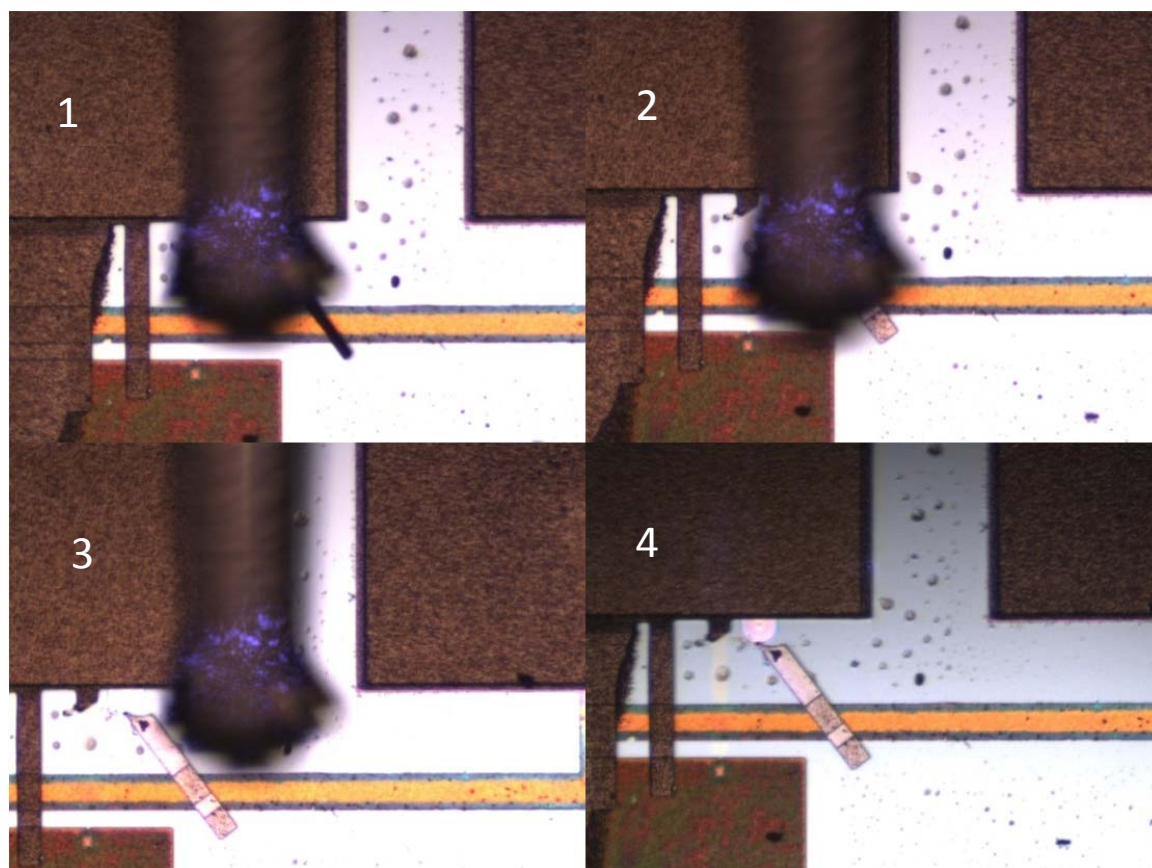


Fig.5 Procesul secvențial 1-2-3-4 de rasturnare a consolei cu partea inferioara în sus.

Măsurarea rugozității suprafețelor de contact la consolele încastate la un capăt

Figura 6 prezintă mapa de topografie a electrodului de contact (a substratului). În mod asemănător s-au măsurat parametrii de suprafață a electrodului flexibil pe zona de contact cu substratul (Fig.7).

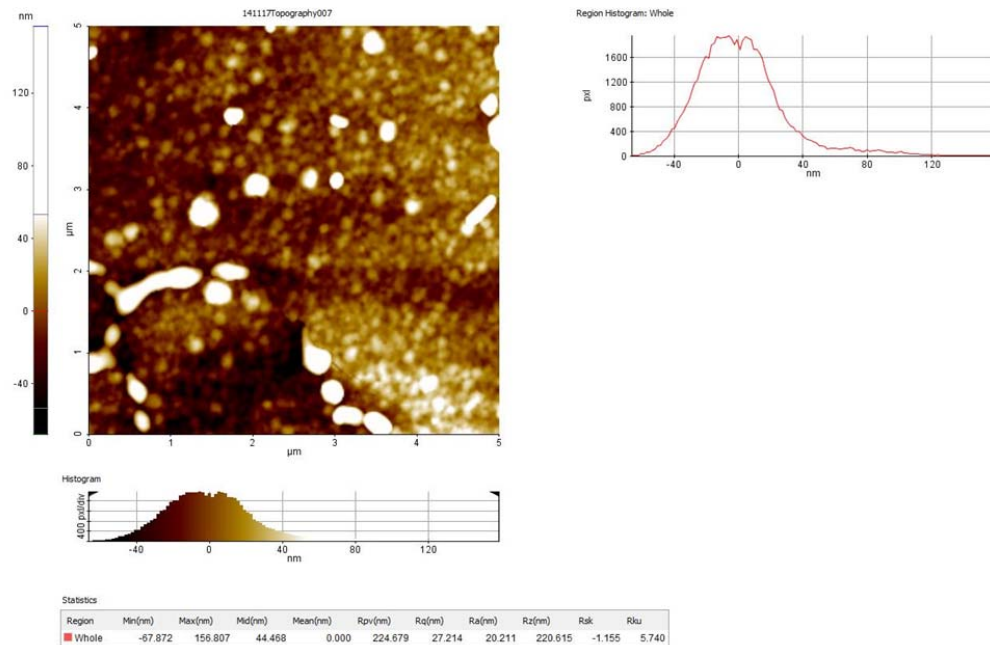


Fig.6 Parametrii de rugozitate la substrat (electrodul de contact).

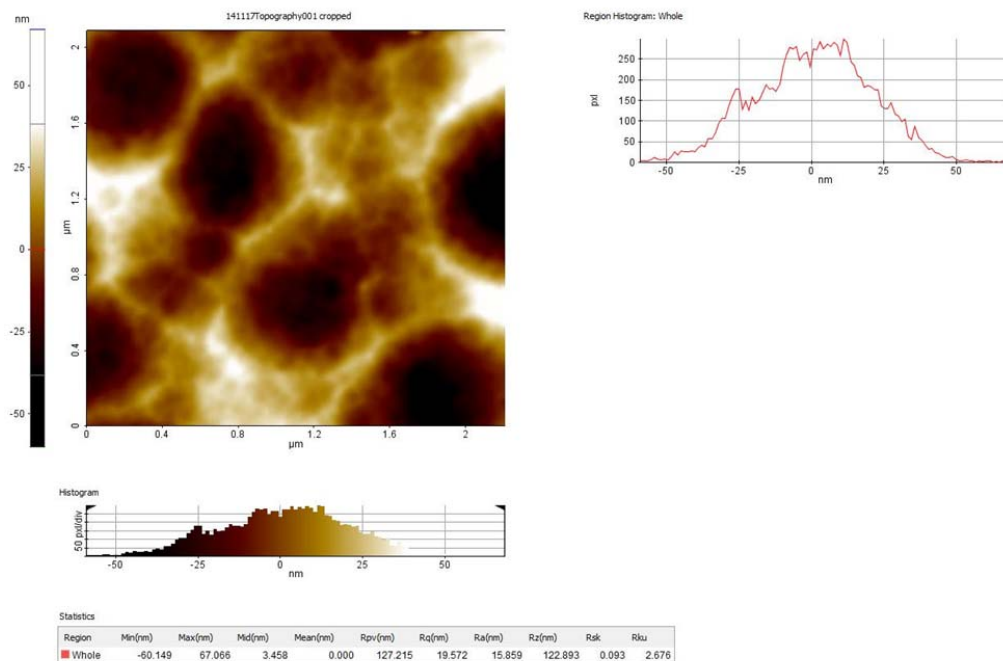


Fig.7 Parametrii de rugozitate de la partea de contact a electrodului flexibil.

Analiza adeziunii la materiale MEMS

Materialele supuse testelor experimentale au fost depuse cu o grosime de 500nm pe același substrat de siliciu. Investigațiile experimentale au fost realizate prin modulul de spectroscopie-în-matrice al microscopului de forță atomică (AFM). Pentru validarea rezultatelor experimentale s-au utilizat modelele teoretice JKR și DMT de determinare analitică a forței de adeziune.

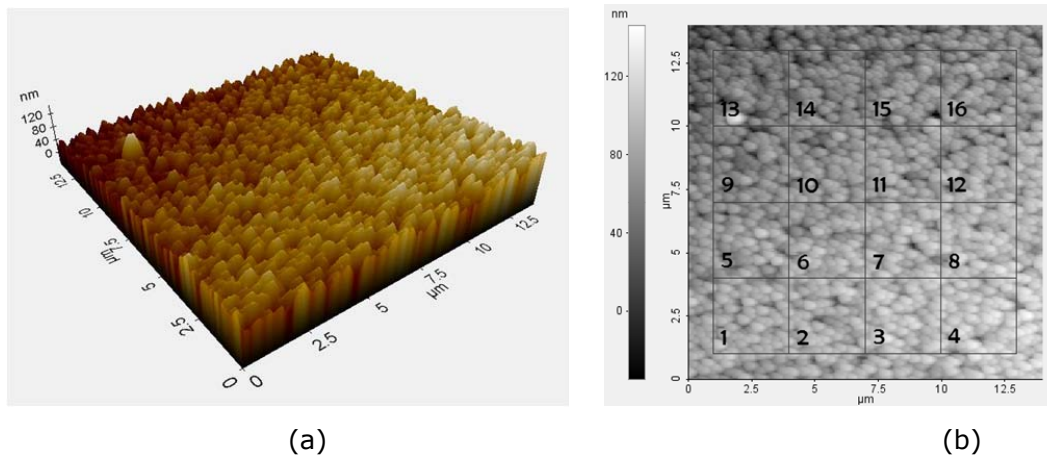


Fig.8 Topografia de suprafață la proba din polisiliciu și matricea unde s-a realizat spectroscopia pentru măsurarea adeziunii

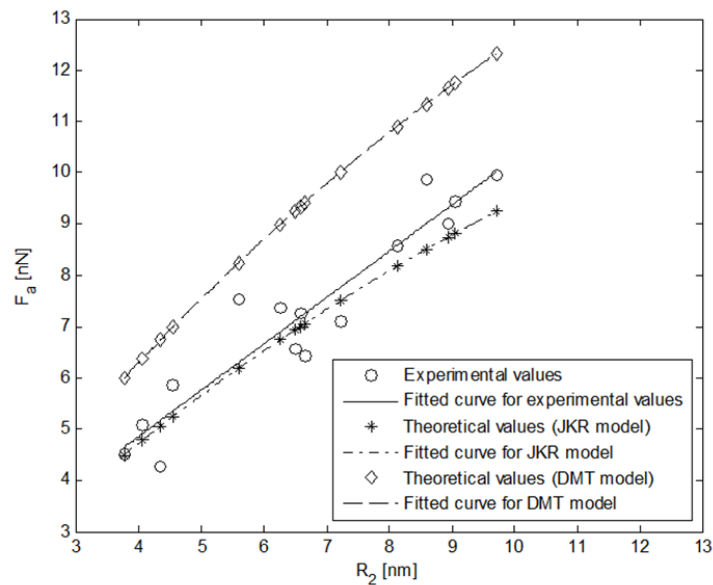


Fig.9 Comparație între valorile experimentale și teoretice date de modelul JKR și DMT pentru polisiliciu

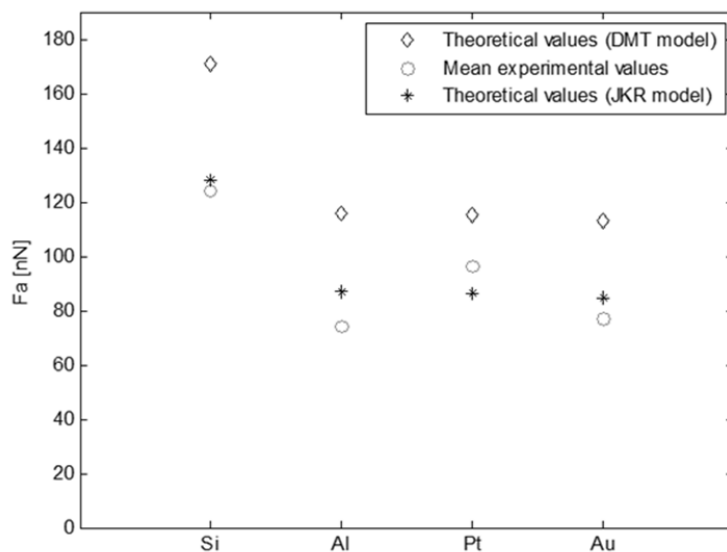


Fig.10 Forța de adeziune experimentală și teoretică pentru Si, Al, Pt și Au

Adeziunea la consolele incastrate la ambele capete

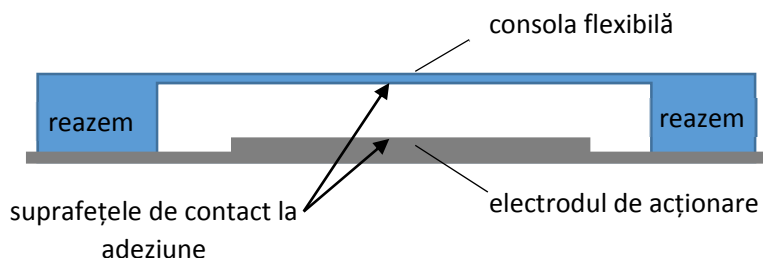
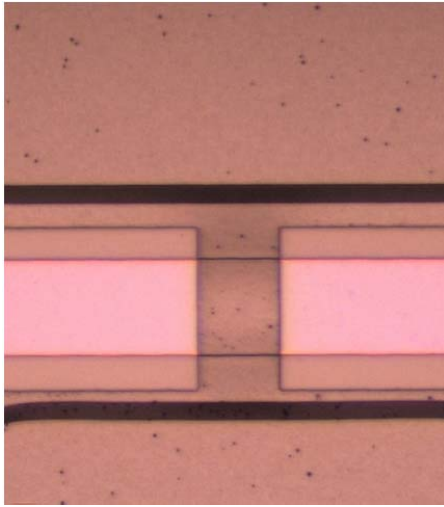


Fig.11 Consolă încastrată la ambele capete utilizată la senzorii de vibrație (probe realizate de către partenerul IMT- București și testate de către partenerul UTCN).

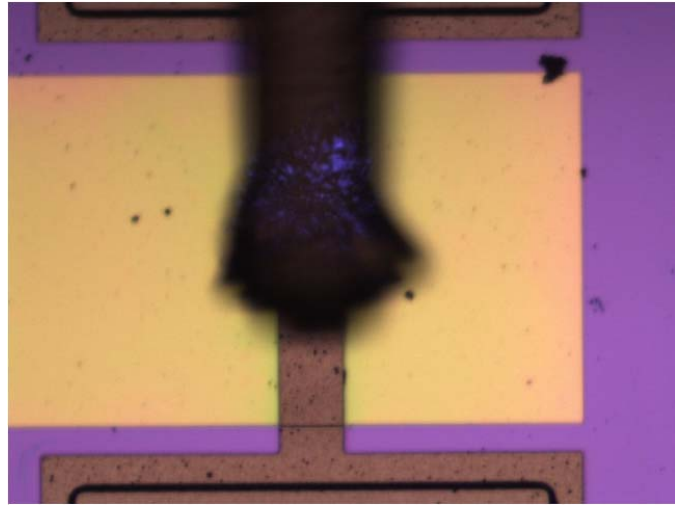
Determinările experimentale au implicat:

- I) Determinarea forței de adeziune dintre suprafețele de contact (Fig.11);
- II) Debitarea consolei flexibile și întoarcerea acesteia în scopul de a măsura rugozitatea suprafețelor de contact.

Determinarea forței de adeziune dintre suprafețele de contact la consola încastrată la ambele capete. Figura 12 prezintă două console cu lungimi diferite supuse testelor de adeziune. Palpatorul AFM a fost poziționat în mijlocul părții flexibile a probelor și a realizat deplasare până la substrat. Forța mecanică de acționare este dată de rigiditatea palpatorului AFM (cunoscută) multiplicată cu deformarea palpatorului AFM (monitorizată optic).



(a)



(b)

Fig.12 Console încastrate la ambele capete din polisiliciu supuse testelor de adeziune

Sau ales doua console încastrate la ambele capete cu următoarele dimensiuni geometrice:

- Consola **B₁** (Fig.8a)– are lungimea $L_1 = 100\mu\text{m}$, grosimea $t = 1\mu\text{m}$ și lățimea $w = 5\mu\text{m}$;
- Consola **B₂** (Fig.8b)– are lungimea $L_2 = 300\mu\text{m}$, grosimea $t = 1\mu\text{m}$ și lățimea $w = 50\mu\text{m}$.

Forța dată de palpatorul AFM a fost aplicată la mijlocul părții flexibile așa cum se poate observa în figura 12b și a încovoiat consolele până la substrat. Curba AFM obținută prin modulul de spectroscopie-în-punct, la încărcare (curba roșie) și la descărcare (curba albastră), din figurile 13 și 14 ne dă informații asupra adeziunii dintre consolă și substrat. Acel salt de pe curba de încărcare, marcat de cursoarele 1 și 2 reprezintă forța de atracție a consolei la substrat care apare atunci când distanța dintre ele este foarte mică. Saltul de pe curba de descărcare dintre cursoarele 3 și 4 reprezintă forța de adeziune, adică forța cu care consola este reținută la substrat pe perioada descărcării.

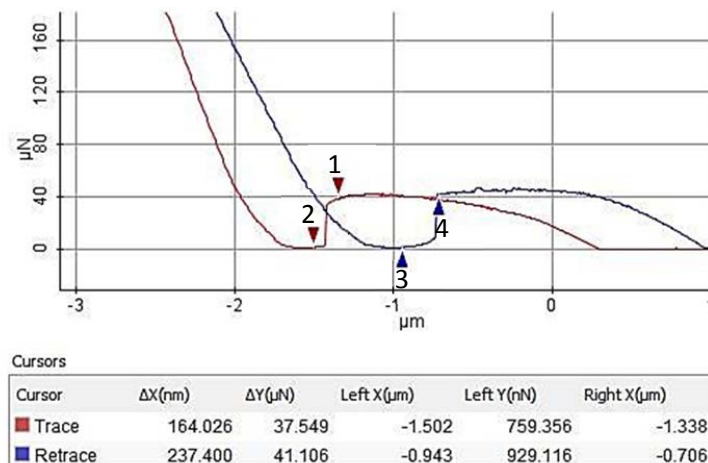


Fig.13 Curba AFM la încărcare (roșu) și descărcare (albastru) pentru consola **B₁** cu lungimea de $100\mu\text{m}$

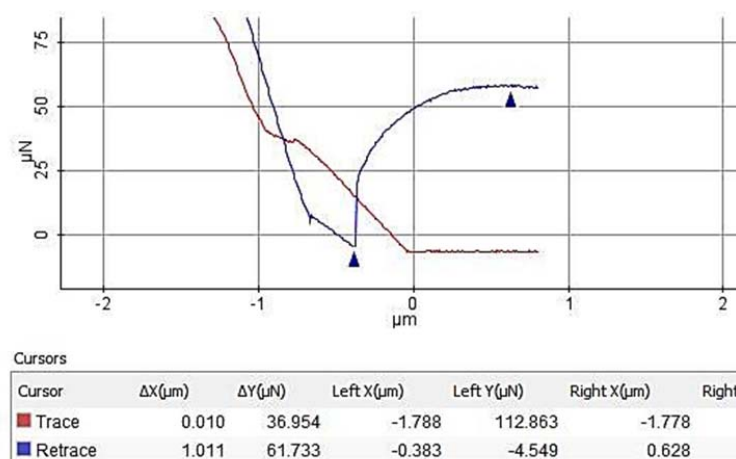


Fig.14 Curba AFM la încărcare (roșu) și descărcare (albastru) pentru consola B_2 cu lungimea de $300\mu m$

Prin urmare, forța de adeziune dintre consola B_1 cu lungimea de $100\mu m$ și substrat este data de diferența Δy dintre cursoarele 3 și 4 și este de $41.106\mu N$ pe când aceasta crește la $61.733\mu N$ în cazul consolei B_2 cu lungimea de $300\mu m$.

Adeziunea depinde nu numai de aria de contact dintre suprafețe dar și de forța de revenire a consolei (Fig.15). Forța de revenire este direct dependentă de rigiditatea consolelor. Pentru aceeași suprafață de contact dintre consolă și substrat, forța de revenire scade cu cât lungime consolei crește datorită scăderii rigidității. Rigiditatea consolei B_2 este mai mică decât a consolei B_1 ceea ce duce la scăderea forței de revenire și la creșterea forței de adeziune.

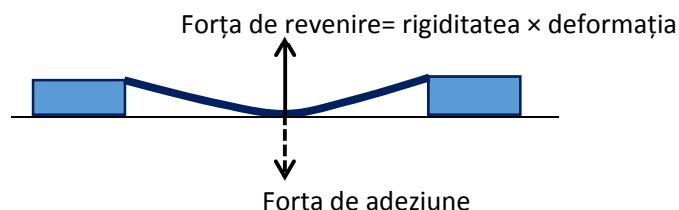
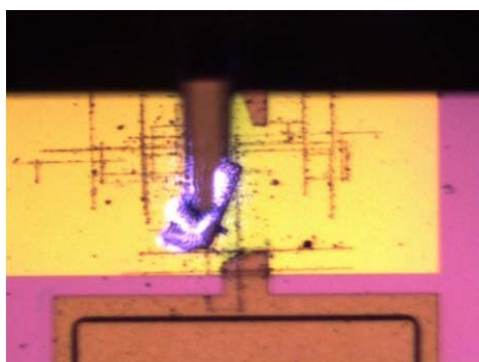
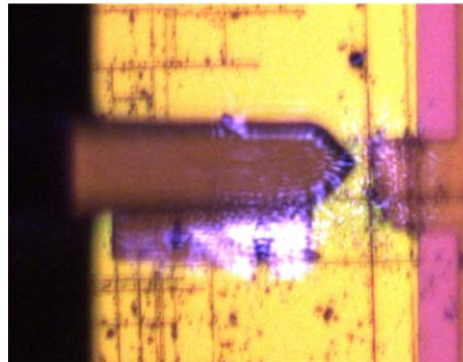


Fig.15 Sistemul de forțe care contribuie la adeziune

Debitarea consolei flexibile încastrată la ambele capete și întoarcerea acesteia în scopul de a măsura rugozitatea suprafețelor de contact.



(a)



(b)

Fig.16 Scanarea părții de dedesubt a consolei flexibile (a) și a electrodului de contact (b)

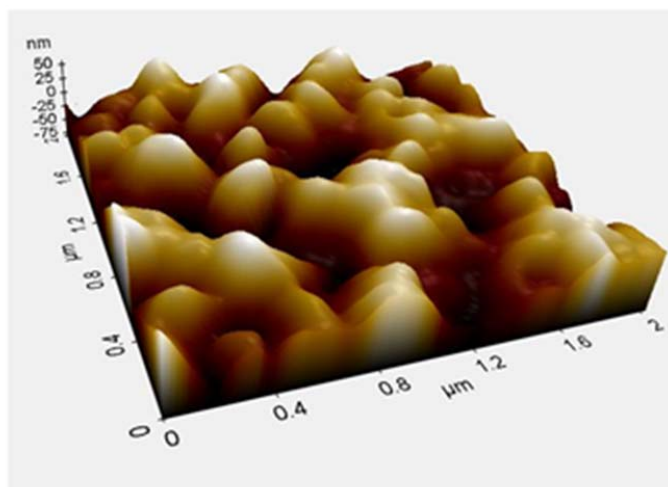


Fig.17 Imaginea 3D a părții de dedesubt a consolei flexibile

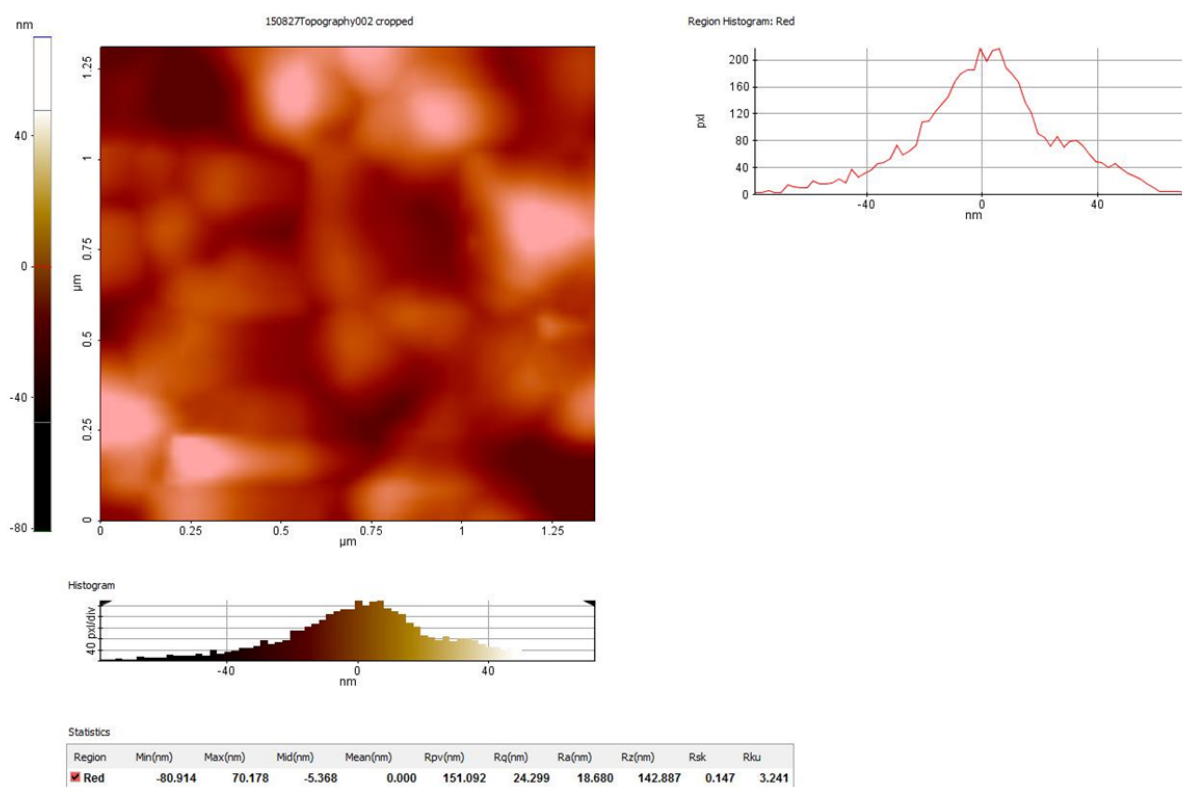


Fig.18 Parametrii de suprafață a părții de dedesubt a consolei flexibile

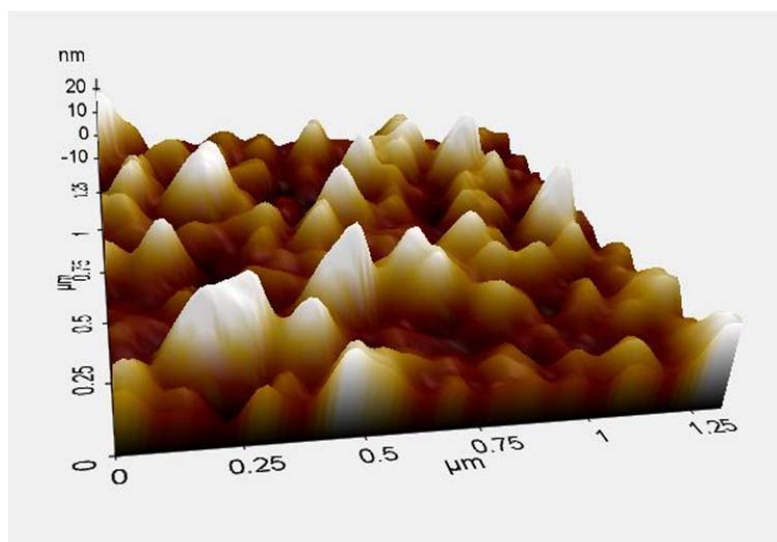


Fig.19 Imaginea 3D a suprafeței de contact de la substrat

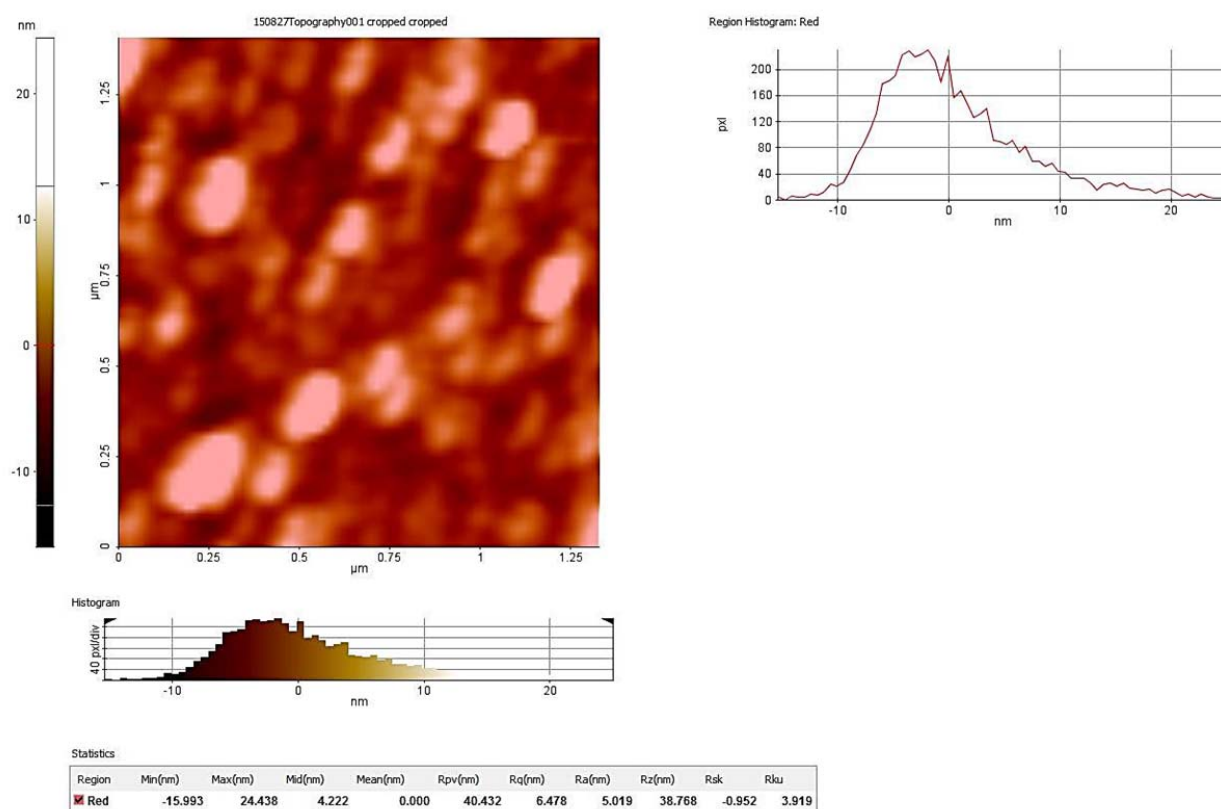
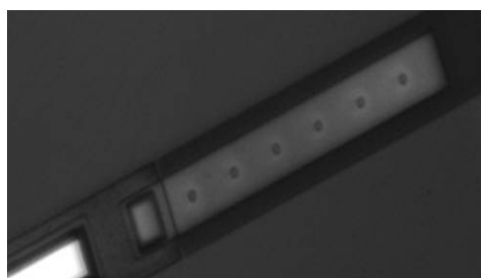


Fig.20 Parametrii de suprafață a suprafeței de contact de la substrat

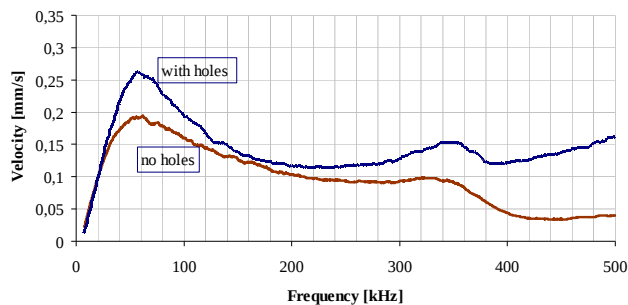
Valoarea medie a rugozității suprafeței de contact a consolei flexibile R_a este de 18,68nm iar a electrodului de contact de la substrat este de 5.019nm.

Optimizarea și proiectarea fiabilă a microsenzorilor de vibrație

Pentru a reduce pierderile de energie datorate frecării cu aerul, s-au studiat structuri optimizate de console oscilatorii. S-a urmărit diminuarea pierderii de energie datorate frecării cu aerul, și implicit creșterea vitezei de oscilație la aceeași frecvență de rezonanță. Astfel, s-au analizat console din polisiliciu la care s-au realizat orificii pe direcția deplasării (Fig. 21a). Comparativ cu o consolă fabricată în aceleași dimensiuni geometrice, dar fără orificii, s-a obținut o îmbunătățire a factorului de calitate și o reducere a energiei pierdute prin frecarea cu aerul de aproximativ 20% (Fig. 21b). Se poate observa cum viteza de oscilație a crescut de la 0.18mm/s la 0.27mm/s pentru același semnal de acționare.



(a)



(b)

Fig. 21 Răspunsul dinamic a consolei din polisiliciu încastrată la un capăt, realizată cu orificii și fără orificii: (a) proba cu orificii testată, (b) răspunsul în frecvență

Pierdere de energie pe baza efectului termoelastic a fost studiată încă din faza de început a proiectului. Studiile au fost aprofundate pe parcursul realizării proiectului. Pe baza modelelor experimentale s-a dezvoltat o interfață software de analiza a pierderii în amplitudine pe o anumită perioadă de excitație continuă. Testele au fost dezvoltate pe structurile de console vibratorii încastrate la ambele capete (Fig. 22). Rezultatele teoretice au fost validate de cele experimentale (Fig. 23).



Fig. 22 Microconsolă încastrată la ambele capete supusă analizei pierderilor interne de energie (lungimea totală=150μm, distanța dintre reazeme= 124μm, lățimea= 30μm și grosimea= 1.9μm)

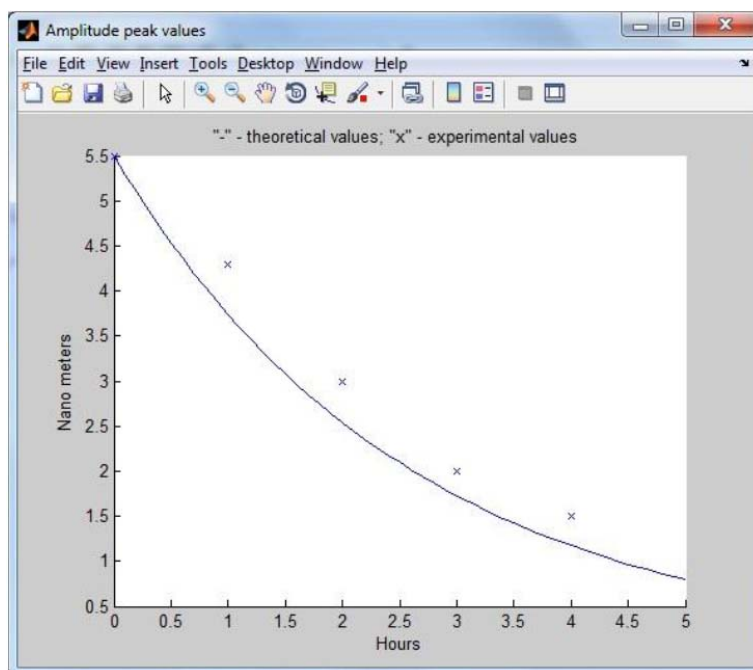
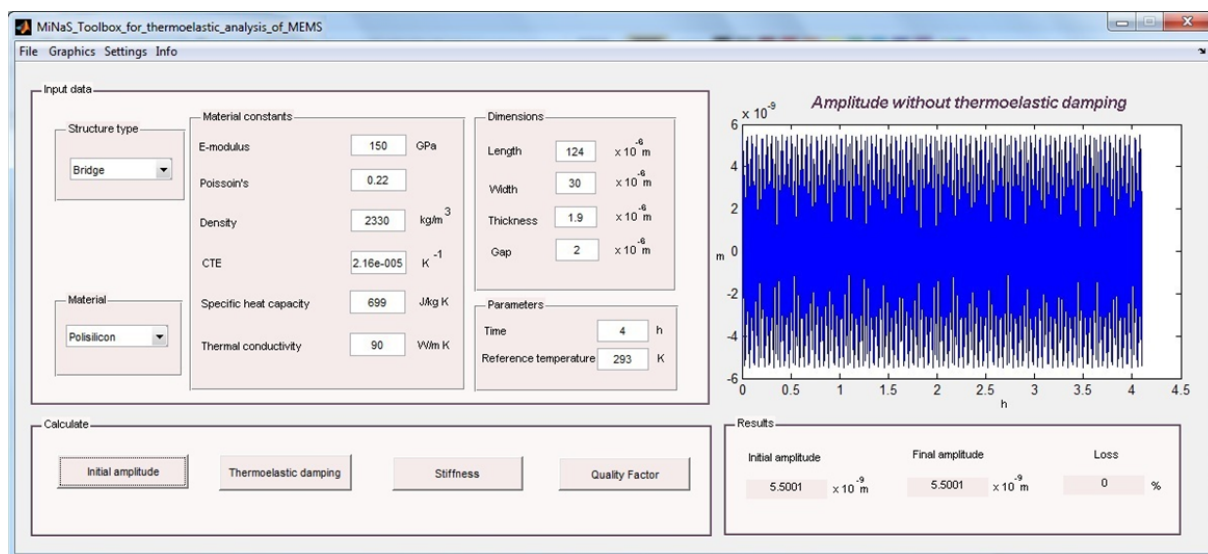
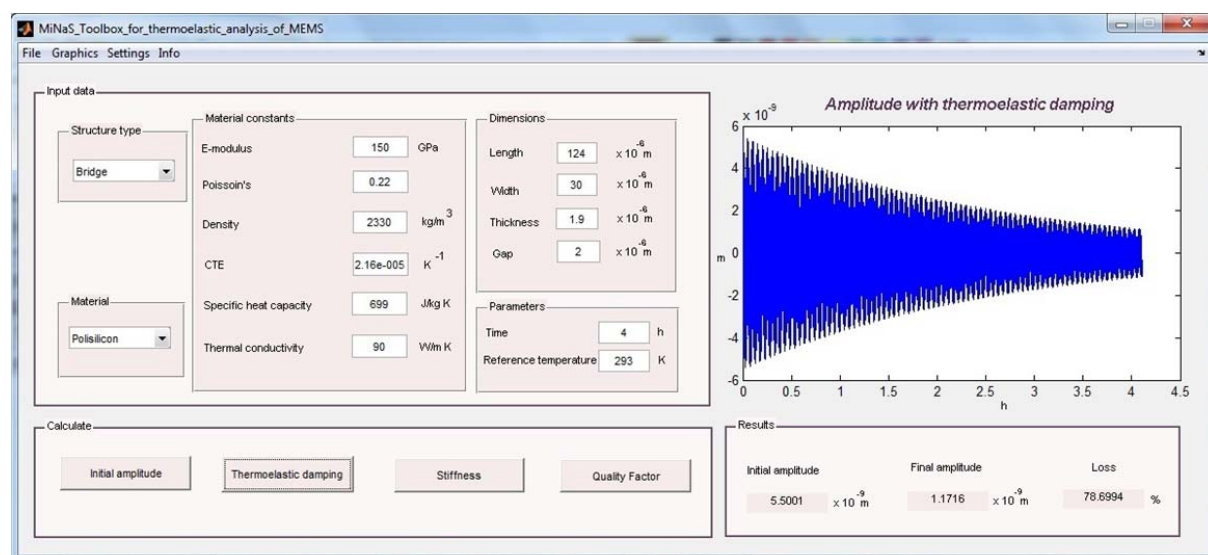


Fig. 23 Pierderea în amplitudine teoretică și experimentală pe o perioadă de excitație continuă (semnalul de acționare este white noise, DC=5V, AC=5V)

S-a realizat o interfață software prezentată în figura 24. Rezultatele prezentate în figura 24 sunt caracteristice simulării pierderii în amplitudine pentru grinda prezentată în figura 22 cu lungimea totală de 150 μ m. Figura 24a prezintă simularea funcționării pentru micorconsola încastrată la ambele capete cu lungimea totală de 150 μ m și deschiderea dintre reazeme de 124 μ m pentru situația în care nu se ia în considerare pierderea interioară de energie din material datorată efectului termoelastice. Figura 24b prezintă situația reală de funcționare pentru același oscilator dar considerând pierderea internă de energie. Astfel, după 4 ore de funcționare continuă, amplitudinea scade de la 5.5nm la 1.17nm reprezentând o pierdere de 78,69%.



(a)



(b)

Fig. 24 Interfața software pentru determinarea pierderilor în amplitudine: (a) fără considerarea pierderilor de energie interne, (b) prin considerarea pierderii de energie pe o perioadă de 4 ore de oscilație continuă.

Pierdere de energie determinată teoretic a fost validată experimental cu ajutorul analizorului de vibrații de tip Politech existent în cadrul Laboratorului de vibrații de la Universitatea din Liege, unul dintre partenerii proiectului. În figura 25 s-a prezentat scăderea în amplitudine după fiecare oră de funcționare. Se poate observa ca amplitudinea inițială este de 5.52nm iar dupa 4 ore, aceasta scade la 1.5nm, reprezentând o pierdere de energie de 72,82%, valoare apropiată de cea determinată teoretic. Testele au fost realizate în 3 zile diferite și aceeași pierdere a fost obținută după 4 ore de funcționare.

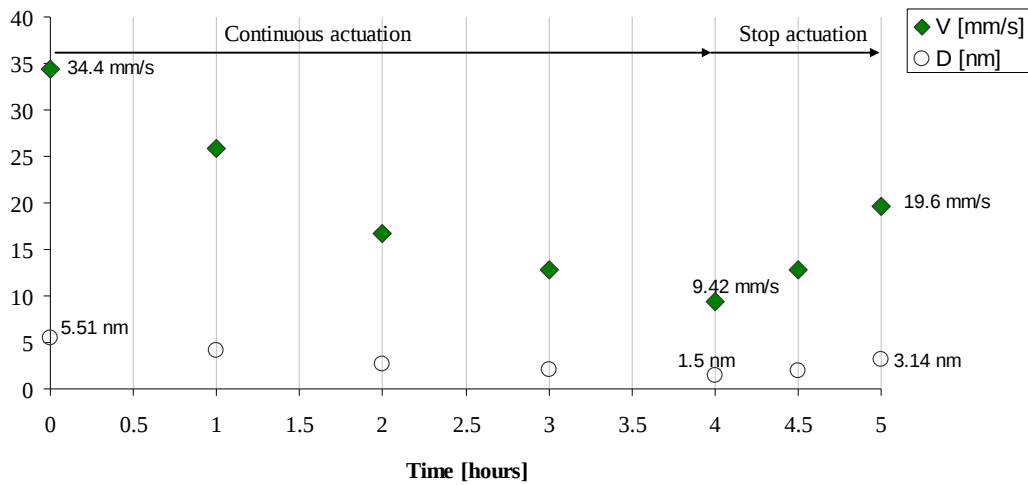


Fig.25 Răspunsul dinamic în vacuum pentru consola încastrată la ambele capete cu lungimea dintre reazeme de 124 μ m pentru același semnal de acționare (white noise AC=5V, DC=5V)

În ultima fază de analiză a pierderilor de energie internă s-a realizat o optimizare cu algoritmi evolutivi utilizând algoritmul Cuckoo Search. Funcția obiectiv a fost determinarea dimensiunilor optime a consolei încastrată la ambele capete pentru care pierderea internă de energie să fie minimă.

În urma rulării programului de optimizare s-au obținut rezultatele optimizate ale senzorului de vibrație prezentate în tabelul următor.

Dimensiunile optimizate ale rezonatorului consolă încastrată la ambele capete

Time (h)	Length (μ m)	Thickness (μ m)	Width (μ m)	Attenuation of amplitude (%)
4	214.19	1	30	1.12%

Acest efect al pierderii interioare de energie are efect asupra proiectării fiabile a senzorilor de vibrație aflați sub excitație continuă (senzorii seismici, de detecție a poluării mediului etc). Algoritmul dezvoltat poate fi utilizat în viitor pentru determinarea dimensiunilor optime ale senzorilor de vibrație astfel încât pierderea de energie să fie minimă.

Publications UTCN-partner

1. Rusu F., Pustan M., Birleanu C., Muller R., Voicu R., Baracu A (2015) Analysis of the surface effects on adhesion in MEMS structures, *Applied Surface Science* 358, 634-640
2. Pustan M., Dudescu C., Birleanu C. (2015) Static response and stiction analysis of MEMS micromembranes for optical applications, *Physica Status Solidi C: Current Topics in Solid State Physics*, DOI: 10.1002/pssc.201510096
3. Pustan M., Dudescu C., Birleanu C. (2014) - Reliability Design Based on Experimental Investigations of Paddle MEMS Cantilevers Used in Mass Sensing Applications, *Sensor Letters* ISSN: 1546-198X (Print): EISSN: 1546-1971 (Online) Copyright © 2000- 2014 American Scientific Publishers. All Rights Reserved, *Sensor Lett.* 12, 1600-1606 (2014)
4. Pustan M., Birleanu C., Rusu F., Dudescu C., Belcin O. (2014) Size effect on the microbridges quality factor tested in free air space, 15th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, EuroSimE 2014, Gent, Belgium – April 7-8-9, 2014, 978-1-4799-4790-4/14/©2014 IEEE
5. Violeta Merie, Marius Pustan, Corina Birleanu, Gavril Negrea, Belcin Ovidiu, (2014) Substrate Influence on the Mechanical and Tribological Characteristics of Gold Thin Films for MEMS Applications, 3rd International Conference Advance in Engineering & Management, September 11-12, Drobeta Turnu Severin, Romania