



UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE
ȘTIINȚĂ ȘI TEHNOLOGIE
POLITEHNICA BUCUREȘTI



Școala Doctorală de Electronică, Telecomunicații
și Tehnologia Informației

Decizie nr. 84 din 19-07-2024

REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT

Ing. George-Stelian MUSCALU

MICROSISTEME DE CAPTARE A ENERGIEI
PENTRU APLICAȚII DE MEDIU
ENERGY HARVESTING MICROSYSTEMS FOR
ENVIRONMENTAL APPLICATIONS

COMISIA DE DOCTORAT

Prof. Dr. Ing. Ion MARGHESCU

Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Președinte
Politehnica București

Prof. Dr. Ing. Gheorghe BREZEANU

Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Conducător de doctorat
Politehnica București

Prof. Dr. Ing. Radu VASIU

Universitatea Politehnica din Timișoara Referent

CS I. Dr. Ing. Carmen-Aura MOLDOVAN

INCD pentru Microtehnologie IMT-București Referent

Dr. Ing. Adrian TULBURE

Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Referent
Politehnica București

BUCUREȘTI 2024

Cuprins

Introducere.....	3
1.1 Prezentarea domeniului tezei de doctorat.....	3
1.2 Scopul tezei de doctorat	3
1.3 Conținutul tezei de doctorat	4
Microgeneratoare piezoelectrice de energie – considerații teoretice	5
2.1 Sinteza din literatura de specialitate	5
2.2 Tehnologii de microprelucrare	5
2.3 Microgenerator piezoelectric de energie	6
Proiectarea și simularea microgeneratoarelor piezoelectrice.....	7
3.1 Schema de principiu. Date de proiectare	7
3.2 Microgenerator piezoelectric de energie pentru aplicații industriale – PZU1	8
3.3 Microgenerator piezoelectric de energie pentru aplicații automotivă – PZU2.....	9
Tehnologia de realizare a microgeneratoarelor de energie	10
4.1 Considerații inițiale.....	10
4.2 Microgenerator piezoelectric de energie pentru aplicații industriale – PZU1	10
4.3 Microgenerator piezoelectric de energie pentru aplicații automotivă – PZU2.....	13
Testarea experimentală a microgeneratoarelor.....	15
5.1 Montajul experimental și modulul electronic	15
5.2 Testarea microgen. piezoelectric de energie pentru aplicații industriale – PZU1	16
5.3 Microgenerator piezoelectric de energie pentru aplicații automotivă – PZU2.....	19
5.4 Compararea cu microgeneratoare similare	21
Concluzii.....	22
6.1 Rezultate obținute	22
6.2 Contribuții originale.....	23
6.3 Lista lucrărilor originale.....	24
6.4 Perspective de dezvoltare ulterioară.....	28
Anexe.....	29
A1 Fluxul tehnologic pentru obținerea de structuri de testare a straturilor piezoelectrice ..	29
A2 Microgenerator piezoelectric de energie pentru aplicații aerospațiale – PZU3.....	29
A3 Microgen. piezoelectric de energie pentru aplicații de infrastructură civilă – PZU4	29
Bibliografie – selecție	30

Capitolul 1

Introducere

1.1 Prezentarea domeniului tezei de doctorat

Într-o societate din ce în ce mai conectată, senzorii reprezintă un motor important în avansarea lumii informaționale. Principalele tendințe în dezvoltarea acestora sunt: portabilitatea, miniaturizarea, tehnici avansate de integrare, conectivitatea, securitatea și fiabilitatea. Astfel, pentru adresarea acestor tendințe, au apărut cerințe tot mai mari pentru un consum de energie mic, fapt ce a dus la dezvoltarea de circuite integrate de putere foarte mică, de la câțiva μW până la sute de μW [1].

***Energy harvesting* este procesul de extragere de cantități mici de energie din mediul înconjurător.** Altfel spus, prin *energy harvesting* se transformă energie din mediul înconjurător în energie electrică. Această lucrare se axează pe energia provenită din vibrațiile mecanice, energie ce poate fi captată prin mecanismul de piezoelectricitate.

Microgeneratoarele piezoelectrice de energie fabricate prin tehnologii MEMS reprezintă o alternativă atractivă pentru generarea de mici cantități de energie din vibrațiile din mediul ambiant. Această cerere pentru sisteme sigure, eficiente energetic și durabile ce necesită mentenanță minimă sau deloc a dus la creșterea pieței microgeneratoarelor de energie, piață ce ar putea atinge 0,9 miliarde de dolari până în 2028 [2].

Microsistemele de captare de energie prin materiale piezoelectrice, sau microgeneratoarele piezoelectrice de energie, pot oferi o eficiență ridicată în conversia de energie și compatibilitate pentru miniaturizare. Scopul lor este de a colecta energie mecanică, în cazul nostru cea provenită din vibrații, prin inducerea de stres în materialul piezoelectric și transformarea sa în energie electrică prin **efectul piezoelectric direct**.

1.2 Scopul tezei de doctorat

Lucrarea de față își propune dezvoltarea de noi **microgeneratoare piezoelectrice de energie (energy harvesters)** fabricate prin **tehnologii MEMS** pentru aplicații industriale, automotivă, aerospațiale și de infrastructură civilă.

Scopul temei este dezvoltarea unor tehnologii de colectare a energiei din mediul ambiant în vederea operării autonome a unor microsenzori, noduri wireless de senzori sau sisteme portabile de putere foarte joasă, în domeniul 1-100 μW . Mecanismul de generare/captare de energie este prezentat în **Fig. 1.1**.

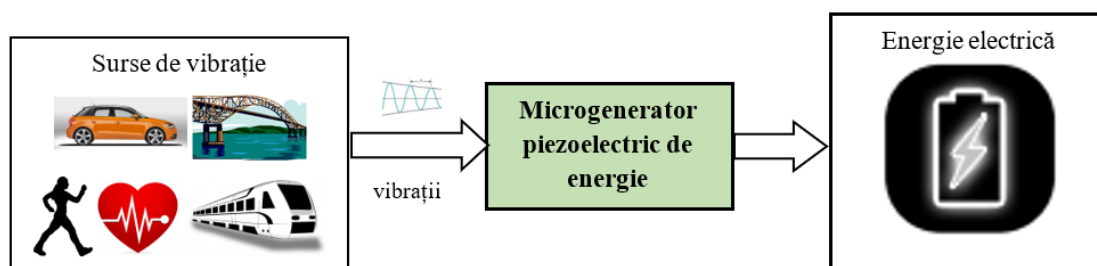


Fig. 1.1 Mecanismul de generare de energie

Ca materiale piezoelectrice, se are în vedere atât folosirea de materiale piezoelectrice nepoluante, precum oxidul de zinc (ZnO), oxid de zinc dopat, nitrura de aluminiu (AlN), nitrura de aluminiu dopată sau potasiu-sodiu-niobat (KNN), cât și folosirea de materiale pe bază de plumb, precum titanat-zircanat de plumb (PZT).

1.3 Conținutul tezei de doctorat

Lucrarea de față cuprinde 6 capitole care analizează, pe rând, pașii de proiectare, simulare și fabricare a unor microgeneratoare piezoelectrice de energie realizate cu tehnologii MEMS pentru aplicații industriale și automotive. Pe lângă aceste 6 capitole, teza cuprinde și 3 anexe care descriu structuri de testare a materialului piezoelectric precum și încercări mai puțin reușite de fabricare de microgeneratoare piezoelectrice de energie pentru aplicații aerospațiale și de infrastructură civilă.

Capitolul 1 prezintă domeniul tezei printr-o prezentare scurtă a nevoii de microsisteme de captare de energie și o sinteză a câtorva surse de vibrații mecanice. Acestea au dus la conturarea scopului lucrării.

Capitolul 2 începe printr-o sinteză a lucrărilor de specialitate în domeniul fabricării de microsisteme piezoelectrice de captare de energie, sinteză ce stă la baza concretizării unor noțiuni teoretice ce au ajutat la realizarea microgeneratorului.

În **capitolul 3** s-au proiectat și simulat diferite structuri de cantilever pentru două tipuri de aplicații, industriale și automotive, rezultând două tipuri de microgeneratoare, PZU1 și PZU2.

Capitolul 4 prezintă tehnologiile de fabricare a celor două tipuri de microgeneratoare.

În **capitolul 5** s-au testat structurile MEMS fabricate, atât în condiții de laborator, cât și în mediul real pentru cele de aplicații automotive.

Capitolul 6 sumarizează concluziile generale ale tezei și prezintă rezultatele obținute. Rezultatele originale ale autorului sunt evidențiate distinct, în corelație cu lucrările științifice publicate pe parcursul stagiului doctoral. În ultima secțiune sunt prezentate posibilităților de dezvoltare ulterioară, atât a unor procese tehnologice independente, cât și a microsistemului de colectare de energie.

Anexa 1 prezintă fabricarea structurilor de test pentru materialul piezoelectric, un pas important în fabricarea microgeneratorului, iar în **anexele 2 și 3** sunt prezentate alte microsisteme de colectare de energie proiectate, simulate și fabricate pentru aplicații aerospațiale și de infrastructură civilă. Deși microsistemele prezentate în aceste două anexe nu au putut fi testate sau rezultatele au fost mult sub așteptări, ele au reprezentat un pas didactic important în dezvoltarea microgeneratorului PZU2.

Capitolul 2

Microgeneratoare piezoelectrice de energie – considerații teoretice

2.1 Sinteza din literatura de specialitate

Principalele surse de energie din mediul înconjurător sunt: solare, eoliene, acustice, termoelectrice și vibrații mecanice, cele din urmă reprezentând interesul acestui proiect.

Scopul proiectului este realizarea în siliciu a unui microgenerator MEMS de captare a energiei provenite din vibrațiile mecanice ambientale și transformarea acesteia în energie electrică. Microgeneratoarele studiate au la baza lor, ca structură rezonatoare, o **structură mecanică de cantilver** (o bară de siliciu fixată la un capăt care are sau nu o masă inerțială în vârful acesteia) care vibrează pe o frecvență de rezonanță proprie.

În 2014, Jackson et al. evaluează trei microgeneratoare piezoelectrice MEMS de captare a energiei pentru accelerații joase. A folosit același strat piezoelectric (AlN). Pentru accelerații de 0.2-0.4g și frecvențe de rezonanță de 97-149Hz, s-au obținut densități de putere de 24-100 μ W/cm³ [3]. De asemenea, a demonstrat o mărire a domeniului de frecvență dacă se folosește o matrice de cantilever.

O variantă de microgenerator cu cantilever lat a fost prezentată de Jia et al. în 2016 [4], unde au obținut o putere de 20.47 μ W la o frecvență de 210Hz. și o accelerație de 0.27g.

Pentru realizarea microgeneratoarelor s-au implementat tehnologii de microprelucrare a siliciului.

2.2 Tehnologii de microprelucrare

Înțelegerea tehnologiilor de microprelucrare a siliciului este necesară pentru dezvoltarea și fabricarea microgeneratoarelor de energie și se împart în două mari categorii: **microprelucrarea de volum** și **microprelucrarea de suprafață**. Acestea la rândul lor sunt formate prin combinarea mai multor procese de microprelucrare.

Oxidarea termică (creștere termică) este folosită pentru a crește dioxid de siliciu amorf de înaltă calitate pe plachete de siliciu.

Depunerea chimică în stare de vapori (CVD – Chemical Vapour Deposition) se bazează pe descompunerea termică și/sau reacția compușilor gazoși și pe depunerea materialului dorit direct din faza gazoasă pe suprafața substratului.

Depunerea fizică în stare de vapori (PVD – Physical Vapour Deposition) este folosită pentru obținerea de straturi subțiri de material (de la câțiva nm la câțiva μ m).

Procesele PVD sunt tehnici de depunere în vid, cu impact scăzut asupra mediului. Cele mai utilizate tehnici PVD sunt **evaporarea și pulverizare catodica** (sputtering).

Litografia este un proces tehnologic prin care sunt formate configurații într-un polimer rezistent chimic (rezist) aplicat pe o plachetă de siliciu. În urma expunerii rezistului unei radiații, acesta își modifică compoziția (devine solubil sau insolubil în funcție de tipul rezistului).

Corodarea constă în îndepărtarea selectivă a unui material folosind fotorezist configurat ca model de corodare. Modelul poate fi corodat direct în substratul de siliciu sau într-un film subțire, ce poate fi folosit la rândul său ca mască de corodare. Corodarea poate fi umedă sau uscată.

Corodarea umedă este un proces chimic și este izotropă în materialele amorfe (SiO_2) și poate fi și anizotropă în materialele cristaline (Si). Corodarea chimică constă în următoarele faze: mișcarea reactanților chimici la suprafață, corodarea prin reacție chimică și îndepărtarea produșilor de reacție.

Corodarea uscată sau corodarea în plasmă implică generarea de reactivi chimici, neutri (F, Cl) și ioni (SF_x^+), care sunt accelerați, sub acțiunea unui câmp electric, spre un substrat țintă. Corodarea uscată izotropă are loc în plasmă de hexafluorură de sulf (SF_6) și este folosită ca alternativă la corodarea umedă. Pentru corodarea uscată anizotropă a siliciului se folosește cel mai des **procesul Bosch**. Acesta folosește pași alternativi de pasivare și corodare. Pasivarea se realizează prin depunerea unui polimer cu rol de protecție a pereților laterali.

Mecanismele de stop-corodare sunt esențiale în procesele de corodare. Acestea sunt: stoparea prin regiuni puternic dopate cu bor, stoparea electrochimică, stoparea la timp de corodare, stoparea prin straturi îngropate de oxid.

2.3 Microgenerator piezoelectric de energie

Piezoelectricitatea este proprietatea materialelor de a-și modifica starea de polarizație (de a acumula sarcina electrică) sub acțiunea unor forțe mecanice (efect piezoelectric direct) și de a se deforma sub acțiunea unor tensiuni electrice aplicate din exterior (efect piezoelectric invers).

Materialele piezoelectrice au o polarizație prestabilită, răspunzând diferit la stres în funcție de direcția undei elastice. Sunt **două moduri principale de cuplare electromecanică** pentru materialele piezoelectrice: **modul transversal** (d_{31} - unda elastică are direcția perpendiculară pe direcția câmpului electric) și **modul longitudinal** (d_{33} - câmpul electric și unda elastică au aceeași direcție).

Scopul proiectării este de a colecta energia mecanică de la o sursă de vibrație și de a obține o putere cât mai mare. Pentru acest lucru, **microgeneratorul va trebui să rezoneze pe aceeași frecvență de rezonanță cu sursa de vibrație țintită**.

Pentru structura de cantilever dreptunghiular avem următoarea expresie pentru **frecvența de rezonanță** [5]:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Y_{eq} W t^3}{4L^3 (m_i + 0.24m_c)}} \quad (2.13)$$

unde Y_{eq} este modulul lui Young echivalent al cantileverului, W , t și L sunt lățimea, grosimea și respectiv lungimea cantileverului, m_i și m_c sunt masa inerțială și respectiv masa cantileverului.

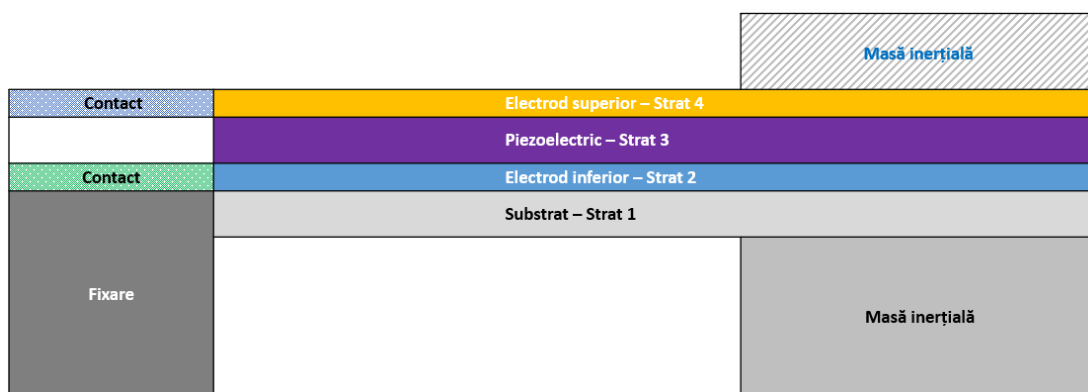
Puterea de ieșire este influențată și de **grosimea și modurile de cuplare electromecanică** a stratului piezoelectric, dar și de **morfologia** cantileverului.

Capitolul 3

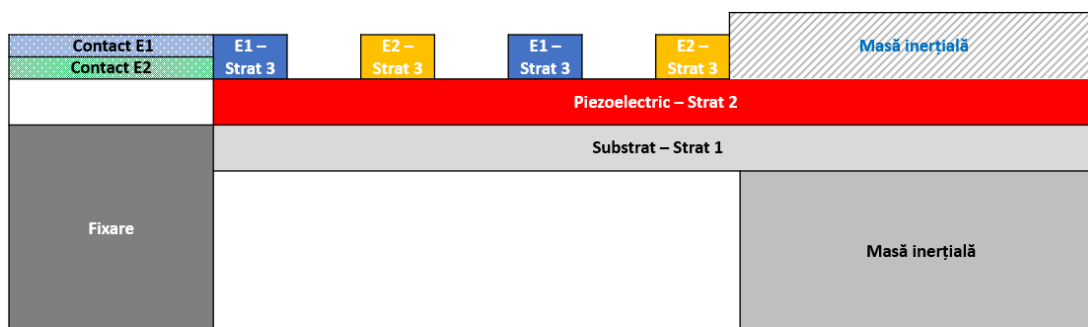
Proiectarea și simularea microgeneratoarelor piezoelectrice

3.1 Schema de principiu. Date de proiectare

Microgeneratorul piezoelectric de energie este proiectat ca structură de cantilever. Pentru proiectarea acestuia s-a ținut cont atât de procesele tehnologice pentru microprelucrarea siliciului cât și de parametrii descriși în capitolul 2. Schema de principiu din Fig. 3.1 a stat la baza acestei proiectări. Aceasta prezintă două tipuri de microgeneratoare, bazate pe structură mecanică de cantilever: unul cu electrozi planari proiectat să funcționeze în modul de cuplare transversal (Fig. 3.1a) și unul cu electrozi interdigitați pentru modul de cuplare longitudinal (Fig. 3.1b). Masa inerțială (m.i.) are ca scop reducerea frecvenței de rezonanță.



(a)



(b)

Fig. 3.1 Schema de principiu a unui microgenerator piezoelectric: (a) cu electrozi planari pentru modul de cuplare d_{31} ; (b) cu electrozi interdigitați pentru modul de cuplare d_{33}

3.2 Microgenerator piezoelectric de energie pentru aplicații industriale – PZU1

În cazul domeniului industrial, o posibilă aplicație ar fi monitorizarea diferitelor echipamente de pe o linie de producție sau din fabrici pentru o mentenanță optimizată.

Acest tip de microgenerator a făcut parte din primul proiect de cercetare. Constrângerile impuse au fost aria cipului (1 cm^2), designul nou propus (o matrice de 2×10 cantilever) și materiale nepoluante. Cu aceste constrângeri și cu valori de sute de Hz pentru echipamente industriale, am optat pentru frecvențe de rezonanță de **400-500Hz** pentru microgeneratorul piezoelectric.

Proiectarea și simularea microgeneratorului au fost prezentate și în lucrări proprii anterioare [6]. Proiectarea a avut loc după structura din **Fig. 3.1a** și cu datele de proiectare din **Tabelul 3.1**.

Tabel 3.1 Date de proiectare a microgeneratorului pentru aplicații industriale

Aria cipului	1 cm^2	Lungime cant.	$2500 \mu\text{m}$
Geometrie	Matrice de 2×10 cantilever	Lățime cant.	$300 \mu\text{m}$
Morfologie	Unimorf	Grosime cant.	$10 \mu\text{m}$
Materiale	Nepoluante	Masă inerțială (m.i.)	DA
Modulul lui Young	Proprietăți de material	Lungime m.i.	$1200 \mu\text{m}$
Densitate	Proprietăți de material	Lățime m. i.	$300 \mu\text{m}$
Frecvență de rezonanță	400-500 Hz	Grosime m.i.	$400 \mu\text{m}$
Mod de cuplare	Transversal (d_{31})		

S-au efectuat un prim rând de simulări folosind unelte software bazate pe metoda elementelor finite, *FEM (Finite Element Method)*, utilizând COMSOL Multiphysics. Frecvența de rezonanță obținută inițial a fost de 448Hz însă, după o optimizare a procesului tehnologic descris în subcapitolul 4.2, structura de cantilever s-a reproiectat. Nouă frecvență de rezonanță este de 435Hz (**Fig. 3.8**), în intervalul țintit de 400-500Hz. **Fig. 3.11** prezintă concepul microgeneratorului PZU1 cu o matrice de 20 de cantilever.

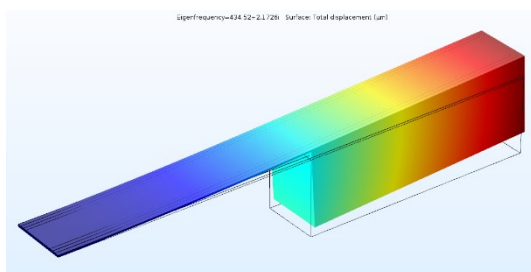


Fig. 3.8. Frecvența de rezonanță a structurii reproiectate, 435Hz

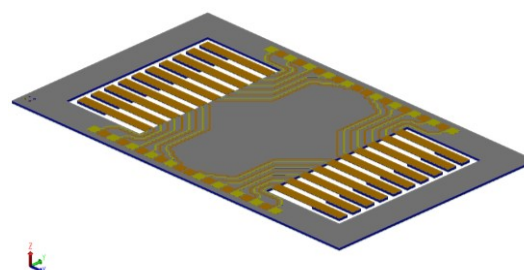


Fig. 3.11. Concepul microgeneratorului cu o matrice de 2×10 cantilever

3.3 Microgenerator piezoelectric de energie pentru aplicații automotive – PZU2

În acest caz am folosit toată experiența acumulată în dezvoltarea celorlalte microgeneratoare ce sunt descrise în **subcapitolele 3.2, 4.2, 5.2 și Anexele 2 și 3**.

Frecvența de rezonanță țintită a fost aleasă în urma unor măsurători de vibrație de către Renault Technologie Roumanie (RTR) la Centrul Tehnic Titu. Măsurătorile s-au făcut pe un autovehicul Dacia Jogger ca în exemplul din **Fig. 3.12**. În urma acestor măsurători a rezultat un spectru de frecvențe de interes, **Fig. 3.13**.

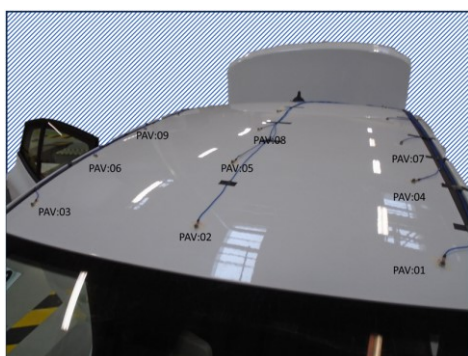


Fig. 3.12 Exemplu de montaj pentru măsurători de vibrație pe un autovehicul

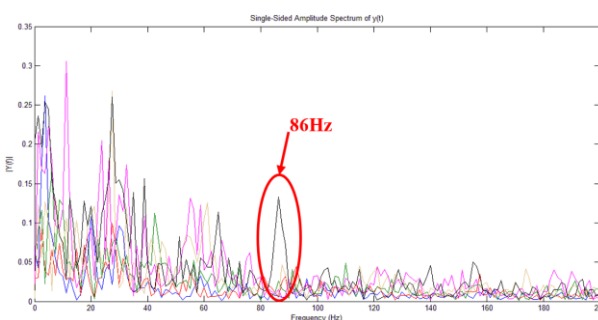


Fig. 3.13 Spectru de frecvențe rezultat în urma măsurătorilor de vibrație

Frecvența de proiectare s-a ales conform capabilităților tehnologice din IMT-București și a aplicației dorite de către RTR. Ca locație a microgeneratorului în autovehicul s-a dorit amplasarea acestuia spre partea din spate a mașinii, o locație unde ar fi costisitor de tras cabluri de alimentare. Astfel, s-a ales frecvența de proiectare de 86Hz. Datele de proiectare sunt prezentate în **Tabelul 3.4**. S-a ales PZT ca material piezoelectric deoarece oferă coeficienți piezoelectrice mai buni și posibilitatea folosirii modului de cuplare longitudinal (**Fig. 3.1b**). Conform simulărilor, primul mod de vibrație este la 87Hz (**Fig. 3.16**).

Tabel 3.4 Date de proiectare a microgeneratorului pentru aplicații automotive

Aria cipului	1 cm ²	Lungime cantilever	8800 μm
Geometria	1 Cantilever lat	Lățime cantilever	7450 μm
Morfologie	Unimorf	Grosime cantilever	20 μm
Materiale	PZT	Masă inerțială (m.i.)	DA
Modulul lui Young	Proprietăți de material	Lungime m.i.	4400 μm
Densitate	Proprietăți de material	Lățime m.i.	7450 μm
Frecvență de rezonanță	86 Hz	Grosime m.i.	510 μm
Mod de cuplare	Longitudinal (d33)		

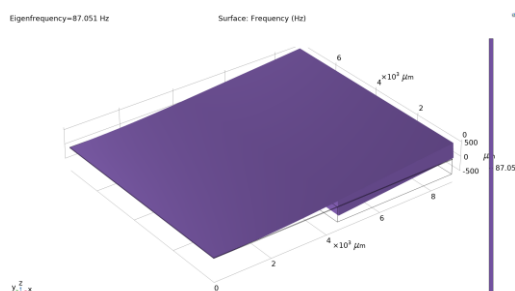


Fig. 3.16. Primul mod de vibrație, 87Hz

Capitolul 4

Tehnologia de realizare a microgeneratoarelor de energie

4.1 Considerații inițiale

În acest capitol se are în vedere conceperea procesului de fabricare a microgeneratoarelor de energie, și anume conceperea măștilor și alegerea pașilor tehnologici.

Pentru stabilirea pașilor tehnologici și conceperea măștilor, câteva aspecte sunt luate în considerare: eliberarea structurilor, microprelucrarea de volum a siliciului, modalități de stopare a corodării, manipularea cipurilor, proprietățile piezoelectrice și cum sunt acestea influențate de procesele tehnologice.

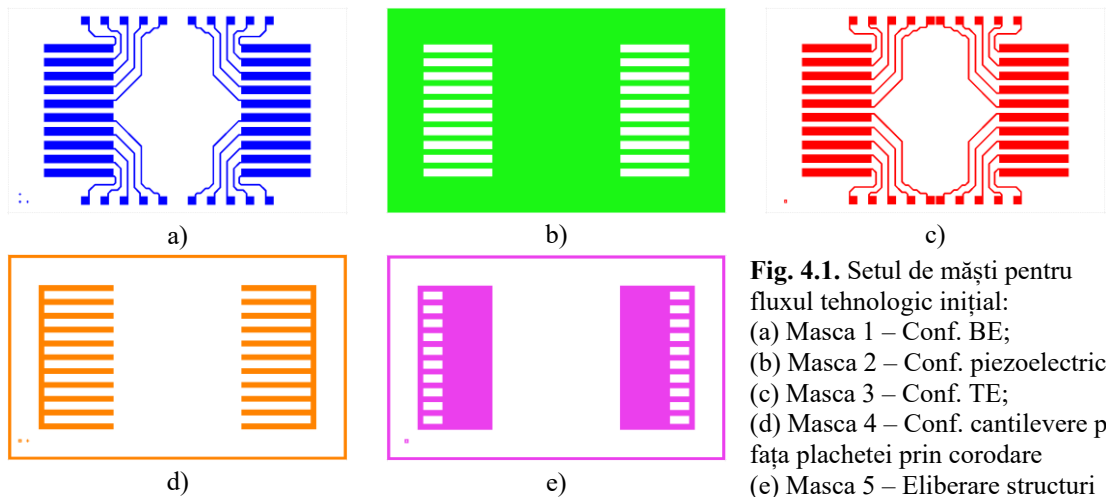
4.2 Microgenerator piezoelectric de energie pentru aplicații industriale – PZU1

Plecând de la schema din **Fig. 3.1a** și conceptul microgeneratorului din **Fig. 3.11**, am conceput măștile de fabricare și procesul tehnologic. Pentru realizarea structurilor sunt utilizate procese specifice microprelucrării de volum: corodare anizotropă, alinierea față-spate, tehnici de stop corodare.

Plachetele SOI (*Silicon on Insulator*) sunt necesare în fluxul tehnologic. Acestea sunt caracterizate prin cele 3 straturi componente: un strat de siliciu în care se conturează dispozitivul (*device = dispozitiv*), un strat îngropat de oxid cu rol de izolator (*BOX = buried oxide*) și stratul suport (*handler*). Stratul îngropat de oxid (BOX) are și rol de strat de stop-corodare în cazul nostru, oferindu-ne astfel un control mai bun asupra corodării finale.

Inițial, fluxul tehnologic pentru fabricarea microgeneratoarelor PZU1 a constat în utilizarea a 5 măști tehnologice (**Fig. 4.1**) și de plachete SOI de diametru 3". Plachetele SOI au o grosime a stratului de dispozitiv de 10 μ m, a oxidului îngropat de 0.5 μ m și a stratului suport de 400 μ m. Măștile tehnologice sunt construite cu o distanță de 200 μ m între cantileverele și au fost proiectate pentru utilizarea fotorezistului pozitiv.

Fluxul tehnologic începe cu o creștere termică de oxid de siliciu de 0.5 μ m cu rol de izolator. Peste acest strat de oxid se depune și se configurează electrodul inferior, Ti-Pt 20nm-200nm, (*BE – bottom electrode*) folosind Masca 1 (**Fig. 4.1a**) și metoda lift-off. Apoi se depune și se configurează stratul piezoelectric (Masca 2 – **Fig. 4.1b**) peste care se depune și se configurează electrodul superior, Cr-Au 20nm-200nm, (*TE – top electrode*) prin Masca 3 (**Fig. 4.1c**).



Spatele plăchetei se protejează cu fotorezist iar fața acesteia este procesată prin Masca 4 (**Fig. 4.1d**) pentru configurarea cantileverelor printr-o corodare umedă a SiO_2 și o corodare uscată DRIE (*Deep Reactive Ion Etching*) pentru cei $10\mu\text{m}$ de siliciu. Corodarea uscată constă printr-un proces Bosch iar stratul de oxid îngropat este folosit ca strat de stop-corodare.

Fața plăchetei se protejează cu fotorezist iar spatele acesteia este procesat prin Masca 5 (**Fig. 4.1e**) printr-o corodare umedă a SiO_2 și o corodare adâncă a siliciului pentru eliberarea structurilor (cca $400\mu\text{m}$).

În fabricarea inițială a microgeneratoarelor au apărut diferite **provocări tehnologice**: integrarea straturilor piezoelectrice cu tehnologiile MEMS, obținerea de straturi metalice potrivite pentru depuneri de material piezoelectric și eliberarea structurilor de cantilever.

Integrarea straturilor piezoelectrice cu tehnologiile MEMS s-a testat pe structurile de test descrise în **Anexa 1**. S-au studiat straturi de oxid de zinc (ZnO) sau ZnO dopat, straturi de KNN și straturi de AlN sau AlN dopată.

Straturile de oxid de zinc dopate cu mangan și vanadiu au fost depuse prin tehnica sol-gel însă rezultatele nu au fost compatibile cu tehnologia MEMS folosită. Straturile au fost fie prea subțiri și neuniforme în cazul ZnO dopat cu Mn (**Fig. 4.2a**) sau puternic neuniforme în cazul ZnO dopat cu V (**Fig. 4.3a**).

Folosirea unui strat de ZnO depus prin pulverizare catodică a dus la reproiectarea măștilor pentru a evita un scurtcircuit între cei doi electrozi prin supracorodarea oxidului de zinc (**Fig. 4.4b**) însă, în final, acest strat nu a avut proprietățile piezoelectrice dorite. Compatibilitatea acestui proces cu tehnologiile MEMS a dus la validarea fluxului tehnologic la IMT-București.

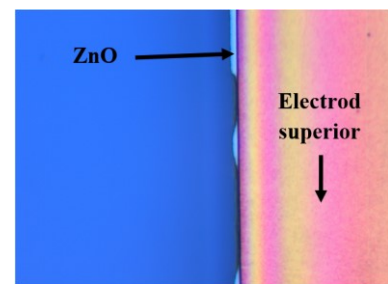
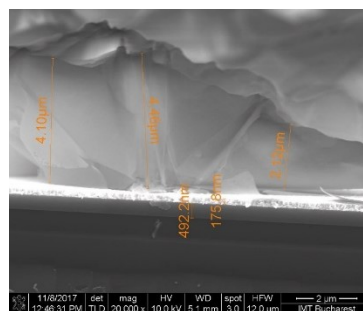
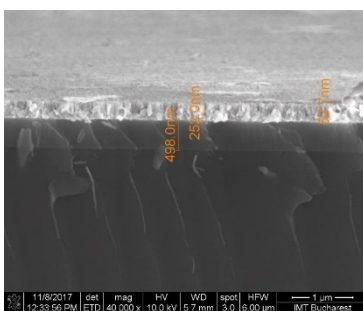


Fig. 4.2a. Probe cu ZnO dopat cu Mn – Secțiune transversală SEM

Fig. 4.3a. Probe cu ZnO dopat cu V – Secțiune transversală SEM

Fig. 4.4b. Supracorodarea ZnO și scurtcircuit între electrozi

Straturile piezoelectrice de potasiu-sodiu-niobat (KNN) au fost depuse pe straturi metalice de platină deoarece necesită tratamente termice de 700°C. Acestea au avut o aderare slabă la substrat însă acest lucru a generat un studiu pentru îmbunătățirea straturilor metalice de Pt [7]. Studiul a vizat diferite tratamente termice, cu temperaturi de 450-700°C, în diferite atmosfere, precum gaz inert (argon), aer sau gaz de formare (H₂:N₂ 1:6). S-a studiat efectul acestora asupra direcției cristalografice a platinei și asupra rezistenței per pătrat. În urma experimentelor s-a obținut o îmbunătățire a direcției cristalografice (111) pentru tratamentul în aer și gaz de formare la 500°C, însă cel în aer oferă și o scădere a celorlalte orientări (**Fig. 4.12**). Rezistența per pătrat scade cu temperatura pentru toate tratamentele, dar se obține cea mai mică valoare pentru tratamentul în aer (**Tabel 4.2**). Rezultatele acestui studiu a dus la îmbunătățiri în procesarea tehnică și a altor familii de senzori, precum cei de gaze sau biomedicali.

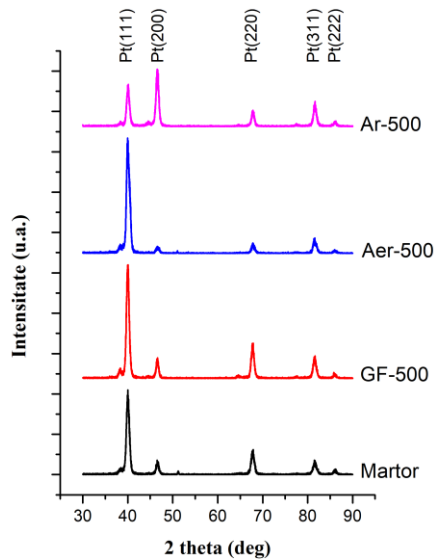


Fig. 4.12 Comparație GIXRD pentru proba martor și probe Pt/Ti tratate în argon (500°C), aer (500°C), gaz de formare (500°C), 30 de minute

Tabel 4.2. Dependența rezistenței pe pătrat de temperatura de tratare în cele trei atmosfere

Temp. [°C]	R _s [mΩ/□]		
	Ar	Aer	Gaz de formare
450	797	658.5	715
500	711.5	602	718.5
550	664.5	602	578
600	622.5	590	585
650	629	550.5	546.5
700	597	514.5	566

Provocările tehnologice legate de eliberarea structurilor de cantilevere au fost remediate prin proiectări succesive ale măștilor tehnologice. Astfel, dacă inițial structurile de cantilevere nu se eliberau (**Fig. 4.18**), prin reproiectarea măștilor tehnologice s-a ajuns la structuri complet eliberate (**Fig. 4.26**). Setul de măști final implică reproiectarea electrozilor pentru a evita apariția scurtcircuitelor (**Fig. 4.4b**), mărirea distanței dintre cantilevere de la 200μm la 300μm și includerea unor structuri de sacrificiu pe Masca 5 (**Fig. 4.27e**) pentru a uniformiza viteza de corodare din timpul corodării adânci a siliciului. Setul final este prezentat în **Fig. 4.27** iar structurile fabricate sunt arătate în **Fig. 28-29**.

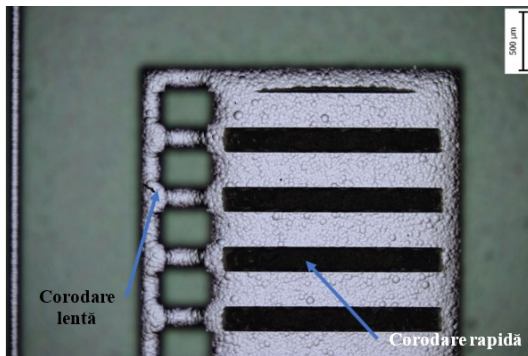


Fig. 4.18 Imagine microscop: Corodarea DRIE pe spatele plachetei, setul 1 de măști

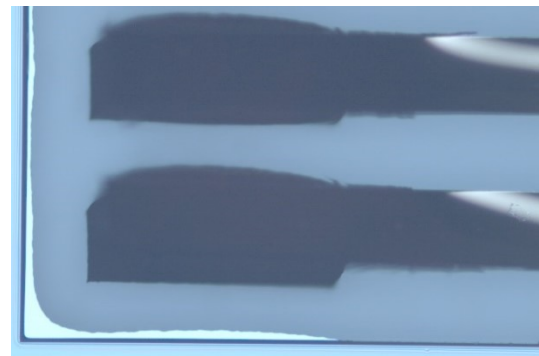


Fig. 4.26. Structuri eliberate realizate pe plachete standard de siliciu

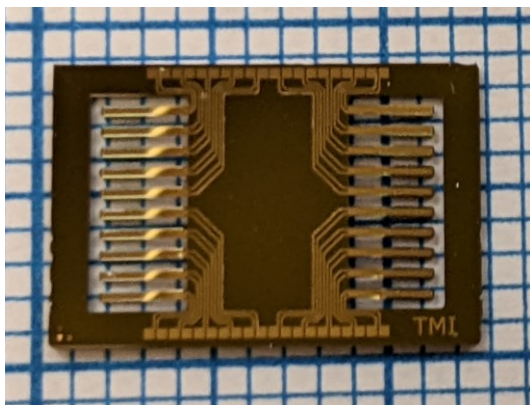
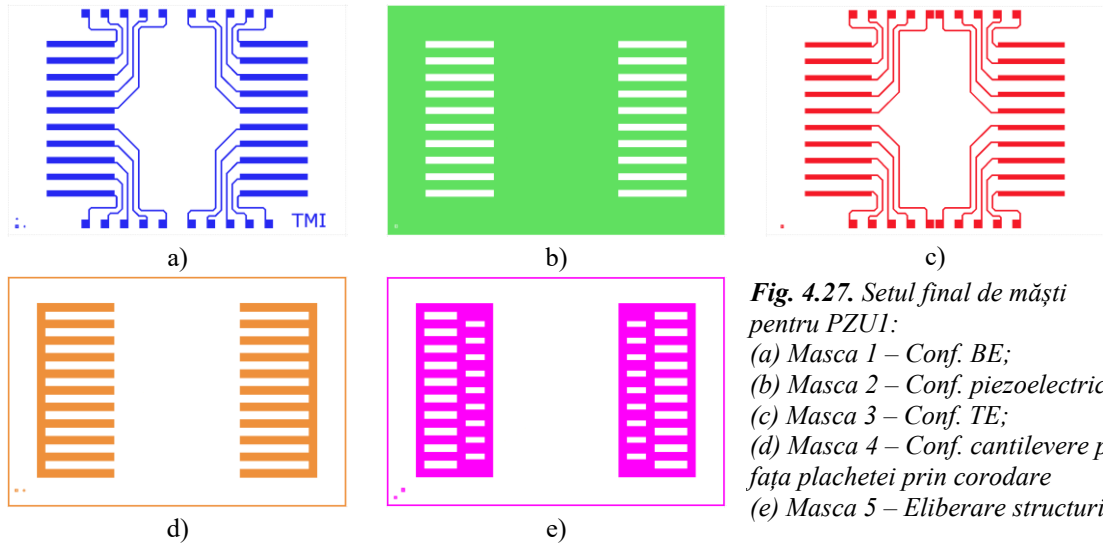


Fig. 4.28. Microgeneratorul PZU1 fabricat

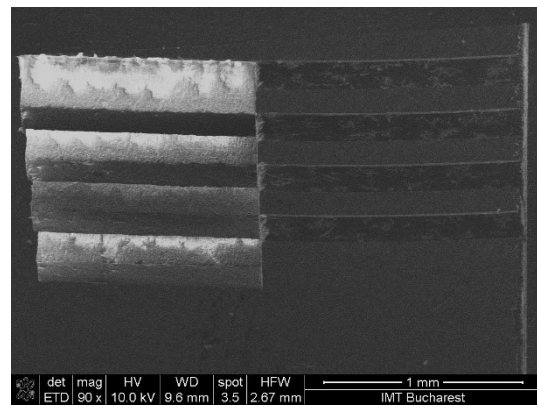


Fig. 4.29. Detaliu SEM asupra unui șir de cantileverele de pe microgeneratorul de energie

4.3 Microgenerator piezoelectric de energie pentru aplicații automotive – PZU2

În conceperea fluxului tehnologic pentru microgeneratorul PZU2, am ținut cont de rezultatele anterioare, prezentate atât în **subcapitolul 4.2** cât și în **Anexele 2 și 3**. Experiența anterioară a făcut posibilă obținerea unor structuri mult mai rapid.

Proiectarea microgeneratorului PZU2 ține cont de schema din **Fig. 3.1b** iar setul de măști este prezentat în **Fig. 4.30**. Materialul piezoelectric folosit este PZT, un material care ne oferă coeficienți piezoelectrice foarte buni și pe modul de cuplare longitudinal. Acest mod de cuplare implică folosirea electrozilor interdigitați, fapt ce simplifică semnificativ fluxul tehnologic.

Fluxul tehnologic pornește cu folosirea de plăchete SOI (strat de dispozitiv de 20μm, oxid îngropat de 1μm și strat suport de 510μm) care se oxidează termic pentru creșterea unui oxid de siliciu (0.5μm) cu rol de izolator. Peste acesta se depune un strat de însămânțare cu rol în depunerea stratului piezoelectric și totodată și izolator. Se depune și se configurează electrozii interdigitați (IDE – Cr-Au 20nm-200nm) folosind Masca 1 (**Fig. 4.30a**) după care urmează o serie de corodări prin Masca 2

(Fig. 4.30b), pe fața plachetei, pentru configurarea cantileverelor: PZT, stratul de însămânțare, oxidul termic crescut și cei 20μm de siliciu. Fața plachetei se protejează utilizând parilenă și se continuă procesarea pe spatele plachetei, prin Masca 3 (Fig. 4.30c), pentru eliberarea structurilor.

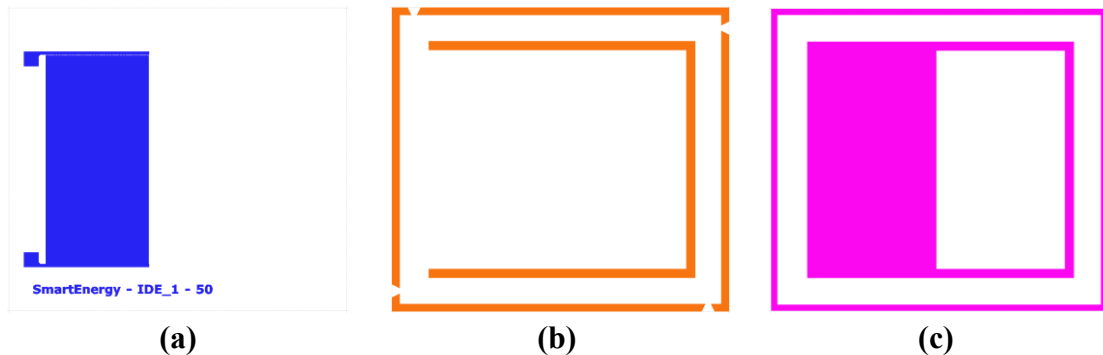


Fig. 4.30. Setul de măști pentru fabricarea microgeneratorului PZU2:
(a) Masca 1 – Configurare IDE; (b) Masca 2 – Conf. cantilever; (c) Masca 3 – Eliberare structuri;

Microgeneratorul PZU2 fabricat este prezentat în Fig. 4.31. Electrozii interdigitați au fost proiectați astfel încât să permită polarizarea stratului piezoelectric PZT în toată grosimea sa. Prin polarizarea stratului piezoelectric înțelegem aplicarea unei tensiuni continue, la o anumită temperatură și pentru un anumit timp. În urma polarizării, direcția cristalografică a stratului piezoelectric se modifică și rezultă coeficienți piezoelectrice ridicați. Pentru o polarizare optimă a **stratului piezoelectric cu o grosime de 1.1μm**, electrozii interdigitați (IDE) s-au proiectat în consecință, cu o **lățime de 4μm** și o **distanță dintre ei de 6μm**. Electrozii IDE se desfășoară pe o arie de 3540 μm × 7130μm și acoperă doar baza cantileverului, acolo unde forța asupra stratului piezoelectric este maximă. În procesul de polarizare s-a aplicat o tensiune continuă, între 30V și 80V, timp de 15 minute la o temperatură de 150°C (pe o plită electrică). Cel mai bun rezultat l-a avut tratamentul la tensiunea de 80V (Fig. 4.35).

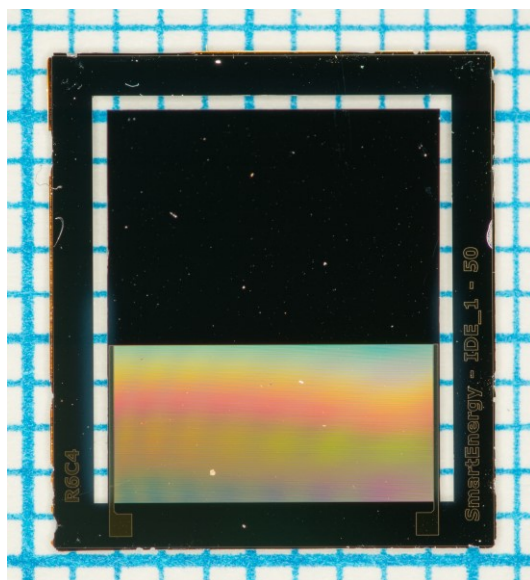


Fig. 4.31. Microgeneratorul PZU2 fabricat

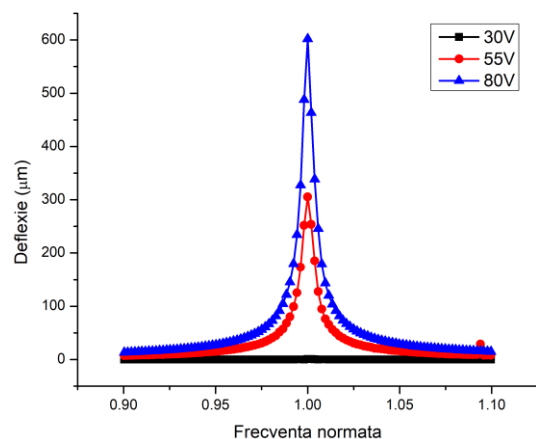


Fig. 4.35. Răspunsul microgeneratorului la diferite tensiuni de polarizare: 30V, 55V, 80V

Capitolul 5

Testarea experimentală a microgeneratoarelor

5.1 Montajul experimental și modulul electronic

Pentru testarea experimentală a microgeneratoarelor s-au creat două montaje experimentale de măsură, unul pentru fiecare microgenerator. Ambele au în componența lor un generator de funcții, un amplificator, un excitator de vibrații pe care se plasează dispozitivul de test (DUT) împreună cu un accelerometru pentru controlul vibrațiilor iar semnalul este măsurat pe un osciloscop (sondă 10M Ω , 8pF). O formă inițială pentru un astfel de montaj este prezentată în **Fig. 5.2**. Acesta a fost folosit în testarea microgeneratoarelor PZU1 și folosește un amplificator și difuzor audio pentru excitație, componente alese pentru reproducerea fidelă de frecvențe de 400-500Hz. Montajul experimental din **Fig. 5.3** a fost folosit pentru testarea microgeneratoarelor PZU2, având în componența sa un amplificator și excitator de vibrații cu o gamă mult mai largă de lucru, potrivite pentru frecvențe de 80-100Hz.

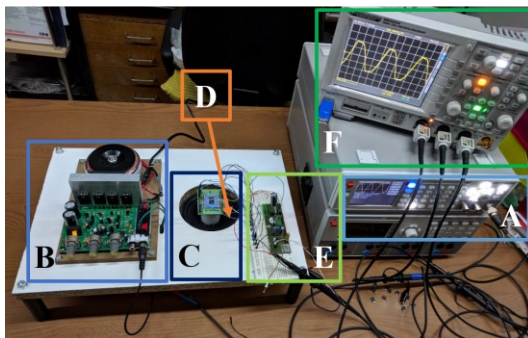


Fig. 5.2. Montajul experimental de testare a microsistemelor pentru aplicații industriale:
 A – generator funcții; B – amplificator;
 C – excit. de vibrații; D – DUT cu accelerometru;
 E – modul electronic; F – osciloscop

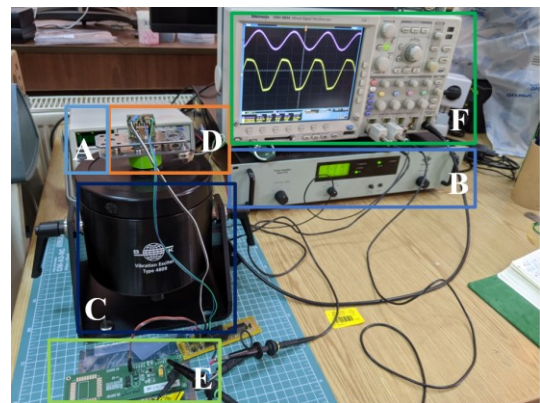


Fig. 5.3. Montajul experimental de testare a microsistemelor pentru aplicații automotive:
 A – generator funcții; B – amplificator;
 C – excit. de vibrații; D – DUT cu accelerometru;
 E – modul electronic; F – osciloscop

Scopul microgeneratoarelor de energie este de a le folosi în alimentarea unor senzori sau sisteme. În acest scop este necesară utilizarea unui modul electronic pentru a obține o tensiune utilizabilă, stabilizată. În realizarea modului electronic am optat pentru o variantă comercială prin folosirea circuitului integrat LTC3588-1. Acesta integrează o punte dublă-redresoare cu pierderi mici împreună cu un convertor Buck, eficient și optimizat pentru aplicații de putere foarte joasă.

S-a avut în vedere folosirea a două variante pentru modulul electronic: varianta A care oferă posibilitatea alegerii tensiunii stabilizate dorite (1.8V, 2.5V, 3.3V sau

3.6V) și varianta B, o variantă mai compactă care poate oferi doar 1.8V. În final s-a optat pentru folosirea variantei A (**Fig. 5.4**). Microgeneratorul de energie (PZ_eq) este conectat la pinii PZ1 și PZ2 ce reprezintă intrarea pe puntea dublă-redresoare. Energia dată de microgenerator este astfel redresată și înmagazinată pe capacitorul de intrare C_{in} . Atunci când tensiunea pe acest capacitor atinge o tensiune de prag de 4.06V, energia înmagazinată pe acesta este transferată prin convertorul Buck pe capacitorul de ieșire, C_{out} . Ciclul se repetă până când tensiunea de ieșire, V_{out} , atinge valoarea stabilizată aleasă. Această condiție este îndeplinită atunci cand semnalul P_{good} are valoarea "1" logic.

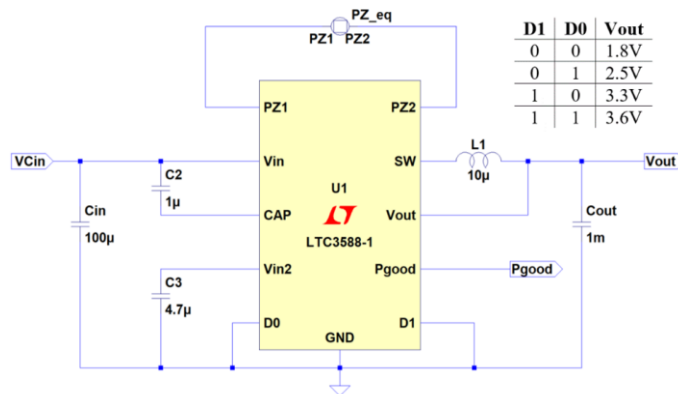


Fig. 5.4. Circuit de redresare, stabilizare și stocare a energiei provenite de la microgeneratorul piezoelectric – varianta A

5.2 Testarea microgeneratorului piezoelectric de energie pentru aplicații industriale – PZU1

Dat fiind design-ul microgeneratorului (20 de cantilever grupate pe două rânduri), un pas important în dezvoltarea sa a fost măsurarea vibrației cantileverelor la ITE-Polonia cu ajutorul unui interferometru Doppler, MSA-500 de la Polytec (Irvine, CA, USA) – **Fig. 5.9**. În urma unor astfel de măsurători am obținut frecvența de rezonanță, factorul de calitate și faza pentru fiecare cantilever în parte.

Măsurătorile au fost posibile prin încapsularea structurii într-o capsulă ceramică realizată de către HIPOT-RR (Otocec, Slovenia) și prin fixarea acesteia pe un cablaj de test pentru a avea acces cu ușurință la padurile cantileverelor (**Fig. 5.10**). Cantileverele au fost împărțite în cadrane și rezultatele măsurătorilor sunt date în **Tabelul 5.1**, tabel reprodus integral din lucrarea proprie [8].

Tabel 5.1. Rezultatele măsurătorilor cu interferometrul Doppler

Cadrant	Cantilever														
	1			2			3			4			5		
	f [Hz]	Q	ϕ [°]	f [Hz]	Q	ϕ [°]	f [Hz]	Q	ϕ [°]	f [Hz]	Q	ϕ [°]	f [Hz]	Q	ϕ [°]
1	465.4	1751	-	465.3	2028	19.34	464.8	1909	32.47	465.3	1854	19.21	456.2	1824	23.12
2	462.2	1383	19.33	464.6	1423	23.01	468.3	2397	21.56	468	1357	27.7	463.4	2069	32.46
3	462.3	1782	21.48	475.2	930	N/A	482.2	820	44.1	463.6	1865	72.48	463.7	1735	N/A
4	464.2	N/A	-4.8	476.1	1915	18.41	464.1	1600	20.89	464	1634	19.51	461.7	1790	N/A

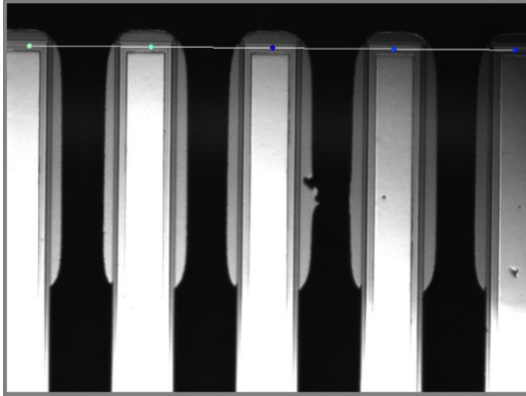


Fig. 5.9. Măsurarea frecvențelor de rezonanță a cantileverelor cu un interferometru Doppler

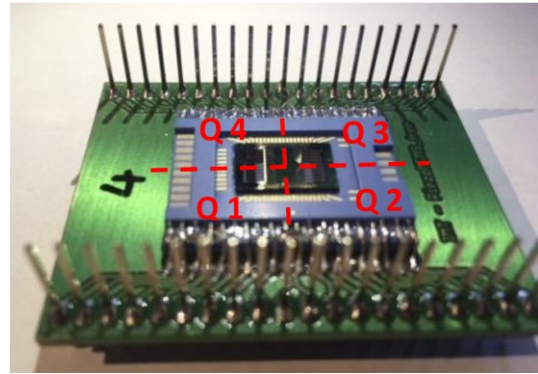


Fig. 5.10. Împartirea cantileverelor în cadrane

Se observă că frecvențele de rezonanță rezultate sunt în intervalul dorit, de 400-500Hz. Variația frecvențelor cantileverelor este într-un interval de 26Hz. Factorul mare de calitate face ca această variație să fie semnificativă. Se observă și o diferență de fază între cantilevere, fapt ce influențează foarte mult performanțele electrice ale microgeneratorului.

Diferențele de fază împiedică gruparea tuturor celor 20 de cantilevere astfel încât rezultatul să fie mai bun decât al unui singur. O soluție ar fi să grupăm doar o parte dintre cantilevere, cu faze apropiate. În acest scop am localizat 10 cantilevere în **Tabelul 5.1** cu faze cuprinse între 18 și 23°. Modalitățile de grupare ale celor 10 cantilevere au fost aprofundate în lucrarea prezentată la conferința CAS 2018 [9], concluzia fiind gruparea celor 10 cantilevere în 2 ramuri în serie cu 5 cantilevere în paralel fiecare (gruparea denumită *5p2s*).

În **Fig. 5.14** este evidențiat avantajul grupării mai multor cantilevere. Semnalul generat de gruparea *5p2s* este semnificativ mai mare decât semnalul generat individual de cantileverele componente. Măsurătorile au fost efectuate la o accelerație de 1g. De altfel, gruparea *5p2s* culege energie de pe o bandă de frecvențe mai mare decât a unui singur cantilever.

În continuare voi analiza doar gruparea *5p2s* testată la **frecvența sa de rezonanță de 465.2Hz**. În **Figura 5.15** este prezentat răspunsul grupării, prin amplitudinea vârf-la-vârf, la creșterea accelerației de excitare. La 0.8g și 1.7g se observă o creștere mai accentuată a răspunsului microgeneratorului. O posibilă explicație pentru acest lucru este o mai bună colaborare între cantileverele componente ale grupării. Experimental s-a observat o variație mică a frecvenței de rezonanță (de +/- 1Hz) cu creșterea accelerației.

Fig. 5.16 și 5.17 detaliează răspunsul grupării la variația rezistenței de sarcină precum și puterea electrică generată. Axa rezistenței de sarcină este reprezentată în scară logaritmică.

La frecvența de rezonanță de 465.2Hz și o accelerație de 1g, **puterea maximă obținută a fost de 2.53μW** pentru o **rezistență de sarcină optimă de 1MΩ**. **Densitate de putere rezultată este de 60.2nW/mm³**.

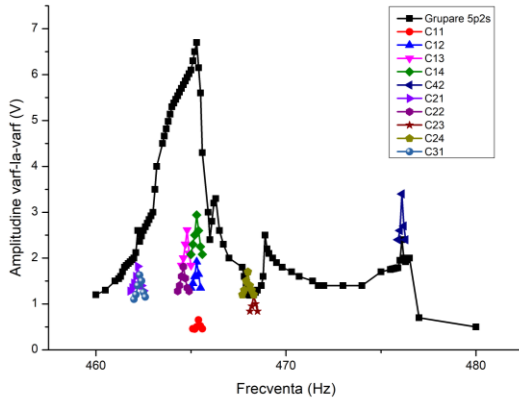


Fig. 5.14. Gruparea 5p2s în raport cu cantileverele componente – accelerație de 1g

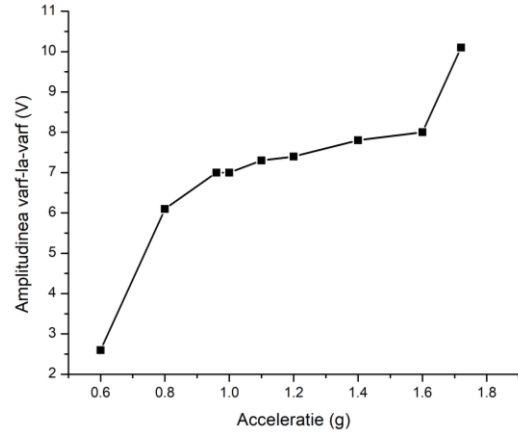


Fig. 5.15. Amplitudinea vârf-la-vârf a grupării 5p2s cu variația accelerației

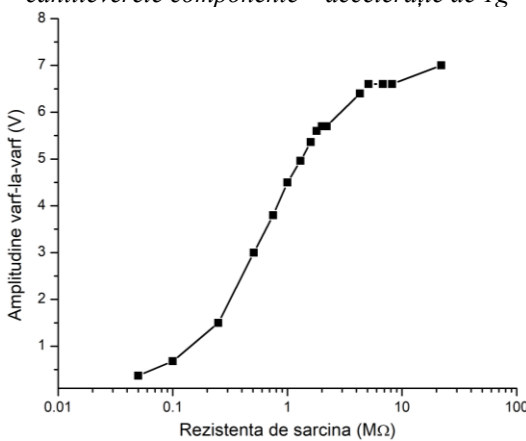


Fig. 5.16. Amplitudinea vârf-la-vârf a grupării 5p2s cu variația rezistenței de sarcină

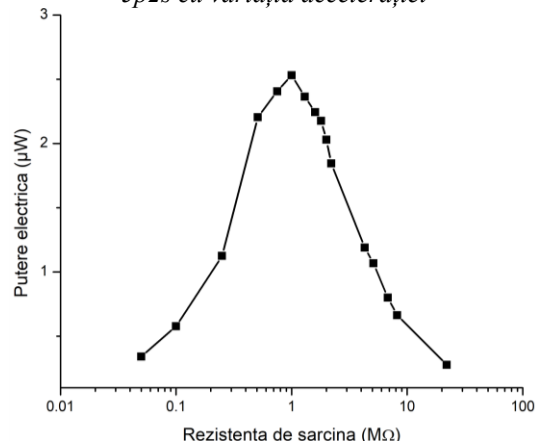


Fig. 5.17. Puterea electrică a grupării 5p2s cu variația rezistenței de sarcină

Pentru o **accelerație** de aproximativ **2g**, circuitul ajunge la stabilizare oferind o **tensiune de ieșire de 1.8V** (Fig. 5.20-5.21), măsurată la pinul V_{out} din circuitul din Fig. 5.4. Valori mai mari ai acestor condensatori se traduc printr-un timp mai lung de încărcare și stabilizare dar permit conectarea sistemului în sarcină un timp mai îndelungat (câteva secunde).

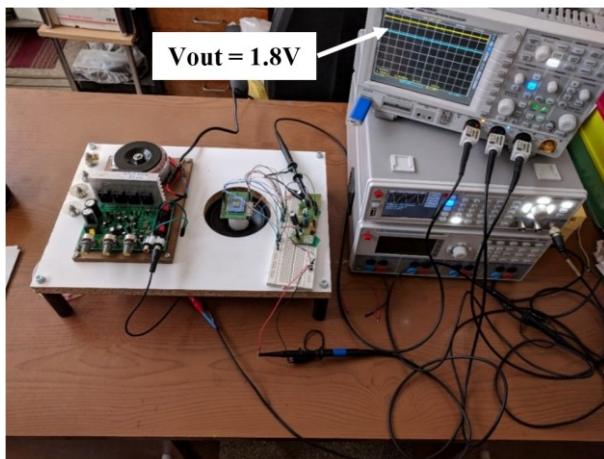


Fig. 5.21. Funcționalitatea circuitului LTC3588-1 cu microgeneratorul PZU1; Pe osciloscop: $V_{out} = 1.8V$ (montaj experimental)

Rezultatele prezentate în acest subcapitol au fost publicate în lucrarea “Piezoelectric MEMS Energy Harvester for Low-Power Applications”, Electronics 2024, 13(11), 2087; <https://doi.org/10.3390/electronics13112087> [8].

5.3 Microgenerator piezoelectric de energie pentru aplicații automotive – PZU2

În acest caz am optat pentru montarea microgeneratorului direct pe un PCB (*Printed Circuit Board – cablaj imprimat*) special proiectat în acest sens, fără o capsulă ceramică – **Fig. 5.23**. Pe această structură se pot monta unul sau doua microgeneratoare. Conectarea unui al doilea microgenerator poate aduce un câștig în tensiune sau curent, dacă este necesar. Structurile MEMS s-au testat pe montajul experimental din **Fig. 5.3**.

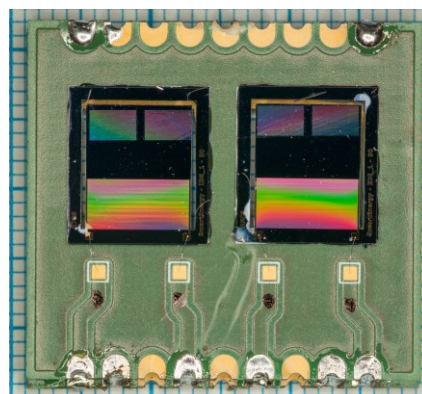


Fig. 5.23. Microgeneratorul de energie PZU2 montat pe PCB

Deoarece scopul acestui microgenerator este pentru aplicații automotive, testarea a avut loc la accelerații mai mici, între 0.2g și 0.6g și s-a testat un singur cip/cantilever o dată, negrupat cu altele.

În **Fig. 5.25** este prezentat răspunsul microgeneratorului în jurul frecvenței de rezonanță, la o accelerație de 0.2g. Frecvența de rezonanță obținută a fost de 86Hz, conform specificațiilor cerute.

În **Fig. 5.26** este prezentat răspunsul microgeneratorului la variația accelerației. Comparativ cu microgeneratorul prezentat în subcapitolul 5.2, aceasta variație este liniară, fiind conectat singur.

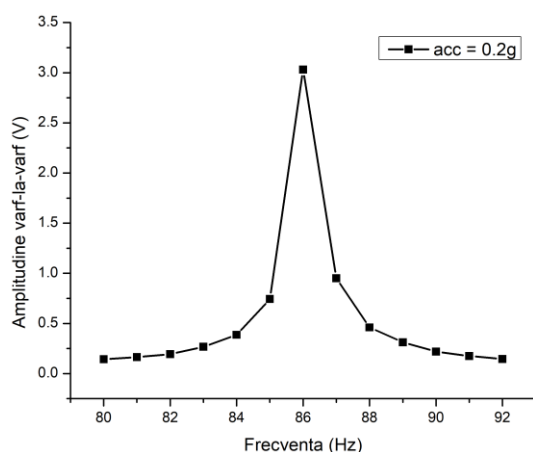


Fig. 5.25. Răspunsul microgeneratorului în jurul frecvenței de rezonanță

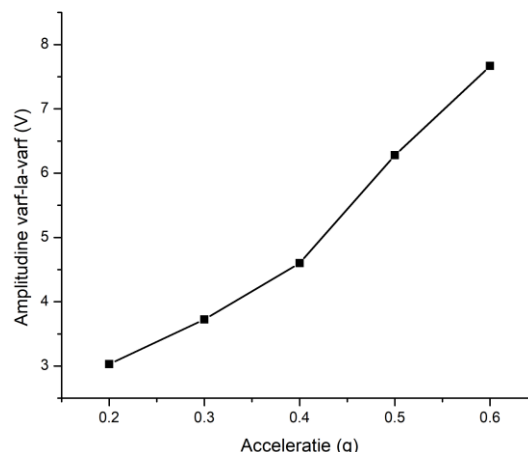


Fig. 5.26. Răspunsul microgeneratorului la variația accelerației de excitație

Variația tensiunii vârf-la-vârf cu rezistența de sarcină este reprezentată în **Fig. 5.27** iar calculul de putere este reprezentat în **Fig. 5.28**. Am testat la accelerații joase, asemănătoare cu cele întâlnite pe autovehicul. Axa orizontală este reprezentată în scară logaritmică.

La frecvența de rezonanță de 86Hz și o accelerație de 0.4g, **puterea electrică maximă este de 2.28μW pentru o rezistență de sarcină optimă de 250kΩ**. Densitatea de putere este de 69.5nW/mm³.

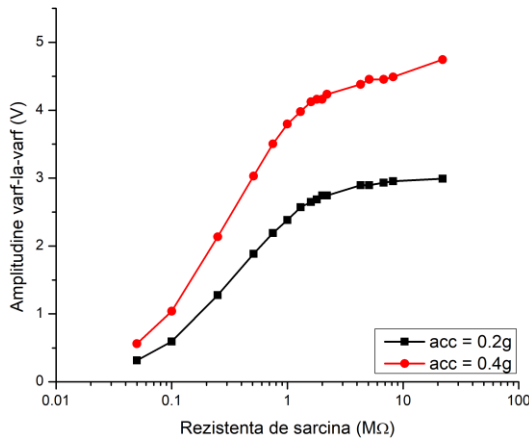


Fig. 5.27. Variația tensiunii vârf-la-vârf cu rezistența de sarcină

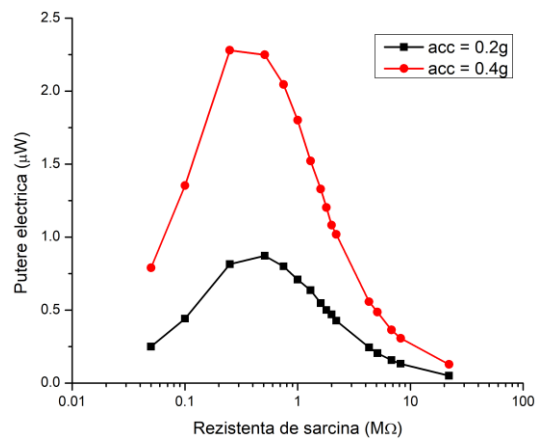


Fig. 5.28. Variația puterii electrice generate cu rezistența de sarcină

Și în acest caz a fost posibil obținerea unei tensiuni stabilizate în condiții speciale de laborator. S-au conectat 5 microgeneratoare PZU2 în paralel și s-a mărit treptat accelerația semnalului de excitație până la 2.5g. S-a obținut o tensiune de ieșire stabilizată de 2.5V folosind circuitul din Fig. 5.4 și înlocuind capacitorul de ieșire C_{out} cu un supercapacitor în capsulă CR2032 fabricat de Swistor SA (Laussane, Elveția). Stabilizarea s-a obținut în aproximativ 12 minute (Fig 5.30).

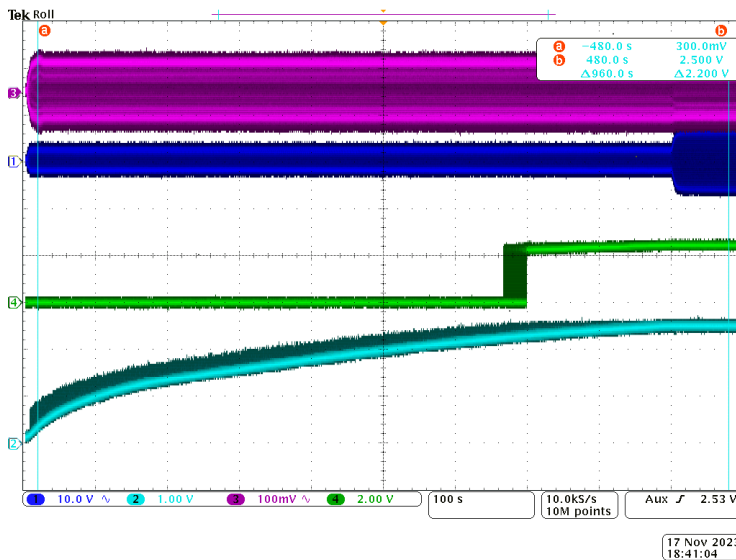


Fig. 5.30. Obținerea unei tensiuni de stabilizare de 2.5V în condiții de laborator:

1. magenta – accelerometru
2. albastru – 5× PZU2 în paralel
3. verde – semnal PGOOD
4. cyan – tensiunea pe supercap./ ieșirea circuitului

În acest caz a fost posibilă testarea în mediul real al microgeneratoarelor PZU2, pe un autoturism Dacia Jogger la Centrul Tehnic Titu, Renault Technologie Roumanie (București, România).

S-au testat 3 scenarii: **scenariul 1** (pornire de pe loc și viteze de 50km/h și 70km/h), **scenariul 2** (pornire de pe loc și viteze de 70km/h și 120km/h) și **scenariul 3** (pornire de pe loc, accelerare la 50km/h, oprire și repetare de 3 ori).

Două tipuri de microgeneratoare au fost testate în aceleași condiții: microgeneratoarele fabricate PZU2 și cele comerciale (MIDE PPA 1021) de la Mide Technology (Woburn, MA, USA). Frecvența de rezonanță a celor comerciale a fost setată la 86Hz. Rezultatele sunt prezentate în **Tabelul 5.2**.

Ca densitate de putere am obținut rezultate similare cu microgeneratoarele comerciale. Cele mai bune rezultate au fost pentru scenariul 2 (Fig. 5.32) unde am obținut o densitate de putere de 46.10nW/mm³. Accelerațiile măsurate au fost de sub

0.5g. În Fig. 5.34 sunt prezentate cele două tipuri de microgeneratoare, ca o comparație între dimensiunile lor.

Rezultatele au fost diseminate și la conferința EpoSS Anual Forum [10].

Tabel 5.2. Măsurători în mediul real pentru microgeneratorul PZU2

Scenariu	Microgenerator	Frecvența de rezonanță (Hz)	Dimensiune (L × W × t mm ³)	Putere electrică (μW)	Densitate de putere (nW/mm ³)
1	MIDE PPA 1021	86	54 × 10.3 × 8.1	104.63	23.22
	PZU2	86	8.8 × 7.45 × 0.5	0.67	20.39
2	MIDE PPA 1021	86	54 × 10.3 × 8.1	225.16	49.98
	PZU2	86	8.8 × 7.45 × 0.5	1.51	46.10
3	MIDE PPA 1021	86	54 × 10.3 × 8.1	97.91	21.73
	PZU2	86	8.8 × 7.45 × 0.5	0.66	20.12

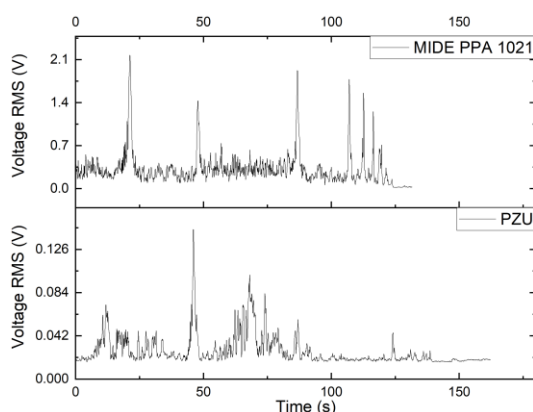


Fig. 5.32. Măsurători în mediul real – Scenariul 2

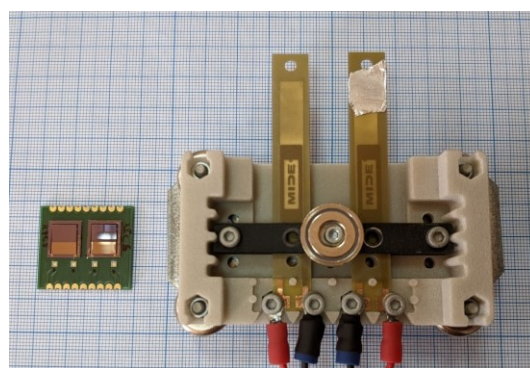


Fig. 5.34. Comparație între cele două microgeneratoare, PZU2 (stânga) și MIDE PPA 1021 (dreapta)

5.4 Compararea cu microgeneratoare similare

Pentru a uniformiza aceste diferențe se folosește densitatea de putere normată la pătratul accelerației pentru comparație. În calculul densității de putere normate la pătratul accelerației am luat în considerare doar volumul rezonatorului (împreună cu spațiile dintre cantileverele acolo unde a fost cazul). Rezultatele sunt date în **Tabelul 5.3**, tabel reprodus parțial din referința [8].

Tabel 5.3. Compararea diferitelor microgeneratoare de energie - selecție

Microgenerator	Material	Dimensiuni (mm ³)	Frecvență de rez. (Hz)	Accelerație (g)	Putere _{max} (μW)	Densitate de putere (μW · mm ⁻³ · g ⁻²)
PZU1	ScAlN	2 × (2.5 × 5.7 × 0.412)	465.3	1	2.53	0.215
PZU2	PZT	8.8 × 7.45 × 0.5	86	0.4	2.28	0.434
Liu et al. [11]	ScAlN/AlN	4.02 × 4 × 0.551	1357.5	1	1.7	0.192
He et al. [12]	AlN	13 × 14 × 0.402	160.6	1	54.1	0.74
Zhao et al. [13]	AlN	11 × 12.12 × 0.502	230.4	1	3.249	0.048
Jackson et al. Narrow [3]	AlN	7.5 × 1 × 0.562	97	0.4	0.38	0.56

Capitolul 6

Concluzii

Lucrarea a abordat posibile aplicații ale microgeneratoarelor piezoelectrice de energie și au fost proiectate și simulate mai multe astfel de structuri cu ajutorul tehnicilor generale de modelare-simulare bazate pe metoda elementelor finite (FEM – Finite Element Method).

Astfel, au fost proiectate, fabricate și testate două soluții pentru două aplicații, una pentru domeniul industrial și una pentru domeniul automotive. Structurile pentru aplicații industriale au fost testate doar la nivel de laborator însă cele pentru aplicații automotive au fost testate și în mediul real.

Microsistemele piezoelectrice de captare de energie pot reprezenta soluții viabile ca sursă alternativă de alimentare în anumite condiții. Aceste condiții sunt definite de vibrațiile existente în mediu pentru o anumită aplicație, vibrații ce se caracterizează prin magnitudinea (acelerația) și frecvențele lor.

6.1 Rezultate obținute

Toate rezultatele prezentate în această lucrare au reprezentat câte un pas în atingerea scopului final, acela de a dezvolta microsisteme capabile să colecteze energie din vibrațiile din mediul ambiant în vederea alimentării unor sisteme pentru aplicații industriale și de automotive.

Capitolul 1 definește domeniul tezei printr-o prezentare scurtă a nevoii de microsisteme de captare de energie, ceea ce a dus la conturarea scopului și motivația pentru aceste cercetări.

Capitolul 2 prezintă studiul literaturii de specialitate în domeniul fabricării de microsisteme piezoelectrice de captare de energie și considerațiile teoretice necesare proiectării și fabricării acestora. Considerațiile teoretice constau în tehnologiile de microprelucrare a siliciului, în mecanica structurii de cantilever și proprietățile materialelor piezoelectrice.

Capitolul 3 este dedicat proiectării și simulării microgeneratoarelor de energie. Proiectarea s-a făcut pe baza noțiunilor prezentate în capitolul anterior iar simulările au fost realizate prin metoda elementelor finite (FEM). Au fost proiectate și simulate două tipuri de structuri: una pentru aplicații industriale cu frecvențe de rezonanță cuprinse între 400 și 500Hz și accelerații de peste 1g (microgeneratorul PZU1) și o a doua pentru aplicații automotive cu frecvențe de rezonanță de sub 100Hz și accelerații de sub 0.5g (microgeneratorul PZU2). Proiectarea PZU2 a fost posibilă direct pe o frecvență de interes de 86Hz datorită datelor de la Renault Technologie Roumanie (RTR), frecvență aleasă conform capabilităților tehnologice.

În *capitolul 4* s-a proiectat fluxul tehnologic pentru fiecare structură, setul de măști asociat cu acesta și au fost fabricate microgeneratoarele de energie. Astfel, s-au

obținut: 2 seturi de măști (1 set de 5 măști pentru microgeneratorul de energie pentru aplicații industriale (PZU1) și 1 set de 3 măști pentru cel de aplicații automotiv (PZU2)), structuri PZU1 cu câte 20 de cantileverele înguste pe cip, structuri PZU2 cu câte 1 cantilever lat pe cip, 1 tehnologie de fabricație a microgeneratoarelor de energie pentru aplicații industriale, 1 tehnologie de fabricație a microgeneratoarelor de energie pentru aplicații automotiv și 1 tehnologie de tratare a straturilor de platină în funcție de aplicația vizată

În *capitolul 5* au fost testate structurile fabricate la capitolul anterior.

Pentru structurile **PZU1** s-au putut conecta doar 10 cantileverele din 20, grupate în două ramuri conectate în serie cu 5 cantileverele conectate în paralel fiecare. În condiții de laborator, s-a obținut o **putere electrică de $2.53\mu\text{W}$** la o **frecvență de 465.3Hz** și **acclerație de 1g** . Materialul piezoelectric folosit a fost **AlN dopat cu $12\% \text{Sc}$** . La accelerații mai mari (2g) s-a obținut o **tensiune stabilizată de 1.8V** atunci când s-a conectat la un modul electronic bazat pe circuitul integrat LTC3588-1.

Pentru microgeneratorul **PZU2** s-a obținut, în condiții de laborator, o **putere electrică de $2.28\mu\text{W}$** la o **frecvență de 86Hz** și o **acclerație de 0.4g** . În acest caz materialul piezoelectric folosit a fost **PZT**. La accelerații mai mari (2.5g) s-a obținut o **tensiune stabilizată de 2.5V** atunci când s-a conectat la un modul electronic bazat pe circuitul integrat LTC3588-1. Pentru microgeneratorul **PZU2** au fost posibile măsurători în mediul real, pe un autoturism Dacia Jogger la Centrul Tehnic Titu – RTR. Structurile au fost testate pentru 3 scenarii și s-au obținut rezultate similare cu un microgenerator comercial, MIDE PPA 1021, din punct de vedere al densității de putere.

Capitolul 6 conține prezentarea concluziilor rezultate din aspectele teoretice și practice ale cercetării. De altfel, sintetizează rezultatele și contribuțiile originale, precum și opțiunile de dezvoltare ulterioară.

Lucrarea se încheie cu 3 anexe care prezintă încercările mai puțin reușite din cadrul tezei de doctorat.

6.2 Contribuții originale

Rezultatele prezentate pe parcursul acestei lucrări se bazează pe contribuții originale ale autorului, confirmate în cadrul unor publicații științifice cotate ISI, articole, lucrări prezentate la conferințe științifice sau prin brevete de invenție. Acestea sunt enumerate în continuare; la fiecare contribuție se precizează și lucrarea unde a fost prezentată, conform listei din subcapitolul 6.3.

1. *Sinteze din literatura de specialitate privind:*

- Principalele tipuri de microgeneratoare piezoelectrice de energie pentru aplicații biomedicale sau de mediu [1]
- Materiale uzuale folosite la fabricarea microgeneratoarelor piezoelectrice de energie
- Tehnici de simulare/modelare prin metoda elementelor finite (FEA)

2. *Proiectarea setului de măști pentru fabricarea microgeneratoarelor piezoelectrice de energie:*
 - Microgenerator piezoelectric de energie pentru aplicații industriale – microprelucrare de suprafață și de volum utilizând setul de 5 măști și plachete de tip SOI (Silicon on Insulator) [1, 9, 10, 11, 13]
 - Microgenerator piezoelectric pentru aplicații automotivă – microprelucrare de suprafață și de volum utilizând setul de 3 măști și plachete de tip SOI
3. *Dezvoltarea de noi tehnologii pentru fabricarea microgeneratoarelor piezoelectrice de energie* [1, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 17]
4. *Studierea și optimizarea procesului de corodare DRIE pentru eliberarea structurilor de microgeneratoare cu efect în îmbunătățirea procesului MEMS*
5. *Caracterizarea și testarea microgeneratoarelor piezoelectrice de energie* [1, 8, 9, 10, 11, 12, 13]
 - Caracterizarea și testarea în condiții de laborator a microgeneratorului pentru aplicații industriale și a microgeneratorului pentru aplicații automotivă
 - Testarea în condiții reale (pe automobile Dacia Jogger la Centrul Tehnic Titu) a microgeneratorului pentru aplicații automotivă

În paralel la activitatea de proiectare, fabricare, caracterizare și testare a microgeneratoarelor, au fost aduse contribuții notabile în stabilirea tehnologiei de fabricație pentru mai multe familii de senzori:

- senzori piezoelectrice [10, 17]
- senzori de gaze [10, 3, 6, 7, 14, 15]
- senzori de pesticide/insecticide [10, 4]
- senzori de aplicații biomedicale [10, 2, 5, 16]

Experiența acumulată în stabilirea tehnologiilor pentru senzori a fost de real folos în optimizarea pașilor tehnologici necesari procesului de fabricație a microgeneratoarelor.

6.3 Lista lucrărilor originale

Activitatea de cercetare din această teză a fost încadrată în **5 proiecte de cercetare** desfășurate la IMT-București: PiezoMEMS (2015-2018 M-era.Net, UEFISCDI contract nr. 12/2015), PiezoHARV (2017-2019 proiect STAR 2016, contract nr. 164/2017), SENSIS 4 (2018-2021 proiect COMPLEX PN-III-P1-1.2-PCCDI-2017-0419, contract nr. 71 PCCDI/2018), SmartEnergy (2021-2024 M-era.Net, UEFISCDI contract nr. 240/2021) și NET4Air (2023-2025 HORIZON-WIDERA-2021-ACCESS-03, Comisia Europeană contract 101079455).

Lucrările originale au fost concretizate în **7 articole publicate în reviste cotate ISI** (1 articol ca prim-autor (Q3) și co-autor la 6 articole (2 Q1, 3 Q2 și 1 Q3)), **7 articole publicate în proceeding-uri ISI** (5 articole ca prim-autor și co-autor la 2 articole), **co-autor la 3 brevete de invenție, 8 lucrări prezentate la conferințe**

internaționale, nepublicate în volum (5 ca prim autor și co-autor la 3) și 5 rapoarte științifice.

- **Articole publicate în reviste cotate ISI**

1. **George Muscalu**, B. Firtat, A. Angheliescu, C. Moldovan, S. Dinulescu, C. Brasoveanu, M. Ekwinska, D. Szmigiel, M. Zaborowski, J. Zajac, A. Tulbure, „*Piezoelectric MEMS Energy Harvester for Low-Power Applications*”, Electronics 2024, 13(11), 2087; <https://doi.org/10.3390/electronics13112087> - **AIS Quartile Q3**
2. R. C. Sandulovici, Mihailescu C.-M., A. Grigoroiu, C. A. Moldovan, M. Savin, V. Ordeanu, S. N. Voicu, D. Cord, G. M. Costache, M. L. Galatanu, M. Popescu, I. Sarbu, E. Mati, L. E. Ionescu, R. Neagu, V. Țucureanu, Rîmbu M. C., I. Mihalache, C. Romanitan, A. Piperea-Sianu, A. Boldeiu, O. Brincoveanu, C. E. Manea, B. Firtat, **George Stelian Muscalu**, D. Dragomir, „*The Physicochemical and Antimicrobial Properties of Silver/Gold Nanoparticles Obtained by “Green Synthesis” from Willow Bark and Their Formulations as Potential Innovative Pharmaceutical Substances*”, Pharmaceuticals 2023, 16(1), 48, <https://doi.org/10.3390/ph16010048> - **AIS Quartile Q2**
3. A. Grigoroiu, C.-M. Mihailescu, M. Savin, C.A. Moldovan, C. Brasoveanu, S. Dinulescu, N. Djourellov, G.V. Cristian, O. Brincoveanu, G. Craciun, C. Pachiu, I. Stan, B. Firtat, **George Stelian Muscalu**, M. Ion, A. Angheliescu, „*Facile Electrodeposition-Based Chemosensors Using PANI and C-Hybrid Nanomaterials for the Selective Detection of Ammonia and Nitrogen Dioxide at Room Temperature*”, Chemosensors, vol. 11, no. 2, p. 132, Feb. 2023, <https://doi.org/10.3390/chemosensors11020132> - **AIS Quartile Q2**
4. O. Tutunaru, C. M. Mihailescu, M. Savin, B. C. Tincu, M. C. Stoian, **George Stelian Muscalu**, B. Firtat, S. Dinulescu, G. Craciun, C. A. Moldovan, A. Fica, A. C. Ion, „*Acetylcholinesterase entrapment onto carboxyl-modified single-walled carbon nanotubes and poly (3,4-ethylenedioxythiophene) nanocomposite, film electrosynthesis characterization, and sensor application for dichlorvos detection in apple juice*”, Microchemical Journal, Volume 169, October 2021, 106573, <https://doi.org/10.1016/j.microc.2021.106573> - **AIS Quartile Q2**
5. C. M. Mihailescu, D. Stan, M. Savin, C. A. Moldovan, S. Dinulescu, C. H. Radulescu, B. Firtat, **George Muscalu**, C. Brasoveanu, M. Ion, D. Dragomir, D. Stan, A. C. Ion, „*Platform with biomimetic electrochemical sensors for adiponectin and leptin detection in human serum*”, Talanta Journal, Volume 210, Pages 120643, April 2020, <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.120643> - **AIS Quartile Q1**
6. B. Firtat, C. Moldovan, C. Brasoveanu, **George Muscalu**, M. Gartner, M. Zaharescu, P. Chesler, C. Hornoiu, S. Mihaiu, C. Vladut, I. Dascalu, V. Georgescu, I. Stan, „*Miniaturised MOX based sensors for pollutant and explosive gases detection*”, Sensors and Actuators B: Chemical Journal, Volume 249, Pages 647-655, October 2017, <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.04.032> - **AIS Quartile Q1**

7. P.Chesler, C. Hornoiu, S. Mihaiu, C. Vladut, J.M. Calderon Moreno, M. Anastasescu, C. Moldovan, B. Firtat, C.Brasoveanu, **George Muscalu**, I. Stan and M. Gartner, "Nanostructured SnO₂-ZnO composite gas sensors for selective detection of CO", Beilstein Journal of Nanotechnology, 7, 2016, 2045-2056, <https://doi.org/10.3762/bjnano.7.195> - AIS Quartile Q3

• **Articole publicate în proceeding-uri indexate ISI**

8. **George-Stelian Muscalu**, N. Varachiu, B. Firtat, S. Dinulescu, A. Tulbure, C. Moldovan, "Vibrational energy harvesting devices for Structural Health Monitoring–Design optimization", 2020 International Semiconductor Conference (CAS), Sinaia, Romania, 2020, pp. 151-154, <https://doi.org/10.1109/CAS50358.2020.9268030>
9. M. A Ekwińska, J. Zając, D. Szmigiel, M. Zaborowski, C. Jastrzębski, **George Muscalu**, B. Firtat, S. Dinulescu, A. Anghelescu, C. Moldovan, "Advantages of Using Piezoelectric Materials in the MEMS Construction on the Example of AlN and Sc Doped AlN Layers", Mechatronics 2019: Recent Advances Towards Industry 4.0. MECHATRONICS 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1044. Springer, Cham, September 2019, https://doi.org/10.1007/978-3-030-29993-4_33
10. **George Muscalu**, C. Romanitan, B. Bită, S. Dinulescu, A. Anghelescu, C. Moldovan, "Effect of temperature treatments in different atmospheres on the crystallographic orientation and sheet resistance of Pt/Ti films on silicon", 2017 International Semiconductor Conference (CAS), Sinaia, Romania, 2017, pp. 279-282, <https://doi.org/10.1109/SMICND.2017.8101224>
11. **George Muscalu**, B. Firtat, S. Dinulescu, C. Moldovan, A. Anghelescu, I. Stan, "Power Harvesting and Storage Circuit for a Double Array of Lead-Free Piezoelectric Cantilevers", 2018 International Semiconductor Conference (CAS), Sinaia, Romania, 2018, pp. 321-324, <https://doi.org/10.1109/SMICND.2018.8539803>
12. **George Muscalu**, B. Firtat, S. Dinulescu, C. Moldovan, A. Anghelescu, C. Vasile, D. Ciobotaru, C. Hutanu, "Design and Simulation of Piezoelectric Energy Harvester for Aerospace Applications", 2018 International Semiconductor Conference (CAS), Sinaia, Romania, 2018, pp. 325-328, <https://doi.org/10.1109/SMICND.2018.8539767>
13. **George Muscalu**, A. Anghelescu, B. Firtat, "Design optimization of MEMS piezoelectric energy cantilever device for environment vibrations harvesting", 2015 International Semiconductor Conference (CAS), Sinaia, Romania, 2015, pp. 267-270, <https://doi.org/10.1109/SMICND.2015.7355228>
14. A. Grigoriu, C.-M. Mihailescu, M. Savin, C. Brașoveanu, C.-A. Moldovan, S. Dinulescu, **George-Stelian Muscalu**, O. Brincoveanu, B. Firtat, M. Ion, D. Dragomir, Adrian Anghelescu, „Enhancing NO₂ gas sensing performance at room temperature using electrodeposited composite Ppy-rGO-Fc”, 2023 International Semiconductor Conference (CAS), Sinaia, Romania, 2023, pp. 43-46, <https://doi.org/10.1109/CAS59036.2023.10303719>

- **Brevete**

15. C.A. Moldovan, C.M.Mihăilescu, M. Savin, B. Firtat, A. Grigoroiu, C. Brașoveanu, S. Dinulescu, **George Stelian Muscalu**, V.C. Georgescu, I. Stan, "Procedeu de realizare film compozit sensibil la amoniac bazat pe electrodepunerea materialului compozit PANI/MWCNT-NH₂/PSS", RO-BOPI 01/2024, G01N 30/64, https://osim.ro/images/Publicatii/Inventii/2024/bopi_inv_01_2024.pdf
16. C.M. Mihăilescu, M. Savin, C.A. Moldovan, B. Firtat, **George Stelian Muscalu**, M. Ion, F.A Boldeiu, C. Romanițan, O.A. Brincoveanu, I. Mihalache, "Procedeu de sinteză și caracterizare molecule de detecție folosite pentru dezvoltarea de teste rapide imunocromatografic", RO-BOPI 11/2023, G01N 33/53, https://osim.ro/images/Publicatii/Inventii/2023/inv_11_2023.pdf
17. G. Marin, C. Moldovan, M. Gartner, **George Muscalu**, H. Stroescu, C. Brasoveanu, "Procedeu de obținere a soluției de precursori pentru depunerea prin metoda sol-gel a straturilor de PZT", RO-BOPI 06/2021, C23C18/48, RO a201800598, https://osim.ro/wp-content/uploads/Publicatii-OSIM/BOPI-Inventii/2021/bopi_inv_02_2021.pdf

- **Lucrări prezentate la conferințe internaționale**

18. **George Muscalu**, S. Dinulescu, C. Moldovan, B. Firtat, A. Angheliescu, G. Sirbu, N. Boicea, J. Zajac, M. Ekwińska, D. Szmigiel, "Piezoelectric MEMS energy harvester for automotive applications", EpoSS Annual Forum 2024, 18–21 iunie 2024, Cork, Ireland – nepublicat in volum
19. J. Zajac, M. Ekwinska, Helena Klos, D. Szmigiel, **George Muscalu**, S. Dinulescu, C. Moldovan, B. Firtat, A. Angheliescu, G. Sirbu, N. Boicea, "Maintenance-free energy source made of SOI wafers and piezoelectric materials: AlN:Sc and PZT", 10th Joint International EuroSOI Workshop and International Conference on Ultimate Integration on Silicon (EuroSOI-ULIS) 2024, 15-17 mai 2024, Atena, Grecia – nepublicat in volum
20. **George Muscalu**, S. Dinulescu, B. Firtat, A. Angheliescu, C. Moldovan, C. Brasoveanu, A. Tulbure, M. Ekwińska, D. Szmigiel, M. Zaborowski, J. Zajac, G. Sirbu, N. Boicea, „Piezoelectric MEMS energy harvester for ultra-low power applications”, 2023 International Semiconductor Conference (CAS), Sinaia, Romania, 2023 – nepublicat in volum
21. D. Belavic, K. Vojisavljevic, D. Kuscer, T. Pecnik, J. Zajac, A. Angheliescu, **George Muscalu**, M. Hodnik, T. Kos, S. Drnovsek, B. Malic, "Ceramic packaging of PiezoMEMS devices", 2017 21st European Microelectronics and Packaging Conference (EMPC) & Exhibition, Warsaw, Poland, 2017, pp. 1-4, <https://doi.org/10.23919/EMPC.2017.8346888>
22. **George Muscalu**, B. Firtat, S. Dinulescu, A. Angheliescu, C. Moldovan, M. Ekwińska, D. Szmigiel, M. Zaborowski, J. Zajac, "Piezoelectric energy harvester for wireless sensor networks", 2019 ISAF-ICE-FEM-IWPM-PFM Joint Conference – f2cπ2, 14-19 iulie 2019, Lausanne, Elveția – nepublicat in volum

23. **George Muscalu**, B. Fîrtat, S. Dinulescu, A. Angheliescu, C. Moldovan, M. Gartner, M. Zaharescu, M. Anastasescu, H. Stroescu, S. Mihaiu, M. Ekwińska, D. Szmigiel, M. Zaborowski, J. Zajac, "Piezoelectric energy harvester for environmental applications", EuroNanoForum 2019, 12-14 iunie 2019, Bucharest, Romania – nepublicat in volum
24. **George Muscalu**, B. Fîrtat, S. Dinulescu, C. Moldovan, A. Angheliescu, D. Varsescu, A. Avram, S. Vulpe, "Fabrication and mechanical testing of MEMS piezoelectric cantilevers array for energy harvesting", Micro and Nano Engineering Conference (MNE), 24-27 Septembrie 2018, Copenhagen, Denmark – nepublicat in volum
25. B. Fîrtat, C. Moldovan, A. Angheliescu, **George Muscalu**, P. Schiopu, „Lead-free piezoelectric MEMS cantilever for energy harvesting – design, optimization and technology”, Smart Systems Integration 2017 Conference, 8-9 Martie 2017, Cork, Ireland – nepublicat in volum

- **Rapoarte științifice**

26. Raport științific nr. 1, *Microsisteme piezoelectrice de captare a energiei pentru aplicații biomedicale și de mediu – considerații teoretice și rezultate preliminare;*
27. Raport științific nr. 2, *Optimizarea proceselor tehnologice esențiale în obținerea unui microsistem de captare a energiei pentru aplicații de mediu;*
28. Raport științific nr. 3, *Obținerea unui microsistem de captare a energiei pentru aplicații de mediu și optimizarea proceselor tehnologice;*
29. Raport științific nr. 4, *Dezvoltarea modului electronic de stocare și livrare controlată a energiei;*
30. Raport științific nr. 5, *Integrarea dispozitivului MEMS, a straturilor piezoelectrice și a modului electronic;*

6.4 Perspective de dezvoltare ulterioară

Astfel de microsisteme sunt dedicate aplicațiilor de putere foarte joasă (1-100 μ W). Deși am atins astfel de puteri cu microgeneratoarele fabricate, acestea au fost atinse în condiții de laborator fapt ce a demonstrat potențialul microgeneratoarelor piezoelectrice de energie pentru alimentarea unor microsenzori.

Un prim pas îl reprezintă publicarea rezultatelor noi obținute pentru microgeneratorul pentru aplicații automotivă PZU2. Următorul pas este optimizarea structurilor pentru a culege energie de pe o bandă mai largă de frecvențe.

Un alt pas în dezvoltarea ulterioară a microgeneratorului o reprezintă realizarea și integrarea de straturi piezoelectrice la IMT-București. Validarea acestui pas ne permite realizarea mult mai rapidă de microgeneratoare, iar prin testări și încapsulări adecvate (în vid) este posibilă atingerea unui TRL (*Technology Readiness Level*) mai bun.

Pe viitor se pot optimiza procese tehnologice și pentru alte tipuri de structuri datorită experienței acumulate.

Anexe

A1 Fluxul tehnologic pentru obținerea de structuri de testare a straturilor piezoelectrice

S-au proiectat și fabricat structuri de test pentru caracterizarea straturilor piezoelectrice în vederea integrării acestora cu tehnologiile MEMS disponibile. Acestea sunt mai simple și cu un cost mai redus din punct de vedere tehnologic.

Structurile de test constau în structuri de cantilever cu grosimi egale cu grosimea plachetei, iar principiul de măsurare a acestora se bazează pe efectul piezoelectric invers.

A2 Microgenerator piezoelectric de energie pentru aplicații aerospațiale – PZU3

Microgeneratorul PZU3 a fost conceput pentru colectarea energiei de la vibrațiile apărute la un stabilizator vertical de la elicopterul PZL SW-4, vibrații ce apar la frecvențe de 30, 45 și 90Hz cu accelerații de 15.4, 8.6 și respectiv 1.5 m/s².

Ca material piezoelectric s-a optat pentru PZT după prin centrifugare. Deși acesta nu a putut fi integrat cu tehnologiile MEMS disponibile, metoda de depunere a fost îmbunătățită și a rezultat într-un brevet de invenție [14]. Structurile fabricate sunt prezentate în **Fig. A2.12** și **Fig. A2.17**, fără strat piezoelectric funcțional.

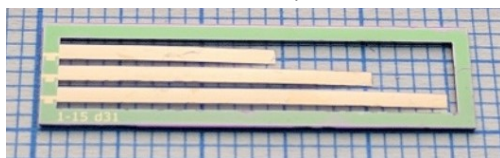


Fig. A2.12. Structurile inițiale PZU3

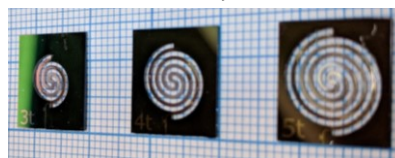


Fig. A2.17. Structuri spiralate PZU3 fabricate

A3 Microgenerator piezoelectric de energie pentru aplicații de infrastructură civilă – PZU4

Microgeneratorul PZU4 (**Fig. A3.5**) a fost conceput pentru vibrații a unui pod de lemn frecventat de oameni, vibrații cu frecvențe de 385Hz. Grupuri de 5 cantileverele au fost fixate cu o masă inerțială comună pentru a evita diferențele de fază iar ca material piezoelectric a fost folosit AlN. Puterea generată maximă a fost mult sub așteptări, de 0.046μW, datorită cedării mecanice a cantileverelor (**Fig. A3.12**).

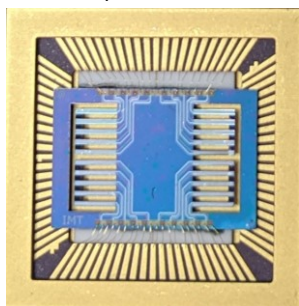


Fig. A3.5. Microgeneratorul de energie PZU4

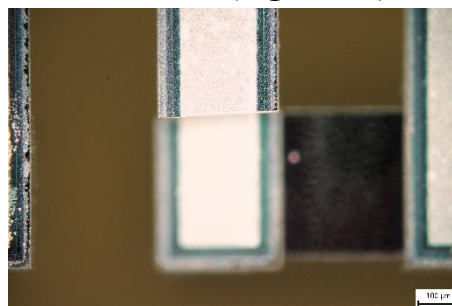


Fig. A3.12. Cedare mecanică a cantileverelor

Bibliografie – selecție

- [1] M. Yip, “Ultra-low-power circuits and systems for wearable and implantable medical devices,” Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2013. Accessed: Jun. 09, 2024. [Online]. Available: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/84902>
- [2] “Energy Harvesting System Market Size, Share, Industry Trends Forecast, Opportunities 2030,” MarketsandMarkets. Accessed: Mar. 26, 2024. [Online]. Available: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/energy-harvesting-market-734.html>
- [3] N. Jackson, R. O’Keeffe, F. Waldron, M. O’Neill, and A. Mathewson, “Evaluation of low-acceleration MEMS piezoelectric energy harvesting devices,” *Microsyst Technol*, vol. 20, no. 4, pp. 671–680, Apr. 2014, doi: 10.1007/s00542-013-2006-6.
- [4] Y. Jia and A. A. Seshia, “Power Optimization by Mass Tuning for MEMS Piezoelectric Cantilever Vibration Energy Harvesting,” *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 25, no. 1, pp. 108–117, Feb. 2016, doi: 10.1109/JMEMS.2015.2496346.
- [5] C. B. Williams and R. B. Yates, “Analysis of a micro-electric generator for microsystems,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 52, no. 1–3, pp. 8–11, Mar. 1996, doi: 10.1016/0924-4247(96)80118-X.
- [6] G. Muscalu, A. Angheliescu, and B. Firtat, “Design optimization of MEMS piezoelectric energy cantilever device for environment vibrations harvesting,” in *2015 International Semiconductor Conference (CAS)*, Oct. 2015, pp. 267–270. doi: 10.1109/SMICND.2015.7355228.
- [7] G. Muscalu, C. Romanitan, B. Bită, S. Dinulescu, A. Angheliescu, and C. Moldovan, “Effect of temperature treatments in different atmospheres on the crystallographic orientation and sheet resistance of Pt/Ti films on silicon,” in *2017 International Semiconductor Conference (CAS)*, Oct. 2017, pp. 279–282. doi: 10.1109/SMICND.2017.8101224.
- [8] G. Muscalu *et al.*, “Piezoelectric MEMS Energy Harvester for Low-Power Applications,” *Electronics*, vol. 13, no. 11, p. 2087, May 2024, doi: 10.3390/electronics13112087.
- [9] G. Muscalu, B. Firtat, S. Dinulescu, C. Moldovan, A. Angheliescu, and I. Stan, “Power Harvesting and Storage Circuit for a Double Array of Lead-Free Piezoelectric Cantilevers,” in *2018 International Semiconductor Conference (CAS)*, Sinaia: IEEE, Oct. 2018, pp. 321–324. doi: 10.1109/SMICND.2018.8539803.
- [10] G. Muscalu *et al.*, “Piezoelectric MEMS energy harvester for automotive applications,” presented at the EpoSS Annual Forum 2024, Cork, Irlanda, 21 iunie 2024.
- [11] Y. Liu *et al.*, “Design and Performance of ScAlN/AlN Trapezoidal Cantilever-Based MEMS Piezoelectric Energy Harvesters,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 68, no. 6, pp. 2971–2976, Jun. 2021, doi: 10.1109/TED.2021.3072612.
- [12] X. He, D. Li, H. Zhou, X. Hui, and X. Mu, “Theoretical and Experimental Studies on MEMS Variable Cross-Section Cantilever Beam Based Piezoelectric Vibration Energy Harvester,” *Micromachines*, vol. 12, no. 7, p. 772, Jun. 2021, doi: 10.3390/mi12070772.
- [13] X. Zhao, Z. Shang, G. Luo, and L. Deng, “A vibration energy harvester using AlN piezoelectric cantilever array,” *Microelectronic Engineering*, vol. 142, pp. 47–51, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.mee.2015.07.006.
- [14] G. Marin, C. Moldovan, M. Gartner, G. Muscalu, H. Stroescu, and C. Brasoveanu, “Procedeu de obținere a soluției de precursori pentru depunerea prin metoda sol-gel a straturilor de PZT,” RO-BOPI 06/2021, C23C18/48, RO a201800598 [Online]. Available: https://osim.ro/wp-content/uploads/Publicatii-OSIM/BOPI-Inventii/2021/bopi_inv_02_2021.pdf