

**MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII AL REPUBLICII MOLDOVA**

**Universitatea Tehnică a Moldovei  
Facultatea Calculatoare, Informatică și Microelectronică  
Departamentul Microelectronică și Inginerie Biomedicală**

**Admis la susținere  
Șef interimar departament MIB:  
conf.univ., dr. Serghei RAILEAN**

„\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2022

**INVESTIGAREA PROPRIETĂȚILOR  
ELECTROMECHANICE ALE STRUCTURILOR ÎN  
BAZĂ DE AERO-GaN ȘI AEROGALLOX**

**Teză de master**

**Student: \_\_\_\_\_ Crestincov Ivan,  
grupa IBM-201M**

**Coordonator: \_\_\_\_\_ Tighineanu Ion  
acad., dr. hab., prof. univ.**

**Consultant: \_\_\_\_\_ Railean Serghei,  
conferențiar universitar, doctor**

**Chișinău – 2022**

## REZUMAT

la teza de master cu tema „ **Investigarea proprietăților electromecanice ale structurilor în bază de Aero-GaN și aerogallox** ”

**Teza cuprinde:** Introducerea, 3 capitole, 34 figuri, 6 tabele, concluzii, 62 surse bibliografice și 0 anexă.

**Cuvinte-cheie:** Aerogalnit, aerogallox, tetrapode, polimer.

**Domeniul de cercetare** îl constituie aspectele teoretice și practice a realizării cercetărilor asupra microterapodelor de aerogalnit și aerogallox impregnat în PDMS. S-a demonstrat sensibilitatea fotoelectrică a aero-nano-materialului și proprietățile deformațiilor mecanice la întindere.

**Scopul lucrării** constă în studierea proprietăților electromecanice, piezoelectrice, piezorezistivi și fotoelectrice a aerogalnitului și aerogalloxului impregnat în polimer elastic.

**Metodologia cercetării științifice** constă în elaborarea în premieră a senzorilor de presiune în baza unor material noi – aerogalnit și aerogallox.

**Noutatea și originalitatea** științifică a rezultatelor obținute constă în definirea unor noi materiale formate din microtuburi și microtetrapode de aero-GaN și aero-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Rezultatele obținute oferă posibilitatea de a declara că aero-nano-materialul prezintă o gamă largă de utilizare cum ar fi robotica, biomedicină precum și industria aerospațială.

**Semnificația teoretică** a lucrării o constituie elaborarea metodelor senzorilor tactili, și cercetarea proprietăților posibile a aero-GaN și aero-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

**Valoarea aplicativă a lucrării** constă în elaborarea unor sensori de presiune impregnați în PDMS ce ar permite utilizarea în diverse aplicații biomedicale, robotice, aerospațiale precum și spațiale. Aero-GaN datorită stabilității biocompatibilității precum și proprietăților fascinante menționate mai sus permite pe o gama largă utilizarea în implanturi și microchirurgie.

## ANNOTATION

to the master's thesis on "**Investigation of electromechanical properties of structures based on Aero-GaN and aerogalox**"

**The thesis includes:** Introduction, 3 chapters, 34 figures, 6 tables, conclusions, 62 bibliographic sources and 0 appendix.

**Keywords:** Aerogalnit, aerogalox, tetrapod, polymer..

**The research field** is the theoretical and practical aspects of conducting research on microtherapies of aerogallit and aerogalox impregnated in PDMS. The photoelectric sensitivity of the aero-nano material and the properties of mechanical tensile deformations have been demonstrated.

**The aim** of the paper is to study the electromechanical, piezoelectric, piezoresistive and photoelectric properties of aerogallit and aerogalox impregnated with elastic polymer.

**The methodology** of scientific research consists in the first elaboration of pressure sensors based on new materials - aerogallit and aerogalox.

**The novelty and scientific originality** of the obtained results consists in the definition of new materials formed by aeroGaN and aero-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> microtubes and microtetrapods. The results provide the possibility to state that the aero-nano-material has a wide range of uses such as robotics, biomedicine as well as the aerospace industry.

**The theoretical** significance of the paper is the development of tactile sensor methods, and research into the possible properties of aero-GaN and aero-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

**The applicative** value of the paper consists in the elaboration of pressure sensors impregnated in PDMS that would allow the use in various biomedical, robotic, aerospace and space applications. Aero-GaN due to the stability of the biocompatibility as well as the fascinating properties mentioned above allows a wide range of use in implants and microsurgery.

# Cuprins

<b>INTRODUCERE.....</b>	<b>9</b>
<b>1. PROPRIETĂȚILE NITRURILOR ȘI UTILIZAREA ACESTORA .....</b>	<b>11</b>
1.1. Proprietățile de bază a nitruților.....	11
1.2. Proprietățile optice .....	16
1.3. Proprietăți electrice .....	20
1.4. Efectele electromecanice a nitruții de galiu.....	23
1.5. Proprietățile piezoelectrice a nitruții de galiu .....	24
<b>2. AEROMATERIALE ȘI PROPRIETĂȚILE ACESTORA .....</b>	<b>30</b>
2.1. Noțiuni generale despre aerogeluri .....	30
2.2. Amestec de oxid de metal/aerogeluri dopate cu metal .....	31
2.3. Aerogeluri de carbon.....	34
2.4. Aerogelurile organice.....	36
2.5. Aerogeluri pe bază de nitruță de galiu .....	38
2.6. Polimerii utilizați.....	41
2.7. Dispozitive și echipamente utilizate .....	43
2.7.1. Microscopul cu scanare electronică.....	43
2.7.2. Microscopul optic cu contrast de interferență diferențială.....	44
2.7.3. Aparatul de măsurare Keithley 2400.....	46
2.7.4. Aparatul pentru măsurarea forței aplicate asupra senzorului .....	47
<b>3. STUDIAREA AERO-GAN ȘI AERO-GA<sub>2</sub>O<sub>3</sub> IMPREGNAT ÎN PDMS .....</b>	<b>49</b>
3.1. Fabricarea senzorilor tactil pe baza de aero-GaN și aero-GA <sub>2</sub> O <sub>3</sub> impregnat în polimer.....	49
3.2. Cercetarea proprietăților fotoelectrice ale aero-GaN impregnat în polimer .....	52
<b>CONCLUZII .....</b>	<b>59</b>
<b>BIBLIOGRAFIE.....</b>	<b>60</b>

## INTRODUCERE

Studierea materialelor semiconductoare a dus la un pas înalt spre evoluția tehnicii moderne care tinde spre micșorarea și integrarea cât mai considerabil în viața contemporană. La moment se studiază materiale semiconductoare cu o bandă interzisă cât mai largă ce permit funcționarea în spectrul vizibil, precum și tehnologiile de fabricare a dispozitivelor cu dimensiuni reduse pentru a fi posibil integrarea a mai multor componente într-un dispozitiv.

Tehnologiile avansate ne-au ușurat viața în nenumărate moduri, dar au extras și un preț în ceea ce privește consumul resurselor de energie și generarea deșeurilor. O mare abordare se face la îmbunătățirea nivelului de viață, prin implementarea a noilor dispozitive apare tot odată și problema energetică care trebuie soluționată din timp, cu implementarea noilor tehnologii de producere a energiei electrice.

În ultimul secol dezvoltarea tehnologiilor semiconductoare a evoluat drastic, spre exemplu siliciul, care a permis elaborarea tranzistoarelor, microprocesoarelor, circuitelor integrate, computerul și epoca informației, au influențat practic toate aspectele vieții moderne. Într-o manieră similară, materialele semiconductoare sunt pregătite în așa fel încât să ne modifice în mod fundamental viața. Aceste materiale, care includ nitrura de galiu (GaN), nitrura de aluminiu (AlN) și nitrura de indiu (InN), vor permite elaborarea de dispozitive semiconductoare cu noi capacități și vor face posibilă reinventarea tehnologiilor existente. Aceste aplicații pot anticipa piețele comerciale noi, iar această posibilitate stimulează deja dezvoltarea agresivă a materialelor de sprijin și a tehnologiilor dispozitivelor. Marea promisiune care decurge din aceste inovații este capacitatea de a face mai mult (mai multă lumină, mai multă putere) cu mai puțin (eficiență energetică mai mare, mai puțin curent electric, mai puțin căldură uzată). Dar inovațiile nu stau pe loc și tind de a se extinde prin crearea noilor materiale mai ușoare, stabile termic, cu o frecvență înaltă de lucru și mai rigide cum ar fi aeromateriale.

Aeromaterialele, cum ar fi aerogelurile, sunt materiale tridimensionale ultra-ușoare, extra-poroase formate din rețele de nanostructuri distribuite aleatoriu având diferite forme și dimensiuni, cum ar fi: nanofire, nanotuburi sau nanotetrapozi. Există un număr destul de limitat de materiale care pot fi pregătite sub formă de aeromateriale, dar acest număr este în continuă creștere, în special pentru nanomateriale pe bază de carbon, cum ar fi nanotuburi de carbon, grafenul, aerografrit, etc., dar și nanomateriale pe bază de nitruri cum ar fi nitrura de galiu, nitrura de aluminiu, nitrura de indiu, BN, etc. Această evoluție extraordinară a aeromaterialelor este legată de o mulțime de

aplicații în stocarea și conversia energiei (de exemplu, supercapacitoare și celule solare), aplicații biologice (de exemplu, eliberarea de medicamente, ingineria țesuturilor și biosenzori).

Sursele ambientale de energie, cum ar fi energia termică, eoliană și biomecanică, sunt ușor disponibile. O abordare avantajoasă pentru recoltarea energiei din surse alternative este utilizarea materialelor piezoelectrice semiconductoare, care facilitează conversia energiei mecanice în energie electrică. În această privință, utilizarea sistemelor de recoltare a energiei piezoelectrice se conturează ca o strategie eficientă pentru alimentarea nodurilor senzorilor wireless și a electronicelor personale, alături de metodele termoelectrice și solare studiate mai pe larg. De fapt, pentru condițiile de iluminare interioară sau în care este necesară o durată de viață lungă, colectarea energiei piezoelectrice produce o densitate de putere mai mare decât alte strategii în care energia este, de asemenea, captată din mișcare. Recent, această strategie a fost folosită la scară nanometrică prin utilizarea nanocristalelor de oxid de zinc (ZnO) și nitrură de galiu (GaN)[1]. Aceste nanomateriale sunt realizate în diverse configurații, printre care nanofirele (NF) și nanocenturile (NC) cvasi-unidimensionale (1-D) sunt cele mai frecvent sintetizate și sunt materiale promițătoare pentru elementele structurale și funcționale din diferite nanodispozitive inteligente și nanoelectronice. Astfel, s-au investit eforturi considerabile în caracterizarea proprietăților elastice, piezoelectrice și semiconductoare ale NF și NC piezoelectrice. S-a remarcat în studiile anterioare [2–5] că raportul mare suprafață-volum la scară nanometrică ar putea îmbunătăți în mod dramatic efectul de suprafață și ar putea duce în cele din urmă la proprietăți elastice și piezoelectrice distincte, care sunt semnificativ diferite de omologii lor macroscopici.

Dezvoltarea extraordinară a diferitelor aplicații ale acestui compus semiconductor, fiind utilizat în dispozitive de frecvență înaltă, electronica de putere și optoelectronică. Mai mult, GaN are un coeficient piezoelectric mare, util în micro și nano-sistemele electromecanice și senzori de undă acustică de suprafață, care pot fi folosiți în senzori biologici datorită biocompatibilității sale. Pe aerogeluri, grafene decorate cu filme nanocristaline de GaN care arată că o membrană ultrasubțire de GaN cu grosimea de 15 nm acționează ca un memristor [6], analog cu o sinapsă a creierului.

Senzorii tactili trebuie să fie stabili în condiții de accelerare și vibrații puternice, în plus, aplicații aerospațiale de care au nevoie pentru a suporta radiații, substanțe chimice agresive. În mod corespunzător, sa studiat un nou tip de aeromaterial, și anume aero-GaN sau altfel numit aerogalnit, care poate fi exploatat potențial pentru aplicațiile menționate mai sus [7]. Nitrura de galiu fiind afirmat ca un „semiconductor ultra-ușor”, datorită structurii alcătuite din microtuburi de GaN în formă de tetrapozi distribuiți aleatoriu, cu grosimea peretelui de câteva zeci de nanometri și lungimea brațelor tetrapodului de zeci de micrometri.

## BIBLIOGRAFIE

1. ZHANG, Y.; LIU, Y.; WANG, Z.L. Fundamental Theory of Piezotronics, In: *Adv. Mater.* Volume 23, Issue 27, July 19, 2011, pages 3004-3013
2. HAROLD S. PARK, PATRICK A. KLEIN, Surface stress effects on the resonant properties of metal nanowires: The importance of finite deformation kinematics and the impact of the residual surface stress, In: *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Volume 56, Issue 11, 2008, Pages 3144-3166,
3. RÉMI DINGREVILLE, JIANMIN QU, MOHAMMED CHERKAOUI, Surface free energy and its effect on the elastic behavior of nano-sized particles, wires and films, In: *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Volume 53, Issue 8, 2005, Pages 1827-1854,.
4. PÄR A.T. OLSSON, HAROLD S. PARK, On the importance of surface elastic contributions to the flexural rigidity of nanowires, In: *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Volume 60, Issue 12, 2012, Pages 2064-2083,
5. CAMMARATA R.C., Surface and interface stress effects on interfacial and nanostructured materials, In: *Materials Science and Engineering: A*, Volume 237, Issue 2, 1997, Pages 180-184,
6. DRAGOMAN MIRCEA, TIGINYANU ION, DRAGOMAN DANIELA, DINESCU ADRIAN, BRANISTE TUDOR, and CIOBANU VLADIMIR (2018). Learning mechanisms in memristor networks based on GaN nanomembranes.
7. TIGINYANU, I., BRANISTE, T., SMAZNA, D., DENG, M., SCHÜTT, F., SCHUCHARDT, A., ... ADELUNG, R. (2019). Self-organized and self-propelled aero-GaN with dual hydrophilic-hydrophobic behaviour. In: *Nano Energy*, 56, 759–769.
8. FABRIZIO ROCCAFORTE, MIKE LESZCZYNSKI (2020). Introduction to Gallium Nitride Properties and Applications.
9. AREHART, A., HOMAN, T., WONG, M.H. ET AL. (2010). Impact of N- and Ga-face polarity on the incorporation of deep levels in n-type GaN grown by molecular beam epitaxy
10. YU, E.T., DANG, X.Z., ASBECK, P.M. ET AL. (1999). Spontaneous and piezoelectric polarization effects in III–V nitride heterostructures. *J. Vac. Sci. Technol. B* 17: 1742–1749.
11. BERNARDINI, F., FIORENTINI, V., AND VANDERBILT, D. (1997). Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III–V nitrides. In: *Phys. Rev. B* 56: R10024–R10027

12. LEE, C.D., SAGAR, A., FEENSTRA, R.M. ET AL. (2001). Growth of GaN on SiC(0001) by molecular beam epitaxy. In: *Phys. Status Solidi (a)* 188: 595–599
13. CHOI, S., HELLER, E., DORSEY, D. ET AL. (2013). Analysis of the residual stress distribution in AlGaIn/GaN high electron mobility transistor. In: *J. Appl. Phys.* 113: 093510.
14. REN, F. AND ZOLPER, J.C. (2003). *Wide Band Gap Electronic Devices*. Singapore: World Scientific
15. ISHIDA, M., UEDA, T., TANAKA, T., AND UEDA, D. (2013). GaN on Si technologies for power switching devices. *IEEE Trans. Electron Devices* 60: 3053–3059
16. SARZYNSKI, M., LESZCZYNSKI, M., KRYSKO, M. ET AL. (2012). Influence of GaN substrate off-cut on properties of InGaIn and AlGaIn layers. *Cryst. Res. Technol.* 47: 321–328.
17. SUSKI, T., STASZCZAK, G., GRZANKA, S. ET AL. (2010). Hole carrier concentration and photoluminescence in magnesium doped InGaIn and GaIn grown on sapphire and GaIn misoriented substrates. *J. Appl. Phys.* 108: 023516
18. KRYSKO, M., DOMAGALA, J.Z., CZERNECKI, R., AND LESZCZYNSKI, M. (2013). Triclinic deformation of InGaIn layers grown on vicinal surface of GaIn (00.1) substrates. *J. Appl. Phys.* 114: 113512.
19. ZAUNER, A., ARET, E., ENCKEVORT, W. ET AL. (2002). Homo-epitaxial growth on the N-face of GaIn single crystals: the influence of the misorientation on the surface morphology. *J. Cryst. Growth* 24
20. SCHUBERT, E.F. (2006). *Light-Emitting Diodes*, 2e. New York: Cambridge University Press.
21. ORSAL, G., EL GMILI, Y., FRESSENGEAS, N. ET AL. (2014). Bandgap energy bowing parameter of strained and relaxed InGaIn layers. In: *Opt. Mater. Express* 4: 1030–1041.
22. GU, G.-H., JANG, D.-H., NAM, K.-B., AND PARK, C.-G. (2013). Composition fluctuation of In and well-width fluctuation in InGaIn/GaN multiple quantum wells in light-emitting diode devices. *Microsc. Microanal.* 19 (S5): 99–104.
23. MOSES, P.G. AND VAN DE WALLE, C.G. (2010). Band bowing and band alignment in InGaIn alloys. In: *Appl. Phys. Lett.* 96: 021908.
24. YUN, F., RESCHIKOV, M.A., HE, L. ET AL. (2002). Energy band bowing parameter in  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{In}$  alloys. In: *J. Appl. Phys.* 92 (8): 4837–4839.



25. JAIN, S.C., WILLANDER, M., NARAYAN, J., AND VAN OVERSTRAETEN, R. (2000). III-nitrides: growth, characterization and properties. In: *Appl. Phys. Rev.* 87: 965–1006.
26. JIN ZHANG, CHENGYUAN WANG, RAJIB CHOWDHURY, SONDIPON ADHIKARI, (2013) Size- and temperature-dependent piezoelectric properties of gallium nitride nanowires, In: *Scripta Materialia*, Volume 68.
27. CHEN CQ, SHI Y, ZHANG YS, ZHU J, YAN YJ. Size dependence of Young's modulus in ZnO nanowires. In: *Phys Rev Lett.* 2006 Feb 24
28. R AGRAWAL AND B PENG AND EE GDOUTOS AND HD ESPINOSA, (2008). Elasticity Size Effects in ZnO Nanowires-A Combined Experimental- Computational Approach. In: *NANO LETTERS*, 8, 3668-3674
29. XU, FENG & QIN, QINGQUAN & MISHRA, ASHISH & GU, YI & ZHU, YONG. (2010). Mechanical Properties of ZnO Nanowires Under Different Loading Modes. *Nano Research*.
30. ASTHANA A, MOMENI K, PRASAD A, YAP YK, YASSAR RS. In situ observation of size-scale effects on the mechanical properties of ZnO nanowires. *Nanotechnology*. 2011 Jul 1
31. ZHANG, J & WANG, C.Y & CHOWDHURY, RAJIB & ADHIKARI, SONDIPON. (2013). Size and temperature dependent elastic and piezoelectric properties of gallium nitride nanobelts. In: *Scripta Materialia*. 68. 627-630.
32. AGRAWAL R, ESPINOSA HD. Giant piezoelectric size effects in zinc oxide and gallium nitride nanowires. A first principles investigation. *Nano Lett.* 2011 Feb 9;786
33. F.H. STILLINGER, T.A. WEBER, In *Phys. Rev. B* 31 (1985) 5262.
34. NOSE S. ´, CHEM J.. A unified formulation of the constant temperature molecular dynamics methods *Phys.* 81 (1984) 511.
35. M. MINARY-JOLANDAN, R.A. BERNAL, I. KULJANISHVILI, V. PARPOIL, H.D. ESPINOSA, Individual GaN Nanowires Exhibit Strong Piezoelectricity in 3D (2012) *Nano Lett.* 12
36. JIN ZHANG, CHENGYUAN WANG, RAJIB CHOWDHURY, SONDIPON ADHIKARI, Size- and temperature-dependent piezoelectric properties of gallium nitride nanowires, In: *Scripta Materialia*, Volume 68, Issue 8, 2013, Pages 627-630,
37. YU ET AL., (1998) "Mechanical properties of the GaN thin films deposited on sapphire substrate", *J. Cryst. Growth*, pp. 189-190,.

38. FABIO BERNARDINI, VINCENZO FIORENTINI, AND DAVID VANDERBILT PHYS. (1997). Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides. *Rev. B* 56, R10024(R)
39. SUSAN MONTES, HAJAR MALEKI, , SABU THOMAS, ANU TRESA SUNNY, PRAJITHA VELAYUDHAN, (2020), Aerogels and their applications,
40. ALEMA ´N J.V., ET AL., (2007) Definitions of terms relating to the structure and processing of sols, gels, networks, and inorganic-organic hybrid materials (IUPAC recommendations 2007), *Pure Appl. Chem.* 1801.
- 41 WICKLEIN. B., ET AL., (2015) Thermally insulating and fire-retardant lightweight anisotropic foams based on nanocellulose and graphene oxide, *Nat. Nanotechnol.* 10 (3) 277.
42. KARAASLAN, MUZAFFER & KADLA, JOHN & KO, FRANK. (2016). Lignin-Based Aerogels.
- 43 SCH€AFER. H., MILOW B., RATKE L., (2013) Synthesis of inorganic aerogels via rapid gelation using chloride precursors, *RSC Adv.* 3 (35) 15263–15272.
44. MOHANAN J.L., ARACHCHIGE I.U., BROCK S.L., (2005) Porous semiconductor chalcogenide aerogels, *Science* 307 (5708) 397–400.
45. ARACHCHIGE I.U., S.L. BROCK, (2006) Solgel assembly of CdSe nanoparticles to form porous aerogel networks, *J. Am. Chem. Soc.* 128 (24) 7964–7971.
46. BIGALL N.C., ET AL., (2009) Hydrogels and aerogels from noble metal nanoparticles, *Angew. Chem. Int. Ed.* 48 (51) 9731–9734.
47. YOLDAS B.E., (1980) Formation of titania-silica glasses by low temperature chemical polymerization, *J. Non-Cryst. Solids* 38 81–86.
48. ARAVIND P., ET AL., (2009) Silica–titania aerogel monoliths with large pore volume and surface area by ambient pressure drying, *J. Sol-Gel Sci. Technol.* 52 (3) 328–334.
49. MILLER J.B., JOHNSTON, S.T. E.I. KO, (1994) Effect of prehydrolysis on the textural and catalytic properties of titania-silica aerogels, *J. Catal.* 150 (2) 311–320.
- 50 MILLER. J.B., E.I. KO, (1996) Acidic properties of silica-containing mixed oxide aerogels: preparation and characterization of zirconia–silica and comparison to titania–silica, *J. Catal.* 159 (1) 58–68.
51. SALIGER R., ET AL., (1998) High surface area carbon aerogels for supercapacitors, *J. Non-Cryst. Solids* 225 81–85.

52. C. LI, X. YANG, G. ZHANG, (2015) Mesopore-dominant activated carbon aerogels with high surface area for electric double-layer capacitor application, *Mater. Lett.* 161 538–541.
53. R.W. PEKALA, ET AL., (1998) Carbon aerogels for electrochemical applications, *J. Non-Cryst. Solids* 225 74–80.
54. KISTLER, S.S. (1931) Coherent expanded aerogels and jellies, *Nature* 127 (3211) 741.
55. Trademark of The Dow Chemical Company (“Dow”) or an affiliated company of Dow SYLGARD™ 184 Silicone Elastomer © 2017 The Dow Chemical Company. All rights reserved <https://www.dow.com/content/dam/dcc/documents/en-us/productdatasheet/11/11-31/11-3184-sylgard-184-elastomer.pdf?iframe=true>
56. CREWE, ALBERT V; ISAACSON, M. AND JOHNSON, D.; JOHNSON, D. (1969). "A Simple Scanning Electron Microscope". *Rev. Sci. Instrum.* 40 (2): 241–246 [https:// en.wikipedia.org/wiki/Transmission\\_electron\\_microscopy](https://en.wikipedia.org/wiki/Transmission_electron_microscopy)
57. ADELA CRISTINA TEODORESCU Microscopul, 1 noiembrie 2008, *Jurnalul Național* <https://ro.wikipedia.org/wiki/Microscop>
58. Test equipment Solutions Ltd Unit 8 Elder Way Waterside Drive Langley Berkshire SL3 6E <http://www.testequipmenthq.com/datasheets/KEITHLEY-4200-Datasheet.pdf>
59. CRESTINCOV IVAN, (2019) Investigare proprietăților electromecanice ale structurilor în bază de aero-GaN,. *Lucrare de liceă*
60. BRANISTE T, CIOBANU V, SCHÜTT F, MIMURA H, RAEVSCHI S, ADELUNG R, PUGNO NM, TIGINYANU I. (2021) Self-Propelled Aero-GaN Based Liquid Marbles Exhibiting Pulsed Rotation on the Water Surface. *Materials.*; 14(17):5086. <https://doi.org/10.3390/ma14175086>
61. PLESCO, I., STROBEL, J., SCHÜTT, F. ET AL. (2018) Hierarchical Aerographite 3D flexible networks hybridized by InP micro/nanostructures for strain sensor applications. *Sci Rep* 8, 13880.
62. NGUYEN T.D., MAO S., YEH Y.W., PUROHIT P.K., M.C. MCALPINE (2013), Nanoscale flexoelectricity ,In: *Adv. Mater.*, 25 pp. 946-974