



**Universitatea Tehnică a Moldovei**

# **CIRCUITE DE MEMBRANE ÎN BAZA GaN PENTRU APLICAȚII MEMRISTIVE**

**Masterand: Batîri Mihail**

**Conducător: acad. Tighineanu Ion**

**Chișinău - 2017**

## REZUMAT

la teza de master cu tema “Circuite de membrane în baza GaN pentru aplicații memristive”,

Teza cuprinde introducerea, trei capitole, concluzii, bibliografia din 45 titluri, 67 pagini text de bază, inclusiv 56 figuri și 2 tabele.

**Cuvinte cheie:** nanomembrane ultrasubțiri, memristor în baza materialelor nanostructurate, litografia cu sarcină de suprafață, decaparea foto-electrochimică, caracterizare electrică, caracterizare morfologică, aplicații memristive.

**Domeniul de cercetare** îl constituie metoda de nanostructurare a materialului GaN sub formă de membrane ultrasubțiri pentru obținerea circuitelor de membrane pentru aplicații memristive.

**Scopul lucrării** constă în studiul memristorului și efectelor memristive în baza nanomembranelor de GaN, caracterizarile morfologice și caracterizarile electrice în diferite configurații ale circuitelor de nanomembrane pentru aplicații memristive, efectuarea proceselor tehnologice pentru obținerea membranelor și fabricarea circuitelor de membrane în baza GaN.

**Noutatea și originalitatea științifică** a rezultatelor obținute constă în: elaborarea și caracterizarea memristorilor în baza GaN, dezvoltarea și optimizarea procesului de obținere a membranelor de GaN cu posibilitatea utilizării membranelor ultrasubțiri de GaN ca memristori în electronică și nanoelectronică.

**Semnificația teoretică** prezintă demonstrarea faptului că nanomembranele în baza GaN posedă memorie, prin urmare fiind posibil de utilizat aceste structuri în electronica de nouă generație, în sisteme neuromorfe care vor fi capabile să învețe din propria experiență și calculatoare capabile de a lua singure decizii.

**Valoarea aplicativă a lucrării** constă în faptul că membranele ultrasubțiri de GaN cu grosimea stabilită de 15 nm, conform caracteristicilor curenți-tensiune efectuate, demonstrează capacitatea acestora de a fi utilizate în electronică și nanoelectronică având un comportament identic cu cel al memristorilor. Nanomembranele de GaN prezintă mecanisme de învățare, cum ar fi adaptarea sau învățarea urmată de stocarea răspunsului la un anumit stimul electric. Aceste mecanisme de învățare artificiale sunt analogice comportamentului cognitiv și de memorare, specific organismelor vii, precum și limitele de memorie. Acestea pot fi folosite ca noi tipuri de memorii în electronica digitală.

## ABSTRACT

to master thesis „Circuits of membranes based on GaN for memristive applications”

The thesis is composed from introduction, followed by three chapters, conclusions, references from 45 titles, 67 text pages, including 56 figures and 2 tables.

**Key words:** ultrathin nanomembrane, memristor based on nanostructured materials, surface charge lithography, photo-electrochemical etching, electrical characterisations, morphology characterisations, memristive applications .

**Research field** is related to nanostructuring methods of GaN material in the form of ultrathin membranes as well as ultrathin membranes for obtaining circuits of membrane for memristive applications.

**The work goal consist is** to study memristors and memristive effects of nanomembrane based on GaN, the morphology characterisations and electrical characterisations in different configurations of circuits of nanomembranes for memristive applications, to make the technological processes for optimisation process of obtaining GaN nanomembrane.

**Novelty and scientific originality** of the obtained results consists in: elaborations and characteristics of memristor based on GaN, develop and optimisations of obtaining GaN nanomembrane with possibility to use ultrathin membrane as a memristors in electronics and nanoelectronics.

**Theoretical signification** of the thesis is related to process optimization for obtaining ultrathin GaN membranes and demonstration that these membranes memory, therefore the possibility of using them for fabrication of new type of memories in digital electronics and nanoelectronics.

**Applicative value** in that GaN ultrathin membrane with thickness of 15nm, conformable the characteristics current-voltage, is demonstrated that we can use in electronics and nonvolatile memory and it is identical to the memristor. GaN nanomembranes arranged in simple networks show learning mechanisms such as habituation and dishabituation followed by storage of the response to a certain electrical stimulus. These artificial learning mechanisms are analogous to non-associate learning processes, which are identical in simple animals and human beings.

## CUPRINS

<b>REZUMAT</b> .....	2
<b>INTRODUCERE</b> .....	4
<b>1. STUDIUL LITERATURII ÎN DOMENIUL OBȚINERII NANOMEMBRANELOR ÎN BAZA GaN ȘI A DISPOZITIVELOR MEMRISTIVE</b> .....	5
1.1. Proprietățile fizico-chimice ale nitrurii de galiu și particularitățile tehnologice de procesare a GaN.....	5
1.2. Tehnologia litografiei cu sarcină de suprafață.....	11
1.3. Fabricarea nanomembranelor ultrasubțiri pe baza de GaN.....	13
1.4. Stadiul actual în domeniul dispozitivelor memristive. Memristorul.....	15
1.4.1. Elaborarea memristorilor în baza semiconductrilor și oxizilor.....	20
1.4.2. Aplicațiile memristorilor în electronică .....	26
<b>2. METODE DE STUDIU ȘI CERCETARE A MEMRISTORILOR ÎN BAZA NANOMEMBRANELOR DE GaN</b> .....	31
2.1. Echipament pentru elaborarea contactelor Ohmice.....	31
2.2. Echipament pentru tratament cu ioni de energie joasă.....	32
2.3. Echipament pentru decaparea foto-electrochimică.....	34
2.4. Echipament pentru studiul morfologiei nanostructurilor.....	35
2.5. Echipament pentru caracterizarea electrică a semiconductrilor.....	37
<b>3. FABRICAREA ȘI CARACTERIZAREA CIRCUITELOR DE MEMBRANE ÎN BAZA GaN PENTRU APLICAȚII MEMRISTIVE</b> .....	39
3.1. Fișa tehnologică pentru fabricarea circuitelor în baza nanomembranelor de GaN.....	39
3.2. Caracterizarea morfologică a nanomembranelor obținute utilizând microscopia electronică.....	47
3.3. Caracterizarea electrică a circuitelor memristive în baza nanomembranelor de GaN, analiza rezultatelor obținute și explicarea efectelor observate.....	53
<b>CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI</b> .....	61
<b>BIBLIOGRAFIE</b> .....	63
<b>DECLARAȚIA DE ONESTITATE</b> .....	67

## INTRODUCERE

Pe parcursul ultimelor două decenii evoluțiile în domeniul nitrurilor din grupul III-V au fost destul de importante, principalele descoperiri datând cu anii 90. Acestea au fost priviți ca un sistem de materiale extrem de promițătoare pentru aplicații electronice și optoelectronice.

Materialele semiconductoare în baza structurilor compușilor semiconductori  $A^{III}B^V$  au o contribuție importantă în dezvoltarea tehnologiei electronicii. O atenție sporită au atras materialele semiconductoare cu banda largă în baza nitrurilor ca dispozitive de emisie și detectare în regiunea spectrelor vizibil și ultraviolet. Nitrura de galiu (GaN) și soluțiile solide în baza ei sunt unele dintre cele mai atractive materiale pentru elaborarea dispozitivelor optoelectronice.

Pentru obținerea membranelor ultra-subțiri de GaN este utilizată tehnologia SCL, o metodă propusă pentru prima dată în cadrul Centrului National de Studiu și Testare a Materialelor. Tehnologia constă în iradierea suprafeței probei cu ioni de energie joasă și decaparea fotoelectrochimică ulterioară. Tratamentele cu ioni de energie joasă duc la crearea defectelor de suprafață care formează un strat de sarcină negativă la suprafața materialului. Stratul de sarcină negativă protejează nitrura de galiu la decaparea fotoelectrochimică.

În 1971, profesorul Leo Chua la Universitatea din California scria despre existența teoretică a unui al patrulea element component al circuitului integrat [1]. Memristorul are o rezistență ce variază în funcție de sensul și tensiunea unui semnal aplicat. În plus, el își păstrează această rezistență atunci când nu mai este alimentat. Atunci când este combinat cu alți tranzistori, memristorul poate crea circuite noi ce funcționează la fel ca circuite cu mult mai mulți tranzistori. Aceste circuite ocupă mai puțin spațiu și consumă mult mai puțină energie electrică.

Având în vedere că memristorul își amintește starea anterioară când excitația este oprită, este non-volatilă și puternic legată de rezistența de comutare, adică își memorează starea anterioară, memristorii sunt considerați a fi următoarea generație de memorii electronice. Memristorii ar putea fi utilizați în circuite logice reconfigurabile [2] sau în sistemele de neuromorfice [3] în scopul de a imita sinapsele, care sunt componentele cheie fundamentale ale sistemelor neuronale.

Scopul acestei lucrări este de a demonstra că nanomembranele de GaN semiconductoare, cu o grosime de 15 nm, se comportă ca un memristor și în diferite configurații memristorii se comportă diferit. Acest lucru constituie un pas înainte în domeniul materialelor de calcul [4], care arată că un singur material se poate executa un algoritm de calcul practic cu orice componente electronice, cum ar fi rezistențe, tranzistori sau condensatori.

## BIBLIOGRAFIE

1. CHUA, L. If it's pinched it's a memristor Memristors and Memristive Systems ed R Tetzlaff (New York: Springer) pp 17–90.2014.
2. XIA, Q. Memristor device engineering and CMOS integration for reconfigurable logic applications Memristors and Memristive Systems, ed R. Tetzlaff (New York: Springer) pp 195–221.2014.
3. JO, S.; H., CHANG; T., EBONG; I., BHADVIYA; B. B., MAZUNDER; P., and LU, W. Nanoscale memristor device as synapse in neuromorphic systems. Nano Lett. [10 1297–301.2010.](#)
4. FANG, Y.; YASHIN, V.V.; LEVITAN, S.P.; BALAZ, A.C. Pattern recognition with “materials that compute, Sci. Adv. 2, e1601114/1-10 (2016).
5. BOTTCHEER, T.; FIGGE, S.; EINFELDT, S.; HOMMEL D. GaN based diodes – epitaxial growth and device fabrication. În: Physica Status Solidi C, 2003, Vol. 0, Issue 6, p. 1846-1859.
6. GaN–Band structure and carrier concentration. Available in: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaN/>. [Accesat la 06.09.2016].
7. BOCKOWSKI, M.; GREZEGORY, I.; KRUKOWSKI, S.; LUCZNIK, B.; WROBLEWSKI, M.; et al. Gallium nitride growth on sapphire/GaN templates at high pressure and high temperatures. În: Journal of Cristal Growth, 2005, Vol. 274, p. 55-64.
8. EITING, C. J.; GRUDOWSKI, P. A.; DUPUIS, R. D. P- and N-type doping of GaN and AlGaN epitaxial layers grown by metalorganic chemical vapor deposition. În: Journal of Electronic Materials, 1998.
9. GUGUN, G.; HEATH, K.; DAMIOLA, D. Gallium Nitride (GaN). În: PHYS 57.
10. NAKANO, Y.; FUJISHIMA, O.; KACHI, T. Effect of p-typed activation ambient on acceptor levels in Mg-doped GaN. În: Journal of Applied Physics, 2004, Vol. 96, p. 415.
11. MATERIAL SCIENCE AND ENGINEERING AT UC BARKELEY. [online]. MBE Growth of GaN. Available in: <http://www.mse.berkeley.edu/groups/weber/research/ganmbe.html>. [Accesat la 15.009.2016].
12. ASHRAF, H.; KUDRAWIEC, R.; MISIEWICZ, J.;HAGEMAN, P. R. Bulk Growth of GaN by HVPE. În: CS Mantech Conference, 2009.

13. PASKOVA, T.; MONEMAR, B. HVPE growth and characterization of GaN films on sapphire with different buffers. 4-oe Всероссийское совещание Нитриды галлия, индия и алюминия - Структуры и приборы.
14. DAM, C. E. C.; GRZEDORCZYK, A. P.; HAGEMAN, P. R.; LARSEN, P. K. Method for HVPE growth of thick crack – free GaN layers. În: Journal of Crystal Growth, 2006, Vol. 290, p. 473-478.
15. Schema HVPE-Reaktor. [online]. Available in: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schema\\_HVPE-Reaktor\\_de.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schema_HVPE-Reaktor_de.png). [Accesat la 18.09.2016].
16. HVPE Edition for modeling hydride vapor phase epitaxy of GaN, AlN or AlGaIn alloy. [online]. Available in: <http://www.str-soft.com/products/cvdsim/HVPE/>. [Accesat la 20.09.2016].
17. CHEN, L. –C.; HSU, C. –Y.; LAN W. –H.; TENG, S. –Y. GaN-based light-emitting diodes with Ni/AuBe transparent conductive layer. În: Solid-State Electronics, 2003, Vol. 47, Issue 10, p. 1843-1846.
18. HEON, L.; DAVID, B. O.; JAMES, S. H. Reactive ion etching of gallium nitride films. În: Journal of Electronic Materials, 1996, Vol. 25, p. 835-838.
19. PEARTON, S. J.; ABERNATHY, C. R.; REN, F.; et al. Ar<sup>+</sup> -ion milling characteristics of III-V nitrides. În: Journal of Applied Physics, 1994, Vol. 76, p. 1210.
20. Metalorganic vapour phase epitaxy. [online]. Available in: [http://en.wikipedia.org/wiki/Metalorganic\\_vapour\\_phase\\_epitaxy](http://en.wikipedia.org/wiki/Metalorganic_vapour_phase_epitaxy). [Accesat la 21.09.2016].
21. GUGUN, G; HEATH, K.; DAMIOLA, D. Gallium Nitride (GaN) PHYS 57.
22. TIGHINYANU, I. M.; POPA, V.; SAURA, A., et al. Surface charge lithography for GaN micro- and nanostructuring. În: Proc. of SPIC, 2009, Vol. 7216, p. 72160.
23. TIGHINYANU, I. M.; POPA, V. Ultra-thin membranes of non-layered crystalline solids. În SPIE Newsroom, 6 July 2011, DOI: 10.1117/2.1201105.003718.
24. POPA, V.; VOLCIUC, O. Noi tehnologii de nanostructurare a materialelor semiconductoare pentru dispozitive electronice. În: Akademos, nr.4 (11), p.85, Decembrie 2008.
25. VOLCIUC, O.; POPA, V.; TIGHINEANU, I. Cathodoluminescence microscopy and spectroscopy of GaN epilayers microstructured using surface charge lithography. În: Journal of Applied Physics, 2006, Vol. 100, p. 023509

26. TIGHINEANU, I.; POPA, V.; VOLCIUC, O. Surface-charge lithography for GaN microstructuring based on photoelectrochemical etching techniques. În: Applied Physics Letters, vol. 86, 174102, April 2005.
27. TIGHINEANU, I.; POPA, V.; MARION, A. Ultra-Thin GaN Membranes Fabricated by Using Surface Charge Lithography. În: ECS Transactions, Vol. 35, no 6, pp. 13-19 (2011).
28. WIDROW, B. An Adaptive ADALINE Neuron Using Chemical Memistor, Technical Report TR 1553-2, 23 Oct. 1960, Stanford Electronics Laboratories Technical Report.
29. THAKOOR, S., et al., Solid State Thin Film Memistor for Electronic Neural Networks. J. of Applied Physics, 67(1990), 6, pp. 3132-3135.
30. FANO, R., et al. Electromagnetic Fields, Energy and Forces MIT Press, 1968, Chapter 6.
31. STRUKOV, D. B. et al. The missing memristor found, Nature, Vol. 453, p. 80-83 (2008).
32. STRUKOV, D.; B., GREGORY; S., SIDER; DUNCAN, R.; STEWART, and R. STANLEY WILLIAMS. The missing memristor found. Nature, 453(2008), 7191.
33. Hp memristor. [online]. Available in: [http://www.channelregister.co.uk/2011/12/27/memristors\\_and\\_mouette/](http://www.channelregister.co.uk/2011/12/27/memristors_and_mouette/). [Accesat la 23.09.2016].
34. HUTCHBY, J.; and M. GARNER. Assessment of the Potential & Maturity of Selected Emerging Research Memory Technologies. In Workshop & ERD/ERM Working Group Meeting, Barza, Italy, April 6-7, 2010.\
35. XIONGWU, HE., et all. Memristive properties of hexagonal WO<sub>3</sub> nanowires induced by oxygen vacancy migration. Nature, vol. 465, 653-856, 2014
36. BORGHETTI, J.; G. S. SIDER; P. J. KUEKES; J.J. YAN; D. R. STEWARD and R. S. WILLIAMS. Memristive' Switches Enable 'Stateful' Logic Operations via Material Implication. Nature, vol. 464, 873-876, 2010.
37. Memorii ReRAM. [online]. Available in [http://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1327289](http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1327289). [Accesat la 10.10.15].
38. MEAD, C. Analog VLSI and Neural Systems, Addison-Wesley Longman Publishing Co. Inc. Boston, 1989.
39. SUNG HYUN JO; TING CHANG; IDOHGESIT EBONG, et al. Nanoscale Memristor Device as Synapse in Neuromorphic Systems Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of Michigan, Michigan 48109



40. Depuneri în magnetron. [online]. Available in:  
[http://www.c4s.utcluj.ro/Publicatii/Theses/PhD%20Thesis\\_Robert\\_Pato.pdf](http://www.c4s.utcluj.ro/Publicatii/Theses/PhD%20Thesis_Robert_Pato.pdf). [Accesat la 25.10.16].
41. BATÎRI, M.; CIOBANU, V.; BRANIȘTE, T., MONAICO, E.; TIGHINEANU, I. Extinderea suprafeței membranelor ultra-subțiri în baza GaN în procesul de fabricare prin utilizarea litografiei cu sarcină de suprafață. ICTEI, Mai 2015.
42. OBREJA, A.; C., CRISTEA; D., MIHALACHE, I., RADOI, A.,; GAVRILA, R.; COMANESCU, F. and KUSCO, C. Charge transport and memristive properties of graphene quantum dots embedded in poly(3-hexylthiophene) matrix Appl. Phys. Lett. **105**, 2014.
43. DRAGOMAN, M.; TIGINYANU, I.; DRAGOMAN, D.; BRANISTE, T.; CIOBANU, V. GaN ultrathin suspended membrane array, Nanotechnology 27 (2016) 295204 (5pp).
44. STRUKOV, D.B; SNIDER G.S; STEWARD, D. R. and WILLIAMS, R.S. The missing memristor found Nature **453** 80–3, 2008.
45. WANG, Z.Q; XU, H.Y.; LI, X.H.; H. YU; Y.C. LIU. and X.J. ZHU. Synaptic learning and memory functions achieved using oxygen ion migration/diffusion in an amorphous InGaZnO memristor. Adv. Funct. Mater. **22**, 2759–2765 (2012).