

Fișa de prezentare a rezultatelor proiectului de cercetare

I. Codul(cifrul) și denumirea proiectului

16.80013.5007.07/Ro „Sinapse artificiale bazate pe membrane ultrafine din GaN”

II. Denumirea programului de stat, denumirea direcției strategice

Materiale, tehnologii și produse inovative

III. Obiectivele proiectului

Scopul general al acestui proiect a fost dezvoltarea tehnologiei de obținere a membranelor de nitrură de galiu (GaN) cu diferite dimensiuni, crearea elementelor memristive pe baza lor și asamblarea sistemelor capabile să efectueze cele mai simple operații de învățare.

Obiectivele propuse spre realizare au fost:

- Proiectarea și simularea circuitelor memristive bazate pe membrane de GaN cu scopul modelării mecanismelor de formare a defectelor în membrana de GaN.
- Fabricarea elementelor memristive pe baza membranelor ultrasubțiri de GaN cu diferite grosimi și design-uri, precum și pe rețele de membrane, pentru a fi utilizate în calitate de sinapse artificiale:
 - Obținerea nanomembranelor ultrasubțiri în bază de GaN utilizând metoda Litografiei cu Sarcină de Suprafață (SCL). Proiectarea rețelelor de membrane de GaN cu diferite design-uri.
 - Caracterizarea morfologică a structurilor obținute în baza nanomembranelor de GaN.
 - Studiul proprietăților electrice și investigarea efectului memristiv în nanomembranele de GaN.
- Demonstrarea în premieră a fezabilității circuitelor electronice în baza nanomembranelor de GaN capabile să îndeplinească funcții de învățare a obișnuinței la un stimul și funcții de percepție elementară.
- Efectuarea vizitelor reciproce, organizarea seminarelor și atelierelor de lucru. Conclucrarea tinerilor cercetători din ambele echipe pentru a învăța unul de la altul, să își împărtășească experiența câștigată prin lucru efectiv pe noile echipamente și tehnologii, proiectare și fabricare care sunt disponibile la IMT. Acumularea experienței practice mult mai largi în domeniul nanotehnologiei.

IV. Termenul executării

01.09.2016 - 31.08.2018

V. Volumul total al finanțării

Finanțarea planificată **235,0** (mii lei)

Executată (mii lei) **235,0** (mii lei)

2016 - 60,0 (mii lei)

2017- 100,0 (mii lei)

2018 -75,0 (mii lei)

VI. Volumul cofinanțării (mii lei)

Fără cofinanțare

VII. Organizațiile, subdiviziunile – executori ai proiectului (institut, laborator, secție, sector etc.)

Universitatea Tehnică a Moldovei, Centrul Național de Studiu și Testare a Materialelor

VIII. Organizația partener în executarea proiectului, conducătorul de proiect

Institutul Național de Cercetare – Dezvoltare pentru Microtehnologie, IMT-București, Centrul de Nanotehnologii, Prof. Mircea Dragoman

IX. Executorii

	<i>Nume, prenume, anul nașterii, titlul științific, funcția în cadrul proiectului</i>
1	Tighineanu Ion, 1955, acad., cercetător științific principal
2	Brașiște Fiodor, 1989, dr., cercetător științific stagiar
3	Postolache Vitalie, 1979, cercetător științific
4	Ciobanu Vladimir, 1990, cercetător științific stagiar

5	Pleșco Irina, 1992, cercetător științific stagiar
6	Batîri Mihail, 1992, cercetător științific stagiar
7	Bodarev Piotr, 1997, inginer
8	Pîslaru Ion, 1997, inginer

X. Sumarul activităților proiectului realizate

	<i>Activități planificate</i>	<i>Activități realizate și rezultate noi obținute în cadrul proiectului (150 de cuvinte)</i>
1.	Prepararea membranelor de GaN cu diferite grosimi și design-uri folosind litografia SCL urmata de decaparea fotoelectrochimică (PEC) a straturilor de GaN, caracterizarea morfologică a membranelor fabricate și dezvoltarea circuitelor electronice neuronale cu diverse topologii.	Au fost elaborate nanomembrane ultrasubțiri de GaN utilizând metoda Litografiei cu Sarcină de Suprafață în baza căreia a fost realizat primul memristor din GaN. A fost elaborat un model teoretic ce explică existența efectului de memristor în nanomembranele de GaN, acesta fiind datorat mecanismului de încapsulare controlată a sarcinilor spațiale, în care capcanele adânci încărcate negativ generează câmpul electric cu aceeași orientare ca și câmpul electric aplicat. Efectul este mai pronunțat atunci când cel puțin una din dimensiunile structurii este comparabilă cu lățimea regiunii sarcinilor spațiale. Dependența curentului și a tensiunii electrice în timp poate fi explicată prin migrarea indusă de câmpul electric a sarcinilor negative încapsulate spre stările de suprafață ale nanomembranei. Migrarea este observată doar pentru valori suficient de mari ale curentului și tensiunii electrice aplicate, pentru care bariera de constrângere a sarcinilor încapsulate este micșorată.
2	Fabricarea circuitelor în baza membranelor de GaN capabile să mimeze procese neuro-morfice de învățare și adaptare la stimuli externi.	Au fost elaborate circuite ce conțin una, două și trei membrane de GaN cu conexiunea electrică în paralel și în serie. S-a demonstrat că nanomembranele de GaN aranjate în rețele compuse din memristori conectați în paralel sunt capabile să efectueze operații bazate pe mecanisme de învățare și memorare a unui stimul electric.
3	Optimizarea design-ului circuitelor memristive în baza nanomembranelor de GaN și elaborarea memristorilor în bază de SnS ₂ .	S-a demonstrat existența efectului memristiv și în Sulfura de Staniu (SnS ₂), care este un material stratificat ce face parte din clasa semiconductorilor de calcogenizi ai metalelor cu banda interzisă de 2,2 eV. Materialul este aplicat în domeniul optic, având timpul de răspuns optic rapid, iar în acest proiect s-a propus de a fi studiate proprietățile electronice și anume efectul memristiv îmbinat cu proprietățile optice ale materialului. A fost elaborat un fotomemristor în bază de SnS ₂ , care este ghidat de lumina solară. Rezultatele obținute demonstrează că curentul și conductanța sunt dependente de puterea de iluminare precum și de numărul ciclurilor de tensiune electrică aplicate.
4	Optimizarea tehnologiilor de fabricare a memristorilor	S-a demonstrat că timpul de răspuns sau, cu alte cuvinte, durata procesului de adaptare la un stimul,

pentru realizarea funcțiilor de învățare a obișnuinței la un stimul conform modelului Kandell. Învățarea semnalelor de tip Pavlov și a funcțiilor de percepție elementară.

descrește odată cu conectarea în paralel a câtorva memristori, circuitul constituit din mai mulți memristori fiind capabil de a accelera procesul de învățare.

- XI. Lista lucrărilor științifice (monografii, articole, obiecte de proprietate intelectuală, teze de licență, masterat, doctorat susținute sau pregătite) cu referință la proiectul realizat

Articole în reviste internaționale cu factor de impact:

1. DRAGOMAN, M.; TIGINYANU, I.; DRAGOMAN, D.; DINESCU, A.; BRANISTE, T.; CIOBANU, V. Learning mechanisms in memristor networks based on GaN nanomembranes. *Journal of Applied Physics*. **2018**, 124, 152110. IF=2.04 (Lucrarea a fost inclusă în Colecția „Editor’s Pick”, vezi <https://aip.scitation.org/topic/collections/editors-pick?SeriesKey=jap>).
2. DRAGOMAN, M.; BATIRI, M.; DINESCU, A.; CIOBANU, V.; RUSU, E.; DRAGOMAN, D.; TIGINYANU, I. A SnS₂-based photomemristor driven by sun. *Journal of Applied Physics*. **2018**, 123, 024506. IF=2.04
3. DRAGOMAN, M.; DRAGOMAN, D.; TIGINYANU, I. Atomically thin semiconducting layers and nanomembranes: a review. *Semicond. Sci. Technol.* **2017**, 32, 033001, 19 p. IF=2.3
4. DRAGOMAN, M.; TIGINYANU, I.; DRAGOMAN, D.; BRANISTE, T.; CIOBANU, V. Memristive GaN ultrathin suspended membrane array. *Nanotechnology*, **2016**, vol. 27, 295204, (5p). IF=3.82

Comunicări la Conferințe Internaționale:

5. DRAGOMAN, M.; CIOBANU, V.; DRAGOMAN, D.; DINESCU, A.; BRANISTE, T.; TIGINYANU, I. GaN nanomembranes as memristors with self-rectification. *International Conference on Memristive Materials, Devices and Systems MEMRISYS 2017*, 3-6 aprilie 2017, Atena, Grecia.
6. TIGINYANU, I. Three-dimensional architectures of nanomaterials for multifunctional applications. Invited paper presented at the *9th International Conference on Advanced Materials ROCAM-2017*, 10-14 Iulie 2017, București, Romania.
7. TIGINYANU, I. Functional 2D and 3D architectures of nanomaterials: New avenues for applications. Plenary paper presented at the *International Semiconductor Conference CAS-2017*, 11-14 Octombrie, 2017, Sinaia, Romania.
8. TIGINYANU, I. Convergence of science and technology. Raport plenar prezentat la a *VI-a Conferință Internațională "Telecomunicații, Electronică și Informatică"*, 23-26 Mai 2018, Chișinău, Moldova.
9. RUSU, E.; DRAGOMAN, M.; CIOBANU, V.; BATIRI, M.; DINESCU, A.; DRAGOMAN, D.; TIGINYANU, I. Photomemristor based on SnS₂ crystals. *NATO Advanced Research Workshop*, 14-17 mai 2018, Chișinău, Republica Moldova.

Teze de masterat susținute:

Mihail BATÎRI - 27.01.2017 „Circuite de membrane în baza GaN pentru aplicații memristive”

Teze de doctorat susținute:

Fiodor BRANIȘTE - 16.05.2017 „Nanoarhitecturi bi- și tridimensionale în baza GaN pentru aplicații ingineresti”

Teze de doctorat în curs de realizare:

Rezultatele obținute în cadrul proiectului dat stau la baza tezei de doctorat “Rețele de nano-membrane și structuri tubulare din GaN și TiO₂ pentru aplicații în sisteme memristive și biomedicină” a doctorandului anul II Vladimir CIOBANU.

- XII. Lista propunerilor de proiecte prezentate și câștigate în cadrul concursurilor naționale și internaționale cu tângă la tematica cercetării proiectului realizat
1. Programul H2020, a fost prezentat și câștigat proiectul european NanoMedTwin “Promoting smart specialization at the Technical University of Moldova by developing the field of Novel Nanomaterials for BioMedical Applications through excellence in research and twinning”, 2018 – 2021.
 2. Proiectul bilateral STCU nr. 6222 „Nanoarhitecturi tri-dimensionale ierarhice hibride în baza aerogelurilor grafitice și compușilor semiconductori nanocristalini pentru aplicații multifuncționale”. 2017 - 2019
 3. Proiectul regional „The Danube Nano Micro Facility Network” 2017 – 2018.

XIII. Lista colaborărilor inițiate în cadrul proiectului

XIV. Lista evenimentelor organizate / la care s-a participat în cadrul proiectului

20.07.2018 Organizarea workshop-ului „Raportarea rezultatelor științifice în cadrul proiectului bilateral „Sinapse artificiale bazate pe membrane ultrafine din GaN”.

XV. Lista de mobilități efectuate în cadrul proiectului

2016:

1. Ciobanu Vladimir – 16.11.2016 – 28.11.2016
2. Pleșco Irina – 16.11.2016 – 28.11.2016

2017:

3. Ciobanu Vladimir – 02.05.17-13.05.17
4. Batîri Mihail – 02.05.17-13.05.17
5. Pleșco Irina – 06.09.2017 – 09.09.17
6. Pleșco Irina – 21.11.17 – 24.11.17
7. Tighineanu Ion – 10.07.2017 – 14.07.2017
8. Tighineanu Ion – 10.10.2017 – 14.10.2017

2018:

9. Ciobanu Vladimir – 12.03.18 – 16.03.18
10. Tighineanu Ion – 26.06.18 – 29.06.18
11. Ciobanu Vladimir – 02.07.2018 – 06.07.18
12. Pleșco Irina – 02.07.2018 – 06.07.18
13. Bodarev Piotr – 02.07.2018 – 06.07.18

XVI. Informații despre infrastructura utilizată în realizarea proiectului

Ambele echipe lucrează în domeniul nanotehnologiilor și dispun de infrastructură modernă, tehnologică și de caracterizare, ce a permis de a realiza cu succes proiectul dat. Activitatea Centrului Național de Studiu și Testare a Materialelor al Universității Tehnice a Moldovei este preponderent focusată asupra elaborării nanomaterialelor și caracterizării lor, în timp ce activitatea IMT este dedicată fabricării dispozitivelor și circuitelor micro/nano electronice. Echipele de cercetare formează un lanț complet, acoperind atât creșterea și caracterizarea nanomaterialelor, cât și fabricarea dispozitivelor și circuitelor micro-nanoelectronice și testarea acestora.

Echipamentul utilizat

1. Microscop electronic TESCAN VEGA 5130 MM dotat cu sistemă INCA Energy 200 EDX (OXFORD Instruments) pentru analiza compoziției chimice;
2. Instalația pentru decapare electrochimică “Elipor” cu celula de decapare, Potențostat/galvanostat, Termostat, Analizator de frecvență, Calculator IBM Pentium 4, soft.
3. Instalația pentru decapare electrochimică “Gill AC” cu Potențostat/galvanostat, Analizator de frecvență, Calculator IBM Pentium 4, soft.
4. Instrument pentru măsurători I-V Keithley 2400 (diapazon 0 – 1 A; 0 – 200 V) rezoluția 10 pA; 5 μV.
5. Instrument pentru măsurători I-V supersensibil Keithley 6430 (rezoluția 10 aA, 1 μV).
6. Utilaj pentru fotolitografie, oxidare, difuzie și trament termic;

7. Utilaj pentru decapare electrochimică cu iluminare in-situ și agitare magnetică a soluției;
8. Instalație de depunere în vid „Sputter-Coater” cu surse e-beam și magnetron.
9. Sistema de decapare cu plasma "CYLOS 160 RIE".

XVII. Dificultăți/ impedimente apărute pe parcursul realizării proiectului

XVIII. Relevanța rezultatelor științifice obținute (până la 200 de cuvinte).

În rezultatul cercetărilor efectuate în premieră s-a demonstrat că rețeaua de nanomembrane în baza GaN posedă proprietăți caracteristice unui dispozitiv memristiv. Elaborarea procedurilor tehnologice de creare a nanomembranelor ultrasubțiri din GaN și a memristorului în baza acestor nanomembrane permit dezvoltarea în continuare a dispozitivelor noi cu posibilități de aplicare practică în domeniul nanoelectronicii, contribuind și la dezvoltarea dispozitivelor analogice sinapselor, cu funcționalități prețioase precum învățarea și memoria. Aceste circuite și dispozitive neuromorfice au o importanță deosebită datorită avantajelor în îmbunătățirea capabilității computerelor non-von Neumann, care sunt bazate pe arhitecturi neuronale. În afară de memristorii în bază de GaN, a fost elaborat un fotomemristor în bază de SnS₂, ghidat de lumina solară. Luând în considerare că acest material este constituit din elemente abundente în natură, este importantă implementarea lui în dezvoltarea rețelelor neuronale artificiale.

XIX. Beneficiarul (ministere, instituții de stat sau private, întreprinderi etc.)

Ministerul Educației, Culturii și Cercetării
Ministerul Sănătății, Muncii și Protecției Sociale

Director de proiect: acad. Ion TIGHINEANU