

Contractor: INCDFM
Cod fiscal : RO9068280

(anexa la procesul verbal de avizare interna nr.)

De acord,
DIRECTOR GENERAL
Dr. Ionut Enculescu

Avizat,
DIRECTOR DE PROGRAM
Dr. Lucian Pintilie

RAPORT DE ACTIVITATE AL FAZEI

Contractul nr. : 10N/10.03.2016

Proiectul : Sinteza si caracterizarea materialelor nanostructurate, straturilor subtiri si heterostructurilor

Faza nr. 1 : Sinteza chimica in mediu slab bazic a nanofirelor de ZnO pentru aplicatii de tip tranzistori cu efect de camp

Termen : 15.04.2016

1. Obiectivul proiectului:

Prezentul proiect isi propune sa desfasoare studii detaliate privind sinteza materialelor multifunctionale, a nanomaterialelor si nanocompozitelor, a straturilor subtiri si heterostructurilor precum si caracterizari aprofundate privind proprietatile lor structurale, electrice, magnetice, optice, etc. cu scopul declarat de a identifica potentiale aplicatii de interes economic sau social.

2. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului:

Scopul este de a obtine noi cunostinte si de a dezvolta noi aplicatii in domenii de interes ridicat cum ar fi industriile de inalta tehnologie (electronica, optoelectronica, telecomunicatii, spatiu si securitate, senzoriala, auto, etc.), energetica (in special surse regenerabile si stocare) si medicina. Avand la dispozitie o infrastructura diversificata pentru depuneri de straturi subtiri, multistraturi si compozite complexe (PLD, pulverizare RF, diverse metode chimice, MAPLE, CVD, SPS), proiectul isi propune sa combine diverse materiale functionale, sub forma de straturi subtiri sau nano-obiecte, in arhitecturi complexe care sa duca la caracteristici imbunatatite sau la noi functionalitati derivate din diferite tipuri de cuplaje la interfete. Dintre materialele functionale se au in vedere cele cu proprietati semiconductoare, dielectrice/ feroelectrice/ multiferoice/ piroelectrice/piezoelectrice si supraconductoare. Un accent aparte va fi pus pe anduranta in exploatare, cost redus, flexibilitate, abundenta naturala a elementelor constitutive si amprenta redusa asupra mediului inconjurator

3. Obiectivul fazei:

Obiectivul prezentei faze consta in obtinerea printr-o metoda chimica a unor nanofire de ZnO in vederea integrarii acestora in dispozitive de tip tranzistor cu efect de camp.

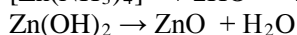
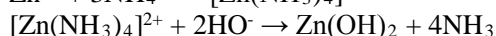
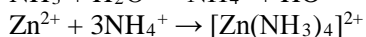
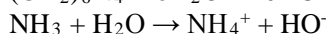
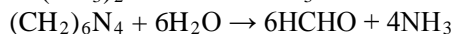
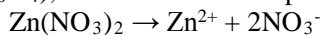
4. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului fazei:

Rezultatele estimate ale fazei sunt urmatoarele: i) sinteza chimica a nanofirelor de ZnO si investigarea proprietatilor morfologice, structurale si optice ale acestora; ii) fabricarea de electrozi micrometrici interdigitati prin fotolitografie, utilizati ulterior pentru contactarea unor nanofire singulare de ZnO prin litografie cu electroni; iii) caracterizarea electrica a nanofirelor singulare de ZnO si masurarea acestora in configuratia de tranzistor cu efect de camp avand poarta sub canalul semiconductor.

5. Rezumatul fazei: (maxim 5 pagini)

In ultimii ani, o atentie deosebita a fost acordata fabricarii unor dispozitive de tip tranzistor cu efect de camp bazat pe nanofire semiconductoare [1-4]. ZnO este un material cu o familie de nanostructuri cu morfologii extrem de variate si un semiconductor caracterizat printr-o banda interzisa directa (3.37 eV la 300 K), o energie mare de legatura a excitonilor (60 MeV) si o transmisie mare a luminii vizibile [5]. Nanostructurile de ZnO pot fi preparate printr-o gama variata de metode umede (sol-gel, crestere hidrotermala, depunere electrochimica, depunere in baie chimica, depunere autocatalitica) [6-13] si metode uscate (oxidare termica, pulverizare catodica cu magnetron, evaporare termica, epitaxie cu fascicul molecular, depunere prin laser pulsant) [14-17]. Metodele de preparare umede prezinta urmatoarele avantaje: i) nu necesita echipamente sofisticate, avand, astfel, costuri scazute, ii) implica folosirea unor materii prime usor accesibile, iii) temperaturile de lucru sunt scazute (sub 100°C) si iv) permit obtinerea unui control bun al morfologiei si proprietatilor nanostructurilor sintetizate prin simpla modificare a parametrilor experimentali. Recent, diferite studii au fost focalizate pe sinteza prin metode umede a nanofirelor de ZnO [18-23], interesul fiind motivat de posibilitatea integrarii acestor structuri in dispozitive electronice.

Lucrarea de fata isi focalizeaza atentia pe: i) sinteza chimica a nanofirelor de ZnO, ii) investigarea proprietatilor morfologice, structurale si optice ale nanofirelor obtinute si iii) caracterizarea electrica a nanofirelor singulare de ZnO si masurarea acestora in configuratia de tranzistor cu efect de camp avand poarta sub canalul semiconductor. Astfel, nanofirele de ZnO au fost sintetizate in mediu apos, utilizand intr-un amestec echimolar, o sare de zinc ($Zn(NO_3)_2$) si un compus cu proprietati bazice slabe ($(CH_2)_6N_4$), reactiile chimice implicate fiind urmatoarele:



Prin hidroliza azotatului de zinc si prin descompunerea termica a hexametilentetraamini se obtin ioni de zinc si respectiv, molecule de amoniac si formaldehida. In urma reactiilor chimice dintre acesti compusii sunt formati complexii de tip ion tetraaminozinc. La randul lor, acestia fiind instabili genereaza hidroxil de zinc a carui descompunere termica are ca rezultat formarea oxidului de zinc. Functia exacta a $(CH_2)_6N_4$ in sinteza ZnO este inca neclara. Astfel, hexametilentetraamina poate juca urmatoarele roluri: i) ca amina terciara neionica ciclica se poate comporta ca un ligand bidentat Lewis capabila sa creeze puncti intre doi ioni de zinc [24], ii) poate actiona ca un agent de modificare morfologica prin atasarea preferentiala la planele nepolare ale cristalitelor de ZnO, cresterea avand loc doar pe fata polara (001) a ZnO [25] si iii) ca baza slaba poate fi folosita ca solutie tampon de pH, fiind considerata o sursa constanta pentru eliberarea lenta a ionilor hidroxil [26]. In cazul sintezelor implicate in lucrarea de fata, reactiile chimice s-au desfasurat intr-un volum de reactie de ~300 ml apa, mentinut intr-o etuva timp de ~2 zile la temperatura de reactie de 90°C. Trebuie mentionat faptul ca in timpul prepararii nanofirelor de ZnO au fost folosite ca substraturi plachete de SiO_2/Si acoperite cu un strat dublu metalic Ti/Au. Astfel, prin pulverizare catodica in sistem magnetron a fost depus filmul de titan (grosime = 10 nm), acesta avand rolul de a imbunatati aderența filmului de aur (grosime = 100 nm) depus prin evaporare termica in vid. Pe langa rolul de substrat colector pentru nanofire al plachetelor de SiO_2/Si , filmul de aur aflat pe suprafata acestora a avut rolul de a favoriza formarea centrilor de nucleere in cresterea nanofirelor de ZnO [27].

Proprietatile morfologice, structurale si optice ale nanofirelor de ZnO obtinute au fost investigate prin microscopie electronica de baleiaj – SEM (Zeiss Evo 50 XVP), microscopie electronica analitica de inalta rezolutie – HRTEM, inclusiv difractie de electroni efectuata pe o arie selectata – SAED (JEM ARM 200F), difractie de raze X (Bruker AXS D8), reflexie (Perkin-Elmer Lambda 45 UV-VIS echipat cu o sfera integratoare) si fotoluminescenta (FL 920 Edinburgh Instruments avand ca sursa de excitare o lampa cu xenon de 450 W Xe ($\lambda_{exc}=350nm$) si monocromatoare duble atat pe fasciculul de excitare cat si pe cel de emisie). In vederea obtinerii unor nanofire singulare de ZnO pentru integrarea acestora in dispozitive de tip tranzistor cu efect de camp, a fost necesara dispersarea, prin ultrasonare in alcool izopropilic ultrapur, a manunchiurilor de fire aflate pe plachetele de SiO₂/Si. Ulterior, picaturi dintr-o suspensie de nanofire de ZnO au fost plasate pe substraturi cu electrozi interdigitati metalici de Ti/Au. Prin alegerea unor nanofire singulare de ZnO aflate intre interdigiti, capetele acestora au fost contactate de electrozii interdigitati folosind tehnica litografiei cu fascicul de electroni (instalatie cu un microscop electronic de baleiaj Hitachi S 3400 ajustat, avand un sistem de litografie de la Raith aflate intr-o camera curata de clasa 1000). De mentionat faptul ca, electrozii interdigitati metalici au fost fabricati prin fotolitografie (instalatie EVG 620 aflata intr-o camera curata de clasa 100) pe plachete de SiO₂/Si, implicand folosirea succesiva a unor pasi de tratament termic, iluminare cu radiatie in ultraviolet si dezvoltare, iar ulterior acoperirea cu un strat dublu metalic Ti/Au prin pulverizare catodica si respectiv, evaporare termica. Masuratorile electrice (Keithley 4200 SCS si Cascade Microtech MPS 150) pe tranzistorul cu efect de camp avand ca si canal un nanofir singular de ZnO au fost efectuate inainte si dupa pasivarea cu un strat de polimetilmetacrilat (PMMA) depus prin centrifugare.

Din imaginea SEM a probei preparate chimic (Fig. 1) se observa ca nanostructurile sintetizate sunt nanofire foarte subtiri si dese, avand lungimi de ~10 μm .

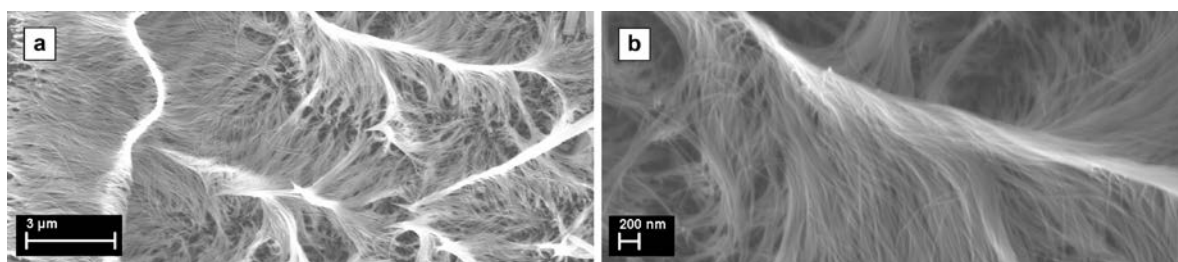


Figura 1. Imaginile SEM (la diferite mariri) ale nanofirelor de ZnO sintetizate chimic.

Difractograma de raze X a probei investigate (Fig. 2a) prezinta 3 maxime corespunzatoare indicilor Miller ai planurilor de reflexie (100), (002) si (101) asociate structurii hexagonale (wurtzite) a ZnO, precum si maxime de difractie specifice substratului (Au si Si). De asemenea, proprietatile optice ale probei obtinute in urma reactiei chimice dintre Zn(NO₃)₂ si (CH₂)₆N₄ sunt tipice pentru ZnO. Astfel, din spectrul de reflexie (Fig. 2b) valoarea benzii interzise poate fi estimata ca fiind ~3.3 eV, iar in spectrul de fotoluminescenta (Fig. 2c) se observa banda de emisie larga si intensa, cu maximul la ~ 2.2 eV, asociata, in mod uzual, defectelor de oxigen (interstitiali sau vacante) si gruparilor hidroxil incorporate in retea cristalina a ZnO sintetizat chimic in mediu apos [28, 29]. De mentionat faptul ca deoarece sinteza chimica a ZnO implica deshidratarea hidroxidului de zinc, urmele acestui compus pe suprafata ZnO au ca rezultat diminuarea sau chiar disparitia emisiei excitonice a ZnO [30].

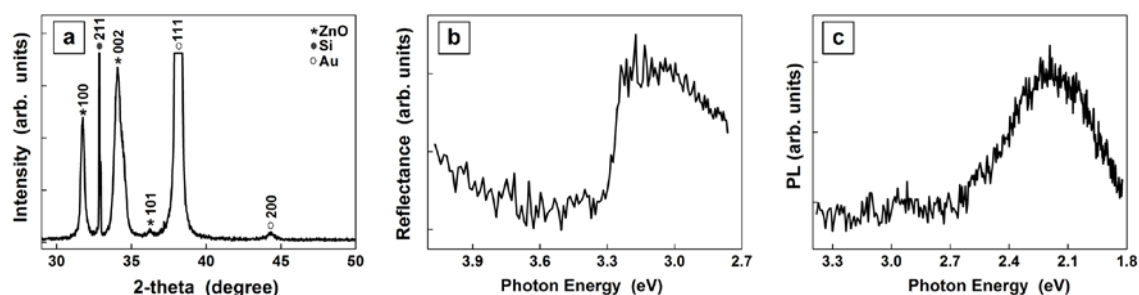


Figura 2. Difractograma de raze X (a), spectrul de reflexie (b) si spectrul de fotoluminescenta (c) ale nanofirelor de ZnO sintetizate chimic.

Prin plasarea unei picaturi dintr-o suspensie continand nanofire de ZnO pe o grila, acestea au putut fi investigate si prin TEM, HRTEM si SAED. Imaginea TEM (Fig. 3a) a relevat ca nanofirele de ZnO au

diametre de ~ 20 nm. Imaginea HRTEM (Fig. 3b) si difractograma SAED (Fig. 3b-detaliu) au confirmat informatiile obtinute prin tehnicile anterioare: structura hexagonala a nanofirelor si prezenta defectelor pe suprafata acestora.

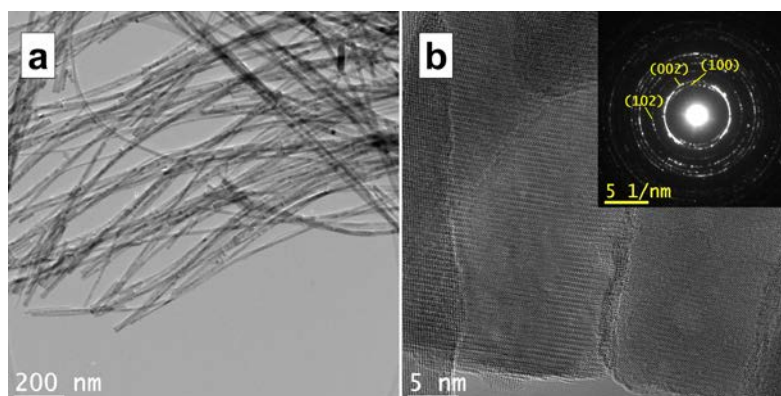


Figura 3. Imaginea TEM (a) si imaginea HRTEM (b) avand in detaliu difractograma SAED ale nanofirelor de ZnO sintetizate chimic.

In continuare, pentru integrarea nanofirelor singulare de ZnO in dispozitive de tip tranzistor cu efect de camp cu poarta situata sub semiconductor, a fost utilizata tehnica litografiei cu fascicul de electroni (EBL) in vederea contactarii nanofirelor. Etapele implicate in contactarea unui singur nanofir de ZnO sunt urmatoarele: i) plasarea unor picaturi dintr-o suspensie de nanofire de ZnO pe substraturi continand electrozi interdigitați metalici de Ti/Au, ii) identificarea unor nanofire singulare de ZnO situate intre interdigiti, iii) alegerea unui nanofir de ZnO convenabil plasat si contactarea capetelor acestuia de electrozii interdigitați. Imaginile SEM ale unui astfel de nanofir de ZnO contactat prin EBL sunt prezentate in Fig. 4, in detaliu fiind observata schema tranzistorului cu efect de câmp avand canal nanofirul de ZnO sintetizat chimic, masurat in configuratia cu poarta situata sub materialul semiconductor.

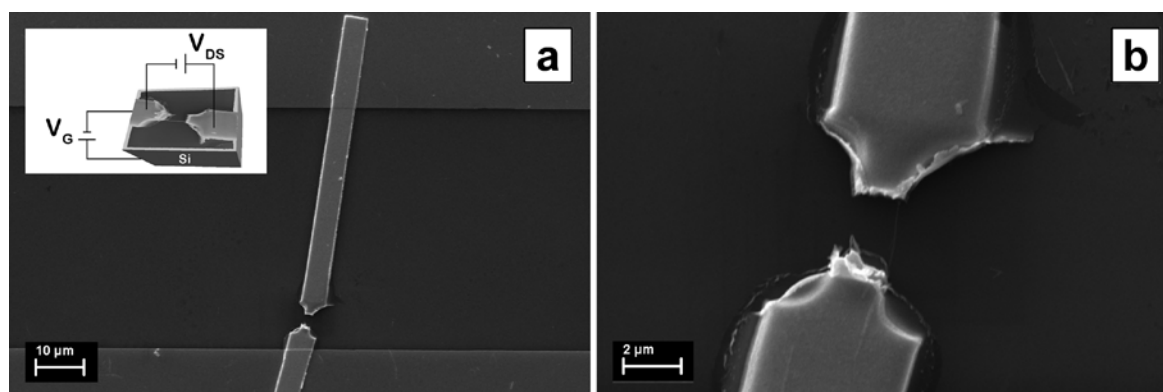


Figura 4. Imaginile SEM (la diferite maririri) ale unui nanofir de ZnO sintetizat chimic si contactat prin tehnica EBL. In detaliu: schema unui tranzistor cu efect de camp avand canal un astfel de nanofir de ZnO, masurat in configuratia cu poarta situata sub semiconductor.

Masuratorilor electrice realizate pe un tranzistor cu efect de camp avand ca si canal un nanofir de ZnO sintetizat chimic au fost efectuate inainte (Fig. 5 a-c) si dupa pasivarea (Fig. 5 d-f) cu un strat de PMMA. Avand un dispozitiv cu un diametru al canalului semiconductor de 20 nm si lungimea de 2 μm, starile de suprafata devin mult mai importante pentru proprietatile acestuia comparativ cu dispozitivele clasice bazate pe tehnologia planara. Prin acoperirea cu stratul polimeric, starile de suprafata sunt pasivate realizandu-se un control electrostatic al portii mai bun asupra purtatorilor de sarcina din canal. Caracteristicile de transfer ale tranzistorului au fost masurate prin varierea tensiunii pe poarta intre -6 V si 18 V si intre -5 V si 5 V (inainte si dupa pasivarea cu PMMA) si aplicarea a doua tensiuni sursa-drena de 0.1 V si 1 V. Caracteristicile de iesire ale tranzistorului au fost masurate prin varierea tensiunii sursa-drena intre 0 V si 3 V si intre 0 V si 1 V (inainte si dupa pasivarea cu PMMA) si aplicarea unei tensiuni pe poarta intre 0 V si 20 V, cu un pas de 4 V si intre 0 V si 2 V, cu un pas de 0.2 V (inainte si respectiv, dupa pasivarea cu PMMA). Pentru un tranzistor cu efect de camp, un parametru esential este raportul I_{ON}/I_{OFF} , care evalueaza daca tranzistorul este un bun amplificator.

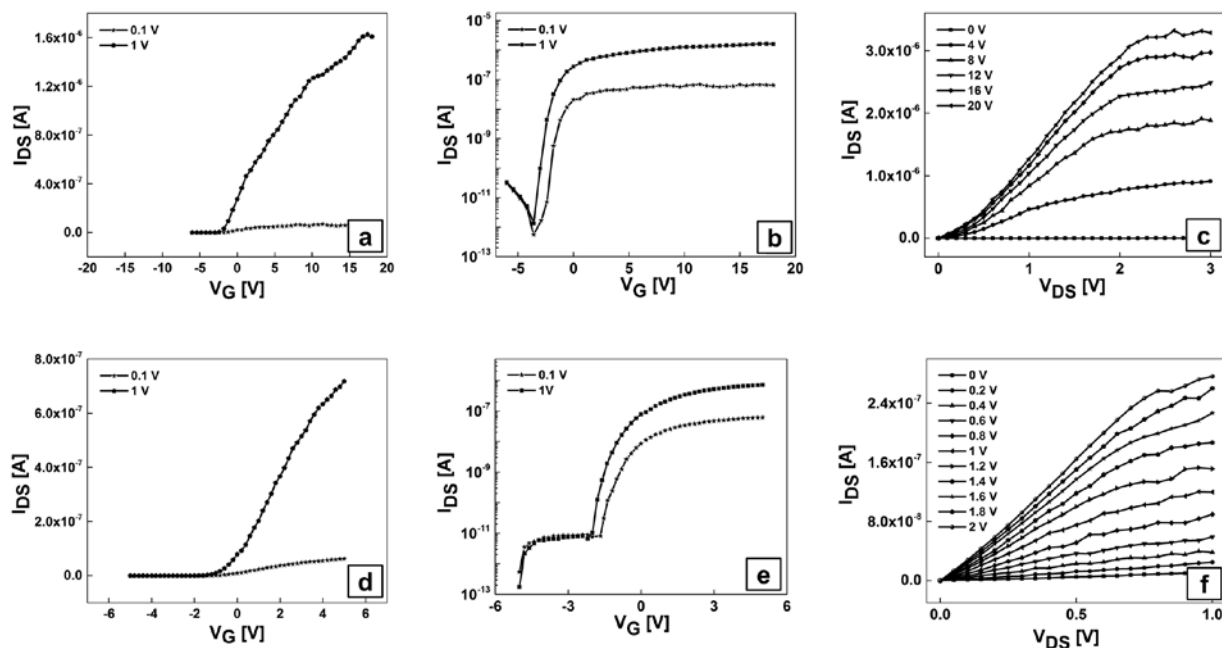


Figura 5. Caracteristicile de transfer in scara liniara (a, d), Caracteristicile de transfer in scara semi – logaritmica (b, d) si Caracteristicile de iesire (c, f) pentru un tranzistor cu efect de camp avand canal un nanofir de ZnO sintetizat chimic: inainte (a, b, c) si dupa (d, e, f) pasivarea cu PMMA.

Alti parametrii specifici tranzistorilor cu efect de camp, ce pot fi estimati din caracteristicile de iesire si de transfer sunt: I_{ON} = curentul de deschidere al tranzistorului (pentru care tranzistorul este in stare ON), I_{OFF} = curentul pentru care tranzistorul este in stare OFF (este un curent de scurgere diferit de zero), V_{TSAT} = tensiunea de prag in zona de saturatie, V_{TLIN} = tensiunea de prag in zona liniara, V_T = tensiunea de prag care trebuie aplicata pe poarta pentru ca tranzistorul sa functioneze, V_{DSAT} = tensiunea critica de trecere de la zona liniara la zona de saturatie, R_{ON} = rezistenta in zona liniara, r_o = rezistenta in zona de saturatie, S = cati mV sunt necesari pentru a creste curentul de drena cu un ordin de marime, $DIBL$ = cu cati mV se deplaseaza curba $I_{DS} = f(V_{GS})$ daca se mareste tensiunea sursa-drena cu 1 V, g_m = transconductanta, μ = mobilitatea purtatorilor de sarcina din semiconductor si n = concentratia de purtatori din semiconductor. Valorile pentru acesti parametri specifici, obtinute prin analiza caracteristicilor de transfer si de iesire ale tranzistorului (inainte si dupa pasivarea cu PMMA), sunt urmatoarele: $I_{ON} = (1.6 \times 10^{-6} \text{ A}; 7.14 \times 10^{-7} \text{ A})$; $I_{OFF} = (1.3 \times 10^{-12} \text{ A}; 1.75 \times 10^{-13} \text{ A})$; $I_{ON}/I_{OFF} = (10^6; 4 \times 10^6)$; $V_{TSAT} = (-4 \text{ V}; -1 \text{ V})$; $V_{TLIN} = (-19 \text{ V}; -5.8 \text{ V})$; $V_T = (-4 \text{ V}; -1 \text{ V})$; $V_{DSAT} = (2 \text{ V}; 0.6 \text{ V})$; $R_{ON} = (0.57 \text{ M}\Omega; 2.8 \text{ M}\Omega)$; $r_o = (3.38 \text{ M}\Omega; 9.1 \text{ M}\Omega)$; $S = (342 \text{ mV/decada}; 269 \text{ mV/decada})$; $DIBL = (1100 \text{ mV/V}; 568 \text{ mV/V})$; $g_m = (0.235 \text{ }\mu\text{S}; 0.156 \text{ }\mu\text{S})$; $g_m/d = (11.75 \text{ }\mu\text{S}/\mu\text{m}; 7.8 \text{ }\mu\text{S}/\mu\text{m})$; $\mu = (76.11 \text{ cm}^2/\text{Vs}; 87 \text{ cm}^2/\text{Vs})$; $n = (1.54 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}; 1.64 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3})$. Valorile parametrilor S si V_T evidentiaza lucrul in regim de putere mica pentru tranzistorii cu efect de camp pe baza de nanofire singulare de ZnO sintetizate chimic, avand timpi de comutare mai mici decat cei raportati in literatura pentru tranzistori pe baza de nanofire de ZnO preparate prin alte metode [31, 32]. Prin compararea valorilor parametrilor specifici ai tranzistorului cu efect de camp avand canal un nanofir de ZnO sintetizat chimic, inainte si dupa pasivarea cu PMMA, este evidenta importanta etapei de pasivare in imbunatatirea semnificativa a performantelor tranzistorului.

Referinte:

- [1] W. K. Hong, G. Jo, J. I. Sohn, W. Park, M. Choe, G. Wang, Y. H. Kahng, ACS Nano 4, 811 (2010).
- [2] C. Florica, A. Costas, A. G. Boni, R. Negrea, L. Ion, N. Preda, L. Pintilie, I. Enculescu, Appl. Phys. Lett. 106, 223501 (2015).
- [3] C. Florica, E. Matei, A. Costas, M. E. Toimil Molares, I. Enculescu, Electrochim. Acta 137, 290 (2014).
- [4] J. Maeng, W. Park, M. Choe, G. Jo, Y. H. Kahng, T. Lee, Appl. Phys. Lett. 95, 123101 (2009).
- [5] A. Janotti, C. G. Van de Walle, Rep. Prog. Phys. 72, 126501 (2009).
- [6] Y. Zhang, M. K. Ram, E. K. Stefanakos, D. Y. Goswami, J. Nanomater. 2012, 624520 (2012).
- [7] D. P. Singh, Sci. Adv. Mater. 2, 245 (2010).
- [8] S. Xu, Z. L. Wang, Nano Res. 4, 1013 (2011).

- [9] C. Florica, N. Preda, M. Enculescu, I. Enculescu, Phys. Status Solidi RRL 8, 648 (2014).
- [10] C. Florica, N. Preda, M. Enculescu, I. Zgura, M. Socol, I. Enculescu, Nanoscale Res. Lett. 9, 385 (2014).
- [11] M. Izaki, T. Omi, J. Electrochem. Soc. 144, 1949 (1997).
- [12] P. K. Baviskar, P. R. Nikam, S. S. Gargote, A. Ennaoui, B. R. Sankapal, J. Alloys Compd. 551, 233 (2013).
- [13] T. Pauporte, Design of Solution-Grown ZnO nanostructures, in Wang ZM (ed.), Toward Functional Nanomaterials, Lecture Notes in Nanoscale Science and Technology 5, Springer Science+Business Media, New-York, (2009).
- [14] D. P. Singh, Sci. Adv. Mater. 2, 245 (2010).
- [15] M. Sui, P. Gong, X. Gu, Front. Optoelectron. 6, 386 (2013).
- [16] S. Choopun, N. Hongsith, E. Wongrat, Metal-oxide Nanowires by Thermal Oxidation Reaction Technique. In: Prete P, editor. Nanowires. Croatia: InTech (2010).
- [17] S. Rackauskas, A. G. Nasibulin, H. Jiang, Y. Tian, V. I. Kleshch, J. Sainio, E. D. Obraztsova, S. N. Bokova, A. N. Obraztsov, E. I. Kauppinen, Nanotechnology 20, 165603 (2009).
- [18] V. Pachauri, A. Vlandas, K. Kern, K. Balasubramanian, Small, 6, 589, (2010).
- [19] Q. Ahsanulhaq, S. H. Kim, Y. B. Hahn, J. Phys. Chem. Solids 70, 627 (2009).
- [20] X. Sheng, C. Lao, B. Weintraub, Z. L. Wang, J. Mater. Res. 23, 2072 (2008).
- [21] G. W. Ho, A. S. W. Wong, Appl. Phys. A 86, 457 (2007).
- [22] L. E. Greene, B. D. Yuhas, M. Law, D. Zitoun, P. Yang, Inorg. Chem. 45, 7535 (2006).
- [23] L. Vayssieres, Adv. Mater. 15, 464 (2003).
- [24] I. S. Ahuja, C. L. Yadava, R. Singh, J. Mol. Struct. 81, 229 (1982).
- [25] K. Govender, D. S. Boyle, P. B. Kenway, P. O'Brien, J. Mater. Chem. 14, 2575 (2004).
- [26] A. Sugunan, H. C. Warad, M. Boman, J. Dutta, J. Sol-Gel Sci. Techn. 39, 49 (2006).
- [27] J. H. Tian, J. Hu, S.-S. Li, F. Zhang, J. Liu, J. Shi, X. Li, Z. Q. Tian, Y. Chen, Nanotechnology 22, 245601 (2011).
- [28] M. Gao, J. Liu, H. Sun, X. Wu, and D. Xue, J. Alloys Compd. 500, 181 (2010).
- [29] Q. Tian, J. Li, Q. Xie, and Q. Wang, Mater. Chem. Phys. 132, 652 (2012).
- [30] H. Zhou, H. Alves, D.M. Hofmann, W. Kriegseis, B.K. Meyer, G. Kaczmarczyk, and A. Hoffmann, Appl. Phys. Lett. 80, 210 (2002).
- [31] H. Qian, Y. Wang, Y. Fang, L. Gu, R. Lu, J. Sha, J. Appl. Phys. 117, 164308 (2015).
- [32] A. S. Dahiya, C. Opoku, R. A. Sporea, B. Sarvankumar, G. Poulin-Vittrant, F. Cayrel, N. Camara, D. Alquier, Sci. Rep. 6, 19232 (2016).

6. Rezultate, stadiul realizării obiectivului fazei, concluzii și propuneri pentru continuarea proiectului

Raportul de cercetare prezintă date experimentale noi privind sinteza chimică în mediu slab bazic și proprietățile structurale, optice și morfologice a nanofirelor de ZnO, precum și integrarea unor nanofire singulare de ZnO în dispozitive de tip tranzistor cu efect de câmp având poarta sub canalul semiconductor. S-a pus în evidență faptul că după nanofirele de ZnO releva semnaturile caracteristice acestui semiconductor (faza hexagonală, lățimea benzii interzise și banda de emisie în domeniul vizibil). Folosind electrozi interdigitați metalici de Ti/Au și prin utilizarea tehnicii EBL au fost contactate și măsurate în configurația de tranzistor cu efect de câmp având nanofire singulare de ZnO. Măsurătorile electrice realizate pe un singur nanofir de ZnO înainte și după pasivarea cu un strat de PMMA au evidențiat îmbunătățirea caracteristicilor după etapa de pasivare a starilor de suprafață (ex.: I_{ON}/I_{OFF} de la 10^6 la 4×10^6 ; V_T de la -4 V la -1 V; S de la 342 mV/decada la 269 mV/decada), tranzistorul fabricat operând în regim de putere mică și având timpi mici de comutare, caracteristici foarte importante pentru aplicații.

Obiectivul de cercetare programat pentru această fază a fost integral îndeplinit.

Parte din rezultate sunt raportate într-un articol: "High performance field effect transistors based on single ZnO nanowires fabricated by low cost methods", autori: C. Florica, A. Costas, A. Kuncser, N. Preda, I. Enculescu, ce va fi trimis spre publicare la o revistă cotate ISI.

Responsabil proiect
Dr. Adrian Crisan

Responsabili fază,
Dr. Nicoleta Preda

Dr. Camelia Florica