

NANOTEHNOLOGII NELITOGRAFICE ÎN MOLDOVA*

Academician *Ion TIGHINEANU*

NON-LITHOGRAPHIC NANOTECHNOLOGIES IN MOLDOVA

The efforts related to the development of nanotechnologies in Moldova are described, the main accents being focused on non-lithographic nanotechnologies successfully developed by the author and his colleagues over the last decade. Achievements in the creation of capacities in the field involved are presented, in particular in the creation of nanotechnological infrastructure, multidisciplinary training of students, promotion of doctoral thesis etc. It is shown that our papers published in top-rank scientific journals have been highly appreciated by the international community which is demonstrated by the increasing number of citations, selection by the NanoTechWeb.org portal of the developed novel nanotechnological approaches among the best achievements in the nano-fields, successful attraction of extrabudgetary sources of money via European competition etc.

Key words: nanotechnologies, non-lithographic nanotechnologies, nanotechnological infrastructure, nanomaterials, training of students, nanoelectronic and optoelectronic applications.

1. Infrastructura nanotehnologică

Putem afirma cu certitudine că domeniul nanotehnologiilor a fost „prorocit” în anul 1959 de profesorul american Richard Feynman, care în timpul unei lecții publice a declarat: „Există un spațiu enorm la nivelul atomilor”. Este de remarcat faptul că această afirmație fusese făcută în perioada când erau lansați primii sateliți artificiali ai Terrei, ceea ce semnala începutul explorării unui alt spațiu enorm – al celui cosmic.

În traducere din limba greacă, „nano” înseamnă „pitic” sau „mic”. Obiectele nanometrice nu numai că sunt extrem de mici, adesea fiind constituite doar din câteva molecule sau atomi, dar ele posedă proprietăți noi, uneori surprinzătoare în comparație cu obiectele macroscopice. La dimensiuni nanometrice, de pildă, carbonul devine de cca 200 de ori mai trainic decât oțelul, iar membranele constituite din câteva straturi atomare de carbon posedă conductiv-

* Articol scris în contextul cercetărilor pentru care autorul a fost ales în calitate de membru titular al AȘM, prin decizia Adunării Generale a membrilor AȘM din 6 decembrie 2012.

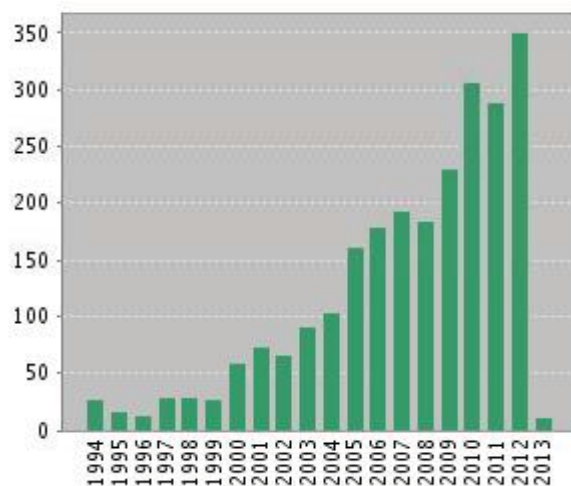


Figura 1. Evoluția în timp a numărului de citări la articolele publicate în reviste internaționale (o secvență din cadrul prelegerii publice *Nanotehnologiile – provocarea timpului*, canalul TV „Культура”, 2012).

vităte termică de 5-7 ori mai mare decât cuprul, ceea ce deschide posibilități de a evita supraîncălzirea cipurilor electronice.

Deși termenul *nanotehnologii* a fost propus încă în anul 1974 de către profesorul Norio Taniguchi de la Universitatea de Științe din Tokyo pentru a descrie precizia creării materialelor cu toleranță de nanometri (un nanometru echivalează cu o milionime de milimetru), o adevărată explozie a explorării și utilizării nanotehnologiilor s-a produs după lansarea „Noii Inițiative Nanotehnologice” („New Nanotechnology Initiative”) în SUA și a Programului european de cercetare Cadru 6, respectiv în anii 2000 și 2002.

Putem afirma cu certitudine că Republica Moldova s-a implicat plenar în dezvoltarea acestui domeniu în 2002, odată cu fondarea, în cadrul Universității Tehnice a Moldovei, a Centrului Național de Studiu și Testare a Materialelor dotat cu microscopie moderne electronice și de forță atomică, ele fiind achiziționate prin susținerea financiară din partea fundațiilor CRDF-MRDA. Ulterior, dotarea tehnică și tehnologică a Centrului a fost realizată prin donații și granturi internaționale din partea Fundației „Alexander von Humboldt”, Centrului Științifico-Tehnologic din Kiev, Ministerului Federal al Educației și Cercetării din Germania, Comisiei Europene (programele INTAS și Cadru 7) etc.

Actualmente, Centrul Național de Studiu și Testare a Materialelor dispune de o infrastructură nanotehnologică solidă ce asigură condiții adecvate nu numai pentru crearea și caracterizarea nanomaterialelor, dar și pentru elaborarea de noi dispozitive electronice și fotonice. Printre echipamentele principale putem

menționa utilajele tehnologice necesare pentru realizarea proceselor fotolitografice, inclusiv echipamentul pentru producerea măștilor litografice; instalațiile pentru nanostructurare și depuneri electrochimice de straturi subțiri; instalația de corodare dirijată în plasmă; echipamentul pentru depuneri chimice din fază de vapori asistată de plasmă, a peliculelor dielectrice de pasivare pe diverse elemente de dispozitive, inclusiv pe senzori, detectori, tranzistoare etc. În cadrul Centrului au fost dezvoltate metode de caracterizare electrică și fotoelectrică a nanomaterialelor, inclusiv la temperaturi scăzute, excitarea optică fiind asigurată de surse laser cu schimbarea dirijată a lungimii de undă în tot diapazonul vizibil al spectrului. Concomitent, unități importante de utilaj tehnologic și de caracterizare au fost achiziționate și de alte instituții din țară.

Totodată, subsemnatul (acad. I.Tighineanu – n.r.) a contribuit personal la dotarea Institutului de Fizică Aplicată cu utilaj performant pentru creșterea dozelor cuantice din compuși semiconductori. Astfel, dezvoltând cooperarea bilaterală cu Germania, am obținut o donație semnificativă de echipament de la Universitatea Christian-Albrechts din Kiel (Germania) pentru acest institut. În continuare, în anul 2009 am reușit fondarea Laboratorului de nanotehnologii în cadrul Institutului de Inginerie Electronică și Nanotehnologii (IEEN) „D. Ghițu”, înzestrat cu utilaj modern de producere a nanotemplatelor semiconductoare. Ulterior, laboratorul a fost dotat cu utilaj de creștere a straturilor subțiri prin tehnologia magnetron sputtering și de caracterizare a acestora prin metoda dispersării micro-Raman. Recent, în cadrul proiectului european Mold-Nanonet, unități de utilaj tehnologic performant a achiziționat, de asemenea, Institutul de Cercetări Științifice „ELIRI”.

2. Direcția științifică „Nanotehnologii nelitografice”

Pe parcursul ultimilor decenii au fost elaborate două metode nanotehnologice larg utilizate: prima se bazează pe asamblarea nanomaterialelor noi din molecule sau atomi (un exemplu deja clasic fiind epitaxia din fascicule de molecule), iar a doua metodă utilizează litografia cu fascicul de electroni pentru corodarea prin ferestre, ce duce la nanostructurarea spațială a materialelor. Ambele metode însă necesită utilaj sofisticat și scump. În această ordine de idei, cercetătorii au fost și sunt în căutarea noilor concepții și metode accesibile și, totodată, eficiente de nanostructurare a materialelor pentru diverse aplicații.

Reieșind din cele expuse, investigațiile noastre în domeniul nanotehnologiilor s-au bazat pe

conceptul potrivit căruia nanostructurarea dirijată a compușilor semiconductori este posibilă prin tratarea electrochimică a materialelor, preliminar iradiate cu ioni, ce modifică localizat proprietățile lor, și prin crearea condițiilor de autoorganizare a nanostructurilor. Prin urmare, n-au fost implicate nanotehnologiile litografice.

Cercetările în baza acestui concept au permis de a elabora metode noi de nanostructurare spațială a materialelor semiconductoare, în particular, metoda litografiei sarcinii de suprafață, realizată prin inducerea cu ajutorul razei focalizate de ioni la energii mici a unei sarcini negative la suprafața semiconductorului care îl protejează de corodare electrochimică (Applied Physics Letters, Vol. 86, 174102, 2005). Între anii 2007-2012 au fost propuse și realizate următoarele metode nanotehnologice întemeiate pe concepții noi:

- Metoda creării rețelelor ordonate de nanotuburi din dioxid de titan cu diametrul intern dirijat. Tehnologia a fost remarcată de site-ul NanoTechWeb.org din UK, vezi <http://nanotechweb.org/cws/article/tech/42313>, precum și de site-ul MaterialsViews.com din Germania, vezi <http://www.materialsviews.com/more-less-hollow-always-nano-titania-templates/>;

- Metoda formării rețelelor ordonate de nanotuburi metalice incorporate în matrice de semiconductor. Tehnologia a fost reflectată pozitiv de același site NanoTechWeb.org, vezi <http://nanotechweb.org/cws/article/tech/34704>;

- Metoda vizualizării directe a nanoarhitecturii spațiale a dislocațiilor într-un corp solid a fost, de asemenea, apreciată de site-ul NanoTechWeb.org din UK, vezi <http://nanotechweb.org/cws/article/tech/44967>;

- Metoda intensificării rezistenței la radiații a compușilor semiconductori prin nanostructurare a fost mediatizată de același site NanoTechWeb.org ca o noutate științifică de valoare, vezi <http://nanotechweb.org/cws/article/tech/49261>;

- Metoda de formare a membranelor ultra-subțiri de GaN suspendate pe nanocoloane de GaN, create în mod dirijat în același proces tehnologic, a avut multiple ecouri pe diverse site-uri, inclusiv pe site-ul NanoTechWeb.org, vezi <http://nanotechweb.org/cws/article/tech/49261>.

Utilizarea acestor metode a permis dezvoltarea și explicarea proceselor de formare a nanotuburilor metalice prin depunere electrochimică, elaborarea nanomaterialelor noi, printre care membranele constituite din nanotuburi de TiO₂ cu diametrul intern dirijat, rețelele bidimensionale ordonate metal/semiconductor, nanopiramidele din nitru de galiu

rezistente la radiații, membranele ultra-subțiri de GaN pentru diverse aplicații, precum studierea proprietăților lor fizice. În particular, prelucrarea nanomatricelor semiconductoare cu ioni grei la energii mari (85 MeV Kr⁺¹⁵ și 130 MeV Xe⁺²³) a rezultat în intensificarea emisiei undelor Terahertz la excitarea cu ajutorul laserului cu impulsuri de femtosecunde, ceea ce a permis un studiu sistematic al procesului de generare a undelor Terahertz în funcție de mai mulți parametri. Dependența emisiei de densitatea de excitare optică, orientarea unui câmp magnetic co-planar aplicat și unghiul azimutal al feței nanomatricii față de polarizarea excitării a identificat rectificarea optică ca mecanism responsabil de generarea undelor Terahertz (Applied Physics Letters, Vol. 97, 181921, 2010).

A fost observat, studiat și explicat fenomenul retroreflexiei luminii în probe nanoporoase puternic absorbante de InP cu o topologie de plasă (Optics Letters, Vol. 36, no 16, pp. 3227-3229, 2011). Un alt rezultat important al cercetărilor noastre, publicat în reviste cu factor de impact, este demonstrarea fezabilității utilizării materialelor nanocompozite semiconductor-oxid în calitate de mediu activ al laserelor aleatoare. În cazul dat, împrăștierea puternică a luminii, necesară pentru formarea micro-cavităților, este asigurată de fluctuațiile în spațiu ale indicelui de refracție al mediului poros, iar emisia și amplificarea radiației electromagnetice se datorează ionilor de pământuri rare sau ionilor de tranziție impregnați în materialul nanocompozit. Totodată, s-a demonstrat că explorarea modurilor de emisie în micro-tetrapozi de ZnO poate fi utilizată pentru determinarea dependenței de temperatură a dispersiei indicelui de refracție în regiunea rezonanței excitonice (Applied Physics Letters, Vol. 95, 171101, 2009). Un succes remarcabil al echi-

pei, atins în colaborare cu parteneri din Germania și SUA, este elaborarea LED-urilor pentru spectrul UV în baza rețelelor de nanofire de ZnO depuse electrochimic la temperaturi relativ scăzute pe substraturi de p-GaN (ACS Applied Materials & Interfaces, Vol. 2, no 7, pp. 2083-2090, 2010).

Rezultatele investigațiilor teoretice, experimentale și metodele nanotehnologice elaborate au permis fondarea direcției științifice „Nanotehnologii nelitografice” în baza tratării cu ioni și creării condițiilor de autoorganizare, precum și a școlii științifice deja recunoscute nu numai la noi în țară. Sunt mândru de cei 16 doctori și doctori habilitați în științe, care au pregătit și au susținut tezele de doctorat sub conducerea și îndrumarea mea, iar astăzi fac cercetare de performanță.

După cum ne-am convins, rezultatele obținute de cercetătorii noștri sunt evaluate la înalta lor valoare de comunitatea științifică internațională. Primul argument în acest sens este publicarea articolelor noastre științifice în cele mai prestigioase reviste din domeniu (*Nanotechnology*, *Applied Physics Letters*, *Journal of Applied Physics*, *Physical Review B*, *Semiconductor Science and Technology*, *Electrochemical and Solid-State Letters*, *Physica Status Solidi* etc.), inclusiv solicitarea prezentării lucrărilor de sinteză în reviste internaționale și în cadrul forumurilor științifice din domeniu. De exemplu, Referatul „Surface Charge Lithography: Maskless Nanofabrication based on Surface Radiation Defects (Invited Paper)” a fost prezentat la *E-MRS Fall Meeting 2012*, Warsaw, Poland, September 17-21, 2012; Referatul „Focusing elements based on photonic metamaterials consisting of nanotubular structures and multilayer rods (Invited Paper)” – la *International Conference ROMOPTO-2012 „Micro- to Na-*

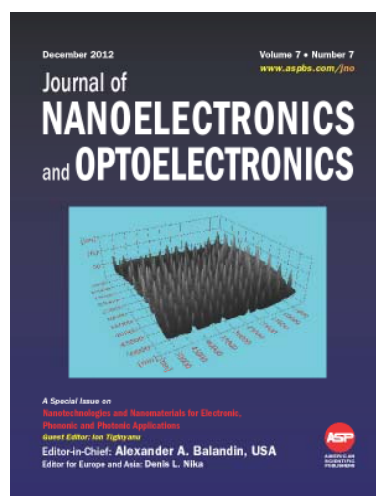
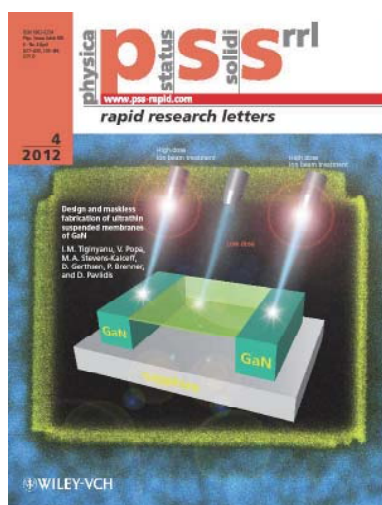


Figura 2. Coperta revistei *Physica Status Solidi RRL* din Germania și a revistei *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics* din SUA

no-Photonics III”, Bucharest, Romania, September 3-6, 2012; Referatul „Maskless nanoscale fabrication by using negative charge direct writing (Invited paper)” – la „2012 International Workshop on Advanced Nanovision Science”, Research Institute of Electronics, Shizuoka University, Hamamatsu, Japan, January 23-24, 2012; Referatul „Surface charge lithography for GaN micro- and nanostructuring (Invited paper)” – la *SPIE Photonics West Conference*, Report 7216-34, January 24-29, 2009, San Jose, California, USA; Referatul „Nanoporous III-V and II-VI Semiconductor Compounds (Invited paper)” – la *International Conference on Surfaces, Coatings and Nanostructured Materials*, July 9-11, 2007, Algarve, Portugal (<http://www.nanosmat.org/keynotes.asp>) etc.

Numai între anii 2007-2012, împreună cu colegii mei, am publicat 3 monografii în limba engleză, 78 de articole în reviste internaționale recenzate, un articol în Enciclopedia UNESCO *Encyclopedia of Life Support Systems: Nanoscience and Nanotechnologies* (2012) (<http://www.eolss.net/Sample-Chapters/C05/E6-152-51-00.pdf>), de asemenea, am obținut 8 brevete de invenție și am prezentat 14 referate invitate la conferințe internaționale și seminare organizate de universități și centre științifice din diverse țări. Elaborările noastre au fost distinse cu 5 medalii de aur și 2 de argint la expoziții internaționale, inclusiv metoda nanotehnologică de formare a rețelelor ordonate de nanotuburi din dioxid de titan cu diametrul intern dirijat a fost distinsă cu Medalia de Aur la Expoziția EUREKA-2011 din Bruxelles și Premiul special „Pentru cea mai bună invenție în domeniul nanotehnologiilor” la Expoziția Specializată „Arhimede” din or. Moscova. Actualmente această invenție se implementează la Centrul Național de Studiu și Testare a Materialelor în scopul elaborării dispozitivelor nanoelectronice.

De o înaltă prețuire internațională se bucură și versiunea modificată a litografiei sarcinii de suprafață care a stat la baza elaborării în premieră a membranelor ultra-subțiri de nitrură de galiu și este fezabilă pentru nanostructurarea tridimensională a materialului. În primăvara anului 2012, metoda respectivă a fost plasată pe coperta revistei internaționale *Physica Status Solidi – Rapid Research Letters* din Germania. Fiind coordonator al Programului de Stat „Nanotehnologii și nanomateriale” (2009-2012), recent am promovat publicarea rezultatelor fundamentale într-un volum special al revistei științifice din SUA *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics* (Vol. 7, nr. 7 din decembrie 2012, vezi <http://www.aspbs.com/jno.htm>) (figura 2).

Conform datelor Institutului de Informație Științifică din SUA, numărul de citări la articolele publicate de subsemnat, în calitate de autor sau coautor, în reviste internaționale depășește cifra de 2000 și este în continuă creștere.

Am reușit să promovăm o imagine pozitivă Republicii Moldova și prin prelegerea publică *Nanotehnologiile – provocarea timpului*, ținută în cadrul programului „Academia” în martie 2012 la invitația canalului TV „Культура” al Federației Ruse (http://tvkultura.ru/video/show/brand_id/20898/video_id/155723) (figura 1). Prelegerea respectivă a fost înalt apreciată de organizatori, ea fiind ulterior retransmisă de canalele TV „Культура” și „РТР Планета”. Vom specifica că în anii precedenți, în cadrul programului „Academia”, au ținut prelegeri publice acad. Jores Alferov, laureat al Premiului Nobel în fizică, profesorul Serghei Karița, personalitate bine cunoscută și la noi în țară, academicienii Vladimir Skulachev și Konstantin Skryabin – experți de talie mondială în biochimie și bioinginerie etc.

3. Colaborarea internațională. Proiectul Mold-Era

Realizările noastre se datorează, în mare parte, cooperării internaționale. Anume prin granturi internaționale am reușit să achiziționăm unități de utilaj modern, să participăm la prestigioase forumuri științifice internaționale și, cel mai important, să ridicăm nivelul cercetării științifice la noi acasă. *Exelența în cercetare* nu este o lozincă pentru noi, ci a devenit un mod de viață. În anii '90 ai secolului trecut personal am realizat câteva proiecte științifice în Germania, SUA, Italia și, concomitent, am deschis posibilități similare și pentru membrii echipei noastre. În toamna anului 2002, de exemplu, tânărul absolvent al UTM Veaceslav Popa a plecat pentru trei luni în SUA, unde a învățat arta studierii obiectelor nanometrice cu ajutorul microscopelor electronice și de forță atomică. Trainingul pentru dânsul a fost de un bun augur. Revenind acasă, colegul nostru a lucrat insistent asupra tezei de doctor în științe tehnice, pe care a susținut-o cu brio în decembrie 2005. Ulterior, a câștigat prestigioasa bursă „Alexander von Humboldt”. Au urmat 2 ani de cercetare științifică la Universitatea Tehnică din Darmstadt, Germania, în condiții tehnologice de excelență, după care tânărul savant iarăși a revenit acasă, de data aceasta aducând și el donații de utilaj performant, dar și o experiență europeană deosebit de valoroasă.

Această istorie de succes se repetă în cazul tânărului doctor în științe Eduard Monaico, care după absolvirea UTM a realizat un training la fir-

ma Oxford Instruments din Londra, Marea Britanie, iar după susținerea cu succes a tezei de doctorat a câștigat aceeași bursă „Alexander von Humboldt”. Actualmente el implementează un proiect științific pentru o perioadă de 2 ani la Universitatea din Hamburg, Germania. Proiecte științifice în Germania au realizat și alți tineri cercetători din echipă: dr. Victor Zalamai – proiect Humboldt la Universitatea din Karlsruhe, dr. Olesia Volciuc – proiect NATO la Universitatea Tehnică din Darmstadt, dr. Lilian Sirbu – proiect DFG la Universitatea din Kiel. Merită a fi menționat și succesul doctorului habilitat Oleg Lupan, care după deplasări extinse în SUA și Franța a câștigat recent bursa „Alexander von Humboldt” și următorii doi ani va realiza un proiect nanotehnologic de anvergură la Universitatea din Kiel, în cadrul căruia va elabora unele elemente de dispozitiv în baza nanostructurilor din oxid de zinc.

Voi specifica și importanța proiectului european MOLD-ERA care reunește parteneri din Marea Britanie, Germania, Israel și Republica Moldova, fiind primul proiect PC7 în care țara noastră, reprezentată de Institutul de Inginerie Electronică și Nanotehnologii „D. Ghițu”, are rolul de coordonator. Demarat în noiembrie 2010, cu o durată de 30 de luni, proiectul MOLD-ERA are un impact semnificativ în ceea ce privește extinderea infrastructurii existente în domeniul nanotehnologiilor, furnizarea unui prog-

ram modern de formare în nanobioinginerie pentru cei tineri și acordarea de asistență cercetătorilor și personalului din instituțiile științifice, pentru o mai bună înțelegere a regulilor PC7 prin intermediul seminarelor de instruire.

Proiectul MOLD-ERA a avut un impact pozitiv și în cadrul Conferinței Internaționale de Nanotehnologii și Inginerie Biomedicală (7-8 iulie 2011). Acest eveniment s-a produs în premieră la Chișinău, reunind 150 de participanți din 17 state ale lumii, inclusiv din Germania, Franța, Marea Britanie, Spania, Elveția, Statele Unite ale Americii, Japonia, Israel, România, Rusia, Ucraina, Republica Moldova etc. A doua ediție a Conferinței Internaționale de Nanotehnologii și Inginerie Biomedicală este programată la Chișinău pentru 18-20 aprilie curent, fiind suplimentată de Simpozionul moldo-german în domeniul nanomaterialelor noi pentru aplicații electronice, fotonice și biomedicale (www.icnbme.sibm.md/).

4. Concluzii

Pe parcursul ultimilor ani, *Direcția nanotehnologiilor nelitografice* a cunoscut o dezvoltare ascendentă în țara noastră, fiind susținută atât prin Programul de Stat „Nanotehnologii și nanomateriale”, cât și prin realizarea unor importante proiecte europene ca Mold-Era și Mold-Nanonet. Ca rezultat, a fost creată o infrastructură modernă de echipament, a fost instruită o generație nouă de tineri savanți – experți în domenii multidisciplinare, care au trecut prin traininguri internaționale și au acumulat experiența necesară pentru dezvoltarea în continuare a cercetărilor.

Concomitent, crește numărul de teze de doctorat în domeniul „nano”, realizate și susținute în Republica Moldova. Este în permanentă creștere și citarea publicațiilor semnate de cercetătorii noștri. În ultimii ani au fost inițiate mai multe proiecte multidisciplinare și a fost lansată Conferința Internațională de Nanotehnologii și Inginerie Biomedicală. Nanotehnologiile au prins rădăcini în țara noastră, iar capacitățile deja create ne însuflă încrederea că ele vor fi dezvoltate și mai departe atât în aspect fundamental, cât și în cel aplicativ. Acest nou domeniu de cercetare, mai mult ca oricare altul, urmează să-și aducă contribuția la dezvoltarea unei economii bazate pe cunoaștere.



Eudochia Zavtur. *Renaștere*. 2011, 900x900 mm, u/p