

NANOTEHNOLOGIILE SCHIMBĂ LUMEA

Academician **Ion TIGHINEANU**
Academia de Științe a Moldovei

NANOTECHNOLOGIES CHANGE THE WORLD

Summary. Nanotechnologies enable one to find solutions for most stressing problems of civilization – depletion of natural resources, environmental pollution, global warming, improvement of medical treatment, mitigation of the consequences of natural disasters. This work presents some aspects of the history of nanotechnologies, starting from use in the Middle Ages of stained glass in churches and cathedrals and finishing with modern multifunctional systems. Along with this, some concrete achievements are described such as development of nanometer-scale electronic devices, connecting photonic systems to nanoelectronic ones, implementation of nanomaterials in biomedicine etc.

Keywords: Nanotechnologies, nanomaterials, biomedicine, nanoelectronics, photonics.

Rezumat. Nanotehnologiile vin cu soluții pentru cele mai stringente probleme ale civilizației – epuizarea resurselor naturale, poluarea mediului ambiant, încălzirea globală, eficientizarea tratamentului medical, diminuarea consecințelor calamităților naturale. În lucrarea dată sunt prezentate aspecte din istoria nanotehnologiilor, începând cu utilizarea vitraliilor în biserici și catedrale încă din Evul Mediu și terminând cu sisteme multifuncționale moderne. Pe lângă aceasta, sunt descrise și realizări concrete, cum ar fi crearea dispozitivelor electronice cu dimensiuni nanometrice, conectarea sistemelor fotonice la cele nanoelectronice, implementarea nanomaterialelor în biomedicină etc.

Cuvinte-cheie: Nanotehnologii, nanomateriale, biomedicină, nanoelectronică, fonică.

1. INTRODUCERE

În condițiile lumii moderne, progresul economic depinde, în primul rând, de gradul de mobilizare și utilizare tot mai intense a resurselor proprii – umane, materiale, financiare. Dat fiind faptul că Republica Moldova este limitată în materii prime și practic nu dispune de surse tradiționale de energie, șansa de a dezvolta o economie prosperă ne poate fi oferită prin plasarea accentelor pe utilizarea potențialului uman de înaltă calificare, capabil să creeze produse high-tech cu o valoare adăugată bine pronunțată. Din acest punct de vedere, se impune dezvoltarea nanotehnologiilor care actualmente formează scheletul domeniului high-tech, de necesitatea implementării unei culturi tehnologice în societate, de vitalitatea abordării multidisciplinare în pregătirea cadrelor ingineresti etc.

Nanotehnologiile posedă un potențial inovativ nelimitat, produsele lor fiind create prin utilizarea unor cantități infime de materie primă, adesea doar în baza unor atomi sau molecule. Micșorarea dimensiunilor rezultă în noi proprietăți sau funcționalități care stau la baza elaborării de structuri inovative. „Cu cât mai mic, cu atât mai voinic” – acesta este motto-ul nanotehnologiilor, având în vedere că unele materiale, precum este carbonul, la dimensiuni de nanometri sunt

de circa o sută de ori mai trainice decât oțelul.

Nanotehnologia este un domeniu multidisciplinar care reflectă abilitatea omului de a transforma materia prin manipularea și ordonarea cu precizie a atomilor și moleculelor pentru a construi nanostructuri, iar din aceste nanostructuri a crea nanoproduse, adică nanodispozitive și nanomașini (e.g. nanoroboți sau nanoboți). Nanotehnologia, în esență, permite controlul formei și dimensiunii materialelor la scară nanometrică. Menționăm că „nano” în limba greacă înseamnă „pitic”, iar 10 atomi de hidrogen, așezați unul lângă celălalt, ar forma un lanț cu dimensiunea de 1 nm. Un nanometru reprezintă o milionime din milimetru sau o miliardime din metru ($1 \text{ nm} = 10^{-6} \text{ mm} = 10^{-9} \text{ m}$).

2. DIN ISTORIA DEZVOLTĂRII NANOTEHNOLOGIILOR

Probabil că primele aplicații nanotehnologice revin făurarilor de sticlă colorată din Evul Mediu. Sticla, care conținea nanoparticule din aur sau argint, datorită rezonanței plasmonice absorbea lumina vizibilă în unele porțiuni ale spectrului, astfel aducând în biserici și catedrale, unde a și fost pe larg implementată, o atmosferă misterioasă suplimentată de sentimente înălțătoare. Desigur, făurarii au descoperit sticla co-

lorată fără a avea vreo explicație pentru proprietățile enigmatice observate.

Potențialul fascinant al nanotehnologiilor a fost prezis de ilustrul savant american Richard Feynman, Laureat al Premiului Nobel pentru contribuția sa la dezvoltarea electrodinamicii cuantice. La 29 decembrie 1959, în cadrul unei lecții publice în fața Societății Americane de fizică, Feynman a declarat: „There is plenty of room at the bottom” (Există un spațiu enorm la nivelul atomilor), descriind posibilitatea manipulării atomilor și moleculelor pentru a forma noi materiale și chiar a prezis scrierea Enciclopediei Britanice pe măgălia unui ac. Surprinzător este faptul că frază istorică „There is plenty of room at the bottom” a fost pronunțată tocmai atunci când erau lansati primii sateliți ai Pământului, când omenirea era entuziasmată de oportunitatea cuceririi unui spațiu fără hotar – cel cosmic.

Termenul „nanotechnology” a fost utilizat pentru prima dată în 1974 de profesorul japonez N. Taniguchi. În 1981 a fost inventat microscopul de tunelare, iar peste cinci ani – microscopul de forțe atomice, ambele aparate demonstrând ulterior capacitatea de a vizualiza molecule și chiar atomi. În 1986 Eric Drexler din SUA folosește termenul „nanotechnology” în cartea sa „Motoare de creație: Era viitoare a nanotehnologiei”, considerată de majoritatea savanților ca fiind cursul de bază al nanotehnologiei.

Dezvoltarea vertiginoasă a nanotehnologiilor a început în anul 2000, odată cu lansarea de către președintele Bill Clinton a Noii Inițiative Naționale pentru Nanotehnologii în SUA („New Nanotechnology Initiative”). În anul 2002 nanotehnologiile au fost incluse în lista domeniilor prioritare ale Programului UE Cadru 6. La conferința de lansare a Programului comunitar Cadru 6 de la Bruxelles, la care am avut fericirea de a fi printre participanți, a fost menționată importanța strategică a nanotehnologiilor pentru dezvoltarea unei economii bazate pe cunoaștere și inovare, pentru prosperarea social-economică a țărilor.

Întâmplător sau nu, dar anul nașterii nanotehnologiilor în Republica Moldova poate fi considerat același, 2002, când au fost procurate primele aparate moderne: microscopul electronic cu baleaj și microscopul de forțe atomice. Aceste două aparate au fost achiziționate de Centrul Național de Studiu și Testare a Materialelor, creat în cadrul Universității Tehnice a Moldovei cu sprijinul unui grant câștigat prin concurs de la CRDF-MRDA. Odată cu crearea Centrului nominalizat, subsemnatul a antrenat în cercetare studenți ai Catedrei de Microelectronică și Inginerie Biomedicală, care cu timpul au devenit doctori în științe: Veaceslav Popa, Eduard Monaico, Lilian Sirbu, Olesia Volciuc, Sergiu Albu, Mihai Enachi ș.a. Ac-

tualmente majoritatea dintre ei continuă cu succes investigațiile în domeniul nanotehnologiilor și nanomaterialelor, fie acasă sau în laboratoare științifice din țări occidentale.

În decursul unei perioade de timp relativ scurte, nanotehnologiile au trecut prin cinci generații de produse și procese de producere: nanostructuri pasive; nanostructuri active; rețele din nanosisteme, arhitecturi ierarhice, nanorobotică; dispozitive create prin design molecular; tehnologii convergente la intersecția nano-bio-info pentru crearea sistemelor multifuncționale complexe. Astăzi produsele nanotehnologice se regăsesc pe piețele internaționale în cele mai diverse domenii: cosmetică, medicină, protecția mediului ambiant, tehnologia informației și comunicațiile, industria auto, transportul aerian, industria textilă etc.

3. ENCICLOPEDIA BRITANICĂ, SCRISĂ PE MĂGĂLIA UNUI AC

Dezvoltarea nanotehnologiilor au un impact direct asupra dezvoltării electronicii, tehnologiilor informaționale și comunicațiilor. Actualmente numărul de tranzistori pe un singur cip se dublează la aprox. 18 luni. Dacă în anul 1971 procesoarele Intel 4004 aveau la bază integrarea pe cip a dispozitivelor cu dimensiuni de 10 μm, în 2002 dimensiunile fiind de 180 nm, atunci de-a lungul anilor aceste dimensiuni s-au redus până la 14 nm. De menționat, că telefoanele mobile *iPhone 6s* și *iPhone 6s Plus*, produse de Apple Inc., au la bază procesoare Intel cu dimensiunile nanodispozitivelor pe cip de 14 nm. În iulie 2015 IBM a anunțat elaborarea primelor tranzistoare funcționale cu dimensiunile de doar 7 nm. Evident că reducerea dimensiunilor dispozitivelor pe cip a revoluționat electronica, aducând pe piață echipamente electronice cu dimensiuni foarte mici, dar totodată cu performanțe impresionante față de cele precedente. Interesant este că numărul de tranzistori pe un singur cip a depășit cifra de 7 miliarde (egală cu numărul locuitorilor pe planeta noastră!).

Astăzi se vorbește despre posibilitatea elaborării dispozitivelor electronice cu dimensiunea de 5 nm, ceea ce este doar de două ori mai mare decât diametrul unei molecule ADN. La așa dimensiuni materia demonstrează proprietăți cuantice, de exemplu se poate manifesta efectul de tunelare cuantică a electronilor prin poarta logică. În consecință, elaborarea și implementarea nanodispozitivelor cu dimensiunea de 5 nm va dura în timp, ceea ce consemnează fără echivoc sfârșitul epocii Legii lui Moore, conform căreia numărul de tranzistori plasați pe un circuit integrat se dublează aproximativ la fiecare doi ani.

Dar care ar fi limita de jos a dimensiunilor unui

transistor electronic? Probabil că limita de jos va fi atomul, cel puțin la o etapă intermediară. Se merită de menționat, în context, că cercetătorii australieni au demonstrat, în condiții de laborator, un transistor electronic construit în baza unui nanocristal constituit doar din 7 atomi de siliciu (<http://www.dailytech.com/article.aspx?newsid=18476>), iar în 2012 un grup de cercetători din Australia, Coreea de Sud, și SUA au demonstrat primul transistor în baza unui singur atom [1]. În contextul noilor salturi tehnologice, fără îndoială că Enciclopedia Britanică va putea fi scrisă pe măgălia unui ac, așa cum a prezis multe decenii în urma savantul american Richard Feynman.

4. NANOTEHNOLOGIA FACILITEAZĂ „MARIAJUL” DINTRE FOTON ȘI ELECTRON

Astăzi este dificil de imaginat cum ar arăta lumea fără lumina laserelor. Interesant este că primele articole științifice dedicate inventării laserelor în baza diferitor medii au fost respinse de mai multe reviste internaționale din domeniu, sursele de lumină monocromatică și coerentă fiind percepute, la intersecția deceniilor cinci și șase ale secolului trecut, mai mult ca ceva exotic și fără utilitate, decât ca elaborare tehnologică de mare perspectivă pentru implementare în practică.

Inventarea laserelor a adus deja câteva premii Nobel în domeniul fizicii. În conformitate cu datele oficiale, elaborarea primului laser a avut loc în anul 1961, fapt ce a adus Premiul Nobel, în 1964, savanților sovietici Nikolai Basov și Alexandr Prokhorov, precum și profesorului Charles Townes din SUA. În anul 2000 de Premiul Nobel s-a învrednicit savantul rus Jores Alferov pentru contribuția sa semnificativă la dezvoltarea heterostructurilor de semiconductori, utilizate, în particular, la elaborarea laserelor cu corp solid, iar relativ recent, în 2014, Premiul Nobel pentru fizică a fost decernat savanților japonezi Shuji Nakamura, Isamu Akasaki și Hiroshi Amano pentru inventarea, cu peste 20 de ani în urmă, a diodelor laser cu emisie de lumină albastră.

La elaborarea surselor de lumină laser au contribuit și savanții din Republica Moldova. În special, profesorul universitar Viorel Trofim de la Universitatea Tehnică a Moldovei a realizat teza de doctor în științe la Sankt-Petersburg sub îndrumarea academicianului Jores Alferov, iar doctorul habilitat Alexei Sirbu a reușit, la intersecția deceniilor opt și nouă ale secolului trecut, să dezvolte tehnologii de creare a laserelor în cadrul UTM, pentru ca ulterior să-și continue activitatea în Elveția.

Recent, prof. Pallab Bhattacharya și colegii săi de la Universitatea din Michigan, SUA, au anunțat elaborarea unei diode laser, a cărei funcționare nu se bazează pe electroni, ci pe polaritoni supuși condensării Bose-

Einstein (polaritonii reprezintă excitații proprii ale mediului, numite în literatura de specialitate excitoni, cuplați cu fotonii) [2]. Printre principalele avantaje ale laserului polaritonic se poate menționa faptul că densitatea curentului de prag, necesară pentru excitarea diodei, este extrem de mică. În plus, în comparație cu laserele obișnuite, emisia laserului polaritonic poate fi modulată la frecvențe mult mai mari. Pentru noi este important că teoria fenomenului de condensare Bose-Einstein a excitonilor și biexcitonilor în corpuri solide a fost în premieră propusă și dezvăluită, cu mulți ani în urmă [3], de academicianul Sveatoslav Moscalenco, unul dintre puținii cercetători moldoveni distinși cu Premiul de Stat al fostei URSS în domeniul științei și tehnicii.

Așadar, astăzi laserul a devenit un atribut al existenței noastre, fiind implementat în cele mai variate sfere – de la tehnica audio-video, păstrarea și transmiterea informației, până la diverse dispozitive utilizate în cercetare, medicină, industrie etc. Cu ajutorul unui fascicul laser pot fi transmise, concomitent, zeci de mii de programe de televiziune sau zeci de milioane de conversații telefonice. Astăzi fasciculul de lumină laser „dorește cu insistență” să penetreze pe cip, să muncească „cot la cot” cu electronul.

Problema stă în faptul că dispozitivele nanoelectronice de pe cip au dimensiuni foarte mici, actualmente de 14 nm, iar lumina vizibilă are o lungime de undă de 30-50 de ori mai mare. În așa condiții interacțiunea luminii doar cu unele dispozitive de pe cip este exclusă, deoarece unda de lumină va acoperi, ca o lebădă cu aripile întinse, multe sute de dispozitive, interacționând concomitent cu fiecare dintre ele. Cercetările intense din ultimul deceniu au permis savanților să elaboreze tehnologii întru promovarea „mariajului” dintre fotoni și electroni pe cip.

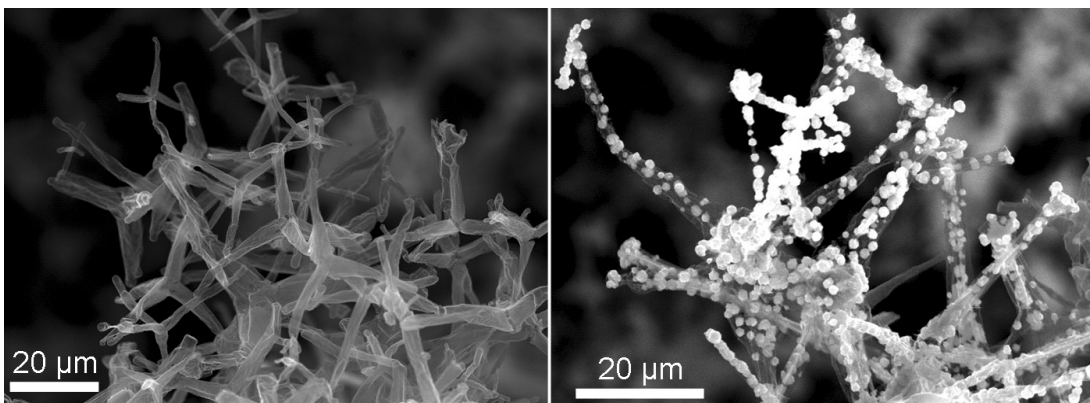
În anumite condiții, la interfața metal-dielectric, este posibilă cuplarea undelor electromagnetice cu oscilațiile colective ale electronilor – plasmonii. Drept rezultat are loc generarea unei noi excitații, așa-numitei unde de suprafață plasmon – polariton (SPP – „Surface plasmon – polariton”), cu o localizare puternică la interfața metal-dielectric, adică cu o confinare a radiației în spațiu la dimensiuni mult mai mici decât lungimea de undă a luminii. Utilizând nano-cărărușe metalice depuse pe substraturi din materiale semiconductoare sau dielectrice, în decursul ultimilor ani au fost elaborate diverse ghiduri de undă pentru propagarea energiei prin excitații SPP. Se așteaptă că în timpul apropiat ghidurile de undă menționate vor fi integrate pe larg la interfața dintre sistemele nanofotonice și cele nanoelectronice, ceea ce va consemna un nou salt tehnologic important, generat, în acest caz, de mariajul reușit dintre foton și electron.

5. MEMRISTORUL – A PATRA COMPONENTĂ ELECTRONICĂ

Până nu demult au existat doar trei componente fundamentale utilizate în construirea circuitelor electronice: rezistorul, capacitorul și inductorul. În 2008 o echipă de la Hewlett-Packard a publicat în revista *Nature* un articol în care anunța construirea unei a patra componente electronice, numite memristor [4]. Stan Williams, conducătorul echipei de autori, a definit memristorul drept „un rezistor cu memorie”.

Teoretic, memristorul a fost inventat încă în 1971 [5], realizarea lui în practică a devenit însă posibilă doar datorită dezvoltării nanotehnologiilor. Memristorii reprezintă potențiometre electrice cu două terminale care pot fi realizate sub formă de file foarte subțiri. Pentru a construi primul memristor, Stan Williams și colegii săi au folosit un strat de TiO_2 plasat între două așchii subțiri de platină, dispozitivul având grosimea de doar 5 nm [4]. O proprietate inconfundabilă a memristorilor este bucla de histererezis ce reflectă variația curentului la o tensiune periodică. Rezistența unui memristor este determinată nu de curentul instantaneu ce curge prin sistem, ci de integrala curentului în timp, adică depinde de sarcina totală care a trecut prin dispozitiv. Cu alte cuvinte, valoarea rezistenței unui memristor este în funcție de valorile ei precedente, reflectând astfel existența memoriei în dispozitiv.

Echipa pe care am onoarea să o conduc a realizat, în colaborare cu cercetători științifici de la Institutul de Microtehnologie din București, primul memristor pe bază de nitrură de galiu – un compus chimic biocompatibil care actualmente este considerat al doilea material semiconductor important, după siliciu. Dispozitivul constă dintr-o rețea de membrane ultrasubțiri cu grosime nanometrică [6], suspendate pe nanofire cu rezistență electrică înaltă [6,7], și, în esență, reprezintă primul memristor cu capacități de operare la puteri mari (o singură membrană ultrasubțire din GaN suportă curenți de 60 mA la tensiunea de 9 V, adică poate opera la puteri mai mari de 0,5 W [6]).



Figură. Aerografrit fără particule (stânga) și cu particule din GaN (dreapta).

Conform așteptărilor, implementarea în practică a memristorilor va impulsiona dezvoltarea de circuite electronice mult mai performante, care ar înlocui memoriile dinamice de astăzi cu acces aleatoriu. În viitor, întreruperea accidentală a curentului nu va mai duce la pierderi de date informaționale, deoarece computerele cu memristoare vor avea capacitatea de a memoriga toate informațiile.

6. DOMENIUL NANO-BIO ÎN ASCENSIUNE

Actualmente nanotehnologiile sunt utilizate în biomedicină cu diverse scopuri, de exemplu pentru:

- *tratament*, e. g. nanoparticulele din funcționalizate cu diverși anticorpi reacționează cu antigenele celulelor canceroase, acestea penetrează în celulele bolnave și le distrug;
- *administrarea și eliberarea dirijată a medicamentelor*, inclusiv dezvoltarea unor metode inovative de transport, e. g. cu ajutorul nanocapsulelor;
- *medicina regenerativă*, în particular cu scopul dezvoltării unor materiale biocompatibile inteligente;
- *diagnosticarea afecțiunilor și monitorizarea tratamentului* cu ajutorul tehnicilor de imagistică moleculară.

Este bine cunoscut faptul că nanoparticulele se atrag între ele și, ca rezultat, are loc aglomerarea lor în clustere. Procesul de aglomerare împiedică studierea interacțiunii nanoparticulelor individuale cu celulele vii. Pentru a evita aglomerarea nanoparticulelor, am propus și am realizat în practică fixarea lor pe ramuri din aerografrit [8] (figură). Aerografritul reprezintă o rețea formată din microtuburi din grafit cu grosimea pereților de doar 15 nm [9]. Nanoparticulele din GaN „cresc” pe ramurile de aerografrit, ceea ce amintește creșterea mugurilor pe ramurile copacilor primăvara. Figura din stânga reprezintă aerografrit curat, iar cea din dreapta demonstrează o ramură de aerografrit după creșterea particulelor din GaN. Este important să menționăm că la interfață se realizează legături chimice între nitrura de galiu și aerografrit, iar materialul hibrid elaborat este fle-

xibil și are o rezistență mecanică bine pronunțată, chiar și în cazul depunerii pe ramurile aerografitului a unei cantități relativ mari de nanoparticule din GaN [8].

Potrivit datelor experimentale obținute recent, nanoparticulele din nitrură de galiu sunt atrase de celulele endoteliale vii, penetrând în ele și formând clustere [10]. Luând în considerare proprietățile piezoelectrice ale nitrurii de galiu, penetrarea nanoparticulelor deschide posibilitatea de a stimula unele procese vitale ce au loc în aceste celule, de exemplu cu ajutorul unui câmp ultrasonor aplicat din exterior [10].

7. CONCLUZII

Nanotehnologiile reflectă, pe de o parte, eforturile omului de a mima natura, de a învăța și a prelua de la natură cele mai perfecte metode de producere și transformare a diverselor materiale, iar pe de altă parte, deschid oportunități enorme pentru elaborarea unor materiale și metode de producere absolut noi, care nu există în natură. Nanotehnologiile schimbă lumea și aceste schimbări rapide se observă, în particular, prin prisma dezvoltării tehnologiei informației și comunicațiilor: la nivel global, oamenii trimit în fiecare zi 23 de miliarde de SMS-uri prin telefoanele mobile, plasează 350 de milioane de fotografii pe Facebook, iar pe YouTube în fiecare secundă apar videoclipuri cu durată totală de 5 ore. Numărul de transistori pe un singur cip a întrecut numărul de locuitori pe Terra, omenirea intră în era roboților, era inteligenței artificiale care ne va schimba viața, ne va schimba pe noi, sperăm, în bine.

BIBLIOGRAFIE

1. Fuechsle M. et al. A single-atom transistor. *Nature Nanotechnology*, Vol. 7, p. 242-246 (2012).
2. Bhattacharya P. et al. Room temperature electrically injected polariton laser. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 112, 236802 (2014).
3. Moskalenko S. A. Reversible optico-hydrodynamic phenomena in a non ideal exciton gas. *Sov. Phys. Solid State*, Vol. 4, p. 199-204 (1962).
4. Strukov D. B. et al. The missing memristor found, *Nature*, Vol. 453, p. 80-83 (2008).
5. Chua L. O. Memristor – the missing circuit element, *IEEE Trans. on Circuit Theory*, Vol. CT-18, p. 507-519 (1971).
6. Dragoman M., Tiginyanu I. et al. Memristive GaN ultrathin suspended membrane array. *Nanotechnology* (2016).
7. Tiginyanu I. et al. Nanoperforated and continuous ultra-thin GaN membranes. *Electrochemical and Solid State Letters*, Vol. 14, p. K51-K54 (2011).
8. Schuchardt A., Braniste T. et al. Three-dimensional Aerographite-GaN hybrid networks: Single step fabrication of porous and mechanically flexible materials for multifunctional applications. *Scientific Reports*, Vol. 5, 8839 (2015).
9. Mecklenburg M. et al. Aerographite: Ultra lightweight, flexible nanowall, carbon microtube material with outstanding mechanical performance. *Adv. Mater.*, Vol. 24, p. 3486-3490 (2012).
10. Braniste T., Tiginyanu I. et al. Viability and proliferation of endothelial cells upon exposure to GaN nanoparticles. *Beilstein Journal of Nanotechnology* (2016).



Eleonora Romanescu. *Casele gospodarilor din satul natal*, u.p. 90 × 143 cm, 1986