

# NANOFIRE ȘI NANOTUBURI: TEHNOLOGII ȘI PERSPECTIVE DE UTILIZARE

Eduard MONAICO<sup>1</sup>, Ion TIGHINEANU<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universitatea Tehnică a Moldovei, <sup>2</sup>Academia de Științe a Moldovei

**Rezumat.** *Lucrarea prezintă date privind activitățile de cercetare concentrate asupra formării nanostructurilor unidimensionale (1D) – fire și nanotuburi, a căror dimensiune transversală nu depășește 100 nm. Sunt descrise tehnologiile de obținere a nanofirelor și nanotuburilor metalice prin depunerea electrochimică în nanotemplate. Este elucidată, de asemenea, metoda de întindere a microfiredelor îmbrăcate în fibră din sticlă, ce rezultă în formarea de nanofire metalice integrate cu lungimea de până la un metru.*

## INTRODUCERE

În ultimul deceniu, o atenție sporită se acordă obiectelor unidimensionale cum ar fi nanofirele, nanotuburile și rețelele integrate în baza lor. Odată cu reducerea dimensionalității apar noi proprietăți electrice, mecanice, chimice și optice, care sunt în mare măsură rezultatul efectelor de suprafață și de confinare cuantică. Obiectele unidimensionale reprezintă o clasă de materiale multifuncționale, promițătoare pentru aplicații în microelectronică, fonică, medicină, senzori chimici și biologici, etc. Pentru a scoate în evidență importanța obiectelor unidimensionale este de ajuns să se facă referință la nanofirele de Si care, după cum s-a demonstrat recent [1, 2], posedă proprietăți termoelectrice de unicat.

Majoritatea aplicațiilor concrete necesită integrarea unui număr mare de nanofire într-o fibră sau rețea pentru a atinge funcționalitatea necesară. În ultimul deceniu, diferite template bazate pe tehnologii de nanofabricare au fost dezvoltate, ceea ce ne oferă posibilitatea de a produce rețele integrate de nanofire și nanotuburi din diferite materiale cu diametre și lungimi bine definite. În prezent, două tipuri de nanotemplate sunt pe larg utilizate în nanofabricare, și anume membranele poroase de  $Al_2O_3$  [3-6] și membranele cu canale formate de ioni accelerați, acestea fiind bazate în special pe polimeri organici [7, 8]. Aceste membrane însă au o rezistență electrică mare și joacă un rol pasiv în procesele de nanofabricare, de exemplu, rolul de mască la creșterea firelor prin metode chimice sau electrochimice.

## 1. TEHNOLOGII ELECTROCHIMICE DE FORMARE A NANOFIRELOR ȘI NANOTUBURILOR

Electrochimia este folosită de câteva decenii pentru depunerea diferitelor materiale pe suprafața dorită. În prezent, depunerea electrochimică este pe larg recunoscută datorită faptului că ea deschide oportunități pentru depunerea uniformă a peliculelor subțiri sau altor obiecte cu forme complexe, cum ar fi nanofirele sau nanotuburile. Menționăm că procesul de depunere are loc, de obicei, la temperatura camerei și nu este necesar vidul.

În particular, creșterea templată a nanofirelor prin depunerea electrochimică este efectuată prin contactul metalic, după ce în spatele membranei cu rezistență înaltă [9, 10]. În Fig. 1 (a) este dată reprezentarea schematică a matricei din oxid de aluminiu poros după depunerea metalului. Diametrul nanofirelor este controlat prin diametrul porilor în matricea poroasă, iar înălțimea – prin timpul de depunere. Figura 1 (b) reprezintă imaginea nanofirelor după procesul de depunere electrochimică, obținută la microscopul electronic cu baleiaj (SEM).

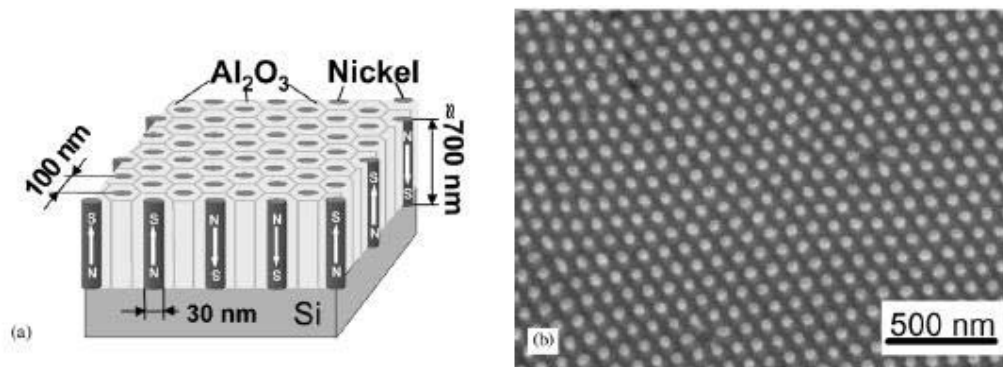


Fig. 1. (a) Reprezentarea schematică a nanofirelor de Ni aranjate în matrice de aluminiu poros pe substrat de Si; (b) imaginea SEM de la suprafață [10].

Astfel, aplicarea depunerii electrochimice (care este o tehnologie cost-efectivă) asigură formarea nanofirelor metalice sau semiconductoare cu parametri controlați, pe când depunerea electrochimică a nanotuburilor metalice necesită intervenții tehnologice adiționale, spre exemplu, modificarea chimică a suprafeței interne a porilor înainte de depunere, ceea ce duce la contaminarea pereților nanotuburilor. Recent a fost propusă o metodă de obținere a nanotuburilor metalice cu posibilitatea de control al parametrilor [11]. Procedura de fabricare a rețelelor de nanotuburi de Au este reprezentată în Fig. 2. Pe suport se depune o peliculă de Au care, în continuare, servește ca electrod, urmat de stratul de aluminiu (Al). Al este supus anodizării pentru formarea stratului de oxid de aluminiu poros (AAO), care în continuare va servi ca templat (Figura 2 (A)). Tensiunea de anodizare ce determină spațiul dintre pori se menține constantă în procesul de anodizare. După anodizare, la interfața cu electrodul de Au rămâne un strat de barieră. Tratamentul ulterior în soluție de 30 mM NaOH rezultă în înlăturarea stratului de barieră de la interfața cu electrodul de Au. În continuare are loc depunerea nanofirelor polimerice (Polypyrrole PPy) din soluție prin electropolimerizare în interiorul porilor (Figura 2 (B)). Corodarea ulterioară a probei în soluție de NaOH lărgeste porii din jurul nanofirelor de PPy (Figura 2 (C)), apoi are loc electrodepunerea Au pentru formarea structurilor tubulare (Figura 2 (D)). Grosimea pereților nanotuburilor de Au este controlată prin durata corodării în NaOH la lărgirea porilor. Firele de PPy sunt neconductive, ceea ce asigură formarea nanotuburilor metalice de la electrodul de Au, a căror lungime este controlată prin timpul de depunere electrochimică. Înlăturarea PPy are loc fără deteriorarea nanotuburilor de Au prin corodarea în plasmă, rezultând în structura reprezentată în Figura 2 (E). Templatul de AAO poate fi înlăturat prin utilizarea corodării în soluție concentrată de NaOH, obținând nanotuburi de Au pe suport (Figura 2 (F)).

După cum se vede, procesul de formare a nanotuburilor este unul complex. Mai mult ca atât, atunci când se încearcă modificarea arhitecturii spațiale a nanotuburilor (lungimea, diametrul, grosimea pereților) apar complicații ce țin de flexibilitatea nanofirelor de PPy, care au tendința de a se prăbuși la lungimi mari (Figura 3 (A)) [12]. Depunerea electrochimică a Au rezultă în formarea rețelelor de nanotuburi orientate neuniform cu pereți necompleți, cum se poate observa din Figura 3 (B).

Menționăm că membranele din oxid de aluminiu poros, datorită rezistenței electrice înalte, joacă un rol pasiv în procesele de nanofabricare, adică după formarea nanofirelor sau nanotuburilor ele se supun dizolvării. În legătură cu aceasta, o problemă tehnologică importantă este dezvoltarea nanotemplatelor semiconductoare cost-efective, ale căror proprietăți pot fi ușor controlate prin iluminarea exterioară, câmpul electric aplicat etc. În cadrul Centrului Național de Studiu și Testare a Materialelor (Universitatea Tehnică a

## 6 Tehnologii moderne

Moldovei) a fost elaborată tehnologia cost-efectivă pentru fabricarea controlată a nanotemplatelor semiconductoare cu auto-ordonare în spațiu a porilor, folosind corodarea anodică a substraturilor cristaline III-V (GaAs, InP, GaP) și II-VI (CdSe) în electrolit neutru [13-15]. Aceste nanotemplate semiconductoare reprezintă o platformă universală pentru umplerea porilor cu o varietate largă de nanostructuri metalice sau polimerice în formă de nanofire, nanotuburi și nanodote.

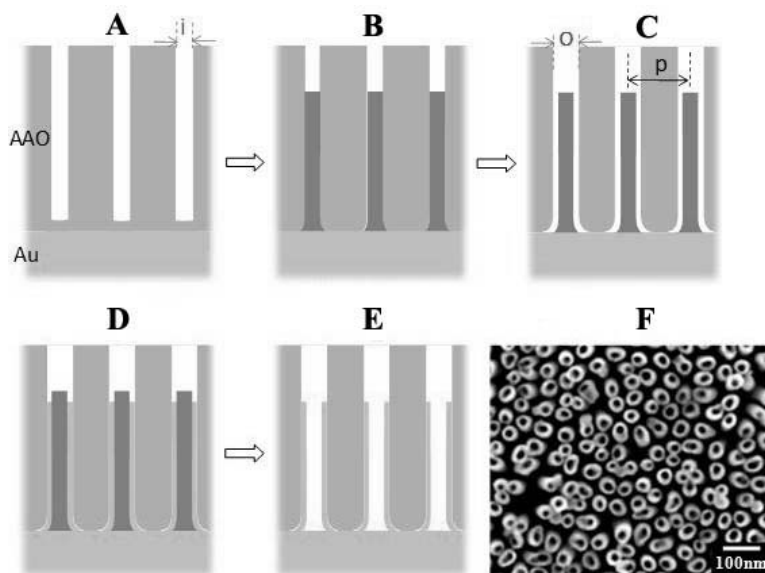


Fig. 2. (A) – (E) Procesul tehnologic de obținere a rețelelor de nanotuburi de Au, unde  $i$  este diametrul porilor,  $o$  este diametrul porilor după lărgire. (F) Imaginea SEM a structurii finale [11].

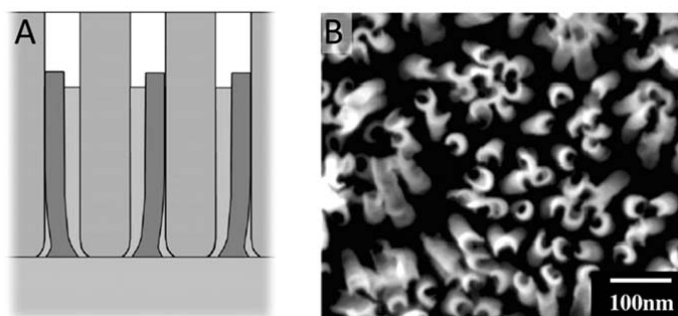


Fig. 3. (A) Reprezentarea schematică a deformării rețelei de nanotuburi. (B) Imaginea SEM a rețelei de nanotuburi deformate [11].

S-a demonstrat deja fiabilitatea nanotemplatelor de InP, GaP și ZnSe (ultimul compus chimic fiind transparent în tot domeniul vizibil al spectrului) pentru depunerea electrochimică prin impulsuri a rețelelor de nanotuburi de platină cu diametre mai mici și mai mari de 100 nm (vezi Fig. 5) [13, 16, 17]. Depunerea electrochimică a platinei s-a efectuat din soluție de platină ce conține 2 g/l Pt (Platinbad D, DODUCO) la temperatura de 40°C în celulă electrochimică, unde proba poroasă servește ca electrod de lucru. Înainte de depunere, probele au fost ținute în această soluție timp de 3 ore pentru a permite umezirea pereților porilor de către electrolit.

Depunerea electrochimică prin impulsuri s-a efectuat cu ajutorul unui generator de impulsuri. Generatorul elaborat asigură următorii parametri ai impulsului: amplitudinea impulsului poate fi variată până la 100 V; durata minimă a impulsului de 10  $\mu$ s; durata maximă a impulsului de 10 s; durata minimă de 10  $\mu$ s între impulsuri; durata maximă de 10 s între impulsuri; un front mic de descreștere (cel mult 10 ns); se pot aplica atât impulsuri pozitive, cât și negative.

Forma și caracteristicile impulsului utilizat la depunere sunt prezentate în Fig. 4, unde:  $U_i$  este amplitudinea impulsului în volți;  $t_1$  – durata impulsului și  $t_2$  – timpul între impulsuri.

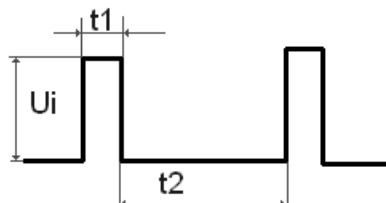


Fig. 4. Forma și parametrii impulsului utilizat la depunerea metalelor în nanotemplate de ZnSe.

Având în vedere condițiile de restricție spațială în porii cu diametrul de doar câteva zeci de nanometri, au fost stabiliți parametrii optimi pentru formarea nanotuburilor metalice în nanotemplatele semiconductoare cu diametrul porilor de 40 – 140 nm și anume: tensiunea aplicată 15 – 20 V, durata impulsului  $t_1 = (70 - 100) \mu$ s și timpul între impulsuri  $t_2 = (1 - 2) s$ . Micșorarea intervalului  $t_2$  între impulsuri duce la depunerea metalului sub formă de nanotuburi în jumătatea de sus a nanotemplatelor semiconductoare. Acest fapt se explică prin epuizarea soluției cu ioni de metal în adâncul porilor și limitarea difuziei lor de la interfața electrolit – nanotemplat semiconductor la intervale mici  $t_2$  între impulsuri. Pentru a facilita reînnoirea concentrației electrolitului din interiorul porilor a fost folosită agitația magnetică.

Morfologia nanotemplatelor de InP în secțiune transversală, după depunerea electrochimică a platinei, este ilustrată în Fig. 5. Analiza minuțioasă a mai multor imagini SEM a demonstrat că depunerea Pt are loc uniform pe pereții interni ai porilor, ceea ce rezultă în formarea rețelelor de nanotuburi metalice încorporate în nanotemplate semiconductoare. Depunerea uniformă a Pt pe pereții interni se datorează conductibilității electrice ridicate a nanotemplatelor semiconductoare. De menționat că conductibilitatea electrică bună se realizează în pofida faptului că grosimea pereților dintre pori adesea nu depășește 20 nm.

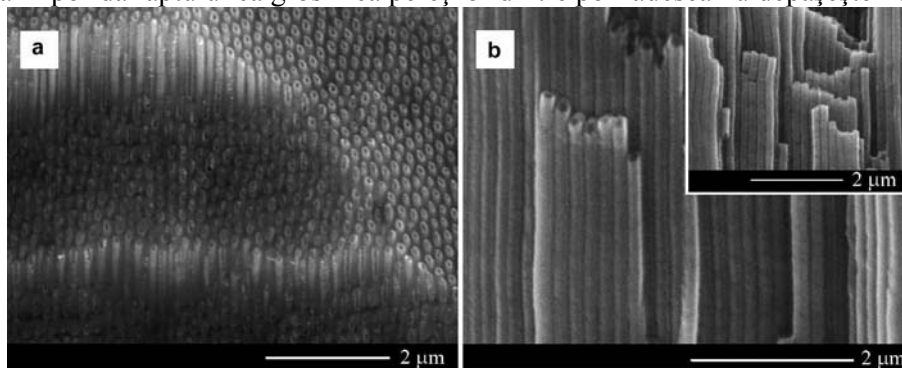


Fig. 5. Imagini SEM ale nanotemplatelor de InP după depunerea electrochimică a platinei prin impulsuri. Imaginea inserată reprezintă rânduri de nanotuburi de Pt în matricea de InP [13].

## 2. TEHNOLOGIA DE FORMARE A NANOFIRELOR PRIN ÎNTINDEREA FIBREI DIN STICLĂ

Depunerea electrochimică în template duce la formarea rețelelor de nanofire sau nanotuburi cu lungimea maximă de câteva sute de micrometri, limitarea lungimii fiind cauzată de procesele de difuzie în electrolit în condițiile restricției spațiale [18]. În legătură cu aceasta, cercetătorii au explorat posibilități alternative pentru confecționarea rețelelor de nanofire. În particular, Husegawa ș.a. [19] au reușit fabricarea rețelelor de micro/nanofire de bismut cu lungime milimetrică prin injectarea sub presiune înaltă a topiturii de Bi în templat de cuarț. Rezultate interesante au fost raportate recent de Zhang [20] și Hong [21], care au propus metoda de întindere a fibrei ce permite de a obține rețele integrate de micro/nanofire metalice în microfibră de sticlă. Filamente de seleniu cristalin cu lungimea de câțiva centimetri au fost fabricate de Deng și colegii săi [22, 23].

Recent, cercetările comune realizate de experții Institutului de Cercetări ELIRI (director – dr. Efim Badinter), în colaborare cu cercetători din cadrul Universității Tehnice a Moldovei și a Institutului de Inginerie Electronică și Nanotehnologii „D. Ghițu”, au rezultat în integrarea unui număr mare de nanofire metalice, semimetalice [24] sau semiconductoare [25], toate fiind izolate electric, într-o fibră de sticlă cu diametrul de până la câteva sute de micrometri și lungimea de până la un metru. S-a reușit fabricarea rețelelor integrate de nanofire din Bi, Ge, Pb/Sn și aliaje de Ni și s-a demonstrat distribuția 2D hexagonală a acestor nanofire în secțiunea transversală a fibrei din sticlă [24].

Procesul tehnologic propus constă în (a) formarea microfîrelor metalice sau semimetalice în izolație din sticlă prin tragerea capilară din partea inferioară a tubului de sticlă încălzit până la temperatura de deformare; (b) tăierea și asamblarea mecanică a microfîrelor de aceeași lungime care sunt distribuite într-o rețea 2D hexagonală dens împachetată și îmbrăcată în înveliș de sticlă comun; (c) întinderea în anumite condiții termice pentru reducerea diametrului conglomeratului de microfîre; și (d) repetarea procesului de tăiere-asamblare-întindere cu scopul descreșterii dimensiunilor transversale ale nanofîrelor până la zeci de nanometri (vezi Fig. 6).

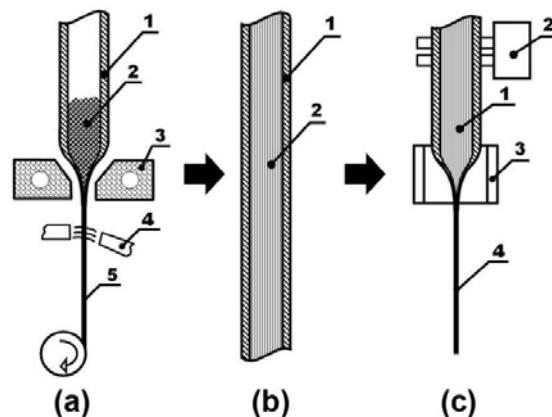


Fig. 6. Reprezentarea schematică a procesului tehnologic propus: (a) formarea microfîrelor metalice sau semimetalice în izolație de sticlă prin tragerea capilară din partea inferioară a tubului de sticlă: 1 – tub de sticlă; 2 – topitură de metal sau semimetal; 3 – inductor de frecvență înaltă; 4 – flux de apă; 5 – microfîr în înveliș de sticlă; (b) microfîre tăiate și asamblate mecanic: 1 – tub de sticlă comun; 2 – rețea de microfîre metalice sau semimetalice în înveliș de sticlă; (c) întinderea în anumite condiții termice a probei obținute: 1 – proba care este supusă întinderii; 2 – mecanismul de

control al deplasării probei cu o viteză anumită; 3 – încălzitor tubular; 4 – nanofire în înveliș de sticlă după întindere.

În Fig. 7A este prezentată imaginea SEM a conglomeratului de microfibre de Bi în izolație de sticlă după primul ciclu de întindere. Repetând procesul de tăiere-asamblare-întindere, este posibil de atins o integrare a nanofirelor în număr de câteva sute de mii sau chiar câteva milioane de nanofire de Bi în înveliș de sticlă. Figura 7B,C prezintă morfologia nanofirelor de Bi cu diametrul de 50 nm după câteva cicluri de tăiere-asamblare-întindere.

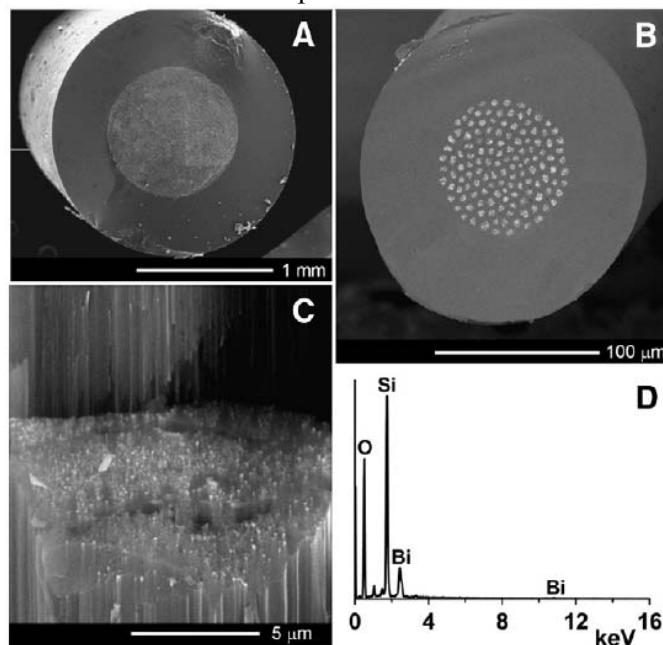


Fig. 7. (A) Imaginea SEM în secțiune transversală a microfibrelelor din Bi în înveliș de sticlă după primul ciclu de întindere; (B) fibră de sticlă cu diametrul comparabil cu cel al unui fir de păr, cu integrarea a aproximativ unui milion de nanofire de Bi; (C) imaginea SEM mărită a nanofirelelor de Bi; și (D) analiza compoziției chimice.

### 3. PERSPECTIVE DE UTILIZARE

Nanotehnologiile oferă posibilități foarte largi de design și fabricare de noi nanomateriale. Aplicațiile nanomaterialelor se bazează pe: (i) caracteristicile fizice specifice ale materialelor nanostructurate, (ii) suprafața enormă, cum ar fi spre exemplu suprafața specifică a nanotuburilor de titanu utilizate în celulele fotovoltaice, și (iii) proprietățile multifuncționale.

Nanostructurile care au cel puțin o dimensiune între 1 și 100 nm (așa cum sunt dimensiunile transversale ale nanofirelor și nanotuburilor) au atras o atenție sporită în comparație cu materialele masive datorită proprietăților lor fascinante și aplicațiilor în electronică, fonică, diagnostica medicală, transportarea substanțelor medicamentoase, senzori și materiale termoelectrice și magnetice [26-33].

Nanofirele pot juca, de asemenea, un rol important în dispozitivele de dimensiuni reduse cum ar fi nanoroboții. Medicii ar putea utiliza acești nanoroboți pentru a trata boli precum cancerul. Unele modele de nanoroboți sunt echipate cu sisteme de alimentare, care ar necesita structuri precum nanofirele pentru a genera și a transmite energia electrică fără pierderi.

Folosind materiale piezoelectrice, este posibilă crearea de nanofire care generează electricitate prin deformare mecanică. Printre asemenea materiale se numără ZnO și GaN, acesta din urmă fiind un material nu numai piezoelectric, ci și biocompatibil cu țesuturile omului. Folosind rețele de nanofire de GaN este posibil de a crea nanobaterii pentru nanodispozitive încorporate în corpul uman, cum ar fi stimulatoarele cardiace. Aceste nanobaterii pot fi plasate în arteră unde sub acțiunea fluxului de sânge nanofirele de GaN sunt supuse deformării mecanice și ca rezultat se realizează fenomenul de polarizare electrică.

Templatele semiconductoare poroase umplute cu metale reprezintă cristale fotonice metalo-dielectrice. Cristalele fotonice oferă posibilitatea de realizare a metamaterialelor, adică a unor materiale cu permitivitatea electrică și permeabilitatea magnetică simultan negative. Prof. Victor Veselago a descoperit teoretic că astfel de metamateriale sunt caracterizate printr-o serie de fenomene noi [34] cum ar fi efectul Doppler invers, radiația Cerenkov inversă, refracția negativă, focalizarea cu o lentilă planară, efectul de suprazoluție etc. Perspectivele implementării cristalelor fotonice metalo-dielectrice unidimensionale, formate din straturi consecutive metalice și dielectrice în calitate de lentile integrate au fost deja demonstrate [35-38]. Actualmente o atenție deosebită se acordă structurilor metalo-dielectrice bidimensionale [39], în special structurilor ordonate nanotubulare [40, 41].

### CONCLUZII

În lucrare sunt prezentate metode cost-efective de formare a nanostructurilor unidimensionale (1D) – fire și nanotuburi, a căror dimensiune transversală nu depășește 100 nm. În particular, sunt descrise metode de formare a nanotemplatelor semiconductoare, precum și avantajele acestor nanotemplate. De menționat că lungimea maximă a nanofirelor sau nanotuburilor prin depunerea electrochimică în nanotemplate nu poate depăși câteva sute de micrometri. În lucrare este prezentată și metoda de întindere a microfiredelor îmbrăcate în sticlă ce rezultă în formarea de nanofire metalice integrate în rețea cu lungimea de până la un metru.

### REFERINȚE

- [1] Hochbaum A.I., Chen R., Delgado R.D., Liang W., Garnett E.C., Najarian M., Majumdar A., Yang P. „Enhanced thermoelectric performance of rough silicon nanowires”. *Nature* **451**, pp. 163-167 (2008).
- [2] Boukai A.I., Bunimovich Y., Tahir-Kheli J., Yu J.K., Goddard III W.A., Heath J.R. „Silicon nanowires as efficient thermoelectric materials”. *Nature* **451**, pp. 168-171 (2008).
- [3] Venkata Kamalakar M. and Raychaudhuri A. „A Novel Method of Synthesis of Dense Arrays of Aligned Single Crystalline Copper Nanotubes Using Electrodeposition in the Presence of a Rotating Electric Field”. *Advanced Materials* **20**, pp. 149–154 (2008).
- [4] Piao Y., Kim H. „Fabrication of nanostructured materials using porous alumina template and their applications for sensing and electrocatalysis”. *J. Nanosci. Nanotechnol.* **9**, pp. 2215-2233 (2009).
- [5] Sharma G., Pishko M.V. and Grimes C.A. „Fabrication of metallic nanowire arrays by electrodeposition into nanoporous alumina membranes: effect of barrier layer”. *Journal of Materials Science* **42**, pp. 4738-4744 (2007).
- [6] Ghahremaninezhad A. and Dolati A. „A study on electrochemical growth behavior of the Co–Ni alloy nanowires in anodic aluminum oxide template”. *Journal of Alloys and Compounds* **480**, pp. 275-278 (2009).
- [7] Cornelius T.W., Schiedt B., Severin D., Pépy G., Toulemonde M., Apel P.Y., Boesecke P. and Trautmann C. „Nanopores in track-etched polymer membranes characterized by small-angle X-ray scattering”. *Nanotechnology* **21**, 155702 (2010).

- [8] Duan J., Liu J., Mo D., Yao H., Maaz K., Chen Y., Sun Y. et al. „Controlled crystallinity and crystallographic orientation of Cu nanowires fabricated in ion-track templates”. *Nanotechnology* **21**, 365605 (2010).
- [9] Lee J., Kim Y., Cagnon L., Gösele U., Lee J. and Nielsch K. „Power factor measurements of bismuth telluride nanowires grown by pulsed electrodeposition”. *Phys. Status Solidi RRL* **4**, pp. 43–45 (2010).
- [10] Nielsch K., Wehrspohn R.B., Barthela J., Kirschner J., Fischer S.F. et al. „High density hexagonal nickel nanowire array”. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **249**, pp. 234–240 (2002).
- [11] Murphy A., McPhillips J., Hendren W., McClatchey C., Atkinson R. et al. „The controlled fabrication and geometry tunable optics of gold nanotube arrays”. *Nanotechnology* **22**, 045705 (2011).
- [12] Hendren W.R., Murphy A., Evans P., O’Connor D., Wurtz G.A., Zayats A.V., Atkinson R. and Pollard R. „Fabrication and optical properties of gold nanotube arrays”, *J. Phys. Condens. Matter* **20**, 362203, (2008).
- [13] Tighineanu I.M., Monaico E., Monaico E. „Ordered arrays of metal nanotubes in semiconductor envelope”. *Electrochem. Commun.* **10**, pp. 731–734 (2008).
- [14] Tighineanu I.M., Ursaki V.V., Monaico E., Foca E., Föll H. „Pore Etching in III-V and II-VI Semiconductor Compounds in Neutral Electrolyte. Electrochem”. *Sol.-St. Lett.* **10**, D127-D129 (2007).
- [15] Tighineanu I.M., Monaico E., Albu S. and Ursaki V.V. „Environmentally friendly approach for nonlithographic nanostructuring of materials”. *Phys. Status Solidi RRL* **1**, pp. 98-100 (2007).
- [16] Monaico E., Tighineanu P., Langa S., Hartnagel H.L. and Tighineanu I.M. „ZnSe-based conductive nanotemplates for nanofabrication”. *Phys. Status Solidi RRL* **3**, pp. 97-99 (2009).
- [17] Tighineanu I.M., Monaico E. and Ursaki V.V. „Two-Dimensional Metal-Semiconductor Networks for Electronic and Photonic Applications”. *ECS Transactions* **41**, pp. 67-74 (2012).
- [18] Schuchert I.U., Toimil Molares M.E., Dobrev D., Vetter J., Neumann R., Martin M. „Electrochemical Copper Deposition in Etched Ion Track Membranes”. *J. Electrochem. Soc.* **150**, C189 (2003).
- [19] Hasegawa Y., Murata M., Nakamura D., Komine T., Taguchi T., Nakamura S. „Thermoelectric Properties of Bismuth Micro/Nanowire Array Elements Pressured into a Quartz Template”. *J. Electron. Mater.* **38**, pp. 944-949 (2009).
- [20] Zhang X., Ma Z., Yuan Z.-Y., Su M. „Mass-Productions of Vertically Aligned Extremely Long Metallic Micro/Nanowires Using Fiber Drawing Nanomanufacturing”. *Adv. Mater.* **20**, pp. 1310-1314 (2008).
- [21] Hong Y., Ma Z., Wang C., Ma L., Su M. „3D Ordered Assemblies of Semiconductive Micro/Nanowires Using Microscale Fibrous Building Blocks”. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* **1**, pp. 251–256 (2009).
- [22] Deng D.S., Orf N. D., Danto S., Abouraddy A.F., Joannopoulos J.D., Fink Y. „Processing and properties of centimeter-long, in-fiber, crystalline-selenium filaments”. *Appl. Phys. Lett.* **96**, 023102 (2010).
- [23] Deng D.S., Orf N.D., Abouraddy A.F., Stolyarov A.M., Joannopoulos J.D., Stone H.A., Fink Y. „In-Fiber Semiconductor Filament Arrays”. *Nano Lett.* **8**, pp. 4265–4269 (2008).
- [24] Badinter E., Ioisher A., Monaico E., Postolache V. and Tighineanu I.M. „Exceptional Integration of Metal or Semimetal Nanowires in Human-Hair-Like Glass Fiber”. *Mater. Lett.* **64**, pp. 1902-1904 (2010).
- [25] Ioisher A., Badinter E., Monaico E., Postolache V., Hartnagel H.L., Leporda N. and Tighineanu I.M. „Integration of Ge nanowire arrays in glass micro-fibers”. *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* **47**, pp. 103-106 (2011).



- [26] Borrás A., Gröning O., Köble J., Gröning P. „Connecting Organic Nanowires”. *Adv. Mater.* **21**, 4816 (2009).
- [27] Woong K., Jennifer K.N., Kunitake M.E., Conklin B.R. and Yang P. „Interfacing Silicon Nanowires with Mammalian Cells”. *J. Am. Chem. Soc.* **129**, pp. 7228-7229 (2007).
- [28] Banerjee A.N., S. Qian and Joo S.W. Large field enhancement at electrochemically grown quasi-1D Ni nanostructures with low-threshold cold-field electron emission. *Nanotechnology* **22**, 035702 (2011).
- [29] Anker J.N., Hall W.P., Lyandres O., Shah N.C., Zhao J. and Van Duyne R.P. „Biosensing with plasmonic nanosensors”. *Nat. Mater.* **7**, pp. 442–53 (2008).
- [30] Lal S., Link S. and Halas N.J. Nano-optics from sensing to waveguiding. *Nat. Photon.* **1**, pp. 641–648 (2007).
- [31] Lim M.A., Lee Y.W., Han S.W. and Park I. „Novel fabrication method of diverse one-dimensional Pt/ZnO hybrid nanostructures and its sensor application”. *Nanotechnology* **22**, 035601 (2011).
- [32] Burke P. J. *Nanotubes and nanowires*. Selected Topics in Electronics and Systems **44**, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd (2007).
- [33] Cao G. *Nanostructures & nanomaterials*. Synthesis, Properties & Applications. Published by Imperial College Press 57 Shelton Street Covent Garden London WC2H 9HE (2004).
- [34] Veselago V.G. *Sov. Phys. Usp.* **10**, 509 (1968).
- [35] Sergentu V.V., Tighineanu I.M., Ursaki V.V., Enachi M., Albu S.P. and Schmuki P. „Prediction of negative index material lenses based on metallo-dielectric nanotubes”. *Phys. Status Solidi RRL* **2**, pp. 242-244 (2008).
- [36] Sergentu V.V., Ursaki V.V., Tighineanu I.M., Foca E., Föll H. and Boyd R.W. „Design of negative-refractive-index materials of the basis of rods with a gradient of the dielectric constant”. *Appl. Phys. Lett.* **91**, 081103 (2007).
- [37] Sergentu V.V., Ursaki V.V., Tighineanu I.M., Foca E., Föll H. and Boyd R.W. „Focusing slabs made of negative index materials based on inhomogeneous dielectric rods”. *Phys. Status Solidi A* **203**, pp. R48-R50 (2006).
- [38] Foca E., Föll H., Daschner F., Sergentu V.V., Carstensen J., Frey S., Knöchel R. & Tighineanu I.M. „Efficient focusing with a concave lens based on a photonic crystal with an unusual effective index of refraction”. *Phys. Status Solidi A* **202**, pp. R35-R37 (2005).
- [39] Bulu I., Caglayan H. and Ozbay E. „Negative refraction and focusing of electromagnetic waves by metallodielectric photonic crystals”. *Phys. Rev. B* **72**, 045124 (2005).
- [40] Sergentu V.V., Tighineanu I.M., Ursaki V.V., Enachi M., Albu S.P., and Schmuki P. „Prediction of negative index material lenses based on metallo-dielectric nanotubes”. *Phys. Status Solidi RRL* **2**, 242-244 (2008).
- [41] Tighineanu I.M., Ursaki V. V., Monaico E., Enachi M., Sergentu V.V., Colibaba G., Nedeoglo D.D., Cojocar A., Föll H. „Quasi-Ordered Networks of Metal Nanotubes embedded in Semiconductor Matrices for Photonic Applications”. *J. Nanoelectron. Optoelectron.* **6**, pp. 463–472 (2011).

Primit la redacție: 11 iunie 2012