

# REZONATOARE LASER ÎN NANOSTRUCTURI DE ZnO CU MODURI DE EMISIE CONTROLATE DE MORFOLOGIE

*Dr. Veaceslav URSACHI<sup>1)</sup>*

*Dr. Emil RUSU<sup>2)</sup>*

*Dr. Victor ZALAMAI<sup>1)</sup>*

*Alexandru BURLACU<sup>2)</sup>*

*M. cor. Ion TIGHINEANU<sup>2,3)</sup>*

<sup>1)</sup>Institutul de Fizică Aplicată, AȘM

<sup>2)</sup>Institutul de Inginerie Electronică și Nanotehnologii „D. Ghițu”, AȘM

<sup>3)</sup>Centrul Național de Studiu și Testare a Materialelor, Universitatea Tehnică a Moldovei

## LASER RESONATORS IN ZNO NANOSTRUCTURES WITH MORPHOLOGY CONTROLLED EMISSION MODES

*The paper gives an overview of technological elaborations performed at the Institute of Applied Physics and the Institute of Electronic Engineering and Nanotechnologies “D. Ghițu” of the Academy of Sciences of Moldova for the production of ZnO based nanostructures ensuring as high optical quality of the produced nanostructures as to act as gain medium for stimulated emission in the ultraviolet spectral region and as relevant geometrical forms and morphologies as to act as high quality factor laser resonators. It is demonstrated that, due to the possibility of multiple and switchable growth directions of the wurtzite structure and the high ionicity of its polar surfaces, ZnO provides conditions for the formation of a variety of micro/nanostructures which act as laser resonators sustaining guided modes, Fabry–Perot modes, whispering gallery modes, random lasing and a combination of them. The produced structures are expected to find many applications in integrated nanoscale optoelectronics, photonics, and sensor technologies.*

### 1. Introducere

Datorită parametrilor avantajoși, cum ar fi banda interzisă largă de 3.36 eV la temperatura camerei și energia de legătură mare a excitonilor de 60 meV, oxidul de zinc este unul dintre cele mai promițătoare materiale pentru dispozitivele optice cu funcționare în regiunea undelor albastre și ultraviolete, inclusiv pentru microlasere [1]. Printre alte proprietăți favorabile trebuie de menționat legăturile puternice (energia coezivă de 1.89 eV), stabilitatea mecanică

înalță (temperatura de topire de 2200 K) și posibilitatea de schimbare multiplă a direcțiilor de creștere în structura de tip wurtzită, care în combinație cu caracterul ionic pronunțat al suprafețelor polare asigură formarea unei diversități imense de microstructuri/nanostructuri [2,3]. Parametrii optici avantajoși ai cristalelor de ZnO asigură posibilitatea emisiei stimulate la temperatura camerei datorită mai multor mecanisme, cum ar fi recombinația excitonilor liberi, interacțiunea exciton-exciton, formarea plasmei electron-gol etc. [4,5]. Din altă perspectivă, posibilitatea producerii microstructurilor și nanostructurilor de ZnO cu o varietate de morfologii asigură oportunitatea de a crea diferite rezonatoare laser și de a dirija structura modurilor de emisie stimulată. Nanolaserele în bază de ZnO au o largă implementare în circuitele optoelectronice și fotonice integrate, tehnologiile senzorilor, păstrarea și procesarea informației, microanaliză etc. [6].

În această lucrare sunt prezentate elaborările colaboratorilor Academiei de Științe a Moldovei în domeniul tehnologiilor de creștere a nanostructurilor de ZnO și implementarea acestor tehnologii în crearea rezonatoarelor laser cu structura modurilor de emisie dirijată.

### 2. Tehnologii de producere a structurilor de ZnO

Una dintre tehnologiile care asigură o calitate optică înaltă a materialului produs este depunerea chimică din vapori cu folosirea precursorilor metalo-organici (MOCVD). Procesul de creștere MOCVD la presiunea atmosferică este efectuat într-un sistem orizontal dublu care constă dintr-o sobă sursă și o sobă principală, după cum este ilustrat în Figura 1a. Acetilacetatul monohidrat de zinc (Aldrich), încărcat într-o luntă de cuarț, servește ca material sursă introdus în soba sursă. Vaporii sunt transportați către soba principală de către un flux de Ar, care este mixat cu un alt flux de Ar și O<sub>2</sub> la intrarea în soba principală. Materialul sursă este menținut la temperatura de 130 °C, iar temperatura suportului din soba principală este setată la 500 °C. Procesul de creștere durează o oră. În acest proces de creștere morfologia structurilor produse este determinată de raportul componentelor din fluxurile de gaze.

Cum tehnologia de creștere MOCVD este costisitoare, au fost elaborate diferite procedee de depunere a structurilor de ZnO printr-o metodă mai simplă și mai eficientă de evaporare carbotermală. Într-o variantă a acestei tehnologii de depunere chimică din vapori, procesul de evaporare și condensare se produce într-o sobă orizontală cu un flux de argon/oxigen, după cum este ilustrat în Figura 1b. Un amestec de pulbere de ZnO (99.999 %) și grafit

cu raportul molar de 1:1 este plasat într-un tub de cuarț interior cu un suport plasat aval sau amonte. În sobă este setat un profil de temperatură cu maximum de 1050 °C în locul de plasare a sursei și de 1000 °C la suport. Durata procesului, ca și în cazul creșterii MOCVD, este de o oră. Într-o altă modificare a acestei tehnologii, creșterea structurilor de ZnO se produce într-o sobă verticală, ilustrată schematic în Figura 1c. Același amestec de ZnO și grafit în calitate de material sursă este plasat la capătul sudat al unui reactor de cuarț. Sistemul este încălzit cu o viteză de 40 °C·min<sup>-1</sup> până la atingerea temperaturii de 1000 °C a materialului sursă. Materialul sursă evaporat este ulterior transportat prin faza de vapori către suportul plasat deasupra unui cilindru interior de cuarț, unde el este oxidat. Temperatura suportului este controlată de către regimurile de temperaturi din sobă și de către înălțimea cilindrului de cuarț interior. Temperatura la suport este cu 60 °C mai joasă decât temperatura sursei datorită gradientului de temperaturi din sobă. Vaporii de Zn sunt inițial generați prin reacția de reducere carbotermală a pulberii de ZnO în zona de temperatură înaltă a sobei. Ulterior, ei sunt transportați prin difuziune termică către zona de temperatură mai joasă și sunt depuși pe suprafața suportului, unde zincul este oxidat prin reacția cu CO/CO<sub>2</sub> și oxigenul din aerul ambiant din camera de creștere.

În calitate de suport pot fi folosite plachete de Si sau cuarț.

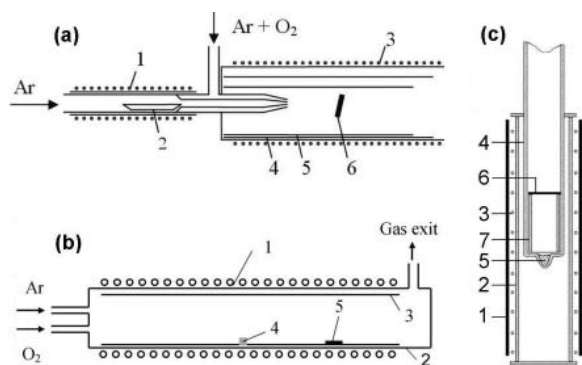


Figura 1. Prezentarea schematică a instalației MOCVD (a), a sobei orizontale (b) și verticale (c) de creștere a structurilor de ZnO prin evaporarea carbotermală. În (a) 1 – sobă sursă, 2 – luntriță de cuarț, 3 – sobă principală, 4 – cilindru de protecție din cuarț, 5 – cilindru din cuarț pentru depunere, 6 – suport de Si sau cuarț. În (b) 1 – sobă orizontală, 2 – reactor din cuarț, 3 – cilindru din cuarț, 4 – material sursă, 5 – suport. În (c) 1 – sobă verticală, 2 – tub ceramic din Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3 – încălzitor, 4 – reactor din cuarț, 5 – material sursă, 6 – suport, 7 – cilindru din cuarț

Tehnologiile de creștere carbotermale sunt mai puțin costisitoare, deoarece nu sunt necesare substanțe precursore scumpe, fiind folosite doar pulbere de ZnO și grafit. Deosebit de eficiente sunt metodele cu sobă verticală care nu necesită sisteme de vidare și nici fluxuri de gaze. Morfologia structurilor produse este controlată atât de parametrii tehnologici, cât și de cantitatea de material sursă introdus în sobă, care se epuizează la diferite etape de creștere a structurilor, producând nanostructuri și microstructuri de diferite forme geometrice.

### 3. Morfologii ale structurilor de ZnO

Prin variația condițiilor tehnologice în procesul de creștere carbotermală pot fi obținute nanostructuri de ZnO de diferite forme geometrice așa ca nanoprisme, nanotuburi, nanotetrapoduri sau structuri mai complexe cum ar fi microtorțe etc., după cum este arătat în rândul de sus al Figurii 2. Structuri în formă de microtorțe (arătate în imaginea de la mijlocul rândului de sus din Figura 2), de exemplu, se produc într-o sobă verticală, procesul de creștere fiind constituit din câteva etape.

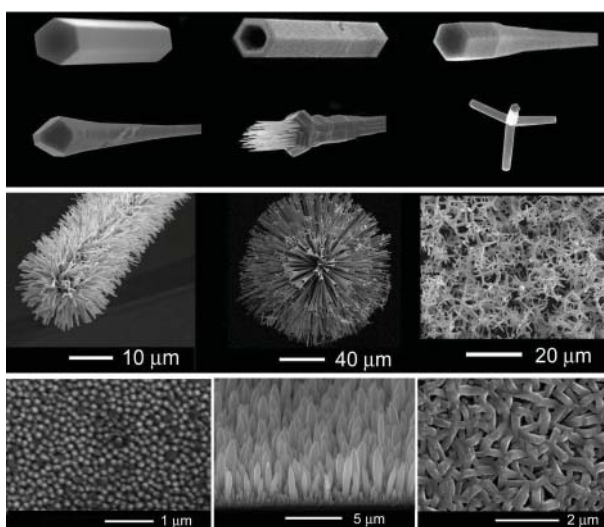


Figura 2. Nanostructuri și microstructuri de ZnO produse prin tehnologia MOCVD sau prin evaporarea carbotermală

În prima etapă, pe suport are loc depunerea unui film subțire de nucleație. În faza a doua, care coincide cu faza de creștere a temperaturii în sobă, are loc creșterea bazei microtorței. Datorită creșterii treptate a temperaturii în această fază, are loc creșterea diametrului bazei de-a lungul direcției de creștere a torței. Faza a treia de creștere constă în formarea platformei hexagonale, de pe care ulterior începe creșterea nanofirelor în ultima fază de creștere, care formează „flacăra” torței. Platforma hexagonală se produce în condițiile de temperatură constantă se-

tată la 1000 °C. Nanofirele care formează „flacăra” cresc din platforma hexagonală în condiții de descreștere a temperaturii după stingerea sobei. După stingerea sobei, concentrația vaporilor în reactor descrește rapid și creșterea de mai departe a platformei hexagonale devine nefavorabilă. În același timp, concentrația vaporilor depășește încă nivelul de suprasaturație a vaporilor favorizând formarea punctelor noi de nucleație pe platforma hexagonală, din care ulterior cresc nanofirele de ZnO.

Prin limitarea cantității de material sursă, astfel ca ea să fie epuizată înainte de stingerea sobei, se creează condiții în care nu are loc creșterea nanofirelor și se produce o nanostructură în formă de bită de beisbol, după cum este arătat în imaginea din dreapta a rândului de sus din Figura 2. Dacă creșterea nanostructurii se produce în condițiile temperaturii constante, are loc formarea unei nanoprisme hexagonale, precum este arătat în imaginea din stânga a rândului de sus din Figura 2.

Aceste nanostructuri reprezintă niște elemente convenabile pentru nanofabricare. O proprietate fascinantă a tehnologiilor date este posibilitatea de autoasamblare a nanostructurilor în microstructuri de formă cilindrică, sferică sau planare, după cum este ilustrat în rândul de mijloc al Figurii 2. Prin plasarea suportului aval față de materialul sursă, într-o sobă orizontală pot fi produse microstructuri cilindrice asamblate din nanoprisme de ZnO, după cum este arătat în imaginea din stânga a rândului de mijloc din Figura 2. Plasarea suportului amonte față de materialul sursă în soba orizontală are ca rezultat creșterea unei structuri planare asamblate din nanotetrapoduri, după cum este arătat în imaginea din dreapta a rândului de mijloc din Figura 2. Structuri emisferice asamblate din nanostructuri în formă de

bită de beisbol (arătate în imaginea de mijloc a rândului de mijloc din Figura 2) au fost crescute într-o sobă verticală. Pentru inițierea creșterii emisferice, pe suport a fost mai întâi depus un film de nucleație de ZnO, din care s-a format un microdisc folosind fotolitografia standard.

Structuri potrivite pentru explorarea efectului laser aleatoriu sub formă de straturi de nanodoturi, nanoroduri sau structuri împletite au fost produse folosind tehnologia MOCVD, după cum este ilustrat în rândul de jos al Figurii 2. Producerea acestor morfologii diferite este dirijată de către raportul componentelor în fluxurile de gaze în procedeele tehnologice. Nanoroduri cu morfologia ilustrată în imaginea de mijloc a rândului de jos din Figura 2 sunt produse atunci când raportul componentelor în fluxul de gaze Ar/O<sub>2</sub> este aproape de 1:1. Dacă componenta de Ar în acest flux de gaze este redusă, se produce un strat de nanodoturi ilustrate în imaginea din stânga a rândului de jos din Figura 2.

Calitatea optică înaltă a materialului produs, necesară pentru realizarea efectului laser, este demonstrată de analiza spectrelor de luminescență arătată în Figura 3. Atât în materialul produs prin evaporarea carbothermală (a), cât și în cel obținut prin tehnologia MOCVD (b), spectrul de luminescență este dominat de emisia datorită recombinării excitonilor legați pe donorii neutri (D<sup>0</sup>X) și replicile fononice LO. Liniile I<sub>1</sub>, I<sub>4</sub> și I<sub>8</sub> sunt cele mai intense linii ale excitonilor legați pe donori în nanostructurile produse prin tehnologia MOCVD, iar în materialul produs prin evaporare carbothermală predomină liniile I<sub>4</sub>, I<sub>8</sub> și I<sub>9</sub> [7]. Un alt indiciu al calității înalte a materialului produs este prezența liniilor de recombinare a excitonilor liberi FX în spectrele de luminescență.

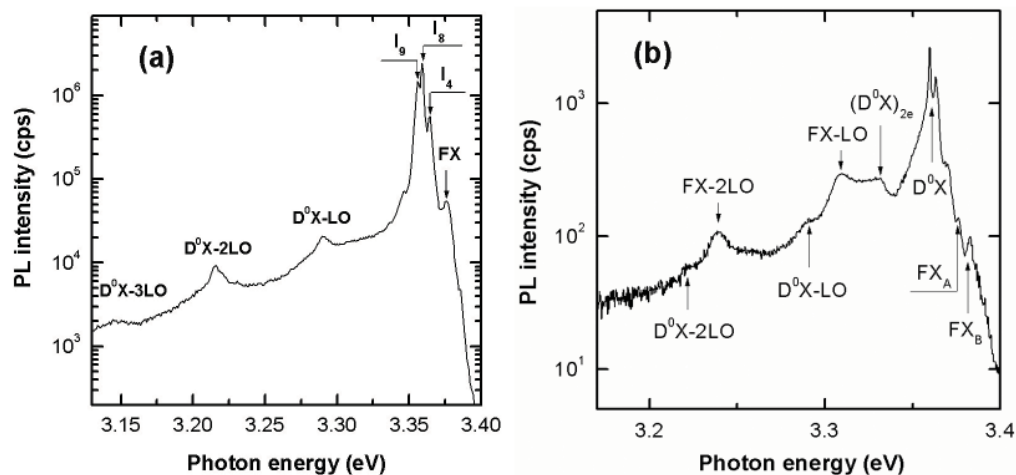


Figura 3. Spectrele tipice de luminescență măsurate la temperatura de 10 K la excitare continuă a nanostructurilor de ZnO crescute prin evaporarea carbothermală (a) și prin tehnologia MOCVD (b)

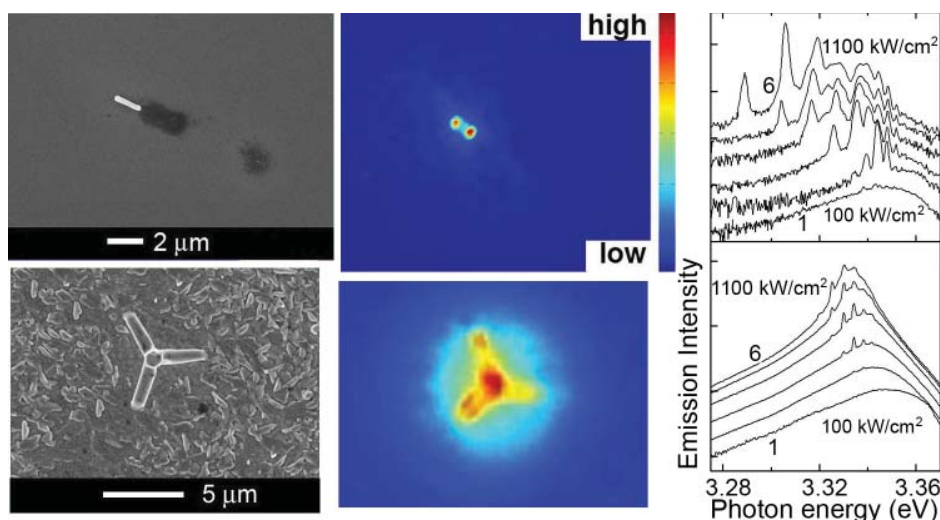


Figura 4. Imaginea de la microscopul electronic de scanare (SEM) (stânga), imaginea colectată cu camera CCD în regim de emisie laser (mijloc) și spectrul de emisie (dreapta) de la un nanorod (rândul de sus) și un nanotetrapod (rândul de jos)

#### 4. Rezonatoare Laser

O mare parte din nanostructurile și microstructurile produse reprezintă rezonatoare laser cu factor de calitate înalt care suportă diferite tipuri de moduri de emisie stimulată în funcție de morfologia și geometria structurii. Caracteristicile laser ale structurilor de ZnO produse au fost investigate la excitare optică cu armonica a treia a unui laser Nd:YAG cu comutarea factorului de calitate Q (355 nm, 10 ns, 10 Hz). Pentru investigarea emisie de la un singur nanorod sau nanotetrapod, radiația de la probă este colectată cu un obiectiv de microscop cu apertura numerică de 0.4 și este transmisă către fanta de intrare a spectrometrului printr-o diafragmă care selectează semnalul de la nanostructura dată. Imaginea nanorodului sau a nanotetrapodului în diafragmă este colectată de către o cameră CCD. În Figura 4 este arătată emisia radiației în regim de excitare laser de la capetele unui nanorod și a unui tetrapod de ZnO înregistrată cu camera CCD. Spectrele de emisie ale acestor nanostructuri la creșterea densității de excitare de la 0.1 mW/cm<sup>2</sup> până la 1.1 mW/cm<sup>2</sup> sunt arătate în partea dreaptă a Figurii 4.

Apariția liniilor înguste de emisie la un anumit prag al densității de excitare, precum și lățimea foarte redusă a liniilor (2 meV) semnalează apariția modurilor de emisie laser. Lungimile de undă ale liniilor de emisie de la nanorodul de ZnO, precum și numărul lor în spectrul de emisie sunt determinate de către modurile ghidate în nanorod, care depind de geometria nanorodului și pot fi calculate prin rezolvarea numerică a ecuației Helmholtz ținând cont de anisotropia indicelui de refracție și dispersia materială [8-11].

În microtetrapoduri sunt posibile două tipuri de moduri de emisie [12,13]. În tetrapodurile de dimensiuni mici (cu lungimea picioarelor mai mică de 1 – 2 μm), precum și în tetrapodurile fără fațete bine conturate de tipul celor ilustrate în Figura 5a, este posibilă doar formarea modurilor ghidate în perechi de picioare, după cum este ilustrat în insertul din Figura 5a, care sunt similare modurilor ghidate din nanoroduri arătate în Figura 4 (rândul de sus). În tetrapodurile mai mari cu fațetele hexagonale de la capătul picioarelor bine formate de tipul celor arătate în Figura 5b și 4 (rândul de jos) este posibilă

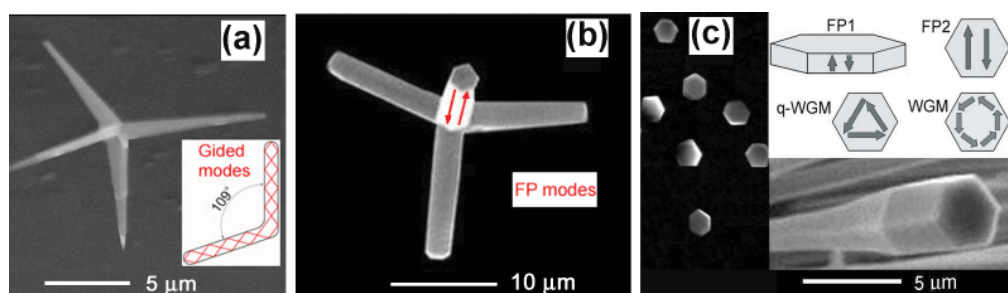


Figura 5. Tipuri de moduri de emisie laser în nanostructuri de ZnO: moduri ghidate (a); moduri Fabry-Perot (b); moduri de tipul galeriei șoptitoare (c)

formarea modurilor Fabry–Perot. Aranjamentul regulat al liniilor de emisie în spectrul de emisie din Figura 4 (rândul de jos) demonstrează originea Fabry–Perot a modurilor, distanța dintre modurile de emisie fiind determinată de expresia

$\Delta\lambda=(1/L)[(\lambda^2/2)(n-\lambda dn/d\lambda)^{-1}]$ , unde  $L$  este lungimea cavității rezonatorului,  $n$  este indicele de refracție, iar  $\lambda$  este lungimea de undă a radiației.

Un alt tip de moduri laser este posibil în microdiscuri sau în structuri în formă de bită de beisbol cu o prismă hexagonală la capătul ei după cum este ilustrat în Figura 5c, și anume moduri de tipul galeriei șoptitoare (whispering gallery modes WGM) [14]. Efectul laser în microdiscuri nu poate fi atribuit modurilor Fabry–Perot, formate în urma reflecțiilor de la fațetele hexagonale (modurile FP1 din Figura 5c). Pentru cavități cu lungimea de 100 nm (grosimea discurilor de ZnO), cu indicele de refracție de 2.4, la lungimea de undă de emisie  $\lambda=390$  nm distanța dintre modurile FP1 ar trebui să fie  $\Delta\lambda = \lambda^2/2nL=320$  nm. Cu alte cuvinte, în astfel de condiții trebuie să existe doar un singur mod de emisie Fabry–Perot în intervalul spectral 3.1–3.2 eV, pe când au fost observate câteva moduri de emisie în microdiscuri de ZnO în acest interval spectral. Modurile de emisie de tipul Fabry–Perot în microdiscuri sunt puțin probabile și din cauza amplificării optice

insuficiente în rezonatoare cu lungimea cavității de 100 nm. Factorul de calitate al modurilor de emisie calculat ca  $Q = \nu/\Delta\nu$ , unde  $\nu$  și  $\Delta\nu$  sunt frecvența și lățimea liniei de emisie, pentru microdiscuri de ZnO cu grosimea de 100 nm și diametrul de 1.8  $\mu\text{m}$  s-a dovedit a fi  $Q = 640$ .

Factorul de calitate pentru modurile de tipul FP1 calculat conform ecuației

$$Q = \frac{2nL_c\pi}{\lambda(1-\sqrt{R_1R_2})}$$

unde  $R_1$  și  $R_2$  sunt coeficienții de reflecție de la fațete, iar  $L_c$  este lungimea cavității, ar trebui să fie egal cu 4.6.

Pentru modurile Fabry–Perot, formate prin reflecții de la fațetele laterale ale microdiscului (modurile FP2 din Figura 5c), factorul de calitate ar trebui să fie  $Q = 80$ , valoare mult mai joasă decât cea observată experimental ( $Q = 640$ ). Structurile de tip hexagonal pot suporta moduri de tipul galeriei șoptitoare WGM sau cvasi q-WGM ( Figura 5c).

Factorul de calitate pentru o cavitate de forma unui poligon regulat poate fi calculat ca

$$Q = \frac{\pi m D R^{m/4}}{2\lambda(1-R^{m/2})} \sin\left(\frac{2\pi}{m}\right)$$

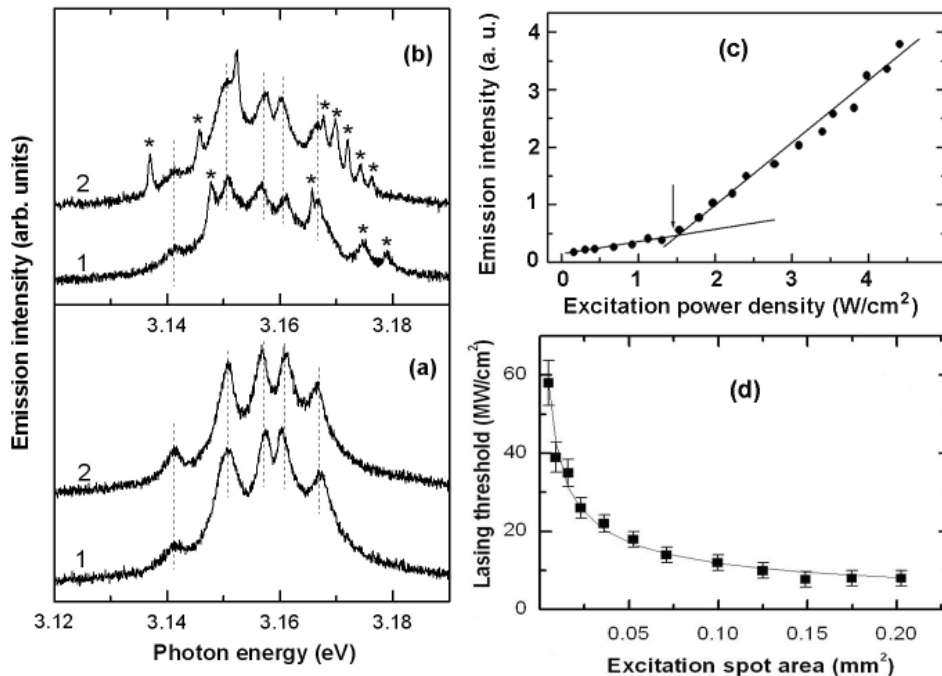


Figura 6. (a) Spectrele de emisie ale unei structuri emisferice ilustrate în mijlocul Figurii 2 la excitare în partea centrală cu un fascicul de diametrul 60  $\mu\text{m}$  (a) și la excitare integrală a structurii (b). Curbele 1 și 2 au fost măsurate la excitare cu două impulsuri consecutive cu durata de 10 nsec și densitatea de excitare de 2.2  $\text{mW}/\text{cm}^2$ . (c) – dependența intensității emisie de densitatea de excitare la o structură cu morfologia ilustrată în imaginea de mijloc din rândul de jos al Figurii 2. (d) – dependența pragului de emisie laser în funcție de aria suprafeței excitate în aceeași structură

unde  $m$  este numărul fațetelor,  $D$  este diametrul poligonului, iar  $R$  este coeficientul de reflecție de la fațete. În acest caz, atât modurile WGM, cât și q-WGM pot asigura un factor de calitate de 640, dar pierderile de radiație în cazul modurilor q-WGM sunt mai mari decât în cazul modurilor WGM.

Rezonatoare laser combinate au fost realizate în structuri emisferice de tipul celor ilustrate în mijlocul Figurii 2. Spectrul de emisie de la această structură depinde de aria excitată din microstructură. Spectrul de emisie de la partea centrală a microstructurii, excitată cu un fascicul de diametrul 60  $\mu\text{m}$  la densități de excitare mai mari decât pragul laser, constă din câteva linii de emisie care nu se schimbă de la un impuls de excitare la altul, după cum se vede din Figura 6a. Aceste moduri de emisie sunt de tipul WGM, formate în prisma hexagonală ilustrată în imaginea de jos a Figurii 5c.

La excitarea integrală a structurii emisferice cu un fascicul de lumină mai larg, în spectrul de emisie apar niște linii noi marcate cu stelute în Figura 6b în plus la liniile observate în Figura 6a. Din Figura 6b putem observa că liniile marcate cu stelute diferă de la un impuls de excitare la altul, ceea ce este caracteristic pentru efectul laser aleatoriu. Efectul laser aleatoriu este realizat în această structură datorită împrăștierii puternice a luminii în stratul de la baza structurii emisferice.

Rezonatoare de tipul laserului aleatoriu se formează și în structuri produse prin metoda MOCVD cu morfologia ilustrată în rândul de jos al Figurii 2 [9]. Emisia laser din aceste structuri a fost observată sub forma multiplelor linii foarte înguste care apar în spectrul de emisie la excitare cu densități mai mari decât pragul laser, iar numărul și poziția spectrală a lor diferă de la un impuls de excitare la altul. Pragul de emisie laser în aceste structuri, determinat din schimbarea pantei din dependența ilustrată în Figura 6c, este de 1.5 W/cm<sup>2</sup>. Formarea modurilor de tipul Fabry–Perot sau WGM nu este posibilă în aceste structuri din cauza formei neregulate a nanostructurilor, a pierderilor optice mari și a amplificării insuficiente în nanostructuri individuale. Pe de altă parte, efectul laser aleatoriu nu necesită cavități regulate, dar depinde în schimb de puterea de împrăștiere a luminii în material. Efectul laser aleatoriu este demonstrat și de analiza dependenței pragului de emisie laser în raport cu aria suprafeței excitate  $A_p$ . În cazul rezonatoarelor de tipul Fabry–Perot, WGM, sau a modurilor ghidate, pragul de emisie laser nu depinde de aria suprafeței excitate, spre deosebire de rezonatoarele laser aleatoriu. O analiză cantitativă a efectului laser aleatoriu în polimeri dopați cu molecule de coloranți, dar și în straturi policristaline de ZnO, a arătat că performan-

ța laserului aleatoriu depinde în mod critic de aria suprafeței excitate, precum și de dimensionalitatea mediului laser aleatoriu [15,16]. S-a demonstrat că pragul de emisie laser este proporțional cu  $A_p^{-0.5}$  în cazul unui mediu laser aleatoriu bi-dimensional (2D) și este proporțional cu  $A_p^{-0.75}$  în cazul unui mediu tri-dimensional (3D).

Analiza dependenței pragului de emisie laser în funcție de aria suprafeței excitate în structuri produse prin metoda MOCVD cu morfologia ilustrată în imaginea de mijloc din rândul de jos al Figurii 2 demonstrează o dependență  $I_{th} = (3.5 \pm 0.4)A_p^{-(0.53 \pm 0.03)}$ , care este în bună concordanță cu mediul laser aleatoriu 2D. Aceste structuri pot fi, într-adevăr, considerate bi-dimensionale, deoarece lumina este împrăștiată în planul stratului de ZnO, iar confinarea optică în direcția perpendiculară stratului se produce prin reflexie internă totală datorită diferenței indicilor de refracție a stratului de ZnO și a suportului de cuarț, pe de o parte, și a mediului ambiant, pe de altă parte.

## 5. Concluzii

Acest studiu confirmă posibilitatea de producere cu ajutorul tehnologiilor cost-efective a materialului ZnO cu proprietăți optice necesare pentru amplificarea radiației optice în domeniul ultraviolet al spectrului care, de rând cu varietatea de nanostructuri și microstructuri cu proprietăți excelente de rezonatoare laser, poziționează oxidul de zinc ca un material cu o perspectivă largă de aplicare în nanolasere și microlasere pentru circuitele optoelectronice și fotonice integrate.

Rezultatele expuse în această lucrare au fost obținute în colaborare cu colegii de la Institutul de Fizică Aplicată al Universității Karlsruhe (TH), Germania; Laboratorul de Fizică H H Wills al Universității Bristol, Marea Britanie, Laboratorul de Cristalizare din Soluții la Temperaturi Înalte a Institutului de Fizică a Corpului Solid, Chernogolovka, Rusia și alte centre de cercetare și au fost publicate în peste 20 de lucrări în reviste de circulație internațională cu înalt factor de impact. Elaborările principale au fost prezentate la expoziții și saloane naționale și internaționale, iar prioritatea lor este protejată de 5 brevete de invenții.

Lucrarea a fost efectuată cu suportul Centrului Științifico-Tehnologic din Ucraina (STCU) (proiectul # 4034). Dr. Victor Zalamai apreciază suportul financiar al Fundației Alexander von Humboldt și DFG KC 354/23.

## Bibliografie

1. U. Ozgur, Ya.I. Aliliv, C. Liu, A. Teke, M.A. Reshchikov, S. Dogan, V. Avrutin, S-J Cho, M. Morkoc, A comprehensive review of ZnO materials and devices, *J. Appl. Phys.* **98** (2005) 041301.
2. C. Klingshirn, ZnO: From basics towards applications, *Phys. Stat. Sol. (b)* **244** (2007) 3027-3073.a
3. M.C. Newton, P.A. Warburton, ZnO tetrapod nanocrystals, *Materials Today* **10**(5) (2007) 50-54.
4. C. Klingshirn, *Semiconductor Optics*, 3rd ed. Springer-Verlag, Berlin, (2007), 809 p.
5. C. Klingshirn, R. Hauschild, J. Fallert, H. Kalt H, Room-temperature stimulated emission of ZnO: Alternatives to excitonic lasing, *Phys. Rev. B* **75** (2007) 115203.
6. M.H. Huang, S. Mao, H. Feick, H. Yan, Y. Wu, H. Kind, E. Weber, R. Russo, P. Yang, Room-Temperature Ultraviolet Nanowire Nanolasers, *Science* **292** (2001) 1897-1899.
7. Meyer B K et al., Bound exciton and donor-acceptor pair recombinations in ZnO, *Phys. Stat. Sol. (b)* **241** (2004) 231-260.
8. R. Hauschild, H. Kalt H, Guided modes in ZnO nanorods, *Appl. Phys. Lett.* **89** (2006) 123107.
9. V.V. Ursaki, V.V. Zalamai, A. Burlacu, J. Fallert, C. Klingshirn, H. Kalt, G.A. Emelchenko, A.N. Redkin, A.N. Gruzintsev, E.V. Rusu, I.M. Tiginyanu, A comparative study of guided modes and random lasing in ZnO nanorod structures, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** (2009) 095106.
10. V.V. Ursaki, V.V. Zalamai, A. Burlacu, J. Fallert, C. Klingshirn, H. Kalt, G.A. Emelchenko, A.N. Redkin, A.N. Gruzintsev, E.V. Rusu, I.M. Tiginyanu, Guided mode lasing in ZnO nanorod structures, Superlattices and Microstructures **46** (2009) 513-522.
11. V.V. Zalamai, V.V. Ursaki, C. Klingshirn, H. Kalt, G.A. Emelchenko, A.N. Redkin, Lasing with guided modes in ZnO nanorods and nanowires, *Appl Phys B* **97** (2009) 817-823.
12. V.V. Ursaki, V.V. Zalamai, I.M. Tiginyanu, A. Burlacu, E.V. Rusu, and C. Klingshirn, Refractive index dispersion deduced from lasing modes in ZnO microtetrapods, *Appl. Phys. Lett.* **95** (2009) 171101.
13. V.V. Zalamai, V.V. Ursaki, I.M. Tiginyanu, A. Burlacu, E.V. Rusu, C. Klingshirn, J. Fallert, J. Sartor, H. Kalt, Impact of size upon lasing in ZnO microtetrapods, *Appl. Phys. B* **99** (2010) 215-222.
14. V.V. Ursaki, A. Burlacu, E.V. Rusu, V. Postolake, I.M. Tiginyanu, Whispering gallery modes and random lasing in ZnO microstructures, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **11** (2009) 075001.
15. Cao H 2005 *J. Phys. A: Math. Gen.* **38** 10497.
16. Ling Y, Cao H, Burin A L, Ratner M A, Liu X and Chang R P H 2001 *Phys. Rev. A* **64** 063808.



Nina Arbore. *Pisici*. 1935. Acvaforte și acvatinta în ton sepia. 18 x 22