

## LASERELE DE LUMINĂ ALBASTRĂ - ELEMENTE CHEIE PENTRU NOILE SISTEME BD

Vasile Z. TRONCIU

Catedra de Fizică, Universitatea Tehnică a Moldovei  
[tronciu@mail.utm.md](mailto:tronciu@mail.utm.md)

### REZUMAT

Prezenta lucrare este destinată studiului dinamicii laserelor InGaN cu absorbant de saturație. Au fost identificate natura bifurcațiilor ce apar în dinamica laserului, precum și condițiile ce sunt necesare pentru apariția autopulsațiilor. S-a studiat influența parametrilor laserului asupra regiunilor de autopulsații și s-au determinat domeniile autopulsațiilor cu frecvențe mari. S-au estimat parametrii laserelor în vederea realizării și utilizării lor în sistemele BD.

**CUVINTE CHEIE** lasere InGaN, autopulsații, BD, CD, DVD

### 1. INTRODUCERE

Dezvoltarea extensivă din ultimii ani a sistemelor de comunicații, stocare și distribuție a informației a mărit interesul pentru dispozitive și surse noi de lumină. Recent, o atenție deosebită s-a acordat laserelor de lumină violetă și albastră de tipul InGaN. Interesul pentru asemenea lasere se datorează aplicării lor la stocarea și procesarea informației în sistemele BD (blu-ray disc) [1]. Sistemul BD reprezintă un succes al sistemelor CD și DVD care fac posibil, datorită utilizării laserului albastru cu lungime de undă 405 nm, înscrierea mai densă a datelor pe disc. În particular, diodele laser de lumină violet-albastră ce funcționează pe lungimea de undă de 405 nm sunt necesare pentru ridicarea capacității de stocare a unui disc până la 25 GB (Figura 1). Laserele și diodele de lumină albastră sunt de asemenea folosite la imprimante și monitoare color, în medicină, în biologie, etc [2].

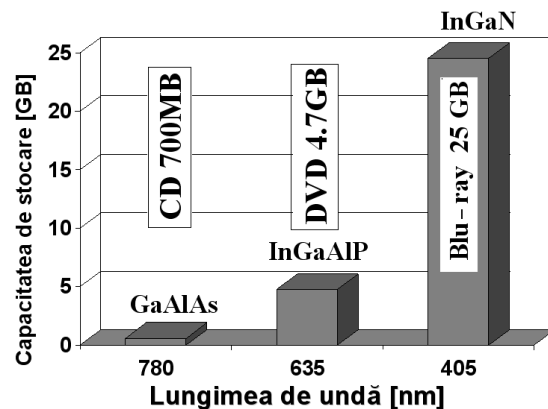


Figura 1. Dependența capacității de stocare a discului de lungimea de undă a laserului.

În ultimul deceniu au fost propuse și dezvoltate numeroase metode de producere a laserelor albastre ce funcționează în regim de unde continue [3]-[7]. Recent, realizarea laserului diodă violet a fost îmbunătățită astfel încât timpul funcționării lui a atins 15000 de

ore. Laserul de unde continue ce funcționează pe lungimea de undă  $\lambda = 400$  nm deja este disponibil comercial [8]. Și totuși, de la momentul când a fost publicată prima investigație a acestui fenomen de către Nakamura [9], nu s-a mai raportat despre fenomenul de autopulsatii în laserul de lumină violet-albastru. Evident, apare întrebarea - care-i motivul pentru cercetarea acestui fenomen? Anterior s-a demonstrat că funcționarea unui laser în regim de autopulsatii ridică semnificativ performanța lui și fenomenul autopulsatiilor este considerat eficient pentru reducerea zgomotului în cazul întoarcerii semnalului reflectat de un obstacol (o oglindă, un disc, o conectare a fibrelor optice etc) [10], [11]. Menționăm că acest fenomen este foarte important în cazul citirii informației de pe disc în vederea reducerii erorilor.

Recent, noi am comunicat despre proprietățile autopulsatiilor și excitabilitate pentru laserul InGaN cu diferite structuri ale absorbantului saturabil [12]–[15]. Prezenta lucrare este o continuare și completare a lucrărilor precedente. În paragraful 2 vom prezenta structura laserului cercetat, modelul și ecuațiile ce descriu evoluția fotonilor și purtătorilor de sarcină injectați. Rezultatele simulărilor numerice ce confirmă existența autopulsatiilor în laserul InGaN și influența diferiților parametri asupra frecvenței autopulsatiilor sunt arătate în paragraful 3. La sfârșitul lucrării sunt expuse concluziile.

## 2. LASER CU ABSORBANT DE SATURAȚIE

Modelul analitic al laserului cu autopulsatii este prezentat în Figura 2. Studiul teoretic are la bază o structură recent fabricată [16],[12]. Acest laser constă din stratul activ - 6 gropi în jurul unei gropi cuantice InGaN de saturare este de 3 nm. Ceilalți

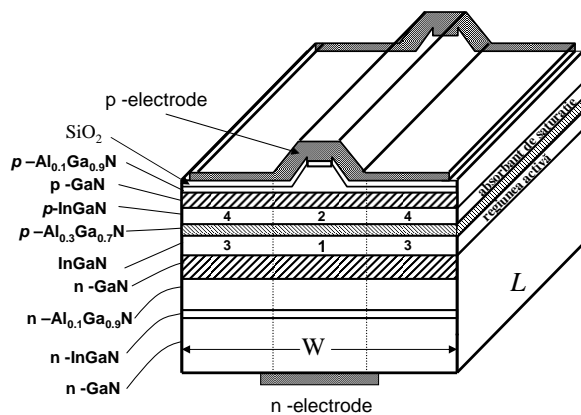


Figura 2. Modelul analitic al laserului cu autopulsatii. Studiul teoretic are la bază o structură recent fabricată [16],[12]. Acest laser constă din stratul activ - 6 gropi în jurul unei gropi cuantice InGaN de saturare este de 3 nm. Ceilalți parametri sunt în Tabelul 1.

Tabelul 1  
Parametrii laserului

Parametrii activi	
Parametrul	Valoarea
$a_{\text{activ}}$	$1.85 \times 10^{-12} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
$N_g$	$1.4 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$
$\tau_a$	2 ns
$d_a$	18 nm
$W_a$	2 $\mu\text{m}$
Parametrii saturantului	
$a_{SA}$	$13 \times 10^{-12} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$
$N_g$	$2.6 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$
$\tau_{SA}$	0.1 ns
$d_{SA}$	3 nm
$W_{SA}$	2.0 $\mu\text{m}$
Parametrii generali	
$\lambda$	395 nm
$R_f$	0.2
$R_b$	0.9
$\kappa$	$15 \text{ cm}^{-1}$

este prezentat pe modelul propus de către noi în această lucrare. Ecuatiile ce descriu

$$\frac{dS}{dt} = \left[ \frac{\sum_i a_i \xi_i (N_i - N_{gi})}{V_i} - BS - G_{th} \right] S + \frac{M \sum_i a_i \xi_i N_i}{V_i}, \quad (1)$$

$$\frac{dN_i}{dt} = -\frac{a_i \xi_i}{V_i} (N_i - N_{gi}) S - \frac{N_i}{T_{si}} + \sum_{j \neq i} \left( \frac{N_j}{T_{ij}} - \frac{N_i}{T_{ji}} + \frac{I_{ji} - I_{ij}}{e} \right), \quad (2)$$

unde  $S$  este numărul fotonilor,  $N_i$  - numărul purtătorilor de sarcină injectați în regiunea  $i$ ,  $a_i$  - coeficientul amplificării diferențiale,  $\xi_i$  - factorul de limitare a câmpului,  $N_{gi}$  - numărul purtătorilor de sarcină transferați prin regiunea  $i$ ,  $\tau_{si}$  - timpul de viață al purtătorilor de sarcină și  $T_{ij}$  - durata de timp echivalentă cu timpul de viață al purtătorilor de sarcină la difuzia lor din regiunea  $j$  în regiunea  $i$ .  $I_{ji}$  este intensitatea purtătorilor de sarcină injectați din regiunea  $j$  în regiunea  $i$ .  $M$  este echivalentul numărului total de moduri longitudinale,  $V_i$  - volumul secțiunilor laserului determinat de expresia  $V_i = W_i \cdot d_i \cdot L$ , unde  $L$  este lungimea laserului, iar  $d_i$  și  $W_i$  sunt respectiv grosimea și lățimea acestor secțiuni.  $B$  este coeficientul de amplificare la saturație

$$B = \frac{9\pi c \tau_{in}^2 |R_{cv}|^2 (N - N_{01}) a_1 \xi_1^2}{2\epsilon_0 n_r^2 \hbar \lambda_0 V_1^2}, \quad (3)$$

unde  $n_r$  este indicele de refracție,  $l_0$  - lungimea undei centrale a radiației laser,  $R_{cv}$  este momentul dipolului și  $\tau_{in}$  fiind timpul de relaxare a purtătorilor de sarcină în tranzițiile dintre zone. Nivelul pragului de amplificare este determinat de expresia

$$G_{th} = \frac{c}{n_r} \left( k + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_f R_b} \right), \quad (4)$$

unde  $R_f$  și  $R_b$  sunt coeficienții de reflexie de la fațetele anterioară și posterioară, iar  $k$  este coeficientul de absorbție a materialului din care este confecționat laserul.

Regiunea activă a laserului este separată în părțile centrale și exterioare așa cum este indicat în Figura 2. În calculele numerice s-au luat în considerare cele 4 regiuni funcționale: 1- regiunea centrală activă, 2- regiunea centrală de saturație și regiunile exterioare 3 și 4. Celelalte regiuni au fost luate în considerare la calcularea indicelui de refracție efectiv, configurației apropiate a câmpului și a factorului de limitare. Regiunea 5 reprezintă un strat exterior care este conectat electric la sursa exterioară de curent. Mai multe detalii despre procedeul de calcul se pot găsi în [18], [12].

### 3. REZULTATE ȘI DISCUȚII

Laserul produce autopulsații dacă pentru un curent exterior constant emisia lui reprezintă un tren periodic de impulsuri (Figura 3). Atât rezultatele experimentale cât și calculele numerice demonstrează prezența autopulsațiilor în lasere de tipul InGaN cu absorbant de saturație. În cazul laserului cu lungimea rezonatorului de  $650\mu\text{m}$  autopulsațiile au fost obținute experimental pentru valori ale curentului injectat cuprinse între 163 și 220 mA cu frecvențe în domeniul de la 1,6 până la 2,25 GHz [16]. În Figura 3 (a) este prezentată traiectoria obținută experimental cu un osciloscop. Traiectoria calculată numeric a impulsului în cazul unui laser cu lungimea rezonatorului de  $650\mu\text{m}$  și un curent injectat cu intensitatea de 185 mA este

arătată în Figura 3(b). După cum rezultă din Figura 3, rezultatele experimentale sunt în deplină concordanță cu calculele numerice și modelul propus descrie adecvat dinamica laserelor InGaN cu absorbant de saturație. Pornind de la această concluzie, în continuare vom cerceta influența parametrilor laserului și compoziția straturilor lui asupra regiunii autopulsațiilor și frecvenței lor.

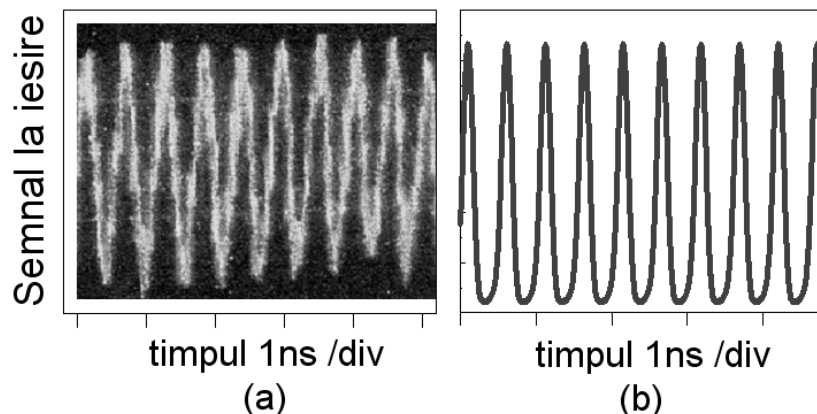


Figura 3. Traiectoria semnalului de ieșire a unui laser cu lungimea rezonatorului de  $650\mu\text{m}$  alimentat cu un curent de injecție de 185 mA (a) măsurată experimental [16] și (b) calculată numeric utilizând parametrii din Tabelul 1.

Vom începe analiza dinamicii laserului în termenii diagramelor bifurcaționale. În Figura 4 este arătată dependența numărului maxim de fotoni de intensitatea curentului injectat, cea din urmă constituie parametrul de bifurcație care variază. La creșterea de la 0 a intensității curentului injectat, îndată după valoarea sa de prag se observă funcționarea laserului în regim de unde continue (linia continuă subțire). După aceasta laserul începe să producă autopulsații la trecerea prin bifurcația Hopf, marcată în Figura 4 printr-un cerculeț. Această caracteristică este complet diferită de cea pentru alte lasere (GaAs) cu autopulsații descrise pe larg anterior în [18], [19] și [20], unde autopulsațiile încep îndată de la valoarea de prag a intensității curentului. În cazul dat la creșterea curentului injectat după trecerea prin bifurcația Hopf amplitudinea oscilațiilor crește. Vârful amplitudinii de pulsație atinge valoarea maximă și autopulsațiile dispar la punctul Hopf superior. Ambele puncte Hopf sunt supercritice. Menționăm că diagrama din Figura 4 este diferită de cea pentru laserele GaAs [18], [19], [20] datorită valorii mici a timpului de viață din regiunea absorbantului de saturație. Această micșorare se presupune a fi cauzată de efectele piezoelectric și tunel în structura cu gropi cuantice separate [21], [22], [16].

După cum s-a menționat în lucrările anterioare [12]-[15], proprietățile absorbantului de saturație determină apariția autopulsațiilor și în cele din urmă frecvența lor. În Figura 5 sunt ilustrate regiunile de autopulsații în dependența lungimii rezonatorului laserului de a) coeficientul amplificării diferențiale  $a_{SA}$  și b) timpul de viața al purtătorilor de sarcină  $\tau_{SA}$  în absorbant. Aceste regiuni au fost obținute folosind ecuațiile (1)–(4) pentru parametrii laserului InGaN (vezi Tabelul 1) și intensitatea curentului fixată la 150 mA. Regiunile întunecate sunt cele cu autopulsații, iar regiunea albă corespunde funcționării cu unde continue sau fără emisie. Observăm că în domeniul lungimilor rezonatorului de la 400 până la 500  $\mu\text{m}$  regiunile de autopulsații se lărgesc. Lungimile mici ale rezonatorului implică frecvențe mari ale autopulsațiilor, totuși aceste regiuni sunt înguste și au niveluri mari ale absorbției și curenți de prag mari. Astfel lungimile rezonatorului 400 – 500  $\mu\text{m}$  sunt cele mai favorabile pentru generarea autopulsațiilor cu frecvențe cuprinse între 2 și 3 GHz.

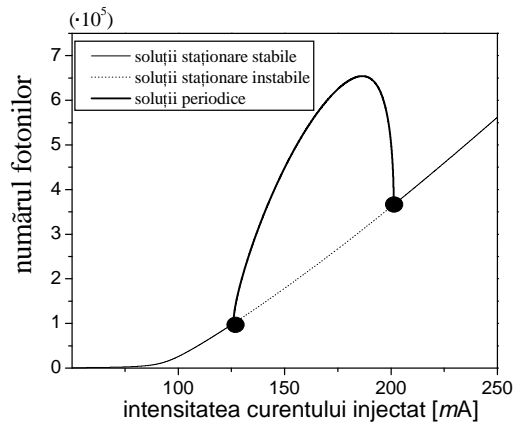


Figura 4. Diagrama bifurcațiilor pentru o lungime a rezonatorului de  $500\mu\text{m}$ . Linia subțire continuă indică regimul de funcționare cu unde continue, în timp ce linia cu puncte reprezintă ramura soluțiilor instabile. Linia continuă mai groasă arată valorile maxime ale soluției periodice stabile (ciclul limită). Cerculețele indică punctele de bifurcație Hopf.

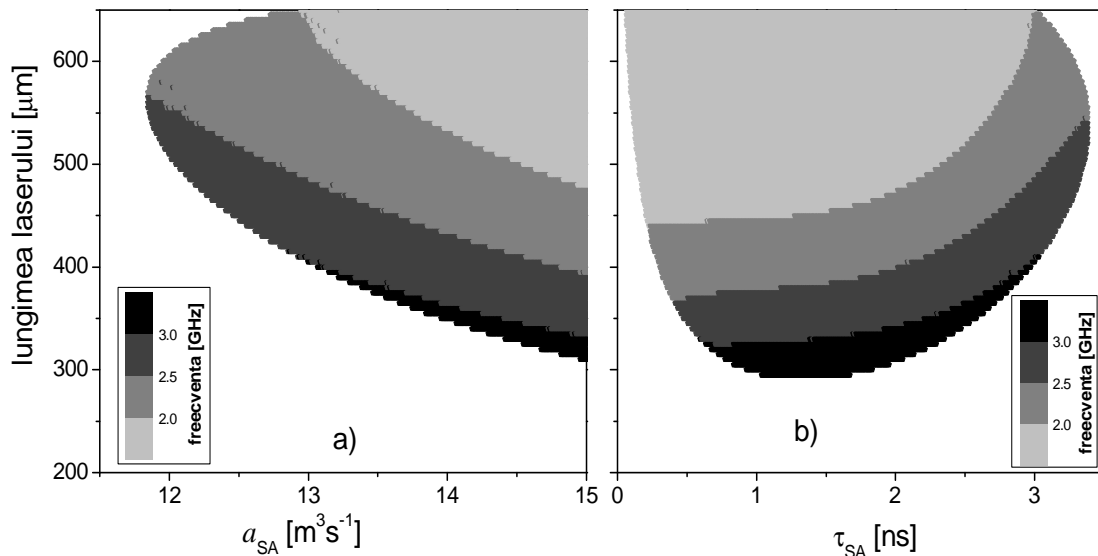


Figura 5 Variația frecvenței autopulsațiilor în planul: lungimea rezonatorului în funcție de a) coeficientul amplificării diferențiale în absorbant  $a_{SA}$  și b) timpul de viață a purtătorilor de sarcină  $\tau_{SA}$  în absorbant. Intensitatea curentului este de 150 mA. Ceilalți parametri sunt cei din Tabelul 1.

În continuare ne vom opri mai detaliat la influența timpului de viață al purtătorilor de sarcină în absorbant asupra caracteristicilor autopulsațiilor. În Figura 6 este arătată dependența numărului fotonilor de intensitatea curentului injectat pentru diferite valori ale timpului de viață al purtătorilor de sarcină în absorbant. Stările staționare instabile sunt trasate prin linii punctate. După cum observăm din figură, variația timpului  $\tau_{SA}$  nu influențează tare valoarea curentului de prag. Totuși pentru o valoare fixă a curentului injectat se observă o dependență mare a numărului fotonilor de valoarea lui  $\tau_{SA}$ . Se poate trage concluzia despre următoarele particularități: pentru valori mici ale lui  $\tau_{SA}$  numărul fotonilor este mic, dar regiunea autopulsațiilor largă; creșterea lui  $\tau_{SA}$  rezultă în creșterea numărului fotonilor și în

îngustarea regiunii autopulsațiilor; în cele din urmă, creșterea ulterioară a lui  $\tau_{SA}$  duce la dispariția autopulsațiilor și la apariția fenomenului de histereză. Cel din urmă a fost studiat în detalii în [14].

Vom analiza variația frecvenței autopulsațiilor în planul: timpul de viață al purtătorilor de sarcină vs intensitatea curentului injectat. În Figura 7 este arătat un exemplu al acestei dependențe pentru un laser cu lungimea rezonatorului de  $500\mu\text{m}$ . Această figură mai demonstrează încă o dată că pentru obținerea autopulsațiilor cu frecvențe înalte este necesară reducerea timpului de viață al purtătorilor în absorbantul de saturație.

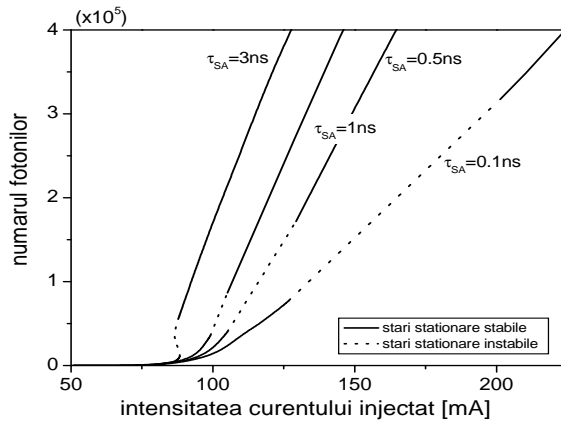


Figura 6. Dependenta numărului de fotoni de intensitatea curentului injectat pentru diferite valori ale timpului de viață al purtătorilor de sarcină. Stările staționare instabile sunt redat prin linie punctată, iar cele stabile prin linii continui.

După cum se vede din figură, menținerea valorilor mari ale timpului de viață al purtătorilor de sarcină în absorbant rezultă în micșorarea intensității curentului injectat pentru realizarea autopulsațiilor. Pe de altă parte, această micșorare duce la scăderea frecvenței autopulsațiilor și reducerea performanțelor laserului. În concluzie, menționăm că micșorarea timpului de viață al purtătorilor de sarcină în absorbant rezultă în generarea autopulsațiilor cu frecvențe mari. Recent, în [13] au fost prezentate diferite structuri ale laserelor în vederea obținerii duratelor mici de viață ale purtătorilor de sarcină în absorbant.

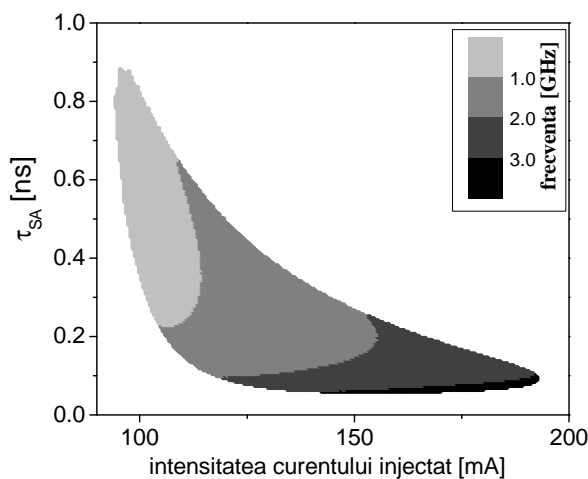


Figura 7. Regiunea autopulsațiilor în planul: timpul de viață a purtătorilor de sarcină în absorbant –intensitatea curentului injectat pentru lungimea rezonatorului  $500\mu\text{m}$ . Alți parametri sunt precum în Tabelul 1.

#### 4. CONCLUZII

În concluzie, menționăm că au fost studiate autopulsațiile unui laser de tipul InGaN cu emisie de lumină albastră-violetă cu lungimea de undă de 395 nm. Dinamica laserului este descrisă în limitele modelului lui Yamada, ajustat pentru cazul laserelor cu multe gropi cuantice InGaN cu absorbant de saturație. S-a arătat că grosimea absorbantului, precum și timpul de viață al purtătorilor de sarcină în absorbant joacă un rol deosebit în dinamica laserului. Autopulsațiile prezise teoretic au fost comparate cu cele detectate experimental în laserele recent fabricate și sunt în deplină concordanță. Din rezultatele obținute rezultă că laserul propus este promițător pentru aplicații practice în sistemele BD. Aceste lasere cu autopulsații dispun de o performanță îmbunătățită față de cele anterioare cu efect de undă continuă.

Autorul aduce mulțumiri prof. M. Yamada de la Universitatea din Kanazawa, Japonia, și prof. R. A. Abram de la Universitatea din Durham, Marea Britanie, pentru colaborare și discuții. Calde mulțumiri domnilor S. Ito, T. Kawakami și M. Taneya de la Compania Sharp, Japonia, pentru suportul experimental. O parte din lucrare a fost efectuată în cadrul proiectului 307 b/s.

#### BIBLIOGRAFIE

1. <http://blu-ray.com>
2. S. Nakamura, S. Pearton, and G. Fasol, *The Blue Laser Diode*, 2nd ed. (Springer, Berlin, 2000).
3. T. Takeuchi, H. Takeuchi, S. Sota, H. Sakai, H. Amano, and I. Akasaki, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Part 2 36, L177 (1997).
4. T. Kobayashi, T. Kobayashi, F. Nakamura, K. Naganuma, T. Tojyo, H. Nakajima, T. Asatsuma, H. Kawai, and M. Ikeda, *Electron. Lett.* 34, 1494 (1998).
5. A. Kuramata, S. Kubota, R. Soejima, K. Domen, K. Horino, and T. Tanahashi, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Part 2 37, L1373 (1998).
6. M. Kuramoto, C. Sasaoka, Y. Hisanaga, Y. Hisanaga, A. Kimura, A. A. Yamaguchi, H. Sunakawa, N. Kuroda, M. Nido, A. Usui, and M. Mizuta, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Part 2 38, L184 (1999).
7. M. Kneissl, D.P. Bour, C. G. Van de Walle, L.T. Romano, J.E. Northrup, R. M. Wood, M. Teepe, and N.M. Johnson, *Appl. Phys. Lett.* 75, 581 (1999).
8. <http://www.nichia.co.jp>
9. S. Nakamura, M. Senon, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kryoku, Y. Sugimoto, T. Kozaki, H. Umemoto, M. Sano, and K. Chocho, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Part 2 36, L1568 (1997).
10. M. Yamada, *J. Appl. Phys.* 79, 61 (1996).
11. S. Matsui, H. Takiguchi, H. Hayashi, S. Yamamoto, S. Yano, and T. Hijikata, *Appl. Phys. Lett.* 43, 219 (1983).

12. V.Z. Tronciu, M. Yamada, Tomoki Ohno, Shigetoshi Ito, Toshiyuki Kawakami, and Mototaka Taneya *IEEE J. Quantum Electronics* **39**, 1509-1514 (2003).
13. V.Z. Tronciu, M. Yamada Toshiyuki Kawakami, Shigetoshi Ito, Tomoki Ohno Mototaka Taneya and R.A. Abram *Optics Communications* Vol. **235** /4-6 pp. 409-414 (2004).
14. V.Z. Tronciu, M. Yamada and R.A. Abram *Phys. Rev. E* **70**, 026604 (2004).
15. V.Z. Tronciu, M. Yamada, Tomoki Ohno, Shigetoshi Ito, Toshiyuki Kawakami, and Mototaka Taneya *Analysis of self-pulsation characteristics of InGaN laser diode*, *Phys. Stat. Sol. C*, **7**, 2296-2299 (2003).
16. T. Ohno, S. Ito, T. Kawakami, M. Taneya, *Appl. Phys. Lett.* **83** 1098, (2003).
17. M. Yamada, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. **29**, pp. 1330–1336 (1993).
18. M. Yamada “ *IEICE Trans. Electron.*, vol. E81-C, pp. 290–298 (1998).
19. L.A. Dubbeldam and B. Krauskopf, *Opt. Commun.* **159**, 325 (1999).
20. C.R. Mirasso, G.H.M. van Tartwijk, E. Hernandez-Garcia, S. Lynch, P. Landais, P. Phelan, J. O’Gorman, M. San Miguel, and W. Elsasser, *IEEE J. Quantum Electron.* **35**, 764 (1999).
21. Y. D. Jho, J. S. Yahng, E. Oh, and D.S. Kim, *Appl. Phys. Lett.*, vol. **79**, pp. 1130–1132, (2001).
22. C.-K. Sun and T.-L. Chiu, *Appl. Phys.Lett.*, vol. **71**, pp. 425–427 (1997).

*Acceptat pentru publicare: 27 noiembrie 2013*