

COMUNICAREA OPTICĂ BAZATĂ PE HAOS CU AJUTORUL LASERELOR SEMICONDUCTOARE CU CAVITATE DE AER

Masterand Ana SANDUȚA

Dr. S.S. RUSU

Dr. hab. V.Z. TRONCIU

Universitatea Tehnică a Moldovei

CHAOS BASED COMMUNICATION USING
SEMICONDUCTOR LASER WITH AIR GAP
CAVITY

Summary. In this review, we report the results of the dynamical behavior of a novel integrated semiconductor laser subject to multiple optical feedback loops. The laser's structure consists of distributed feedback section coupled to a waveguide, an air gap section and phase section. It is found that due to the multiple feedback loops and under certain operating conditions the laser displays chaotic behaviors appropriate for chaos-based communications. The optimal conditions for chaos generation are identified. The synchronization of two unidirectional coupled (master-slave) systems are also studied. Finally, examples of message encoding and decoding are presented and discussed.

Keywords: chaos, communication, laser with air gap, cavity, synchronization.

Rezumat. În această trecere în revistă expunem rezultatele comportamentului dinamic al unui laser semiconductor integrat cu feedback optic multiplu. Structura laserului constă din secția activă cuplată la un ghid de undă, la un strat de aer și la o secțiune de variație a fazei. S-a constatat, că datorită feedback-ului optic multiplu în anumite condiții de funcționare, sistemul are un comportament haotic adecvat comunicării bazate pe haos. Astfel au fost identificate condițiile optime pentru generarea haosului. De asemenea, a fost studiat fenomenul de sincronizare a două lasere cuplate unidirecțional. În cele din urmă sunt prezentate și discutate exemple de codare și decodare a mesajelor.

Cuvinte-cheie: haos, comunicare, laser cu cavitare aer, sincronizare.

Introducere

Astăzi este dificil să ne imaginăm viața fără computere personale, fără internet, comunicare optică, imprimante laser, display etc. În toate aplicațiile enumerate mai sus este nevoie de un dispozitiv care emite lumina, numit laser. În absența laserelor semiconductoare (LS) activitatea de zi cu zi în diferite domenii ale economiei naționale ar fi imposibilă. LS sunt folosite pe larg în comunicații optice, medicină, chimie, sisteme CD, DVD, BD, mecanică și măsurători, spectroscopie, sisteme display etc. Datorită acestor aplicații, laserele semiconductoare au devenit obiect de studiu în multe grupuri de cercetare din întreaga lume.

LS suscită interes nu numai sub aspect aplicativ, dar și din punct de vedere al cercetărilor fundamentale. Totodată, aceste lasere sunt sisteme nelineare. De aceea, în ultimii ani, dinamica lor a devenit obiect de studiu, iar cercetările teoretice sunt necesare pentru precizarea evoluției dispozitivelor laser cu diferite topologii [1]. De subliniat că laserele cu feedback distribuit (DFB – Distributed FeedBack lasers) cu multe secțiuni reprezintă elementul-cheie pentru diferite dispozitive utilizate în sistemele de comunicare optică.

Totuși, trebuie să constatăm ca în aplicațiile tipice ale LS este inevitabilă prezența unui feedback optic (FO). Acesta poate fi realizat de oglinzile rezonatorului laserului sau de reflexia de la alte componente optice ale sistemului. După cum se știe, chiar și valorile mici ale FO produs de la o oglinda plană (vezi Fig. 1) conduc la destabilizarea sistemului și la apariția instabilităților [2-4]. Astfel, FO poate influența considerabil comportamentul dinamic al laserului semiconductor (pentru detalii vezi lucrările [5-7]). Până și reflexiile simple de la oglinzile plasate în exterior, asemenea unor conectoare cu fibre, pot cauza diverse fenomene cum ar fi: colapsul coerent; fluctuații de frecvențe mici sau autopulsații (AP); haos etc.

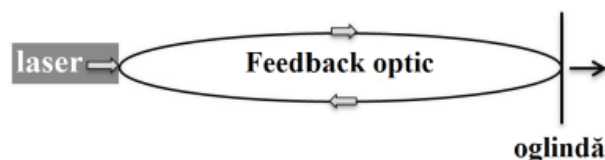


Fig. 1. Reprezentarea schematică a laserului DFB cu un singur mod cuplat cu o oglindă caracterizată de coeficientul de reflexie R și lungimea L .

Prezența oscilațiilor periodice sau haotice reprezintă un fapt bine cunoscut în LS supuse FO. În funcție de domeniul de aplicații, comportamentul haotic poate fi atât util, de exemplu, în aplicațiile

bazate pe haos, cât și nedorit într-un sistem de comunicații.

În această lucrare vom investiga posibilitatea destabilizării emisiei laser cu ajutorul cavităților externe și utilizării oscilațiilor haotice în sistemele de comunicare bazate pe haos. Din punct de vedere aplicativ, comunicarea în baza haosului a devenit atractivă deoarece permite îmbunătățirea securității în sistemele optice de transmitere a datelor. Interesul pentru acest domeniu a crescut considerabil după demonstrarea practică a comunicării optice bazate pe haos în rețeaua de fibre optice a Atenei [8]. În sistemele optice de comunicare bazate pe haos sunt folosite lasere semiconductoare cu diferite FO – complet optice [9-12] sau electro-optice [13-15]. De obicei, pentru generarea haosului, timpul de întârziere trebuie să fie mai mare de câteva sute de picosecunde. Astfel în aer, de exemplu, o oglindă plană trebuie să fie plasată la o distanță de câțiva centimetri de la fațeta laserului și ca rezultat întreg sistemul laser-oglină nu poate fi considerat compact. În acest context, laserele cu multe secții sub influența FO de la o secție exterioară ar fi un candidat convenabil pentru emiterea semnalului haotic și în același timp ar constitui un dispozitiv compact.

Datorită progresului tehnologic continuu, laserele cu multe secții au obținut configurații stabile și compacte, care includ secții integrate cu ghiduri de undă comune ce reglează deplasarea de fază. Însă cea mai simplă configurație, laserul cu două secții – una activă și alta pasivă ce acționează ca o cavitate externă – nu este potrivită, întrucât lungimea secției pasive este de obicei prea mică pentru a se realiza dinamica haotică. Așadar, este necesară examinarea unor modele mai complexe. Pasul făcut recent în această direcție a fost considerarea laserelor cu diferite configurații, care includ reacția inversă de la o cavitate dublă integrată. Nu demult, în lucrările [16-18] au fost cercetate diferite configurații ale laserelor semiconductoare sub influența FO de la cavități. De asemenea, pentru crearea FO au fost studiate diferite configurații utilizând rezonatoare Fabry-Perot [19,20], constatându-se că FO poate atât să destabilizeze emisia laserului, cât și să îmbunătățească stabilitatea emisiei de unde continue.

Scopul acestei treceri în revistă constă în expunerea rezultatelor ce țin de comunicarea bazată pe haos cu utilizarea laserelor semiconductoare cu multe cavități, una din ele fiind de aer. Vom determina condițiile, pentru care evoluția sistemului este haotică din cauza influenței semnalului ce vine de la cavitatea dublă. Vom arăta că aceste unde pot fi folosite în sistemele optice de comunicare bazate pe haos. De

asemenea, vom aborda fenomenul de sincronizare a două astfel de sisteme cuplate unidirecțional și vom determina regiunile de sincronizare în cazul a două lasere identice. Se va prezenta confirmarea experimentală a efectelor de sincronizare și de transmitere a mesajelor prin metoda modulării haotice.

Configurația laser și modelul matematic

Vom examina un dispozitiv, care constă dintr-un laser semiconductor ce funcționează sub influența FO de la o cavitate dublă și-i reprezentat în *Figura 2*. El constă dintr-un laser de unde continue, cuplat printr-o cavitate de aer cu o altă cavitate exterioară pasivă. Pentru evitarea pierderilor la difracție, în cavitatea de aer poate fi introdusă o microlentilă care asigură convergența fascicolului de lumină. Totuși, în experiment vom micșora cavitatea de aer pentru a elimina microlentila și pentru a evita pierderile. Avantajul schemei propuse cu două cavități față de cea convențională cu o oglindă plană constă în existența a două faze – una în cavitatea cu aer, iar alta în cavitatea cu material, ultima fiind ușor controlată în scopul destabilizării sistemului. Configurația dată permite mărirea coeficientului de reflexie a fațetei posterioare a cavității pasive cu material, astfel încât intensitatea semnalului ce se întoarce în laser să crească.

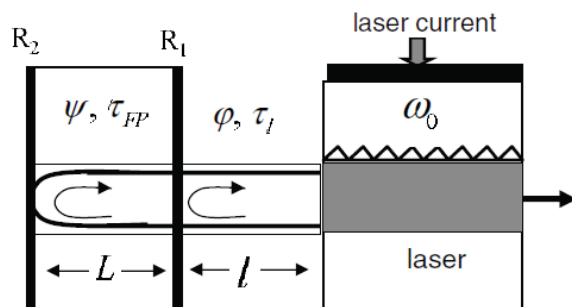


Fig. 2. Schema laserului cu cavitate de aer utilizat pentru sincronizarea haotică, codarea și decodarea mesajului digital sub influența reacției inverse multiple [21]

Pentru modelarea schemei din *Figura 2*, considerăm laserul cu un singur mod, care funcționează în regim de unde continue, cuplat în direcție longitudinală cu o cavitate dublă. Prima oglindă este plasată la distanța l de la fațeta din față a laserului. Distanța dintre prima și a doua oglindă este L . Faza ψ a cavității a doua poate fi ușor controlată de un curent mic injectat în regiunea pasivă de lungime L . Se consideră că curentul injectat în această secție este suficient de mic și influențează doar indicele de refracție, iar lungimea rezonatorului variază foarte puțin. De asemenea, vom presupune că în timp ce faza ψ variază, modificările timpului de întârziere dintre oglinzi τ_L sunt neglijabile. Ca alternativă la cu-

rentul injectat, această fază poate fi controlată cu ajutorul unui dispozitiv piezo-electric. În general, între oglinzi semnalul poate avea reflexii multiple. Totuși, ținând seama de faptul că intensitatea semnalului întors în laser este mică, aproximarea existenței unei singure bucle este justificată. Menționăm, că această aproximare simplifică mult calculele numerice.

$$\frac{dE_{t,r}}{dt} = (1 + i\alpha) \left[\frac{g(N_{t,r} - N_0)}{1 + \varepsilon |E_{t,r}|^2} - \frac{1}{\tau_{ph}} \right] \frac{E_{t,r}}{2} + \gamma_{t1,r1} e^{-i\varphi} E_{t,r}(t - \tau_l) + \gamma_{t2,r2} e^{-i(\varphi + \psi)} E_{t,r}(t - (\tau_l + \tau_L)) + k_r E_t, \quad (1)$$

$$\frac{dN_{t,r}}{dt} = \frac{I_{t,r}}{e} - \frac{1}{\tau_e} N_{t,r} - \frac{g(N_{t,r} - N_0)}{1 + \varepsilon |E_{t,r}|^2} |E_{t,r}|^2. \quad (2)$$

Dinamica sistemului este analizată în limitele modelului extins Lang-Kobayashi [22] pentru amplitudinea complexă a câmpului E și densitatea purtătorilor de sarcină N .

Indicii t și r se referă, respectiv, la laserul principal și cel secundar. Ultimul termen în ecuația (1) este prezent numai pentru laserul secundar și descrie cuplarea într-o singură direcție a laserelor. k_r este parametrul ce descrie intensitatea câmpului injectat în laserul secundar și este dat de următoarea ecuație $k_r = \eta_{ext} \sqrt{1-R} / (\tau_c \sqrt{R})$, unde R este coeficientul de reflexie a fațetei laserului secundar ($R = 30\%$), τ_c este timpul de circulație a câmpului în laser ($\tau_c = 10$ ps), η_{ext} descrie pierderile, cu excepția celor introduse de fațetele laserului ($\eta_{ext} = 0,5$). τ_l și τ_L sunt, respectiv, timpii de întârziere a câmpului în cavitatea cu aer și în secția pasivă L . $\gamma_{t1,r1}$ și $\gamma_{t2,r2}$ sunt, respectiv, intensitățile FO de la oglinzile R_1 și R_2 . Pentru simplitate vom considera R_1 și R_2 astfel, încât să se satisfacă condiția $\gamma_{t1} = \gamma_{t2} = \gamma_{r1} = \gamma_{r2} = \gamma$. $\varphi = \omega_0 \tau_l$ este faza acumulată în cavitatea cu aer și care poate să difere foarte mult de la un laser la altul. $\psi = \omega_0 \tau_L$ este faza acumulată în ambele cavități. Alți parametri au valorile: factorul Henry $\alpha = 5$; coeficientul amplificării diferențiale $g = 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ ps}^{-1}$; coeficientul de saturație a amplificării $\varepsilon = 5 \cdot 10^{-7}$; timpul de viață al fotonilor și al purtătorilor de sarcină $\tau_{ph} = 3$ ps și $\tau_e = 2$ ns; timpii de întârziere $\tau_l = 0.066$ ns, și $\tau_L = 0.2$ ns. Curentul injectat este fixat la valoarea $I = 50$ mA (curentul de prag este $I_{th} = 11.5$ mA), iar numărul purtătorilor de sarcină la transparentă – la valoarea $N_0 = 1,2 \cdot 10^8$. Aceste valori ale parametrilor sunt folosite pentru toate calculele efectuate la obținerea rezultatelor prezentate în figurile acestei lucrări.

Rezultate

Pentru intensități destul de mici ale semnalului FO, laserul emite în regim de unde continue sau de oscilații periodice. Regimul haotic apare doar când intensitatea semnalului de întoarcere este suficient de mare. *Figura 3* ilustrează evoluția în timp (partea stângă) și spectrul de putere (partea dreaptă) a laserului semiconductor sub influența feedback-ului cavității în regim haotic.

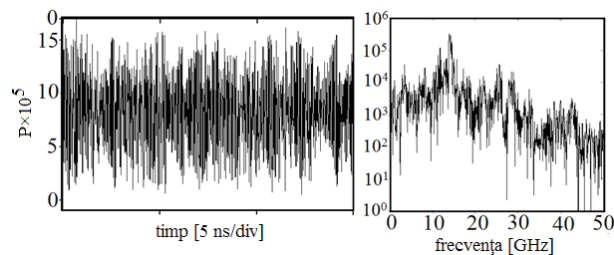


Fig. 3. Evoluția în timp a puterii emergente a laserului semiconductor

În cele ce urmează vom cerceta dinamica laserului în limbajul diagramelor bifurcaționale. În *Figura 4* este reprezentată o diagramă tipică a bifurcațiilor pentru laserul semiconductor aflat sub influența feedback-ului optic.

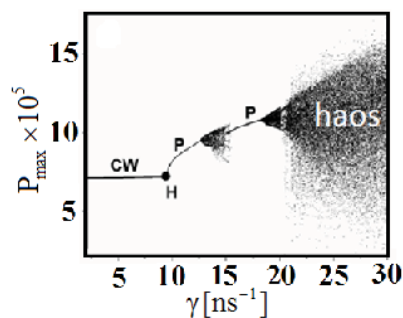


Fig. 4. Diagrama bifurcațiilor obținută numeric pentru valorile $\varphi = -\pi/2$, $\psi = \pi$ ale fazelor. **CW** indică regimul de unde continue, cerculețul **H** indică bifurcația Hopf, iar **P** arată maximum soluțiilor periodice

Odată cu creșterea intensității reacției inverse, în sistem apar diferite instabilități. Pentru valori mici ale intensității reacției inverse observăm regimul de unde continue a puterii emergente care reprezintă o singură valoare a maximumului puterii. Pentru valoarea intensității reacției inverse $\gamma = 10$ ns^{-1} apare bifurcația Hopf, iar puterea emergentă a laserului manifestă un caracter oscilatoriu. Deoarece oscilațiile sunt periodice, pentru o valoare fixă a intensității reacției inverse toate maximele puterii emergente au aceeași valoare și, ca rezultat, apare doar un singur punct. Bifurcația Hopf este supercritică, iar amplitudinea oscilațiilor, după cum se știe, crește ca funcție de rădăcină pătrată din distanța de la punctul de bifurcație. Odată cu creșterea ulterio-

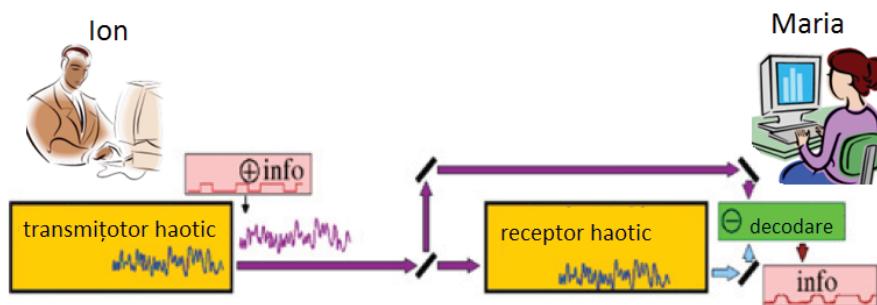


Fig. 5. Schema tehnicii de modulare haotică la codarea și decodarea mesajelor

oară a intensității reacției inverse se obține un scenariu compatibil cu trecerea cuasiperiodică la haos. Menționăm că domeniul și amplitudinea acestor oscilații sunt mici. Când intensitatea reacției inverse atinge valoarea $\gamma = 15 \text{ ns}^{-1}$, se observă trecerea la o nouă regiune de operare periodică **P**. La creșterea ulterioară a intensității reacției inverse apare al doilea scenariu compatibil cu traseul cuasiperiodic spre haos. Pentru valori mari ale intensității reacției inverse sistemul oscilează în regim haotic.

În cele relatate mai sus am clarificat diferite aspecte ale dinamicii laserelor semiconductoare cuplate prin feedback optic pentru obținerea oscilațiilor haotice. În continuare vom studia configurația de transmitere-recepție și vom evalua proprietățile de sincronizare a două lasere. Astfel vom examina criptarea și decriptarea unui mesaj digital în sistemele optice de comunicare bazate pe haos.

În literatura de specialitate au fost propuse diferite metode de criptare haotică, cum ar fi: modularea haosului [9]; deplasarea haotică a cheii [23]; mascarea haotică [24] etc. Vom analiza detaliat doar cazul, când mesajul informațional este inclus ca o modulație a amplitudinii haotice a purtătorilor de sarcină – așa-numita modulare haotică [9]. În cazul când laserele sunt sincronizate, mesajul poate fi decodificat la receptor prin compararea semnalului de intrare cu cel de ieșire din receptor. Astfel, în continuare ne vom concentra asupra configurației emițător-receptor, evaluării proprietăților de sincronizare și de utilizare a acestor dispozitive integrate de codare și decodare a mesajelor în comunicațiile bazate pe haos. În tehnica de modulare a haosului mesajul este codificat ca o modulare a unei amplitudini mici a câmpului emis de sistemul principal (vezi Fig. 5).

În Figura 6 este reprezentată puterea emisă de un sistem secundar în funcție de puterea celui principal (diagrama de sincronizare) pentru regimul haotic și diferite nivele ale parametrului de cuplaj k . În cazul în care sistemele principal și secundar sunt identice și parametrul de cuplaj este egal cu zero, traiectoriile laserelor principal și secundar se îndepărtează una de

alta și diagrama de sincronizare reprezintă un nor de puncte care demonstrează lipsa corelației dintre puterile emise. Mărind parametrul de cuplaj până la $k = 50 \text{ ns}^{-1}$, pe diagramă se observă un proces clar de sincronizare (vezi Fig. 6, b) cu un coeficient de corelație reciprocă $C = 0.75$. Mărind parametrul de cuplaj până la 100 ns^{-1} , sincronizarea se îmbunătățește și coeficientul de corelație reciprocă se mărește, apropiindu-se de unitate (vezi Fig. 6, c și d).

Criptarea haotică a informației este un domeniu relativ nou. Drept exemplu pentru un sistem criptografic haotic am considerat modularea haosului [9] ce poate fi ușor implementată în dispozitivele reale. Semnalul informațional este criptat ca o modulare a amplitudinii câmpului electric al semnalului laserului principal, astfel încât semnalul transmis laserului secundar este

$$E_T = E_t (1 + \zeta m(t)), \quad (3)$$

unde $m(t)$ este semnalul informațional, iar ζ – amplitudinea lui. Mesajul informațional este decodat comparând semnalul ce intră cu cel care iese din laserul secundar în condițiile când laserele principal și secundar sunt sincronizate ideal

$$M_{\text{decodat}} = \sqrt{P_T/P_S} - 1 \quad (4)$$

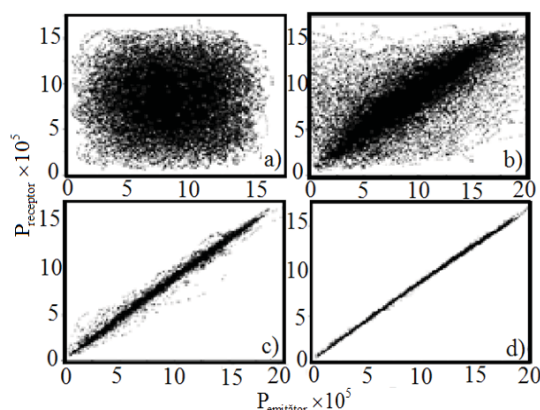


Fig. 6. Diagrama de sincronizare a două lasere, obținută numeric pentru diferite valori ale coeficientului de cuplaj k : a) $k = 0 \text{ ns}^{-1}$ (sistemul nu este corelat), b) $k = 50 \text{ ns}^{-1}$ ($C = 0.75$), c) $k = 75 \text{ ns}^{-1}$ ($C = 0.997$) d) $k = 100 \text{ ns}^{-1}$ ($C = 0.9995$). C este coeficientul de corelație.

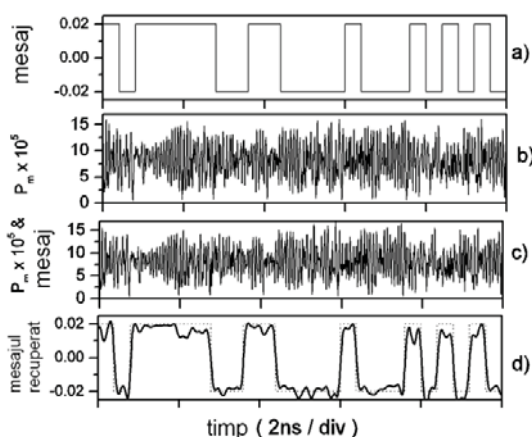


Fig. 7. Rezultatele numerice ale criptării unui mesaj digital de 2.5 Gbit/s, obținute cu un sistem de lasere haotice: a) semnalul informațional destinat pentru criptare; b) puterea emergentă a laserului principal; c) puterea emergentă a laserului principal cu semnalul informațional; d) semnalul informațional după decriptare și filtrare (linia continuă) și semnalul incident (linia punctată).

Figura 7 ilustrează procesul de transmitere a unui semnal digital. Panelul a) prezintă forma semnalului incident, adică al celui care trebuie transmis. Paneelele b) și c) arată puterea emergentă a laserului principal fără mesaj și împreună cu acesta, iar panelul d) – mesajul decodat după formula (4) și apoi filtrat cu un filtru potrivit, așa cum este realizat în [24].

După cum se vede în figură, pentru cazul ideal, când parametrii ambelor lasere coincid, mesajul este recuperat complet. Astfel am demonstrat teoretic că metoda modulării haotice poate fi ușor implementată în sistemele de comunicare optică bazate pe haos [21].

Confirmarea experimentală

În continuare vom expune unele rezultate experimentale [25] ce confirmă anumite efecte descrise mai sus și în lucrările [26, 27]. Designul laserelor a fost propus de către unul dintre autori în cadrul proiectului european PICASSO. Ulterior ele au fost

fabricate la Institutul HHI Berlin [28] și investigate experimental în Dipartimento di Elettronica la Università din Pavia, Italia [29]. Schema investigată este reprezentată în Figura 8 și este compusă din secția activă DFB cuplată cu două secții de reglare a fazei, două ghiduri de lumină transparente și o cavitate de aer. Toate aceste secții ale sistemului ce formează multiple cavități sunt acoperite cu straturi de reflexie înaltă. Ulterior, modulele cu cavități de aer descrise anterior au fost caracterizate pe larg experimental ca generatoare de haos.

De asemenea, au fost realizate experimente de transmisie între fațetele din spate ale laserelor. Fațeta din față a laserului este maxim anti-reflectivă în scopul creării condițiilor pentru obținerea unei valori maxime a puterii emergente. Secțiunea DFB este compusă din 8 gropi cuantice. În urma investigațiilor experimentale s-a arătat că laserul descris mai sus în anumite condiții produce haos. Ulterior s-a demonstrat că două astfel de lasere pot fi sincronizate. Astfel, într-o structură compusă din două lasere, unite în schema de conectare „fațeta posterioară a unuia cu fațeta posterioară a altuia”, a fost realizată transmiterea unui mesaj informațional.

În cele ce urmează vom prezenta rezultatele obținute pentru laserele cu grosimea cavității de aer de 5 μm . Ținem să menționăm, că rezultate similare au fost obținute și pentru alte valori ale grosimii cavității de aer (ca exemple 2, 10, 25 μm). După cum s-a demonstrat, datorită multiplelor legături inverse prezente în sistem, în laserul cu cavitate de aer evoluția puterii emergente este haotică pentru domenii mari ale parametrilor și pentru intervale mari ale variației curentului de injecție.

Figura 9 reflectă posibilitatea de sincronizare a două lasere de tipul celor din Fig. 8, care reprezintă una din condițiile legate de transmiterea securizată a mesajului [25, 29]. Calitatea sincronizării a fost estimată din diagrama prezentată în Figura 9, unde sunt

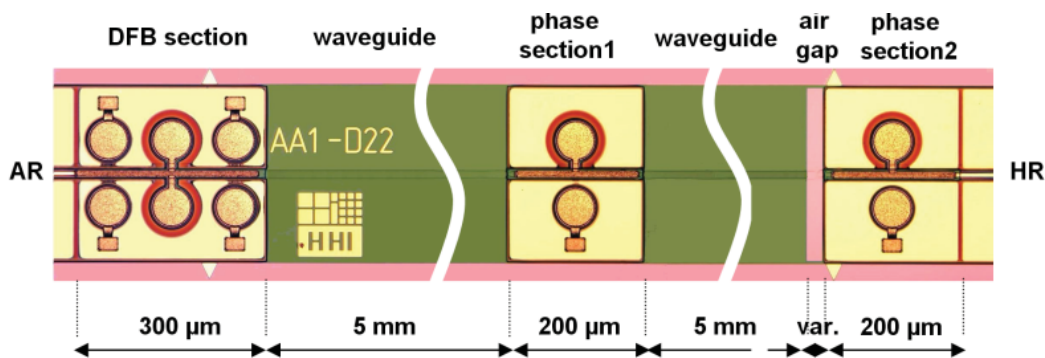


Fig. 8. Schema laserului cu cavitate de aer studiată în experiment [25, 30]

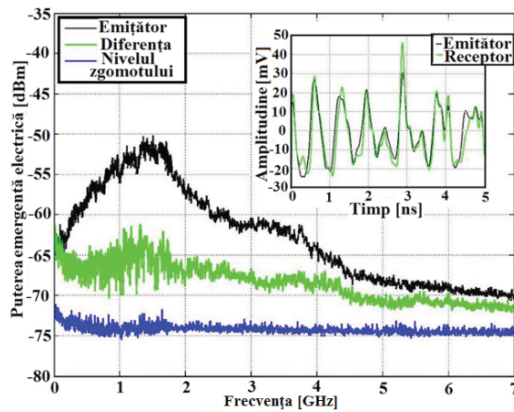


Fig. 9. Diagrama de sincronizare obținută experimental a două lasere de tipul celui prezentat în *Figura 3*, unite într-o configurație unidirecție (emițător→receptor). În inserție sunt prezentate evoluțiile în timp ale amplitudinilor emițătorului și receptorului [25].

comparate spectrul RF al laserului principal și cel al diferenței spectrelor laserului principal și secundar, obținute experimental. Este interesant să observăm că în jurul frecvenței de 1.5 GHz calitatea sincronizării este cea mai mare. În inserția din *Figura 9* sunt prezentate evoluțiile în timp ale laserelor principal și secundar pentru starea de sincronizare. Este ușor de observat că semnalele sunt perfect sincronizate.

Luând în considerație faptul că laserele emițătorului și receptorului pot fi sincronizate în experiment (vezi *Fig. 9*) în continuare arătăm posibilitatea de transmitere a unui semnal digital în schema de conectare „fațeta posterioară - fațeta posterioară”. Un mesaj de 1 Gb/s a fost injectat în laserul principal folosind un modulator de amplitudine extern [25,29]. Decodarea semnalului s-a efectuat la receptor prin metoda de anulare a haosului. S-a obținut o mască eficientă a mesajului (vezi *Fig. 10, a*) care ulterior s-a decodat perfect (vezi *Fig. 10, b*). În aceste experimente s-a folosit un filtru ce elimină componentele de frecvență înaltă ale haosului.

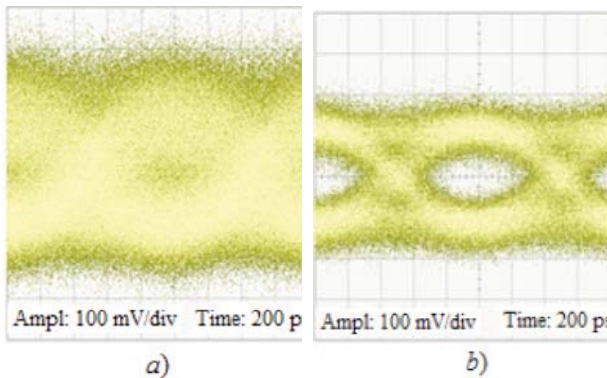


Fig. 10. Fotografia diamei ochi pentru a) un semnal digital de 1Gb/s mascat sub haos și b) mesajul decodat prin metoda de anulare a haosului la receptor [25,29]

Concluzii

În limitele unei adaptări a ecuațiilor Lang-Kobayashi a fost cercetat laserul semiconductor cu un singur mod și cu feedback optic ce provine de la mai multe cavități, una fiind de aer. Prezența mai multor secții conduce la complicarea oscilațiilor sistemului. De menționat că stări haotice ale sistemului cu feedback optic de la cavități multiple au fost obținute și pentru valori mici ale intensității reacției inverse. Un avantaj al sistemului propus în comparație cu cel al feedback-ului optic convențional este că starea de haos apare pentru lungimi mici ale cavităților, ceea ce face dispozitivul mult mai compact. Pe de altă parte, s-a demonstrat că în anumite condiții două astfel de sisteme laser pot fi sincronizate atunci când ele operează în regim haotic în configurația emiter-receptor. Pentru valorile parametrilor la care este obținută sincronizarea perfectă s-a demonstrat posibilitatea de criptare și decriptare a mesajului prin metoda modulării haotice. Mesajul poate fi adecvat restabilit la receptor, chiar și la viteze înalte de transmitere a informației. În final, este expusă confirmarea experimentală a efectelor de sincronizare și transmitere a mesajului informațional.

Acknowledgments

Authors acknowledge the support of the Technical University of Moldova project 106 b/s - 11.817.05.17F. VZT acknowledges the support from the CIM-Returning Experts Programme. V.Z.T. also would like to thank C.Mirasso, P. Colet, V. Annovazzi-Lodi and M. Hamacher their helpful discussions on the results presented in this paper.

Bibliografie

1. Agrawal Govind P., Dutta Niloy K., *Semiconductor lasers - Van Nostrand Reinhold*, 1993, 616 pages.
2. Tartwijk G.H.M and Lenstra D., *Semiconductor lasers with optical injection and feedback*, Quantum Semiclass. Opt., 1995, vol. 7, p. 87-143.
3. Krauskopf B. and Lenstra D. (Eds.), *Fundamental Issues of Nonlinear Laser Dynamics*, AIP Conference Proceedings. 2000, p. 548.
4. Fischer A.P.A., Yousefi Mirvais, Lenstra D., Michael W. Carter, and Vemuri Gautam, *Experimental and Theoretical Study of Semiconductor Laser Dynamics Due to Filtered Optical Feedback*, IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics 2004, vol. 10, p. 944-954.
5. Sacher J., Baums D., Panknin P., Elsaesser W., Goebel E.O., *Intensity instabilities of semiconductor lasers under current modulation, external light injection, and delayed feedback*, Phys. Rev. A, 1992, vol. 45, p. 1893-1905.
6. Petermann K., *External optical feedback phenomena in semiconductor lasers*, IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron., 1995, vol. 1, p. 480-489.

7. Yousefi M., Lenstra D., *Dynamical behavior of a semiconductor laser with filtered external optical feedback*, IEEE J. Quantum Electron., 1999, vol. 35, p. 970-976.
8. Argyris Apostolos, Syvridis Dimitris, Larger Laurent, Annovazzi-Lodi Valerio, Colet Pere, Fischer Ingo, Garcí'a-Ojalvo Jordi, Mirasso Claudio R., Pesquera Luis, Shore K. Alan, *Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links*, Nature., 2005, vol. 438, p. 343-346.
9. Mirasso C.R., Colet P. and Garcia-Fernandez P., *Synchronization of Chaotic Semiconductor Lasers, Application to Encoded Communications*, IEEE Photon. Technol. Lett., 1996, vol. 8, p. 299-301.
10. Annovazzi-Lodi V., Donati S. and Scire A., *Synchronization of chaotic injected-laser systems and its application to optical cryptography*, IEEE J. Quantum Electron, 1996, vol. 32, p. 953-959.
11. Fischer I., Liu Y. and Davis P., *Synchronization of chaotic semiconductor laser dynamics on subnanosecond time scales and its potential for chaos communication*, Phys. Rev. A., 2000, vol. 62, p. 011801(R)-011805.
12. Bogris A., Kanakidis D.F., Argyris A. and Syvridis D., *Performance Characterization of a Closed-Loop Chaotic Communication System Including Fiber Transmission in Dispersion Shifted Filters*, IEEE J. Quant. Electron., 2005, vol. 41, p. 469-469.
13. Tang S. and Liu J.M., *Message encoding-decoding at 2.5 Gbits/s through synchronization of chaotic pulsing semiconductor lasers*, Opt. Lett., 2001, vol. 26, p. 1843-1845.
14. Gastaud N., Poinot S., Larger L., Merolla J.-M., Hanna, M., Goedgebuer J.-P., Malassenet F., *Electro-optical chaos for multi-10 Gbit/s optical transmissions*, Elect. Lett., 2004, vol. 40, p. 898-899.
15. Lin F.Y. and Tsai M.C., *Chaotic communication in radio-over-fiber transmission based on optoelectronic feedback semiconductor lasers*, Opt. Express., 2007, vol. 15, p. 302-311.
16. Simmendinger C. and Hess O., *Controlling delay-induced chaotic behavior of a semiconductor laser with optical feedback*, Phys. Lett A., 1996, vol. 216, p. 97-105.
17. Ruiz-Oliveras F.R. and Pisarchik A.N., *Phase-locking phenomenon in a semiconductor laser with external cavities*, Optics Express., 2006, vol. 14, p. 12859-12867.
18. Register F., Sukow D.W., Gavrielides A., Megret P., Deparis O. and Blondel M., *Experimental demonstration of suppression of low-frequency fluctuations and stabilization of an external-cavity laser diode*, Opt. Lett., 2000, vol. 25, p. 808-810.
19. Tronciu V.Z., Wünsche H.-J., Wolfrum M. and Radziunas M., *Semiconductor laser under resonant feedback from a Fabry-Perot resonator: Stability of continuous-wave operation*, Phys. Rev.E, 2006, vol. 73, p. 046205-046212.
20. Schikora S., Hövel P., Wünsche H.-J., Schöll E. and Henneberger F., *All-Optical Noninvasive Control of Unstable Steady States in a Semiconductor Laser*, Phys. Rev. Lett., 2006, vol. 97, p. 213902-213906.
21. Tronciu V. Z., Mirasso Claudio R. and Colet Pere, *Chaos-based communications using semiconductor lasers subject to feedback from an integrated double cavity*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., 2008, vol. 41, p. 155401/1-155401/8.
22. Lang R. and Kobayashi K., *External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties*, IEEE J. Quantum Electron., 1980, vol. 16, p. 347- 355.
23. Heil Tilmann, Mulet Josep, Fischer Ingo, Mirasso Claudio R., Peil Michael, Colet Pere and Elsässer Wolfgang, *ON/OFF Phase Shift Keying for Chaos-Encrypted Communication using External-Cavity Semiconductor Lasers*, IEEE J. Quantum Electron., 2002, vol. 38, p. 1162-1170.
24. Sanchez-Diaz A., Mirasso Claudio R., Colet Pere and Garcia-Fernandez P., *Encoded Gbit/s digital communications with synchronized chaotic semiconductor lasers*, IEEE J. Quantum Electron., 1999, vol. 35, p. 292-297.
25. Tronciu V.Z., Mirasso C., Colet P., Hamacher M., Benedetti M., Vercesi V., Annovazzi-Lodi V., *Chaos generation and synchronization using an integrated source with an air gap*, IEEE J. Quantum Electronics., 2010, vol. 46, p. 1840-1846.
26. Tronciu V.Z., Ermakov I.V., Colet Pere, Mirasso Claudio R., *Chaotic dynamics of a semiconductor laser with double cavity feedback: Applications to phase shift keying modulation Optics Communications*, 2008, vol. 281, p. 4747-4752.
27. Tronciu V.Z., *Chaos communication using semiconductor lasers subject to different kinds of optical feedback*, Moldavian J. Phys. Sci., 2010, vol. 9, p. 50-69.
28. Hamacher M., private communication.
29. Annovazzi-Lodi V., private communication.
30. Tronciu V., private communication.