UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREŞTI

Şcoala Doctorală de Electronică, Telecomunicații și Tehnologia Informației

Decizie nr. 780 din 03-12-2021

REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT

Cristina Sanda Onea

STUDII PRIVIND COMPORTAREA SISTEMELOR LASER CU SEMICONDUCTOARE ÎN CAVITĂȚI OPTICE EXTERNE DUBLE PENTRU COMUNICAȚII SECURIZATE

COMISIA DE DOCTORAT

Prof. Dr. Ing. Bogdan IONESCU Politehnica Univ. of Bucharest	Președinte
Prof.Dr.Ing.Paul E. STERIAN Politehnica Univ. of Bucharest	Conducător de doctorat
Prof.Dr.Ing.Ion Marghescu Politehnica Univ. of Bucharest	Conducător de doctorat
Prof. Dr. Ing. Doina MĂNĂILĂ MAXIMEAN Politehnica Univ. of Bucharest	Referent
Prof. Dr. Mihaela BARITZ Transilvania University of Bucharest	Referent
C.S.I.Dr.Fiz.Mihai Lucian PASCU INFLPR- IFA	Referent

BUCUREŞTI 2022

Cuprins

1.Introducere 1

1.1 Prezentarea domeniului tezei de doctorat 1

1.2 Scopul tezei de doctorat 1

1.3 Conținutul tezei de doctorat 2

2.Dinamica neliniară haotică a emisiei laserilor cu semiconductori cu cavitate optică externă 3

2.1 Introducere 3

2.2 Laserul cu semiconductoare 3

2.2.1 Construcție și funcționare 3

2.2.2 Parametri de control ai emisiei laser 4

2.2.3 Haosul determinist în fizica laserilor 4

2.3 Sistemul Laser cu semiconductoare cu Cavitate optică Externă (LSCE) 4

2.3.1 Efectele reacției optice asupra dinamicii laser; dinamica haotică 4

2.3.2 Regimul fluctuațiilor de joasă frecvență (LFF) 4

2.3.3 Sisteme laser cu semiconductoare cu cavitate externă simplă și dublă 5

2.4 Analiza Fourier a dinamicii haotice a emisiei laser; spectrul de putere 6

2.5 Controlul dinamicii haotice prin modularea curentului de injecție 6

3.Dinamica haotică de tipul fluctuațiilor de joasă frecvență a emisiei diodelor laser în condiții de funcționare la curenți de injecție peste curentul de prag 7

3.1 Introducere 7

3.2 Caracteristicile montajului experimental 7

3.2.1 Montajul experimental 7

3.2.2 Specificațiile tehnice ale subansamblelor 8

3.3 Caracteristica putere- curent; efectul de ”mode hopping” 9

3.4 Rezultate și discuții 9

3.5 Concluzii 10

4.Dinamica oscilațiilor haotice de înaltă frecvență ale emisiei unui sistem laser cu semiconductoare cu cavitate externă dublă 11

4.1Introducere 11

4.2 Dinamica sistemului laser cu semiconductoare cu cavitate externă dublă 11

4.3 Sistemul laser cu semiconductoare cu cavitate externă dublă (D-LSCE) 12

4.4 Rezultate și discuții 12

4.5 Concluzii 14
5.Sincronizarea și controlul dinamicii haotice în prezența modulării curentului de injecție într-un sistem de două lasere cu semiconductori cuplate master- slave..... 15
5.1 Introducere 15
5.2 Montajul experimental 15
5.3 Rezultate și discuții 16
5.4 Concluzii 17
6.Simularea numerică a dinamicii haotice a emisiei multimod a unui laser cu semiconductoare cuplat optic cu două cavități optice externe..... 18
6.1 Introducere 18
6.2 Montajul experimental și modelul de simulare 18
6.2.2 Sistemul de ecuații diferențiale pentru modelarea emisiilor D-LSCE 19
6.2.3 Dezvoltarea modelului de simulare numerică 20
6.3 Rezultate și discuții..... 21
6.4 Concluzii 22
7.Concluzii generale, rezultate, contribuții și perspective de dezvoltare..... 22
7.1 Rezultate obținute..... 23
7.2 Contribuții originale..... 24
7.3 Lista lucrărilor originale..... 28
7.4 Perspective de dezvoltare ulterioară..... 30
Bibliografie 31

Capitolul 1

Introducere

1.1 Prezentarea domeniului tezei de doctorat

Laserele cu semiconductoare cuplate optic cu cavități externe simple sau multiple, funcționând în regim de reacție optică (feedback optic) au fost studiate atât teoretic cât și experimental în legătură cu aplicațiile lor: controlul dinamicii neliniare (haotice) a emisiei laser și generarea dinamicii haotice multi-dimensionale pentru codificarea datelor informatice[1–3]. În conexiune cu ultima categorie s-au realizat studii atât pentru determinarea semnăturii cavității externe din măsurarea frecvenței oscilațiilor generate de aceasta, cât și pentru ascunderea informațiilor despre geometria cavității externe utilizate [4–6]. Sistemele laser cu emisie în regim haotic, cu cavitate externă cu reflectător dublu, care utilizează ca element extern reflectător rețele de difracție au fost studiate atât teoretic cât și experimental în legătură cu blocarea unor frecvențe laser și creșterea puterii pentru aplicații în laserele cu fibră optică sau analiza modurilor mixte ale stărilor dinamice [7, 8].

1.2 Scopul tezei de doctorat

În această teză am obținut o serie de rezultate noi privind analiza, controlul și sincronizarea dinamicilor haotice în regim de fluctuații de joasă frecvență ale emisiei diodelor laser cu cavitate externă utilizabile în codarea și transmiterea informațiilor.

Pentru aceasta am realizat o serie de studii experimentale privind emisia laser haotică a diodelor laser aflate în cavitate optică externă simplă sau dublă și controlul acesteia prin modularea curentului de injecție într-un sistem de laseri cuplați într-un montaj de tip transmițător-receptor (master-slave) [9, 10]. Studiul dinamicii emisiei diodei laser în condiții de reacție optică dublă a evidențiat un regim de oscilații de înaltă frecvență modulate de fluctuațiile de joasă frecvență. Modificarea intensității feedback-ului într-una dintre cavități permite obținerea de oscilații de înaltă frecvență cu frecvența acordabilă în sistemul format din cele două cavități externe cuplate.

Rezultatele prezentate în teză sunt primele observații experimentale raportate in literatura ale unui astfel de comportament al frecvențelor unui sistem cu două cavități externe (D-LSCE) [11]. Acestea se pot aplica în domeniul codificării și

transmiterii datelor utilizând purtătoarele laser deoarece frecvențele implicate nu poartă informație despre geometria sistemului experimental.

Studiul experimental al dinamicii fluctuațiilor LFF în condiții de cuplaj optic s-a realizat pentru două sisteme laser cu semiconductoare funcționând în regim de feedback optic și cuplate într-un montaj de tip transmițător-receptor (master-slave) în regim sincronizat haotic. S-a arătat că fluctuațiile LFF ale sistemului slave pot fi controlate prin modularea curentului de injecție al sistemului master, în funcție de frecvența de modulare și frecvențele naturale LFF[10].

Pentru abordarea teoretică am utilizat simularea numerică a evoluției ecuațiilor de rată Lang-Kobayashi, acestea fiind considerate cea mai bună aproximare a modului de emisie a unui laser cu semiconductoare în condițiile unui feedback moderat [12]. Aceste simulări permit o evaluare, înaintea efectuării experimentelor a rezultatelor ce vor fi obținute în funcție de parametrii controlabili experimental. Rezultatele numerice obținute arată că modelul multimod dezvoltat simulează dinamica emisiei haotice a sistemului experimental D-LSCE pentru un set particular de valori ale parametrilor [13].

1.3 Conținutul tezei de doctorat

Teza este structurată pe 7 capitole, primele două sunt destinate prezentării domeniului tezei de doctorat și prezentării unor noțiuni generale legate de dinamica neliniară haotică a emisiei laserilor cu semiconductori cu cavitate optică externă. Capitolele 3-6 prezintă cercetările efectuate iar în capitolul 7 sunt prezentate contribuțiile personale în domeniul tezei de doctorat.

Capitolul 2

Dinamica neliniară haotică a emisiei laserilor cu semiconductoare cu cavitate optică externă

2.1 Introducere

Domeniile fizicii laserilor și teoriei haosului s-au dezvoltat independent până în 1975 când Haken a descoperit că se poate face o analogie între ecuațiile Lorentz de curgere convectivă a fluidelor și ecuațiile Maxwell -Block care descriu interacțiunea dintre lumină și materie într-un laser monomod [14]. Aceste investigații timpurii au condus spre studiul comportamentului diodelor laser considerate ca oscilatori nelininiari amortizați [15].

2.2 Laserul cu semiconductoare

2.2.1 Construcție și funcționare

Emisia stimulată a radiației poate să apară în urma procesului de recombinarea a electronilor și golurilor dintr-o joncțiune de tip p-n (dioda laser) dacă aceasta este alimentată la o tensiune directă (dc) a cărei valoare permite realizarea inversiunii de populație în imediata vecinătate a joncțiunii. Diodele laser sunt singurele dispozitive care permit modularea în amplitudine a radiației emise stimulat prin modularea energiei de pompaj. Această proprietate permite utilizarea diodelor laser la transmiterea pe cale optică a informației, cu ajutorul unui fascicul laser modulat.

Pentru ca emisia laser să poată avea loc la nivelul unei joncțiuni de tip p-n este necesară utilizarea unei structuri semiconductoare ”degenerate” în care dopajul depășește o anumită limită atât la impuritățile donoare, cât și la cele acceptoare. În

zona activă se produc purtătorii, electroni și goluri, care asigură funcționarea cu câștig optic pozitiv a diodei laser [16].

2.2.2 Parametri de control ai emisiei laser

Lungimea de undă a radiației emise de un laser cu semiconductoare depinde de o serie de parametri, unii fixați prin construcție (diferența minimă de energie (gap-ul) dintre banda de valență și cea de conducție; lungimea cavității laser), alții care pot fi controlați (temperatura mediului activ și intensitatea curentului de injecție) [17].

2.2.3 Haosul determinist în fizica laserilor

În cazul laserilor există anumite condiții în care emisia, deși coerentă, are o comportare haotic determinstă [17, 18]. Teoria haosului și-a găsit o serie de aplicații în fizica laserilor cum ar fi: utilizarea radiației laser haotice în transmisia criptată a datelor utilizând sisteme haotice, folosirea unui semnal de feedback întârziat pentru controlul dinamicii unui oscilator semiconductor stabil și reglabil [19].

2.3 Sistemul Laser cu Semiconductoare cu Cavitate optică Externă (LSCE)

2.3.1 Efectele reacției optice asupra dinamicii laser; dinamica haotică

În cazul laserilor cu semiconductoare se poate evidenția un comportament haotic al emisiei în condițiile unei reacții optice externe (feedback) obținute prin plasarea în calea fasciculului laser a unui element optic reflectător care poate întoarce o parte din radiația emisă la nivelul mediului activ laser [20]. Reinjectarea în cavitatea diodei laser a unei mici fracțiuni din radiația emisă determina la ieșire un semnal haotic format prin suprapunerea mai multor tipuri de unde, caracterizat de o serie de proprietăți. Multitudinea de dinamici rezultă din competiția dintre oscilațiile intrinseci de relaxare ale mediului activ și oscilațiile cavității externe [21, 22].

2.3.2 Regimul fluctuațiilor de joasă frecvență (LFF)

Fluctuațiile de joasă frecvență sunt oscilații haotice care apar în emisia laser atunci când un sistem laser cu semiconductoare cu cavitate externă (LSCE) funcționează la un curent de injecție apropiat de curentul de prag al emisiei laser. Acest regim este generat de instabilitățile sistemului și se prezintă sub forma unor oscilații intermitente care apar în punctele critice sau de bifurcație, în care două stări diferite ale unui sistem neliniar se suprapun și intră în competiție [23, 24].

Acest regim haotic al emisiei unui laser cu semiconductoare cu feedback optic extern este cel mai mult studiat, el prezentându-se sub forma unor căderi periodice, aproape de zero, ale intensității laser. Fluctuațiile emisiei apar la valori scăzute ale frecvenței, în domeniul de bandă joasă până la 100 MHz și sunt diferite de regimul de oscilații rapide, cu valori de ordinul 1 GHz.

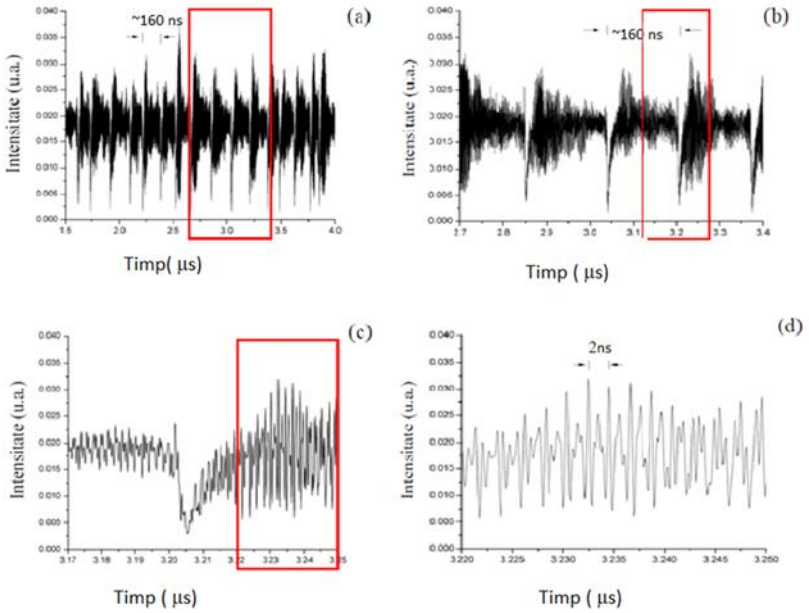


Figura. 2.10 Seria temporală a intensității emisiei laser: (a) dinamica haotică de tip LFF; (b) detaliu pe zona marcată în (a); (c) trenuri de pulsuri (oscilații) ultrascurte - detaliu pe zona marcată în (b); (d) oscilații ultrascurte – detaliu pe zona marcată din (c). Parametrii de operare: I=1,04 × Ith, t=24°C si Lext=30cm. In (a)-(b) si (c) sunt indicate perioadele medii caracteristice ale oscilațiilor LFF, respectiv, ale oscilațiilor modurilor cavității externe

Fluctuațiile LFF constituie anvelopa oscilațiilor asociate modurilor cavității externe compuse (Figura. 2.10 b-d), care la rândul lor formează trenuri de pulsuri de înaltă frecvență. Se observă în figura. 2.10 c) că aceste trenuri de pulsuri sunt întrerupte la intervale de timp neregulate de căderile bruște ale intensității laser, urmată apoi de o creștere a acesteia. Aceste pulsuri se succed după un scenariu haotic. Apariția fluctuațiilor haotice LFF este, de obicei, însoțită de o creștere a puterii emisiei sistemului laser, față de emisia la prag a laserului în absența feedback-ului optic datorită fracțiunii de radiație reinjectate în cavitatea laser [25].

2.3.3 Sisteme laser cu semiconductoare cu cavitate externă simplă și dublă

Evidențierea emisiei haotice LFF a unui laser cu semiconductoare se poate realiza numai în condițiile aplicării unei reacții optice (feedback) externe. În acest scop este necesară realizarea unei cavități optice externe cu ajutorul căreia o fracțiune din radiația emisă de laser să fie reîntoarsă la nivelul joncțiunii laserului.
Cavitatea externă cu reflector optic dublu (D-LSCE) combină o cavitate externă liniară, limitată de o rețea de difracție în configurație Littrow, care realizează

feedbackul optic pe ordinul -1 de difracție al retelei, cu o cavitate Littman care asigură feedback-ul optic pe ordinul 0 de difracție.

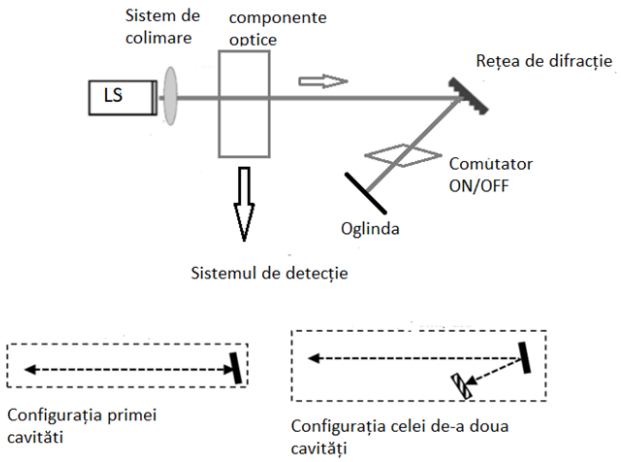


Figura 2.15 Schema bloc a montajului laser cu semiconductoare cu cavitate externă dublă (D-LSCE)[7]

Acest tip de modulare este folosită în comunicațiile optice digitale unde semnalul pe care îl transmite dioda laser modulează purtătoarea optică.

2.4 Analiza Fourier a dinamicii haotice a emisiei laser; spectrul de putere

Analiza seriilor temporale are ca principal scop construirea unor modele care să poată descrie comportamentul sistemului, evoluția sa viitoare sau simularea dinamicii unor părți componente ale sale. În urma analizei seriei de timp, se pot obține informații despre existența unei evoluții dominante a sistemului, despre apariția unor procese oscilante periodice și modul cum ele se pot succede în viitor [26].

2.5 Controlul dinamicii haotice prin modularea curentului de injecție

Emisia unei diode laser poate fi modulată, fără a perturba dinamica acesteia prin introducerea unui semnal periodic aplicat pe curentul de alimentare al diodei laser prin intermediul sursei de control astfel încât emisia să se sincronizeze cu acest semnal. Acest tip de modulare este folosită în comunicațiile optice digitale unde semnalul pe care îl transmite dioda laser modulează purtătoarea optică[10, 27].

Capitolul 3.

Dinamica haotică de tipul fluctuațiilor de joasă frecvență a emisiei diodelor laser în condiții de funcționare la curenți de injecție peste curentul de prag

3.1 Introducere

În acest capitol am prezentat o analiză extinsă a regimului LFF și a datelor experimentale obținute în cadrul tezei privind stabilitatea acestui regim pentru diferite seturi de parametri experimentali.

3.2 Caracteristicile montajului experimental

3.2.1 Montajul experimental

Cu ajutorul montajului experimental a cărui schema este arătată în figura 3.1 s-au determinat condițiile de reproductibilitate, respectiv domeniile de valori ale parametrilor de operare a sistemului, pentru care se pot obține dinamici haotice de tipul fluctuațiilor de joasă frecvență (LFF) [8].

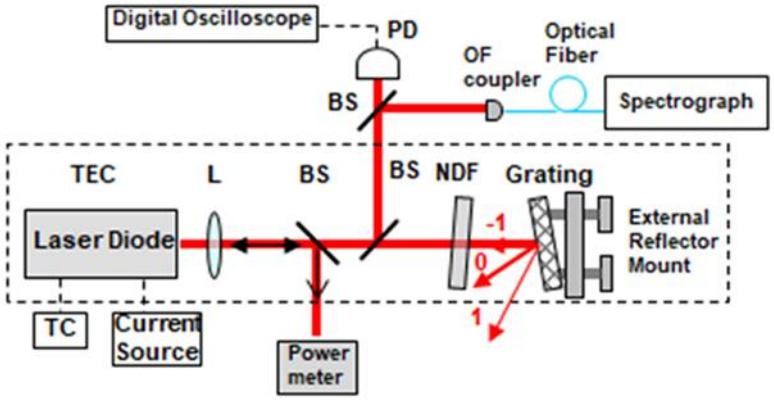


Figura 1.1 Schema montajului experimental LSCE: TEC, montura de control termo-electric; TC, sursa de control a temperaturii; L, lentila colimatoare; BS, divizoare de fascicul; NDF, filtru neutru continuu variabil; PD, fotodetector; OF, fibra optică; -1, 0, 1, ordine de difracție ale rețelei.

În montajul experimental utilizat, un prim divizor de fascicul (BS 1) separă din fasciculul emis o fracțiune de 33% care ajunge la power-metru, restul de 66% se îndreaptă spre al doilea divizor de fascicul (BS 2), care transmite o fracțiune de 82% din intensitatea luminoasă care traversează BS 1. Fascicolul laser ajunge pe un filtru neutru (NDF) continuu variabil și de aici este dirijat spre elementul reflector, oglindă sau rețea optică. Fascicolul luminos reflectat este dirijat parțial spre fotodetector pentru a fi analizat cu ajutorul osciloscopului. O fracțiune de 67% este dirijată prin BS 3 spre fotodioda cuplată la osciloscop iar restul de 33% este dirijat printr-o fibră optică la un spectrograf pentru analiza spectrului optic.

3.2.2 Specificațiiile tehnice ale subansamblelor

Laserul utilizat este o diodă laser Mitsubishi tip ML101J8 stabilizată cu ajutorul unei unități de control a curentului de injecție tip Lightwave LDX-3620. Puterea maximă (40 mW) se obține la parametrii optimi de funcționare în undă continuă, respectiv la I=109 mA și t=24°C, la lungimea de undă λ=663 nm. În absența feedback-ului optic dioda laser prezintă un curent de prag de emisie laser la I_{0th}= 54 mA. Temperatura de termostatare este controlată cu ajutorul unei instalații de termostatare tip Lightwave LDT-5910B, prin intermediul monturii diodei (conține două elemente de termostatare tip Peltier de 16 W). Semnalul optic este achiziționat cu fotodetectorul ET-2030A (Laser 2000), cuplat cu un osciloscop Tektronix DPO7254 utilizat la înregistrarea și analiza seriei temporale a intensității laser. Structura spectrală a emisiei sistemului LSCE s-a inregistrat cu un monocromator Princeton Instruments (tip Acton SpectraPro 2750) cu rezoluția optică de 0.02 nm.

3.3 Caracteristica putere- curent; efectul de ”mode hopping”

Analiza rezultatelor raportate în literatura arată că este utilă o stare haotică înaltă pentru transmiterea unui volum mare de date, permițând totodată și funcționarea laserului la o putere suficient de mare pentru sincronizarea mai multor receptori. Pentru realizarea unei sincronizări stabile in configurație punct-multipunct (un transmițător LSCE si unul sau mai mulți receptori LSCE) este de preferat un regim cu stare haotică joasă [15, 28].

O posibilă soluție pentru îndeplinirea ambelor cerințe o reprezintă aplicarea unui curent de injecție peste curentul de prag, la o valoare corespunzătoare apariției fenomenului de ”mode-hopping” (salt între moduri), adică în acele zone critice în evoluția emisiei laser unde transferul de intensitate de pe un mod pe altul este fluctuantă (instabilă), asemănătoare instabilităților la pragul emisiei laser. Aceste puncte de salt, nefiind specificate în detaliile tehnice ale diodelor laser se determină numai experimental prin ridicarea caracteristicii putere-curent, la diferite temperaturi de termostatare a diodei laser.

În figura 3.6 sunt reprezentate o serie de șase spectre consecutive achiziționate la un interval de 100 μs, la o temperatură de 24,9^{0}C și un curent de 79.9 mA.

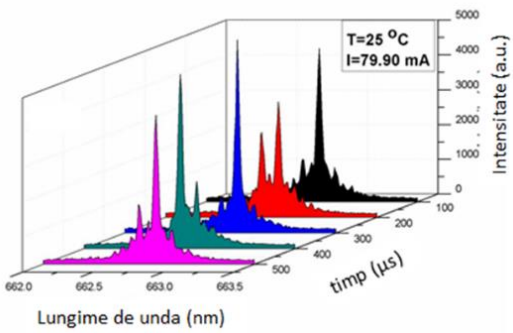


Figura 3.2 Efectul de mode-hopping în emisia laser la curentul de injecție I=79.9 mA și temperatura de 25^{0}C. Spectrul optic al emisiei laser libere a fost achiziționat la interval de 100 μs.

3.4 Rezultate și discuții

Măsurătorile au evidențiat emisia laser caracterizată de o dinamică de tip LFF la curenți de injecție mai mari decât curentul de prag laser. La temperatura de 24.9^{o}C am realizat un studiu comparativ privind caracteristicile acestei emisii în funcție de tipul elementului reflectător extern: oglinda total reflectătoare și rețea de difracție utilizată în reflexie in ordinul -1. La temperatura de termostatare de 24.9 ^{o}C pragul emisiei laser libere apare la curentul de injecție I_{th}= 58 mA, iar puncte critice de tipul “mode-

hopping" apar la curenții 59.7 mA (1.03 × I_{th}) si 79.9 mA (1.38 × I_{th}). În condiții de feedback optic extern, în cazul ambelor elemente reflectătoare utilizate, regimul LFF stabil s-a obținut la valori ale curentului de injecție I_1= 59.7 mA (1.03 × I_{th}) și I_2= 82.36 mA (1.42 × I_{th}), în ultimul caz, la o valoare mai mare decât cea obținută în cazul funcționării libere a emisiei laser.

În fig. 3.8 am reprezentat seriile temporale ale emisiei laser pentru curenții I_1 și I_3 precum și spectrele de putere asociate lor.

Când s-a folosit ca element reflectător rețeaua de difracție a fost utilizat ordinul de difracție -1 pentru obținerea feedback-ului optic. Aceasta întoarce un procent de 43 % din puterea laser incidentă. Măsurătorile au fost efectuate la temperatura de 24,9°C, la aceeași curenți de injecție ca în cazul oglinzii (valori care corespund punctelor critice).În ambele cazuri s-au obținut regimuri stabile de fluctuații de joasă frecvență (LFF) în punctele critice (mode-hopping) de pe caracteristica putere -curent a laserului.

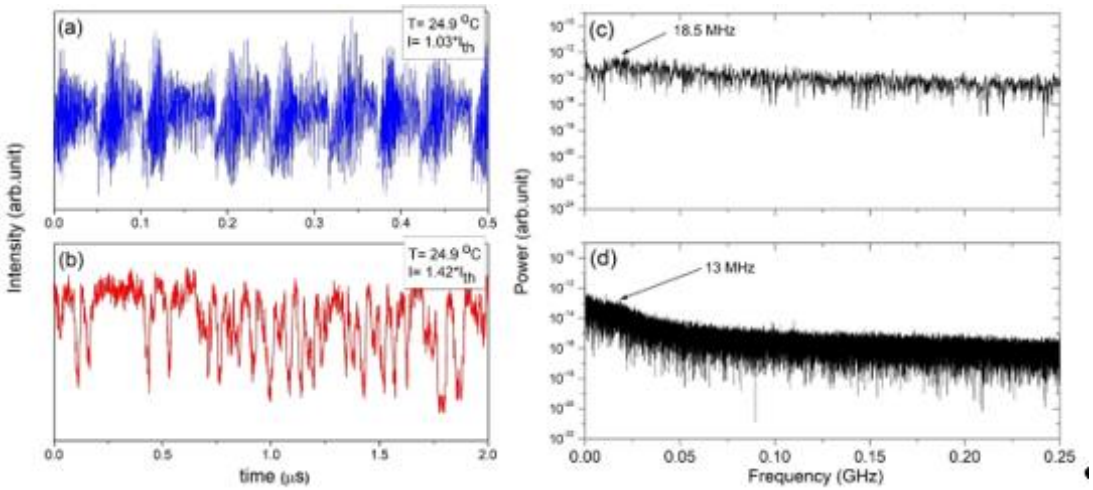


Figura. 3.3 Seria temporală a intensității si spectrul de putere asociat pentru curenții de injecție a) I=1.03 × I_{th} și b) I= 1.42 × I_{th}, in cazul utilizării oglinzii; I_{th}= 58 mA,la temperatura t= 24.9ºC.

Puterea feedback-ului optic necesară pentru a obține un regim haotic stabil de tip LFF în punctele critice a fost măsurată ca fiind de același ordin de mărime pentru ambii reflectori externi cu cea necesară funcționării la prag a sistemului LSCE.

3.5 Concluzii

Măsurătorile efectuate la nivelul curentului de prag laser și la curenți mai mari decât acesta (*Ith, 1,03 * Ith,* respectiv *1,42 * Ith*) pentru o temperatură fixă a diodei, au evidențiat regimuri de emisie cu fluctuații LFF stabile pentru puteri de feedback de același ordin de mărime cu cele corespunzătoare pragului laser. Pentru măsurătorile efectuate la aceeași curenți de injecție și la coeficienți de feedback corespunzători

unor valori ale puterii reinjectate cu un ordin de mărime mai mic (sau mai mare) decât valorile obținute la pragul laser nu s-au observat regimuri de fluctuații LFF stabile.

Capitolul 4

Dinamica oscilațiilor haotice de înaltă frecvență ale emisiei unui sistem laser cu semiconductoare cu cavitate externă dublă

4.1 Introducere

Un sistem laser cu semiconductoare cu cavitate externă dublă este format dintr-o cavitate delimitată de o rețea de difracție, în configurație Littrow, care asigură reinjectarea la nivelul joncțiunii laser a ordinului -1 de difracție, și o a doua cavitate delimitată de o oglindă plană, cavitate Littman care întoarce ordinul 0 de difracție[29–31].

Dinamica emisiei unui laser cu semiconductoare operat în condiții de reacție (feedback) optică dublă arată că se formează un mixaj de oscilații constând în oscilații de înaltă frecvență modulate de fluctuațiile de joasă frecvență. Prin modificarea intensității feedbackului în cavitatea lungă se obțin oscilații haotice de înaltă frecvență acordabile [11].

4.2 Dinamica sistemului laser cu semiconductoare cu cavitate externă dublă

Dinamica laserilor cu semiconductori cu cavitate externă (LSCE) a fost investigată prin intermediul unor modele teoretice, primul propus fiind modelul Lang-Kobayashi. Acest model a fost simplificat pentru analiza locală a dinamicii haotice LFF în limita timpilor mari de întârziere în cavitatea externă și ulterior dezvoltat pentru studiul sistemelor LSCE cu cavitate dublă [12].

4.3 Sistemul laser cu semiconductoare cu cavitate externă dublă (D-LSCE)

Pentru sistemul D-LSCE utilizat s-a folosit ca bază montajul de tip LSCE prezentat anterior. Pe lângă feedbackul optic realizat cu ajutorul rețelei de difracție pe ordinul -1 (configurația cavității externe C1) s-a adăugat o nouă componentă pentru obținerea de feedback pe ordinul 0 al difracției prin intermediul unei oglinzi (Figura 4.1, configurația cavității externe C2). Astfel, sistemul D-LSCE constă într-o cavitate externă dublă, cu doua elemente reflectătoare, cavitatea C1 fiind formată între laser și rețeaua de difracție, cavitatea C2 formata între laser și oglindă, cu o cu cavitatea C1. Montajul experimental conține o rețea de difracție cu 300 tr/mm ca element reflector pentru cavitatea C1 și o oglindă perfect reflectătoare pentru cavitatea C2. Aceasta din urmă include și un comutator mecanic de tip On/Off pentru cuplarea, respectiv decuplarea cavității C2. Intensitățile feedbackului în cavitățile C1 și C2 sunt transmise laserului cu intensitate variabilă în funcție de coeficienții de cuplaj c_1 și c_2 prin intermediul filtrelor C1-NDF și C2-NDF.

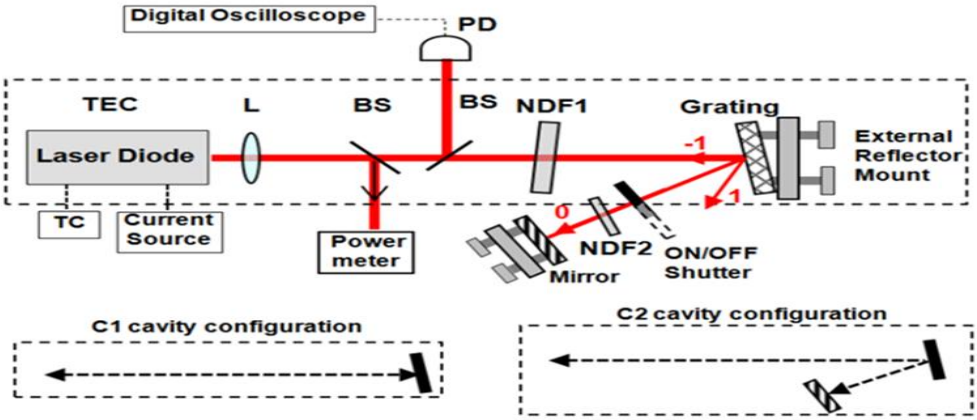


Figura 4.1 Schema montajului experimental cu cele două cavități externe (D-LSCE) unde :TEC, montura de control termo-electric ; TC, sursa de termostatare ; L, lentila colimatoare ; BS, divizoare de fascicul ; NDF, filtre neutre continuu variabile ; PD, fotodetector ; -1,0,1- ordine de difracție. În medalion sunt reprezentate schițele cavităților C1 și C2 [11].

4.4 Rezultate și discuții

În figura 4.4 este reprezentat spectrul de putere asociat seriei temporale a intensității pentru D-LSCE în diferite configurații la I_{th}, c_1= 0,37 și t=24,9°C:

- Numai cavitatea C1(c_2=0);
- Numai cavitatea C2 (c_2= 1.0; rețeaua ușor aliniată în afara poziției pentru care se obține feedback-ul în cavitatea C1 și C2 realiniată corespunzător);
- C1C2 cuplate cu c_2 = 1.0, și valori intre 0.63 și 0.16, care corespund unei intensități a feedback -ului descrescător în cavitatea C2.

Pentru sistemul D-LSCE operând numai cu cavitățile externe C1 sau C2, spectrul de putere prezintă o primă componentă asociată fluctuațiilor de joasă frecvență (υ_{LFF}), o a doua componentă corespunzătoare oscilațiilor cavității externe (υ_{EC}) și armonici ale acesteia (υ_{HFO}). Pentru sistemul operând cu cavitățile cuplate C1C2, la un coeficient de cuplaj c_2= 1.0 (în absența atenuării feedbackului în C2), spectrul de putere prezintă aceleași valori ale frecvenței ca în cazul în care se lucrează numai cu cavitatea C2. Dacă se reduce coeficientul de cuplaj al cavității C2 de la 0.63 la 0.16, la o putere a feedback-ului în C1 de 0.04 mW, spectrul de putere arată o componentă asociată fluctuațiilor de tip LFF.

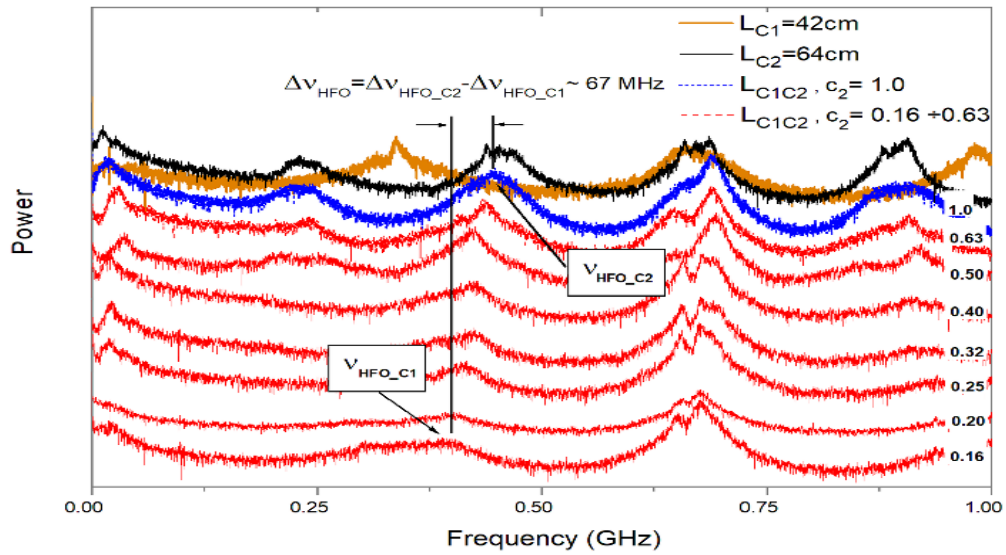


Figura. 4.4 Variația frecvenței υ_{HFO} în funcție de valoarea feedbackului din cavitatea C2. Parametri: I_{th}- intensitatea curentului de prag, c_1=0.37 și t= 24.9°C

În acest caz componenta de frecvență υ_{EC}, pentru o valoare a coeficientului c_2= 0.63 este apropiată dar diferită de cea a cavității C2, iar în cazul unui coeficient c_2=0.16 aceasta nu mai este prezentă în spectru. Frecvența υ_{HFO} pentru valori crescătoare ale coeficientului de cuplaj c_2 ia valori în intervalul de frecvențe $\Delta\upsilon_{HFO}$ (Figura 4.4).

Acest interval este limitat de frecvența υ_{EC1}, când coeficientul c_2 este aproape minim și frecvența $\upsilon_{HFO\text{-}C2}$ când coeficientul c_2 este maxim. Astfel, frecvențele caracteristice (υ_{HFO}) ale sistemului D-LSCE au valori mai mari când coeficientul de cuplaj c_2 este mai mare. Analiza comportamentului frecvențelor υ_{HFO} a fost deasemenea efectuată pentru alte două valori ale coeficientului de cuplaj c_1 al cavității C1, pentru puteri ale feedback-ului de 0.03 mW, respectiv 0.02 mW în cavitatea C1 (Figura 4.5). În ambele cazuri s-a observat că frecvențele înalte, υ_{HFO}, prezintă aceeași evoluție ca în cazul puterii de feedback de 0.04mW utilizată în cavitatea C1. Diferența este determinată de faptul că frecvențele υ_{HFO} au valori cu atât mai mari cu cât intensitatea feedback-ului în cavitatea C1 este mai mare.

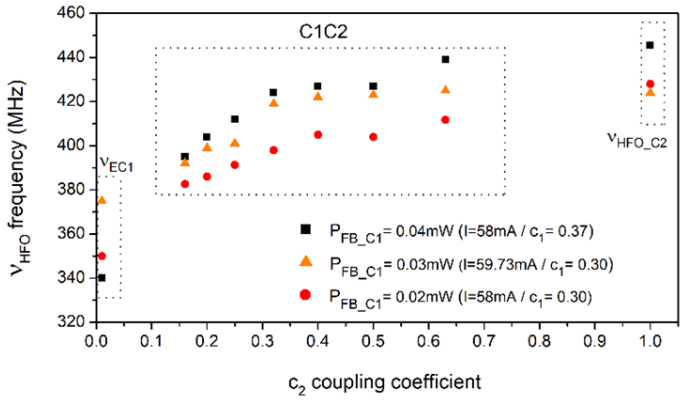


Figura 4.5 Dependența frecvenței υ_{HFO} în funcție de coeficientul de cuplaj al cavității C2 pentru trei valori diferite ale puterii feedbackului în cavitatea C1 (P_{FB_C1}).

4.5 Concluzii

Prin utilizarea sistemului D-LSCE am arătat că se pot genera oscilații haotice de înaltă frecvență acordabilă (υ_{HFO}) în emisia laserului cu semiconductor. Utilizarea unei cavități externe adiționale, combinată cu modificarea intensității feedback-ului oferită de aceasta, permite reglare frecvenței oscilațiilor înalte ale sistemului D-LSCE în mod aproape continuu pe un domeniu de zeci de MHz.

Rezultatele obținute sunt primele observații experimentale raportate in literatură ale unui astfel de comportament al frecvențelor υ_{HFO} ale unui sistem D-LSCE și pot fi valorificate în domeniul codificării și transmiterii datelor și informațiilor utilizând purtătoarele optice prin faptul că frecvențele implicate nu poartă informație despre geometria sistemului experimental.

Capitolul 5

Sincronizarea și controlul dinamicii haotice în prezența modulării curentului de injecție într-un sistem de două lasere cu semiconductoare cuplate master-slave

5.1 Introducere

Două sisteme laser cu semiconductoare funcționând în regim de feedback optic pot fi cuplate într-un montaj de tip MASTER-SLAVE (transmițător-receptor), formând un sistem care lucrează în regim sincronizat haotic. Modularea în frecvență a curentului laserului master induce căderi periodice ale puterii de emisie în sistemul slave observându-se două frecvențe dominante: una indusă și una naturală [10, 32].

5.2 Montajul experimental

Schema montajului experimental utilizat este redată în figura 5.1. Dispozitivul experimental are ca bază două montaje LSCE identice cu lungimea de aproximativ 64 cm (timp de întârziere de feedback τ =4.3ns). Cele două sisteme LSCE au fost cuplate optic prin intermediul unui atenuator de cuplare într-un montaj de sincronizare întârziată bidirecțională. S-au utilizat diode laser single-mode Mitsubishi ML101J8, cu lungimea de undă de 663 nm.

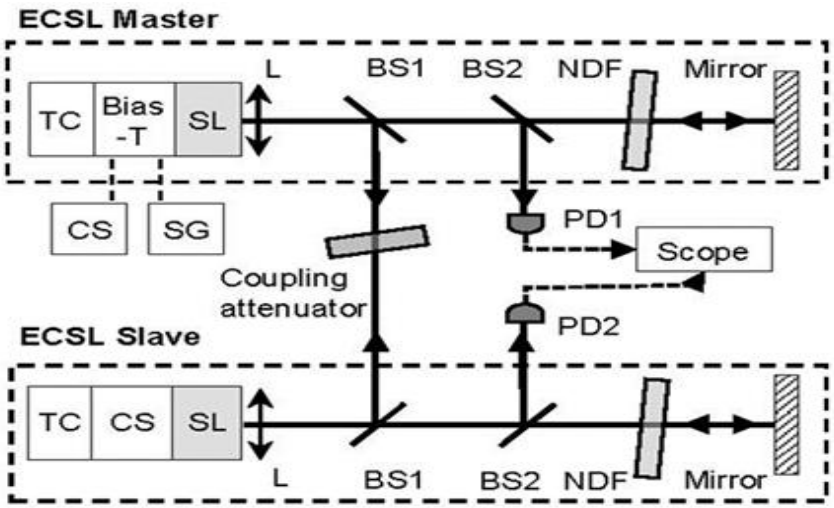


Figura 5.1 Schema montajului experimental sistemelor LSCE cuplate optic bidirecțional și sincronizate într-o schemă master-slave. Laserul master este modulat de un generator de semnal periodic RF (SG). BS, divizor de fascicul ; TC, controler de temperatură ,CS, sursa de curent continuu; Bias-T, multiplexor de frecvențe ; NDF, filtru neutru; PD, fotodiodă

5.3 Rezultate și discuții

Dinamica sistemului de laseri cuplați în prezența modulației externe a fost studiată pentru două frecvențe, cu un factor de modulare $m=3.4 \times 10^{-2}$, unde m este definit ca o fracție între intensitatea curentului de RF de modulație și intensitatea curentului continuu.

Metoda utilizată pentru a caracteriza starea de sincronizare dintre laser și modulator se bazează pe entropia Shanon, fiind evaluată entropia ansamblului constituită de intervalele de timp dintre căderile consecutive la zero ale puterii laserului. S-a investigat rata căderilor de putere ale masterului și slave-ului cuplați optic în funcție de frecvența curentului de modulare. Utilizând pentru modularea masterului două frecvențe, 8 MHz, respectiv 15 MHz, se induc căderi ale puterii semnalului cu o perioadă de 0.125 μs, respectiv 0.067 μs, rezultând in emisia laser fluctuații de tip LFF la două frecvențe dominante, una naturală și una indusă de modulare.

S-a observat că fluctuațiile LFF ale sistemului slave devin mai ordonate în sistemul cuplat; de asemenea când masterul este modulat la 8 MHz, respectiv apropiata de frecvența naturală a oscilațiilor sale de tip LFF (10 MHz), cele două sisteme, masterul și slave-ul au aceeași frecvență (Figura. 5.5).

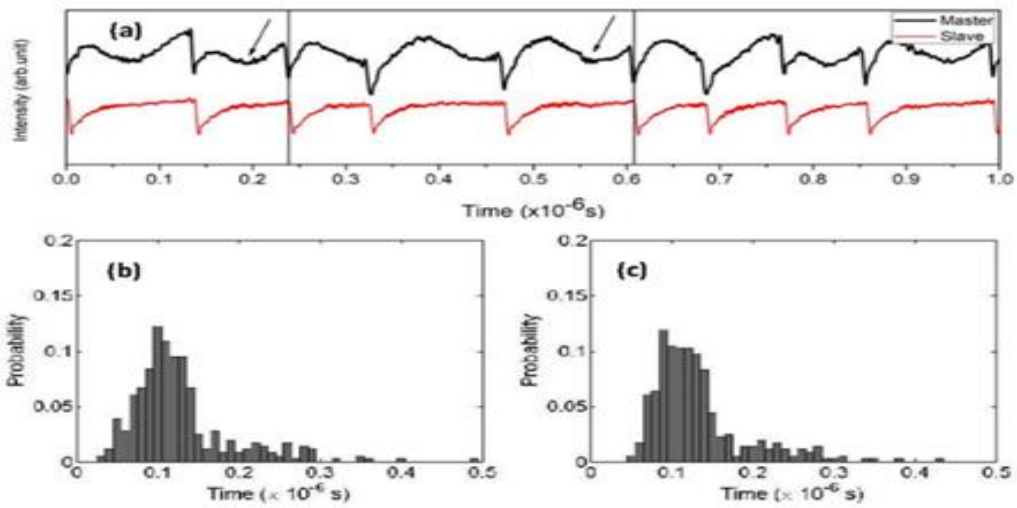


Figura 5.5 Sistemele master și slave cuplate haotic la 8 MHz; (a) seriile temporale ale intensității;(b) și (c) histogramele căderilor de putere pentru master și, respectiv slave. Săgețile indică intensitatea oscilațiilor induse de modulare pentru care dinamica LFF a slave-ului nu se cuplează cu cea a master-ului.

Dinamica haotică a sistemelor LSCE master și slave, odată cuplate, se modifică în prezența modulării în comparație cu cazul fără modulare. Experimentele arată că în funcție de frecvența de modulare, dinamica slave-ului se sincronizează cu cea a masterului și nu cu cea determinată de modulatorul extern.

5.4 Concluzii

Modularea laserului master induce căderi periodice ale puterii de emisie de tip LFF cu două frecvențe dominante. Modularea masterului la o frecvență care nu este în intervalul delimitat de frecvențele LFF naturale ale masterului și slave-ului nu are influență asupra dinamicii haotice a slave-ului. Are doar rolul de a grupa perioadele căderilor de putere, dar la alte valori ale frecvenței decât cea de modulare. Rezultatele raportate despre comportamentul dinamicii haotice a emisiilor laser obținute în diferite condiții de feedback optic extern arată o gamă largă de posibilități de generare și control al haosului; acest lucru are potențial de aplicare în codificarea datelor și transmiterea informațiilor folosind purtătoare optice haotice[19, 33, 34].

Capitolul 6

Simularea numerică a dinamicii haotice a emisiei multimod a unui laser cu semiconductoare cuplat optic cu două cavități optice externe

6.1 Introducere

În acest capitol este prezentat un model numeric pentru simularea dinamicii haotice multimod a unui laser cu semiconductoare cu cavitate externă compusă, constituită din doi reflectori optici (feedback extern dublu) dezvoltat anterior (D-LSCE). Modelul numeric, conform observațiilor experimentale, simulează cele 3 moduri laser active ale emisiei sistemului D-ECSL prin cuplarea a 3 sisteme monomod care au aceeași sursă de feedback și funcționează la valori diferite ale feedback-ului. Pentru dezvoltarea modelului a fost utilizată o extensie multimod a modelului de ecuații ale ratelor Lang – Kobayashi [2, 12, 35].

6.2 Montajul experimental și modelul de simulare

6.2.1 Montajul experimental

Montajul experimental al sistemului laser cu semiconductoare cu cavitate externă cu reflector dublu (D-ECSL) a fost descris anterior. Spre deosebire de cazul anterior rețeaua de difracție asigură feedback-ul optic pe ordinul 0 de difracție iar oglinda utilizează ordinul 1 al rețelei de difracție. De asemenea, pe lângă fotodioda și osciloscopul utilizate pentru monitorizarea si analiza seriei de timp a intensității, s-a mai utilizat un spectrograf pentru monitorizarea spectrelor optice de emisie D-ECSL.

Parametrii folosiți au fost: curentul de injecție I = 58 mA, temperatura de termostatare a diodei laser t = 24,9 ^{o}C și coeficienții de cuplare, c_1 = 1,0 și c_2 = 0,72,

corespunzând transmisiilor filtrului neutru în cavitățile C1 și, respectiv, C2. Procedurile de aliniere a cavităților C1 și C2 și ceilalți parametri utilizați sunt așa cum au fost descrise amănunțit în teză. La valorile parametrilor utilizați, sistemul D-ECSL emite la lungimea de undă λ=662 nm o putere totală P_0 = 1,79 mW, pentru o putere de feedback calculată P_{FB} = 0,313 mW, ceea ce corespunde unui coeficient de feedback total de valoare medie, aproximativ 17%. În aceste condiții, spectrul optic prezintă o structură multimodală cu 3 moduri active (Figura 6.1 a).

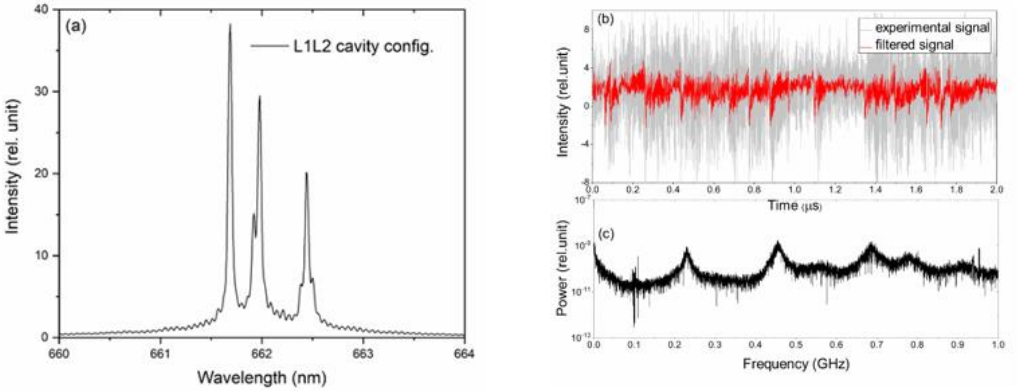


Figura 6.1 Caracteristicile sistemului D-LSCE: (a) spectrul optic, (b) seria temporală a intensității și (c) și spectrul de putere asociat pentru parametrii I= 58 mA, t= 24.9 °C, c_1= 1.0 și c_2=0.72.

În cazul C1 este returnat același raport de putere pentru fiecare mod, în timp ce în cazul C2 puterea este returnată diferențiat pentru fiecare mod separat, în funcție de poziția rețelei de difracție și a oglinzii. Pentru condițiile experimentale utilizate, componentele spectrelor de putere (frecvențe) pot corespunde fluctuațiilor de joasă frecvență (LFF), cu valoarea maximă în jurul a 100 MHz, frecvențelor de oscilație ale cavităților externe, 337 MHz (pentru C1) și 230 MHz (pentru C2) și armonicilor lor sau unui amestec al acestora [9, 36].

6.2.2 Sistemul de ecuații diferențiale pentru modelarea emisiilor D-LSCE

Simularea numerică a emisiei haotice a sistemului D-LSCE se bazează pe ecuațiile de câmp de tip Lang-Kobayashi [12], scrise pentru o cavitate compusă obținută prin adăugarea unui termen de feedback extern la ecuațiile standard ale laserilor, sub formă complexă. Dinamica unui sistem laser cu semiconductoare, care operează multimod cu feedback moderat este dată, pentru fiecare mod activ laser, de setul de ecuații care descriu ratele de variație ale câmpului intern Em (în formă complexă) și a densității de purtători, N, [34, 37]:

$$\frac{dE_m(t)}{dt} = (1+i\alpha)(G_m(t)-\gamma_m)\frac{E_m(t)}{2} + \frac{k}{\tau_L}E_m(t-\tau)e^{-i\omega_{0m}\tau} + \sqrt{2\beta N(t)}\xi(t) \quad (6.1)$$

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{I}{e} - \frac{1}{\tau_s}N(t) - \sum_{m=-M}^{M} G_m(N)|E_m(t)|^2 \quad (6.2)$$

$$G_m(t) = G_c(N - N_0)\left[1 - \left(\frac{m\Delta\omega_L + \frac{d\Phi_m}{dt} - \omega_N(N - N_{th})}{\Delta\omega_g}\right)^2\right] \quad (6.3)$$

unde emisiile spontane, aleatorii au fost modelate de un termen complex, necorelat, de medie nulă, notat ξ, atribuit unui zgomot alb ,gaussian şi cu un coeficient de emisie spontană β.

Ecuațiile diferențiale cuplate arată o întârziere a feedback-ului în cavitate reprezentată de termenul $E_m(t - \tau)e^{i\omega\tau}$. Prima ecuație modelează anvelopa de joasă frecvență a câmpului electromagnetic din cavitate, a doua și a treia ecuație reprezintă variația de timp a purtătorilor în cavitate, respectiv câștigul dependent de mod [12].

Valorile parametrilor folosiți sunt m = 0, ± 1 (3 moduri active; adică M = 1) și m = 0 valoare care corespunde modului situat la maximul curbei de câștig a laserului.

6.2.3 Dezvoltarea modelului de simulare numerică

Efectuarea simulărilor numerice a fost realizată cu ajutorul Mathlab/Simulink. Simularea și analiza fenomenelor haotice ale sistemului D-LSCE s-au făcut prin corelație secvențială între experimentul fizic și rezultatele simulărilor numerice [13]. Pentru început a fost dezvoltat un program test pentru un sistem simplu cu un singur mod cu emisie în spectrul vizibil, pornind de la ecuațiile (6.1-6.3), pentru a verifica comportamentele specifice ale sistemului. Apoi a fost dezvoltat modelul care simulează un sistem cu 3 moduri active prin cuplarea a 3 sisteme monomod (un singur mod activ) cuplate. Valorile parametrilor utilizați pentru simulare se regăsesc în teză, iar pentru rezolvarea numerică a ecuațiilor diferențiale s-a folosit o pereche Runge-Kutta de integrări Bogacki - Shampine. Rutinele sunt atașate în anexele de la finalul tezei.

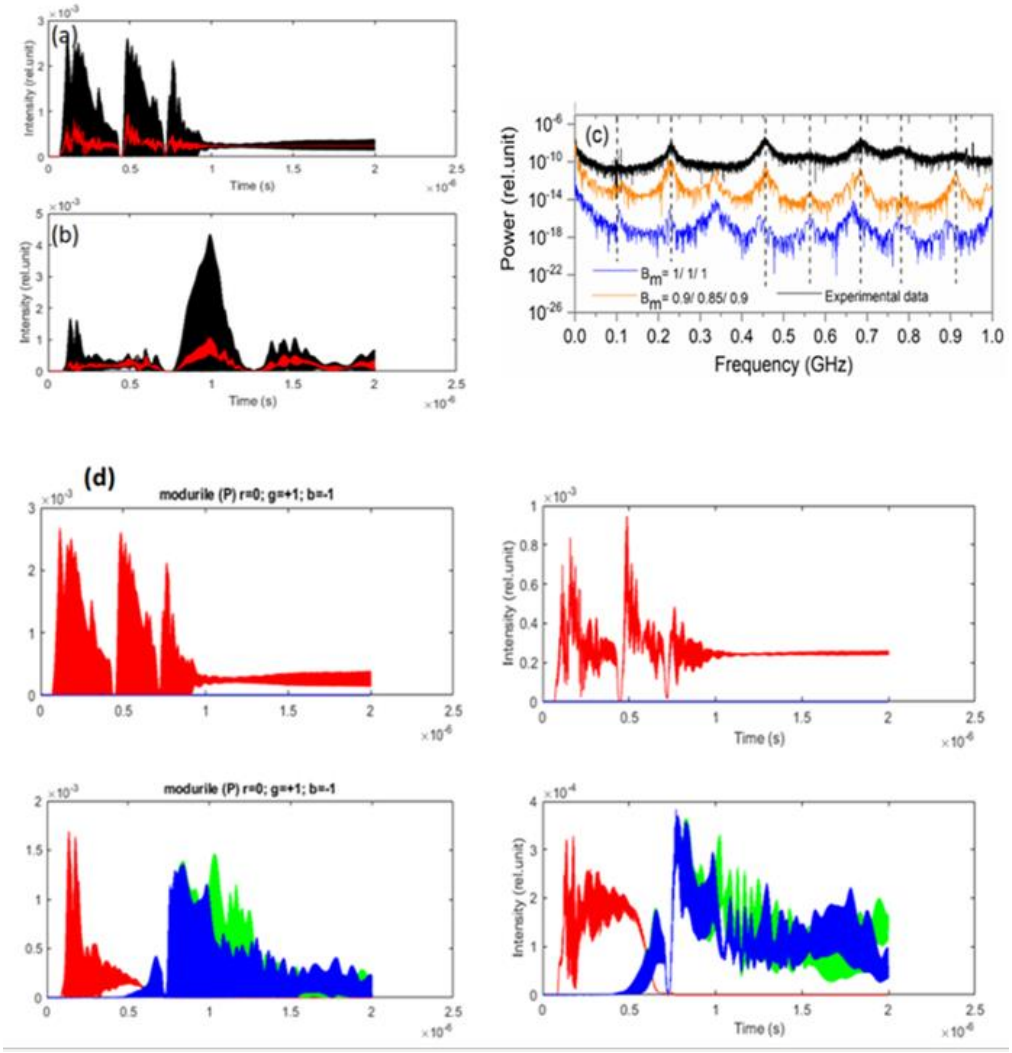


Figura 6.4 Simulări numerice multimod unde (a), (b) reprezintă serii temporale ale puterii de emisie a sistemului D-LSCE (negru) și a semnalului filtrat optic (roșu) pentru B_m = 1/1/1 și B_m = 0.9 / 0.85 / 0.9, (c) spectrele de putere asociate seriile temporale ale puterii evidențiate pentru fiecare mod in parte și (d) moduri nefiltrate (stânga) si filtrate (dreapta), semnalul fiind prezentat filtrat la o frecvență apropiată de cea a unui detector optic obișnuit, atât pentru cazul B_m = 1/ 1/ 1 (sus) cât și B_m = 0.9/ 0.85/ 0.9 (jos).

6.3 Rezultate și discuții

Chiar în cazul în care sunt active 3 moduri (în cazul de față), dacă se îndeplinesc condițiile de apariție a regimului LFF, la o valoare a intensității curentului în apropierea pragului (I = 18.630 mA) și la coeficienți de feedback mari puterea totală emisă de sistemul D-LSCE are un comportament similar cazului în care este activ un singur mod. Seria temporală a puterii s-a obținut prin însumarea semnalelor generate de cele trei moduri, iar durata căderilor de putere este similară cazului cu un singur

mod, ≈0.5μs. Simularea a fost realizată pentru cavități extinse neselective, rețea de difracție și oglindă care returnează același raport de putere pentru fiecare mod; s-au neglijat coerențele relative ale modurilor, s-a presupus că fiecare mod interacționează doar cu câmpul întârziat, neexistând influențe ale modurilor vecine.

6.4 Concluzii

În acest capitol am realizat dezvoltarea unui model numeric pentru simularea dinamicii haotice a emisiilor multimod în spectrul vizibil pentru un sistem cu cavitate optică externă compusă, cu două reflectoare optice (feedback extern dublu), dezvoltat experimental (sistem D-LSCE). În condiții experimentale, spectrul optic de emisie D-LSCE a prezentat 3 moduri active. Componentele spectrelor de putere (frecvențe) corespund fluctuațiilor de joasă frecvență, frecvențelor de oscilație ale cavităților externe, armonicilor lor și unui amestec al acestora. Modelul dezvoltat simulează un sistem cu 3 sisteme monomod cuplate (3 moduri active). Toate modurile sunt cuplate având aceeași sursă „de alimentare” și aflate în condiții de feedback diferite. Astfel, seria temporală a puterii a fost obținută prin însumarea semnalelor generate de cele trei moduri. Rezultatele numerice obținute arată că modelul multimod numeric dezvoltat simulează cu o bună aproximație dinamica emisiei haotice a sistemului experimental D-LSCE pentru un set particular de valori ale parametrilor [13].

Capitolul 7

Concluzii generale, rezultate, contribuții și perspective de dezvoltare

Prezenta teză constituie un studiu de sinteză asupra dinamicii haotice a unui sistem laser cu cavitate externă funcționând în diferite condiții de feedback determinate de: curenți care depășesc valoarea de prag, cavitate externă dublu reflectătoare, funcționare în prezența modulării curentului de injecție într-un sistem cuplat de tip master slave. Studiul este însoțit de o simulare numerică a emisiei multimod a unui laser cu semiconductoare cuplat optic cu două cavități reflectătoare externe.

7.1 Rezultate obținute

1.Am studiat emisia laser în condițiile unei dinamici haotice de tip LFF la curenți mai mari decât curentul de prag laser, anume la valori unde intensitatea emisiei laser prezintă fluctuații permanente, iar în spectrul optic apar oscilații de tip ”mode-hopping”. Un studiu comparativ privind caracteristicile acestei emisii în funcție de tipul elementului reflectător extern: oglindă total reflectătoare și rețea de difracție utilizată în reflexie pe ordinul -1 a fost realizat la o temperatură de termostatare t= 24.9°C. Măsurătorile efectuate la curentul de prag, I_0=58mA, s-au evidențiat regimuri de emisie cu fluctuații LFF stabile pentru puteri reinjectate P_{FB} a căror valoare variază cu un ordin de mărime, 0.2mW, respectiv 0.02mW. Pentru curenți superiori pragului, I_1=59.7mA, respectiv I_2= 82.3 mA regimurile de emisie cu fluctuații de tip LFF stabile s-au obținut pentru puteri reinjectate P_{FB} a căror valoare este de ordinul de mărime al valorilor mici de la pragul emisiei laser 0.05mW, 0.03mW,respectiv 0.007mW, 0.02mW. Pentru măsurătorile efectuate la acești curenți, la coeficienți de feedback corespunzători unor valori ale puterii reinjectate P_{FB} cu un ordin de mărime mai mic (sau mai mare) decât valorile obținute la pragul laser nu am observat regimuri de fluctuații LFF stabile.

2.Am studiat dinamica haotică a sistemului D-LSCE în condițiile funcționării la diferite valori ale intensității feedback-ului aplicat celor două ramuri formate de configurațiile cavităților C1 și C2 am observat că valorile frecvențelor υ_{HFO} cresc odată cu creșterea intensității feedback-ului din cavitatea C2, intervalul de frecvențe având valori mai mari atunci când puterea feedback-ului în cavitatea C1 este mai mare. Rezultatele obținute, anterior anticipate numeric, au arătat că pentru cavități externe mari (de ordinul a zeci de cm) frecvența oscilațiilor haotice corespunzătoare sistemului D-LSCE este limitată de frecvența oscilațiilor cavității externe C1 și frecvența primei armonici a oscilațiilor haotice din cavitatea C2. Am observat că datorită fenomenului de mixare frecvențele υ_{HFO} nu conțin informații despre geometria sistemului D- LSCE pentru valori ale coeficientului de cuplare c_2 până la 0.5. Peste această valoare, pe lângă frecvența υ_{HFO} în spectrul de putere apare o nouă componentă de frecvență apropiată de frecvența υ_{EC2}. Rezultatele obținute și prezentate în teză sunt primele observații experimentale ale unui astfel de comportament al frecvențelor HFO ale unui sistem D-LSCE.

3.Prin măsurătorile efectuate în prezența modulării curentului de injecție într-un sistem format din două diode laser cu semiconductoare cuplate într-un montaj de tip master-slave am arătat că este posibilă sincronizarea emisiilor lor haotice. Curentul de injecție al masterului a fost modulat la 8 MHz și 15Mhz, valori diferite de frecvențele naturale ale oscilațiilor de tip LFF ale masterului (10 MHz) și slave-ului (3.4 MHz).). Modulând laserului master la frecvențele de 8MHz și 10 MHz se induc căderi ale puterii de emisie cu o periodicitate de 0.125 μs, respectiv 0.067μs, ceea ce conduce la oscilații de tip LFF cu două frecvențe dominante. Am analizat printr-o metodă

statistică gruparea căderilor de puterea a sistemelor LSCE cuplate și am observat că: perioadele acestor căderi sunt:

(a) aceleași pentru master și slave și corespund frecvențelor LFF naturale ale masterului, atunci când laserul master și modulatorul funcționează în fază;

(b) diferite pentru master și slave, atunci când masterul și modulatorul nu sunt în fază, chiar dacă semnalul periodic aplicat este rezonant în frecvență cu oscilațiile de tip LFF al laserului master.

Rezultatele obținute arată că modularea sistemului master la o frecvență care nu aparține intervalului frecvențelor naturale ale oscilațiilor de tip LFF nu are niciun efect de control asupra dinamicii haotice a sistemului slave. În acest ultim caz efectul modulării determină o grupare periodică a căderilor de putere dar la valori diferite de cele ale frecvenței de modulare.

4.Am propus dezvoltarea unui model numeric pentru simularea dinamicii haotice a emisiilor multimod în spectrul vizibil pentru un sistem cu cavitate optică externă compusă, cu două reflectoare optice (feedback extern dublu), dezvoltat experimental (sistem D-LSCE). În condițiile experimentale, spectrul optic de emisie D-LSCE a prezentat 3 moduri active. Componentele spectrelor de putere (frecvențe) corespund fluctuațiilor de joasă frecvență, frecvențelor de oscilație ale cavităților externe, armonicilor lor și unui amestec al acestora.

Modelul teoretic dezvoltat simulează un sistem cu 3 sisteme monomod cuplate (3 moduri). Toate modurile sunt cuplate având aceeași sursă „feed" și aflate în condiții de feedback diferite. Seria temporală a puterii a fost obținută prin însumarea semnalelor generate de cele trei moduri. Rezultatele obținute în urma simulărilor numerice arată că modelul multimod dezvoltat descrie cu o bună aproximație dinamica emisiei haotice a sistemului experimental D-LSCE pentru un set particular de valori ale parametrilor. Rezultatele obținute constituie o premieră, deoarece dinamica haotică a sistemelor D-LSCE a fost modelată numeric numai pentru emisiile monomod în domeniul infraroșu.

7.2 Contribuții originale

Principalele rezultate prezentate în această teză au fost obținute pe baza unor cercetări proprii realizate în colaborare cu cercetători de la Institutul Național de Fizica Laserilor, Plasmei și Radiației de la Măgurele, in Laboratoarele acestei institutii prestigioase, sub coordonatrea Domnului prof. Dr fiz. Mihai Lucian Pascu si a conducatorului stiintific .

Principalele rezultate și contribuții personale pot fi formulate după cum urmează:

1.Studiul dinamicii emisiei haotice de tipul fluctuațiilor de joasă frecvență (LFF) a diodelor laser in condiții de funcționare la curenți de injecție peste curentul de prag laser.

În punctele critice ale caracteristicii putere-curent ale unei diode laser apare efectul de "mode hopping". În aceste puncte critice în evoluția emisiei laser are loc un transfer

de intensitate între modurile de emisie laser fără căderi la zero ale intensității iar aplicarea unui feedback moderat, de circa 1% din puterea emisă are rolul de a controla periodicitatea oscilațiilor neliniare la frecvențe caracteristice determinate de valoarea parametrilor de control a sistemului laser .

a. Am realizat studiul regimurilor haotice de tipul fluctuațiilor de joasă frecvență (LFF) in emisia unui sistem LSCE la valori ale curenților de injecție peste curentul de prag laser, in vederea posibilității cuplării haotice a unor astfel de sisteme.

b. Am realizat un studiu comparativ al emisiilor haotice în funcție de tipul elementului reflectător: oglinda total reflectătoare și rețea de difracție utilizată în reflexie în ordinul -1 Măsurătorile efectuate la curentul de prag, I_0= 58mA, au arătat că se obțin regimuri de emisie cu fluctuații LFF stabile pentru puteri reinjectate P_{FB} a căror valoare variază cu un ordin de mărime, 0.2, respectiv 0.02 mW. La valori ale curenților peste prag regimuri LFF stabile pentru puteri reinjectate P_{FB} a căror valoare este de ordinul de mărime al valorilor mici de la pragul emisiei laser.

c. Pentru măsuratorile efectuate la curenti peste prag, la coeficienți de feedback corespunzători unor valori ale puterii reinjectate cu un ordin de mărime mai mic (sau mai mare) decât valorile obținute la pragul laser nu s-au observat regimuri de fluctuatii LFF stabile.

2. Publicarea rezultatelor enumerate anterior în articolul din Buletin UPB, seria C Nr 81/2091: **C. Onea**, P. E. Sterian, I. R. Andrei, A. Baleanu, M. L. Pascu, Chaotic Low-Frequency Fluctuations of Laser Diode Emission At Injection Currents Above Threshold, U.P.B. Sci. Bull. Series C, 81 (2019), dovedește acceparea acestor contributii de către lumea științifica internațională ca având caracter de noutate, de interes pentru diferite aplicatii.

3. Studiul dinamicii oscilațiilor haotice de înaltă frecvență ale unui sistem laser cu semiconductoare cu cavitate externă dublă.

Dinamica emisiei unui laser cu semiconductoare operând în condiții de reacție (feedback) optică dublă constă într-un un mixaj de oscilații de înaltă frecvență modulate de fluctuațiile de joasa frecvență (de tip LFF). Feedbackul extern este asigurat de o cavitate optica externă cu reflector dublu formată dintr-o cavitate delimitată de o rețea de difracție, care asigură reinjectarea la nivelul joncțiunii laser a ordinului -1 de difracție, și o a doua cavitate delimitată de o oglindă plană care întoarce ordinul 0 de difracție.

Frecvența oscilațiilor haotice ale emisiei laserului cu dubla cavitate depinde de intensitatea feedbackului din cavitatea lungă (delimitata de oglindă), iar valorile obținute sunt cuprinse într-un domeniu delimitat de frecvențele proprii ale cavității scurte (delimitate de rețea) și frecvența primei armonici a cavității lungi. Prin modificarea intensității feedbackului în cavitatea lungă se obțin oscilații haotice de înaltă frecvență acordabile.

a.Am studiat dinamica haotică a sistemului D-LSCE în condițiile funcționării la diferite valori ale intensității feedbackului aplicat celor două ramuri formate de configurațiile cavităților C1 și C2. Analiza oscilațiilor haotice a arătat că valorile frecvențelor υ_{HFO} cresc odată cu creșterea intensității feedbackului din cavitatea C2,

intervalul de frecvențe având valori mai mari atunci când puterea feedbackului în cavitatea C1 este mai mare.

b.Am observat că frecvențele υ_{HFO} obținute nu conțin informații despre geometria sistemului D-LSCE.

c.Rezultatele prezentate sunt primele observații experimentale raportate în literatură ale unui astfel de comportament al frecvențelor υ_{HFO} ale unui sistem D-LSCE.

4. Rezultatele prezentate mai sus,au fost publicate în articolul: **C. Onea**, P.E. Sterian, I.R. Andrei, M.L. Pascu, High Frequency Chaotic Dynamics In A Semiconductor Laser With Double-Reflector Selective Cavity, U.P.B. Sci. Bull., Series A, 81 (2019) 261–270 sunt aplicabile în codificarea și transmiterea datelor și informațiilor utilizând purtătoarele optice haotice.

5. Studiul sincronizării haotice de tip master- slave a două sisteme laser în prezența modulării curentului de injecție, reprezintă o alta contribuție importanta la dezvoltarea domeniului.

a.Două sisteme laser cu semiconductoare funcționând în regim de feedback optic cuplate într-un montaj de tip MASTER-SLAVE (transmițător-receptor) formează un sistem care lucrează în regim sincronizat haotic. Experimentele efectuate au arătat că fluctuațiile de joasă frecvență ale unui sistem laser cu semiconductoare cu cavitate externă (LSCE) pot fi controlate prin modularea curentului de injecție, acestea devenind mai ordonate atunci când semnalul de modulare este apropiat de frecvența naturală de oscilație de tip LFF a laserului.

b.Modularea în frecvență a curentului laserului master induce căderi periodice ale puterii de emisie observându-se că există două frecvențe dominante: una indusă și una naturală. Aceste frecvențe la care se observă căderea semnalului sistemului cuplat sunt corelate cu frecvența semnalului de modulare precum și cu frecvențele oscilațiilor naturale ale celor două sisteme laser haotice. c.Am studiat starea de sincronizarea dintre laser (a fluctuațiilor de joasă frecvență) si modulatorul extern prin realizarea unei statistici a căderilor la zero ale intensității emisiei laser (puterii emise de laser) cu ajutorul entropiei Shannon.

6.Rezultatele enumerate mai sus le-am publicat în articolul din Optoelectronics And Advanced Materials – Rapid Communications Vol. 13, No. 5-6, May-June 2019, p. 284-289:

I. R. ANDREI, **C. Onea**, P. E. STERIAN, I. IONITA, M. L. PASCU, Control Of Slave Chaotic Dynamics By Master Current Modulation In A Chaotic Coupled Laser System, fiind de interes aplicativ în studiile științifice privind criptarea informației in comunicatiile optice

7. Studiul aspectelor dinamicii haotice a unui sistem laser cu semiconductoare obținute în diferite condiții de feedback optic extern.

a.Am efectuat o sinteza a studiilor asupra dinamicii emisiei haotice a unui sistem laser cu cavitate externă funcționând în diferite condiții de feedback determinate de: curenți de injecție care depășesc valoarea de prag, cavitate externă dublu reflectătoare, funcționare în prezența modulării curentului de injecție într-un sistem cuplat de tip master-slave.

b.Toate aceste regimuri de funcționare ale unui sistem laser cu cavitate externă sunt, în prezent, tematici de cercetare și interes științific datorită aplicațiilor în codificarea și transmiterea informațiilor utilizând purtătoarele optice haotice. Rezultatele acestor studii le-am publicat în Annals of the Academy of Romanian Scientists Series on Science and Technology of Information Volume 12, Number 1/2019 ISSN 2066 – 2742 **: C. Onea**, P.E. Sterian , I.R. Andrei, M.L. Pascu, Aspects Of Chaotic Dynamics Of The Semiconductor Laser Emission Obtained In Different External Optical Feedback Conditions.

8.Simularea numerică a emisiei haotice multimod a unui laser cu semiconductoare cuplat optic cu două cavități externe.

a.Cu ajutorul ecuațiilor ratelor și câmpului electromagnetic specifice sistemelor laser cu semiconductoare cu cavitate externă am realizat o simulare numerică cu ajutorul căreia am putut evalua, înainte de efectuarea experimentelor, rezultatele ce ar putea fi obținute în funcție de o serie de parametri controlabili ai sistemului. Programul propus simulează procesul de apariție a oscilațiilor de joasă frecvență de tip LFF ale unui sistem laser cu semiconductoare cu dublă cavitate externă (D-LSCE). Determinarea pe cale experimentală a curentului de prag al diodei utilizate a permis identificarea naturii traiectoriei haotice urmate de sistem și identificarea condițiilor de apariție a oscilațiilor de tip LFF. Curentul de injecție aproapiat de valoarea de prag favorizează apariția acestui tip de comportament haotic care constă în căderi ale puterii de emisie a sistemului cu perioade ce pot varia între 10^{-9} s și 10^{-6}s.

b.Modelul a fost propus și dezvoltat pentru simularea dinamicii haotice a emisiilor multimod în spectrul vizibil pentru un sistem cu cavitate optică externă compusă, cu două reflectoare optice (feedback extern dublu), dezvoltat experimental (sistem D-LSCE).

c.În condițiile experimentale, spectrul optic de emisie D-LSCE a prezentat 3 moduri active. Componentele spectrelor de putere (frecvențe) corespund fluctuațiilor de joasă frecvență, frecvențelor de oscilație ale cavităților externe, armonicilor lor și unui amestec al acestora. Modelul dezvoltat simulează un sistem cu 3 sisteme monomod cuplate (3 moduri). Rezultatele numerice obținute arată că modelul multimod numeric dezvoltat simulează cu o bună aproximație dinamica emisiei haotice a sistemului experimental D-LSCE pentru un set particular de valori ale parametrilor.

d.În literatura de specialitate există abordări ale emisiei multimodale în domeniul vizibil, dar numai pentru sistemele LSCE cu feedback extern unic iar dinamica sistemelor D-LSCE a fost studiată numeric, dar numai pentru emisiile monomod în infraroșu. După cunoștința mea modelul propus este o premieră pentru analiza emisiei multimod în domeniul vizibil pentru un sistem D- LSCE.

9.Publicare a rezultatelor anterior enumerate în U.P.B. Sci. Bull., Series A, Vol. 83, Iss. 1, 2021, ISSN 1223-7027 : **C. Onea**, I.R. Andrei, P.E. Sterian, M.L. Pascu, M. Bulinski, Numerical Simulation Of Chaotic Multimode Dynamics Of A Semiconductor Laser Optical Coupled With Two External Cavities, reliefează noutatea contributiilor si aprecierea acestora in lumea stiintifică.

10.Disemunarea rezultatelor obținute la sesiuni de comunicări:

- Naționale: Conferința Facultatii de Fizica, Universitatea din Bucuresti, Magurele, 21-22 Iunie 2018 și 21-22 Iunie2019, ELI-NP Summer School, 08-13 Sept. 2019, Sinaia, Romania, Annual Symposium of Doctoral School of Electronics, Telecommunications and Information Technology, 9.07.2018 și 4.07.2019.
- Internaționale: Joint Iscp-Indlas 2018 Conference, 03 - 07 September, 2018, Alba-Iulia, Romania, The 6th International Colloquium "Physics of Materials" Bucharest, 15-16 november 2018.

Rezultate prezentate au fost apreciate de participanți ca fiind valoroase, având posibilități concrete de aplicare în codificarea și transmiterea codificată a informațiilor utilizând purtătoarele optice.

Rezultatele obținute în cadrul acestei teze se vor utiliza si dezvolta în cadrul proiectului PED care a obținut finanțare de către Laboratorul în care am realizat teza, condus de către domnul prof. Dr. fiz. Mihail-Lucian Pascu, în cadrul unei competiții de proiecte, responsabil de proiect fiind domnul.Dr. fiz Andrei-Relu Ionuț. Acestor personalități stiințifice le mulțumesc și pe această cale pentru sprijin și competentă indrumare .

7.3 Lista lucrărilor originale

Articole publicate în reviste științifice , lucrări prezentate la conferințe științifice naționale și internaționale și rapoarte de cercetare realizate în timpul studiilor doctorale:

1. **C. Onea**, P.E. Sterian, I.R. Andrei, M.L. Pascu, High Frequency Chaotic Dynamics In A Semiconductor Laser With Double-Reflector Selective Cavity, U.P.B. Sci. Bull., Series A, 81 (2019) 261–270, FI 0.619.
2. **C. Onea**, P. E. Sterian, I. R. Andrei, A. Baleanu, M. L. Pascu, Chaotic Low-Frequency Fluctuations Of Laser Diode Emission At Injection Currents Above Threshold, U.P.B. Sci. Bull. Series C, 81 (2019).
3. I. R. Andrei, **C. Onea**, P. E. Sterian, I. Ionita, M. L. Pascu, Control Of Slave Chaotic Dynamics By Master Current Modulation In A Chaotic Coupled Laser System, Optoelectronics And Advanced Materials – Rapid Communications Vol. 13, No. 5-6, May-June 2019, p. 284-289, FI 0.452.
4. **C. Onea**, P.E. Sterian , I.R. Andrei, M.L. Pascu, Aspects Of Chaotic Dynamics Of The Semiconductor Laser Emission Obtained In Different External Optical Feedback Conditions, Annals of the Academy of Romanian Scientists Series on Science and Technology of Information Volume 12, Number 1/2019 ISSN 2066 – 2742**.**
5. **C. Onea**, I.R. Andrei, P.E. Sterian, M.L. Pascu, M. Bulinski, Numerical Simulation Of Chaotic Multimode Dynamics Of A Semiconductor Laser

Optical Coupled With Two External Cavities , U.P.B. Sci. Bull., Series A, Vol. 83, Iss. 1, 2021, ISSN 1223-7027 ,FI 0.619.

6. I. R. Andrei, **C. Onea**, P. E. Sterian, M. L. Pascu,Experimental Control Of Low-Frequency Fluctuations By Current Modulation In A Laser Diode Chaotic Coupled System, Conferința Facultatii de Fizica, Universitatea din Bucuresti, Magurele, 21-22 Iunie 2018.
7. I.R. Andrei, **C. Onea**, P.E. Sterian, I. Ionita, M.L. Pascu **,**Experimental Control Of Slave Chaotic Dynamics By Master Current Modulation In A Chaotic Coupled Laser System, Joint Iscp-Indlas 2018 Conference, 03 - 07 September, 2018, Alba-Iulia, Romania
8. **C. Onea**, P.E.Sterian, I.R.Andrei, M.L.Pascu, Chaotic Low-Frequency Fluctuations Of The Laser Diode Emission At Injection Currents Above The Laser Threshold, Annual Symposium of Doctoral School of Electronics, Telecommunications and Information Technology,9.07.2018
9. **C.Onea**, P.E Sterian, I.R.Andrei, M.L.Pascu, Mixing of High Frequency Oscillations Induced by a Selective Reflector in Diode Laser Emission Dynamics ,The 6th International Colloquium ”Physics of Materials” Bucharest, 15-16 november 2018
10. I.R. Andrei, **C. Onea**, P.E. Sterian, I. Ionita, M.L. Pascu, Control Of Slave Chaotic Dynamics By Master Current Modulation In A Chaotic Coupled Laser System, Annual Symposium of Doctoral School of Electronics, Telecommunications and Information Technology, 4.07.2019.
11. **C.Onea**, P.E Sterian, I.R.Andrei, M.L.Pascu, Chaotic,tunable high frecquencies oscillations induced in a double-reflector external cavity semiconductor laser, Conferinta Facultatii de Fizica, Universitatea din Bucuresti, Magurele, 21-22 Iunie2019 .
12. I.R. Andrei, C. Onea, P.E. Sterian, M.L. Pascu, Chaotic, tunable high frequencies oscillations induced in a double-reflector external cavity semiconductor laser, ELI-NP Summer School, 08-13 Sept. 2019, Sinaia, Romania.
13. C.Onea, Dinamica emisiei haotice de tipul fluctuațiilor de joasă frecvență (LFF) a diodelor laser în condiții de funcționare la curenți de injecție peste curentul de prag- Primul raport de cercetare științifică, coordonator științific Prof.Univ.Dr.Paul E.Sterian.
14. C.Onea, Sincronizarea haotică de tip master-slave a două sisteme laser în prezența modulării curentului – Al doilea raport de cercetare științifică, coordonator științific Prof.Univ.Dr.Paul E.Sterian.
15. C.Onea, Dinamica oscilațiilor haotice de înaltă frecvență ale emisiei unui sistem laser cu semiconductoare cu cavitate externă dublă – Al treilea raport de cercetare științifică, coordonator științific Prof.Univ.Dr.Paul E.Sterian.
16. C.Onea, Aspecte ale dinamicii haotice a unui sistem laser cu semiconductoare obținute în diferite condiții de feedback optic extern -Al patrulea raport de cercetare științifică, coordonator științific Prof.Univ.Dr.Paul E.Sterian.

17. C.Onea, Simularea numerică a dinamicii haotice a emisiei multimod a unui laser cu semiconductoare cuplat optic cu două cavități externe- Al cincilea raport de cercetare științifică, coordonator științific Prof.Univ.Dr.Paul E.Sterian.

7.4 Perspective de dezvoltare ulterioară

Se urmărește dezvoltarea montajului cu doi laseri sincronizați spre un dispozitiv cu control automat al funcționării dar și studierea dinamicii haotice prin intermediul modulării și experimentarea unor tehnici de criptare cu haos. În acest scop se vor utiliza și dezvolta și rezultatele obținute în cadrul acestei teze în studiul dinamicii haotice a unui sistem laser cu semiconductoare cu cavitate externă dublă și se va realiza o dezvoltare a modelului numeric al emisiei multimod a unui laser cu semiconductoare cuplat optic cu două cavități externe pentru a urmări efectul feedback-ului selectiv și neselectiv .

Menționez ca o parte din aceste obiective au fost deja atinse prin participarea la competiția de proiecte tip PED - Proiect experimental – demonstrativ din cadrul Programului Național PN III, competiția 2019, și obținerea finanțării pentru un proiect (420PED/2020). Astfel, rezultatele obținute în cadrul tezei au contribuit la obținerea finanțării proiectului PED cu titlul: Tehnologie haotică pentru testarea metodelor și platformelor utilizate în sistemele de criptare, Conducător de proiect INFLPR București, Director de proiect I.R. Andrei. Acest proiect are ca obiectiv principal dezvoltarea unei platforme experimentale cu control automat de la distanță, bazata pe sincronizarea a doi laseri cu semiconductori cu feedback optic și control al dinamicilor haotice prin modulare, și testarea de metode de criptare utilizând purtătoarea optică haotică.

Bibliografie

1. Nilushi Wijeyasinghe (2019) Laser Diodes & Direct Diode Lasers 2019-2029: Technologies, Markets & Forecasts. IDTechEx
2. Ohtsubo J (2017) Semiconductor Lasers: Stability, Instability and Chaos, 4th Edition. Springer International Publishing, Cham
3. S. Banerjee, L. Rondoni, S. Mukhopadhyay (2011) Synchronization of time delayed semiconductor lasers and its applications in digital cryptography,. Optics Communications 284, 19, 4623 – 4634
4. Ruiz-Oliveras FR, Pisarchik AN (2006) Phase-locking phenomenon in a semiconductor laser with external cavities. Optics Express 14:12859. https://doi.org/10.1364/OE.14.012859
5. Argyris A, Syvridis D, Larger L, et al (2005) Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links. Nature 438:343–346. https://doi.org/10.1038/nature04275
6. Liang Jun-Sheng, Wu Yuan, Wang An-Bang, Wang Yun-Cai (2012) Extracting the external-cavity key of a chaotic semiconductor laser with double optical feedback by spectrum analyzer. Acta Physica Sinica 61:034211. https://doi.org/10.7498/aps.61.034211
7. C. Onea, P.E. Sterian, I.R. Andrei, M.L. Pascu, (2019) Chaotic, tunable high frequencies oscillations induced in a double-reflector external cavity semiconductor laser, . in: Annual Scientific Conference, Faculty of Physics - University of Bucharest, Magurele,
8. C. Onea, P. E. Sterian, I. R. Andrei, A. Baleanu, M. L. Pascu (2019) Chaotic low-frequency fluctuations of laser diode emission at injection currents above threshold,. UPB Sci Bull Series C,
9. C. Onea, P. E. Sterian, I.R. Andrei, M.L. Pascu (2019) High frequency chaotic dynamics in a semiconductor laser with double-reflector selective cavity. UPB Sci Bull, Series A in press:
10. I. R. Andrei, C. Onea, P. E. Sterian, et al (2019) Control of slave chaotic dynamics by master current modulation in a chaotic coupled laser system. OAM-RC 13:
11. C. Onea, P.E. Sterian, I.R. Andrei, M.L. Pascu (2019) Chaotic, tunable high frequencies oscillations induced in a double-reflector external cavity semiconductor laser. Annual Scientific Conference, Faculty of Physics - University of Bucharest, Magurele
12. Lang R, Kobayashi K (1980) External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties. IEEE Journal of Quantum Electronics 16:347–355. https://doi.org/10.1109/JQE.1980.1070479
13. Cristina ONEA, Ionut Relu ANDREI, Paul E. STERIAN, Mihai Lucian PASCU, Mircea BULINSKI NUMERICAL SIMULATION OF CHAOTIC MULTIMODE DYNAMICS OF A SEMICONDUCTOR LASER OPTICAL COUPLED WITH TWO EXTERNAL CAVITIES. UPB Sci Bull, Series A, Vol. 83, Iss. 1, 2021:
14. Haken H (1975) Analogy between higher instabilities in fluids and lasers. Physics Letters A 53:77–78. https://doi.org/10.1016/0375-9601(75)90353-9
15. M. Bulinski, M.L. Pascu (2001) Chaos in laser diode light emission. Romanian Journal of Optoelectronics 19:1–34

16. Paul E.Sterian, Nicolae N.Pușcaș (1988) Laseri și procese multifotonice. Ed.Tehnică
17. Lorenz, E.N (1963) Deterministic Nonperiodic Flow,. J Atmos Sci, Vol 20, pag 130 - 142,
18. Ghys, E (2013) The Lorenz attractor, a paradigm of chaos. , Chaos, Vol 34, pag 1 – 54,
19. Paul E. Sterian (2002) Communication based on chaotic signals. Proceedings of the roumanian academy,Series A 3:
20. Mork J, Tromborg B, Mark J (1992) Chaos in semiconductor lasers with optical feedback: theory and experiment. IEEE Journal of Quantum Electronics 28:93–108. https://doi.org/10.1109/3.119502
21. Erneux T, Gavrielides A, Sciamanna M (2002) Stable microwave oscillations due to external-cavity-mode beating in laser diodes subject to optical feedback. Phys Rev A 66:033809. https://doi.org/10.1103/PhysRevA.66.033809
22. Heil T, Fischer I, Elsäßer W, Gavrielides A (2001) Dynamics of Semiconductor Lasers Subject to Delayed Optical Feedback: The Short Cavity Regime. Phys Rev Lett 87:243901. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.243901
23. Sacher J, Baums D, Panknin P, et al (1992) Intensity instabilities of semiconductor lasers under current modulation, external light injection, and delayed feedback. Physical Review A 45:1893–1905. https://doi.org/10.1103/PhysRevA.45.1893
24. Fischer I, van Tartwijk GHM, Levine AM, et al (1996) Fast Pulsing and Chaotic Itinerancy with a Drift in the Coherence Collapse of Semiconductor Lasers. Phys Rev Lett 76:220–223. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.76.220
25. C. Onea, P.E. Sterian , I.R. Andrei, M.L. Pascu: Aspects Of Chaotic Dynamics Of The Semiconductor Laser Emission Obtained In Different External Optical Feedback Conditions. Annals of the Academy of Romanian Scientists Series on Science and Technology of Information Volume 12:
26. D.Deleanu (2019) Indicatori ai teoriei haosului. Ed.Nautica
27. G. J. Rodgers (1992) From Order into Chaos, Phys. Educ. 27, 14-17
28. K. Pyragas (1992) Continuous control of chaos by self-controlling feedback. Phys Lett A 170, 421
29. Tronciu VZ, Ermakov IV, Colet P, Mirasso CR (2008) Chaotic dynamics of a semiconductor laser with double cavity feedback: Applications to phase shift keying modulation. Optics Communications 281:4747–4752. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2008.05.053
30. Peil M, Heil T, Fischer I, Elsäßer W (2002) Synchronization of Chaotic Semiconductor Laser Systems: A Vectorial Coupling-Dependent Scenario. Physical Review Letters 88:. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.88.174101
31. Heil T, Mulet J, Fischer I, et al (2002) ON/OFF phase shift keying for chaos-encrypted communication using external-cavity semiconductor lasers. IEEE Journal of Quantum Electronics 38:1162–1170. https://doi.org/10.1109/JQE.2002.801950
32. Vicente R, Mirasso CR, Fischer I (2007) Simultaneous bidirectional message transmission in a chaos-based communication scheme. Optics Letters 32:403. https://doi.org/10.1364/OL.32.001271
33. Bulinski M, Pascu ML, Andrei IR (2004) Phase synchronization and coding chaos with semiconductor lasers. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials 6:77–86

34. Sanchez-Diaz A, Mirasso CR, Colet P, Garcia-Fernandez P (1999) Encoded Gbit/s digital communications with synchronized chaotic semiconductor lasers. IEEE Journal of Quantum Electronics 35:292–297. https://doi.org/10.1109/3.748833
35. Z. Fang, H. Cai, G. Chen, R. Qu (2017) External Cavity Semiconductor Lasers, in: Single Frequency Semiconductor Lasers,. Springer Singapore, Singapore. https://doi.org/: pp. 117–166.
36. A. Bakry, S. Abdulrhmann, M. Ahmed Theoretical modeling of the dynamics of a semiconductor laser subject to double-reflector optical feedback. Journal of Experimental and Theoretical Physics 122 (2016):960–969
37. J.M. Buldu, F. Rogister, J. Trull, C. Serrat, M.C. Torrent, J. Garc a-Ojalvo, C.R. Mirasso, (2002) Asymmetric and delayed activation of side modes in multimode semiconductor lasers with optical feedback. Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics 415–420