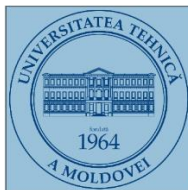


UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI

Departamentul Fizică



Cu titlu de manuscris

C.Z.U: 05.45.-a, 42.65.Sf, 42.55.Px

OLOINIC TATIANA

**DINAMICA COMPLEXĂ A LASERELOR
SEMICONDUCTOARE CU MEDIU ACTIV GROPI SI PUNCTE
CUANTICE**

131.03 – FIZICĂ STATISTICĂ ȘI CINETICĂ

Rezumatul tezei de doctor în științe fizice

CHIȘINĂU 2026

**Teza a fost elaborată în cadrul Departamentului Fizica
Școala doctorală a Universității Tehnice a Moldovei**

Comisia de Doctorat:

URSACHI Veaceslav, membru corespondent al AȘM, doctor habilitat în științe fizico-matematice, conferențiar cercetător, Academia de Științe a Moldovei. Președintele Comisiei de Doctorat.

TRONCIU Vasile, doctor habilitat în științe fizico-matematice, profesor universitar, Universitatea Tehnică a Moldovei. Conducător Științific.

Referenți oficiali:

NICA Denis, doctor habilitat în științe fizice, conferențiar cercetător, Universitatea de Stat din Moldova.

OSTROVSCHI Serghei, doctor habilitat în științe fizico-matematice, conferențiar cercetător, Institutul de Fizica Aplicată, Universitatea de Stat din Moldova.

POSTOLACHI Igor, doctor în științe fizico-matematice, conferențiar universitar, Universitatea Pedagogică de Stat „Ion Creangă” din Chișinău.

Susținerea tezei va avea loc la **12 februarie 2026**, orele **16:00** în ședința Comisiei de Doctorat din cadrul Școlii doctorale a Universității Tehnice a Moldovei (aprobată prin decizia Consiliului Științific din 1 iulie 2025, proces-verbal nr. 7), str. Studenților 9/7, blocul de studii nr. 3 a UTM, **sala 3-305**, Chișinău, MD - 2068, Republica Moldova.

Teza de doctor și rezumatul științific pot fi consultate la Biblioteca Tehnico-Științifică a Universității Tehnice a Moldovei și pe pagina web a ANACEC (<http://anacec.md>).

Rezumatul a fost expediat la 9 ianuarie 2026.

Președintele Comisiei de Doctorat,
membru corespondent al AȘM,
dr. hab. șt. fiz.-mat., conf. cerc.
Conducător științific
dr hab. șt. fiz.-mat., prof. univ.

 URSACHI Veaceslav

 TRONCIU Vasile

Autor

 OLOINIC Tatiana

© Oloinic Tatiana, 2026

CUPRINS

REPERELE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII	4
CONȚINUTUL TEZEI	9
CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI	28
BIBLIOGRAFIE	30
Anexa 1. Lista publicațiilor la tema tezei	31
ADNOTARE	34
SUMMARY	35

REPERELE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII

Actualitatea temei și importanța problemei investigate

În ultimii ani laserele semiconductoare au devenit dispozitive importante care sunt utilizate pe larg în viața cotidiană precum și ca elemente cheie în cercetările interacțiunii dintre substanță și lumină. Pe parcursul anilor au urmat diverse etape care au condus la crearea structurilor laser funcționale stabile. Datorită timpului lung de funcționare și stabilitatea emisiei laser a fost posibilă dezvoltarea ramurii optica nelineară din fizica modernă. Structurile laser recent apărute au fost elaborate având la bază o funcționare mai bună, care generează regimuri de emisie controlabile și stabile. Laserele au devenit mai ieftine inclusiv datorită construcției lor care utilizează materiale în cantități mici. Astfel, cercetarea științifică actuală are stabilită o prioritate în domeniul dat de a efectua analiza teoretică a fenomenelor optice observate în diferite structuri cu lasere. Apariția de noi efecte optice neliniare în lasere a crescut interesul pentru cercetările teoretice în domeniu. Unele din cele mai observate efecte din laserele semiconductoare cu feedback optic sunt autopulsațiile, bistabilitatea optică, haosul optic, rezonanța optică, etc. Optica nelineară este un domeniu foarte mult dezvoltat și cu aplicații în diverse ramuri datorită utilizării laserelor semiconductoare. Cercetările din optica nelineară au condus la crearea de noi structuri laser cu diferite topologii. Un domeniu precum sinergetica are la bază principii care sunt pe larg aplicate în laserele semiconductoare, în știința corpului solid și în alte domenii. Principiile de funcționare a dispozitivelor optoelectronice au la bază fenomenul autoorganizării. Acestea sunt utilizate pe larg în telecomunicații, rețele de calculatoare, în sistemele de iluminat, în medicină etc. Teza prezentată este bazată pe teoria nelineară aplicată în laserele semiconductoare cu mediu activ puncte cuantice sub influența feedback-ului optic provenit de la mai multe cavități optice.

Este bine știut că punctele cuantice au o importanță largă în domeniul nanotehnologiilor, acestea fiind elemente de bază în dezvoltarea lor [1], [2]. Proprietățile optice ale punctelor cuantice sunt determinate de dimensiunile lor și structura acestora. Din punct de vedere al aplicării, punctele cuantice pot fi considerate atomi artificiali [3], [4]. Utilizarea punctelor cuantice în semiconductoare ca atomi artificiali conduce la formarea moleculelor de dimensiuni nano unite structural și electronic. La cuplarea a două sau mai multe puncte cuantice se obține o moleculă artificială, care se hibridizează având o temperatură mică [5]. Punctele cuantice se aplică pe larg în lasere [6], tranzistoare cu un singur electron, surse cu un singur foton, celule solare, LED-uri, imagistică medicală, cercetare în biologie medicală [7]-[10].

Scopul și obiectivele cercetării

Scopul tezei constă în dezvoltarea teoriei dinamicii neliniare a laserelor semiconductoare cu mediu activ gropi și puncte cuantice prin propunerea de noi dispozitive cu secțiuni aer pentru utilizarea lor în sistemele optice de comunicare bazată pe haos.

Din scopul propus rezultă următoarele obiective:

1. Dezvoltarea unui model ce descrie dinamica complexă a laserelor semiconductoare cu mediu activ puncte cuantice cu feedback optic provenit de la un rezonator exterior cu cavitare aer.
2. Studiul comunicării bazate pe haos cu ajutorul laserelor cu gropi cuantice și feedback multiplu.
3. Analiza bifurcațiilor și stărilor staționare care apar în sistemul de ecuații diferențiale cu întârziere ce descriu sistemul laser cu feedback de la cavități exterioare și obținerea soluțiilor analitice, după caz.
4. Determinarea parametrilor și a modului de apariție a diferitor structuri temporale precum autopulsații, turbulență optică și haos. Acesta din urmă reprezintă condiția necesară pentru sistemele de comunicare optică bazate pe haos.
5. Determinarea condițiilor de sincronizare perfectă a două lasere semiconductoare cu mediu activ puncte cuantice cu feedback multiplu și cavități aer cuplate unidirecțional.
6. Analiza utilizării diferitor tehnici de codificare a informației în sistemul de comunicare bazate pe haos.
7. Simularea efectelor dinamice neliniare a laserelor semiconductoare cu mediu activ puncte cuantice prin metodele modelării numerice.
8. Cercetarea comportamentului staționar al laserului cu puncte cuantice cu feedback dublu: unul convențional, iar altul cu filtru.
9. Modelarea numerică prin simularea efectelor dinamice neliniare a autopulsațiilor, turbulenței optice și a haosului.

Metodologia cercetării științifice

Suportul teoretic al tezei a fost realizat în urma analizei literaturii din domeniul teoriei laserilor semiconductoare accesând sursele disponibile la Universitatea Tehnică a Moldovei, precum și lucrările cu acces online deschis.

Pentru realizarea cu succes a obiectivelor de mai sus au fost aplicate următoarele metode:

1. Au fost utilizată aproximația câmpului mediu.

2. Au fost efectuate calcule numerice utilizând metode precum Runge-Kutta de ordinul patru și Euler elaborate în FORTRAN și C++.
3. Au fost integrate ecuații diferențiale cu întârziere de tipul Lang- Kobayashi și Bloch.
4. A fost utilizat softul MATLAB pentru elaborarea de algoritmi și calculul valorilor numerice ale parametrilor ce descriu materialul mediului activ al laserului.
5. A fost utilizat softul DDE-biftool pentru determinarea soluțiilor staționare, periodice și ale bifurcațiilor ecuațiilor diferențiale cu întârziere ce descriu laserele cu puncte cuantice și feedback multiplu.

Noutatea și originalitatea științifică:

1. S-au efectuat simulări numerice pentru laserul semiconductor cu gropi cuantice sub influența feedback-ului multiplu pentru realizarea procesului de comunicare optică criptată bazată pe haos.
2. A fost analizată teoretic dinamica nelineară pentru o structură nouă a laserului semiconductor cu mediu activ puncte cuantice sub influența unui feedback optic provenit de la mai multe cavități exterioare.
3. A fost demonstrată apariția diverselor fenomene precum autopulsații, turbulență și haos optic puternic în laserele considerate.
4. A fost demonstrat teoretic că două lasere semiconductoare cu puncte cuantice cu feedback multiplu pot fi cuplate unidirecțional și sincronizate perfect.
5. În premieră a fost analizat teoretic codificarea și decodificarea informației prin două metode în comunicarea optică bazată pe haos cu utilizarea laserelor cu puncte cuantice haotice cu feedback multiplu.
6. Teoretic au fost studiate proprietățile laserului cu puncte cuantice sub influența feedback-ului dublu: unul convențional și altul cu filtru.

Problema științifică soluționată în teză constă în studiul teoretic al structurilor noi ale laserului cu semiconductoare cu mediu activ puncte cuantice sub influența unui feedback optic provenit de la mai multe cavități exterioare pentru aplicații în sistemele de comunicare bazate pe haos. Au fost investigate fenomene optice, ce caracterizează comportamentul haotic al noilor structuri laser propuse. Prin simulare numerică a fost obținut domeniul parametrilor ce caracterizează dinamica neliniară a laserelor propuse, în particular pentru regiunile haotice. De asemenea, au fost sistematizați parametrii obținuți în simulările numerice și transmiși pentru realizarea experimentală a structurilor cu puncte cuantice și feedback optic.

Semnificația teoretică și valoarea aplicativă a tezei constă în următoarele:

- Prezentarea unui model teoretic inedit al laserului semiconductor cu mediu activ puncte cuantice sub influența feedback-ului de la mai multe cavități. Obținerea expresiilor analitice ale stărilor staționare.
- Identificarea, cu ajutorul programului DDE-biftool, a bifurcațiilor ce apar în sistem în condițiile comportamentului dinamic nelinear.
- Identificarea domeniului de apariție în planul a doi parametri a autopulsațiilor și haos optic puternic în laserele considerate.
- Elaborarea schemei de conectare a două lasere cuplate unidirecțional pentru a realiza sincronizarea perfectă în cazul laserelor identice.
- Studiarea teoretică a fenomenelor optice ce apar în laserele cu puncte cuantice care prezintă interes major pentru înțelegerea funcționării lor și ulterior realizarea experimentală.
- Abordarea teoretică a procesului de comunicare optică bazată pe haos într-un sistem de lasere cu gropi cuantice cuplate unidirecțional în cazul laserelor non-identice.
- Propunerea de dispozitive noi ale laserelor semiconductoare cu mediu activ puncte cuantice sub influența feedback-ului de la mai multe cavități, în unele din care fiind aer.

Valoarea practică a tezei constă în:

- estimarea parametrilor de material și a celor geometrici ai laserelor pentru regiunile cu haos puternic;
- explicarea fenomenelor raportate în diferite experimente;
- recomandări practice pentru lasere cu proprietăți controlabile în aplicații de comunicare optică bazată pe haos;
- implementarea rezultatelor obținute în două proiecte științifice din cadrul programelor de stat finanțate de ANCD.

Rezultatele științifice principale înaintate spre susținere

1. Au fost prezentate rezultate teoretice ale dinamicii laserului semiconductor cu mediu activ gropi și puncte cuantice sub acțiunea unui feedback optic provenit de la mai multe cavități. Au fost analizate stările staționare ale ecuațiilor diferențiale cu întârziere care descriu sistemele studiate pentru a caracteriza comportamentul laserului.
2. Au fost efectuate studii ale fenomenelor optice nelineare prin modelare numerică.

3. Au fost obținute bifurcațiile care conduc la apariția fenomenelor de autopulsații și haos optic dinamic în lasere semiconductoare cu cavități aer adiționale.
4. Au fost propuse lasere cu dimensiuni mult mai mici față de cele raportate în literatura de specialitate pentru utilizarea în structuri de comunicare securizată.
5. Au fost sincronizate două lasere unidireționale prin cuplarea acestora.
6. A fost realizată comunicarea bazată pe haos în sistemele laser cu puncte cuantice și feedback optic.

Aprobarea rezultatelor obținute

Principalele rezultate științifice au fost prezentate la următoarele conferințe:

1. Seminar, schimb de experiență, Trieste, Italia (2019).
2. The 6th International Conference on Telecommunications, Electronics and Informatics, Chișinău, Republic of Moldova, 24-27 mai, p. 225 – 227, 2018.
3. The 9th International Conference on Microelectronics and Computer Science, Chișinău, Republic of Moldova, 19-21 octombrie, p. 88-81, 2017.
4. TIM18 International Physics Conference, 24 - 26 May 2018, Timișoara, Romania, AIO06.
5. Conferința Științifică a Doctoranzilor „Tendințe contemporane ale dezvoltării științei: viziuni ale tinerilor cercetători”, ediția a VI-a, p. 84-88, 2017, Chișinău, Moldova.
6. Școala doctorală de vară ECODAM, Iași, România, 19 – 21 iunie, 2017.
7. Humboldt Kolleg on Multidisciplinarity in Modern Science, Chișinău, 2017.
8. Școala doctorală de vară ECODAM, Iași, România, 21 – 26 iunie, 2016.
9. Conferința Științifică a Doctoranzilor „Tendințe contemporane ale dezvoltării științei: viziuni ale tinerilor cercetători”, ediția a V-a, p. 84-88, 2016.
10. 59th Scientific Conference for Students of Physics and Natural Sciences, Open Readings 2016, 15-18 martie, Vilnius, Lituania.
11. Humboldt Kolleg on Multidisciplinarity in Modern Science, Chișinău, 2015.

Publicații la tema tezei. Rezultatele principale ale tezei au fost publicate în 18 lucrări științifice, dintre care 2 articole în reviste internaționale cotate WoS și SCOPUS, 3 în reviste din Registrul Național al revistelor de profil 1 în categoria B+ și 2 categoria C, 4 articole în culegeri de lucrări ale conferințelor naționale cu participare internațională, 9 teze la foruri științifice, conferințe internaționale. Lista contribuțiilor autorului este prezentată la sfârșitul tezei în Anexa 1.

Volumul și structura tezei. Teza constă din introducere, patru capitole, concluzii generale și recomandări. Teza este expusă pe 131 pagini cu 54 figuri. Bibliografia conține 147 referințe. Teza a fost elaborată în cadrul Laboratorului de cercetare a dispozitivelor laser și a materialelor

nanostructurate, al Departamentului Fizică, Universitatea Tehnică a Moldovei cu participare în proiectul din cadrul Programelor de Stat 20.80009.5007.08 cu titlul „Studiul structurilor optoelectronice și a dispozitivelor termoelectrice cu eficiență înaltă” și în proiectul 15.817.02.22F „Proprietățile termoelectrice și optice ale materialelor nanostructurale și dispozitivelor cu puncte cuantice”.

CONȚINUTUL TEZEI

Introducerea descrie actualitatea și relevanța temei tezei, precum și scopul, obiectivele și noutatea științifică a cercetărilor.

În **Capitolul 1** este prezentată descrierea rezultatelor precedente din domeniul dinamicii complexe a laserelor semiconductoare. În ultimii ani dinamica neliniară a proceselor optice a devenit un domeniu de cercetare în dezvoltare. Cercetările intense din acest domeniu se datorează atât interesului fundamental, cât și celui aplicativ al fenomenelor descoperite. Performanța dispozitivelor laser poate fi modificată de feedbackul optic, care apare la interfața elementelor circuitelor fotonice integrate, sau la reflexia de la un obstacol. Sistemele optoelectronice de comunicare reprezintă dispozitivele electronice care generează, măsoară, recombina și folosesc radiația luminoasă a domeniului optic. Dispozitivele optoelectronice au un rol important și se regăsesc în diverse scheme electrice cum ar fi: diode laser, module laser, LED-uri și accesorii pentru acestea. În această varietate a dispozitivelor optoelectronice laserele semiconductoare reprezintă elementul cheie în dezvoltarea comunicării optice bazate pe haos. Laserul semiconductor a devenit deosebit de atractiv datorită prețului său redus și a dimensiunilor mici. De asemenea, este foarte eficient, spre deosebire de majoritatea celorlalte tipuri de laser.

Capitolul 2, în prima parte, cuprinde expunerea rezultatelor numerice ale comportamentului dinamic al unui laser semiconductor cu mediul activ gropi cuantice, supus mai multor bucle de feedback optic, laser similar celui reprezentat în [11]. Configurația laserului constă dintr-o secțiune activă cu gropi cuantice cu feedback distribuit, cuplată cu cavități cu mai multe secțiuni. S-a demonstrat că, datorită buclelor multiple de feedback și în anumite condiții de funcționare, laserul prezintă comportamente haotice adecvate pentru comunicațiile bazate pe haos. Au fost identificate condițiile optime și parametrii laserului cu gropi cuantice potriviți pentru generarea haosului. A fost studiată sincronizarea a două sisteme cuplate unidirecțional de tipul laser principal – laser secundar (en. master-slave). În cele din urmă, au fost descrise și discutate exemple de codificare și decodificare a mesajelor cu rată mare de biți. Totodată s-a analizat modul în care laserul poate fi destabilizat de cavitățile externe, precum și utilizarea oscilațiilor haotice produse de configurația dată într-un sistem de comunicații bazat pe haos. S-a demonstrat că comunicarea bazată pe haos devine mai atractivă deoarece permite o îmbunătățire suplimentară a

securității transmisiei optice de date. Astfel, în prima parte a acestui Capitol am demonstrat că laserul cu gropi cuantice este util ca element cheie în sistemele de comunicare bazate pe haos. În continuare apare întrebarea dacă laserele cu puncte cuantice ar putea satisface condițiile descrise mai sus, sustenabile pentru laserele cu gropi cuantice?

În partea a doua a Capitolului 2 este expusă teoria laserelor cu mediu activ puncte cuantice și cavități exterioare. Schema laserului este alcătuită dintr-un laser cu mediu activ puncte cuantice care funcționează sub influența unui feedback optic de la două cavități exterioare. Pentru a studia dinamica complexă a laserului se utilizează un set de ecuații pentru variabile adimensionale și pentru feedback optic de tipul Lang-Kobayashi [12]. S-a studiat cazul staționar prin obținerea soluțiilor sub formă de moduri ale cavităților exterioare (MCE). În rezultat s-au obținut ecuații analitice ce descriu amplitudinea câmpului electric, probabilitatea de ocupare în puncte cuantice, densitatea purtătorilor de sarcină și o ecuație transcendentă pentru frecvența MCE. S-a trasat locul geometric al modurilor cavităților exterioare în planul densității purtătorilor de sarcină frecvența de emisie pentru diferite valori ale intensității feedback-ului. S-a obținut ecuația analitică a bifurcației nod-șa. S-au trasat liniile bifurcațiilor șa-nod și trans-critice pentru diferite locații și numere ale modurilor cavităților exterioare. S-a obținut diagrama bifurcațiilor pentru stările de echilibru în planul diferitor parametri pentru diferite intensități ale feedback-ului optic. S-a utilizat soft-ul DDE-biftool pentru studiul stabilității stărilor staționare. S-a obținut locul geometric al bifurcațiilor Hopf. Rezultatele obținute cu ajutorul DDE-biftool au fost verificate prin metoda integrării directe a ecuațiilor de mișcare. În rezultat s-au obținut evoluția în timp a puterii emergente și portretele de fază pentru diferite regimuri de evoluție, precum, unde continui, autopulsații și unde haotice. Au fost trasate diagramele bifurcațiilor obținute numeric. S-a demonstrat sincronizarea a două lasere „principal –secundar” unite în direcție longitudinală. Din rezultatele obținute rezultă, că schița propusă pentru aceste lasere este promițătoare pentru aplicații practice ale acestor lasere în sistemele de comunicare optică. Schema laserului cu mediu activ puncte cuantice acestuia este reprezentată în Fig. 1. Dispozitivul este alcătuit dintr-un laser cu mediu activ puncte cuantice cu cavitare aer care funcționează sub influența unui feedback optic de la două cavități exterioare. Prima oglindă a laserului este amplasată la distanța l de la partea laterală a laserului. Faza φ în cavitatea cu aer poate fi schimbată de un piezo-element, care este plasat la fațeta posterioară a sistemului. Faza feedback-ului optic în cavitatea a doua poate fi controlată prin includerea unui curent în secțiunea pasivă. Se presupune că curentul injectat în secțiunea pasivă este mic și afectează indicele de refracție, astfel încât lungimea optică a rezonatorului este schimbată în intervale de sub-lungimi de undă. Pe de altă parte, faza feedbackului φ poate fi reglată prin modificarea timpului de întârziere dintre cele două oglinzi.

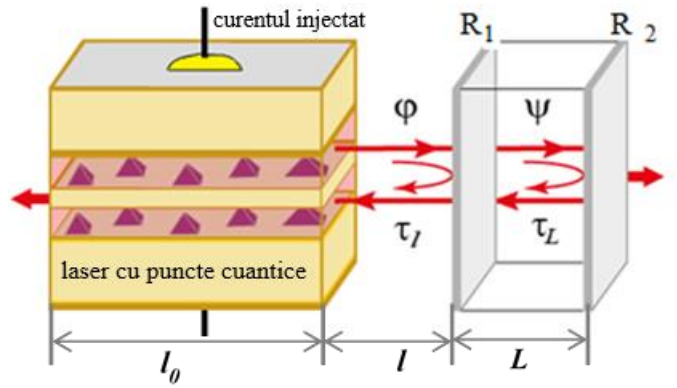


Fig. 1. Schema laserului. l_0 este lungimea laserului, l este distanța dintre partea laterală a laserului și prima oglindă a rezonatorului. L este distanța dintre oglinzi, ω_0 este frecvența laserului, φ este faza feedback-ului în cavitatea cu aer și ψ este faza în interiorul rezonatorului. τ_l și τ_L sunt timpul pentru cavitățile exterioare respective [A1].

Pentru studiul dinamicii complexe a laserului cu mediu activ puncte cuantice sub influența unui feedback optic dublu se utilizează următoarele ecuații pentru dimensiuni adimensionale și pentru feedback optic de tip Lang –Kobayashi [12]

$$\frac{dE}{d\tau} = \frac{1}{2}(1+i\alpha)\left[-\gamma_{np} + g(2\rho-1)\right]E + \Gamma_1 e^{-i\varphi} E(\tau - \tau_l) + \Gamma_2 e^{-i(\varphi+\psi)} E(\tau - (\tau_l + \tau_L)), \quad (1)$$

$$\frac{d\rho}{d\tau} = -\gamma_{ns}\rho - (2\rho-1)|E|^2 + (CN^2 + BN)(1-\rho), \quad (2)$$

$$\frac{dN}{d\tau} = J - N - 2\left[(CN^2 + BN)(1-\rho)\right], \quad (3)$$

unde E este amplitudinea complexă a câmpului electric, N este densitatea purtătorilor de sarcină în groapa cuantică și ρ este probabilitatea de ocupare în punctele cuantice. $\tau_l = 0.05$, $\tau_L = 0.2$ este timpul pentru cavitățile exterioare respective, care corespund $l = 7.5$ mm, și $L = 1$ cm, respectiv. $g = 1200$ este câștigul diferențial, iar $J = 20$ este parametrul de pompare. Constantele $B = 0.012$ și $C = 40$ descriu transportul purtătorilor de sarcină prin interacțiunea sarcină-foton. Aceste valori ale parametrilor menționați sunt utilizate ca bază pentru a descrie rezultatele obținute și a le prezenta cu ajutorul diagramelor în acest Capitol. Totuși unii din acești parametri vor avea variații care vor fi incluse în legendele figurilor. Parametrii Γ și τ descriu conexiunea feedback-ului și timpul de întârziere. Γ_1 și Γ_2 reprezintă nivelurile feedback-ului care mențin reflectivitatea oglinzilor R_1 și R_2 , respectiv. Se presupune că ambele fațete ale cavităților sunt acoperite cu material care poate schimba reflectivitatea acestora. Faza feedback-ului φ poate fi modificată cu un curent mic sau poate fi variată cu ajutorul unui piezo-element. Astfel, intensitatea feedback-

ului Γ_1 și Γ_2 , precum și faza în cavitatea de aer φ sunt parametri principali care variază pe parcursul investigației teoretice.

Soluțiile staționare ale sistemului de ecuații (1) – (3) sunt exprimate prin modurile cavității exterioare sub forma

$$E = E_s e^{i\omega_s \tau}, \quad N = N_s, \quad \rho = \rho_s. \quad (4)$$

Utilizând (4) din (1)-(3) obținem o ecuație transcendentă pentru frecvența de emisie ω_s

$$\begin{aligned} \omega_s = & -\Gamma_1 (\alpha \cos(\omega_s \tau_l + \varphi) + \sin(\omega_s \tau_l + \varphi)) - \\ & -\Gamma_2 [\alpha \cos(\omega_s (\tau_l + \tau_L) + \varphi + \psi) + \sin(\omega_s (\tau_l + \tau_L) + \varphi + \psi)], \end{aligned} \quad (5)$$

de asemenea și ecuațiile pentru probabilitatea de ocupare, densitatea purtătorilor de sarcină și intensitatea semnalului emergent

$$\rho_s = \frac{1}{2g} \{ \gamma_{np} + g - 2[\Gamma_1 \cos(\omega_s \tau_l + \varphi) + \Gamma_2 \cos(\omega_s (\tau_l + \tau_L) + \varphi + \psi)], \quad (6)$$

$$N_s = -\frac{2B(1-\rho_s)+1}{4C(1-\rho_s)} + \frac{\sqrt{[2B(1-\rho_s)+1]^2 + 8C(1-\rho_s)J}}{4C(1-\rho_s)}, \quad (7)$$

$$|E_s|^2 = \frac{J - N_s - 2\gamma_{ns}\rho_s}{2(2\rho_s - 1)}. \quad (8)$$

În cazul în care sistemul laser funcționează sub influența unui feedback optic convențional, modurile cavităților exterioare sunt sub formă de elipsă. Figura 2 reprezintă locul geometric în planul $(N_s - \omega_s)$ pentru diferite valori ale puterii feedback-ului. Dacă feedbackul optic convențional lipsește, iar dispozitivul funcționează sub influența unui feedback optic provenit de la două cavități exterioare, modurile cavităților exterioare obțin o formă diferită de cea eliptică. Se consideră, pentru început, cazul feedback-ului optic convențional, adică $\Gamma_1 = 10$ și $\Gamma_2 = 0$. În acest caz reflexia se produce doar de la prima fațetă a rezonatorului exterior. Pentru aceste valori ale puterii feedback-ului locul geometric al modurilor se consideră o elipsă (Fig. 2(a)). Cazul când feedbackul optic este convențional a fost discutat detaliat timp de două decenii. În cele ce urmează analizăm influența feedbackului dublu asupra locației modurilor exterioare. Când intensitatea feedbackului $\Gamma_1 = 10$ și Γ_2 variază până la 10 elipsa centrală se deformează și apar sateliți exteriori (a se vedea Fig. 2(b)). În Fig. 2(c) se observă, că atunci când Γ_2 variază până la 20 elipsa centrală este deformată mai mult și obține forma unui opt turtit. Când ambele puteri ale feedback-ului optic Γ_1 și Γ_2 sunt crescute până la 20 elipsa se divizează în trei cercuri pe care sunt localizate modurile cavităților exterioare. De asemenea, apar în dreapta și în stânga sateliți suplimentari (Fig. 2(d)).

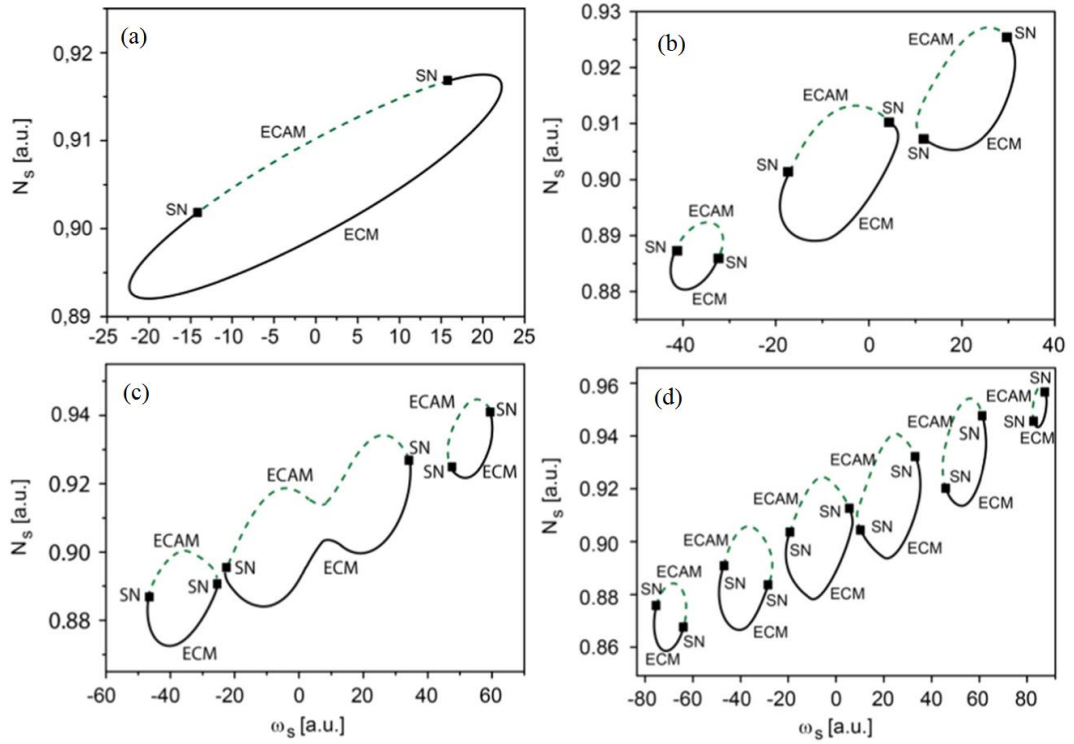


Fig. 2. Locul geometric al modurilor cavităților exterioare în planul ($N_s - \omega_s$) pentru faza feedback - ului fixată $\psi = \pi/2$ și diferite valori ale puterii feedback - ului (a) $\Gamma_1 = 10, \Gamma_2 = 0$ (COF), (b) $\Gamma_1 = 10, \Gamma_2 = 10$, (c) $\Gamma_1 = 10, \Gamma_2 = 20$, (d) $\Gamma_1 = 20, \Gamma_2 = 20$. Anti-modurile cavităților exterioare AMCE. SN este bifurcația șa – nod [A1].

Figura 3(a) reprezintă diagrama bifurcației când puterea feedback-ului Γ_1 este parametrul bifurcației.

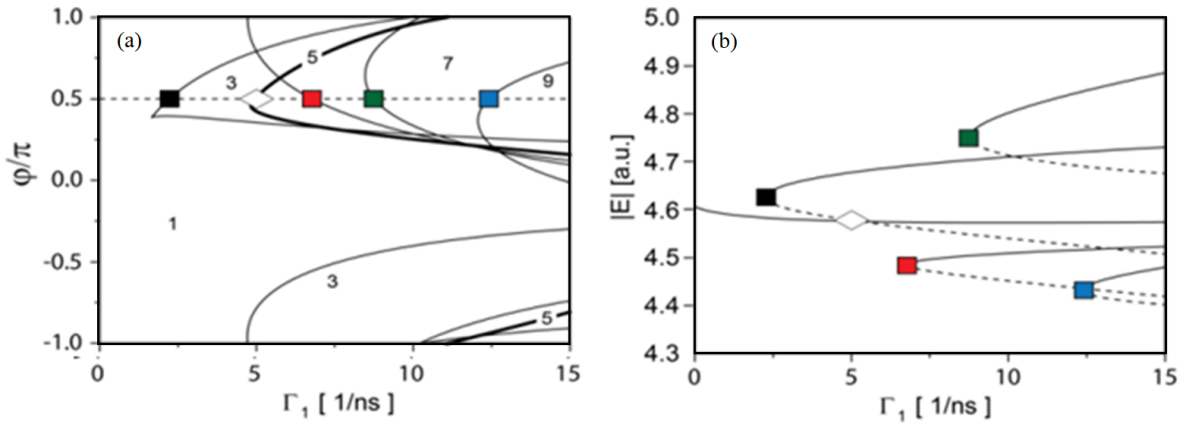


Fig. 3. (a) Liniile bifurcațiilor șa-nod (subțiri) și trans-critice (îngroșate) pentru diferite locații și numere a MCE în corespundere cu regiunile respective. (b) Diagrama bifurcațiilor pentru stările de echilibru în planul $|E|$ în dependență de puterea feedback-ului Γ_1 pentru $\varphi = \pi/2$. Liniile solide reprezintă modurile, iar liniile punctate anti-modurile. Pătratele indică bifurcațiile șa-nod. Rombul caracterizează bifurcația trans-critică. $\Gamma_2 = 10$ [A1].

Pentru intensități mici ale feedback-ului există o regiune, unde doar un singur mod este prezent. Moduri ale cavităților exterioare suplimentare (în perechi) apar atunci când se parcurge curba șa-nod (liniile subțiri). Bifurcația trans-critică este prezentată prin liniile îngroșate. Figura 3(b) se aseamănă cu situația, când faza $\varphi = \pi/2$ (a se vedea liniile punctate în Fig. 3(a)). Fiecare simbol de pe această linie este reprodus în Fig. 3(b). Figura 4 reprezintă bifurcațiile Hopf în planul $(\varphi - \Gamma_1)$ pentru valoarea fixă a fazei $\psi = \pi/2$, și diferite valori Γ_2 . Regiunile mărginite de aceste linii sunt instabile.

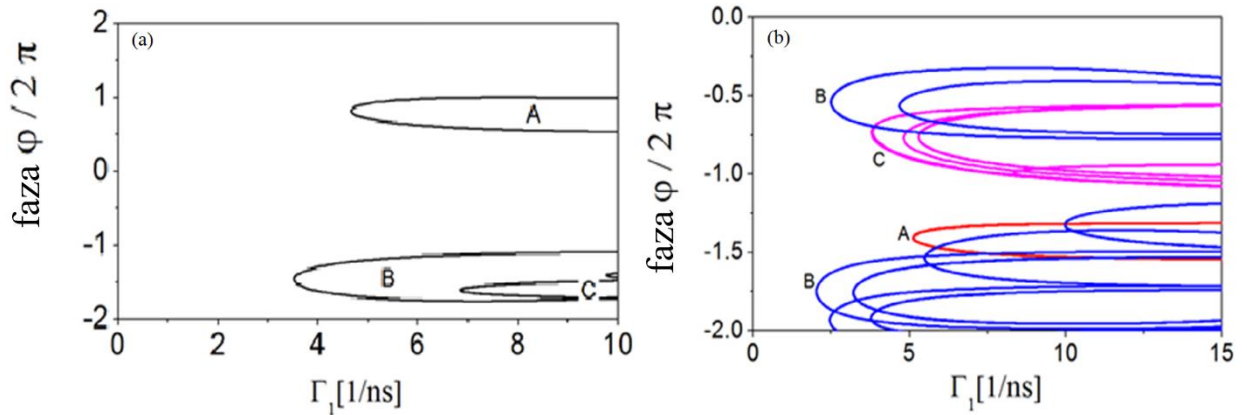


Fig. 4. Liniile ce determină bifurcațiile Hopf ale modurilor cavităților exterioare pentru $\psi = \pi/2$ la diferite locații în planul $(\varphi - \Gamma_1)$ pentru (a) $\Gamma_2 = 10$ și (b) $\Gamma_2 = 20$ [A1].

Pentru ecuațiile (1)-(3) separăm părțile reale și imaginare și obținem un sistem de cinci ecuații diferențiale cu întârziere. În cele ce urmează se analizează numeric soluțiile sistemului de ecuații pentru părțile reale și imaginare ale mărimilor din (1)–(3) pentru a descrie detaliat comportamentul dinamic. Figura 5 reprezintă evoluția în timp a puterii emergente și portretul de fază. Ele au fost obținute după integrare prin metoda Runge Kutta de ordinul 4. Prin această metodă putem obține figurile care descriu evoluția în timp a puterii emergente, portretul de fază pentru diferite valori ale fazei, bifurcațiile în funcție de faza φ , parametrul bifurcației și diferite puteri ale feedback-ului. Figura 5(a) prezintă evoluția în timp a intensității emergente pentru regiunea staționară stabilă care conține un focar stabil când faza este $\varphi = \pi/2$. Figura 5(b) prezintă evoluția în timp a intensității emergente pentru un comportament stabil și auto-pulsații. În acest caz faza traiectoriei devine un cerc stabil limitat ($\varphi = 0$). Frecvența pulsațiilor în Fig. 5(b) este aproximativ 20 GHz. Când faza este $\varphi = \pi$, oscilațiile intensității emergente devin mult mai complicate, iar comportamentul haotic devine conform portretului de fază un atractor straniu (a se vedea Figura 5c).

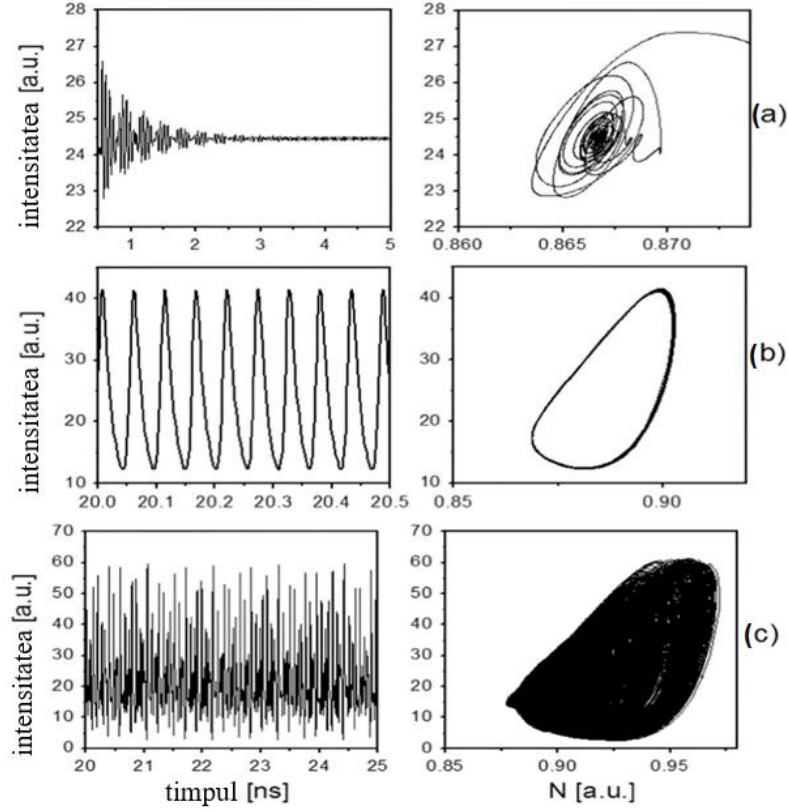


Fig. 5. Evoluția în timp a puterii emergente (stânga) și portretul de fază (dreapta) pentru diferite valori ale fazei. faza φ (a) $\varphi = \pi/2$, unde continui, (b) $\varphi = 0$, auto-pulsații, și (c) $\varphi = \pi$, comportamentul haotic. Alți parametri: $\Gamma_1 = 20$, $\Gamma_2 = 20$, $\psi = \pi/2$ [A1].

Un calcul al bifurcațiilor prezente în sistem este reflectat în Figura 6, când parametrii feedback-urilor Γ_1 (a) și Γ_2 (b) au fost aleși ca parametru de bifurcație. Această figură arată dependența de maxim și minim a numărului de fotoni. Se observă că regiunile haotice sunt largi cu amplitudini mari. În Fig. 6 (a) se observă că regimul haotic apare și pentru feedback redus Γ_1 . Acesta apare din cauza feedback-ului Γ_2 care are valori înalte a coeficientului de reflexie al fațetei posterioare.

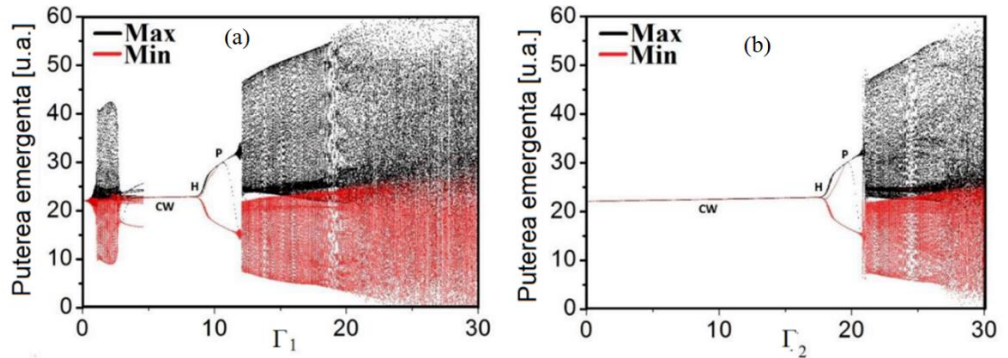


Fig. 6. Diagrama bifurcațiilor obținută numeric pentru valorile Γ_1 (stânga) și Γ_2 (dreapta). CW indică regimul de unde continue, cerculețul H indică bifurcația Hopf, iar P arată maximul soluțiilor periodice. Parametrii sunt: $B = 0.01$, $C = 40$, $J = 20$, $g = 1200$, $\gamma_{ns} = 1.0$, $\gamma_{np} = 500.0$, $\alpha = 2.0$ [A1].

În continuare este studiat procesul de sincronizare a două lasere „principal –secundar” de tipul celui redat în Fig. 1 care sunt unite în direcție longitudinală. Este bine știut că sincronizarea poate fi cuantificată prin măsurarea coeficientului de corelație încrucișată $\left[C = \langle P_m(t)P_s(t) \rangle / (\langle P_m(t) \rangle \langle P_s(t) \rangle) \right]$. Figura 7(a) arată comportamentul haotic al laserului principal. Este evident că laserul oscilează în regim haotic. Despre amplitudine putem spune că ia valori de la zero până la 70 u.a. Figura 7(b) ne arată procesul de sincronizare între ambele lasere. Se observă că amplitudinea semnalului laserului “principal” este mai mică ca cea a laserului “secundar”. Aceasta este o consecință a faptului că semnalul laserului „principal” se amplifică în laserul “secundar”. În Fig. 7(c) este reprezentată puterea emisă a sistemului „secundar” față de puterea laserului principal, așa-numita diagramă de sincronizare. Se observă că astfel de lasere precum în Fig. 1 unite în direcție longitudinală se pot sincroniza. Coeficientul de corelație încrucișată este 0.95.

Rezultatele de mai sus ne arată că două lasere cu puncte cuantice și feedback optic pot fi sincronizate în condițiile când parametrii lor sunt identici. Acest rezultat arată că aceste lasere pot fi buni candidați pentru surse de lumină la comunicarea bazată pe haos.

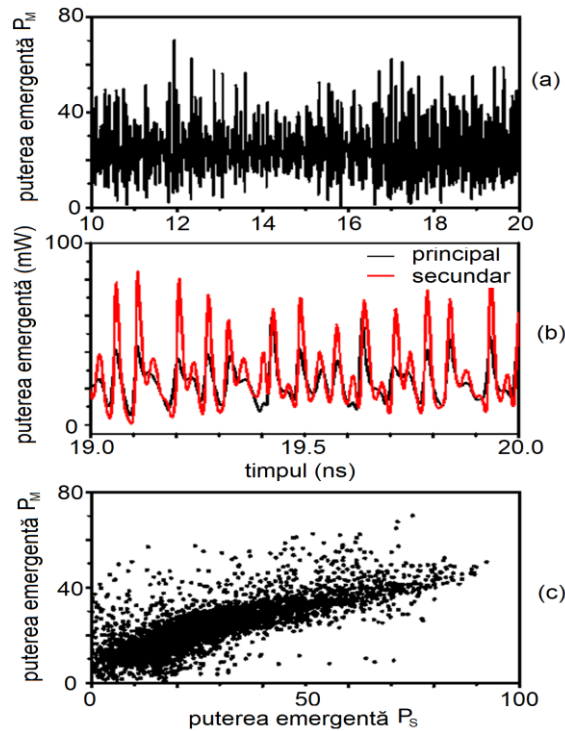


Fig. 7. Procesul de sincronizare a două lasere identice prezentate în Figura 1. (a) traseul pulsului laserului principal care prezintă un comportament haotic. (b) traseele pulsurilor laserelor principal și secundar în procesul de sincronizare. (c) Diagrama de sincronizare.

În realitate nu este ușor de crescut 2 structuri cu parametri complet identici. Astfel la finalul acestui Capitol, s-a studiat sincronizarea a două sisteme cuplate unidirecțional (principal-secundar) când avem o nepotrivire a parametrilor asupra calității sincronizării. De obicei, pentru a obține un comportament haotic al laserelor convenționale cu feedback de la o oglindă îndepărtată, este necesar un timp de întârziere dus-întors de cel puțin câteva nanosecunde. În acest caz oglinda trebuie plasată la o distanță de câteva zeci de centimetri de fața din spate a laserului. Pe de altă parte, laserele cu cavități externe multi-secțiuni pot fi candidați potriviți pentru emițători haotici integrați care au dimensiuni mici. Laserele supuse feedback-ului din cavitățile cu goluri de aer au fost luate în considerare în acest capitol. S-a arătat că sincronizarea este degradată atunci când există o nepotrivire a parametrilor materialelor și dispozitivului laserelor principal și secundar. Totuși numărul de puncte cuantice nu afectează puternic caracteristicile de sincronizare ale laserelor cu puncte cuantice. De menționat, că în grupul de cercetare UTM s-a propus pentru investigații o schiță nouă a laserului cu multe secțiuni, unele din ele fiind aer și a studiat-o teoretic. Ulterior structuri similare au fost crescute, investigate experimental și utilizate în scheme de comunicare bazate pe haos în Pavia, Italia.

Figura 8 prezintă structura laserului semiconductor cu mediu activ puncte cuantice sub influența feedbackului din cavitățile exterioare distribuite egal. Considerăm un laser DFB cu un singur mod cuplat la mai multe cavități în direcție longitudinală. Prima oglindă este situată la distanța l_1 de la fațeta laser, iar distanța dintre oglinzi este luată și l_2 .

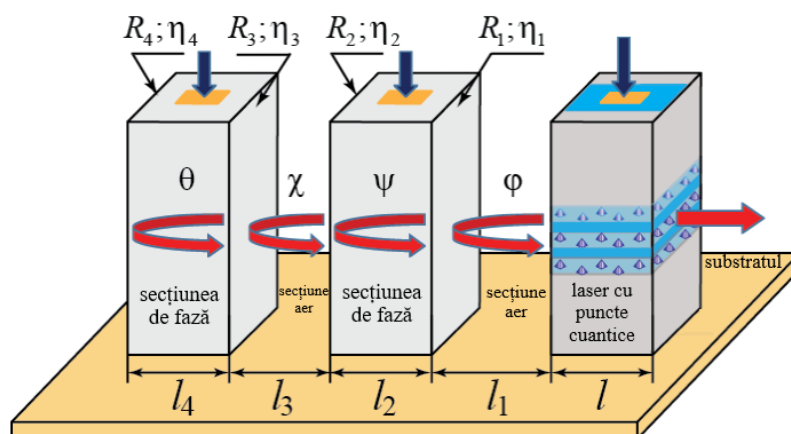


Fig. 8. Schema laserului cu mediu activ puncte cuantice sub influența unui feedback optic multiplu extern. Fazele ψ și θ sunt controlate de un curent aplicat. R_1 și R_2 sunt reflectivitatea fațetei aer-material a primei secțiuni de fază. R_3 și R_4 sunt reflectivitățile celei de a doua secțiune de fază [A4].

Partea de feedback este compusă din secțiuni aer și de fază. Secțiunile de fază sunt controlate de un curent mic care trece prin acestea. Presupunem că în secțiunile de fază curentul

injectat este suficient de mic pentru a modifica doar indicele de refracție adică faza, astfel încât lungimea optică a rezonatorului să rămână constantă sau să fie modificată în intervalul zecimi de lungimi de undă.

Ecuatiile ce descriu dinamica sistemului reprezentat în Fig. 8 au forma [13]

$$\frac{dE}{d\tau} = -kE + 2Z^{QD}\Gamma gP + \frac{Z^{QD}\Gamma\beta}{\tau_{eff}E} \left(\frac{D+1}{2} \right)^2 + \eta_1 e^{i\varphi} E(\tau - \tau_1) + \eta_2 e^{i\psi} E(\tau - \tau_2) + \eta_3 e^{i\chi} E(\tau - \tau_3) + \eta_4 e^{i\theta} E(\tau - \tau_4) + \zeta E, \quad (9)$$

$$\frac{dP}{d\tau} = -\gamma P + gDE, \quad (10)$$

$$\frac{dD}{d\tau} = -4gEP + \frac{d_0 - D}{T_1} - \frac{1}{\tau_{eff}} \left(\frac{D+1}{2} \right)^2, \quad (11)$$

unde E este amplitudinea complexă a câmpului electric, P este polarizarea și D este inversia. Aceste ecuații sunt utilizate pentru laserele principal și secundar. Aici k este rata de dezintegrare a fotonului, și β reprezintă factorii de cuplare și de emisie spontană [13], g este câștigul. Z^{QD} este numărul de puncte cuantice din regiunea activă a laserului, iar Γ reprezintă factorul de confinare care caracterizează fracțiunea punctelor cuantice din volumul modului, care contribuie la emisia laserului. T_1 și d_0 sunt inversul duratei de viață și intensitatea pompajului, iar η_i sunt intensitățile feedback-urilor variate de reflectivitate R_i , respectiv. ζ reprezintă forțele de cuplare, τ_i sunt timpi în cavitățile exterioare dus-întors. Parametrii adimensionali au valorile $k = 300$, $Z^{QD} = 1000$, $\Gamma = 0.01$, $\beta = 1.0$, $d_0 = 0.95$, $\gamma = 100$, $T_1 = 0.01$, $g = 48.86$, $\tau_{eff} = 0.001$, $\eta_1 = \eta_2 = \eta_3 = \eta_4 = 25$, $\zeta = 20$.

Figura 9 arată dependența coeficientului de corelație încrucișată în funcție de diferența de fază (faza laserului principal – faza laserului secundar) pentru cavitățile aer și cazul când celelalte faze ale secțiunilor pasive sunt fixe. Linia neagră arată degradarea sincronizării din cauza unei nepotriviri a fazei φ a laserelor principal și secundar din prima secțiune aer. Faza φ_s a laserului secundar este menținută la zero, în timp ce faza φ_m a laserului principal este variată de la 0 la π . Se poate trage următoarea concluzie. Când fazele de feedback coincid, sistemul arată o sincronizare perfectă cu un coeficient de corelație încrucișată care se apropie de unitate (a se vedea punctul A din Fig. 9). O creștere a nepotrivirii fazelor de feedback induce o degradare rapidă a sincronizării, care manifestă o reducere a coeficientului de corelație încrucișată. Această degradare rapidă este urmată de una lentă. Linia roșie arată efectul unei nepotriviri în cea de-a doua fază de feedback χ a cavității de aer. Considerăm faza χ a laserului secundar ca fiind zero și variază faza χ_m a laserului principal. Pe măsură ce nepotrivirea dintre faze crește, degradarea este în mod clar mai puțin severă decât în cazul nepotrivirii în faza de feedback φ a primului spațiu de aer. Astfel, faza cavității mai scurte este mai sensibilă la nepotrivire decât cea a cavităților lungi.

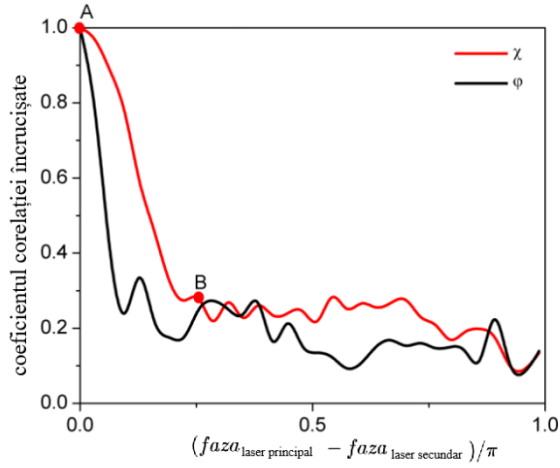


Fig. 9. Coeficient de corelație încrucișată în funcție de diferența de fază de reacție (principal de fază – secundar de fază) pentru cuplarea $\zeta = 20$. Parametri: $\varphi_s = 0$, $\psi_m = \psi_s = \pi/5$, $\chi_s = 0$, $\theta_m = \theta_s = \pi/4$ [A4].

Figura 10 prezintă evoluția în timp a puterii optice a laserelor principal (negru) și secundar (roșu) și diagramele de sincronizare pentru punctele A și B din Fig. 9, respectiv.

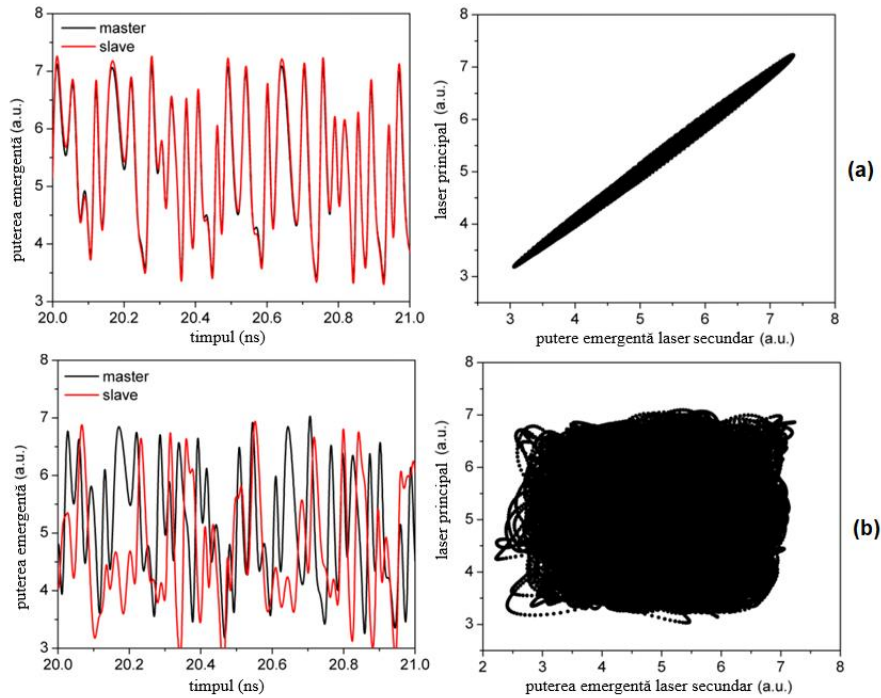


Fig. 10. Sincronizarea pentru punctul A (a) și B (b) din Fig. 9 [A4].

În cazul unei sincronizări perfecte, coeficientul de corelație încrucișată este aproape de unitatea $C = 0,995$ (a se vedea Fig. 10(a)). Diagrama de sincronizare arată un proces de sincronizare clar. Figura 10(b) prezintă aceleași dependențe pentru punctul B, când se observă degradarea sincronizării și coeficientul de corelație încrucișată este $C = 0,3$. Traiectoriile laserelor

principal și secundar se îndepărtează unul de celălalt, iar diagrama de sincronizare este un nor de puncte care arată lipsa corelației dintre semnale. Astfel am demonstrat că două lasere cu patru cavități exterioare două dintre care sunt aer, manifestă proprietăți de sincronizare în cazul mediului activ puncte cuantice. Sistemul manifestă evoluții haotice ale puterii emergente sub influența feedbackului optic provenit de la mai multe secțiuni. Feedbackul implică un comportament complex dar menține dispozitivul compact.

În **Capitolul 3**, pentru prima dată au fost prezentate rezultatele simulărilor numerice privind comportamentul haotic al laserului cu puncte cuantice supus unui feedback optic de tip T. S-a demonstrat, că în condiții specifice, datorită influenței feedback-ului extern, sistemul prezintă un comportament haotic puternic, potrivit pentru comunicațiile bazate pe haos. S-a demonstrat influența parametrilor relevanți ai dispozitivului, cum ar fi fazele și intensitatea feedback-ului asupra dinamicii laserului. S-a calculat timpul de autocorelare care delimitează regiunile haotice de cele ale undelor continue. S-a demonstrat sincronizarea a două lasere cuplate unidirecțional. În cele din urmă, s-au obținut condițiile potrivite pentru codificarea mesajelor cu o rată de biți ridicată prin tehnica de modulare a haosului folosind laserele cu puncte cuantice compacte sub influența buclelor de feedback T. După procesul de sincronizare perfectă a laserelor principal (transmițător) și secundar (receptor), mesajul se decodifică la receptor prin compararea semnalului de intrare cu cel de ieșire. Aceasta metoda a fost utilizată și în experimente. Ulterior s-au propus dispozitive fotonice noi cu secțiuni pasive și cavități de aer la scară nanometrică. Structura laserului constă din secțiunea activă cuplată la un strat de aer și la multiple secțiuni exterioare. S-a constatat, că datorită feedback-ului optic multiplu în anumite condiții de funcționare, sistemul are un comportament haotic cu amplitudini majorate. S-a demonstrat un nou scenariu de apariție a haosului sub influența feedback-ului multiplu. Spectrul de putere este larg și portretul de fază este un atractor straniu. S-a demonstrat că semnalele transmise și decodificate sunt aceleași și este posibilă codificarea și decodificarea mesajelor la diverse viteze de transmitere a informației. Aceste lasere dispun de o performanță îmbunătățită față de cele anterioare mai ales în aplicațiile, unde rata de codificare trebuie să fie mare. Figura 11 reprezintă structura dispozitivului, care este formată dintr-un laser cu puncte cuantice sub influența unui feedback optic provenit de la cavitățile exterioare sub formă de T. Intensitatea feedbackului optic de la cele două cavități exterioare Γ_1 și Γ_2 sunt determinate de reflexiile R_1 și R_2 cu fazele φ și ψ . τ_1 și τ_2 fiind timpii de întârziere, respectivi. Un avantaj al sistemului propus în comparație cu cel cu feedback optic convențional este faptul că comportamentul haotic are loc pentru lungimi mici ale cavităților, care fac ca dispozitivul să fie mult mai compact.

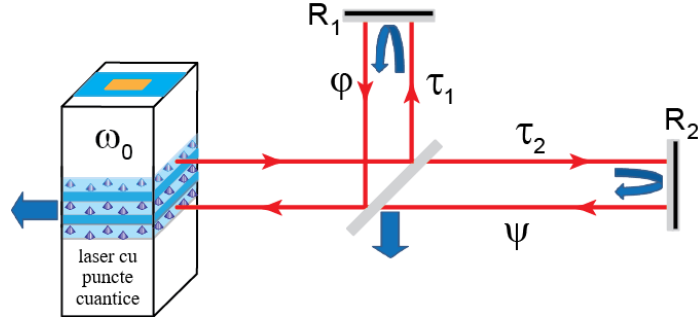


Fig. 11. Schema laserului semiconductor sub influența unui feedback optic dublu provenit de la cavitățile exterioare de tip T [A2].

În acest context a fost studiată dinamica laserelor cu puncte cuantice, în special proprietățile haotice, posibilitatea sincronizării a două astfel de lasere, precum și tehnica de modulare haotică aplicată utilizând dispozitivul din Figura 11 și ecuațiile ratei conform modelului (1) – (3) cu ecuația pentru amplitudinea câmpului electric sub forma

$$\frac{dE}{d\tau} = \frac{1}{2}(1+i\alpha)[- \gamma_{np} + g(2\rho-1)]E + \Gamma_1 e^{-i\varphi} E(\tau - \tau_1) + \Gamma_2 e^{-i\psi} E(\tau - \tau_2). \quad (12)$$

Considerăm aproximarea unei singure bucle și neglijăm reflexiile multiple din interiorul cavităților. Alți parametri sunt: factorul Henry $\alpha = 2$, și $\tau_1 = 0,3$, $\tau_2 = 0,5$ sunt timpii de parcurgere dus-întors ale cavităților exterioare. $g = 1200$ este câștigul diferențial, iar $J = 20$ este parametrul de pompare.

Figura 12(a) prezintă evoluția în timp a puterii emergente pentru $\Gamma_1 = 15$, $\Gamma_2 = 16,2$. Portretul de fază reprezintă un ciclu limită stabil. Acest ciclu limita este stabil în tot intervalul de integrare de 100 ns. Figura 12(b) prezintă dublarea de perioadă pentru $\Gamma_1 = 15$, $\Gamma_2 = 20$. Portretul de fază este un ciclu limită deformat, iar în spectrul de putere sunt prezente noi oscilații. Se observă ca doar o mică creștere a intensității feedback-ului Γ_2 duce la bifurcație nouă dublarea de perioadă. Odată cu creșterea intensității feedback-urilor Γ_1 și Γ_2 se observă o evoluție haotică în timp a puterii emergente. Figura 12(c) ilustrează un atractor straniu pentru următoarele valori ale intensităților feedback-ului $\Gamma_1 = 20$ și $\Gamma_2 = 30$. Astfel evoluția în timp a puterii emergente reprezintă oscilații haotice. Dacă analizăm spectrul de putere se observă că el este larg și nu are nici o armonică dominantă. O caracteristică importantă a semnalului optic de ieșire este timpul de autocorelare. Dinamica laserului cu puncte cuantice are un comportament haotic mai pronunțat când timpul de autocorelare este mai mic.

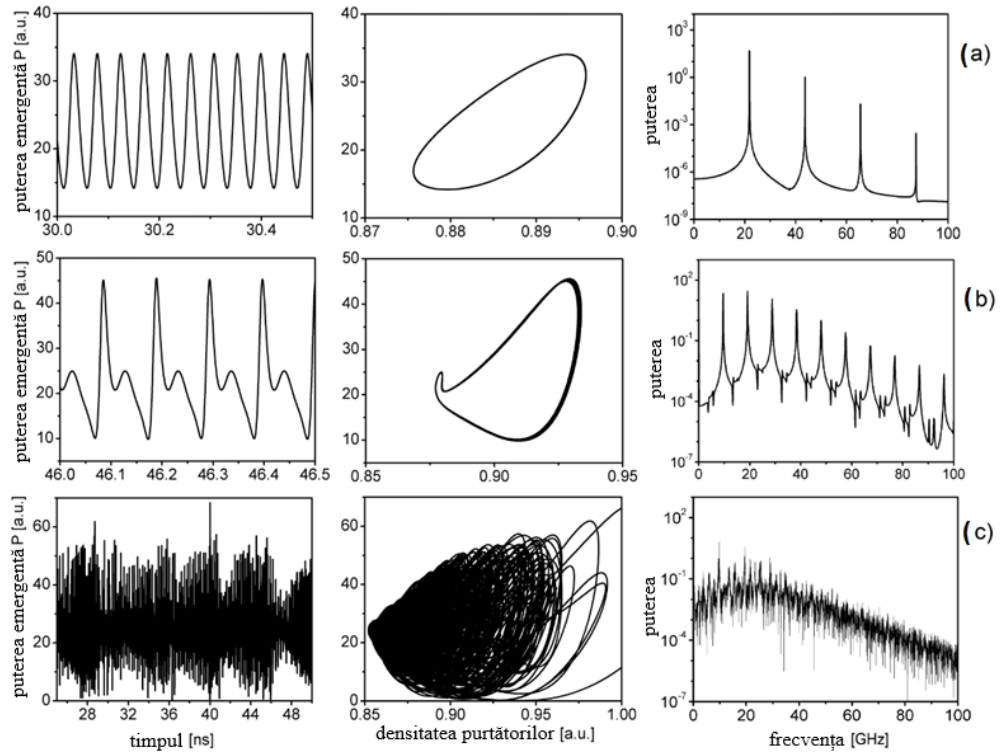


Figura 12. Evoluția în timp a puterii emergente (stânga), portretul de fază (centru) și spectrul de putere (dreapta) a laserului semiconductor sub influența unui feedback optic provenit de la cavitățile exterioare de tip T : (a) $\Gamma_1 = 15$, $\Gamma_2 = 16,2$ (comportament periodic); (b) $\Gamma_1 = 15$, $\Gamma_2 = 20$ (perioadă dublă); (c) $\Gamma_1 = 20$, $\Gamma_2 = 30$ (comportament haotic). Fazele sunt $\phi = \pi/2$, $\psi = 3\pi/2$ [A2].

Pentru a stabili aceste regiuni, calculăm timpul de autocorelare în laserul semiconductor cu puncte cuantice sub influența unui feedback optic provenit de la cavitățile de tip T. Rezultatele acestor calcule sunt prezentate în Fig. 13 în planul fazelor ($\psi - \phi$).

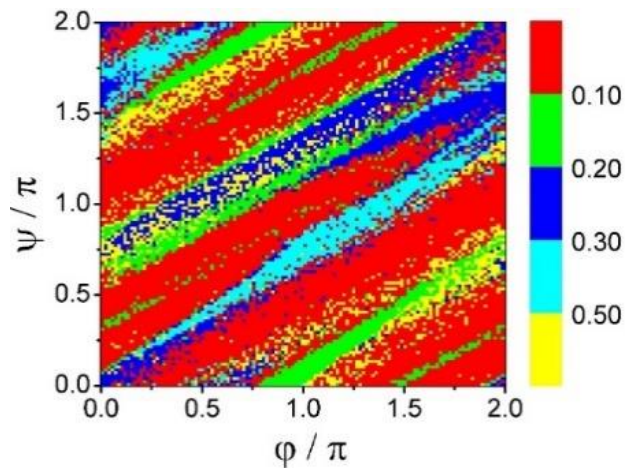


Fig. 13. Timpul de autocorelare în planul ($\psi - \phi$) atunci când intensitățile feedback-ului sunt $\Gamma_1 = 20$ și $\Gamma_2 = 25$. Pasul de variere a fazei este 0.05 radiani [A2].

Aici regiunile roșii corespund regiunilor puternic haotice ale laserului semiconductor cu timpul de autocorelare mai mic de 0.1 ns.

În cele ce urmează, s-a considerat cazul a două lasere identice, conectate conform configurației transmițător – receptor, precum este reprezentat în Fig. 14. Studiem sincronizarea celor două dispozitive și posibilitatea utilizării acestora la codificarea și decodificarea mesajelor în comunicarea optică bazată pe haos. Pentru aceasta, utilizăm tehnica modulării semnalului [14], [15], în care codificarea mesajului constă în modularea unei mici amplitudini adăugată în câmpul emis al laserului principal. După procesul de sincronizare perfectă a laserelor principal (transmițător) și secundar (receptor), mesajul se decodifică la receptor prin compararea semnalului de intrare cu cel de ieșire. Aceasta metodă a fost utilizată și în experimente și după cum s-a spus mai sus verificată în [17].

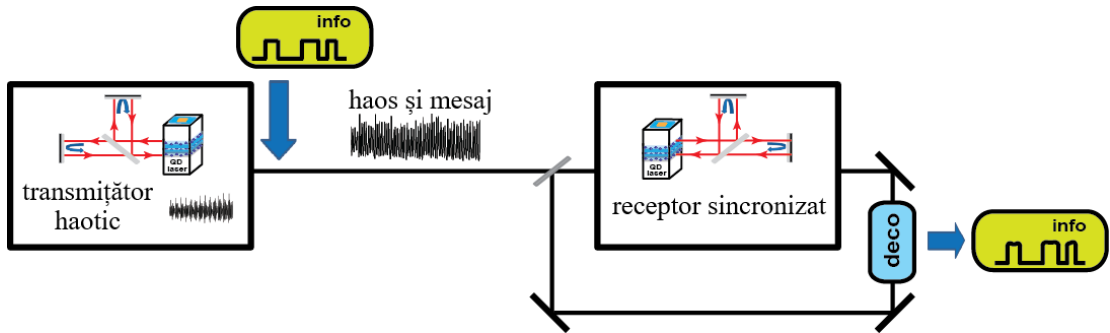


Fig. 14. Reprezentarea schematică a tehnicii de modulare [A2].

Considerând că ambele lasere semiconductoare sunt conectate unidirecțional, în continuare prezentăm analiza numerică a proprietăților de sincronizare ale acestui sistem. La început vom considera că parametrii ambelor lasere sunt aproape identici. Semnalele laserelor principal și secundar vor fi sincronizate perfect când coeficientul de corelare este aproape de unitate (Fig.15).

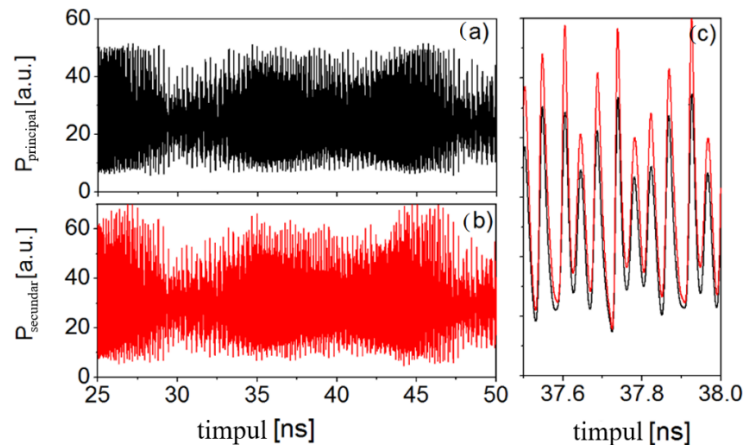


Fig. 15. Fenomenul de sincronizare a două lasere semiconductoare unite unidirecțional pentru parametrul de cuplare $k = 50$. Evoluția în timp a puterii emergente a laserelor (a) principal (b) secundar. (c) ambele semnale ale laserelor principal și secundar. Alți parametri: $\Gamma_1 = 20$ și $\Gamma_2 = 25$, $\phi = \pi/2$, $\psi = 3\pi/2$ [A2].

Acest parametru poate fi controlat în experiment prin filtrarea semnalului care ajunge din laserul principal la cel secundar. Totodată s-a analizat transmiterea și recepționarea mesajului digital de către sistemul format din două lasere identice conectate unidirecțional precum a fost prezentat în Fig. 16. S-a reușit criptarea și decriptarea mesajului digital de 10 Gb/s în tehnica de modulare haotică. Astfel, în Capitolul 3 s-a studiat dinamica complexă a laserului semiconductor cu mediu activ puncte cuantice sub influența unui feedback optic provenit de la două cavități. Această configurație a sistemului are dimensiuni mult mai mici (2-5 cm) în comparație cu sistemele existente la acel moment și este o structură compatibilă cu sistemele optice de comunicare existente.

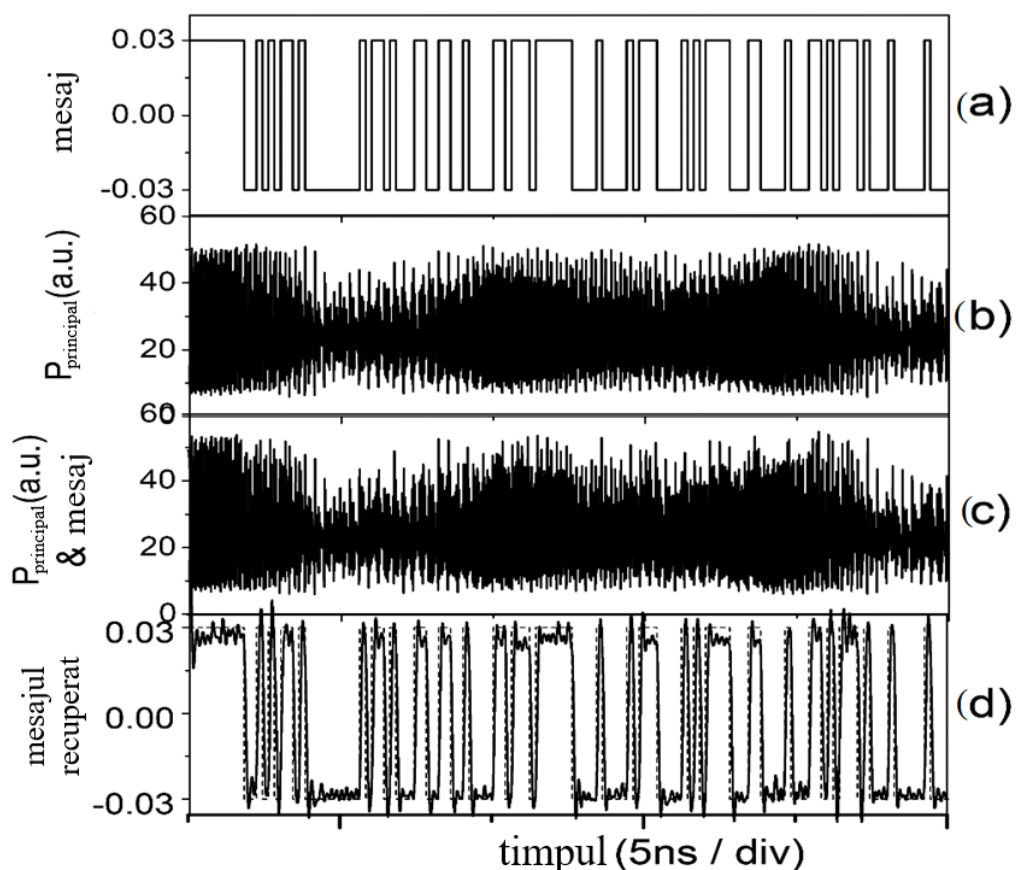


Fig. 16. Rezultatele calculelor numerice a codificării și decodificării unui mesaj digital de 15 Gbit/s. a) Mesajul digital codificat; b) Semnalul de ieșire a laserului principal fără mesaj; c) Semnalul transmis (cu mesaj); d) Mesajul decodificat și reconstituirea mesajului după filtrare (linia continuă) și mesajul transmis (întreruptă). Alți parametri: $\Gamma_1 = 20$, $\Gamma_2 = 25$, $\phi = \pi/2$, $\psi = 3\pi/2$, și $k = 50$ [A2].

În **Capitolul 4** s-a elaborat o metodă teoretică nouă de tratare a influenței feedback-ului filtrat asupra dinamicii laserului cu un singur mod și cu puncte cuantice (Fig. 17).

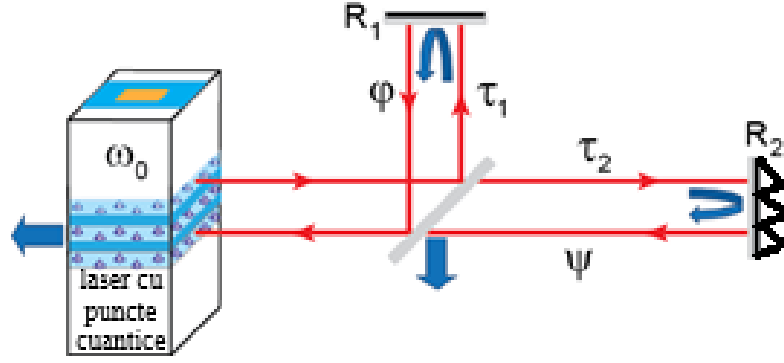


Fig. 17. Laser cu puncte cuantice cu feedback convențional și cu filtru [A2].

Stările staționare sunt exprimate prin MCE. A fost prezentat sistemul de ecuații și a fost descrisă fiecare etapă de obținere a mărimilor ce pot fi aplicate pentru investigarea dinamicii complexe a laserului. Astfel, laserele semiconductoare cu mediu activ puncte cuantice care funcționează sub influența feedback-ului optic dublu unul convențional și altul filtrat sunt elemente de bază potrivite în comunicarea optică. Faza feedbackului optic are un rol deosebit în controlul emisiei laser. În acest capitol am demonstrat teoretic că prin metoda de calcul numerică se poate obține stabilitatea modurilor cavității exterioare, a bifurcației Hopf, a undelor continue, periodice și haotice. Aceasta permite îmbunătățirea structurii laserului și a dinamicii complexe. Teoria elaborată oferă noi perspective de cercetare la nivel experimental.

Ecuatia ratei pentru amplitudinea complexă a câmpului $E(t)$ și $F(t)$ și a densității purtătorilor de sarcină $N(t)$ este

$$\frac{dE}{d\tau} = \frac{1}{2}(1+i\alpha)[- \gamma_{np} + g(2\rho-1)]E + \gamma_1 e^{i\phi} E(\tau-\tau_1) + \gamma_2 F, \quad (13)$$

$$\frac{dF}{d\tau} = \Lambda E(\tau-\tau_2) e^{i\psi} + (i\Delta\omega - \Lambda)F(\tau), \quad (14)$$

$$\frac{d\rho}{d\tau} = -\gamma_{ns}\rho - (2\rho-1)|E|^2 + (CN^2 + BN)(1-\rho), \quad (15)$$

$$\frac{dN}{d\tau} = J - N - 2[(CN^2 + BN)(1-\rho)], \quad (16)$$

unde ρ este probabilitatea ocupării în punctele cuantice, J este curentul adimensional de pompaj, τ_1 și τ_2 sunt timpul dus-întors prin cavitățile externe, γ_1 și γ_2 puterea feedbackului controlat de reflexia în rezonatoare. Frecvența optică centrală a filtrului ω și Λ sunt mărimi ce descriu filtrarea maximă.

Stările staționare ale ecuațiilor (13)-(16) pentru E , F , ρ și N sunt exprimate prin soluțiile modurilor cavităților exterioare de tipul următor

$$E = E_s e^{i\omega_s \tau}; F = F_s e^{i\omega_s \tau + i\Phi_s}; \rho = \rho_s; N = N_s, \quad (17)$$

unde E_s , F_s , ω_s , Φ_s , N_s sunt constante reale independente de timp care pot lua numai valori pozitive. Frecvența pentru cazul staționar este obținută cu ajutorul (17)

$$\omega_s = -\gamma_1 [\sin(\omega_s \tau_1 - \varphi) + \alpha \cos(\omega_s \tau_1 - \varphi)] + \gamma_2 \left[\left(\frac{F_1}{E_1} \sin \Phi_s - \alpha \cos \Phi_s \right) + \left(\frac{F_2}{E_1} (\cos \Phi_s + \alpha \sin \Phi_s) \right) \right]. \quad (18)$$

Amplitudinea complexă a câmpului este obținută din (13) și (14)

$$E_s = \sqrt{\frac{J - N_s - 2\gamma_{ns}\rho_s}{2(2\rho_s - 1)}}. \quad (19)$$

Astfel pentru N_s se obține

$$N_s = \frac{-[2B(1-\rho_s)+1] + \sqrt{[2B(1-\rho_s)+1]^2 + 8C(1-\rho_s)J}}{4C(1-\rho_s)}. \quad (20)$$

Ținând cont de (19) s-a obținut probabilitatea ocupării ρ_s pentru cazul staționar

$$\rho_s = \frac{1}{2g} \left\{ \gamma_{np} + g - 2\gamma_1 \cos(\omega_s \tau_1 - \varphi) - \frac{2\gamma_2}{\Omega^2 + 1} [\cos(\omega_s \tau_1 - \varphi) - \Omega \sin(\omega_s \tau_1 - \varphi)] \right\}. \quad (21)$$

În Fig. 18 este prezentată localizarea modurilor pentru valori diferite a puterii feedback-ului în prezența filtrului.

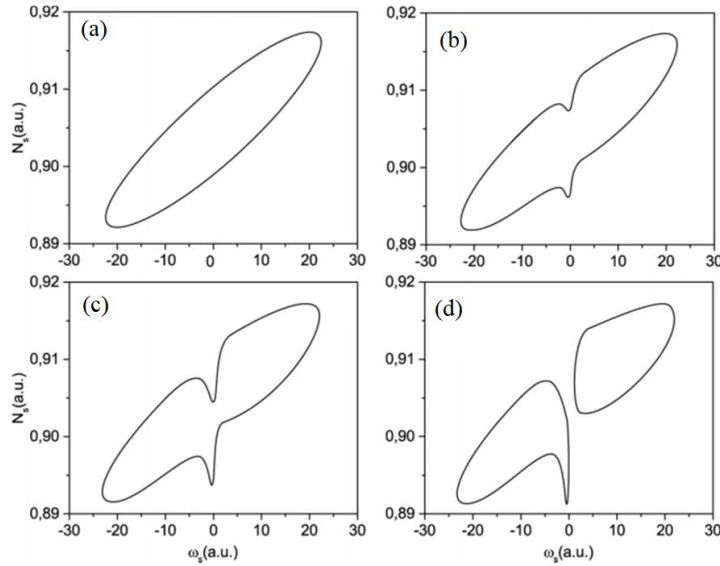


Fig. 18. Localizarea modurilor cavităților exterioare pentru valori invariabile ale intensității feedback-ului optic convențional ($\gamma_1=0$) și diferite valori ale intensității feedbackului în prezența filtrului: (a) $\gamma_2 = 0$, (b) $\gamma_2 = 5$, (c) $\gamma_2 = 10$, (d) $\gamma_2 = 15$ [A3].

Valoarea pentru $\Delta\omega$ este egală cu zero. În Fig. 18(a) modurile cavităților exterioare sunt localizate pe o elipsă. În acest caz $\gamma_2=0$. În Fig. 18(b) γ_2 variază până la 5 iar elipsa se deformează.

O altă deformare a elipsei este observată pentru $\gamma_2=10$. Pentru valori mai mari ale γ_2 , elipsele se vor transforma în două cercuri precum este indicat în Fig. 18(d). În urma obținerii acestor rezultate s-a observat că prin intermediul ramurii secundare este posibil de controlat stările staționare a modurilor cavităților exterioare. Evoluția în timp a unui laser semiconductor cu feedback dublu, unul fiind cu filtru, poate fi cercetată prin utilizarea sistemului de ecuații (13)-(16). S-a utilizat metoda Runge-Kutta pentru a integra numeric acest sistem de ecuații. Prin integrare se obțin rezultate pentru care puterea feedbackului se consideră egală în ambele ramuri ale laserului semiconductor. În Fig. 19 este reprezentată evoluția în timp a puterii de ieșire (partea stângă). În mijloc este reprezentat portretul de fază care descrie dependența densității de sarcină în funcție de puterea optică N . În partea dreaptă observăm spectrul de putere.

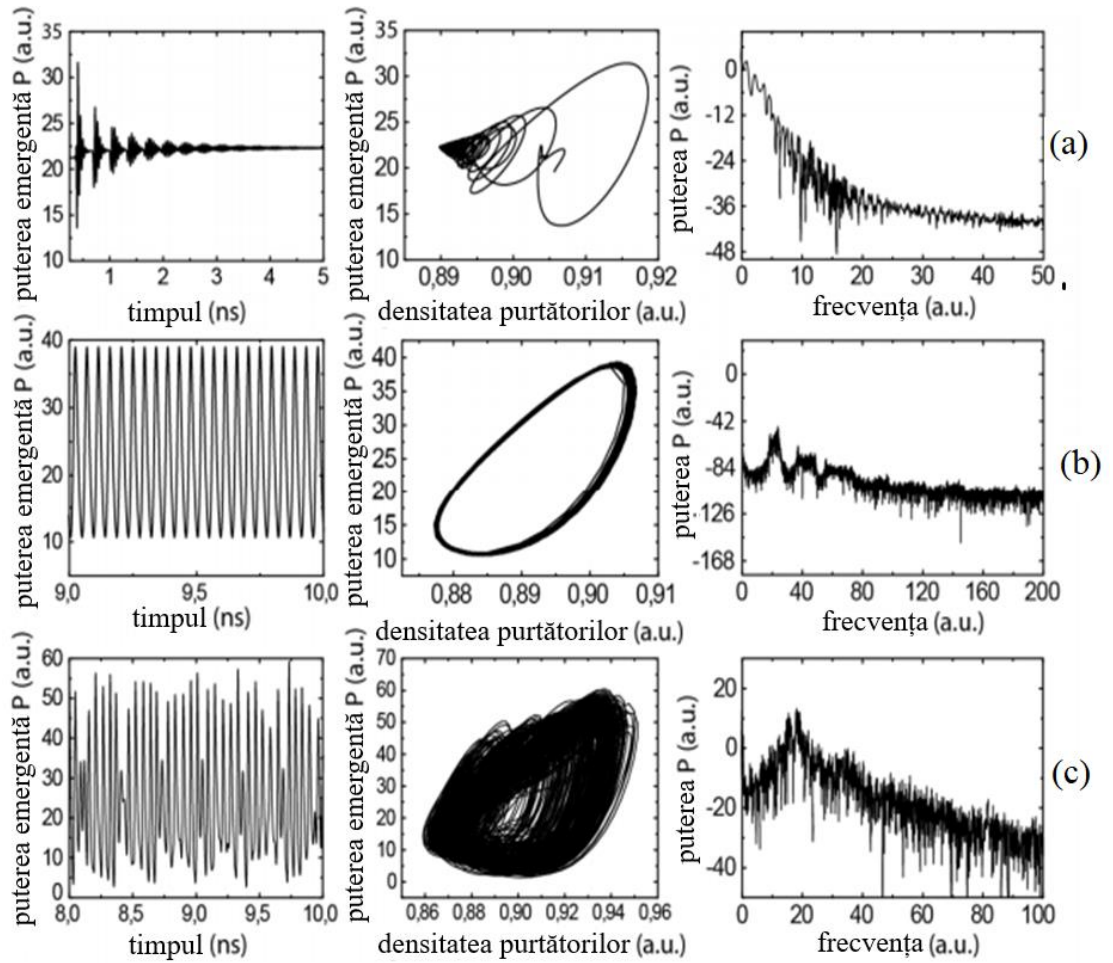


Fig. 19. Reprezentarea grafică a puterii de ieșire în funcție de timp (partea stângă), portretul de fază (centrul) și spectrul puterii (partea dreaptă): (a) $\gamma_1 = \gamma_2 = 15$, (b) $\gamma_1 = \gamma_2 = 20$, (c) $\gamma_1 = \gamma_2 = 40$ [A3].

Când intensitatea feedbackului este egală cu 15 este posibil de văzut oscilații libere timp de câteva nanosecunde a căror portret de fază reprezintă unde care oscilează constant prin

stabilizare. O mărire de la 15 până la 20 a intensității feedbackului pulsațiile se obțin periodice, iar portretul de fază devine un cerc în limita unor valori ale puterii feedback-ului. Valorile intensității feedback-ului fiind egale cu 40 permit obținerea unui comportament haotic al pulsațiilor precum se observă în partea stângă a Fig. 19c). Tot în această figură partea de mijloc se observă o deformare a undelor neperiodice și oscilații multiple de forma unui cerc. Comportamentul haotic este bine analizat prin observarea spectrului puterii reprezentat în partea dreaptă a Fig. 19(c).

CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI

Importanța acestei teze constă în prezentarea rezultatelor teoretice ale dinamicii neliniare a laserelor semiconductoare cu mediu activ gropi și puncte cuantice asupra cărora influențează un feedback optic provenit de la mai multe cavități exterioare. Concluziile generale sunt următoarele:

1. A fost analizat modelul teoretic al structurilor avansate de dimensiuni mici de lasere semiconductoare cu mediu activ gropi cuantice. S-a demonstrat prezența haosului într-un astfel de laser cu feedback multiplu. Acest regim haotic a fost utilizat într-un sistem de comunicare optică bazată pe haos. S-a demonstrat că, în anumite condiții, două astfel de sisteme laser ar putea fi sincronizate atunci când funcționează în configurație emițător-receptor. S-a obținut sincronizarea perfectă, s-a demonstrat posibilitatea criptării și decriptării mesajului prin metoda modulării haotice. S-a arătat că mesajul poate fi restabilit în mod adecvat de către receptor chiar și la viteză mare (peste 10 Gb/s) de transmitere a semnalului. (Cap. 2, § 2.2). [A1],[A4]
2. A fost analizată dinamica neliniară a laserului semiconductor cu puncte cuantice sub influența unui feedback optic provenit de la mai multe cavități. S-a demonstrat că, stările staționare nu mai sunt localizate pe o elipsa dar au forma complexă. Studiul stabilității stărilor staționare ne indică că ele devin instabile datorită bifurcației Hopf. S-a obținut scenariul dublării de perioadă la tranziția către oscilații haotice. Portretele de fază reprezintă cicluri limită pentru evoluția periodică și atractori strani pentru evoluția haotică. S-a demonstrat că sincronizarea a două lasere este degradată atunci când există o nepotrivire a parametrilor de material și celor ce descriu geometria dispozitivului principal și secundar. S-a observat că o nepotrivire a fazelor feedback-ului duce la pierderea sincronizării. În plus, s-a demonstrat că nepotrivirea coeficienților de amplificare ale laserelor conduce la o degradare aprofundată a sincronizării. Pe când numărul de puncte cuantice nu afectează puternic caracteristicile de sincronizare ale laserelor cu puncte cuantice. Rezultate obținute cu ajutorul programului DDE-biftool sunt în concordanță cu cele ale integrării numerice directe. (Cap. 2, § 2.3) [A2]

3. S-a investigat teoretic dinamica complexă a laserului semiconductor sub influența unui feedback optic de tip T provenit de la două cavități. S-a arătat că această configurație a sistemului are dimensiuni mult mai mici în comparație cu sistemele existente de producere a haosului pentru sistemele de comunicare bazată pe haos. S-au obținut timpi de autocorelare mai mici ca 0.1 ns pentru care sistemul are un comportament haotic. De asemenea s-a calculat coeficientul de corelație încrucișată în planul fazelor feedback-ului care este mai mare ca 0.95, fapt care demonstrează că două lasere pot fi sincronizate prin cuplarea unidirecțională atunci când valorile parametrilor laser principal și secundar coincid. Într-un experiment numeric semnalele digitale ale transmițătorului au fost cu succes decodificate la emițător, chiar și la viteze mari (> 15 Gb/s) de transmitere a mesajelor. (Cap. 3, § 3.2, § 3.3) [A3]
4. Au fost propuse teoretic spre realizare experimentală două dispozitive fotonice avansate în care feedback-ul optic provine de la mai multe cavități exterioare crescute în direcție orizontală. Aceste structuri pot fi utilizate în diferite experimente datorită faptului că ele au fost îmbunătățite, au o stabilitate mai bună, și la elaborarea lor este necesar mai puțin timp și materie primă. Calculele numerice au arătat că dispozitivele propuse au un regim haotic într-un domeniu larg al parametrilor care le descriu și este ușor de realizat sincronizarea lor. Îndeplinirea ultimei condiții este necesară în sistemele de comunicare cu haos. (Cap.3, § 3.4). [A3]
5. A fost investigată dinamica nelineară a unei structuri laser cu puncte cuantice sub influența feedbackul-ui optic dublu, unul convențional și celălalt cu filtru. S-au determinat valorile parametrilor ce caracterizează cea de a doua ramură a feedback-ului cu scopul de a controla emisia laserului. S-a demonstrat că astfel de laser ar putea funcționa în două moduri: fie cu emisie sub formă de unde continue, fie ca generator de haos optic. Au fost obținute ecuațiile analitice pentru stările staționare care au o distribuție complexă în planul a doi parametri. Într-un calcul numeric s-a obținut un regim haotic de evoluție a sistemului. (Cap. 4. § 4.2, § 4.3) [A4]

Recomandări:

1. Se recomandă de implementat rezultatele teoretice obținute în practică.
2. Se recomandă dezvoltarea softurilor și metodelor de calcul pentru a obține rezultate reprezentative în domeniul laserelor semiconductoare.

BIBLIOGRAFIA

- [1] BIMBERG, D.; GRUNDMANN, M.; HEINRICHS DORFF, F.; LEDENTSOV, N. N.; USTINOV, V. M.; ZHUKOV A. E.; KOVSH, A. R.; MAXIMOV M.V.; SHERNYAKOV, Y. M.; VOLOVIK, B.V.; TSATSULNIKOV, A.F.; KOPEV P.S.; ALFEROV, Z. Quantum dot lasers: breakthrough in optoelectronics. In: *Thin Solid Films*. 2000, Vol. 367, p. 235-249. DOI: 10.1016/S0040-6090(00)00697-0
- [2] MURRAY, C. B.; KAGAN, C. R.; BAWENDI, M. G. Synthesis and Characterization of Monodisperse Nanocrystals and Close-Packed Nanocrystal Assemblies. In: *Annual Review of Materials Research*., 2000, Vol. 30, nr.1, p. 545–610. DOI: 10.1146/annurev.matsci.30.1.545
- [3] BRUS, L. E. Chemistry and Physics of Semiconductor Nanocrystals, (PDF), Retrieved 7 July 2009. In: http://www.columbia.edu/cu/chemistry/fac-bios/brus/group/pdf/files/semi_nano_website_2007.pdf. DOI: 10.4236/jamp.2021.911187
- [4] ASHOORI, R. C. Electrons in artificial atoms. In: *Nature*, 1996, Vol. 379, nr. 6564, p. 413–419. DOI: 10.1038/379413a0.
- [5] KASTNER, M. A. Artificial Atoms. In: *Physics Today*, 1993, Vol. 46, nr. 1, p. 24–31. DOI: 10.1063/1.881393
- [6] JIABIN, C.; YOSSEF, P. E.; SOMNATH, K.; DOAA, S.; NIR, W.; REMENNIK, S.; POPOV, I.; MEIRAV, O.; URI, BANIN. Colloidal quantum dot molecules manifesting quantum coupling at room temperature. In: *Nature Communications*, 2019, vol. 10, nr. 1, p. 5401. DOI: 10.1038/s41467-019-13349-1.
- [7] HUFFAKER, D. L.; PARK, G.; ZOU, Z.; SHCHEKIN, O. B.; DEPPE, D. G. 1.3 μm room-temperature GaAs-based quantum-dot laser. In: *Applied Physics Letters*, 1998, vol. 73, nr. 18, p. 2564–2566. DOI: 10.1063/1.122534
- [8] LODAHL, P.; MAHMOODIAN, S.; STOBBE, S. Interfacing single photons and single quantum dots with photonic nanostructures. In: *Reviews of Modern Physics*, 2015, vol. 87, nr. 2, p. 347–400. DOI: 10.1103/RevModPhys.87.347
- [9] EISAMAN, M. D.; FAN, J.; MIGDALL, A.; POLYAKOV, S. V.; Invited Review Article: Single-photon sources and detectors, *Review of Scientific Instruments*, 2011, vol. 82, nr. 7, 071101–071101–25. DOI: 10.1063/1.3610677
- [10] AMÍREZ, H. Y.; FLÓREZ J.; CAMACHO A. S., Efficient control of coulomb enhanced second harmonic generation from excitonic transitions in quantum dot ensembles. In: *Chem. Phys.*, 2015 vol. 17, nr. 37, p. 23938–46. DOI: 10.1039/c5cp03349

- [11] 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 cap. In: *IEEE J. Quantum Electron.*, 2010, vol. 46, p. 1840-1846. DOI:10.1109/JQE.2010.2049642
- [12] LANG, R.; KOBAYASHI, K.; ????. In: *IEEE J Quantum Electron*, 1980, vol. 16, p. 347-355. DOI:10.1109/JQE.1980.1070479 DOI:10.1109/jqe.2009.2028159
- [13] LÜDGE, K., SCHÖLL, E., Quantum-dot lasers-desynchronized nonlinear dynamics of electrons and holes. In: *IEEE J. Quantum Electron* 45(11), 2009, pp.1396–1403. DOI:10.1109/jqe.2009.2028159
- [14] MIRASSO, C.; COLET, P.; GARCIA-FERNANDEZ, P. Synchronization of chaotic semiconductor lasers: Application to encoded communications. In: *IEEE, Photon. Technol. Lett.*, vol. 8, pp. 299–301, 1996. DOI: 10.1109/68.484273
- [15] ARGYRIS, A.; SYVRIDIS, D.; LARGER, L.; ANNOVAZZI-LODI, V.; COLET, P.; Ingo FISCHER, I.; GARCIA-OJALVO, J.; MIRASSO, C. R.; PESQUERA, L.; SHORE, K.A. Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links. In: *Nature*, 2005, vol. 438, p. 343 – 346.

Anexa 1 Lista publicațiilor la tema tezei

Articole în reviste internaționale cotate ISI și SCOPUS:

- [A1] RUSU, S.S.; OLOINIC, T.; TRONCIU, V. Z. Quantum dots lasers dynamics under the influence of double cavity external feedback , *Optics communications*, v. 381, p. 140 – 145, 2016. IF=2.12 <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2016.06.082>
- [A2] OLOINIC, T.; RUSU, S. S.; TRONCIU, V. Z. Numerical simulations of quantum dots lasers under the influence of T-type external optical feedback. Applications to chaos based communication. *Romanian Reports in Physics*, vol. 70. 411 p. 1-10(2018). IF=1.5 <https://rrp.nipne.ro/2018/AN70411.pdf>

În reviste din Registrul Național al revistelor de profil, cu indicarea categoriei:

- [A3] RUSU, Spiridon; OLOINIC, Tatiana; CHISTOL, Vitalie; TRONCIU Vasile. Characteristics of quantum dots laser subjected to conventional and filtered optical feedback, *Journal of Engineering Science*, Vol. XXVII, no. 2 (2020), pp. 44 – 51 DOI: 10.5281/zenodo.3784341 Categoria B+

- [A4] OLOINIC, Tatiana; RUSU, Spiridon; TRONCIU, Vasile Synchronization of chaotic quantum dot lasers with external feedback under parameter mismatch, Moldavian Journal of the Physical Sciences, Vol. 17, 3-4, p. 142-147 2018 Categoria C.
- [A5] OLOINIC, T.; RUSU, S.S; TRONCIU, V. Z. Communication with chaos using semiconductor lasers with an air gap, Moldavian Journal of the Physical Sciences, v.14, N. 1 – 2, p.113, 2016, categoria C. <https://mjps.utm.md/archive/2015/article/43395>

Articole in lucrările conferințelor și altor manifestații științifice:

- [A6] OLOINIC, Tatiana; RUSU, Spiridon; PÎRȚAC, Constantin; TRONCIU, Vasile Influence of parameter mismatch on synchronization of quantum dots lasers Telecommunications, Electronics and Informatics Conferința "Telecommunications, Electronics and Informatics" Ed. 6, 2018 Chișinău, Moldova, 24-27 mai 2018 p. 225-226 https://ibn.idsi.md/sites/default/files/imag_file/225-226_0.pdf
- [A7] OLOINIC, T.; RUSU, S.; GRIGORIEV, E.; TRONCIU, V. Comunicarea optică bazată pe haos cu ajutorul laserelor cu puncte cuantice și feedback optic, 2016 Fizica și tehnologiile moderne, 25-27 august 2016, Chișinău. Chișinău, Republica Moldova: Universitatea Tehnică a Moldovei, 2016, Ediția a 22-a, pp. 78-83. Disponibil: https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/156675
- [A8] OLOINIC, T.; RUSU, S.S; TRONCIU, V.Z. Comunicarea optică bazată pe haos cu ajutorul laserelor cu puncte cuantice, Tendințe contemporane ale dezvoltării științei: viziuni ale tinerilor cercetători ediția a V-a, UnASM, Chișinău, 2016, p.48-52. https://ibn.idsi.md/sites/default/files/imag_file/48-52_6.pdf
- [A9] OLOINIC, T. Dinamica neliniară a laserelor cu puncte cuantice sub influența feedback-ului multiplu. Aplicații, Tendințe contemporane ale dezvoltării științei: viziuni ale tinerilor cercetători, ediția a VI-a, Chișinău, 2017, p.84-88. [https://ibn.idsi.md/sites/default/files/imag_file/Tendinte%20contemporane_Vol I%2C%202017.pdf](https://ibn.idsi.md/sites/default/files/imag_file/Tendinte%20contemporane_Vol_I%2C%202017.pdf)

Teze la foruri științifice conferințe internaționale si nationale:

- [A10] OLOINIC, Tatiana The dynamic behavior of quantum dots laser under the influence of external optical feedback from five external cavities, NANO 2019 Conferința "SPINTECH Summerschool "S/F HybridStructures for Spintronics"" 2019, Chișinău, Moldova, 24-27 septembrie 2019 p.96 https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/93034
- [A11] OLOINIC, T.; RUSU, S.; TRONCIU V. Complex dynamics of quantum dots lasers under the influence of external multiple optical feedback. Conferința "International Conference on

Materials Science and Condensed Matter Physics" Ediția 9, Chișinău, Moldova, 25-28 septembrie 2018 p.87 https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/70650

- [A12] OLOINIC, T.; RUSU, S.; TRONCIU, V. Dynamics of quantum dots semiconductor lasers under the influence of doublecavity feedback. Abstr.59thScientific Conference for Students of physics and Natural Sciences, Open Readings Vilnius, Lituania, p. 196, 2016.
- [A13] OLOINIC, T., RUSU, S. S; TRONCIU, V.Z. Chaos-based optical communication of semiconductor lasers with air gaps, International Conference Scienceand Society: the use of light. Humboldt Kolleg, Chisinau, 2015, p.31. <https://www.repository.utm.md/handle/5014/20295?show=full>
- [A14] SANDUȚA, A.; OLOINIC, T.; RUSU, S.S.; TRONCIU, V. Z. Synchronization of chaos of quantum dots lasers under the influence of external cavity optical feedback. International Conference Scienceand Society: the use of light. Humboldt Kolleg, Chisinau, 2015, p. 30. <https://repository.utm.md/bitstream/handle/5014/20294/Workshop-Science-Society-Use-Light-2015-p-30.pdf?sequence=1>
- [A15] ANTOHI, I.; OLOINIC, T.; SANDUȚA, A.; RUSU, S.S.; TRONCIU, V.Z. Multi Sections Semiconductor Laserswith an Air Gap for Chaos Based Communication, International Conference Scienceand Society: the use of light. Humboldt Kolleg, Chisinau, 2015, p.28. <https://repository.utm.md/bitstream/handle/5014/20292/Workshop-Science-Society-Use-Light-2015-p-28.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [A16] OLOINIC, T.; RUSU, S.; TRONCIU, V. Nonlinear dynamics of quantum dots lasers under the influence of double cavity external feedback, NANO-2016: Ethical, Ecological and Social Problems of Nanoscienceand Nanotechnologies, p. 39-40, Chișinău, 2016. https://ibn.idsi.md/sites/default/files/imag_file/39-40_22.pdf
- [A17] OLOINIC, T.; RUSU, S.S.; TRONCIU, V.Z. Chaos based communications with quantum dots lasers under the influence of multiple feedbacks, 8th International conference on materials science and condensed matter physics, p. 215, Chișinău, 2016 https://repository.utm.md/bitstream/handle/5014/9960/Conf_on%20Materials_Science%26Condens_Matter_2016_p215.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [A18] OLOINIC, T.; RUSU, S.S.; TRONCIU, V.Z. Chaos communication with quantum dots lasers under the influence of multiple feedback. Multidisciplinarity in Modern Science for theBenefit of Society, Chișinău, 21-22 septembrie, 2017, p.45. <https://repository.utm.md/bitstream/handle/5014/18740/Workshop-Multidisciplinarity-Modern-Science-Benefit-Society-2017-p45.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

ADNOTARE

la teza „**Dinamica complexă a laserelor semiconductoare cu mediu activ gropi și puncte cuantice**”, prezentată de Tatiana OLOINIC pentru conferirea gradului de doctor în științe fizice la specialitatea 131.03 „Fizică statistică și cinetică”. Chișinău 2026.

Structura tezei include: introducere, 4 capitole, concluzii generale și recomandări. Teza se expune pe 131 pagini, bibliografia care constă din 147 titluri și 56 figuri. Rezultatele prezentate în teză sunt publicate în 18 lucrări științifice.

Cuvinte cheie: lasere semiconductoare cu puncte cuantice, comportament haotic, bifurcații, dinamica complexă, sincronizare, comunicare optică bazată pe haos.

Domeniul de studiu: Științe ale naturii.

Scopul tezei: Scopul tezei constă în dezvoltarea teoriei dinamicii neliniare a laserelor semiconductoare cu mediu activ gropi și puncte cuantice prin propunerea de noi dispozitive cu secțiuni aer pentru utilizarea lor în sistemele optice de comunicare bazată pe haos.

Obiectivele: Dezvoltarea unui model ce descrie dinamica complexă a laserelor semiconductoare cu mediu activ puncte cuantice cu feedback optic provenit de la un rezonator exterior cu cavitare aer. Simularea efectelor dinamice neliniare a laserelor semiconductoare cu mediu activ puncte cuantice prin metodele modelării numerice. Analiza bifurcațiilor și stărilor staționare care apar în sistemul de ecuații diferențiale cu întârziere ce descriu sistemul laser cu feedback de la cavități exterioare și obținerea soluțiilor analitice. Determinarea parametrilor și a modului de apariție a diferitor structuri temporale precum autopulsații, turbulență optică și haos. Determinarea condițiilor de sincronizare perfectă a două lasere semiconductoare cu mediu activ puncte cuantice cu feedback multiplu și cavități aer cuplate unidirecțional. Analiza utilizării diferitor tehnici de codificare a informației în sistemul de comunicare bazate pe haos. Cercetarea comportamentului staționar al laserului cu puncte cuantice cu feedback dublu: unul convențional, iar altul cu filtru.

Noutatea și originalitatea științifică a rezultatelor: în premieră este prezentat o structură nouă al laserului semiconductor și s-a analizat funcționarea acestuia sub influența unui feedback optic provenit de la mai multe cavități exterioare. S-a observat prezența unui comportament haotic în evoluția puterii emergente. De asemenea, s-a studiat funcționarea sincronă a două lasere semiconductoare cu mediu activ și puncte cuantice prin cuplarea lor unidirecțională. S-a realizat codificarea și decodificarea informației transmise prin astfel de sistem.

Problema științifică soluționată în teză constă în studiul teoretic al structurilor noi ale laserului cu semiconductoare cu mediu activ puncte cuantice sub influența unui feedback optic provenit de la mai multe cavități exterioare pentru aplicații în sistemele de comunicare bazate pe haos. Prin simulare numerică a fost obținut domeniul parametrilor ce caracterizează dinamica neliniară a laserelor propuse, în particular pentru regiunile haotice.

Semnificația teoretică și aplicativă constă în prezentarea unui model teoretic inedit al laserului semiconductor cu mediu activ puncte cuantice sub influența feedback-ului de la mai multe cavități unele fiind aer. Obținerea expresiilor analitice ale stărilor staționare. Identificarea, cu ajutorul programului DDE-biftool, a bifurcațiilor ce apar în sistem în condițiile comportamentului dinamic nelinier. Identificarea domeniului de apariție în planul a doi parametri a autopulsațiilor și haos optic puternic în laserele considerate. Elaborarea schemei de conectare a două lasere cuplate unidirecțional pentru a realiza sincronizarea perfectă în cazul laserelor identice. Studiarea teoretică a fenomenelor optice ce apar în laserele cu puncte cuantice care prezintă interes major pentru înțelegerea funcționării lor și ulterior realizarea experimentală. Abordarea teoretică a procesului de comunicare optică bazată pe haos într-un sistem de lasere cu gropi cuantice cuplate unidirecțional în cazul laserelor non-identice.

Implementarea rezultatelor științifice: rezultatele acestei teze au fost cu succes implementate în cadrul proiectului din cadrul Programelor de Stat 20.80009.5007.08.

SUMMARY

of the thesis “**Complex dynamics of semiconductor lasers with active medium quantum wells and dots**”, presented by Tatiana Oloinic to obtain the PhD degree in physical science in the specialty 131.03 “Statistical and kinetic physics”. Chisinau, 2026.

The structure of the thesis includes: introduction, 4 chapters, general conclusions and recommendations. The thesis is presented on 131 pages, the bibliography which consists of 147 titles, and 56 figures. The results presented in the thesis are published in 16 scientific papers.

Keywords: semiconductor quantum dot lasers, chaotic behavior, bifurcations, complex dynamics, timing, chaos-based optical communications.

Research field: Natural Sciences.

The main purpose of the thesis consists in developing the theory of nonlinear dynamics of semiconductor lasers with active medium holes and quantum dots; proposing new air-section devices for their use in optical chaos-based communication system; the development of new programs for performing numerical calculations in order to find parameters that correspond to the operation of lasers in a chaotic regime, the theoretical explanation of the phenomena observed in the experiments.

The objectives: Development of a model that describes the complex dynamics of semiconductor lasers with active medium quantum dots with optical feedback from an external resonator with an air cavity. Analysis of bifurcations and steady states occurring in the system of delayed differential equations describing the laser system with feedback from external cavities and obtaining analytical solutions, as appropriate. Determining the parameters and the mode of appearance of different temporal structures such as self-pulsations, optical turbulence and chaos. The latter is the necessary condition for optical communication systems based on chaos. Determination of perfect synchronization conditions of two active medium semiconductor lasers with multiple feedback quantum dots and unidirectional coupled air cavities. Analysis of the use of different information coding techniques in chaos-based communication system. Simulations of nonlinear dynamic effects of semiconductor lasers with quantum dot active medium through numerical modelling methods. Investigating the steady state behavior of double feedback quantum dot laser: one conventional and one with filter. The study of chaos-based communication using quantum-hole lasers and multiple feedback. Numerical modelling by simulating the nonlinear dynamical effects of self-pulsations, optical turbulence and chaos.

Scientific novelty and originality of the results: for the first time, a new structure of the semiconductor laser is presented and its operation under the influence of optical feedback from several external cavities was analysed. The presence of chaotic behavior in the evolution of emerging power was observed. The synchronous operation of two active medium semiconductor lasers and quantum dots by their unidirectional coupling was also studied. Coding and decoding of the information transmitted through such a system was achieved. Numerical modelling by simulating the nonlinear dynamical effects of self-pulsations, optical turbulence and chaos.

The scientific problem solved consists in proposing new structures of semiconductor lasers with quantum dot active media, with the aim of a theoretical analysis of the dynamic behaviour and its operation for their use in chaos-based optics.

Theoretical and practical significance: in this thesis, the complex dynamics of semiconductor lasers with active medium quantum dots under the influence of optical feedback from several external cavities is demonstrated. New structures of lasers were proposed and optical phenomena such as optical turbulence, unidirectional synchronization of lasers were theoretically investigated. According to the presented theoretical results, lasers have their applicability in various fields and in everyday life their rapid development is a current requirement.

Implementation of scientific results: the results of this thesis were successfully implemented within the project within State Programs 20.80009.5007.08.

TATIANA OLOINIC

**DINAMICA COMPLEXĂ A LASERELOR
SEMICONDUCTOARE CU MEDIU ACTIV GROPI SI PUNCTE
CUANTICE**

131.03 – FIZICĂ STATISTICĂ ȘI CINETICĂ

Rezumatul științific al tezei de doctor în științe fizice

Aprobat spre tipar 05.01.2026

Hârtie ofset. Tipar RISO

Cod de tipar 2.0

Formatul hârtiei 60x84 1/16

Tirajul 30 ex.

Comanda nr. 20

Chișinău, bul. Moscovei 5, SRL "Lumin-video" mini tipografie

@ UTM 2026