

**UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI**

**Departamentul Fizică**



Cu titlu de manuscris

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

**GRIGORIEV EUGENIU**

**PROPRIETĂȚILE LASERELOR SEMICONDUCTOARE CU MAI MULTE SECȚIUNI  
ȘI FEEDBACK OPTIC EXTERIOR**

**131.03 – FIZICĂ STATISTICĂ ȘI CINETICĂ**

**Rezumatul tezei de doctor în științe fizice**

**CHIȘINĂU, 2025**

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

**Comisia de Doctorat:**

**MACOVEI Mihai**, doctor habilitat în științe fizico-matematice, conferențiar cercetător, Institutul de Fizică Aplicată, Universitatea de Stat din Moldova, **Președintele Comisiei de Doctorat.**

**SANDULEAC Ionel**, doctor în științe fizice, conferențiar universitar, Universitatea Tehnică a Moldovei, **Secretarul Comisiei de Doctorat.**

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

**BARDETCHEI Profir**, doctor în științe fizico-matematice, conferențiar universitar Institutul de Fizică Aplicată, Universitatea de Stat din Moldova, **Membru.**

**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 Fizică Aplicată, Universitatea de Stat din Moldova.

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

Susținerea tezei va avea loc la 27 martie 2025, orele 13:00 în ședința Comisiei de Doctorat din cadrul Școlii doctorale a Universității Tehnice a Moldovei (aprobată prin decizia Consiliului Științific din 3 iulie 2024, proces-verbal nr. 5), Bd. Ștefan cel Mare 168, Blocul de studii nr. 1 a UTM, sala 1-205, Chișinău, MD - 2004, 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 21 februarie 2025.

Secretar științific al Comisiei de Doctorat,

dr. în șt. fiz., conf. univ.

Conducător științific

dr hab. în șt. fiz.-mat., prof. univ.

Autor

 SANDULEAC Ionel

 TRONCIU Vasile

 GRIGORIEV Eugeniu

## Cuprins

<b>REPERELE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII</b> .....	3
<b>CONȚINUTUL TEZEI</b> .....	9
<b>CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI</b> .....	28
<b>BIBLIOGRAFIE</b> .....	30
<b>Anexa 1. Lista publicațiilor la tema tezei</b> .....	31
<b>ADNOTARE</b> .....	34
<b>SUMMARY</b> .....	35

## REPERELE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII

**Actualitatea temei și importanța problemei investigate.** Laserele semiconductoare cu mediul activ gropi și puncte cuantice reprezintă o clasă inovatoare de dispozitive optoelectronice care utilizează structuri cu mai multe secțiuni, oferind avantaje semnificative în eficiență și performanță, un spectru de emisie mai îngust și stabilitate termică îmbunătățită în comparație cu laserele tradiționale. Principala lor caracteristică constă în capacitatea de obținere a unor emisii de lumină cu spectru mai îngust și o eficiență îmbunătățită, esențială pentru diverse aplicații, de la comunicațiile optice la tehnologiile cuantice. Cu toate aceste avantaje, dezvoltarea și implementarea laserelor semiconductoare implică tehnologii complexe de creștere a structurilor cu mai multe secțiuni, minimizând pierderile de energie și avansând în structuri fără impurități. Laserele semiconductoare sunt utilizate deja în domenii precum biofizica, medicina, spectroscopie etc. Fabricarea laserelor semiconductoare se bazează pe tehnici care permit depuneri de straturi foarte subțiri, uneori cu o singură groapă cuantică. Controlul dimensiunilor părților componente ale mediului activ gropi sau puncte cuantice este esențial pentru obținerea performanțelor laserelor, necesare pentru aplicațiile menționate mai sus. Dezvoltarea continuă în acest domeniu promite să aducă noi inovații și aplicații în viitorul tehnologiei laserelor și optoelectronicii.

O problemă cu care se confruntă la moment domeniul laserelor semiconductoare este variabilitatea și reproductibilitatea în fabricarea laserelor, reducerea pierderilor de energie prin procese non-radiaționale. Aceste procese de recombinare non-radiaționale pot afecta eficiența și performanța laserelor prin degradare și pierderea stabilității termice. Menționăm că, laserele cu mai multe secțiuni, fiind sensibile la fluctuațiile de temperatură în unele secțiuni, pot afecta performanța lor. Astfel, integrarea fără costuri mari ale noilor produse laser în tehnologiile optoelectronice existente este obiect de studiu important pentru aplicațiile practice.

Ținem să menționăm unele direcții de perspectivă pentru laserele semiconductoare precum dezvoltarea tehnologiilor cuantice, cum ar fi computerele cuantice și criptografia cuantică, prin îmbunătățirea controlului și manipulării fotonice la nivel cuantic, comunicații optice de înaltă viteză, care oferă transfer de date de înaltă capacitate, aplicații medicale și biotehnologice prin imagistică biomedicală și tratamentele non-invazive. Nu în ultimul rând, laserele semiconductoare pot fi integrate în senzori optici de înaltă precizie pentru detectarea și măsurarea unei game diverse de parametri, cum ar fi temperatură, presiune în gaze și substanțe chimice etc. Cercetările din acest domeniu nu numai că aduc inovație, dar au și un impact semnificativ asupra cunoștințelor din domeniul științelor fundamentale.

## **Descrierea situației în domeniul de cercetare și identificarea problemelor de cercetare**

Situația în domeniul cercetărilor teoretice privind laserele semiconductoare este una dinamică și atrage un interes semnificativ din partea comunității științifice și industriale, datorită potențialului lor de a revoluționa tehnologia optoelectronică. Aspecte precum îmbunătățirea eficienței și performanței laserelor, optimizarea proceselor de fabricație și integrarea acestor dispozitive în sistemele existente sunt în discuții permanente în diferite centre de cercetare atât naționale, cât și internaționale. Un aspect crucial în cercetarea laserelor semiconductoare este utilizarea de noi materiale semiconductoare care să ofere performanțe îmbunătățite. Aceste eforturi necesită o înțelegere profundă a fenomenelor cuantice care au loc în straturile cu mai multe secțiuni și cu mediu activ gropi sau puncte cuantice și o abordare integrată care combină expertiza în fizică, inginerie și chimie. Cercetările din domeniul laserelor semiconductoare se concentrează în ultimul timp asupra dezvoltării de noi materiale semiconductoare cu proprietăți optoelectronice îmbunătățite pentru utilizarea lor în producerea laserelor. Optimizarea dimensiunilor și compoziției mediului activ pentru a obține emisii de lumină conduce la apariția dispozitivelor cu caracteristici specifice. Aceasta poate implica utilizarea tehnicilor avansate de fabricație pentru a controla grosimea, lungimea și compoziția chimică a mediului activ. O altă preocupare majoră este îmbunătățirea eficienței și stabilității emisiei de laser. La momentul formulării problemei de cercetare a acestei teze au fost identificate diferite probleme care existau în explicarea rezultatelor experimentale din domeniul cercetării. Unele fenomene nu puteau fi explicate cu modelele teoretice existente. Astfel a fost necesară elaborarea de noi modele care ar putea explica rezultatele experimentale. Nu în ultimul rând, explorarea noilor aplicații și tehnologii precum comunicațiile optice de mare viteză, senzorii optici de înaltă precizie, imagistica medicală și tehnologiile cuantice au impulsivat cercetările teoretice. În final menționăm că, utilizarea simulărilor numerice avansate ajută la evaluarea structurilor cu caracteristici performante care ulterior sunt realizate în experimente. Cooperarea între experimenterii, teoreticienii și parteneriate cu industria conduc la identificarea potențialului aplicațiilor noi și emergente ale laserelor cu semiconductori. În ultimele decenii, laserele semiconductoare prezintă interes științific substanțial deoarece sunt folosite pe larg în diferite experimente a fenomenelor noi care apar în fizica modernă, precum și fenomene din compartimentul dinamicii neliniare a laserelor semiconductoare.

În concluzie, situația actuală în domeniul cercetării laserelor semiconductoare este una dinamică, în care progresele remarcabile sunt însoțite de provocări tehnologice semnificative.

**Scopul tezei** constă în studiul teoretic al comportamentului staționar și dinamic al laserelor semiconductoare cu mai multe secțiuni și feedback optic, propunerea de noi dispozitive cu diferite topologii, analiza bifurcațiilor și a scenariilor ce conduc la apariția instabilităților și propunerea de

modalități de evitare ale lor, elaborarea programelor de calcul pentru efectuarea simulărilor numerice, explicarea teoretică a fenomenelor observate experimental și raportate în lucrări științifice recente, stabilirea domeniilor de utilizare ale noilor structuri laser în comunicarea optică, spectroscopie, metrologie cuantică, medicină, etc.

### **Obiectivele cercetării**

1. Ajustarea modelului teoretic al laserului semiconductor cu mediu activ puncte cuantice la acțiunea unui feedback optic provenit de la un rezonator Fabry Perot exterior. Obținerea stărilor staționare ale laserului în cazul prezenței unui strat de aer între rezonator și mediul activ. Trasarea graficelor pentru distribuțiile modurilor cavității exterioare în planul diferitor parametri. Identificarea condițiilor optime de funcționare a laserului în regim de unde continue.
2. Elaborarea modelului teoretic al comportamentului laserelor cu reflectoare Bragg distribuite DBR (eng. Distributed Bragg Reflector) care permit funcționarea în regimul unui singur mod longitudinal cu o linie spectrală îngustă. Studiul teoretic al proprietăților dinamice ale unui laser cu secțiunea DBR încorporată care se află sub influența feedbackului optic extern. Propunerea unui model având parametrii principali dependenți de lungimea de undă a modului primar. Identificarea naturii bifurcațiilor care apar într-un astfel de sistem. Trasarea regiunilor cu instabilități în planul diferitor parametri de material și geometrici ai laserului.
3. Studiul comportamentului dispozitivelor de putere înaltă cu emisie spectrală în bandă îngustată și difracție spațială limitată, așa numitele amplificatoare de putere (eng. PA) cu oscilator master (eng. MO) integrat monolitic (eng. MOPA). Determinarea mecanismului influenței pompajului din secțiunea PA asupra secțiunii MO prin încălzirea termică. Investigarea teoretică a colapsului emisiei dispozitivului MOPA raportat experimental. Explicarea cantitativă a rezultatelor experimentale disponibile de la partenerii noștri, în special, prăbușirea puterii în cazul în care curentul este injectat într-o secțiune de control adiacent laserului cu reflector Bragg distribuit. Compararea rezultatelor teoretice cu cele experimentale.
4. Analiza dinamicii diferitor tipuri de lasere care generează autopulsații și serii de impulsuri de scurtă durată. Stabilirea parametrilor și modul de influență a parametrilor laserului de lumină albastră, precum influența grosimii absorbantului de saturație, a lungimii laserului, precum și a duratei de viață a purtătorilor de sarcină asupra autopulsațiilor. Studiul teoretic

al structurii laser de tip DFB pentru generarea autopulsațiilor și impulsurilor de scurtă durată. Determinarea mecanismului de generare a impulsurilor de scurtă durată.

5. Modelarea numerică prin simularea efectelor dinamice neliniare a laserelor semiconductoare cu mediu activ gropi și puncte cuantice.

**Metodologia cercetării științifice.** Suportul teoretic pentru realizarea tezei a fost acumulat în urma analizei literaturii de specialitate în domeniul teoriei laserelor semiconductoare. Pentru realizarea cu succes a obiectivelor de mai sus au fost aplicate următoarele metode teoretice și modele:

1. Au fost utilizate metodele analizei bifurcaționale pentru a determina bifurcațiile care apar în sistemele studiate;
2. A fost utilizat soft-ul DDE-biftool și metode de calcul, cum ar fi metoda Runge-Kutta de gradul IV;
3. Au fost efectuate calcule numerice ale modelului Bloch adaptat cu partea teoretică pentru feedback-ul optic provenit de la rezonatorul Fabry-Perot cu un strat de aer între mediul activ și rezonator;
4. Au fost efectuate calcule numerice în cazul modelului adaptat, în care pentru prima dată parametrii principali sunt dependenți de lungimea de undă, iar rezultatele obținute comparate cu cele ale modelului Lang-Kobayshi;
5. Pentru studiul dinamicii laserelor de putere înaltă de tip MOPA a fost utilizat modelul undelor progresive;
6. Pentru generarea impulsurilor scurte într-un laser DFB excitabil a fost propus modelul ratelor;
7. Au fost elaborate programe în Matlab, Fortran și C++ pentru simulări numerice în cazul integrării directe a ecuațiilor diferențiale cu întârziere.

#### **Noutatea și originalitatea științifică**

Noutatea științifică a rezultatelor obținute constă în:

1. A fost extins modelul teoretic pentru structura laserului cu puncte cuantice cu feedback dublu și secțiune aer între rezonatoare. Modelul extins permite obținerea distribuției stărilor staționare, adică a modurilor cavității exterioare în planul diferitor parametri;
2. A fost elaborat un nou model al laserelor cu reflectoare DBR în regim de funcționare a unui singur mod longitudinal cu o lățime a liniei spectrale îngustă. Acest model ia în considerație parametrii principali ai laserului dependenți de lungimea de undă a modului primar și este în concordanță cu rezultatele experimentale. S-a analizat cazul laserului sub influența feedback-ului optic extern;

3. Teoretic a fost stabilit mecanismul influenței pompajului din secțiunea de amplificare PA asupra secțiunii master-oscilator MO. Această influență s-a realizat prin încălzirea termică a unui dispozitiv multisețional MOPA. A fost confirmat teoretic și explicat colapsul emisiei dispozitivului MOPA observat experimental. Rezultatele teoretice cantitative sunt în concordanță cu datele experimentale disponibile;
4. S-a determinat mecanismul de generare a impulsurilor de scurtă durată a unui laser de tip DFB;
5. S-au obținut autopulsații de frecvență înaltă în lasere de tipul InGaN cu absorbant de saturație;
6. S-au efectuat simulări numerice ale efectelor dinamice neliniare a laserelor semiconductoare cu mai multe cavități și feedback optic extern.

**Problema științifică soluționată constă în** propuneri spre realizare a structurilor laser noi cu mai multe secțiuni și cu proprietăți controlabile. Rezultatele teoretice obținute în teză au fost explicate și comparate cu cele experimentale oferite de către colegii de la Institutul Ferdinand Braun din Berlin, Germania. În rezultatul simulărilor numerice au fost obținuți parametri potriviți pentru funcționarea optimă a sistemelor laser cu mai multe secțiuni pentru utilizare în diferite domenii precum spectroscopie, comunicare optică, metrologie cuantică, medicină etc.

**Semnificația teoretică și valoarea aplicativă a lucrării constă în:**

- Tratarea teoretică a structurii laserului cu puncte cuantice cu feedback dublu și secțiune aer între rezonatoare. Determinarea distribuției stărilor staționare adică a modurilor cavității exterioare în planul diferitor parametri, care s-a dovedit a fi cu mult mai complexă ca în cazul feedback-ului convențional;
- Elaborarea teoretică a unui model al laserului DFB cu feedback optic având parametri principali ai laserului dependenți de lungimea de undă a modului primar;
- Identificarea mecanismului influenței pompajului din secțiunea de amplificare PA asupra secțiunii MO a laserului cu multisețiuni MOPA prin încălzirea termică. Confirmarea teoretică a colapsului emisiei dispozitivului MOPA observat în experiment;
- Propuneri pentru realizarea experimentală a dispozitivelor laser pentru generarea autopulsațiilor și a impulsurilor de scurtă durată.

**Valoarea practică a tezei constă în** explicarea diferitor fenomene raportate în literatura de specialitate, unele dintre ele obținute în cadrul cercetărilor experimentale ale colegilor de la Institutul Ferdinand Braun din Berlin:



- estimarea parametrilor de material și a celor geometrici ai laserelor cu mai multe secțiuni pentru îmbunătățirea controlului emisiei externe;
- recomandări practice pentru configurarea laserelor cu proprietăți controlabile în diferite aplicații;
- implementarea rezultatelor obținute în teză, în două proiecte științifice.

### **Rezultatele științifice principale înaintate spre susținere:**

1. A fost obținută distribuția modurilor cavității exterioare a laserului cu puncte cuantice și feedback dublu care este complet diferită de cea a feedback-ului convențional, iar structura laser propusă este compactă și poate fi ușor integrată cu sistemele de comunicare optică existente;
2. S-a propus un model nou care descrie adecvat comportamentul laserelor DBR cu cavitare aer supuse feedback-ului extern puternic. Ideea acestui model constă în dependența parametrilor laserului de lungimea de undă. S-a demonstrat că parametrii modelului precum factorul Henry, durata de viață a fotonului, puterea feedbackului și indicele grupului modal depind puternic de dezacordul dintre lungimea de undă laser și lungimea de undă Bragg. Stările staționare stabile trec în instabile prin bifurcațiile Hopf. S-a demonstrat că laserele DBR cu secțiuni active scurte sunt caracterizate de regiuni instabile. Explicația teoretică a instabilităților constă în existența unei regiuni largi de instabilitate pentru valori mari ale factorului Henry în aceste regiuni;
3. A fost explicat comportamentul complex al sistemului DBR MOPA monolitic cu mai multe secțiuni utilizând modelul undelor progresive. S-a demonstrat teoretic prezența colapsului emisiei laser observat în experimente, acesta fiind cauzat de dezacordarea termică a ambelor secțiuni ale laserului. S-a demonstrat că pentru o funcționare stabilă a dispozitivului MOPA este necesară o reflectivitate a fațetei frontale mai mică de  $10^{-4}$ . Simulările numerice sunt în bună concordanță cu rezultatele experimentale disponibile;
4. A fost observată generarea de impulsuri de către un laser DFB excitabil cu reflector dispersiv pasiv încorporat. În particular, au fost obținute impulsuri de scurtă durată care au formă simetrică.

### **Aprobarea rezultatelor obținute**

Principalele rezultate științifice au fost prezentate la următoarele conferințe și seminare:

1. The 6<sup>th</sup> International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering, ICNBME-2025, 20-23 Septembrie 2023, Chisinau, Republic of Moldova;

2. The seventh edition of the International Colloquium 'Physics of Materials' - PM-7, University POLITEHNICA of Bucharest, in collaboration with The Romanian Academy of Scientists on November 10-11, 2022, Bucharest, Romania;
3. The 5<sup>th</sup> International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering ICNBME-2021, 3-5 noiembrie 2021, Chisinau, Republic of Moldova;
4. Conferința tehnico-științifică a studenților, masteranzilor și doctoranzilor. 29 martie 2022. Chișinău, Republica Moldova;
5. Conferința tehnico-științifică a studenților, masteranzilor și doctoranzilor. 23-25 martie 2021. Chișinău, Republica Moldova;
6. Conference on Electronics, Communications and Computing: IC|ECCO-2021, Ed. 11, 21-22 octombrie 2021, Chișinău, Republica Moldova;
7. Conferința tehnico-științifică a studenților, masteranzilor și doctoranzilor, 1-3 aprilie 2020, Chișinău, Republica Moldova;
8. Seminarele Laboratorului de cercetare a dispozitivelor laser și a materialelor nanostructurate, Departamentul Fizica, UTM.

#### **Publicații la tema tezei**

Rezultatele principale ale tezei au fost publicate în 16 lucrări științifice, dintre care 4 articole în reviste internaționale cotate ISI și SCOPUS, 3 în reviste din Registrul Național al revistelor de profil categoria B+, 5 articole în culegeri de lucrări ale conferințelor naționale cu participare internațională, 4 teze la foruri științifice, conferințe internaționale. Lista contribuțiilor autorului la tema tezei este prezentată la sfârșitul rezumatului în Anexa 1.

#### **Volumul și structura tezei**

Teza constă din introducere, cinci capitole, concluzii generale și recomandări. Teza este expusă pe 137 pagini, cu 3 tabele și 64 figuri. Bibliografia conține 136 de 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”.

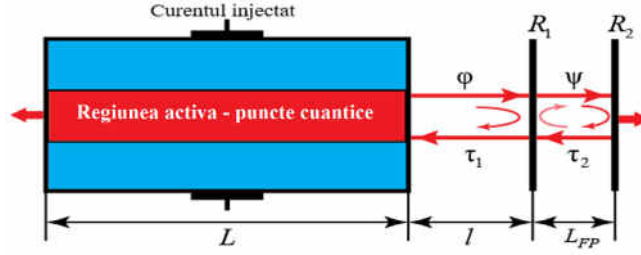
### **CONȚINUTUL TEZEI**

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

**Capitolul I** reprezintă o trecere în revistă a teoriei laserelor semiconductoare, precum și a proprietăților laserelor cu diferite topologii pentru diferite aplicații [1]. Este descris laserul cu semiconductori ca o alternativă cost-eficientă și fiabilă a laserelor cu gaz. Este menționat avantajul laserelor semiconductoare precum mărimi reduse, costurile mici de fabricație, utilizare largă, longevitate mare, etc. Sunt descrise detalii ce țin de realizarea practică a laserelor semiconductoare prin studiul compoziției de material și dimensionalitate [2]-[6] asupra obținerii amplificării. Este expusă teoria fundamentală, conceptul și proprietățile laserelor semiconductoare. Sunt descrise laserele semiconductoare ca o dezvoltare recentă a domeniului tehnologiei laser. Sunt definite proprietățile laserelor de tip DFB [7]-[9] și descrise fenomenele complexe care apar în ele. De asemenea sunt descrise diferite metode de control al emisiei laser. În finalul acestui Capitol au fost descrise rezultatele publicate recent în domeniul dispozitivelor MOPA [10].

**În Capitolul 2** sunt prezentate rezultate ale studiului stărilor staționare ale laserului cu mediu activ puncte cuantice cu feedback optic. S-a studiat comportamentul laserului cu mediu activ puncte cuantice cu feedback provenit de la un rezonator Fabry-Perot exterior. A fost utilizat modelul complex al ecuațiilor Bloch, în care rata de anihilare a fotonilor și degradarea polarizării au mărime de ordin similară. Parametrii utilizați în calcule numerice au fost obținuți pentru a fi utilizați ulterior în crearea de noi dispozitive laser. Ecuațiile inițiale au fost normate astfel că în final s-au obținut ecuații pentru mărimi adimensionale. Ecuațiile adimensionale reprezintă un sistem de ecuații diferențiale nelineare cu întârziere ce descriu dinamica laserului cu puncte cuantice cu feedback optic considerat în acest capitol. S-au analizat soluțiile sistemului de ecuații diferențiale cu întârziere sub forma așa-numitelor moduri ale cavității exterioare. În urma unor transformări matematice s-a obținut, la început, o ecuație transcendentă pentru frecvența modurilor cavității externe. Ulterior s-au obținut valorile de amplitudine ale intensității câmpului laserului și ale vectorului de polarizare. În final, s-a determinat densitatea purtătorilor de sarcină care este soluția ecuației de ordinul trei. Au fost trasate graficele distribuțiilor modurilor cavității externe (MCE) în planul a doi parametri. Forma distribuției modurilor este complicată atunci când puterea feedback-ului în a doua ramură crește, astfel încât ele prezintă formă de „clopot” și de sateliți ai elipselor deformate. Așadar, am constatat că, pentru o putere mare de feedback, forma locației modurilor externe devine mai complexă. Rezultatele acestui Capitol sunt prezentate în lucrările [A2], [A4], [A7], [A10], [A13] din Anexa nr. 1.

Modelul schematic al laserului cu puncte cuantice este prezentat în Fig. 1.



**Fig. 1. Schema laserului pe bază de puncte cuantice.**

Acest laser constă din stratul care reprezintă mediul activ cu puncte cuantice GaN și un rezonator exterior Fabry-Perot. Considerăm structura prezentată în Fig. 1 și modelul laserului cu mediu activ puncte cuantice, folosind următorul sistem de ecuații Bloch [11], [12] în care  $E$  este amplitudinea câmpului,  $p$  - polarizarea,  $N$  - inversia, iar termenii care conțin  $\Gamma_1$  și  $\Gamma_2$  descriu feedback-ul dublu

$$\frac{dE}{dt} = -\kappa E + 2Z^{QD}\Gamma|g|p + \frac{Z^{QD}\Gamma\beta F_P}{\tau_{sp}E^*} \left(\frac{N+1}{2}\right)^2 + \Gamma_1 e^{i\varphi} E(t-\tau_1) + \Gamma_2 e^{i\psi} E(t-\tau_2), \quad (1)$$

$$\frac{dp}{dt} = -\gamma p + |g|EN, \quad (2)$$

$$\frac{dN}{dt} = -4|g|Ep + \frac{N_0(w_e) - N}{T_1(w_e)} - \frac{F_P}{\tau_{sp}} \left(\frac{N+1}{2}\right)^2. \quad (3)$$

Numărul de puncte cuantice din regiunea activă a laserului este notat cu  $Z^{QD}$ .  $t_1 = 2l/c$  și  $t_2 = 2L_{FP}/c_g$  sunt timpii de întârziere a semnalului între laser și rezonator și, respectiv, în rezonator.

Analizăm soluțiile sistemului de ecuații (1)-(3) sub forma așa-numitelor moduri ale cavității exterioare (MCE)

$$E = E_s e^{i\omega_s t}; \quad p = p_s e^{i\omega_s t + i\alpha_s}; \quad N = N_s. \quad (4)$$

Utilizând (4) din (1)-(3) pentru frecvența modurilor cavității externe se obține următoarea ecuație transcendentă pentru  $\omega_s$ :

$$\omega_s = -\Gamma_1 \sin(\omega_s \tau_1 + \varphi) - \Gamma_2 \sin(\omega_s \tau_2 + \psi), \quad (5)$$

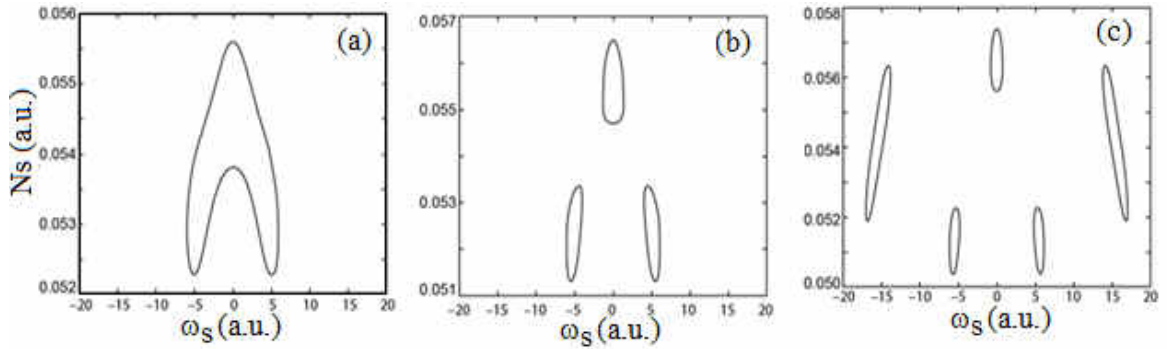
și valorile de amplitudine ale intensității câmpului laserului și ale vectorului de polarizare:

$$E_s = \sqrt{\frac{1}{CN_s} \left[ \frac{d_0 - N_s}{\tilde{T}_1} - \frac{1}{\tilde{\tau}_{eff}} \left(\frac{N_s + 1}{2}\right)^2 \right]}, \quad p_s = \sqrt{\frac{\tilde{g}^2 N_s}{C\tilde{\gamma}^2} \left[ \frac{d_0 - N_s}{\tilde{T}_1} - \frac{1}{\tilde{\tau}_{eff}} \left(\frac{N_s + 1}{2}\right)^2 \right]}. \quad (6)$$

Densitatea purtătorilor de sarcină  $N_s$  este soluția ecuației de ordinul trei

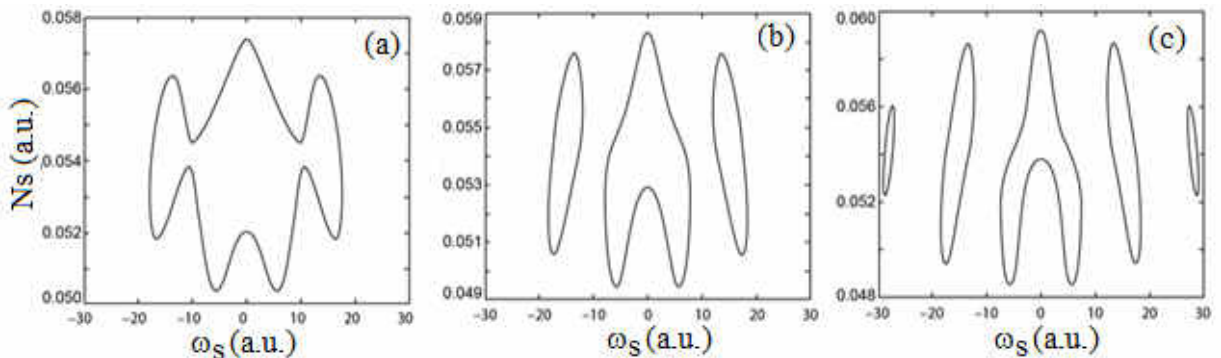
$$\begin{aligned} \tilde{T}_1 D N_s^3 + \left[ \tilde{T}_1 \Gamma_f + 2\tilde{T}_1 D - 4\tau_{eff} A \right] N_s^2 + \\ + \left[ \tilde{T}_1 D + 2\Gamma_f \left( \tilde{T}_1 + 2\tau_{eff} \right) + 4d_0 A \tau_{eff} \right] N_s + \Gamma_f \left( \tilde{T}_1 - 4d_0 \tau_{eff} \right) = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Distribuțiile modurilor cavității exterioare în planul  $(N_s - \omega_s)$  este redat în Fig. 2. Se poate observa că modurile nu sunt situate pe elipsă, dar pe formă de „clopot”.



**Fig. 2. Distribuția MCE în planul a doi parametri  $(N_s - \omega_s)$  pentru (a)  $\Gamma_1 = 5, \Gamma_2 = 5$ , (b)  $\Gamma_1 = 5, \Gamma_2 = 10$ , (c)  $\Gamma_1 = 5, \Gamma_2 = 15$ .  $\tau_1 = 0.2$ ,  $\tau_2 = 0.5$ .**

Figura 3 prezintă distribuția MCE pentru o putere de feedback mai mare în prima ramură a cavității externe  $\Gamma_1 = 15$  și o putere de feedback mică în cea de-a doua  $\Gamma_2 = 5$ . Se poate observa o distribuție mai complicată a MCE spre deosebire de feedback-ul convențional.



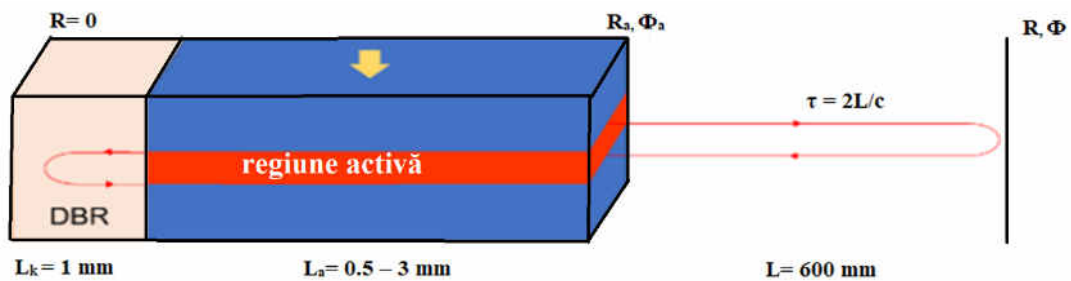
**Fig. 3. Distribuția MCE în planul a doi parametri  $(N_s - \omega_s)$  pentru (a)  $\Gamma_1 = 15, \Gamma_2 = 5$ , (b)  $\Gamma_1 = 15, \Gamma_2 = 10$ , (c)  $\Gamma_1 = 15, \Gamma_2 = 15$ .  $\tau_1 = 0.2$ ,  $\tau_2 = 0.5$**

Astfel menționăm că, în acest Capitol s-au obținut stările staționare ale laserului cu mediu activ puncte cuantice sub influența feedback-ului optic. Am demonstrat că MCE sunt situate pe forma de „clopot” pentru o putere scăzută de feedback. Intensități mai mari a feedback-ului implică apariția unor sateliți ai elipselor deformate.

**În Capitolul 3** a fost elaborată teoria laserelor DBR. Aceste lasere permit funcționarea în regimul unui singur mod longitudinal cu o lățime mică a liniei spectrale. S-au studiat teoretic proprietățile dinamice ale unui laser cu secțiunea DBR încorporată, care se află sub influența feedbackului optic exterior. Modelul Lang-Kobayashi a fost folosit pentru a verifica rezultatele modelului propus în acest capitol pentru coeficienți de reflexie mici. Modelul utilizat în acest capitol este complet diferit de cel utilizat pentru laserele Fabry – Perot, deoarece parametrii

principali depind de lungimea de undă a modului primar, adică de reducerea a eficacității modului de laser primar. S-a identificat natura bifurcațiilor care apar într-un astfel de sistem. S-au trasat bifurcațiile care apar în sistemul laser plus feedback. A fost determinată bifurcația Hopf și reprezentată în planul diferiților parametri. S-a demonstrat că această bifurcație este responsabilă de instabilitățile care apar în astfel de lasere. Au fost identificate condițiile necesare pentru funcționarea stabilă a laserului în regim de unde continue. De asemenea, s-a demonstrat influența lungimii regiunii active asupra stabilității emisiei dispozitivului și s-a arătat modul în care această proprietate este modificată prin variația dezacordului modului laserului de la cel solitar. Rezultatele prezentate în acest Capitol oferă o bază bună pentru studiile experimentale mai detaliate ale laserelor DBR și aplicațiile acestora ca sursă de lumină stabilă cu un singur mod. Rezultatele acestui capitol au fost publicate în lucrările [A3], [A16] din Anexa nr 1.

Figura 4 prezintă schema laserului DBR studiată în acest Capitol. Emisia laserului de pe fațeta frontală este transmisă de un front de undă și reflectată de o oglindă îndepărtată cu reflectivitatea  $R$ . Au fost luate în considerare defazajele oglinzilor și ale fațetelor oglinzii exterioare.  $\varphi$  este faza oglinzii externe,  $\tau$  este întârzierea feedback-ului extern. Lungimea de undă a laserului primar  $\lambda_\lambda$  este de  $1,12 \mu\text{m}$ . Pierderile optice în secțiunea DBR sunt de  $200 \text{ m}^{-1}$ . Lungimea de undă centrală  $\lambda_\kappa$  a laserului DBR este de  $1,12 \mu\text{m}$ . Reflectivitatea fațetei frontale a regiunii active este  $R_a = 0,1$ .



**Fig. 4. Schema laserului DBR cu feedback optic exterior.**

În condiții de funcționare cu unde continue CW (eng. Continues Wave), densitățile purtătorilor de sarcină, precum și puterea optică din laserul DBR sunt constante în timp. În întregul laser circulă două unde - progresivă și regresivă - de următoarea formă:

$$E(z,t) = \left[ E^+(z,t,\omega_s) e^{-i\beta_0 z} + E^-(z,t,\omega_s) e^{i\beta_0 z} \right] e^{i\omega_s t}, \quad (8)$$

unde  $\beta_0 = n\pi / \Lambda$  cu ordinul  $n$  și perioada rețelei  $\Lambda$  în DBR.

Puterea redimensionată a feedbackului se obține utilizând formula pentru  $\tilde{q}$  din [13] cu următoarea formă:

$$\eta = \frac{\sqrt{R/R_a}}{|\partial_{\omega_s} \tilde{q}|}, \text{ cu } q(\omega_s, g_s) = \frac{1 - \rho(\omega_s, g_s)}{R_a - \rho(\omega_s, g_s)}. \quad (9)$$

Faza este scrisă sub forma:

$$\phi = \varphi + \arg(\partial_{\omega_s} \tilde{q}) - \frac{\pi}{2} - \arg(r). \quad (10)$$

Factorul Henry poate fi scris astfel:

$$\tilde{\alpha}_H = -\frac{\text{Re}(\partial_g \tilde{q} / \partial_{\omega} \tilde{q})}{\text{Im}(\partial_g \tilde{q} / \partial_{\omega} \tilde{q})}. \quad (11)$$

Durata de viață redimensionată a fotonului are forma:

$$\tilde{\tau}_p = (\tilde{v}_g g_l)^{-1} \text{ cu } \tilde{v}_g = +2 \text{Im}(\partial_g \tilde{q} / \partial_{\omega} \tilde{q}). \quad (12)$$

Condițiile de prag sunt redatate de următoarea expresie:

$$g_l = \alpha_a - \frac{1}{L_a} \ln(|r_k(\omega_l)| \sqrt{R_a}). \quad (13)$$

Pentru reflectivitatea care intră în (12), adică reflectivitatea din partea dreaptă a unei rețele, utilizăm următoarea formulă [14]

$$r_k = \frac{-ik \frac{+\sin(\gamma L_k)}{\gamma}}{\cos(\gamma L_k) + i\beta \frac{\sin(\gamma L_k)}{\gamma}} \text{ cu } \gamma = \sqrt{(\Delta\beta_k)^2 - k^+ k^-}, \quad (14)$$

unde  $L_k$ , este lungimea rețelei, iar dezacordul lungimii de undă  $\Delta\beta_k(\lambda)$  este:

$$\Delta\beta_k(\lambda) = \beta_k(\lambda) - \beta_0, \quad \beta_k = \frac{2\pi}{\lambda} n_k(\lambda) - \frac{i}{2} \alpha_k, \quad k^\pm = k e^{\mp 2\pi i \varphi_k}. \quad (15)$$

Aici  $k$  este coeficientul de cuplare al rețelei,  $n_k$  este indicele modal al ghidului de undă intern,  $\alpha_k$  este coeficientul de absorbție de fundal al undelor ghidate în secțiunea rețelei,  $\varphi_k$  este o schimbare de fază în funcție de poziția relativă a rețelei față de fațeta din dreapta a DBR. Stările staționare sunt date de soluții de unde rotative, așa-numite MCE  $E = E_s e^{i\omega_s t}$ . Utilizând aceste soluții obținem o ecuație transcendentă pentru  $\omega_s$ :

$$i\omega_s = i\omega_1 + (1 + i\tilde{\alpha}_H) \frac{N_s}{\tilde{\tau}_p} + \eta e^{-(\phi + \tau\omega_s)}. \quad (16)$$

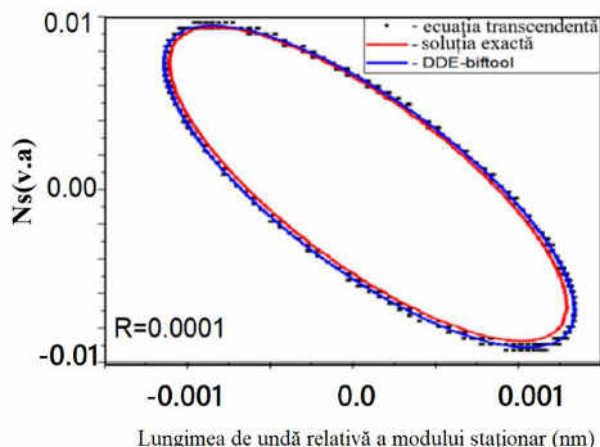
Partea reală a acestei ecuații reprezintă densitatea purtătorilor de sarcină:

$$\frac{N_s}{\tilde{\tau}_p} = -\eta \cos(\tau\omega_s + \phi), \quad (17)$$

iar din partea imaginară obținem o ecuație transcendentă:

$$\omega_s - \omega_1 = -\eta [\tilde{\alpha}_H \cos(\tau\omega_s + \phi) + \sin(\tau\omega_s + \phi)]. \quad (18)$$

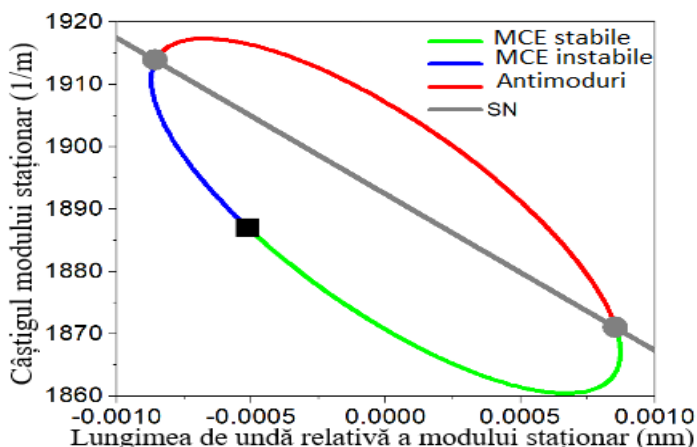
În Fig. 5 prezentăm o demonstrație a validității modelului nostru în comparație cu cel Lang – Kobayashi (LK), dependența coeficientului de amplificare a modului staționar de lungimea de undă a acestuia pentru modelul LK (linie neagră) și modelul propus în acest Capitol - linia roșie, precum și rezultatele obținute cu ajutorul programului soft DDE-biftool. Pentru reflectivitatea  $R = 10^{-4}$  a oglinzii se observă un acord bun între modele, prin suprapunerea foarte bună a elipselor.



**Fig. 5. Modelul LK versus modelul complet pentru reflectivitatea feedback**

**$R = 10^{-4}$ . Lungimea secțiunii active  $L_a = 1,0$  mm.**

O problemă importantă este investigarea stabilității stărilor staționare. Aici folosim softul DDE-biftool pentru ecuații diferențiale cu întârziere [15] pentru a analiza stabilitatea modurilor cavităților exterioare pe baza unei metode de continuare a parametrilor. Figura 6 prezintă elipsa modurilor cavităților exterioare pentru coeficientul de reflexie  $R = 10^{-4}$  și pentru lungimea secțiunii active  $L_a = 1,0$  mm.



**Fig. 6. Curba modurilor cavității externe pentru o lungime a secțiunilor active  $L_a = 1,0$  mm**

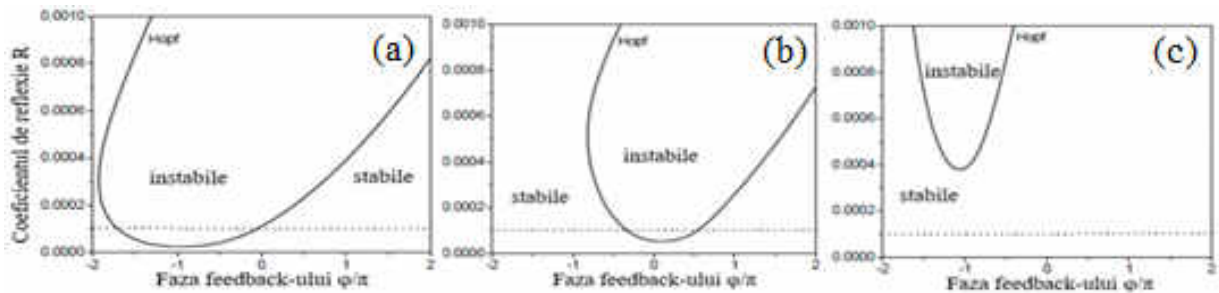
**( $I_{tr} = 0,013$  A,  $I_{th} = 0,0262$  A și  $I = 0,0524$  A) și reflectivitatea fațetei exterioare e  $R = 10^{-4}$ .**

**Linia verde continuă corespunde stării staționare stabile, iar linia albastră – stării staționare instabile. Cercul gri - bifurcarea nod-șa pentru  $R = 10^{-4}$ . Bifurcarea nod-șa redată de linia gri este pentru orice reflectivitate. Pătrat – bifurcarea Hopf.**



Liniile gri constituie o bifurcare nod-șa (eng. SN) pentru orice valoare a reflectivității oglinzii externe  $R$ . Punctele de intersecție dintre această linie și elipsele arătate de cercuri gri reprezintă bifurcații SN pentru  $R = 10^{-4}$ , separând MCE numite „anti-moduri” (linii roșii) de moduri. Linia roșie continuă din această figură nu prezintă interes pentru investigațiile noastre. DDE-biftool permite identificarea bifurcațiilor Hopf marcate cu un pătrat negru în Fig. 6, separând MCE stabile (linia verde) și instabile (linia albastră).

În Figura 7 sunt prezentate liniile Hopf care separă regiunile stabile de cele instabile în planul a doi parametri ai dispozitivului, și anume reflectivitatea externă  $R$  și faza externă  $\varphi$ .



**Fig. 7. Bifurcarea Hopf în planul a doi parametri (reflectivitatea externă  $R$  - fază exterioară  $\varphi/\pi$ . (a)  $L_a = 0,5$  mm, (b)  $L_a = 1,0$  mm (c)  $L_a = 3,0$  mm.**

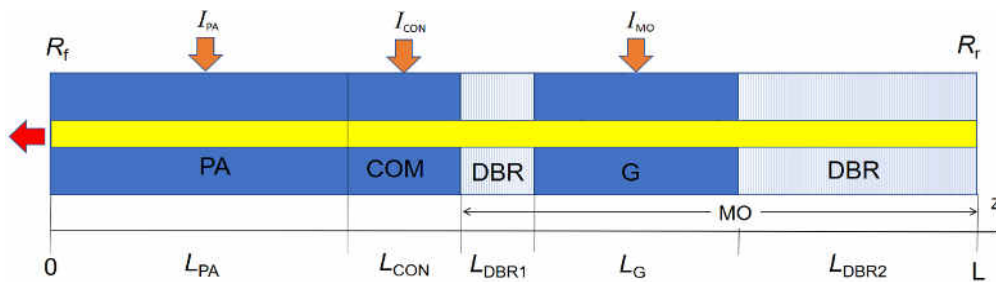
Menționăm că celelalte linii Hopf obținute printr-o repetare, cu o perioadă de  $2\pi$  nu sunt afișate. Această cifră confirmă rezultatele constatărilor anterioare și, de asemenea, cele obținute în [16]. Astfel, pentru laserul cu  $L_a = 0,5$  mm regiunea de instabilitate este foarte largă (Fig. 7(a)). O creștere a lungimii cavității regiunii active duce la o îngustare a regiunilor instabile și la o regiune stabilă mai largă (Fig. 7(b)). Observăm că mărirea suplimentară a lungimii cavității reduce regiunea instabilă (Fig. 7(c)).

Astfel, în acest Capitol se propun rezultate ale investigațiilor teoretice ale comportamentului unui laser DBR supus feedbackului extern. S-a luat în considerare cazul unei ramuri de feedback lungă. S-a obținut un acord bun între modelul propus în acest Capitol și modelul LK pentru reflectivități externe mai mici de  $10^{-4}$ .

**În Capitolul 4** s-a studiat comportamentul dispozitivelor de putere înaltă cu emisie spectrală în bandă îngustată și difracție spațială limitată MOPA. Ținem să menționăm că secțiunea MO este realizată, fie ca un laser DFB cu ghid de undă, fie ca un laser DBR. S-a demonstrat că pompajul în secțiunea PA poate perturba secțiunea MO prin încălzire termică sau feedback optic, rezultând în apariția instabilităților spațio-temporale, cum ar fi autopulsări, funcționare longitudinală multimod și o deteriorare a proprietăților fasciculului spațial. Astfel, în acest Capitol s-a propus decuplarea secțiunilor MO și PA. Între ele poate fi introdusă o secțiune suplimentară

cu un contact separat electric, numit preamplificator sau secțiune de control (CON). Introducerea noii secțiuni CON face sistemul mai complex. S-a constatat experimental că introducerea unei astfel de secțiuni poate conduce la un colaps al emisiei laser. S-a investigat teoretic originea fenomenului menționat. Studiul a fost început pentru laserul MOPA care emite la 1064 nm, folosind modelul undelor progresive MUP (eng. Traveling Wave Equations - TWE) în care se ține cont de cuplarea undelor progresive și regresive. Modelul numeric utilizat în acest capitol explică cantitativ, în special rezultatele experimentale disponibile, prăbușirea puterii în cazul în care curentul este injectat într-o secțiune de control adiacentă laserului cu reflector Bragg distribuit. De asemenea, s-a investigat influența indicelui de reflexie a fațetei din spate a MOPA asupra comportamentului laserului.

Laserul MOPA cu mai multe secțiuni studiat în acest Capitol și prezentat schematic în Fig. 8, este similar cu dispozitivul raportat în [17]. Singura diferență este că am înlocuit secțiunea de amplificare PA conică din [17] cu una liniară. O astfel de simplificare permite o descriere calitativă corectă după cum este menționat în [18]. Laserul DBR MOPA este alcătuit din 5 secțiuni, și anume (în Fig. 8 de la dreapta la stânga): o secțiune DBR de 1 mm lungime alăturată cu o secțiune G de amplificare cu lungimea de 0,75 mm, o secțiune DBR de 0,25 mm lungime, un preamplificator sau o secțiune de control CON cu lungimea de 0,5 mm și o secțiune de amplificare PA de 3,5 mm lungime. Lungimea totală a dispozitivului este de 6 mm. Stratul activ cu trei gropi cuantice InGaAs se extinde peste toate secțiunile. Ambele fațete ale dispozitivului sunt acoperite cu un strat anti-reflex. Pentru simulări numerice, setăm coeficientul de reflexie al fațetei din spate (DBR2) la zero și variem coeficientul de reflexie al fațetei din față al amplificatorului PA de la 0 la  $10^{-2}$ .



**Fig. 8. Vizualizarea schematică a dispozitivului DBR MOPA în care sunt indicate lungimile secțiunilor și curenții din ele.**

Modelul numeric folosit se bazează pe ecuațiile undelor progresive de tipul timp  $\times$  poziție axială, pentru amplitudinile complexe  $E^+(z, t)$  și  $E^-(z, t)$  lent variabile ale câmpurilor optice cu contrapropagare în fiecare secțiune a dispozitivului:

$$\frac{n_g}{c_0} \frac{\partial}{\partial t} E^\pm = [\pm \frac{\partial}{\partial z} - i\Delta\beta(N, I)] E^\pm - ikE^\pm + F_{sp}^\pm. \quad (19)$$

Pentru fiecare amplitudine în parte  $E^+(z, t)$  și  $E^-(z, t)$  putem scrie:

$$\frac{n_g}{c_0} \partial_t E^+ + \partial_z E^+ = -i\beta E^+ - ikE^- + F_{sp}^+, \quad (20)$$

$$\frac{n_g}{c_0} \partial_t E^- - \partial_z E^- = -i\beta E^- - ikE^+ + F_{sp}^-, \quad (21)$$

unde  $c_0$  este viteza luminii în vid,  $F_{sp}^\pm$  este contribuția stocastică a emisiei spontane,  $n_g$  indicele de grup și  $k$  coeficientul de cuplare a câmpului datorită rețelei Bragg. Factorul relativ de propagare în fiecare secțiune este dat de relația:

$$\Delta\beta = \delta_0 - i\frac{\alpha_0}{2} + k_0 [\Delta n_N(N) + \Delta n_T(I)] + i\frac{g(N) - D}{2}, \quad (22)$$

unde  $\delta_0$  este dezacordul static între secțiuni, care se datorează diferitor indici de refracție a modurilor,  $\alpha_0$  redă pierderile optice interne,  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  unde  $\lambda_0$  este lungimea de undă de referință.  $D$  este operatorul linear care modelează dispersia amplificării. Se presupune că amplificarea modală depinde logaritmically de densitatea purtătorilor de sarcină:

$$g(N) = \Gamma g' N_{tr} \ln\left(\frac{N}{N_{tr}}\right), \quad (23)$$

unde  $\Gamma$  este factorul de confinare optică,  $g'$  coeficientul de amplificare diferențială și  $N_{tr}$  densitatea purtătorilor de sarcină la transparență. Dependența variației indicelui modal de densitatea purtătorilor de sarcină are forma:

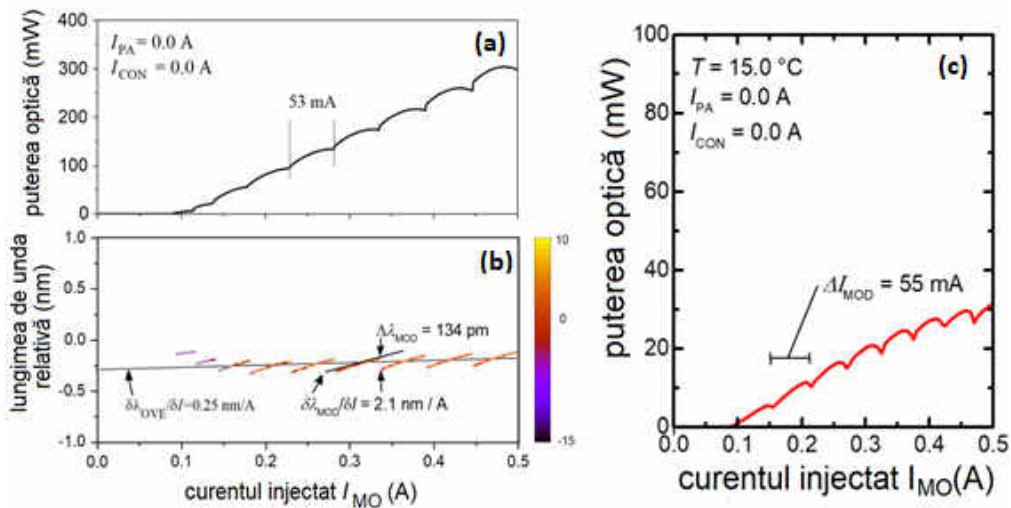
$$\Delta n_N = \tilde{\alpha}_H \frac{\Gamma g' N_{tr}}{k_0} \sqrt{\frac{N}{N_{tr}}}. \quad (24)$$

Funcția  $\Delta n_T(I)$  din (22) descrie modificarea indicelui modal într-o secțiune laser  $k$  datorită încălzirii proprii și încrucișate induse de curenții injectați în secțiunea  $r$ ,

$$\Delta n_{T,k} = \frac{n_g}{\lambda_0} \sum C_k^r \cdot I_r, r, k \in [PA, CON, DBR1, G, DBR2], \quad (25)$$

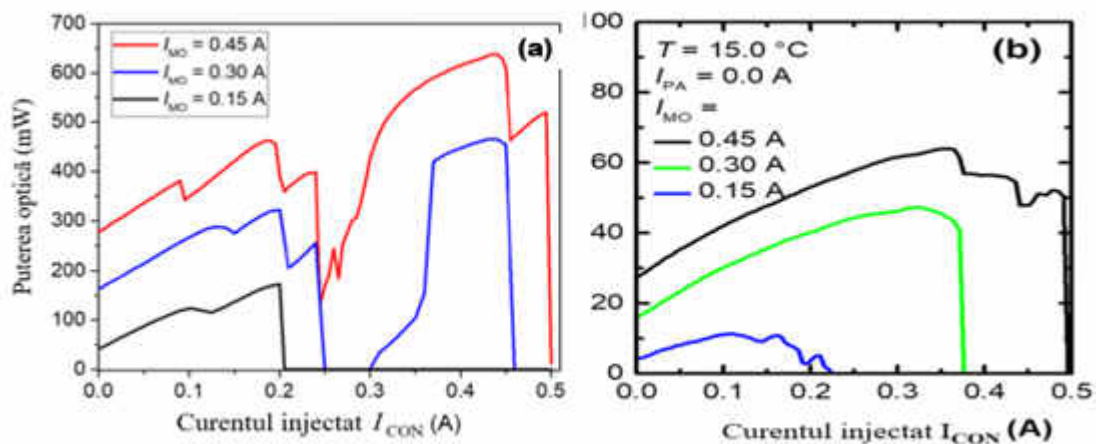
fiind factorul cel mai important care implică tranziții între modurile longitudinale atunci când curentul de injecție este variat. Menționăm că în calculele noastre s-a luat în considerare doar modificările indicilor modali induse de curenții injectați în secțiuni adiacente, care au fost introduse în programul LDSL [18]. În Fig. 9(a) este prezentată dependența puterii optice de ieșire a semnalului la fațeta frontală a secțiunii PA în dependență de curentul injectat în secțiunea de amplificare G a MO. Curentul de prag este de 100 mA, similar cu cel obținut în experiment (vezi

Fig. 9(c). Când curentul secțiunii de amplificare a părții MO este mărit, puterea de ieșire crește și ea având forma tipică a dintelui de ferăstrău cauzată de salturile modurilor longitudinale. Perioada salturilor modurilor este  $\Delta I_{MO} \approx 53 \text{ mA}$ , caracteristică similară celei observate în experiment (Fig. 9(c)). Observăm că pentru intensități mari ale curentului de injecție obținem valori de sute de mW a puterii semnalului la ieșire. Figura 9(b) prezintă o cartografiere optică a densității spectrului pentru variația curentului injectat în regiunea G. Salturile aproape periodice de la un mod cu lungime de undă mai mare la un mod cu lungime de undă mai scurtă ( $\Delta\lambda_{MOD} \approx 0,134 \text{ nm}$ ) sunt observate. Pe lângă salturile de mod, există și o variație a lungimii de undă laser globală, care este determinată în principal de vârful reflectivității secțiunilor DBR. Imediat după valoarea de prag a curentului, lungimea de undă totală scade fiind cauzată de generarea optică a purtătorilor de sarcină în secțiunea DBR, rezultând o scădere a indicelui modal. Pentru curenți mai mari, încălzirea secțiunilor DBR (dată de parametrii DBR)  $C_{DBR1}^G = C_{DBR2}^G$  domină, rezultând o deplasare a lungimii spre valori mai mari. Într-o durată dintre salturile de mod, lungimea de undă a câmpului modal crește odată cu creșterea curentului determinat de coeficientul  $C_G^G$ . Pentru  $I_{MO} = 0.3 \text{ A}$ , panta curbei este  $\delta\lambda_{MOD}/\delta I = 2,1 \text{ nm/A}$  și panta deplasării lungimii de undă totală este  $\delta\lambda_{OVE}/\delta I = 0,25 \text{ nm/A}$ . Aceste valori, precum și distanța dintre modurile longitudinale  $\Delta\lambda_{MOD}$  sunt similare cu cele obținute în experiment.



**Fig. 9. (a) Teorie: puterea de ieșire a semnalului din laser calculată în funcție de curentul injectat în secțiunea de amplificare G a părții MO. (b) Cartografierea pseudo-culoară a densităților spectrale optice (în dB) în funcție de curentul în regiunea G a părții MO. (c) Rezultate experimentale - puterea optică de ieșire în funcție de curentul secțiunii MO. Curentul în secțiunile PA și CON este zero. Reflectivitatea fațetei frontale este egală cu zero.**

Linia neagră din Fig. 10(a) reprezintă dependența puterii de ieșire a semnalului de intensitatea curentului în regiunea CON pentru un curent al regiunii G a părții MO fixată la 0,15 A. Puterea de ieșire crește de la 45 mW la o valoare maximă de 170 mW pentru un curent  $I_{CON}$  de 0,2 A și prezintă un salt la valoarea  $I_{CON} \approx 110$  mA. O creștere suplimentară a curentului  $I_{CON}$  peste 0,2 A conduce la scăderea bruscă a puterii emergente și nu se mai observă emisie laser (colapsul laser), proces similar celui observat în experiment (Fig. 10(b)). Pentru  $I_{MO} = 0,3$  A se observă un comportament similar, dar între curenții  $I_{CON}$  de 0,3 A și 0,45 A are loc din nou emisia laser (linia albastră din Fig. 10(a)). Puterea de ieșire începe să crească de la 160 mW la curentul injectat  $I_{CON} = 0$  și atinge un maxim cu valoarea de 460 mW pentru  $I_{CON} = 0,44$  A. Pentru un curent al secțiunii G a părții componente MO de 0,45 A puterea de ieșire crește de la 280 mW urmat de salturi și neliniarități până la o putere maximă de 640 mW la un curent  $I_{CON}$  de 0,45 A (linia roșie din Fig. 10 (a)). Puterea de ieșire scade până la zero pentru  $I_{CON} = 0,5$  A.



**Fig. 10. (a) Teorie: puterea de ieșire a semnalului din laser în dependență de curentul injectat în secțiunea de control pentru diferiți curenți ai secțiunii G a regiunii MO. (b) Rezultate experimentale: Puterea optică de ieșire în funcție de curentul secțiunii CON. Coeficientul de reflexie a fațetei frontale a laserului este egal cu zero.**

În continuare se propune o versiune simplificată a laserului pentru o coincidență cu cea utilizată în alt experiment a colegilor din Berlin. Doar că secțiunea de amplificare G are o lungime de 0,5 mm este completată de secțiuni DBR de 1 mm și 0,5 mm lungime pe partea stângă și, respectiv, pe partea dreaptă. Regiunea MO este conectată la amplificatorul de putere PA de 4 mm. Întreaga lungime a dispozitivului este de 6 mm, iar lungimea de undă de emisie este de 1120 nm și se deosebește de cea investigată mai sus. Spre deosebire de cazul precedent, în această schemă curenții sunt injectați în secțiunea regiunii MO și amplificatorul de putere PA. Reamintim

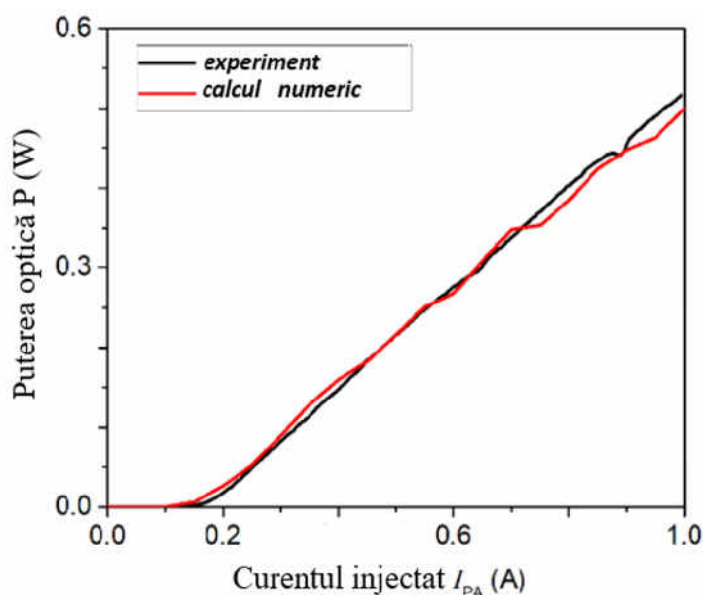
că în cazul precedent curentul din regiunea de amplificare PA este menținut la zero. Structura investigată a fost crescută prin epitaxie în faza de vapori metal-organici. Stratul activ este format dintr-o groapă cuantică dublă InGaAs, încorporată asimetric într-un miez vertical de ghid de undă de 4,8  $\mu\text{m}$  grosime.

Dinamica laserului este analizată folosind ecuațiile (18)–(24) cu valorile parametrilor principali ai laserului utilizați în simulările numerice colectate în Tabelul 1.

**Tabelul 1, Parametrii de bază ai MOPA**

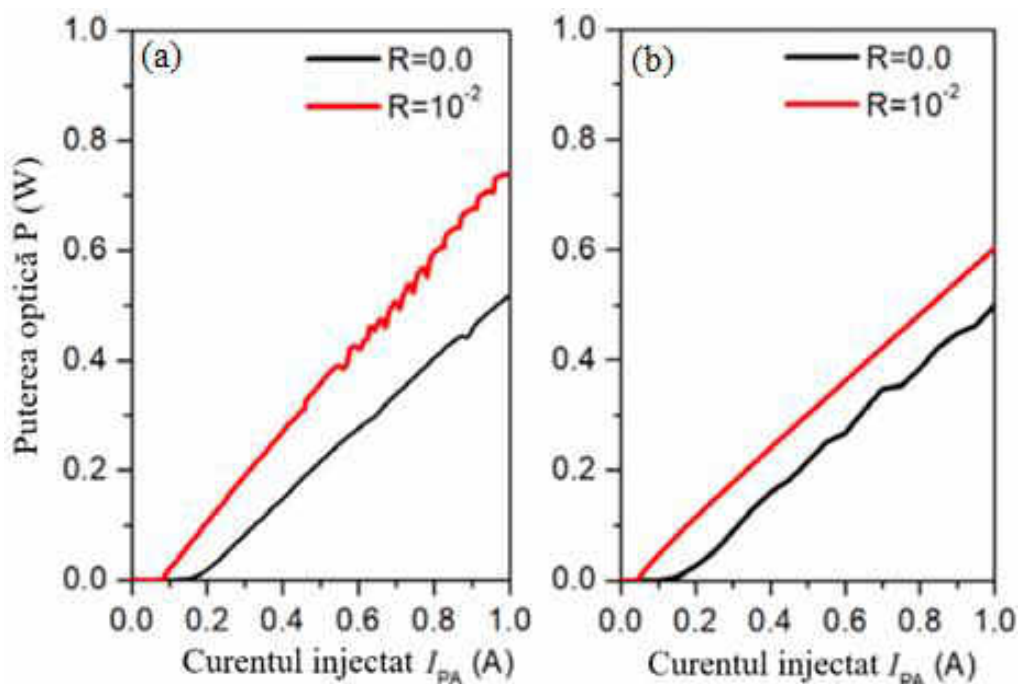
Simbol	Descriere	Unitatea	Valoarea
$\lambda_0$	Lungimea de undă de referință	m	$1,12 \cdot 10^{-6}$
$L_G$	Lungimea secțiunii active	m	$0,5 \cdot 10^{-3}$
$L_{dbr1}$	Lungimea secțiunii DBR	m	$1,0 \cdot 10^{-3}$
$L_{dbr2}$	Lungimea secțiunii DBR	m	$0,5 \cdot 10^{-3}$
$L_{PA}$	Lungimea secțiunii PA	m	$4,0 \cdot 10^{-3}$
$R_r$	Reflectivitatea intensității fațetei din spate		0
$R_f$	Reflectivitatea intensității fațetei din față		0 ... 0,1

În cele ce urmează vom discuta caracteristicile de ieșire ale dispozitivului comparate cu cele experimentale. Experimentul a fost realizat la temperatura camerei. Figura 11 ilustrează atât puterea de ieșire calculată numeric, cât și cea obținută experimental în dependență de curentul injectat în secțiunea de amplificare PA pentru un curent fix de 200 mA injectat în regiunea MO.



**Fig. 11. Dependența puterii semnalului de ieșire din laser de curentul injectat în amplificatorul de putere PA: roșu – calcule numerice, negru – date experimentale. Curentul injectat în regiunea MO este de 200 mA. Coeficientul de reflexie a fațetei frontale este zero ( $R = 0$ ).**

Din aceste caracteristici se poate determina un prag de 0,15 A și o pantă de 0,6 W/A. Această cifră a indicat un acord bun între calculele numerice și rezultatele experimentale. În continuare examinăm aceeași dependență ca în Fig. 12, și anume, ce se întâmplă dacă coeficientul de reflexie al fațetei frontale crește de la zero la  $10^{-2}$ . Figura 12(a) reprezintă caracteristicile putere – curent injectat obținute în experiment.



**Fig. 12. Puterea de ieșire în dependență de curentul de injecție în secțiunea amplificatorului PA pentru două valori ale coeficientului de reflexie ale fațetei frontale. Curentul injectat în secțiunea MO este fixat la 200 mA: (a) experiment, (b) calcule numerice.**

După cum sa menționat anterior, pentru coeficientul de reflexie nul, curentul de prag este de 0,16 A. Pe de altă parte, o creștere a reflectivității fațetei frontale reduce curentul de prag la 0,09 A (curba roșie din Figura 12(a)). Se poate observa o creștere a pantei până la 0,78 W/A. Aceasta se datorează faptului că, pentru o valoare finită a coeficientului de reflexie a fațetei frontale, sistemul acționează ca o cavitate compusă. În plus, pentru curenți mari se observă ondulații în dependența puterii de ieșire de curentul injectat. De regulă, această regiune cu ondulații este caracterizată de instabilități, care nu fac obiectul acestor cercetări. Figura 12(b) reprezintă rezultatele obținute în calculul numeric. Observăm o bună concordanță între experiment și calcule numerice în ceea ce privește micșorarea curentului de prag (0,05 A). Panta curbei crește puțin (0,60 W/A). Menționăm ca ambele rezultate indică o bună concordanță între calcule numerice și rezultatele experimentale.



În acest Capitol s-au prezentat rezultatele investigațiilor numerice ale comportamentului sistemului DBR MOPA monolitic cu mai multe secțiuni. Au fost studiate teoretic 2 structuri similare dar care emit la frecvențe diferite. S-a folosit modelul undelor progresive adaptat dispozitivelor MOPA cu mai multe secțiuni. S-a reușit reproducerea și explicarea caracteristicilor observate în experiment, precum și dependența puterii optice a pre-amplificatorului de curentul de control. S-a demonstrat prezența colapsului emisiei laser cauzat de o dezacordare termică a ambelor secțiuni DBR ale structurii investigate. Simulările numerice arată o tranziție între tipurile de operare ale sistemului MOPA și a unui laser cu multe secțiuni dacă coeficientul de reflexie al fațetei frontale se mărește. Pentru o funcționare stabilă MOPA, o reflectivitate a fațetei frontale de  $10^{-6}$  sau mai mică este necesară pentru buna funcționare a sistemului.

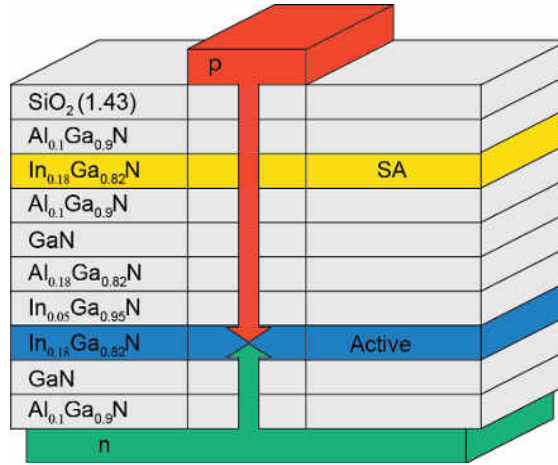
La finalul acestui Capitol menționăm că rezultatele teoretice au fost comparate cu cele experimentale. S-a obținut o concordanță bună între datele experimentale și rezultatele simulărilor numerice. Rezultatele acestui Capitol au fost publicate în lucrările [A1], [A6] și [A9] din Anexa nr. 1.

**În Capitolul 5** este descrisă dinamica diferitor tipuri de lasere care generează autopulsații și serii de impulsuri de scurtă durată. La începutul Capitolului s-au prezentat rezultatele teoretice ale influenței parametrilor laserului de lumină albastră, precum influența grosimii absorbantului de saturație, a lungimii laserului, precum și a duratei de viață a purtătorilor de sarcină asupra autopulsațiilor. Laserul investigat constă din stratul activ InGaN și un absorbant de saturație. Atât stratul activ, cât și absorbantul de saturație sunt compuse din 3 grapi cuantice de tip InGaN. S-a trasat curba bifurcației Hopf calculată pentru regiunea cu autopulsații în planul diferitor parametri menționați mai sus. S-a demonstrat că domeniul lungimilor rezonatorului 400 – 500  $\mu\text{m}$  sunt cele mai favorabile pentru generarea autopulsațiilor cu frecvențe cuprinse între 2 și 3 GHz. În partea a doua a acestui Capitol s-a investigat teoretic o altă structură laser de tip DFB pentru generarea autopulsațiilor și impulsurilor de scurtă durată. Structura investigată a laserelor DFB are un reflector dispersiv pasiv suplimentar. Secțiunile active și pasive sunt integrate împreună într-un cip complex. Reflexia dintre secțiuni este considerată a fi foarte mică. Analiza dinamicii laserului DFB cu reflector pasiv dispersiv s-a efectuat în baza ecuațiilor ratelor. S-a demonstrat că generarea de impulsuri în cazul prezentat în acest Capitol este legat de proprietățile excitabile ale laserului. În regimul excitabil, injectând-se în sistem o mică perturbare, la ieșire din laser s-au obținut impulsuri simetrice ([A2], [A5], [A8], [A11], [A13], [A14] din Anexa nr. 1).

În Fig. 13 este prezentată o configurație a laserului investigat care constă din stratul activ InGaN și un absorbant de saturație. Atât stratul activ, cât și absorbantul de saturație sunt compuse



din 3 gropi cuantice de tip InGaN. Grosimea regiunii active și a absorbantului de saturație este de 18 nm, iar lungimea de undă este de 405 nm. Lungimea stratului activ este de 650 μm.



**Fig. 13. Schema laserului InGaN.**

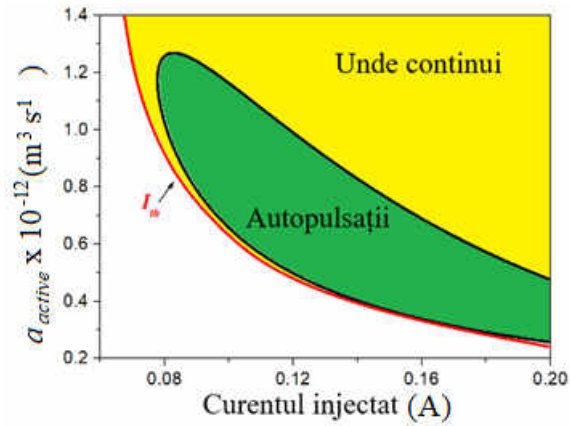
Modelul teoretic utilizat pentru a descrie dinamica laserului InGaN se bazează pe modelul propus în [19],[20]

$$\frac{dS}{dt} = \left[ \frac{\sum_i a_i \xi_i (N_i - N_{gi})}{V_i} - BS - G_{th} \right] S + \frac{M \sum_i a_i \xi_i N_i}{V_i}, \quad (26)$$

$$\frac{dN_i}{dt} = -\frac{a_i \xi_i}{V_i} (N_i - N_{gi}) S - \frac{N_i}{\tau_{si}} + \sum_{j \neq i} \left( \frac{N_j}{T_{ij}} - \frac{N_i}{T_{ji}} + \frac{I_{ji} - I_{ij}}{e} \right), \quad (27)$$

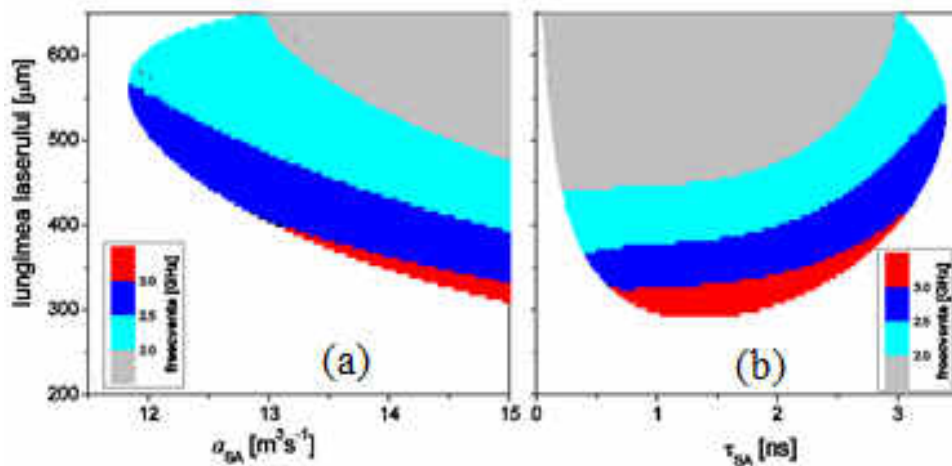
unde  $S$  este numărul fotonilor,  $N_i$  - numărul purtătorilor de sarcină injectați în regiunea  $i$ ,  $a_i$  - coeficientul amplificării diferențiale,  $\xi_i$  - factorul de limitare a câmpului,  $N_{gi}$  este numărul purtătorilor de sarcină transferați prin regiunea  $i$ ,  $\tau_{si}$  reprezintă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

Figura 14 prezintă curba bifurcației Hopf (linia neagră) calculată pentru regiunea cu autopulsații în planul coeficientului de amplificare diferențială în funcție de curentul injectat în regiunea activă. Linia roșie din Fig. 14 separă frontiera dintre regiunile de funcționare ale laserului în modul „off” și „on”.



**Fig. 14. Diagrama bifurcațiilor pentru o lungime a rezonatorului de 650  $\mu\text{m}$ . Regiunea de autopulsații în planul coeficientului de amplificare diferențială în funcție de curentul injectat (regiunea verde). Valoarea de prag a curentului este indicată cu linia roșie. Linia neagră indică bifurcația Hopf.**

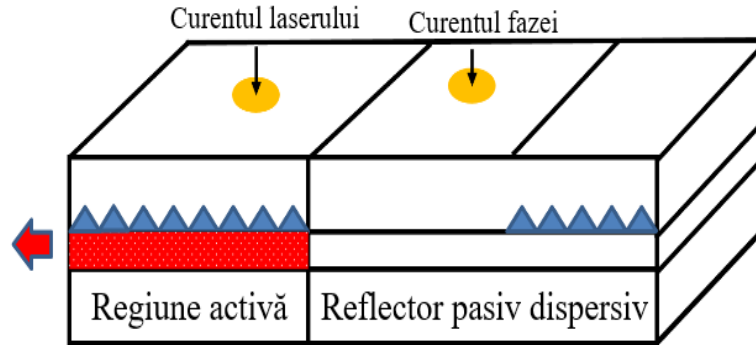
În Fig. 15 sunt ilustrate regiunile de autopulsații în dependența lungimii rezonatorului laserului de (a) coeficientul amplificării diferențiale  $\alpha_{SA}$  și (b) timpul de viață al purtătorilor de sarcină  $\tau_{SA}$  în absorbant. Aceste regiuni au fost obținute pentru parametrii laserului InGaN și intensitatea curentului fixată la 150 mA.



**Fig. 15. Variația frecvenței autopulsațiilor în planul: lungimea rezonatorului în funcție de (a) coeficientul amplificării diferențiale în absorbant  $\alpha_{SA}$  și (b) timpul de viață al purtătorilor de sarcină  $\tau_{SA}$  în absorbant.**

În continuare, analizăm o altă structură laser pentru generarea autopulsațiilor și impulsurilor de scurtă durată. O schiță a structurii investigate a laserelor DFB cu un reflector dispersiv pasiv suplimentar este prezentată în Fig. 16. Curentul de pompaj este aplicat regiunii active. Se mai aplică un curent mic de variație și control al fazei. Secțiunile active și pasive sunt integrate împreună într-un cip complex. Reflexia dintre secțiuni este considerată a fi foarte mică. Este bine cunoscut faptul că dispozitive similare sunt utilizate pentru generarea de autopulsații de

înaltă frecvență cu un singur mod. O aproximare cu un singur mod a fost propusă în [21] și folosit pentru a discuta despre comportamentul de autopulsații și excitabilitate [22]. Aici ne concentrăm atenția asupra generării de impulsuri atunci când laserul funcționează în regim de excitabilitate.



**Fig. 16. Laserul DFB cu reflector pasiv dispersiv adițional în direcție longitudinală. Curentul principal injectat este aplicat secțiunii active. Curentul de control este aplicat secțiunii de fază pentru variația dezacordului  $n_0$ .**

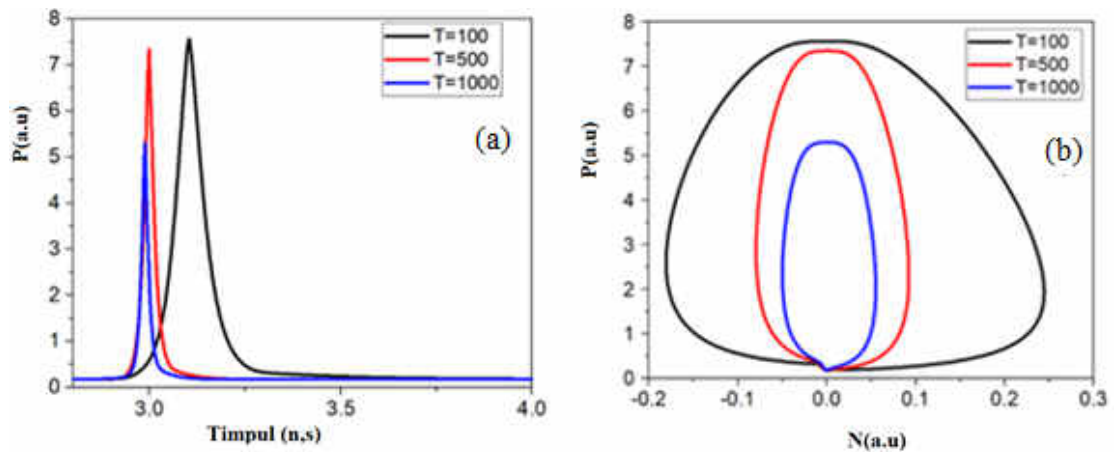
Începem analiza noastră în baza ecuațiilor ratelor [21]

$$\frac{dn}{dt} = J - n - (1 + n)K(n)P + n_{perturb}, \quad \frac{dP}{dt} = TG(n)P, \quad (28)$$

unde  $n$  și  $P$  sunt numărul purtătorilor de sarcină și, respectiv, și al numărului de fotoni.  $\tau$  este timpul adimensional. Parametrul  $J$  este rata relativă de injectare în exces ( $1 < J < 10$ ).  $T$  este raportul dintre durata de viață a purtătorului de sarcină și a fotonului. Funcțiile  $K(n)$  și  $G(n)$  din ecuațiile (28) descriu influența reflectorului asupra dinamicii laserului [21] approximate prin

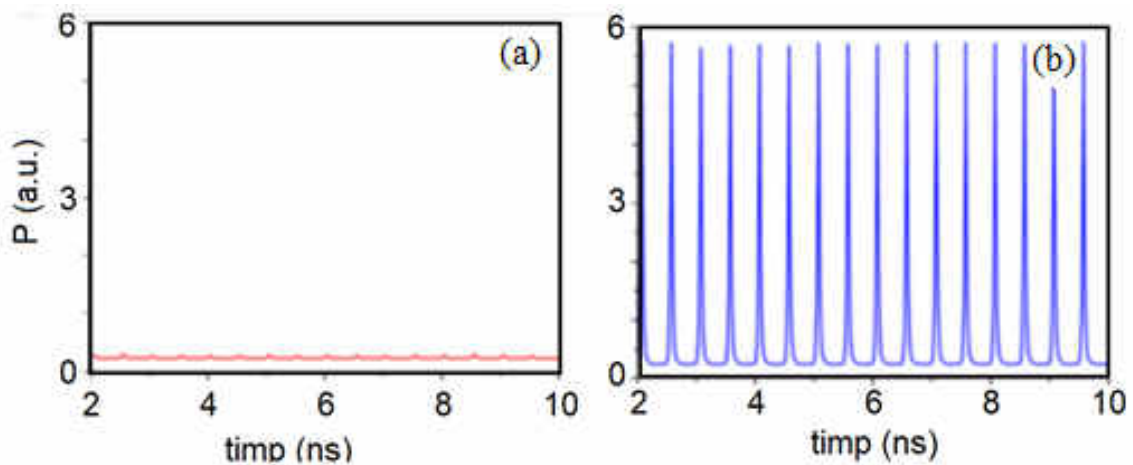
$$K(n) = K_0 + \frac{AW^2}{4(n - n_0)^2 + W^2}, \quad G(n) = n_0 + \alpha \cdot \Delta n \cdot \tanh\left(\frac{n}{\Delta n}\right),$$

unde  $A$ ,  $W$ ,  $K_0$ ,  $n_0$  sunt constante.  $n_0$  este dezacordul dintre vârful de rezonanță al funcției  $K(n)$  și densitatea de prag  $n = 0$ . Acest dezacord poate fi controlat în dispozitivele reale prin reglarea parametrului  $T$ . Amplitudinea perturbației este peste prag. Din această figură distingem natura curentului de fază. Figura 17(a) prezintă evoluția în timp lent-rapidă a numărului de fotoni pentru diferite valori ale parametrului  $T$ . Astfel, pentru  $T = 100$ , numărul fotonilor  $P$  crește și apoi formează o excursie lungă (lentă) în spațiul de fază până revenirea la starea staționară (Fig. 17(b) linia neagră). Pentru valori mari ale parametrului  $T$  excursia lungă în portretul de fază dispare. Pentru valoarea de referință a parametrului  $T = 500$ , se observă impulsul generat de sistem este aproape simetric și ar putea fi folosit în diferite aplicații ca generator de impulsuri scurte.



**Fig. 17. a) Evoluția în timp a numărului de fotoni  $P$  pentru diferite valori ale parametrului  $T$ . b) portretele de fază în planul  $(P - n)$ .**

Figura 18(a) reprezintă dependența numărului de fotoni pentru cazul când perturbația este mai mică decât cea de prag. După cum se observă laserul este în starea “off” cu mici oscilații în jurul stării de echilibru. Figura 18(b) prezintă generarea de impulsuri de către laserul cu reflector pasiv dispersiv sub influența trenului de perturbații cu amplitudini diferite. Impulsurile de curent furnizate cu lățimea impulsului de 0,05 ps au un timp de întârziere de 0,05 ps între ele.



**Fig. 18. Dependența numărului de fotoni  $P$  de timp pentru diferite valori ale perturbației aplicate: (a) laserul în stare “off”; (b) generare de impulsuri.**

În acest Capitol sunt prezentate rezultatele obținute în urma calculelor numerice pentru lasere de diferite tipuri care generează autopulsații și impulsuri de scurtă durată. S-a investigat dinamica laserelor de lumină albastră cu autopulsații. Domeniile autopulsațiilor au fost obținute în planul diferiților parametri ai laserului. Ulterior s-au raportat rezultatele investigațiilor privind generarea de impulsuri de către un laser DFB excitabil cu reflector dispersiv pasiv încorporat. S-a constatat că la perturbații mici nu se observă nici un răspuns al laserului. Pe de altă parte, atunci când perturbația este peste prag, s-a observat răspunsul periodic.

## CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI

Importanța acestei teze constă în prezentarea rezultatelor teoretice, comparativ cu cele experimentale disponibile, ale dinamicii neliniare a laserelor semiconductoare cu diferite topologii.

Concluziile generale sunt următoarele:

1. A fost utilizat modelul ecuațiilor Bloch și ajustat pentru un feedback de la un rezonator Fabry-Perot exterior cu secțiune aer între laser și rezonator. Au fost obținute expresiile pentru valorile de amplitudine ale intensității câmpului laserului și ale vectorului de polarizare, precum și o ecuație algebrică de ordinul trei pentru determinarea densității purtătorilor de sarcină, precum și o ecuație transcendentă pentru determinarea modurilor cavității exterioare. S-a obținut distribuția stărilor staționare ale laserului cu mediu activ puncte cuantice care este complet diferită de cea a feedback-ului convențional. Am descoperit că MCE sunt situate pe forma de „clopot” pentru o putere scăzută de feedback. Feedback-uri mai mari implică apariția unor sateliți în formă de elipse de deformate. (Cap.2, § 2.2-§2.5).
2. Rezultatele investigațiilor teoretice ale comportamentului unui laser DBR supus feedbackului extern se prezintă pentru cazul unei ramuri de feedback lungă. Este demonstrată o concordanță a distribuției stărilor staționare ale modelului complet, în care parametrii sunt dependenți de lungimea de unda versus modelul convențional Lang-Kobayashi. Acest acord între modele este valabil pentru reflectivități mici de  $10^{-3}$ . În modelul propus factorul Henry adaptat, durata de viață a fotonului, puterea feedbackului și indicele grupului modal care intră în modelul LK depind puternic de dezacordul dintre lungimea de undă laser și lungimea de undă Bragg. Stările staționare stabile trec în instabile prin bifurcațiile Hopf. Am demonstrat că laserele DBR cu secțiuni active scurte sunt caracterizate de regiuni instabile largi în comparație cu laserele cu lungimi mari. Atribuim existența unei regiuni largi de instabilitate pentru dezacordul negativ al valorilor ridicate ale factorului Henry caracteristic acestei regiuni. O dezacordare pozitivă implică o reducere a regiunii instabile (factorul  $\alpha$  mic), chiar și dispariția acesteia pentru dezacorduri mai mari. Considerăm că rezultatele prezentate, oferă o bază bună pentru studiile viitoare și, în special, oferă câteva indicii pentru investigații experimentale mai detaliate ale laserelor DBR și aplicațiile acestora ca sursă de lumină stabilă cu un singur mod. (Cap.3, §3.2-§3.5)
3. Rezultatele investigațiilor numerice ale comportamentului a două sisteme DBR MOPA monolitic cu mai multe secțiuni care emit la frecvențe diferite au fost obținute folosind modelul undelor progresive adaptat. S-a reușit reproducerea și explicarea caracteristicilor observate în experiment, precum dependența puterii optice a preamplificatorului de curentul de control.

S-a demonstrat prezența colapsului emisiei laser cauzat de o dezacordare termică a ambelor secțiuni DBR ale structurii investigate, care anterior a fost observat în experiment. Simulările numerice arată o tranziție între tipurile de operare ale sistemului MOPA și a unui laser cu multe secțiuni dacă coeficientul de reflexie al fațetei frontale se mărește. Pentru o funcționare stabilă MOPA, o reflectivitate a feței frontale de  $10^{-6}$  sau mai mică este necesară pentru buna funcționare a sistemului. Rezultatele teoretice obținute sunt în concordanță cu datele experimentale disponibile. (Cap. 4, § 4.2-§4.6).

4. Calculele numerice demonstrează autopulsații și impulsuri de scurtă durată în lasere de diferite tipuri. Domeniile autopulsațiilor în lasere de lumină albastră au fost trasate în planul diferiților parametri de material și geometrici ai laserului. Structura laser este crescută pe direcție verticală, așa-numita „sandwich”. S-a ajuns la concluzia că grosimea absorbantului, precum și durata de viață a purtătorilor de sarcină din absorbant joacă un rol esențial în dinamica laserului, în special, la apariția autopulsațiilor. Autopulsațiile cu frecvențe în intervalul 0,55-5,00 GHz au fost detectate prin calcule numerice. (Cap.5, §5.2-§5.3).
5. Rezultatele investigațiilor unui laser DFB excitabil cu reflector dispersiv pasiv încorporat demonstrează generarea de impulsuri scurte. În cadrul modelului de ecuații ale ratelor, mai întâi s-a căutat un set de parametri pentru care sistemul funcționează în regim excitabil. În regimul excitabil, în sistem s-a injectat o mică perturbare și s-a analizat semnalul la ieșirea din laser. În particular, am obținut impulsuri de formă simetrică. Creșterea raportului dintre durata de viață a purtătorului de sarcină și a fotonului reduce amplitudinea impulsurilor. De asemenea, am injectat în sistem secvența perturbațiilor și am studiat semnalul la ieșire din laser. S-a constatat că la perturbații mici nu se observă niciun răspuns al laserului. Pe de altă parte, atunci când perturbația este peste prag, s-a observat răspunsul periodic. (Cap.5 §5.4-§5.6)

### **Recomandări:**

1. Ajustarea în continuare a programelor soft și algoritmilor de calcul numeric pentru diferite cerințe ale investigațiilor experimentale în domeniul fizicii laserelor;
2. Extinderea investigațiilor în vederea includerii diferitor nelinerități care în prima aproximație au fost excluse;
3. Metodele de control ale emisiei laser utilizată în teză ar putea avea diferite aplicații practice și în alte domenii precum biologie, chimie etc.;
4. Se prezintă a fi interesantă din punct de vedere aplicativ utilizarea laserelor cu autopulsații în medicină.

## BIBLIOGRAFIE

1. DAVID, J. K., Introduction to Semiconductor Lasers for Optical Communications. In: *An Applied Approach*, ISBN 978-3-030-24500-9 ISBN 978-3-030-24501-6 (eBook) <https://doi.org/10.1007/978-3-030-24501-6>
2. YASUHIKO, A., TAKAHIRO, N., JINKWAN, K., Chapter Three-Quantum dot lasers for silicon photonics. In: *Semiconductors and Semimetals, Elsevier*, 2019, vol. 101, pp. 91-138, ISSN 0080-8784, ISBN 9780128188576, <https://doi.org/10.1016/bs.semsem.2019.07.007>
3. CHRISTIAN, O., Dynamics of Quantum Dot Lasers. ISSN 2190-5053 ISSN 2190-5061 (electronic) ISBN 978-3-319-03785-1 ISBN 978-3-319-03786-8 (eBook). DOI 10.1007/978-3-319-03786-8
4. ASADA, M., MIYAMOTO, Y., SUEMATSU, Y., Gain and the threshold of three-dimensional quantum-box lasers. In: *IEEE J. Quantum Electron*, 1986, vol. 22, pp.1915–1921. <https://doi.org/10.1109/JQE.1986.1073149>
5. OTA, Y., Thresholdless quantum dot nanolaser. In: *Opt. Express*, 2017, vol.25, p.19981.
6. 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.
7. BROX, O., BAUER, S., RADZIUNAS, M., WOLFRUM, M., SIEBER, J., KREISSL, J., SARTORIUS, B., WUNSCH, H.-J., High-Frequency Pulsations in DFB-Lasers with Amplified Feedback. In: *IEEE J. of Quantum Electronics*, 2003, vol. 39, pp. 1381-1387.
8. SCHNEIDER, K., MARCENAC, D., Modelling Self-Pulsating DFB Lasers with Integrated Phase Tuning Section. In: *IEEE Journal of Quant. Elect.*, 2000, 36, p. 1026-1034.
9. BANDELOW, U., WUNSCH, H.-J., SARTORIUS, B., Dispersive self Q-switching in DFB-lasers: theory versus experiment. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1997, vol. 3, pp. 270-278.
10. Vu, T.N., KLEHR, A., SUMPFF, B., WENZEL, H., ERBERT, G., TRÄNKLE, G., Wavelength stabilized ns-MOPA diode laser system with 16 W peak power and a spectral line width below 10 pm Semicond. In: *Sci. Technol.*, 2014, vol. 29, no. 035012.
11. AUST, R., Mode Selection and Tuning Mechanisms in Coupled-Cavity Terahertz Quantum Cascade Lasers. In: *Optical and Quantum Electronics*. vol. 48. 2016, nr. 2, 109.
12. LUEDGE, K., Nonlinear laser Dynamics - From Quantum Dots to Cryptography, (*WILEY-VCH Weinheim, Weinheim, 2012*), chap. 1, p. 3-34.
13. TRONCIU, V., WERNER, N., WENZEL, H., WÜNSCH, H.-J. Feedback sensitivity of detuned DBR semiconductor lasers. In: *IEEE J. Quantum Electron*. 2021, vol. 57, p. 1–7.

14. WENZEL, H., GUTHER, R., SHAMS-ZADEH-AMIRI, R., BIENSTMAN, P., A comparative study of higher order Bragg gratings: Coupled-mode theory versus mode expansion modeling. In: IEEE J. *Quantum Electron.*, vol. 42, no. 1, pp. 64–70, 2005.
15. SIEBER, J., ENGELBORGH K., T. LUZYANINA, G., SAMAEY, R., D., DDE-biftool manual-Bifurcation analysis of delay differential equations, 2016 <https://arxiv.org/pdf/1406.7144.pdf>.
16. TROPPEZ, U., KREISSL, J., Designs break bandwidth record. In: *Nature Photonics*, vol. 15, no. 1, pp. 4–5, 2021.
17. ZINK, C., MAAßDORF, A., FRICKE, J., RESSEL, P., MAIWALD, M., SUMPFF, B., ERBERT, G., TRÄNKLE, G., Diffraction limited 1064 nm monolithic DBR-master oscillator power amplifier with more than 7 W output power. In: *Proc. SPIE*, 2018, 10553, 105531C.
18. RADZIUNAS, M., WÜNSCHE, H.J., Multisection lasers: longitudinal modes and their dynamics. In: *Piprek, J. Optoelectron Devices*, 2005, pp. 121–150.
19. TRONCIU, V.Z., YAMADA, M., TOMOKI, M., SHIGETOSHI, O., TOSHIYUKI, I., MOTOTAKA, K. Self-pulsation in an InGaN laser - theory and experiment. In: IEEE J. *Quantum Electronics*, 2003, vol. 39, pp. 1509-1514.
20. YAMADA, M., A theoretical analysis of self-sustained pulsation phenomena in narrowband semiconductor lasers. In: IEEE J. *Quantum Electron.*, 1993, Vol. 29, pp. 1330–1336.
21. TRONCIU, V., WUENSCH, H.-J., SIEBER, J., SCHNEIDER, K., HENNEBERGER, F. Dynamics of single mode semiconductor lasers with passive dispersive reflectors. In: *Optics Communications*, 2000, vol.182 (1-3), pp. 221-228.
22. TRONCIU, V., WUENSCH, H.-J., SCHNEIDER, K., RADZIUNAS, M. Excitability of laser with integrated dispersive reflector. In: *SPIE Proceedings, Physics and Simulation of Optoelectronic Devices IX*, 2001, vol.4283.

#### **Anexa 1. Lista publicațiilor la tema tezei**

##### **Articole în reviste internaționale cotate ISI și SCOPUS:**

- [A1] TRONCIU, V., GRIGORIEV, E., ZINK, C., WENZEL, H.. Characteristics of monolithic multisection distributed-Bragg-reflector master-oscillator power-amplifiers. In: *Optical and Quantum Electronics*, 2022, nr. 9 (54), p. 0. ISSN 0306-8919. DOI: 10.1007/s11082-022-03953-9. Disponibil: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11082-022-03953-9> (WoS IF: 2.794)



- [A2] **GRIGORIEV, E.**, RUSU, S., TRONCIU, V., New Characteristics of Blue Self-pulsating InGaN Lasers, 2023 *IFMBE Proceedings*, 20-23 septembrie 2023, Chişinău. Chişinău: Ediția 6, pp. 59, ISBN: 978-9975-72-773-0. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-42775-6> (SCOPUS)
- [A3] **GRIGORIEV, E.**, TRONCIU, V., Investigation of Dynamical Properties of a Laser with Incorporated DBR Section Under the Influence of External Optical Feedback, 2022 *IFMBE Proceedings*, 3-5 noiembrie 2021, Chişinău. Chişinău: Pontos, 2022, Ediția 5, pp. 439-447. ISSN 16800737. DOI: 10.1007/978-3-030-92328-0\_57. Disponibil: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-92328-0\\_57](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-92328-0_57) (SCOPUS).
- [A4] **GRIGORIEV, E.**, RUSU, S., TRONCIU, V., Influence of Double Feedback on Stationary States of Quantum Dots Lasers, 2022 *IFMBE Proceedings*, 3-5 noiembrie 2021, Chişinău. Chişinău: Pontos, 2022, Ediția 5, pp. 3-10. ISSN 16800737. DOI: 10.1007/978-3-030-92328-0\_1. Disponibil: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-92328-0\\_1](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-92328-0_1) (SCOPUS).

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

- [A5] ANDRONIC, S., **GRIGORIEV, E.**, TRONCIU, V., Generation of high amplitudes pulses with excitable DFB lasers and an integrated dispersive reflector, 2022 *Journal of Engineering Sciences*, 2022, vol. 29, nr. 1, pp. 17-22. ISSN 2587-3474. DOI: 10.52326/jes.utm.2022.29(1).02. Disponibil: [https://jes.utm.md/2022/03/19/10-52326-jes-utm-2022-29\\_1\\_02/](https://jes.utm.md/2022/03/19/10-52326-jes-utm-2022-29_1_02/) (Categoria B+).
- [A6] **GRIGORIEV, E.**, TRONCIU, V., WERNER, N., WENZEL, H., The influence of a residual reflectivity at the front facet of a multisection master-oscillator power-amplifier, 2022 *Journal of Engineering Sciences*, 2022, vol. 29, nr. 2, pp. 62-67. ISSN 2587-3474. DOI: 10.52326/jes.utm.2022.29(2).06. Disponibil: <https://jes.utm.md/2022/06/10/10-52326-jes-utm-2022-29-2-06/>(Categoria B+).
- [A7] RUSU, S., **GRIGORIEV, E.**, TRONCIU, V., Stări staționare ale laserului cu mediu activ puncte cuantice cu feedback optic, 2020 *Revista de Știință, Inovare, Cultură și Artă Akademos*, 2020, nr. 2(57), pp. 18-21. ISSN 1857-0461. DOI: 10.5281/zenodo.3989139. Disponibil: <https://doi.org/10.52673/18570461>, ISSN 1857-0461 E-ISSN 2587 – 3687Caterogia B.

**Culegeri de lucrări ale conferințelor naționale cu participare internațională:**

- [A8] **GRIGORIEV, E.**, Investigații ale generării de impulsuri în lasere cu mediu activ gropi cuantice cu absorbant de saturație, 2022 *Conferința tehnico-științifică a studenților, masteranzilor și doctoranzilor*, 29-31 martie 2022, Chişinău, Republica Moldova: Tehnica-UTM, 2022, Vol.1, pp. 39-42. ISBN 978-9975-45-828-3. Disponibil: [https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare\\_articol/161483](https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/161483)

- [A9] **GRIGORIEV, E.**, Caracteristica structurilor DBR MOPA cu mai multe secțiuni, 2021 *Conferința tehnico-științifică a studenților, masteranzilor și doctoranzilor*, 23-25 martie 2021, Chișinău, Republica Moldova: Tehnica-UTM, 2021, Vol.1, pp. 35-37. ISBN 978-9975-45-700-2. Disponibil: [https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare\\_articol/133720](https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/133720)
- [A10] **GRIGORIEV, E.**, Study of stationary states and dynamics of a laser with feedback from external cavities, 2020 *Conferința tehnico-științifică a studenților, masteranzilor și doctoranzilor*, 1-3 aprilie 2020, Chișinău, Republica Moldova: 2020, Vol.1, p. 20. ISBN 978-9975-45-633-3. Disponibil: [https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare\\_articol/106115](https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/106115)
- [A11] **GRIGORIEV, E.**, Studiul dinamicii neliniare a laserelor InGaN de lumină albastră – violetă, 2019 *Conferința tehnico-științifică a studenților, masteranzilor și doctoranzilor*, 26-29 martie 2019, Chișinău, Republica Moldova: 2019, Vol.1, p. 8. ISBN 978-9975-45-588-6. Disponibil: [https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare\\_articol/84254](https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/84254)
- [A12] OLOINIC, T., RUSU, S., **GRIGORIEV, E.**, TRONCIU, V., Comunicarea optica bazata pe haos cu ajutorul laserelor cu puncte cuantice și feedback optic, 2016 *Fizica și tehnologiile moderne*, 25-27 august 2016, Chișinău, Republica Moldova: Universitatea Tehnică a Moldovei, 2016, Ediția a 22-a, pp. 78-83. Disponibil: [https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare\\_articol/156675](https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/156675)

#### **Teze la foruri științifice conferințe internaționale**

- [A13] **GRIGORIEV, E.**, TRONCIU, V., The seventh edition of the International Colloquium 'Physics of Materials' - PM-7, University POLITEHNICA of Bucharest, in collaboration with The Romanian Academy of Scientists on November 10-11, 2022. Disponibil:
- [A14] ANDRONIC, S., **GRIGORIEV, E.**, TRONCIU, V., Generation of Pulses with Excitable DFB Laser with Dispersive reflector, 2021 *Electronics, Communications and Computing: IC|ECCO-2021*, Ed. 11, 21-22 octombrie 2021, Chișinău, Republica Moldova: Technical University of Moldova, 2021, Editia 11, p. 35. ISBN 978-9975-45-776-7. Disponibil: [https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare\\_articol/154860](https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/154860)
- [A15] **GRIGORIEV, E.**, RUSU, S., TRONCIU, V., Influence of Double Feedback on Stationary States of Quantum Dots Lasers, 2021 *Nanotechnologies and Biomedical Engineering*, Ed. 5, 3-5 noiembrie 2021, Chișinău: Pontos, 2021, Ediția 5, R, p. 60. ISBN 978-9975-72-592-7. Disponibil: [https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare\\_articol/142325](https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/142325)
- [A16] **GRIGORIEV, E.**, TRONCIU, V., Investigation of Dynamical Properties of a Laser with Incorporated DBR Section Under the Influence of External Optical Feedback, 2021 *Nanotechnologies and Biomedical Engineering*, Ed. 5, 3-5 noiembrie 2021, Chișinău: Pontos, 2021, Ediția 5, R, p. 97. ISBN 978-9975-72-592-7. Disponibil: [https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare\\_articol/142591](https://ibn.idsi.md/ro/vizualizare_articol/142591)

## ADNOTARE

La teza „**Proprietățile laserelor semiconductoare cu mai multe secțiuni și feedback optic exterior**”, prezentată de Eugeniu Grigoriev pentru conferirea gradului de doctor în științe fizice la specialitatea 131.03 „Fizică statistică și cinetică”. Chișinău, 2025.

**Structura tezei** include: introducere, 5 capitole, concluzii generale și recomandări. Teza se expune pe 137 pagini, bibliografia care constă din 136 titluri, 3 tabele și 64 figuri. Rezultatele prezentate în teză sunt publicate în 16 lucrări științifice.

**Cuvinte cheie:** lasere semiconductoare, bifurcații, dinamica complexă, feedback optic, MOPA, lasere DFB și DBR, puncte cuantice.

**Domeniul de studiu:** Fizica laserelor.

**Scopul tezei:** dezvoltarea și extinderea studiului teoretic al dinamicii neliniare a laserelor semiconductoare cu multi-secțiuni sub influența feedback-ului optic exterior, precum și prezentarea de noi dispozitive cu diferite topologii și stabilirea criteriilor de utilizare a lor în diferite domenii precum, comunicarea optică, spectroscopie, metrologie cuantică, medicină, etc.

**Obiectivele:** Ajustarea modelului teoretic al laserului semiconductor cu mediu activ puncte cuantice la acțiunea unui feedback optic provenit de la un rezonator Fabry Perot exterior. Elaborarea teoriei laserelor cu reflectoare Bragg distribuite DBR care permit funcționarea în regimul unui singur mod longitudinal cu o lățime a liniei spectrale îngustă, care se află sub influența feedback-ului optic extern. Elaborarea unui model nou cu parametri geometrici și de material dependenți de lungimea de undă a modului primar. Studiul comportamentului dispozitivelor de putere înaltă cu emisie spectrală în bandă îngustă și difracție spațială limitată, așa numitele amplificatoare de putere cu oscilator master integrat monolitic (MOPA). Determinarea mecanismului influenței pompajului dintr-o secțiune asupra secțiunilor alăturate prin încălzirea termică. Investigarea teoretică a colapsului emisiei dispozitivului MOPA observat experimental. Compararea rezultatelor teoretice cu cele experimentale disponibile. Studiarea dinamicii diferitor tipuri de lasere care generează autopulsații și serii de impulsuri de scurtă durată.

**Noutatea și originalitatea științifică a rezultatelor:** A fost aplicat un model teoretic pentru structura laserului cu puncte cuantice cu feedback dublu și secțiune aer între rezonatoare. Acest model permite obținerea distribuției stărilor staționare a modurilor cavității exterioare în planul diferitor parametri. S-a elaborat teoria laserelor cu reflectoare DBR în regim de funcționare a unui singur mod longitudinal cu o lățime a liniei spectrale îngustă, având parametrii principali ai laserului dependenți de lungimea de undă a modului primar. A fost studiat teoretic mecanismul influenței pompajului din secțiunea PA asupra secțiunii MO prin încălzirea termică a unui dispozitiv multisețional MOPA. A fost confirmat teoretic colapsul emisiei dispozitivului MOPA observat experimental. S-a studiat comportamentul cu atopulsații și de generare a impulsurilor scurte a diferitor tipuri de lasere. S-a determinat mecanismul de generare a impulsurilor de scurtă durată a unui laser de tip DFB.

**Problema științifică soluționată** constă în propuneri de noi structuri - laser cu mediu activ gropi și puncte cuantice, cu proprietăți controlabile. În rezultatul simulărilor numerice s-au obținut parametri pentru funcționarea adecvată a sistemelor analizate cu utilizare ulterioară în diferite domenii precum spectroscopie, comunicații, medicină, etc.

**Semnificația teoretică și aplicativă:** În lucrare sunt elaborate modele adaptate teoretic la noi structuri laser cu puncte cuantice și gropi cuantice cu feedback optic și diverse secțiuni. Aceste modele și rezultate teoretice facilitează realizarea experimentală a dispozitivelor studiate în teză pentru îmbunătățirea caracteristicilor lor.

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

## SUMMARY

to the thesis „**Properties of multi-section semiconductor lasers under external optical feedback**“, presented by Eugeniu Grigoriev for the conferment of the degree of doctor in physical sciences in the specialty **131.03 „Physics of statistics and kinetics”**. Chisinau, 2025.

**Dissertation structure** includes: introduction, 5 chapters, general conclusions and recommendations. The thesis is presented on 137 pages, the bibliography which consists of 136 titles, 3 tables and 64 figures the results presented in the thesis are published in 16 papers.

**Keywords:** Semiconductor lasers, bifurcations, complex dynamics, optical feedback, MOPA, DFB lasers, DBR lasers.

**Fields of study:** Physics of lasers.

**Aim of the work:** The development and expansion of the theoretical study of the nonlinear dynamics of semiconductor lasers with active medium pits and quantum dots, as well as the presentation of new devices with different topologies and the establishment of their fields of use in different fields such as optical communication, spectroscopy, quantum metrology, etc.

**The objectives:** Adjustment of the theoretical model of the semiconductor laser with active medium quantum dots to the action of an optical feedback originating from an external Fabry Perot resonator. Development of the theory of DBR distributed Bragg reflector lasers that enable operation in the regime of a single longitudinal mode with a narrow spectral linewidth, which is under the influence of external optical feedback. New model having the main parameters dependent on the wavelength of the primary mode. Study of the behaviour of high-power devices with narrow-band spectral emission and limited spatial diffraction, the so-called monolithic master integrated oscillator power amplifiers (MOPA). Determination of the mechanism of the influence of pumping from the PA section on the MO section through thermal heating. Theoretical investigation of experimentally observed MOPA device emission collapse. Comparison of theoretical and experimental results. Studying the dynamics of different types of lasers that generate self-pulsations and bursts of short duration pulses.

**Novelty and scientific originality:** A theoretical model was applied for the structure of the quantum dot laser with double feedback and air section between the resonators. This model allows obtaining the distribution of the stationary states, that is, the modes of the external cavity in the plane of different parameters. The theory of lasers with DBR reflectors in the mode of operation of a single longitudinal mode with a narrow spectral line width was developed, having the main parameters of the laser dependent on the wavelength of the primary mode. The mechanism of the influence of pumping from the PA section on the MO section through thermal heating of a multi-section MOPA device was theoretically studied. It was theoretically confirmed the collapse of the MOPA device emission observed experimentally. The self-pulsation and short pulse generation behaviour of different types of lasers was studied. The mechanism of generating short duration pulses of a DFB type laser was determined.

**The solved scientific problem:** consists in proposals of new laser structures, with active medium both pits and quantum dots, with controllable properties. As a result of the numerical simulations, parameters were obtained for the proper operation of the analysed systems with use in spectroscopy, optical communication, medicine, etc.

**Theoretical significance and practical value of the work:** In this work, the models are developed theoretically adapted to new laser structures with quantum dots and quantum pits with optical feedback and various sections. Facilitates the experimental realization of the devices studied in the thesis to improve their characteristics based on the theoretical results obtained in the thesis.

**The implementation of the scientific results:** the studies presented in this thesis were successfully implemented within the project of State Programs #20.80009.5007.08.

**GRIGORIEV EUGENIU**

**PROPRIETĂȚILE LASERELOR SEMICONDUCTOARE CU MAI MULTE SECȚIUNI  
ȘI FEEDBACK OPTIC.**

**131.03 – FIZICĂ STATISTICĂ ȘI CINETICĂ**

**Rezumatul științific al tezei de doctor în științe fizice**

---

Aprobat spre tipar 14.02.25

Formatul hârtiei 60x84 1/16

Hârtie offset. Tipar RISO

Tirajul 50 ex.

Coli de tipar 2.25

Comanda nr. 23

---

UTM, 2004, Chișinău, bd. Ștefan cel Mare 168

Editura Tehnica UTM

MD2045, Chișinău, str. Studenților 9/9

@ UTM --- 2025