

Sincronizarea laserelor semiconductoare cu mediu activ puncte cuantice

Tatiana OLOINIC, Constantin PÎRȚAC, Spiridon RUSU, Vasile TRONCIU
 Departamentul Fizica, Universitatea Tehnică a Moldovei, Chișinău, Moldova
 tatiana.oloinic@fiz.utm.md

Abstract — În această lucrare sunt cercetate proprietățile de sincronizare ale laserelor cu puncte cuantice sub influența feedbackului optic extern de la 4 cavități. S-a demonstrat că datorită influenței unui astfel de feedback, în condiții adecvate, sistemul manifestă un comportament haotic puternic. Comportamentul dinamic al unui laser cu un singur mod este studiat în termenii modelului ecuației Bloch. S-au obținut condițiile adecvate pentru comportamentul haotic și pentru sincronizări. S-a demonstrat existența efectului influenței parametrilor relevanți ai dispozitivului asupra proprietăților de sincronizare.

Cuvinte Cheie — lasere semiconductoare cu puncte cuantice, comportament haotic, sincronizare.

I. INTRODUCTION

Laserul semiconductor este un dispozitiv care are o importanță deosebită datorită utilizării lor în diferite domenii precum cercetare științifică, medicină, sisteme CD și DVD și în special în comunicarea optică bazată pe haos [1]. Ținem să menționăm că haosul dinamic este util pentru comunicarea bazată pe haos fiind identificat într-un număr mare de sisteme dinamice.

Cunoașterea comportamentului dinamic al laserului semiconductor care este un sistem neliniar, necesită noi tehnici de control ai emisiei emergente. Cercetările teoretice sunt necesare pentru modelarea dinamicii laserelor și pentru prezicerea evoluției dispozitivelor cu diferite topologii. Utilizarea unui laser semiconductor este inevitabilă fără prezența feedback-ului optic. Acest feedback poate fi realizat de oglinzile rezonatorului laserului sau de reflexia de la alte componente optice din sistem. Este bine cunoscut, că chiar și valorile mici ale feedbackului optic poate influența considerabil comportamentul dinamic al laserului semiconductor [2]. Reflexiile de la oglinzile plasate în exterior, de asemenea, pot cauza diferite fenomene cum ar fi colapsul coerent, fluctuații de mici frecvențe ori autopulsații. Astfel, prin elaborarea modelului teoretic este posibilă analiza teoretică a efectelor ce apar ca urmare a influenței feedback-ului optic și modelarea dinamicii pentru a descrie comportamentul laserului semiconductor cu puncte cuantice [3] – [4]. Prezența punctelor cuantice determină dependențe mai mici de temperatură, reducerea curentului de prag și creșterea coeficientului de amplificare [5] – [6].

În această lucrare sunt utilizate ecuațiile modelului Bloch [7]. Ecuațiile ratei reprezintă un caz particular al ecuațiilor Bloch și se aplică pentru sistemele cu un număr mare de puncte cuantice în regiunea activă. Sunt analizate condițiile optime, pentru ca sistemul propus să funcționeze

în regim haotic. Aceste condiții sunt redată prin diagrame ale bifurcațiilor și analiza evoluției în timp a puterii emergente. De asemenea, sunt prezentate diagrame ale sincronizării a două lasere semiconductoare cuplate unidirecțional.

II. MODELUL TEORETIC

În Figura 1 este prezentată schema laserului semiconductor cu puncte cuantice conectat la mai multe cavități exterioare. Două dintre aceste cavități reprezintă mediul destinat pentru variația fazei, iar altele două sunt cavități aer. $\varphi, \psi, \xi, \theta$ sunt fazele acumulate în fiecare cavitate. R_1, R_2, R_3, R_4 sunt coeficienții de reflexie ai oglinzilor cavităților de variație a fazelor. Cavitățile de variație a fazelor sunt amplasate la distanțe diferite una de alta. $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ reprezintă timpii de întârziere în cavități. Ținem să menționăm, ca valorile curenților aplicați în secțiunile de variație a fazei sunt mult mai mici decât valoarea curentului aplicat în regiunea activă.

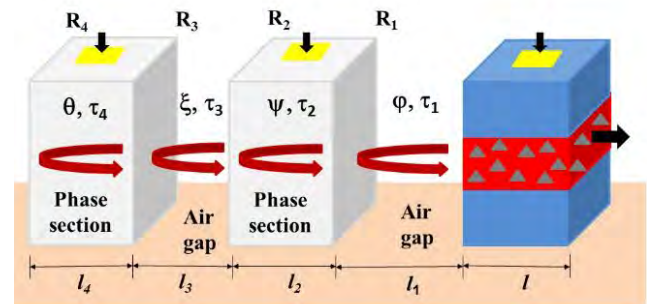


Figura 1: Schema laserului semiconductor cu puncte cuantice sub influența unui feedback optic multiplu.

Comportamentul dinamic al sistemului este descris cu ajutorul ecuațiilor (1) – (3) pentru amplitudinea câmpului electric E , polarizarea P și inversia D în cadrul modelului Bloch [7]:

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dt} = & -kE + 2Z^{OD}\Gamma gP + \frac{Z^{OD}\Gamma\beta}{\tau_{eff}E} \left(\frac{D+1}{2}\right)^2 + \Gamma_1 e^{-i\phi} E(\tau - \tau_1) + \\ & + \Gamma_2 e^{-i\phi - i\xi} E(\tau - \tau_2) + \Gamma_3 e^{-i\phi - i\xi - i\psi} E(\tau - \tau_3) + \\ & + \Gamma_4 e^{-i\phi - i\xi - i\psi - i\theta} E(\tau - \tau_4), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{dP}{dt} = -\Gamma P + gDE, \quad (2)$$

$$\frac{dD}{dt} = -4gEP + \frac{d_0 - D}{T_1} - \frac{1}{\tau_{eff}} \left(\frac{D+1}{2}\right)^2. \quad (3)$$

Rata de atenuare a fotonilor este notată prin k , în timp ce parametrul de atenuare a polarizării corespunde lui γ . τ_{eff} este rata efectivă a emisiei spontane și este dată de factorul Purcell F_P și de rata emisiei spontane τ_{sp} , adică $\tau_{eff} = F_P/\tau_{sp}$. g and β reprezintă factorii de cuplare și de emisie spontană. Factorul β descrie procentul fotonilor emiși spontan în interiorul modului de undă al cavității rezonatoare. Factorul de confinare Γ reprezintă fracțiunea punctelor cuantice din volumul modului care contribuie la emisia laserului. El reprezintă măsura fracțiunii din regiunea activă care amplifică un anumit mod; pentru regimul laserului cu un singur Γ este un parametru constant. Inversul timpului de viață T_1 și intensitatea pompării d_0 depind de densitatea sarcinilor.

Numărul de puncte cuantice din regiunea activa a laserului este notată cu Z^{OD} . Ultimii termeni ai expresiei (1) caracterizează feedback-ul optic în diferite secțiuni ale laserului. $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4$ sunt intensitățile feedback-ului optic.

Pentru calcule numerice utilizăm următoarele valori ale parametrilor de bază: $F_P = 1, \Gamma = 0.01, \beta = 1, Z^{OD} = 1000, d_0 = 0.95, \kappa = 300, \tau_{sp} = 0.001, T_1 = 0.01, g = 48.9, \gamma = 100$. Alți parametri au următoarele valori: $\tau_1 = 0.2$ ns, $\tau_2 = 0.3$ ns, $\tau_3 = 0.4$ ns, $\tau_4 = 0.5$ ns. Parametrii de mai sus sunt considerați a fi identici pentru ambele lasere în cazul sincronizării acestora. Valorile lor sunt utilizate pentru a reprezenta rezultatele în toate diagramele din aceasta lucrare. Menționăm că în cazul procesului de sincronizare dintre două sisteme laser (unul principal și altul secundar) pentru determinarea gradului de sincronizare se va folosi coeficientul funcției de corelare încrucișată definit cu relația $C = \langle P_{master} P_{slave} \rangle / \langle P_{master} \rangle \langle P_{slave} \rangle$.

În Figura 2 este reprezentată evoluția în timp a puterii emergente a), polarizării b) și inversiei c) a laserului semiconductor cu puncte cuantice sub influența feedback-ului optic provenit de la patru cavități exterioare reprezentat în Figura 1. Intensitatea feedback-ului optic este egală cu 25 ns^{-1} . Se observă că toate cele trei marimi puterea emergentă, polarizarea și inversia, pentru acest set de parametri efectuează oscilații haotice. Astfel pentru valori ale intensității feedback-ului optic mai mari ca 25 ns^{-1}

sistemul funcționează în regim haotic adecvat pentru comunicarea optică bazată pe haos.

În cele ce urmează vom examina dinamica laserului în termenii diagramelor de bifurcare. În Figura 3 sunt prezentate rezultate ale bifurcațiilor obținute în rezultatul unui calcul numeric când intensitatea feedback-ului Γ_4 este parametrul de bifurcație care variază. După cum se observă din Figura 3(a) pentru majoritatea valorilor feedback-ului Γ_4 se obține o evoluție haotică a laserului semiconductor pentru $\Gamma_1 = \Gamma_2 = \Gamma_3 = 15 \text{ ns}^{-1}$.

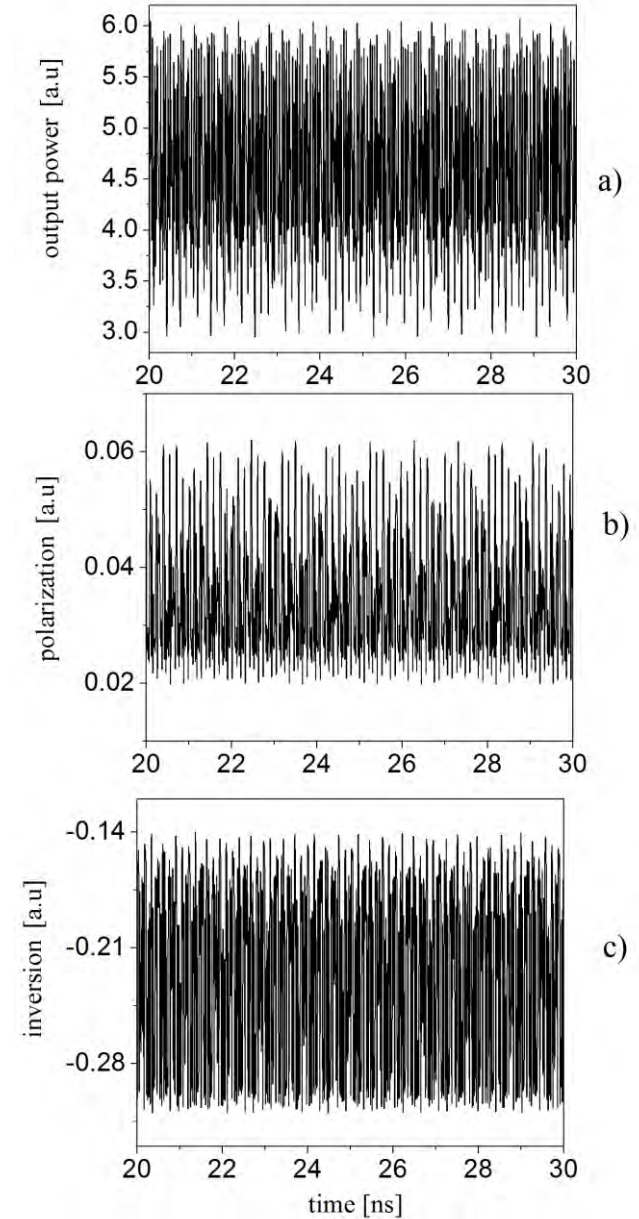


Figura 2: Evoluția în timp a) puterii emergente, b) polarizării și c) inversiei. Parametri: $\phi = \pi/2, \psi = \pi, \xi = \pi/6, \theta = \pi, \Gamma_1 = \Gamma_2 = \Gamma_3 = \Gamma_4 = 25 \text{ ns}^{-1}$.

Mărind intensitatea feedback-ului optic pentru cele trei cavități până la $\Gamma_1 = \Gamma_2 = \Gamma_3 = 20 \text{ ns}^{-1}$, observăm că pentru valori mici ale feedback-ului Γ_4 sistemul generează unde

continue, care pentru valori ale acestuia mai mari de 10 ns^{-1} se transformă în unde haotice (vezi fig.3 (b)).

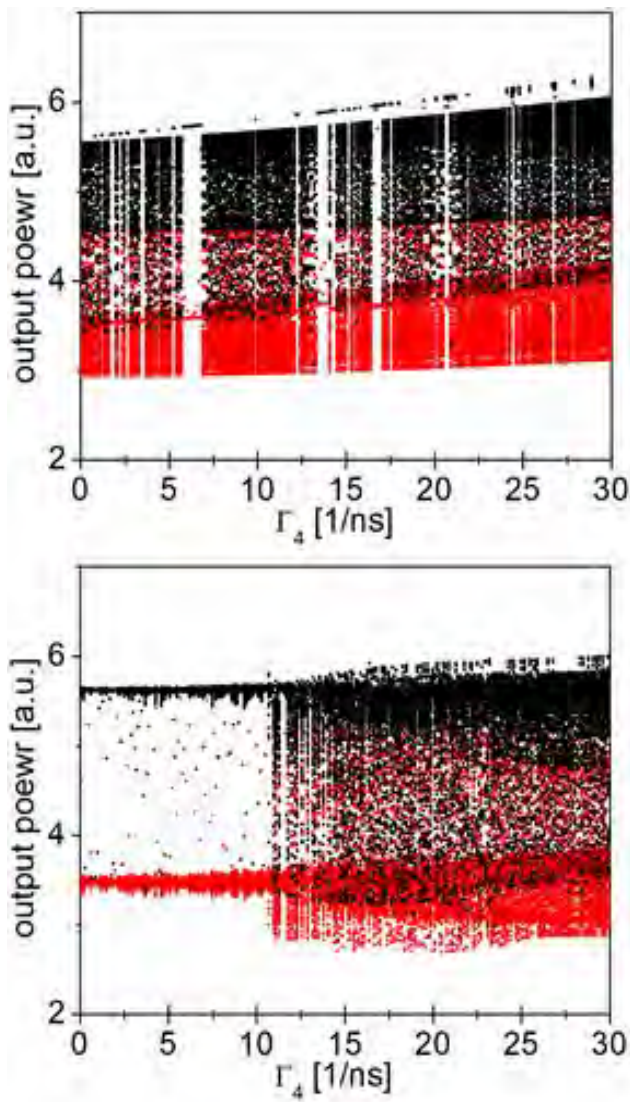


Figura 3. Diagrama bifurcațiilor pentru diferite valori ale intensității feedback-ului a) $\Gamma_1 = \Gamma_2 = \Gamma_3 = 15 \text{ ns}^{-1}$ și b) $\Gamma_1 = \Gamma_2 = \Gamma_3 = 20 \text{ ns}^{-1}$. Fazele au valorile: $\varphi=3\pi/8$, $\psi=0.2\pi/4$, $\xi=\pi/6$, $\theta=0.5\pi/8$.

Diagrama bifurcațiilor pentru diferite valori ale fazelor sistemului, precum și diferite valori ale feedback-ului optic este reprezentată în Figura 4. Se consideră variabilă faza θ din ultima cavitate exterioară. Din Figura 4(a) pentru $\Gamma_1 = \Gamma_2 = \Gamma_3 = \Gamma_4 = 15 \text{ ns}^{-1}$ și unele valori ale fazei θ se obține un comportament haotic al sistemului care trece în regim de unde continue. Apoi se revine iar la evoluție haotică a sistemului. Odată cu mărirea intensității feedback-ului optic $\Gamma_1 = \Gamma_2 = \Gamma_3 = \Gamma_4 = 20 \text{ ns}^{-1}$, regimul haotic apare practic pentru toate valorile existente ale fazei θ cu mici apariții de unde continue. Astfel, sistemul poate avea un comportament haotic adecvat pentru comunicarea optică bazată pe haos într-un domeniu larg al valorilor feedback-ului optic și al fazelor.

În continuare vom studia sincronizarea a două lasere semiconductor de tipul celui din Figura 1, considerând unul fiind principal și altul secundar. Este bine cunoscut că, sincronizarea lor depinde de parametrul de cuplare k . Figura 5 reprezintă diagrama de sincronizare care descrie dependența puterii emergente a laserului semiconductor principal de puterea emergentă a laserului semiconductor secundar pentru diferite valori ale parametrului de cuplare k . În Figura 5(a) observăm o împrăștiere a punctelor în toate direcțiile care descrie lipsa sincronizării pentru $k = 0$. În Figura 5(b) observăm ca pentru $k = 15 \text{ ns}^{-1}$ apare un început de sincronizare, adică o sincronizare parțială. În sfârșit, după cum vedem din Figura 5(c), ca urmare a mării parametrului de cuplare până la $k = 20 \text{ ns}^{-1}$, se stabilește procesul de sincronizare.

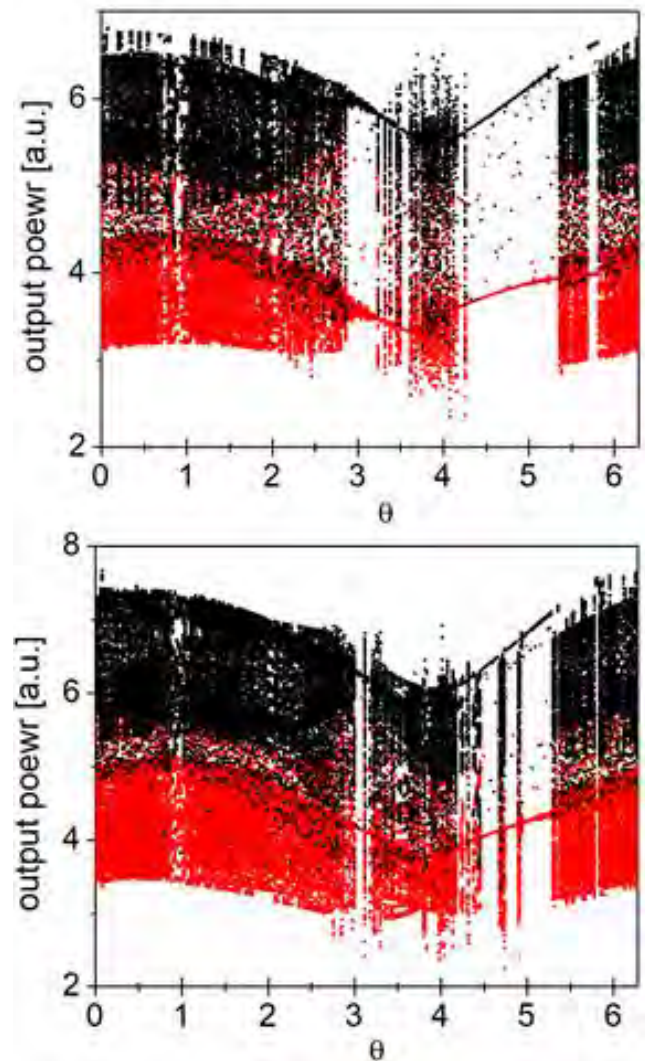


Fig. 4. Diagrama bifurcațiilor pentru fazăultimii cavități θ fiind parametru de bifurcare și următoarele valori ale feedback-ului optic: $\Gamma_1 = \Gamma_2 = \Gamma_3 = \Gamma_4 = 15 \text{ ns}^{-1}$, $\Gamma_1 = \Gamma_2 = \Gamma_3 = \Gamma_4 = 20 \text{ ns}^{-1}$. Celelalte faze au următoarele valori: $\varphi=3\pi/8$, $\psi=0.2\pi/4$, $\xi=\pi/6$, $\theta=0.5\pi/8$.

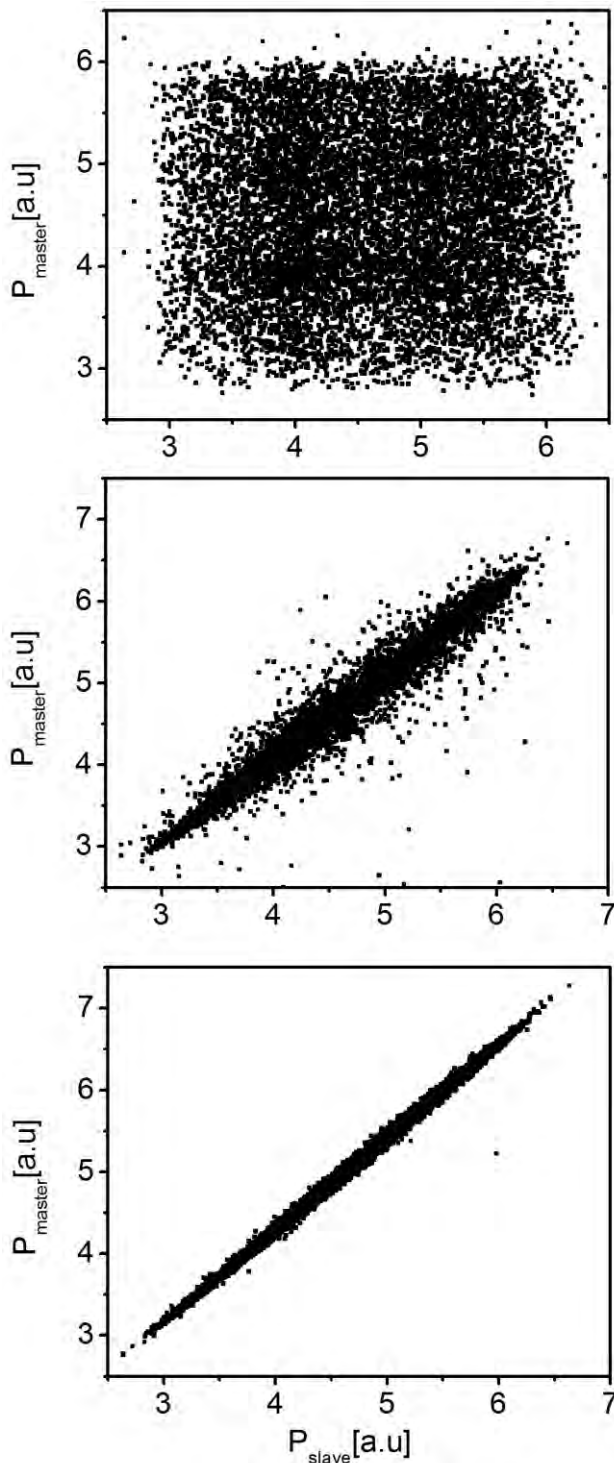


Fig. 5. Diagrama sincronizării pentru diferite valori ale parametrului de cuplare: $k = 0$, $k = 15 \text{ ns}^{-1}$, $k = 20 \text{ ns}^{-1}$. Feedback-ul optic $\Gamma_1 = \Gamma_2 = \Gamma_3 = \Gamma_4 = 20 \text{ ns}^{-1}$, iar fazele au următoarele valori: $\varphi = 3\pi/8$, $\psi = 0.2\pi/4$, $\xi = \pi/6$, $\theta = 0.5\pi/8$.

I. CONCLUZII

În această lucrare am descris comportamentul dinamic al unui laser semiconductor cu puncte cuantice sub influența unui feedback optic provenit de la patru cavități exterioare.

Astfel, a fost propusă o nouă configurație pentru realizarea feedback-urilor multiple. Prezența mai multor cavități externe are ca rezultat un comportament oscilatoriu mult mai complex a sistemului, și în același timp menținând dispozitivul compact. Un avantaj al realizării feedback-ului în sistemul propus în comparație cu cel al feedback-ului optic convențional constă în obținerea unui comportament haotic adecvat pentru comunicarea bazată pe haos pentru lungimi scurte ale cavităților. S-a demonstrat că sistemul funcționează în regim chotic pentru diferite valori ale intensității feedback-ului optic și ale fazelor. Pentru investigațiile numerice au fost utilizate ecuațiile modelului Bloch și s-a arătat că două dintre aceste dispozitive cu parametri identici pot fi sincronizate atunci când ele funcționează în regim haotic într-o configurație master-slave. Procesul de sincronizare devine clar atunci când parametrul de cuplare are valori mai mari de 20 ns^{-1} . Considerăm că această lucrare oferă o bază bună pentru studiile viitoare și, în special, oferă unele indicii pentru investigațiile mai detaliate ale laserelor compacte cu feedback din cavitățile externe multi-secțiune și aplicațiile lor pentru comunicațiile bazate pe haos.

MULȚUMIRI

Autorii mulțumește suportul financiar acordat în cadrul proiectelor 16.80012.02.27F, 14.02.116F/34Ș.

REFERINȚE

- [1] V Z Tronciu, Claudio R Mirasso and Pere Colet, Chaos-based communications using semiconductor lasers subject to feedback from an integrated double cavity, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 41, 155401, 2008.
- [2] B. Krauskopf, D. Lenstra (Eds.), *Fundamental Issues of Nonlinear Laser Dynamics*, AIP Conference Proceedings 548, 2000.
- [3]. B. Globisch, C. Otto, E. Schöll, and K. Ludge, Influence of carrier lifetimes on the dynamical behavior of quantum-dot lasers subject to optical feedback, *Phys. Rev. E* 86, 046201, 2012.
- [4] W. W. Chow and S. W. Koch, Theory of semiconductor quantum dot laser dynamics, *IEEE J. Quantum Electron.* 41, p. 495-505, 2005.
- [5] Y. Arakawa and H. Sakaki, Multidimensional Quantum Well Lasers and Temperature Dependence of Its Threshold Current, *Appl. Phys. Lett.*, 40, p. 939-941, 1982.
- [6] N. Ledentsov, *Nano-Optoelectronics: Concepts, Physics and Devices*, *Prog. Crystal Growth and Charact.*, 35, p. 289, 1997.
- [7] R. Aust, T. Kaul, Cun-Zheng Ning, B. Lingnau, K. Ludge, Modulation response of nanolasers: what rate equation approaches miss, *Opt. and Q. Elect.* 48, 109, 2016