

Rezumatul activității și a rezultatelor obținute în proiect în anul 2025

Cifra proiectului 25.80012.5007.86SE

Denumirea Proiectului Dinamica laserelor cu semiconductoare prin prisma metodelor de învățare automată

În acest proiect ne-am propus investigarea, modelarea și optimizarea generării impulsurilor ultracurte în două tipuri de lasere semiconductoare DFB și InGaN prin metode hibride: simulări numerice avansate și tehnici bazate pe învățare automată (ML). Întrucât sistemele fizice care descriu dinamica acestor lasere pot fi redată riguros prin ecuații diferențiale, una dintre provocările majore o constituie determinarea cu rapiditate și acuratețe a regimurilor dinamice care conduc la apariția impulsurilor cu durate mai mici de 10 ps. Prin acest proiect, se urmărește atât creșterea vitezei de predicție, cât și identificarea unor strategii de control al impulsurilor generate în diferite configurații de lasere semiconductoare. În etapa anului 2025 a acestui proiect cercetarea a fost orientată spre realizarea simulărilor numerice fără utilizarea algoritmilor de învățare automată. Activitățile se împart în două direcții majore. Prima activitate a constat în ajustarea modelelor undelor progresive pentru investigarea generării de impulsuri scurte într-un laser DFB (Distributed Feedback) prin comutarea câștigului. S-a realizat un set de 15 000 de simulări numerice bazate pe ecuații de undă cu propagare bidirecțională pentru câmpurile optice și ecuația de rată pentru densitatea purtătorilor. În cadrul modelului au fost incluse efecte precum compresia câștigului optic, dispersia acestuia, variația indicelui de refracție produsă de variația densității purtătorilor și saturația câștigului la intensități ridicate. Rezultatele obținute arată că, pentru anumite durate ale curentului de injecție, laserul produce un impuls unic, simetric, cu durată de sub 10 ps cu o putere maximă cuprinsă între unu și doi Wați. În aceste condiții, energia impulsului este concentrată aproape integral în prima oscilație care este și unica, ceea ce indică o utilizare eficientă a purtătorilor de sarcină și o disipare minimă a energiei în oscilații ulterioare. Atunci când durata curentului crește peste o anumită limită, am demonstrat mediul activ nu are timp să se descarce complet după primul impuls, iar oscilațiile de relaxare se amplifică, generând maximuri secundari în urma impulsului principal. Această evoluție reduce raportul dintre energia primului impuls și energia totală, ceea ce demonstrează degradarea calității impulsului. După cum s-a menționat mai sus, a fost construită o bază extinsă de date sintetice, folosind aproximativ cincisprezece mii de simulări pentru această structură. Aceasta a permis studierea sistematică a variabilității impulsurilor în funcție de parametri electrici, structurali și optici. O astfel de bază de date reprezintă o resursă rară, deoarece generarea ei implică timp de calcul ridicat și modelare avansată. Fiecare element (eșantion) din setul de date a avut următoarele caracteristici asociate: coeficienți Gamma – factorul de confiment (parametru continuu), kappa – parametru de cuplare (parametru categoric), NQW – numărul de gropi cuantice (parametru categoric) și intensitatea curentului injectat I (parametru continuu). A doua direcție include studiul impulsurilor scurte în laserele semiconductoare InGaN albastru-violet cu absorbant saturabil prin propunerea unei configurații noi în care absorbantul de saturație este situat în regiunile exterioare. Calcule numerice s-au bazat pe modelul ecuației ratelor. S-au efectuat simulări numerice alte 15000 pentru a analiza principalele caracteristici ale impulsurilor, cum ar fi puterea maximă, durata impulsurilor, energia impulsului, energia totală a semnalului la ieșire și raportul acestor energii în funcție de patru parametri structurali și materiali, cum ar fi numărul de gropi cuantice, lungimea absorbantului de saturație, pierderile în dispozitivul complet și reflectivitatea fațetei posterioare. Aceste rezultate vor servi ca baza pentru investigările ulterioare cu ajutorul ML.

Rezumat în limba engleză pentru anul 2025 1 pagină

The aim of this project was to investigate, model and optimise the generation of ultrashort pulses in two types of semiconductor laser DFB and InGaN using hybrid methods involving advanced numerical simulations and machine learning (ML) techniques. As the physical systems that describe the dynamics of these lasers can be accurately represented by differential equations, a key challenge is determining the dynamic regimes that produce pulses with durations shorter than 10 ps rapidly and accurately. The project aimed to increase prediction speed and identify control strategies for pulses generated in different semiconductor laser configurations. At the 2025 stage of the project, research focused on performing numerical simulations without machine learning algorithms. The activities were divided into two main areas. The first activity involved adjusting travelling wave models to investigate pulse generation in a DFB (distributed feedback) laser by switching the gain. A set of 15,000 numerical simulations based on bidirectional wave equations for optical fields and a rate equation for carrier density were performed. The model included effects such as optical gain compression, dispersion and refractive index variation due to carrier density variation, as well as gain saturation at high intensities. The results show that, for certain injection current durations, the laser produces a single, symmetrical pulse with a duration of less than 10 ps and a maximum power of between one and two watts. Under these conditions, the pulse energy is almost entirely concentrated in the first oscillation, which is unique, indicating efficient charge carrier utilisation and minimal energy dissipation in subsequent oscillations. We have demonstrated that when the current duration increases beyond a certain limit, the active medium does not have time to fully discharge after the first pulse. This results in amplified relaxation oscillations and secondary maxima following the main pulse. This reduces the ratio of the energy of the first pulse to the total energy, demonstrating the degradation of pulse quality. As mentioned above, an extensive synthetic database was created using approximately fifteen thousand simulations of this structure. This enabled the systematic study of pulse variability as a function of electrical, structural, and optical parameters. Such a database is a rare resource since generating it involves significant computational time and advanced modelling. Each element (sample) in the dataset was associated with the following characteristics: the confinement factor (continuous parameter) Γ ; the coupling parameter (categorical parameter) K ; the number of quantum wells (categorical parameter) N_{QW} ; and the intensity of the injected current (continuous parameter) I . The second direction of study involves investigating short pulses in blue-violet InGaN semiconductor lasers with a saturable absorber, proposing a new configuration in which the saturable absorber is located in the outer regions. Numerical calculations were based on the rate equation model. A further 15,000 numerical simulations were performed to analyse the main characteristics of the pulses, such as maximum power, pulse duration, pulse energy, total output signal energy and the ratio of these energies, as a function of four structural and material parameters: the number of quantum wells; the length of the saturable absorber; the losses in the complete device; and the reflectivity of the back facet. These results will serve as the basis for further investigations using machine learning.

Conducătorul de proiect  / Tronciu Vasile

Data: _____

LȘ

