

Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду

На 739. седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду одржаној 15.11.2011. године одређени смо за чланове Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације Александра Даничића, мастер инжењера електротехнике, под насловом “Оптимизација квантних каскадних ласера у средњој инфрацрвеној и терахерцној области спектра у јаком магнетном пољу“. Након прегледа добијеног материјала, Наставно-научном већу Електротехничког факултета подносимо следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

Кандидат Александар Даничић је рођен 07.04.1984. године у Београду. Основну и средњу школу завршио је у Београду. Након завршене средње школе уписао је Електротехнички факултет Универзитета у Београду 2003. године, где је дипломирао 2007. године на Одсеку за Физичку електронику са просечном оценом 8,60 одбраном дипломског рада са темом "Напредни модулативни формати за транспортне оптичке мреже високих капацитета". Исте године уписао је дипломске академске (мастер) студије на Групи за наноелектронику, оптоелектронику и ласерску технику, које је завршио 2009. године са просечном оценом 9,60 одбраном мастер рада са темом "Оптимизација квантног каскадног ласера на карактеристичним таласним дужинама у инфрацрвеној области спектра". Од 2009. године запослен је као истраживач приправник у Институту за нуклеарне науке "Винча", у Лабораторији за атомску физику, при чему је 2010. године унапређен у звање истраживач сарадник.

Списак радова објављених у међународним часописима са импакт фактором:

1. J. Radovanović, A. Daničić, V. Milanović, D. Ikonić and Z. Indjin, *Inter-Landau Level Scattering Processes in Magnetic Field Assisted THz Quantum Cascade Lased*, Acta Physica Polonica A, vol. 120, no. 2, 227-230 (2011), IF: 0,467.
2. A. Wiberg, C.-S. Bres, A. Daničić, E. Myslivets and S. Radic, *Performance of Self-Seeded Parametric Multicasting of Analog Signals*, Photonics Technology Letters, vol. 23, issue 21, 1570-1572 (2011), IF: 1,989.
3. A. Daničić, J. Radovanović, V. Milanović, D. Ikonić and Z. Indjin, *Optimization and magnetic-field tunability of quantum cascade laser for applications in trace gas detection and monitoring*, Journal of Physics D – Applied Physics, vol. 43, no. 4, 045101 (2010), IF: 2,109.
4. S. Moro, A. Daničić, N. Alic, B. Stossel and S. Radic, *Noise-induced nonlinear frequency chirping in $\chi^{(3)}$ media*, Optics Express, vol. 18, issue 22, 23413-23419 (2010), IF: 3,753.
5. S. Moro, A. Daničić, N. Alic, N. Usechak and S. Radic, *Widely-tunable parametric*

short-wave infrared transmitter for CO₂ trace detection, Optics Express, vol. 19, issue 9, 8173-8178 (2010), IF: 3,753.

6. A. Daničić, J. Radovanović, V. Milanović, D. Ikonić and Z. Indjin, *Quantum Cascade Laser Design for Tunable Output at Characteristic Wavelengths in the Mid-Infrared Spectral Range*, Acta Physica Polonica A, vol. 117, no. 5, 772-776 (2010), IF: 0,467.
7. A. Woellert, G. Gligorić, M. Škorić, A. Maluckov, N. Raičević, A. Daničić and Lj. Hadžievski, *Modulation Instability of Two-Dimensional Dipolar Bose-Einstein Condensate in a Deep Optical Lattice*, Acta Physica Polonica A, vol. 116, no. 4, 519-521 (2009), IF: 0,433.

Списак радова објављених у зборницима међународних конференција:

1. A.O.J. Wiberg, E. Myslivets, R. Nissim, A. Daničić, D. J. Blessing, B.P.-P. Kuo and S. Radic, "Linearized Parametric Gate for Real-Time Photonic-Sampled Analog-to-Digital Conversion", in *Optical Fiber Communication Conference (OFC)*, Los Angeles, CA, USA, March 2011, paper OThW5.
2. A.O.J. Wiberg, C.-S. Brès, A. Daničić, D.J. Blessing, E. Myslivets, and S. Radic, "Low Distortion and High SNR Analog Signal Multicasting Using Self-Seeded Parametric Mixer", *CLEO 2011*, Baltimore, MD, USA, May 2011, paper CFM7.

Радови објављени у форми апстракта:

3. A. Daničić, J. Radovanović, V. Milanović, D. Indjin and Z. Ikonić, "Modeling of electron relaxation processes and the optical gain in magnetic-field assisted THz quantum cascade laser", *Photonica 2011 – III International School and Conference on Photonics*, Book of Abstracts, pp. 115 (2011), Belgrade, Serbia.
4. A. Daničić, A. Maluckov and M. Stepić, "Strongly localized bright-dark structures in nonlinear fiber arrays with alternating dispersion", *Photonica09 – II International School and Conference on Photonics*, Book of Abstracts, pp. 58 (2009), Belgrade, Serbia.

Списак радова објављених у зборницима домаћих конференција:

1. M. Mirić, N. Raičević, A. Daničić, "Numerical simulation of the modulation response in semiconductor heterostructure lasers", *Zbornik radova, 51. konferencija ETRAN*, STU13-MO-1-4, Herceg Novi – Igalo, Crna Gora, (2007).

2. M. Krstić, A. Daničić, D. Gvozdić, „Signal degradation of directly modulated laser by optical fiber dispersion and nonlinearity,“ *Elektronski zbornik radova*, 15. *konferencija TELFOR*, rad 06-03 (1-4), Beograd, (2007).
3. A. Daničić, J. Radovanović, V. Milanović, V. Spagnolo, G. Scamarcio, "Optimizacija kvantnog kaskadnog lasera za primene u atmosferskom monitoringu u infracrvenoj oblasti spektra", *Zbornik radova*, 53. *konferencija ETRAN*, rad MO2.5. (2009).

Радови објављени у форми апстракта:

4. A. Daničić, J. Radovanović, V. Milanović, "Optimizacija kvantno kaskadnog lasera na karakterističnim talasnim dužinama u infracrvenoj oblasti spektra", *Fotonika 2009 - Teorija i eksperiment u Srbiji*, Zbornik apstrakata, str. 17, (2009), Beograd, Srbija.
5. J. Radovanović, A. Daničić, V. Milanović, D. Indin, Z. Ikonić "Procesi rasejanja između Landauovih nivoa THz kvantno kaskadnih lasera u prisustvu magnetnog polja", *Četvrta radionica fotonike*, zbornik radova, str. 23 (2011), Kopaonik, Srbija.

2. Предмет и циљ истраживања

Квантни каскадни ласери су униполарни полупроводнички извори кохерентног зрачења, чији се рад заснива на унутарзонским прелазима. Захваљујући великој снази која се може остварити и могућностима подешавања таласне дужине у широком опсегу (без промене врсте материјала), овај тип ласера нашао је широку примену у пракси: за детекцију опасних гасова присутних у атмосфери, за неинвазивну медицинску дијагностику, у оптичким комуникацијама за пренос података кроз транспарентне атмосферске прозоре, итд. Посебно је значајан развој квантних каскадних ласера за терахерцни спектрални опсег пошто велики број једињења има карактеристичне спектралне линије у том делу спектра, па овај тип ласера има примену како у науци тако и у комерцијалне сврхе.

Квантни каскадни ласери представљају периодичне структуре, сачињене од великог броја квантних јама и баријера, а основна периода се састоји од активне и инјекторске/колекторске области. Путем спољашњег електричног поља се остварује каскадни режим рада и прелазак електрона у наредну периоду. С обзиром да се механизам генерације фотона заснива на унутарзонским прелазима између енергетских подзона проводне зоне, карактерише их веома кратко време живота електрона на горњем ласерском нивоу. Ово је последица расејања електрона са поменутог нивоа путем емисије лонгитудиналних оптичких фонона, што умањује оптичко појачање ласера. Применом јаког магнетног поља у правцу нарастања структуре ласерске подзоне се дискретизују на серије Ландауових нивоа, чиме се може значајно утицати на нерадијативне прелазе са горњег ласерског нивоа и практично остварити њихово укидање на одабраним вредностима поља. Такав ефекат је посебно значајан у терахерцној области, где расејање може битније деградирати перформансе ласера због малих енергија прелаза.

У дисертацији ће бити разматрана структура квантног каскадног ласера на бази GaAs/AlGaAs са различито дизајнираном активном облашћу. Одређивање оптималног дизајна ове области је од пресудног значаја за функционисање ласера пошто параметри који одређују оптичко појачање, као што су степен инверзне популације између ласерских нивоа и одговарајући матрични елементи прелаза, зависе од профила потенцијала, који се може варирати како би се постигле најбоље емисионе карактеристике. За систематску оптимизацију профила потенцијала користиће се Генетски Алгоритам, који омогућава варирање дебљина слојева и висина потенцијалних баријера, да би се максимизовало оптичко појачање на специфичним таласним дужинама из инфрацрвене области спектра, погодним за детекцију одређених једињења присутних у атмосфери. Посебна пажња ће бити посвећена разматрању утицаја јаког спољашњег магнетног поља на излазне карактеристике ласера, као и ефекат различитих механизма расејања на рад ласера у таквим условима. Када је магнетно поље примењено у правцу нормалном на раван слојева, енергетске подзоне се цепају на строго дискретне Ландауове нивое, чиме се значајно мењају услови за нерадијативне прелазе у структури. У средњој инфрацрвеној области спектра најзначајнији процеси расејања су расејања на лонгитудиналним оптичким и акустичним фононима, а оптичко појачање у активној области се одређује решавањем пуног система нелинеарних брзинских једначина, при чему се у обзир узимају сви релевантни Ландауови нивои. Када је реч о квантним каскадним ласерима који се користе за рад у терахерцном делу спектра, посматрани дизајн структуре ће се битно разликовати од онога који је коришћен за мање таласне дужине. У овом случају се ради о прелазима између енергетски веома блиских стања, а профил структуре подразумева директну спрегу између суседних активних области. Као последица тога, инјекторске/коллекторске области се могу свести на индивидуалне баријере, што значи да се не може изоловано анализирати активна област ласера у апроксимацији јединичне инјекције, већ пуни модел који обухвата довољан број суседних периода. У овом случају се број нивоа неопходних за прорачун појачања у оквиру система брзинских једначина значајно повећава, што нумеричке симулације чини битно сложенијим у односу на претходни спектрални опсег. Посебно је важно нагласити да због малих разлика у енергијама ласерских нивоа, на рад терахерцних квантних каскадних ласера значајно утичу термално активирани нерадијативни губици. Услед ових ефеката радна температура је ограничена, тј. ласери захтевају криогено хлађење. С обзиром да се нерадијативни прелазии могу битно ограничити дискретизацијом енергија путем спољашњег поља, чиме се радна температура повећава, ови ефекти ће бити посебно анализирани у дисертацији. Такође ће бити спроведен и комплетан оптимизациони поступак у односу на излазне карактеристике уз урачунавање додатног механизма расејања на неравнинама спојева, које се код овако дизајнираног ласера мора узети у обзир.

Осврт на релевантне библиографске изворе

Дизајн и оптимизација квантних каскадних ласера, као веома квалитетних извора зрачења у инфрацрвеној области спектра, представља једну од најактуелнијих области у оквиру полупроводничких наноелектронских направа последњих година [1-16]. Посебно је значајно побољшање перформанси терахерцних квантних каскадних ласера, услед недостатка адекватних извора у овом спектралном домену, што је проблем који је широко

заступљен у литератури [17-24].

- [1] J. Faist, F. Capasso, D. L. Sivco, C. Sirtori, A. L. Hutchinson and A. Y. Cho, "Quantum cascade laser", *Science* 264, 553 (1994)
- [2] F. Rossi, "Theory of Semiconductor Quantum Devices: Microscopic Modeling and Simulation Strategies", Springer, 2010
- [3] G. Wysocki, R. Lewicki, R. F. Curl, F. K. Tittel, L. Diehl, F. Capasso, M. Troccoli, G. Hofler, D. Bour, S. Corzine, R. Maulini, M. Giovannini and J. Faist, "Widely tunable mode-hop free external cavity quantum cascade laser for high resolution spectroscopic applications", *Appl. Phys. B* 92, 305 (2008)
- [4] J. B. McManus, J. H. Shorter, D. D. Nelson, M. S. Zahniser, D. E. Glenn and R. M. McGovern, "Pulsed quantum cascade laser instrument with compact design for rapid, high sensitivity measurements of trace gases in air", *Appl. Phys. B* 92, 387 (2008)
- [5] L. Diehl, D. Bour, S. Corzine, J. Zhu, G. Hofler, M. Loncar, M. Troccoli and F. Capasso, "High-power quantum cascade lasers grown by low-pressure metal-organic vapor-phase epitaxy operating in continuous wave above 400K", *Appl. Phys. Lett.* 88, 201115 (2006)
- [6] J. Radovanović J, V. Milanović, Z. Ikonić and D. Indjin, "Application of the genetic algorithm to the optimized design of semimagnetic semiconductor-based spin-filters", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 40,5066 (2007)
- [7] A. Wade, "Quantum cascade lasers in high magnetic fields", Doctoral Dissertation, Florida State University, 2008.
- [8] A. Hugi, R. Maulini and J. Faist, "External cavity quantum cascade laser", *Semicond. Sci. Technol.* 25, 083001 (2010)
- [9] M. Razeghi, "Technology of Quantum Devices", Springer, 2010.
- [10] O. Drachenko, S. Winnerl, H. Schneider, M. Helm, J. Wosnitza, J. Leotin, "Compact magnetospectrometer for pulsed magnets based on infrared quantum cascade lasers", *Rev. Sci. Instrum.* 82 (2011) 033108 (1-6).
- [11] J. R. Freeman, A. Brewer, H.E. Beere, D. A. Ritchie, "Photo-luminescence study of heterogeneous terahertz quantum cascade lasers", *J. Appl. Phys.* 110, 013103 (2011)
- [12] J. Radovanovic, A. Mircetic, V. Milanovic, Z. Ikonic, D. Indjin, P. Harrison and R. W. Kelsall, "Influence of the active region design on output characteristics of GaAs/AlGaAs quantum cascade lasers in a strong magnetic field", *Semiconduc. Sci. Technol.* 21, 215 (2006)
- [13] J. Radovanovic, V. Milanovic, Z. Ikonic, D. Indjin and P. Harrison, "Electron-phonon relaxation rates and optical gain in a quantum cascade laser in a magnetic field", *J. Appl. Phys.* 97, 103109 (2005)
- [14] A. Leuliet, A. Vasanelli, A. Wade, G. Fedorov, D. Smirnov, G. Bastard and C. Sirtori, "Electron-scattering spectroscopy by a high magnetic field in quantum cascade lasers", *Phys. Rev. B* 73, 085311 (2006)
- [15] I. Savic, N. Vukmirovic, Z. Ikonic, D. Indjin, R. W. Kelsall, P. Harrison and V. Milanovic, "Density matrix theory of transport and gain in quantum cascade lasers in a magnetic field", *Phys. Rev. B* 76, 165310 (2007)
- [16] M. P. Semtsiv, M. Wienold, S. Dressler, W. T. Masselink, G. Fedorov and D. Smirnov, "Intervalley carrier transfer in short-wavelength InP-based quantum cascade laser", *Appl. Phys. Lett.* 93, 071109 (2008)
- [17] A. Wade, G. Fedorov, D. Smirnov, S. Kumar, B. S. Williams, Q. Hu and J. L. Reno, "Magnetic-field-assisted terahertz quantum cascade laser operating up to 225K", *Nature Photon.* 3, 41 (2009)

- [18] R.F. Curl, F. Capasso, C. Gmachl, A. A. Kostërev, B. McManus, R. Lewicki, M. Pusharsky, G. Wysocki and F. K. Tittel, "Quantum cascade lasers in chemical physics", Chem. Phys. Lett. 487, 1 (2010)
- [19] S. Kumar, C. W. I. Chan, Q. Hu and J. Reno, "A 1.8-THz quantum cascade laser operating significantly above the temperature of $\hbar\omega/k_B$ ", Appl. Phys. Lett. 95, 14110 (2009)
- [20] L. Schrottke, M. Giebler, M. Wienold, R. Hey and H. T. Grahn, " Compact model for the efficient simulation of the optical gain and transport properties in THz quantum-cascade lasers", Semicond. Sci. Technol. 25, 045025 (2010)
- [21] Y. Petitjean, F. Destic, J.-C. Mollier and C. Sirtori, "Dynamic modeling of terahertz quantum cascade lasers", J. Sel. Topics in Quant. Elect. 17, 22 (2011)
- [22] M. I. Amanti, G. Scalari, R. Terazzi, M. Fischer, M. Beck, J. Faist, A. Rudra, P. Gallo and E. Kapon, " Bound-to-continuum terahertz quantum cascade laser with a single-quantum-well phonon extraction/injection stage" New J. Phys. 11, 125022 (2009)
- [23] D. Burghoff, T. Kao, D. Ban, A. W. Min Lee, Q. Hu, and J. Reno, "A terahertz pulse emitter monolithically integrated with a quantum cascade laser", Appl. Phys. Letters 98, 061112 (2011)
- [24] S. Kumar, "Recent progress in terahertz quantum cascade lasers", J. Sel. Topics in Quant. Elect. 17, 38 (2011)

3. Полазне хипотезе

Полазна хипотеза дисертације је да се променом дизајна активне области квантног каскадног ласера (у средњој инфрацрвеној области) или променом дизајна целе периоде (у терахерцној области) може значајно утицати на излазне перформансе ласера, прецизније, на оптичко појачање на жељеној таласној дужини. Варирањем параметара структуре и систематском оптимизацијом, мења се положај релевантних електронских стања и облик таласних функција, чиме се утиче на вероватноће прелаза путем нерадијативних механизма и степен инверзне насељености ласера. Применом спољашњег магнетног поља у правцу нарастања слојева, постиже се цепање енергетских подзона на строго дискретне Ландауове нивое, чиме се значајно мењају услови за нерадијативне прелазе у структури што омогућава додатну модулацију излазних карактеристика оптимизованог ласера. Ово је нарочито значајно за рад у терахерцној спектралној области где процеси расејања битно ограничавају радну температуру ласера.

4. Научне методе истраживања

Методологија истраживања у оквиру предложене докторске дисертације састојаће се од следећих корака:

- Преглед постојећих резултата у домену развоја и примене квантних каскадних ласера.
- Аналитички приступ који ће се састојати од извођења израза за времена релаксације носилаца на лонгитудиналним оптичким и акустичним фононима, и расејања на неравнинама спојева, са посебним нагласком на случај када је примењено спољашње магнетно поље.
- Формирање детаљног теоријског модела за одређивање оптичког појачања квантног

каскадног ласера који се заснива на пуном систему нелинеарних брзинских једначина које описују расподелу електрона по нивоима структуре.

- Нумеричко истраживање током којег ће бити развијен алгоритам и написан одговарајући програмски код који имплементира претходно развијени теоријски модел и омогућава израчунавање свих потребних брзина релаксације, а затим и решавање система брзинских једначина. Као резултат, овај код ће давати зависност појачања квантног каскадног ласера, укупно време релаксације носилаца са горњег ласерског нивоа и однос површинских густина електрона на горњем и доњем ласерском нивоу у функцији примењеног магнетног поља.

5. Очекивани научни допринос

Основни научни доприноси који се очекују од ове докторске дисертације су:

- Формирање теоријског модела за одређивање брзине расејања електрона услед интеракције са лонгитудиналним оптичким и акустичким фононима, као и при расејању на неравнинама спојева, у случају када на структуру делује спољашње магнетно поље нормално на правац слојева.
- Развијање оптимизационог поступка на бази генетског алгоритма за генерисање оптималних параметара структуре, који обезбеђују максимално оптичко појачање на задатој таласној дужини.
- Развијање одговарајућег алгоритма и програмског кода за решавање комплетног система брзинских једначина у случају када је присутно магнетно поље. Димензије система брзинских једначина (које су нелинеарне у односу на површинске концентрације електрона на Ландауовим нивоима) зависе од јачине магнетног поља, и при малим вредностима поља систем једначина постаје врло захтеван за решавање.
- Проширење теоријског модела и нумеричког алгоритма за случај терахерцних квантних каскадних ласера код који се систем једначина мора формирати на посебан начин јер се код изабраног дизајна морају урачунати интеракције између суседних периода. Број брзинских једначина неопходних за анализу се из тога разлога значајно повећава.

6. План истраживања и структура рада

У првом делу истраживања биће дате теоријске основе и принципи функционисања квантних каскадних ласера, историјат њиховог развоја, примена у разним сферама индустрије, медицине и науке, као и потенцијална примена у безбедносне сврхе, за детекцију токсичних материја у амбијенту.

Други део рада чиниће аналитичка извођења брзина расејања носилаца за различите типове интеракција, где ће посебна пажња бити посвећена расејању на лонгитудиналним оптичким фононима, као и расејању на неравнинама граничних површина у случају терахерцних ласера. Сви поменути типови расејања ће бити анализирани у случају када је на структуру примењено екстерно магнетно поље у правцу нормалном на равни слојева, као и у уобичајеном режиму рада (без магнетног поља).

У наставку ће бити разматрана примена Генетског Алгоритма, као моћне алатке за оптимизацију параметара одабране структуре, са циљем да се одреди најбољи профил активне области (који обезбеђује максимално оптичко појачање) када се ради о средњој инфрацрвеној области спектра или комплетне периоде ласера (када се ради о терахерцној области). Овакав оптимизациони поступак примењује се за генерисање одговарајуће структуре пре њеног излагања дејству спољашњег магнетног поља.

Четврти део рада базираће се на нумеричкој имплементацији тј. примени развијеног програмског кода на решавање система брзинских једначина и прорачун оптичког појачања код различитих структура, добијених у оптимизационом поступку, али и структура које су познате у литератури, ради верификације модела и добијања упоредних карактеристика. Такође ће бити извршена анализа утицаја појединачних механизма расејања на оптичко појачање, у зависности од дизајна активне области и дела спектра инфрацрвеног зрачења у коме дати ласер емитује зрачење.

У финалној фази истраживања биће анализирани могућности за примену и даљи правци истраживања у овој области.

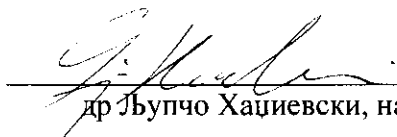
7. Закључак и предлог

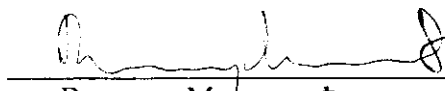
На основу свега изложеног, Комисија сматра да кандидат Александар Даничић, мастер инжењер електротехнике испуњава све формалне и суштинске услове за приступање изради докторске дисертације. Резултати до којих би кандидат требало да дође, имали би значајан допринос у области наноелектронских квантних структура. Стога Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду да кандидату Александру Даничићу одобри израду докторске дисертације под насловом “Оптимизација квантних каскадних ласера у средњој инфрацрвеној и терахерцној области спектра у јаком магнетном пољу”.

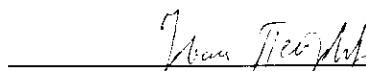
У Београду, 20.12.2011. год.

Чланови Комисије:


др Јелена Радћвановић, ванредни професор


др Љупчо Хаџиевски, научни саветник


др Витомир Милановић, редовни професор


др Јована Петровић, научни сарадник