

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата Николе (Ненада) Вуковића за израду докторске дисертације

Одлуком бр. 5015/13-1 од 16. 11. 2017 године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата дипл. инж. ел. -маст. Николе Вуковића за израду докторске дисертације и научне заснованости теме **"Рискен-Нумедал-Грахам-Хакен нестабилности и само-пулсирање у квантним каскадним ласерима"** (енгл. **"Risken-Nummedal-Graham-Haken instabilities and self-pulsing in quantum cascade lasers"**).

Напомена: дисертација ће бити написана на енглеском језику.

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Никола Вуковић рођен је у Београду 5.5.1989. године где је завршио основну школу као ђак генерације и носилац награда са републичких такмичења из математике. Математичку гимназију завршио је са одличним успехом и на основу награде са републичког такмичења из физике 2008. године, уписао је Електротехнички факултет без полагања пријемног испита. Дипломирао је 2012. на Одсеку за физичку електронику, смер Наноелектроника, оптоелектроника и ласерска техника (НОЛТ) са просеком 9.70, затим је био на двомесечној стручној пракси у Немачкој, на Техничком факултету у Килу. Мастер студије уписао је 2012. године на модулу НОЛТ и завршио их са просечном оценом 10,00 у септембру 2013. Тема мастер рада је „Утицај непараболичности на електронску структуру квантног каскадног ласера“, а ментор је проф. др Јелена Радовановић. Током завршне године основних и током мастер студија био је стипендиста Фонда за младе таленте републике Србије - Доситеја. У октобру 2013. уписао је докторске студије на изборном подручју Наноелектроника и фотоника и у међувремену је положио све испите (10) на докторским студијама са просечном оценом 10,00. Од јануара 2014. године запослен је на Електротехничком факултету у Београду као учесник на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја, а учествовао је и на још неколико међународних пројеката. Током 2015. и 2017. године у оквиру COST акције BM1205 боравио је три пута по месец дана у научној посети код др. Дмитрија Л. Боика у Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique (CSEM) у Нушателу (Швајцарска) и обављао активности везане за пројекте FastIQ и BM1205. Од 1. октобра 2017. године је у звању асистента, а пре тога је био у звањима истраживач-приправник и

истраживач сарадник. Током досадашњег научно-истраживачког рада објавио је 6 радова у часописима са импакт фактором и 15 радова на конференцијама.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Преглед положених испита

У оквиру докторских студија, до подношења захтева за одобрење докторске дисертације, кандидат Никола Вуковић је положио све испите и успешно завршио све обавезе предвиђене планом и програмом докторских студија. Испити које је кандидат положио су:

1. Специјалне функције (оцена: 10, ЕСПБ: 9)
2. Квантна оптика (оцена: 10, ЕСПБ: 9)
3. Функционална анализа и примене (оцена: 10, ЕСПБ: 9)
4. Иновације, трансфер технологије и заштита интелектуалне својине (оцена: 10, ЕСПБ: 6)
5. Простирање оптичких таласа у комплексним срединама (оцена: 10, ЕСПБ: 9)
6. Увод у нелинеарну динамику (оцена: 10, ЕСПБ: 9)
7. Оптимизација и инжењеринг наноструктурних параметара (оцена: 10, ЕСПБ: 9)
8. Моделовање хетероструктурних микроелектронских направа (оцена: 10, ЕСПБ: 9)
9. Моделовање наноструктура (оцена: 10, ЕСПБ: 9)
10. Оптичке особине полупроводничких хетероструктура (оцена: 10, ЕСПБ: 9)

и испунио следеће обавезе:

1. Научно стручни рад (ЕСПБ: 3),
2. Студијски истраживачки рад I (ЕСПБ: 15),
3. Студијски истраживачки рад II (ЕСПБ: 15),

остваривши укупно 120 ЕСПБ и просечну оцену 10,00. Кандидат је такође успешно положио испит о подобности теме и кандидата (докторски испит) пред комисијом у саставу:

1. др Витомир Милановић, професор емеритус, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
2. др Љупчо Хаџиевски, научни саветник, Универзитет у Београду – Институт за нуклеарне науке Винча,
3. др Ненад Цакић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.

Јавно усмено излагање је одржано 16. 11. 2017. године при чему је кандидат добио оцену “задовољно”.

Учешће на пројектима

Никола Вуковић од јануара 2014. године учествује на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја под бројем ИИИ45010 – "Фотоника микро и нано структурних материјала", а учествовао је и на пет међународних пројеката:

- "Terahertz QCL Based Spectrometer for Rapid Detection of Chemical Agents and Explosives", Science for Peace and Security Programme, ref. no. 984068, (од 2014. - 2016.),

- "Ultrafast Infrared Emitter on a Quantum Cascade – FastIQ" (SCOPES 2013-2016: Joint Research Projects), (од 2014. -2017.),
- COST action BM1205– "European Network for Skin Cancer Detection using Laser Imaging", (од 2014. -2017.),
- COST action MP1204–"TERA-MIR Radiation: Materials, Generation, Detection and Applications" (од 2014.-2016.) и
- COST action MP1406– "Multiscale in modelling and validation for solar photovoltaics (MultiscaleSolar)" (од 2015. -)

Списак радова

Радови у врхунским међународним часописима (M21):

1. N. Vuković, J. Radovanović, V. Milanović, D. L. Boiko, "Low-threshold RNGH Instabilities in Quantum Cascade Lasers," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 23, 1200616 (2017)., DOI: 10.1109/JSTQE.2017.2699139, ISSN 1077-260X, импакт фактор 3.971 (2016).
2. N. Vuković, J. Radovanović, V. Milanović, D. L. Boiko, "Analytical expression for Risken-Nummedal-Graham-Haken instability threshold in quantum cascade lasers," *Optics Express* 24, pp. 26911-26929, (2016). ISSN 1094-4087, импакт фактор 3.307 (2016).

Радови у истакнутим међународним часописима (M22):

3. N. Vuković, A. Daničić, J. Radovanović, V. Milanović, and D. Indjin, "Possibilities of achieving negative refraction in QCL-based semiconductor metamaterials in the THz spectral range," *Optical and Quantum Electronics* 47, 883-891, ISSN 0306-8919, (2015) импакт фактор 1.290.
4. N. Vuković, V. Milanović and J. Radovanović, "Influence of nonparabolicity on electronic structure of quantum cascade laser," *Physics Letters A* 378 (2014), pp. 2222-2225, DOI: 10.1016/j.physleta.2014.04.069, ISSN 0375-9601, импакт фактор 1.683 (2014).
5. N. Vuković, J. Radovanović and V. Milanović, "Enhanced modeling of band nonparabolicity with application to mid-IR quantum cascade laser structure," *Physica Scripta T* 162 (2014) 014014 (1-4), DOI:10.1088/0031-8949/2014/T162/014014, ISSN 0031-8949, импакт фактор 1.126 (2014).

Радови у међународним часописима (M23):

6. N. Vuković, J. Radovanović, V. Milanović, D. L. Boiko, "Multimode RNGH instabilities of Fabry - Perot cavity QCLs: impact of diffusion," *Optical and Quantum Electronics* 48, 254 (1-10), 2016. ISSN 0306-8919, импакт фактор 1.055 (2016).

Саопштење са међународног скупа штампано у целини (M33):

7. N. Vuković, A. Daničić, J. Radovanović and V. Milanović, "Conduction-band nonparabolicity and gain calculations for THz Quantum cascade laser in strong magnetic field," Proceedings of 1st International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering IcETRAN Vrnjačka Banja, June 2-5 2014, pp. MOI2. 2. 1-4 (2014).

Саопштење са међународног скупа штампано у изводу (M34):

8. N. Vuković, J. Radovanović, V. Milanović, D. L. Boiko, "Self-pulsing in monolithic and external cavity mid-IR QCLs," International School and Conference on Photonics - PHOTONICA2017, Belgrade 08/2017, Book of Abstracts, p. 130, (2017).
9. N. Vuković, J. Radovanović, V. Milanović, D.L. Boiko, "Self-pulsations in QCLs", International Quantum Cascade Lasers School & Workshop IQCLSW 2016, 4.-9. September 2016, Cambridge UK, Book of Abstracts, p.195-196, (2016).
10. N. Vuković, J. Radovanović, V. Milanović, D. L. Boiko, "Determination of RNGH Round-trip Gain in QCLs," 4th Annual Conference of COST Action MP1204 & SMMO2016 Conference, Lisbon, Portugal, 21.-24. March 2016, Book of Abstracts, P.08, (2016).
11. M. Dubajić, A. Daničić, N. Vuković, V. Milanović, J. Radovanović, "Possibilities of achieving negative refraction conditions in quantum well structures based on cubic nitrides," 4th Annual Conference of COST Action MP1204 & SMMO2016 Conference, Lisbon, Portugal, 21.-24. March 2016, Book of Abstracts, P.23, (2016).
12. N. Vuković, J. Radovanović, V. Milanović, D.L. Boiko, "The Role of Carrier Diffusion in RNGH Instabilities of Quantum Cascade Lasers," Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference, 21-25 June 2015 Munich, Advance programme, p. 202 (2015).
13. N. Vuković, J. Radovanović, V. Milanović, D. L. Boiko, "Influence of Carrier Diffusion on RNGH Instabilities in Semiconductor Lasers," 3rd Annual Conference of COST Action MP1204 & 6th International Conference on Semiconductor Mid-IR Materials and Optics-SMM02015, Book of Abstracts, p. 61, 8-11. April 2015, Prague, Czech Republic (2015).
14. N. Vuković, J. Radovanović, V. Milanović, D.L. Boiko, "Determination of RNGH round-trip gain using bi-orthogonal perturbation approach," International School and Conference on Photonics - PHOTONICA2015, Belgrade 08/2015, Book of Abstracts, p. 126, (2015).
15. A. Danicic, N.Vuković, J. Radovanović, V. Milanović, "Modeling and applications of Quantum Cascade in external magnetic field," International School and Conference on Photonics - PHOTONICA2015, Belgrade 08/2015, Book of Abstracts, p. 38, (2015).
16. N. Vuković, A. Daničić, J. Radovanović and V. Milanović, "Effects of Conduction-band Nonparabolicity on Electronic Structure and Gain of THz Quantum Cascade Laser in Magnetic field," International quantum cascade lasers school & workshop 2014 , 7-14. September 2014, Policoro, Italy, Workbook, pp. 242-243 (2014).
17. N. Vuković, J. Radovanović, V. Milanović and D. L. Boiko, "Exploring the relation between Risken-Nummedal-Graham-Haken instabilities and conditions for superradiance in a quantum cascade laser," European Semiconductor Laser Workshop 2014 , Workbook, 18-19. September 2014, Paris, France (2014).
18. A. Daničić, N. Vuković, J. Radovanović, V. Milanović, "Realization of negative refraction in the THz spectral range via quantum cascades," STSM Workshop & Management Committee Meeting, 13-15. November 2014, Warsaw, Poland, Workbook, (2014).
19. N. Vuković, J. Radovanović, V. Milanović, D.L. Boiko, "Investigation of Risken-Nummedal-Graham-Haken instabilities in quantum cascade lasers," 13th YOUNG RESEARCHERS' CONFERENCE, Materials Science and Engineering, Belgrade 12/2014. Book of Abstracts, p. 18, (2014).

Саопштење са скупа националног значаја штампано у изводу (M64):

20. N. Vuković, J. Radovanović, V. Milanović, D. Boiko, "Recent progress on RNGH Instabilities in QCLs," 9th Photonics Workshop, Kopaonik, Serbia, March 2-6, 2016., Book of Abstracts, p. 20, (2016).
21. N. Vuković, J. Radovanović, V. Milanović, D.L. Boiko, "Multimode Risken-Nummedal-Graham-Haken Instabilities of Fabry-Perot Cavity Quantum Cascade Laser," 8th Photonics Workshop, Kopaonik, Serbia, March 2015., Book of Abstracts, p. 28, (2015).

Цитати у часописима са импакт фактором (без аутоцитата и индиректних цитата):

Рад 2. је цитиран у:

1. Kocharovsky V V, Zheleznyakov V V, Kocharovskaya E R, Kocharovsky V V "Superradiance: the principles of generation and implementation in lasers" *Phys. Usp.* 60 345–384 (2017), DOI:<https://doi.org/10.3367/UFNe.2017.03.038098>
2. Paolo Bardella, Lorenzo Luigi Columbo, and Mariangela Gioannini, "Self-generation of optical frequency comb in single section quantum dot Fabry-Perot lasers: a theoretical study," *Opt. Express* **25**, 26234-26252 (2017).

Рад 3. је цитиран у:

3. Figarova, S.R., Figarov, V.R. & Rashidova, S.S. *Opt Quant Electron* (2016) 48: 452. <https://doi.org/10.1007/s11082-016-0722-8>

Рад 4. је цитиран у:

4. Borowik, P., Thobel, J.L. & Adamowicz, L. *Opt Quant Electron* (2017) 49: 96. <https://doi.org/10.1007/s11082-017-0931-9>
5. A. Tiutiunnyk, M.E. Mora-Ramos, A.L. Morales, C.M. Duque, R.L. Restrepo, F. Ungan, J.C. Martínez-Orozco, E. Kasapoglu, C.A. Duque, "Electron Raman scattering in a double quantum well tuned by an external nonresonant intense laser field," *Optical Materials* 64, pp 496-501, ISSN 0925-3467, <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2017.01.001>, (2017).
6. M. Solaimani, Seyed Mohammad Ali Aleomraninejad, Leila Lavaei, "Optical rectification in quantum wells within different confinement and nonlinearity regimes," *Superlattices and Microstructures*, ISSN 0749-6036, <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2017.07.011>, (2017).
7. Gookbin Cho and Jungho Kim, "Effect of conduction band non-parabolicity on the optical gain of quantum cascade lasers based on the effective two-band finite difference method," *Semiconductor Science and Technology* 32, 095002, <https://doi.org/10.1088/1361-6641/aa8018> (2017).

Рад 5. је цитиран у:

8. Borowik, P., Thobel, J.L. & Adamowicz, L. *Opt Quant Electron* (2017) 49: 96. <https://doi.org/10.1007/s11082-017-0931-9>

Рад 6. је цитиран у:

9. Petar Tzenov, David Burghoff, Qing Hu, and Christian Jirauschek, "Time domain modeling of terahertz quantum cascade lasers for frequency comb generation," *Optics Express* 24, 23232-23247 (2016).
10. Erheng Wu, Qing Cao, Jun You, Chengpu Liu, "Nonlinear dynamics investigation in few-cycle laser seeding of quantum cascade lasers: role of permanent dipole moment," *Optics Communications* 392, pp 196-201, ISSN 0030-4018, <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.01.055>, (2017).

Друго: цитати на међународним конференцијама (без аутоцитата и индиректних цитата)

Рад 2. је цитиран у:

11. Lorenzo Luigi Columbo, Paolo Bardella, Ivo Montrosset and Mariangela Gioannini, "Self-mode-locking in Quantum Dot unidirectional ring lasers: model and simulations," International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD), (2017).

Рад 6. је цитиран у:

12. Petar Tzenov, Christian Jirauschek, "Slow terahertz light via resonant tunneling induced transparency in quantum well heterostructures," Proc. SPIE 10226, 19th International Conference and School on Quantum Electronics: Laser Physics and Applications, 1022603 (5 January 2017).

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

На основу научно-истраживачке и стручне активности и постигнутих резултата може се закључити да је Никола Вуковић подобан кандидат за израду докторске дисертације на тему: "Рискен-Нумедал-Грахам-Хакен нестабилности и само-пулсирање у квантним каскадним ласерима" (енг. "Risken-Nummedal-Graham-Haken instabilities and self-pulsing in quantum cascade lasers"). Број објављених радова и положен докторски испит, као и наведене истраживачке активности у области предложене теме докторске дисертације, показују спремност за самосталан рад и посвећеност датој теми што представља несумњив аргумент за одобрење за рад на поменутој теми.

2. Предмет и циљ истраживања

Квантни каскадни ласери су нашли велику примену у електронским уређајима за детекцију гасова у малим концентрацијама, контролу загађења, сигурносни надзор, итд. Емитовање фотона у квантним каскадним ласерима је засновано на електронском транспорту између дискретних нивоа чији распоред зависи од димензија и састава полупроводничких слојева ласера.

Потенцијал квантног каскадног ласера (ККЛ) за примену у спектроскопији био би значајно увећан уколико би био омогућен рад у режиму ултра кратких импулса. Могућности за примене у средњем и далеком инфрацрвеном делу спектра би укључивале лидаре (енгл. Light Detection and Ranging), опсервацију Земље, примене у екологији - за даљинску детекцију молекула штетних гасова, комуникације велике брзине базиране на ККЛ које користе атмосферски трансмисиони прозор од 3-5 μm или 8-12 μm , и многе друге [1]. Међутим, ултра-брза релаксација носилаца код ККЛ која је реда величине пико секунде, онемогућава реализацију стандардних начина за генерисање кратких импулса који се примењују код обичних ласерских диода, пасивно закључавање модова (енгл. passive mode locking) и Q-прекидачки (Q-switching) режим [2]. До сада је демонстрирано произвођење импулса помоћу методе прекидања појачања (енгл. gain switching) које је резултовало импулсима трајања 120 ps [3], као и активно закључавање модова (енгл. active mode locking) при чему је време живота носилаца повећано на 50 ps погодним дизајном ККЛ који користи тзв. дијагонални прелаз, што с друге стране није погодно за практичну примену због врло ниске радне температуре (77 K) [4].

Постоји још један приступ за генерисање кратких импулса у средњем инфра-црвеном делу спектра помоћу ККЛ, који се појавио након што је експериментално уочена [5], појава мултимодних нестабилности Рискен-Нумедал-Грахам-Хакен (РНГХ) типа [6,7] мало изнад ласерског прага. Мултимодна РНГХ нестабилност повезана је са неадијабатским [8] понашањем поларизације медијума и екситацијом брзих осцилација поларизације и инверзије носилаца. Ова нестабилност се манифестује као само-пулсирање излазне снаге ласера, док је оптички спектар подељен у два бочна опсега чије растојање је приближно једнако двострукој Рабијевој фреквенцији. Испод прага РНГХ нестабилности, оптички мод је потпуно контролисан ласерском шупљином и излазна снага је континуални талас (енгл. continuous wave, CW).

Оригинална РНГХ теорија [6,7] која је формулисана за једнодирекциони ласер са прстенастим резонатором (енгл. unidirectional ring laser) који ради у континуалном режиму, предвиђа да је неопходна јачина струје прага која је најмање 9 пута већа од струје ласерског прага. Међутим, у [5] и [9] је појава РНГХ нестабилности уочена код ККЛ са Фабри-Перо ласерском шупљином пар процената изнад ласерског прага, и код дизајна ККЛ са гребенастим таласоводом (енгл. ridge waveguide), као и код закопане хетероструктуре (енгл. buried heterostructure). Иако је улога ефекта SHB (енгл. spatial hole burning) у смањењу прага РНГХ нестабилности узета у обзир у [9], аутори су сматрали да РНГХ нестабилност не настаје само као резултат индуковане решетке популације носилаца, већ су направили додатну претпоставку да је за смањење прага (са 9 на 1.1 пут изнад ласерског прага) одговоран сатурабилни апсорбер (СА) који се на неки начин формирао у ласерској шупљини ККЛ-а. Заправо, јесте познато да СА може смањити праг нестабилности, међутим природа сатурабилне апсорпције у ККЛ-у није до сада у потпуности разјашњена [1]. Конкретно, аутори у [9] су претпоставили да је Керов ефекат сочива (енгл. Kerr lensing effect) могући механизам одговоран за настанак СА. У случају ласера са уским гребенастим таласоводом, код кога долази до преклапања крајева мода у таласоводу и металног контакта, Керов ефекат може довести до сатурабилне апсорпције. Међутим, код ККЛ који је дизајниран као закопана хетероструктура, овај ефекат уопште није толико изражен, а истовремено је за оба дизајна ККЛ-а (закопана хетероструктура и гребенасти таласовод) уочен низак праг РНГХ нестабилности.

Предмет истраживања ове докторској дисертацији је мултимодна РНГХ нестабилност код ККЛ који раде у средњем инфрацрвеном делу спектра са циљем да се одреде услови под којим настају регуларне само-пулсације. Биће приказан алтернативни модел који не узима у обзир СА, већ неке друге ефекте и који објашњава низак праг РНГХ нестабилности. У дисертацији ће бити показано под којим условима је могуће добити регуларне ултра-кратке импулсе, као и могућности оптимизације фреквенције ових импулса помоћу екстерне ласерске шупљине. Где год је то могуће биће изведени аналитички изрази.

Релевантни библиографски извори:

- [1] J. Faist, *Quantum cascade lasers*, 1st ed., Oxford University Press, 2013.
- [2] H. A. Haus, "Mode-locking of lasers," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 6, pp. 1173-1185, 2000.
- [3] R. Paiella, F. Capasso, C. Gmachl, C. G. Bethea, D. L. Sivco, J. N. Baillargeon, A. L. Hutchinson and A. Y. Cho, "High-Speed Operation of Gain-Switched Midinfrared Quantum Cascade Lasers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 75(17), pp. 2536-2538, 1999.
- [4] Ch. Y. Wang, L. Kuznetsova, V. M. Gkortsas, L. Diehl, F. X. Kärtner, M. A. Belkin, A. Belyanin, X. Li, D. Ham, H. Schneider, P. Grant, C. Y. Song, S. Haffouz, Z. R. Wasilewski, H. C. Liu and F. Capasso, "Mode-locked pulses from mid-infrared Quantum Cascade Lasers," *Opt. Express*, vol. 17, pp. 12929-12943, 2009.
- [5] Ch. Y. Wang, L. Diehl, A. Gordon, C. Jirauschek, F. X. Kärtner, A. Belyanin, D. Bour, S. Corzine, G. Höfler, M. Troccoli, J. Faist, and F. Capasso, "Coherent instabilities in a semiconductor laser with fast gain recovery," *Phys Rev A*, vol. 75, 031802(R), 2007.
- [6] H. Risken and K. Nummedal, "Self-Pulsing in Lasers," *J. Appl. Phys.*, vol. 39, pp. 4662-4672, 1968.

- [7] R. Graham and H. Haken, "Quantum Theory of Light Propagation in a Fluctuating Laser-Active Medium," *Z. Phys.*, vol. 213, pp. 420-450, 1968.
- [8] M. D. Crisp, "Adiabatic-following approximation," *Phys. Rev. A*, vol. 8, pp. 2128-2135, 1973.
- [9] A. Gordon, C. Y. Wang, L. Diehl, F. X. Kärtner, A. Belyanin, D. Bour, S. Corzine, G. Höfler, H. C. Liu, H. Schneider, T. Maier, M. Troccoli, J. Faist, and F. Capasso, "Multimode regimes in quantum cascade lasers: From coherent instabilities to spatial hole burning," *Phys. Rev. A*, vol. 77 (5), 053804, 2008.
- [10] N. V. Kravtsov, E. G. Lariontsev, A. N. Shelaev, "Oscillation regimes of ring solid-state lasers and possibilities for their stabilization," *Laser Physics*, vol. 3, pp. 21-62, 1993.
- [11] T. S. Mansuripur, C. Vernet, P. Chevalier, G. Aoust, B. Schwarz, F. Xie, C. Caneau, K. Lascola, C. Zah, D. P. Caffey, T. Day, L. J. Missaggia, M. K. Connors, C. A. Wang, A. Belyanin and F. Capasso, "Single-mode instability in standing-wave lasers: The quantum cascade laser as a self-pumped parametric oscillator," *Phys. Rev. A*, vol. 94, 063807, 2016.
- [12] M. Bugajski, K. Pierściński, D. Pierścińska, A. Szerling, K. Kosiel, "Multimode instabilities in mid-infrared quantum cascade lasers," *Photonics Lett. Pol.*, vol. 5 (3), pp. 85-87, 2013.
- [13] R. H. Dicke, "Coherence in spontaneous radiation processes," *Phys. Rev.*, vol. 93, pp. 99-110, 1954.
- [14] V. V. Kocharovskiy, A. A. Belyanin, E. R. Kocharovskaya, and V. V. Kocharovskiy "Superradiant lasing and collective dynamics of active centers with polarization lifetime exceeding photon lifetime," in *Advanced Lasers O. Shulika, I. Sukhoivanov*, eds (Springer Series in Optical Sciences, 2015), pp. 49-69.
- [15] Kocharovskiy V V, Zheleznyakov V V, Kocharovskaya E R, Kocharovskiy V V "Superradiance: the principles of generation and implementation in lasers" *Phys. Usp.*, vol 60, pp 345-384, 2017.
- [16] D. L. Boiko and P. P. Vasil'ev, "Superradiance dynamics in semiconductor laser diode structures," *Opt. Express*, vol. 20, pp. 9501-9515, 2012.
- [17] L. Lugiato, F. Prati, and M. Brambilla, *Nonlinear Optical Systems* (Cambridge University, 2015), Chap. 22.
- [18] J. Ohtsubo, *Semiconductor Lasers, Stability, Instability and Chaos*, 3rd ed. (Springer, 2013).
- [19] L. L. Columbo, P. Bardella, I. Montrosset and M. Gioannini, "Self-mode-locking in Quantum Dot unidirectional ring lasers: model and simulations," International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD), (2017).
- [20] P. Bardella, L. L. Columbo, and M. Gioannini, "Self-generation of optical frequency comb in single section quantum dot Fabry-Perot lasers: a theoretical study," *Opt. Express* 25, 26234-26252, 2017.
- [21] Antonov, A. A., D. I. Kuritsyn, A. Gajic, E. E. Orlova, J. Radovanovic, V. V. Vaks, and D. L. Boiko. "Tailoring Risken-Nummedal-Graham-Haken instability in quantum cascade lasers." In *Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC, 2017 Conference on)*, pp. 1-1. IEEE, 2017.

3. Полазне хипотезе

Полази се од следећих хипотеза:

- Смањење прага за РНГХ нестабилност је у литератури објашњено кратким временом релаксације горњег ласерског нивоа, затим ефектом познатим као "spatial hole burning" (SHB), као и "вештачким" увођењем сатурабилног апсорбера.
- Провером је утврђено да постојећи модел [9] не даје добре резултате у адијабатској апроксимацији (динамика поларизације адијабатски прати поље, изводи по времену и по z-координати поларизације медијума су тада нула): решења нису у складу са добро познатим и утемељеним резултатима за полупроводничке ласере [10], што указује на то да модел није потпуно исправан и да га треба кориговати и проширити.
- Нови модел (који ће бити представљен у дисертацији) настао од скраћеног семикласичног система Максвел-Блохових (МБ) једначина за двонивоски систем, без адијабатске апроксимације, треба да укључи (1) индиковану решетку поларизације (пored решетке за популацију носилаца) и (2) процес дифузије носилаца који доводи до релаксације обе решетке. То представља основну разлику у односу на све друге моделе присутне у литератури [9,11].
- Нови модел не треба да садржи сатурабилни апсорбер у активној области ККЛЈ коју садржи модел у [9], али треба да резултира ниским прагом за нестабилност, тј. настанак само-пулсација.

- Нови модел у адијабатској апроксимацији треба да се сведе на модел из [10].
- На основу новог модела могуће је развити апроксимативне аналитичке моделе чији су резултати у високој сагласности са резултатима добијеним нумеричким моделом и резултатима експеримената наведених у литератури [5,9,12].
- РНГХ нестабилност одликује јако брза динамика система праћена брзим променама поларизације медијума, стохастичко динамичко понашање, успостављање ван-дијагоналног уређења (енгл. Off-Diagonal Long-Range Order), може се описати као интерагујући Бозе-ов гас [6,7], што све јако подсећа на Дикеову суперрадијансу [13-15].

4. Научне методе истраживања

Као модел ККЛ за анализу стабилности биће узет семи-класични систем Максвел-Блохових једначина за два ласерска нивоа и Фабри-Перо ласерску шупљину који садржи и дифузиони члан у једначини за поларизацију медијума. Једначине за електрично поље и поларизацију медијума ће укључивати оба смера пропагације (позитиван и негативан смер z -осе). Након што се нађу стационарна решења, вршиће се линеаризација овог система за случај малих пертурбација (анализа стабилности по Љапунову). Аналитички израз за праг мултимодних РНГХ нестабилности добиће се применом биортогоналне теорије пертурбација другог реда на својствене векторе матрице стабилности. Нумерички модел за решавање брзинских једначина биће базиран на моделу путујућег таласа, слично као у [16], али без сатурабилног апсорбера. Нумерички модел ће касније бити потребно прилагодити за случај када се ККЛ налази у екстерној ласерској шупљини.

5. Очекивани научни допринос

- Финални исход предложене дисертације биће један софистицирани модел који нуди објашњење ниског прага мултимодних РНГХ нестабилности у ККЛ, који не претпоставља сатурабилни апсорбер и који укључује ефекте сатурације и просторне модулације и базира се на моделу путујућег таласа (енгл. Travelling wave, TW). Осим тога, научни доприноси укључују:
- анализу утицаја дужине ласерске шупљине на праг РНГХ нестабилности,
- аналитичке изразе за једноставну и брзу процену вредности прага за РНГХ нестабилност
- испитивање сличности и разлика између услова за настанак РНГХ нестабилности код ККЛ са Фабри-Перо шупљином и услова за настанак суперрадијансе [14-16],
- анализу у конфигурацији када се ККЛ налази у екстерној ласерској шупљини и теоријско испитивање могућности такве конфигурације за настанак ултра-кратких импулса.

Проблематика која ће бити обрађена у дисертацији представља и даље изазов у научној заједници, како са инжењерског аспекта, с обзиром на потешкоће реализације (описане у првом параграфу), тако и чисто научног, јер постојећи модели у литератури [9,11] не успевају да у потпуности одговоре на питање зашто је низак праг РНГХ нестабилности у ККЛ.

6. План истраживања и структура рада

План истраживања састоји се из следећих фаза:

- У првој фази истраживања потребно је упознавање са релевантном литературом [1-21] и постојећим моделима.

- Следећа фаза је прорачун одговарајућих параметара одређених комерцијално доступних ККЛ који ће бити коришћени у симулацијама.
- Анализа стабилности се врши на основу линеаризације МБ једначина за двонивоски систем, за случај малих пертурбација. Потребно је одредити својствене вредности и својствене векторе. Нестабилност настаје када је реални део неке од својствених вредности позитиван.
- Поређење вредности за праг РНГХ нестабилности које су добијене анализом својствених вредности матрице стабилности са оним вредностима које су добијене из нумеричких симулација помоћу модела путујућег таласа, као и поређење са експерименталним резултатима присутним у литератури. Нумеричке симулације обезбеђују временску зависност амплитуде поља, поларизације, концентрације носилаца итд. Показаће се да нумеричке симулације за случај стандардне дужине ласерске шупљине ККЛ (3-4 mm) дају на излазу нерегуларне само-пулсације врло близу ласерског прага, у складу са резултатима анализе стабилности и експериментима у литератури. Међутим, испоставиће се да је у симулацијама где је дужина ласерске шупљине мала (100 μm или краћа) јачина струје потребна да се на излазу уоче само-пулсације излазне снаге (а не континуална излазна снага) знатно већа него што предвиђа анализа стабилности. Потребно је показати да је то у складу са теоремом о површини ласерског пулса (енгл. pulse area theorem). Такође је потребно детаљно испитати утицај дужине ласерске шупљине не само на праг РНГХ нестабилности, већ и на форму излазних импулса.
- У следећој фази биће дато извођење аналитичких формула коришћењем биортогоналне теорије пертурбација другог реда.
- Испитивање везе између РНГХ типа нестабилности код ККЛ са Фабри-Перо шупљином и услова за настанак суперрадијансе.
- Прилагођење модела путујућег таласа за случај када је присутна екстерна ласерска шупљина и теоријско испитивање могућности такве конфигурације за настанак ултра-кратких импулса.

7. Закључак и предлог

Након увида у наведене значајне резултате досадашњег рада кандидата, Комисија је донела одлуку да је он показао изражену способност за научно-истраживачки рад и за реализацију планираних истраживања. Одлука је донета имајући у виду његове резултате постигнуте током истраживања на докторским студијама.

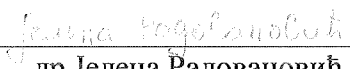
Такође, Комисија је мишљења да је предложена тема докторске дисертације "Рискен-Нумедал-Грахам-Хакен нестабилности и само-пулсирање у квантним каскадним ласерима" (енгл. "Risken-Nummedal-Graham-Haken instabilities and self-pulsing in quantum cascade lasers") подобна у смислу наведених циљева рада, очекиваних резултата и научних доприноса, имајући у виду актуелна истраживања у одговарајућој области и могућност њене практичне примене.

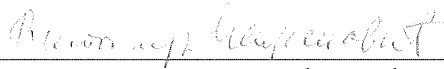
Комисија констатује да предложена тема припада области Физичке електронике за коју је Електротехнички факултет у Београду матичан и за ментора рада се предлаже др Јелена Радовановић, редовни професор, која је запослена на Електротехничком факултету у Београду. Због тога је уз овај извештај приложен и списак радова проф. др Јелене Радовановић, који је квалификују за ментора. Дисертација ће бити писана на енглеском језику.

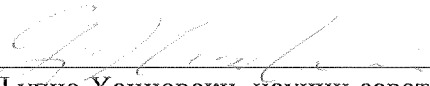
Узимајући у обзир чињенице наведене у овом извештају, Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду да прихвати тему докторске дисертације "Рискен-Нумедал-Грахам-Хакен нестабилности и само-пулсирање у квантним каскадним ласерима" (енгл. "Risken-Nummedal-Graham-Haken instabilities and self-pulsing in quantum cascade lasers") и да кандидату Николи Вуковићу омогући приступ њеној изradi.

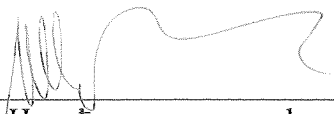
Београд, 21. новембар 2017. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ


др Јелена Радовановић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Витомир Милановић, професор емеритус
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Љупчо Хаџиевски, научни саветник
Универзитет у Београду – Институт за нуклеарне науке Винча


др Ненад Цакић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет