

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Оцена научне заснованости теме докторске дисертације кандидата Новака Станојевића.

Одлуком Изборног и Наставно-научног већа Електротехничког факултета Универзитета у Београду на својој 921. седници бр. 2232/41 од 09. 12. 2025. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације кандидата Новака Станојевића под насловом „Моделовање електронске структуре, транспортно-оптичких карактеристика и нелинеарне динамике терахерцних квантних каскадних ласера“ (енгл. *“Modelling of electronic structure, transport-optical characteristics, and nonlinear dynamics of terahertz quantum cascade lasers”*).

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Новак Станојевић рођен је 11.07.1999. године у Нишу. Завршио је основну школу „Свети Сава“ у Нишу као вуковац и ђак генерације. Уписао је специјално одељење за физику у гимназији „Светозар Марковић“ у Нишу и завршио га као вуковац. Током школовања освојио је награде на бројним такмичењима из физике и астрофизике, у земљи и иностранству. Међу најпрестижнијим наградама које је освојио су: бронзана медаља на Међународној Јуниорској Научној Олимпијади у Аргентини 2014. године, бронзана медаља на Међународној Олимпијади из Астрономије и Астрофизике у Индији 2016. године, сребрна медаља на Међународној Олимпијади из Физике у Индонезији 2017. године, сребрна медаља на Румунском Мастеру из Физике у Румунији 2017. године, сребрна медаља на Међународној Олимпијади из Физике у Португалу 2018. године.

Након завршене средње школе своје образовање наставио је у Београду где је уписао основне академске студије на Електротехничком факултету и Физичком факултету. Завршио је основне академске студије 2018-2022. године на студијском програму Електротехника и рачунарство, модул Физичка електроника, смер Наноелектроника, оптоелектроника и ласерска техника на Електротехничком факултету у Београду у року са просечном оценом 9,76. Одбранио је дипломски рад „Моделовање електронске структуре и оптичких особина $\text{BaSnO}_3/\text{BaO}$ квантних јама“ под менторством др Николе Вуковића са оценом 10,00. Такође је завршио основне академске студије 2018-2022. године на смеру Теоријска и експериментална физика на Физичком факултету у Београду, у року, са просечном оценом

9,85. Уписао је мастер академске студије на Електротехничком факултету у Београду, модул Наноелектроника и фотоника 2022. године и завршио их 2023. године са просечном оценом 10,00. Одбранио је мастер рад „Утицај зонске непараболичности, дифузије и позадинског допирања на транспортне карактеристике терахерцних квантних каскадних ласера“ под менторством др Николе Вуковића са оценом 10,00.

Уписао је докторске академске студије на Електротехничком факултету у Београду, модул Наноелектроника и фотоника 2023. године и положио све испите са просечном оценом 10,00. Аутор је и коаутор четири рада објављена у научним часописима међународног значаја, као и 14 радова саопштених и публикованих на научним скуповима међународног значаја.

Од марта 2023. године запослен је у Влатаком Институту високих технологија на позицији систем инжењер, а у новембру 2023. године изабран је у звање истраживач приправник.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Током докторских студија на Електротехничком факултету, Новак Станојевић је положио следеће испите:

1. 19Д061ООПХ - Оптичке особине полупроводничких хетероструктура, оцена 10, 9 ЕСПБ
2. 13Д061КТ - Квантни Транспорт, оцена 10, 9 ЕСПБ
3. 13Д061ЕСП - Електронска структура полупроводника, оцена 10, 9 ЕСПБ
4. 19Д061ПОТС - Простирање оптичких таласа у комплексним срединама, оцена 10, 9 ЕСПБ
5. 19Д061ОИНП - Оптимизација и инжењеринг наноструктурних параметара, оцена 10, 9 ЕСПБ
6. 19Д061МН - Моделовање наноструктура, оцена 10, 9 ЕСПБ
7. 19Д061КО - Квантна оптика, оцена 10, 9 ЕСПБ

и реализовао обавезе:

1. Студијски истраживачки рад I - 24 ЕСПБ, 03.09.2024.
2. Студијски истраживачки рад II - 24 ЕСПБ, 02.09.2025.

02. септембра 2025. године је положио све испите са просечном оценом 10 и завршио обавезе предвиђене програмом докторских студија, остваривши укупно 111 ЕСПБ.

Новак Станојевић је аутор и коаутор четири рада објављена у научним часописима међународног значаја, као и 14 радова саопштених и публикованих на научним скуповима међународног значаја.

Категорија M20: Радови објављени у научним часописима међународног значаја

Категорија M21a+

- [1] N. Stanojević, A. Demić, N. Vuković, P. Dean, Z. Ikonić, D. Indjin, J. Radovanović, "Derivative transfer matrix method: Machine precision calculation of electron structure and interface phonon dispersion in semiconductor heterostructures", Computer Physics Communications, Vol. 311, No. 109573, June, 2025; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2025.109573>; ISSN: 0010-4655; (IF=7.2)

Категорија М21

- [1] N. Stanojević, N. Vuković, J. Radovanović, "Calculation of intersubband absorption in n-doped BaSnO₃ quantum wells", Optical and Quantum Electronics, Vol. 55, No. 383, Mar, 2023. DOI: 10.1007/s11082-023-04656-5; ; ISSN: 0306-8919; (IF=3.3)
- [2] A. Atić, X. Wang, N. Vuković, N. Stanojević, A. Demić, D. Indjin, J. Radovanović, "Resonant Tunnelling and Intersubband Optical Properties of ZnO/ZnMgO Semiconductor Heterostructures: Impact of Doping and Layer Structure Variation", MATERIALS, Vol. 17, No. 4, Feb, 2024; DOI: 10.3390/ma17040927; ISSN: 1996-1944; (IF=3.4)
- [3] N. Stanojević, A. Demić, N. Vuković, P. Dean, Z. Ikonić, D. Indjin, J. Radovanović, "Effects of background doping, interdiffusion and layer thickness fluctuation on the transport characteristics of THz quantum cascade lasers", Scientific Reports, Vol. 14, No. 5641, Mar, 2024; DOI: 10.1038/s41598-024-55700-7; ISSN: 2045-2322; (IF=4.6)

Категорија М30: Зборници међународних научних скупова:

Категорија М33: Саопштење са међународног скупа штампано у целини:

- [1] N. Stanojević, J. Radovanović, N. Vuković, "Calculation of intersubband absorption in n-doped BaSnO₃ quantum wells", 22nd International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD 2022), 12 - 16 September 2022, Italy; Section Novel Materials and Devices, NM09. (Rad drugačiji od onog u Optical and Quantum Electronics 55, 383 (2023), iako greškom imaju isti naslov)
- [2] N. Stanojević, A. Demić, N. Vuković, D. Indjin, J. Radovanović, "Impact of Band Nonparabolicity and Interface Broadening effects on Electronic Structure and Rabi-Coupling Frequency in THz Quantum Cascade Lasers", 10th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2023), 5 – 8 June, 2023, East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina; Section Microelectronics and Optoelectronics, Nanosciences and Nanotechnologies.
- [3] N. Stanojević, A. Demić, X. Wang, N. Vuković, D. Indjin, J. Radovanović, "Design of Ga₂O₃/(AlGa)₂O₃ Double-Barrier Resonant Tunnelling Diode", 11th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2024), Niš, Serbia, 3-6 June 2024;
- [4] J. Radovanović, N. Vuković, N. Stanojević, A. Demić, M. Stojković, M. Ignjatovic, N. Basta, F. Perišić, and D. Indjin, "Modelling of THz quantum cascade lasers for imaging, sensing, and biomedical applications", Proc. SPIE 13335, Nanoscale Imaging, Sensing, and Actuation for Biomedical Applications XXII, 1333504 (21 March 2025);
- [5] N. Vuković, M. Ignjatović, N. Stanojević, M. Stojković, N. Basta, F. Perišić, A. Milićević, A. Demić, D. Indjin, J. Radovanović, "Terahertz quantum cascade laser modeling for applications in imaging, sensing, and metrology", Proc. SPIE 13571, Optical Methods for Inspection, Characterization, and Imaging of Biomaterials VII, 135711R (1 August 2025);
- [6] N. Vuković, M. Ignjatović, N. Stanojević, A. Demić, M. Stojković, F. Perišić, D. Indjin, J. Radovanović, "Numerical Simulations of Terahertz Quantum Cascade Laser Electronic Structure and Dynamics", 25th International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD 2025), 14 - 19 September 2025, Poland; Section Novel Materials and Devices, MA02.

Категорија М34: Саопштење са међународног скупа штампано у изводу:

- [1] **N. Stanojević**, J. Radovanović, V. Milanović, "Comparison of numerical methods for solving the effective mass Schrödinger equation for multilayer heterostructure applications", 19th Young Researchers' Conference - Materials Science and Engineering, Book of Abstracts pp. 49, 1 - 3 December, 2021, Belgrade, Serbia; Section Theoretical Modelling of Materials.
- [2] **N. Stanojević**, J. Radovanović, N. Vuković, "Influence of layer thickness and external bias variation on intersubband absorption in n-doped BaSnO₃ symmetric quantum wells", 20th Young Researchers' Conference - Materials Science and Engineering, Book of Abstracts pp. 22, November 30 - December 2, 2022, Belgrade, Serbia; Section Theoretical Modelling of Materials.
- [3] N. Vuković, A. Atić, **N. Stanojević**, X. Wang, A. Demić, D. Indjin, J. Radovanović, "Modeling of optical properties of novel terahertz photonics quantum well heterostructures", 16th Photonics Workshop, 12 – 15 March, 2023, Kopaonik, Serbia.
- [4] **N. Stanojević**, A. Demić, N. Vuković, X. Wang, D. Indjin, J. Radovanović, "Impact of Interface Diffusion and Doping Segregation on Transport Characteristics in THz Quantum Cascade Lasers", 21st Symposium on Condensed Matter Physics (SFKM 2023), Book of Abstracts pp. 91, 26 – 30 June, 2023, Belgrade, Serbia; Section Semiconductor physics.
- [5] **N. Stanojević**, A. Demić, N. Vuković, D. Indjin, J. Radovanović, "Dependence of Transport Parameters on Interface Composition Diffusion and Doping Segregation in Longitudinal Optical Phonon, Bound to Continuum and Hybrid THz Quantum Cascade Laser Designs", IX International School and Conference on Photonics (Photonica 2023), Book of Abstracts pp. 99, August 28 – September 01, 2023, Belgrade, Serbia; Section Devices and components.
- [6] N. Vuković, **N. Stanojević**, A. Demić, A. Atić, X. Wang, M. Ignjatović, N. Basta, D. Indjin, J. Radovanović, "Optical and transport properties of THz quantum cascade heterostructures", Book of Abstracts, 17th Photonics Workshop, pp. 14 - 14, Institute of Physics Belgrade, Kopaonik, Mar, 2024
- [7] N. Vuković, M. Ignjatović, **N. Stanojević**, A. Demić, A. Atić, A. Milićević, N. Basta, F. Perišić, M. Stojković, D. Indjin, J. Radovanović, "Modelling of THz quantum cascade laser dynamics", Book of Abstracts, 18th Photonics Workshop, pp. 53 - 53, Institute of Physics Belgrade, Kopaonik, Mar, 2025
- [8] **N. Stanojević**, N. Vuković, M. Ignjatović, J. Radovanović, "Modelling of Terahertz Quantum Cascade Laser Self-Mixing Dynamics", X International School and Conference on Photonics (Photonica 2025), Book of Abstracts pp. 110, August 25 – August 29, 2025, Belgrade, Serbia; Section Devices and components.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Усмена одбрана теме докторске дисертације Новака Станојевића одржана је 25.12.2025. у просторијама Електротехничког факултета пред Комисијом у саставу др Јелена Радовановић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет; др Александра Малуцков, научни саветник, Универзитет у Београду – Институт за нуклеарне науке „Винча“, Институт од националног значаја за Републику Србију; др Никола Баста, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.

Комисија је излагање кандидата оценила оценом: задовољио.

Кандидат је успешно завршио све обавезе предвиђене наставним програмом докторских студија. Досадашње научноистраживачке активности кандидата су верификоване публикацијама у научним часописима међународног значаја, као и у зборницима међународних научних скупова.

Комисија је, разматрајући све претходно наведене чињенице и резултате досадашњег научноистраживачког рада кандидата Новака Станојевића, анализом његовог досадашњег рада стекла јасан увид у кандидатове способности за научноистраживачки рад. На основу тога, Комисија сматра да је кандидат Новак Станојевић у потпуности подобан за рад на предложеној теми.

2. Предмет и циљ истраживања

Терахерцни квантни каскадни ласери (енгл. *THz Quantum Cascade Lasers* - THz ККЛ-и) [1, 2] емитују светлост у традиционално тешко доступном делу спектра - у далеком инфрацрвеном подручју. Имају све већу примену у медицинској дијагностици, хемијској детекцији и обради слике [3, 4]. Фреквенција ових ласера покрива опсег од 1,2 до 5,6 THz [5, 6], а максимална постигнута оптичка снага на криогеним температурама већа је од 1 W [7]. Максимална температура на којој је постигнут импулсни режим рада износи 261 K [8], док је континуални режим рада постигнут на 129 K [9].

Предмет истраживања предложене докторске дисертације је: 1) теоријска студија и нумеричко моделовање присутних нежељених ефеката насталих услед технолошких несавршености приликом процеса нарастања ККЛ-а. Конкретно се разматра њихов утицај на транспортно-оптичке карактеристике ових уређаја, односно на зависност материјалног појачања од примењеног спољашњег електричног поља и струјно напонске карактеристике. Додатно, предмет истраживања предложене докторске дисертације је и 2) развој новог високопрецизног и ефикасног нумеричког метода заснованог на трансфер матрицама (унапређеног трансфер матричног метода) и његова примена на решавање електронске структуре и одређивање дисперзионих релација оптичких интерфејс фонона ККЛ-а. Даље, предмет истраживања је и 3) развој софтвера за моделовање динамике ККЛ-а са присутном инјекцијом повратног зрачења рефлектованог од екстерне мете назад у резонатор (екстерне оптичке повратне спреге). Полази се од модела већ присутног у литератури, уз увођење неколико значајних промена у примени модела и анализи резултата, као што су а) укључивање зависности улазних параметара од примењене струје ласера коришћењем параметара који ће бити добијени из симулација транспорта и б) примена модела на фабрикованом ККЛ-у присутном у литератури.

THz ККЛ-и се обично нарастају методом епитаксије молекуларним снопом (енгл. *Molecular Beam Epitaxy* - EMC) због високог квалитета раста. THz ККЛ-и се састоје од великог броја (често више од 100) периода хетероструктуре и могу у великој мери зависити од процеса нарастања и недостатака до којих долази током самог процеса нарастања. Три ефекта присутна код нарастања помоћу EMC, који ће бити испитани у овој дисертацији и који могу имати значајан утицај на транспорт THz ККЛ-а су: позадинско допирање, дифузија композиције баријерног материјала и флукуације дебљине слојева структуре. Позадинско допирање нежељеним n или p типом примеса присутно је у сваком слоју структуре због нечистоћа у материјалима унутар епиузионих ћелија или услед нечистоћа из саме машине за EMC. Иако је позадинско допирање експериментално познат ефекат [10], његово теоријско моделовање није присутно у литератури. Раст ККЛ структура методом EMC одвија се на високим температурама, што их чини подложним дифузији композиције баријерног материјала (алуминујум у случају $Al_xGa_{1-x}As$ структура). Као резултат тога, реални ККЛ-и немају оштре интерфејсе између слојева, што може имати значајан утицај на рад ових уређаја [11]. Раст ККЛ структура методом EMC одвија се слој по слој, при чему се време раста сваког слоја израчунава у зависности од жељене дебљине слоја и флукса молекула који

падају на супстрат. Због варијација у интензитету флукса, слојеви се често нарасту са дебелинама различитим од планираних.

Трансфер матрични метод (ТММ) је широко коришћен нумерички метод за решавање обичних диференцијалних једначина (ОДЈ), првобитно уведен као математички метод у статистичкој механици [12]. ТММ је нашао бројне примене у литератури међу којима је израчунавање електронске структуре у хетероструктурама са квантним јамама [13, 14]. ТММ нуди интуитиван начин решавања ОДЈ захваљујући својој способности да спаја аналитичка решења појединачних сегмената на нумеричкој мрежи. Међутим, приликом решавања својствених проблема, као што је израчунавање електронске структуре, јављају се два проблема: 1) елементи укупне трансфер матрице немају исти ред величине за различите својствене вредности и 2) тражење својствених вредности ради се неефикасним поступком линеарног проласка кроз вредности енергије. Први проблем се решава тражењем минимума вредности елемената трансфер матрице, док други проблем, колико је нама познато, до сада није разматран у литератури. У оквиру предложене дисетације овај 2. проблем ће бити решаван развијањем унапређеног трансфер матричног метода (енгл. derivative transfer matrix method - dTMM) који је базиран на рачунању аналитичког првог извода трансфер матрица и проналажења његових нула бисекционим алгоритмом, који обично брзо конвергира, због чега ће dTMM имати далеко боље перформансе у односу на стандардни ТММ, како у времену извршавања, тако и у прецизности решавања електронске структуре.

У овој дисертацији биће коришћен теоријски модел развијен у референци [15], заснован на ефективним Максвел-Блоховим једначинама за полупроводник (енгл. effective semiconductor Maxwell-Bloch equations - ESMBEs) [16], ради проучавања динамике THz ККЛ-а у конфигурацији са Фабри-Перо ласерском шупљином. Модел узима у обзир кључне карактеристике полупроводничког активног медијума, као што су асиметрично, фреквенцијски зависно појачање и индекс преламања, као и спрегнутост између фазе и амплитуде, која се описује фактором ширења линије. Овај модел урачунава формирање стојећих таласа у резонатору, што за последицу има ефекат просторног сагоревања рупа (енгл. spatial hole burning). У овом истраживању биће написан софтвер за нумеричко решавање овог система једначина коришћењем метода коначних разлика за дискретизацију функција у времену и простору, и њихово решавање методом путујућег таласа, слично оном у референци [15], уз две кључне разлике у примени модела. Биће укључена зависност улазних параметара као што су појачање, запреминска концентрација електрона, нерадијативно време живота носилаца и време декохеренције поларизације од улазне струје. Модел ће бити први пут примењен на већ фабрикованом GaAs/AlGaAs THz ККЛ-а дизајнираном за емисију на 2 THz [17] и коришћене зависности биће добијене из симулација транспорта коришћењем модела матрице густине представљеном у [17, 18].

Један циљ истраживања је испитивање утицаја позадинског допирања, дифузије композиције баријерног материјала и флукуације дебљине слојева структуре на електронску структуру и транспортно-оптичке карактеристике, на примеру три најзаступљенија дизајна THz ККЛ-а: лонгитудинални оптички фононски (ЛО-фононски), са везано-слободним прелазима (енгл. bound-to-continuum) и хибридни. Биће утврђено колико су ови дизајни осетљиви на технолошке несавршености приликом процеса нарастања. **Други циљ истраживања** је развијање новог нумеричког метода заснованог на трансфер матрицама (dTMM) и његова примена на израчунавање електронске структуре ККЛ-а. Предложени метод би требало да превазиђе ограничења стандардног ТММ-а, као и да обезбеди машинску прецизност решавања својствених проблема, коју није могуће постићи ТММ-ом. **Трећи циљ истраживања** обухвата проучавање динамике ККЛ-а у присуству екстерне оптичке повратне спреге, као и унапређење постојећег модела из литературе, ради пружања потпуније анализе утицаја оптичке повратне спреге на спектар ласера и његове потенцијалне примене у сензорици.

Значај истраживања утицаја технолошких несавршености приликом процеса нарастања на транспортно-оптичке карактеристике огледа се у пружању кључних смерница

током процеса нарастања различитих типова дизајна ради побољшање поновљивости раста ККЛ-а. Ово се може постићи кроз оптимизацију профила допирања, ради уклањања ефеката позадинског допирања, или прецизније контроле температуре раста ради смањења дифузије композиције баријерног материјала. Такође, развој унапређеног трансфер матричног метода, који ће постићи исту машинску прецизност као и често коришћени метод коначних разлика [19], а притом га надмашити већом нумеричком ефикасношћу, омогућиће боље временске перформансе и примену веће просторне резолуције приликом дискретизације простора у односу на постојеће нумеричке методе. Значај последњег дела истраживања, односно моделовања нелинеарне динамике ККЛ-а, огледа се у пружању дубљег разумевања нелинеарне динамике ККЛ-а под утицајем екстерне оптичке повратне спреге што омогућава прецизнију контролу емисије и детекције сигнала, и има непосредан значај за унапређење сензорских и комуникационих апликација заснованих на квантним каскадним ласерима.

3. Полазне хипотезе

Предложено истраживање се заснива на следећим хипотезама:

1. Технолошке несавршености које настају током процеса нарастања епитаксијом молекуларним снопом, као што су позадинско допирање, дифузија композиције баријерног материјала и флукуације дебљине слојева, могу значајно утицати на електронску структуру и транспортно-оптичке карактеристике THz ККЛ-а. Ове несавршености могу довести до смањења перформанси уређаја и бити узрок лоше поновљивости нарастања ККЛ-а.
2. Различити дизајни THz ККЛ-а (ЛО-фононски, са везано-слободним прелазима и хибридни) имају различити степен осетљивости на поменуте технолошке несавршености, те да систематско проучавање ових утицаја може пружити кључне смернице за оптимизацију процеса нарастања различитих дизајна и побољшање поновљивости ласера кроз контролу профила допирања, температуре раста и других параметара.
3. Могуће је развити нумерички метод заснован на проналажењу нула аналитички израчунатог првог извода елемената трансфер матрице, који, захваљујући великој ефикасности бисекционих алгоритама, не само да значајно убрзава израчунавање својствених вредности у односу на стандардни трансфер матрични метод, већ и омогућава постизање изузетно високог нивоа прецизности рачунања.
4. Предложени метод може постићи машинску прецизност у израчунавању електронске структуре ККЛ-а, чиме може надмашити стандардни ТММ који то не може. Док у поређењу са методом коначних разлика, који такође поседује машинску прецизност, нуди већу нумеричку ефикасност, омогућава коришћење веће просторне резолуције приликом дискретизације простора - без губитка стабилности и перформанси, омогућавајући прецизније и поузданије моделовање сложених квантних структура.
5. Урачунавањем зависности кључних улазних параметара модела нелинеарне динамике ККЛ-а од примењене струје, могуће је знатно побољшати тачност и физичку реалистичност постојећег модела заснованог на ефективним Максвел-Блоховим једначинама. Улазни параметри су појачање, запреминска концентрација носилаца, нерадијативно време живота и време декохеренције поларизације, а добијени су из симулација транспорта.
6. Примена унапређеног динамичког модела на већ реализовани, експериментално познати THz ККЛ омогућиће реалистичну симулацију динамике ласера у присуству оптичке повратне спреге, чиме се могу предвидети и анализирати ефекти као што су *self-mixing*, мултимодна емисија, појава оптичких фреквенцијских чешљева, што отвара могућност за развој прецизнијих сензорских и комуникационих уређаја базираних на ККЛ-има.

4. Научне методе истраживања

1. Електронска структура ће бити одређена самосагласним поступком, који подразумева решавање једнодимензионалне Шредингерове једначине у апроксимацији ефективне масе у спрези са Поасоновом једначином. За моделовање транспорта биће коришћен модел матрице густине, који укључује ефекте кохеренције и пружа адекватан опис резонантног тунеловања кроз инјекциону баријеру. Коришћењем овог модела биће одређене транспортно-оптичке карактеристике, односно зависност материјалног појачања од примењеног спољашњег електричног поља и струјно-напонске карактеристике. Примењени модел заснива се на апроксимацијама првог суседа и јаке везе (енгл. tight-binding), као и на претпоставци о бесконачном броју периода ККЛ структуре. Механизми расејања моделују се као пертурбације Фермијевим златним правилом.
2. Утицај позадинског допирања биће урачунат кроз промену профила допирања, што ће утицати на Хартријев члан у Хамилтонијану, и довести до промене електронске структуре. Поред овога, биће промењен укупан број електрона у структури, што ће директно утицати на транспортно-оптичке карактеристике. Утицај дифузије композиције баријерног материјала биће урачунат кроз промену профила проводне зоне и ефективне масе дуж правца раста хетероструктуре, која ће бити израчуната нумеричким решавањем Фиковог закона дифузије методом коначних разлика. Утицај флукуација дебљине слојева на транспортно-оптичке карактеристике биће показан симулирањем великог броја структура, код којих ће бити дозвољене случајне флукуације дебљине од ± 1 монослоја за сваки слој, и статистичком анализом добијених резултата.
3. Ради валидације тачности и прецизности развијеног унапређеног трансфер матричног метода (dTMM) биће извршено поређење резултата добијених dTMM са резултатима добијеним методом коначних разлика на истим ККЛ-има. За сваку структуру биће решена електронска структура коришћењем параболичног модела, двозонског Кејновог непараболичног модела и његове Тејлорове апроксимације.
4. Анализа нумеричких перформанси dTMM биће извршена поређењем овог метода са методом коначних разлика код решавања електронске структуре једног ККЛ-а коришћењем параболичног модела, двозонског Кејновог непараболичног модела и његове Тејлорове апроксимације мерењем времена израчунавања на процесору као и конвергенције израчунатих резултата у зависности од просторне резолуције приликом дискретизације простора.
5. Моделовање динамике ККЛ-а биће урађено нумеричким решавањем ефективних Максвел-Блохових једначина методом коначних разлика вршењем просторне и временске дискретизације, и решавањем у маниру путујућег таласа, што ће омогућити праћење просторне и временске еволуције електромагнетног поља и популација носилаца у ККЛ-у.
6. Приликом моделовања динамике ККЛ-а, улазни параметри, као што су појачање, запреминска концентрација носилаца, нерадијативно време живота и време декохеренције поларизације, који зависе од улазне струје, биће одређени рачунањем електронске структуре и транспорта методом матрице густине.

5. Очекивани научни допринос

1. Демонстрација и објашњење утицаја технолошких несавршености на транспортно-оптичке карактеристике THz ККЛ-а пружањем, по први пут у литератури, анализе осетљивости различитих дизајна THz ККЛ-а (ЛО-фононски, са везано-слободним

прелазима и хибридни) на недостатке настале током процеса нарастања (позадинско допирање, дифузија композиције баријерног материјала и флукуација дебљине слојева) објашњавајући узроке слабе поновљивости при нарастању ККЛ-а.

2. Развој унапређеног трансфер матричног метода (dTMM), заснованог на аналитичком првом изводу трансфер матрица, који постиже машинску прецизност, имаће боље временске перформансе, и омогућиће већу максималну резолуцију дискретизације простора у односу на метод коначних разлика, чинећи га једним од најефикаснијих нумеричких метода за решавања електронске структуре квантних хетероструктура.
3. Унапређење постојећег динамичког модела THz ККЛ-а, заснованог на ефективним Максвел-Блоховим једначинама, доступног у литератури. Укључивањем зависности улазних параметра добијених из симулација транспорта, од примењене струје конкретног, већ фабрикованог GaAs/AlGaAs ККЛ-а, омогућиће предвиђање и контролу појава као што су self-mixing, мултимодна емисија и формирање оптичких фреквенцијских чешљева.

Литература

- [1] J. Faist et al., "Quantum cascade laser," *Science*, vol. 264, pp. 553–556, (1994).
- [2] R. Köhler et al., "Terahertz semiconductor-heterostructure laser," *Nature*, vol. 417, pp. 156–159, (2002).
- [3] C. Gmachl, F. Capasso, D. L. Sivco, and A. Y. Cho, "Recent progress in quantum cascade lasers and applications," *Rep. Prog. Phys.*, vol. 64, pp. 1533–1601, (2001).
- [4] A. A. Kosterev and F. K. Tittel, "Chemical sensors based on quantum cascade lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 38, pp. 582–591, (2002).
- [5] C. Walther et al., "Quantum cascade lasers operating from 1.2 to 1.6 THz," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, 131122, (2007).
- [6] G. Scalari et al., "THz and sub-THz quantum cascade lasers," *Laser Photonics Rev.*, vol. 3, pp. 45–66, (2009).
- [7] L. Li et al., "Terahertz quantum cascade lasers with >1 W output powers," *Electron. Lett.*, vol. 50, pp. 309–311, (2014).
- [8] A. Khalatpour et al., "Enhanced operating temperature in terahertz quantum cascade lasers based on direct phonon depopulation," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 122, 161101, (2023).
- [9] M. Wienold et al., "High-temperature, continuous-wave operation of terahertz quantum-cascade lasers with metal-metal waveguides and third-order distributed feedback," *Opt. Express*, vol. 22, pp. 3334–3348, (2014).
- [10] L. Li et al., "The MBE growth and optimization of high performance terahertz frequency quantum cascade lasers," *Opt. Express*, vol. 23, pp. 2720–2729, (2015).
- [11] L. Wang et al., "Terahertz quantum cascade laser considering compositional interdiffusion effect," *Appl. Phys. Express*, vol. 16, 032007, (2023).
- [12] H. A. Kramers and G. H. Wannier, "Statistics of the two-dimensional ferromagnet. Part I," *Phys. Rev.*, vol. 60, pp. 252–262, (1941).

- [13] B. Jonsson and S. T. Eng, "Solving the Schrödinger equation in arbitrary quantum-well potential profiles using the transfer matrix method," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 26, pp. 2025–2035, (1990).
- [14] C. Jirauschek, "Accuracy of transfer matrix approaches for solving the effective mass Schrödinger equation," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 45, pp. 1059–1067, (2009).
- [15] C. Silvestri et al., "Coherent multi-mode dynamics in a quantum cascade laser: amplitude- and frequency-modulated optical frequency combs," *Opt. Express*, vol. 28, no. 16, pp. 23846–23861, (2020).
- [16] C. Z. Ning, R. A. Indik, and J. V. Moloney, "Effective Bloch equations for semiconductor lasers and amplifiers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 33, no. 9, pp. 1543–1550, (1997).
- [17] A. Demić et al., "Infinite-period density-matrix model for terahertz-frequency quantum cascade lasers," *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, vol. 7, pp. 368–377, (2017).
- [18] A. Demić, Z. Ikonić, R. W. Kelsall, and D. Indjin, "Density matrix superoperator for periodic quantum systems and its application to quantum cascade laser structures," *AIP Adv.*, vol. 9, 035123, (2019).
- [19] J. Cooper et al., "Finite difference method for solving the Schrödinger equation with band nonparabolicity in midinfrared quantum cascade lasers," *J. Appl. Phys.*, vol. 108, 113109, (2010).

6. План истраживања и структура рада

1. Свеобухватни преглед релевантне литературе везане за електронску структуру, транспорт и динамику THz ККЛ-а.
2. Развијање методологије за испитивање утицаја технолошких несавршености на електронску структуру и транспорт моделирањем позадинског допирања, дифузије композиције и флукуације дебљине слојева и њена примена симулирањем ових ефеката код три различита дизајна THz ККЛ-а (ЛО-фононски, са везано-слободним прелазима и хибридни).
3. Реализација математичког оквира унапређеног трансфер матричног метода (dTMM), и развијање софтверског пакета за његову примену на израчунавање електронске структуре ККЛ-а. Биће испитани следећи сценарији прорачуна електронске структуре: параболични модел, двозонски Кејнов непараболични модел и његова Тејлорова апроксимација (развој у ред). Осим тога, нови метод ће бити примењен код одређивања дисперзионих релација оптичких интерфејс фонона ККЛ-а.
4. Валидација и тестирање dTMM-а поређењем са TMM и методом коначних разлика. Анализа прецизности, стабилности и нумеричких перформанси (време рачунања, максимална резолуција дискретизације простора) израчунавањем електронске структуре за одабране ККЛ-е из литературе.
5. Развој софтвера за моделирање динамике ККЛ-а нумеричким решавањем ефективних Максвел-Блохових једначина методом коначних разлика (просторно-временска дискретизација) користећи приступ путујућег таласа.
6. Примена софтвера на конкретан GaAs/AlGaAs ККЛ дизајниран за емисију на 2-THz уз укључивање зависности улазних параметра, добијених из симулација транспорта, од примењене струје.

7. Закључак и предлог

Разматрањем достављене документације и анализом досадашњег научноистраживачког рада кандидата, Комисија је констатовала да:

- Кандидат испуњава све формалне и суштинске услове прописане Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Београду и Статутом Електротехничког факултета Универзитета у Београду за израду докторске дисертације.
- Предложена тема је научно заснована, а очекивани резултати њене реализације представљаће значајан и оригиналан допринос области истраживања.

Комисија констатује да предложена тема спада у ужу научну област Физичке електронике и да је Електротехнички факултет Универзитета у Београду матичан за ову област. За ментора израде докторске дисертације Комисија предлаже др Николу Вуковића, доцента Електротехничког факултета Универзитета у Београду. На основу изложеног, Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да кандидату Новаку Станојевићу, мастер инжењеру електротехнике и рачунарства, одобри израду докторске дисертације на тему: „Моделовање електронске структуре, транспортно-оптичких карактеристика и нелинеарне динамике терахерцних квантних каскадних ласера“ (енгл. *“Modelling of electronic structure, transport-optical characteristics, and nonlinear dynamics of terahertz quantum cascade lasers”*).

Датум: 26.12.2025.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

Јелена Радовановић

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

А. Малуцков

др Александра Малуцков, научни саветник
Универзитет у Београду – Институт за нуклеарне
науке „Винча“, Институт од националног значаја за
Републику Србију

Никола Баста

др Никола Баста, доцент,
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет