

## КОМИСИЈИ ЗА СТУДИЈЕ II СТЕПЕНА ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКОГ ФАКУЛТЕТА У БЕОГРАДУ

Комисија за студије II степена, Електротехничког факултета у Београду, на својој седници одржаној 29.08.2023. године именовало нас је у Комисију за преглед и оцену мастер рада дипл. инж. Новака Станојевића под насловом „Утицај зонске непарараболичности, дифузије и позадинског допирања на транспортне карактеристике терахерцних квантних каскадних ласера”. Након прегледа материјала Комисија подноси следећи

### ИЗВЕШТАЈ

#### **1. Биографски подаци кандидата**

Новак Станојевић рођен је 11.07.1999. године у Нишу. Завршио је основну школу „Свети Сава” у Нишу као вуковац и ћак 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. Током основних студија учествовао је на две међународне конференције: 19th Young Researchers' Conference 2021 и 22nd International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices 2022 где је презентовао резултате свог научног истраживања, а као надоградњу свог дипломског рада написао је научни рад који је публикован у часопису са SCI liste: N. Stanojević, N. Vuković, J. Radovanović, "Calculation of intersubband absorption in n-doped  $\text{BaSnO}_3$  quantum wells", Optical and Quantum Electronics 55, 383 (2023). 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 у октобру 2022. године. Положио је све испите са просечном оценом 10. Током мастер студија учествовао је на четири међународне конференције: 20th Young Researchers' Conference 2022, 10<sup>th</sup> International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering 2023, 21st Symposium on Condensed Matter Physics 2023 и IX International School and Conference on Photonics 2023 где је презентовао резултате свог научног истраживања.

#### **2. Извештај о студијском истраживачком раду**

Кандидат Новак Станојевић је као припрему за израду мастер рада „Утицај зонске непарараболичности, дифузије и позадинског допирања на транспортне карактеристике терахерцних квантних каскадних ласера“ урадио истраживање релевантне литературе која се односи на област квантних каскадних ласера.

Конкретно, урађен је преглед литературе везане за терахерцне квантне каскадне ласере високих перформанси (број референце одговара броју у мастер раду):

- [2] Y. Bai, N. Bandyopadhyay, S. Tsao, S. Slivken, and M. Razeghi, "Room temperature quantum cascade lasers with 27% wall plug efficiency," *Appl. Phys. Lett.* 98, 181102 (2011).
- [3] N. Bandyopadhyay, S. Slivken, Y. Bai, and M. Razeghi, "High power, continuous wave, room temperature operation of  $\lambda \sim 3.4 \mu\text{m}$  and  $\lambda \sim 3.55 \mu\text{m}$  InP-based quantum cascade lasers," *Appl. Phys. Lett.* 100, 212104 (2012).
- [4] S. Kumar, "Recent progress in terahertz quantum cascade lasers," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 17(1), 38 (2011).
- [5] S. Kumar, Q. Hu, and J. L. Reno, "186 K operation of terahertz quantum cascade lasers based on a diagonal design," *Appl. Phys. Lett.* 94, 131105 (2009).
- [6] M. Wienold, B. Roben, X. Lu, G. Rozas, L. Schrottke, K. Biermann and H. T. Grahn, "Frequency dependence of the maximum operating temperature for quantum-cascade lasers up to 5.4 THz," *Appl. Phys. Lett.* 107 202101 (2015).
- [7] L. Li, L. Chen, J. Zhu, J. Freeman, P. Dean, A. Valavanis, A. G. Davies and E. H. Linfield, "Terahertz quantum cascade lasers with >1 W output powers," *Electron. Lett.* 50 309–311 (2014).

Урађен је преглед литературе везане за могуће дизајне терахерцних квантних каскадних ласера и њихових предности и мана, и установљено је да у мастер раду анализа утицаја свих ефеката треба бити независно спроведена на три најчешћа дизајна како би се установио степен осетљивости сваког типа дизајна појединачно (број референце одговара броју у мастер раду):

- [8] B. S. Williams, "Terahertz quantum-cascade lasers," *Nature photonics*, vol. 1, no. 9, p. 517, (2007).
- [13] S. Fathololoumi, E. Dupont, C. W. I. Chan, Z. R. Wasilewski, S. R. Laframboise, D. Ban, A. Matyas, C. Jirauschek, Q. Hu, and H. C. Liu, "Terahertz quantum cascade lasers operating up to ~200 K with optimized oscillator strength and improved injection tunneling," *Opt. Express*, vol. 20, no. 4, pp. 3866–3876, (2012).
- [14] A. Demić, A. Grier, Z. Ikonić, A. Valavanis, C. A. Evans, R. Mohandas, L. Li, E. H. Linfield, A. G. Davies, D. Indjin "Infinite-Period Density-Matrix Model for Terahertz-Frequency Quantum Cascade Lasers," in *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 7, no. 4, pp. 368-377, (2017).
- [15] L. Li, L. Chen, J. Zhu, J. Freeman, P. Dean, A. Valavanis, A. Davies, and E. Linfield, "Terahertz quantum cascade lasers with >1 W output powers," *Electronics letters*, vol. 50, no. 4, pp. 309–311, (2014).

Детаљно су анализирани следећи радови који се баве дифузијом композиције баријерног материјала, први од којих експериментално показује утицај овог ефекта на максималну радну температуру, а други пружа начин моделовања овог ефекта:

- [11] L. Wang, T. Lin, M. Chen, K. Wang and H. Hirayama, "Terahertz quantum cascade laser considering compositional interdiffusion effect", *Appl. Phys. Express* 16, 032007 (2023).
- [22] A. Valavanis, Z. Ikonić, and R. W. Kelsall, "Intersubband carrier scattering in n and p-Si/SiGe quantum wells with diffuse interfaces," *Physical Review B* 77, 075312 (2008).

Утврђено је да недостаје систематично нумеричко симулирање већег броја ласера и испитивања утицаја дифузије композиције и дифузије примеса на транспорт квантних каскадних ласера. Такође, у литератури није пронађено теоријско моделовање утицаја

позадинског допирања на транспортне карактеристике терахерцних квантних каскадних ласера, познатог ефекта до кога долази приликом нарастања ових структура.

### 3. Опис мастер рада

Мастер рад обухвата 41 страну, са укупно 23 слике, 7 табела и 26 референци. Рад садржи увод, 2 поглавља и закључак (укупно 4 поглавља) и списак коришћене литературе.

Прво поглавље представља увод у коме су описаны предмет и циљ рада. Након прегледа историјског напретка перформанси трахерцних квантних каскадних ласера и објашњења принципа њиховог рада, изнета је мотивација за испитивање утицаја зонске непараболичности, дифузије и позадинског допирања на транспортне карактеристике ових направа. Описаны су најчешћи начини моделовања транспорта и објашњени разлози за избор методе матрице густине.

Друго поглавље подељено је на 6 потпоглавља и представља теоријско разматрање ефеката и метода коришћених у раду. У првом потпоглављу описаны су принципи рада најчешћих дизајна терахерцних квантних каскадних ласера као и кратак преглед њихових предности и мана. У другом потпоглављу описано је моделовање транспорта квантних каскадних ласера мотодом матрице густине као и начин налажења материјалног појачања и густине струје. У трећем потпоглављу описан је Екенбергов модел непараболичности добијен на основу четрнаесто-зонског  $k \cdot p$  модела. У четвртом потпоглављу објашњен је процес нарастања квантних каскадних ласера, као и начин описивања и моделовања дифузије композиције баријерног материјала и дифузије примеса до којих долази приликом процеса нарастања. У петом потпоглављу представљен је стандардни нумерички трансфер матрични метод. У шестом потпоглављу детаљно је изложено извођење новог нумеричког трансфер матричног метода коришћеног у овом раду, са посебним освртом на разлоге због којих превазилази недостатке стандардног трансфер матричног метода.

Треће поглавље подељено је на 5 потпоглавља и представља приказ добијених нумеричких резултата самог рада и дискусију о њима. У прва три потпоглавља приказан је утицај дифузије композиције, дифузије допирања и позадинског допирања на транспортне карактеристике квантних каскадних ласера на примерима ЛО фононског, bound to continuum и хибридног дизајна. У четвртом потпоглављу анализиран је утицај Екенбергове непараболичности на електронску структуру и транспортне карактеристике ових ласера. У петом потпоглављу изложено је поређење стандардног и новог трансфер матричног метода.

Четврто поглавље је закључак у оквиру кога је описан значај добијених резултата. Резимирани су резултати рада и наглашено је који од испитаних ефеката има значајан утицај приликом моделовања терахерцних квантних каскадних ласера.

### 4. Анализа рада са кључним резултатима

Мастер рад дипл. инж. Новака Станојевића бави се испитивањем утицаја зонске непараболичности, дифузије и позадинског допирања на транспортне карактеристике терахерцних квантних каскадних ласера.

У свом раду утврђено је да зонска непараболичност и дифузија композиције баријерног материјала могу имати значајан утицај због чега их треба урачунавати приликом моделовања, док дифузија примеса нема значајан утицај на транспортне карактеристике ових ласера. Такође је испитана осетљивост различитих дизајна ових ласера на позадинско допирање као и вредности концентрације позадинског допирања при којима долази до значајних промена транспортних карактеристика код различитих дизајна.

Основни доприноси рада су следећи: 1) утврђивање утицаја испитиваних ефеката приликом моделовања квантних каскадних ласера; 2) развијање новог трансфер матричног метода који представља драстично унапређење стандардног; 3) могућност надоградње добијених резултата и објављивања научног рада у часопису.

## 5. Закључак и предлог

Кандидат Новак Станојевић је у свом мастер раду успешно испитао утицај наведених ефеката на транспортне карактеристике квантних каскадних ласера. У оквиру свог мастер рада развио је нови нумерички трансфер матрични метод који даје резултате веће прецизности за краће време и који представља драстично унапређење стандардног трансфер матричног метода.

Кандидат је исказао самосталност и систематичност у своме поступку као и иновативне елементе у решавању проблематике овог рада.

На основу изложеног, Комисија предлаже Комисији за студије II степена Електротехничког факултета у Београду да рад дипл. инж. Новака Станојевића прихвати као мастер рад и кандидату одобри јавну усмену одбрану.

Београд, 01.09.2023. године

Чланови комисије:

Никола Вуковић  
др Никола Вуковић,  
доцент

Јелена Радовановић  
др Јелена Радовановић,  
редовни професор