

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата Александра Атића, мастер инж. електротехнике и рачунарства за израду докторске дисертације *„Моделовање квантних наноструктура заснованих на оксидним полупроводницима са великим енергетским процепом“*, на енглеском језику *„Modeling of quantum nanostructures based on wide bandgap oxide semiconductors“*

Одлуком бр. 5021/19-1 од 26.09.2022 године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Александра Атића за израду докторске дисертације и научне заснованости теме *„Моделовање квантних наноструктура заснованих на оксидним полупроводницима са великим енергетским процепом“*, на енглеском језику *„Modeling of quantum nanostructures based on wide bandgap oxide semiconductors“*.

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Александар Атић рођен је у Београду 1992. године. Основну школу је завршио на Новом Београду 2007. године као носилац Вукове дипломе. Завршио је Осму београдску гимназију у Београду 2011. године. Исте године уписао се на основне академске студије на Електротехничком факултету у Београду, студијски програм Електротехника и рачунарство. Дипломирао је на Електротехничком факултету, Универзитета у Београду 2016. године на одсеку за Физичку електронику са темом *„Модулација индекса преламања у полупроводничкој квантној јами применом суперсиметричне квантно-механичке трансформације“*. Мастер студије завршио је такође на Електротехничком факултету у Београду 2019. године, студијски програм Електротехника и рачунарство, модул Наноелектроника и фотоника, са темом *„Моделовање квантног каскадног ласера заснованог на ZnO/ZnMgO“*. Докторске студије уписао је исте 2019. година такође на смеру за Наноелектронику и фотонику. Положио је све испите са просечном оценом 10,00 и испунио све обавезе прописане студијским програмом сакупивши предвиђених 120 ЕСПБ.

Радио је као „junior design engineer“ у фирми „Elsys Eastern Europe“ од октобра 2018 до фебруара 2019. Од марта 2019. је волонтирао, а од децембра 2019. је запослен у „Институту за нуклеарне науке Винча, институт од националног значаја за Републику Србију, Универзитета у Београду“ при Лабораторији за атомску физику, као истраживач приправник на теми „Физика комплексних система“ у оквиру програма истраживања „Нови материјали и

нано науке“. Од 2022. године је на теми „Комплексни системи: теорија и примене“ на којој је руководио др Александра Малуцков.

Током докторских студија објавио је три рада на међународним конференцијама и један рад у истакнутом међународном часопису.

1.2. Сечено научноистраживачко искуство

Кандидат Александар Атић, мастер инжењер електротехнике и рачунарства, уписао је докторске академске студије на Електротехничком факултету 2019. године на модулу Наноелектроника и фотоника. Основне области којима се кандидат бавио јесте примена нових полупроводничких материјала за реализацију терахерцних емитера. Током истраживачког рада, посебан фокус био је на нумеричким методама за симулирање ZnO-наноструктура као нових кандидата за реализацију полупроводничких хетероструктура. У току докторских академских студија, до доношења захтева за одобрење теме докторске дисертације, кандидат Александар Атић испунио је све обавезе предвиђене Студијским планом и програмом, чиме је остварио укупно 120 ЕСПБ бодова.

Положио је следеће испите:

1. Квантна оптика (оцена 10, ЕСПБ 9);
2. Простирање оптичких таласа у комплексним срединама (оцена 10, ЕСПБ 9);
3. Нумеричка анализа (оцена 10, ЕСПБ 9);
4. Енглески језик (оцена 10, ЕСПБ 6);
5. Оптичке особине полупроводничких хетероструктура (оцена 10, ЕСПБ 9);
6. Оптимизација и инжењеринг наноструктурних параметара (оцена 10, ЕСПБ 9);
7. Квантни транспорт (оцена 10, ЕСПБ 9);
8. Моделовање наноструктура (оцена 10, ЕСПБ 9);
9. Електронска структура полупроводника (оцена 10, ЕСПБ 9);
10. Увод у нелинеарну динамику (оцена 10, ЕСПБ 9).

Испунио је следеће научне и истраживачке обавезе:

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

Списак до сада објављених публикација налази се у наставку.

M22 – Рад у истакнутом међународном часопису

1. **A. Atić**, N. Vuković and J. Radovanović, “Calculation of intersubband absorption in ZnO/ZnMgO asymmetric double quantum wells“, *Optical and Quantum Electronics* **54**, 810 (2022). doi: 10.1007/s11082-022-04170-0 (IF₂₀₂₁=2.794)

M34 – Саопштење са међународног скупа штампано у изводу

2. **A. Atić**, J. Radovanović, V. Milanović, „Modeling of the optical gain in ZnO-based quantum cascade lasers“, Eighteenth Young Researchers Conference, Book of abstracts p. 31, Belgrade, Serbia, December 2019.
3. **A. Atić**, J. Radovanović, N. Vuković, „Modeling of intersubband transitions in ZnO/ZnMgO Coupled Quantum Wells“, VIII International School and Conference on Photonics – PHOTONICA2021, Book of Abstracts p. 118, Belgrade, Serbia, August 2021.

4. A. Atić, J. Radovanović, N. Vuković, "Numerical modeling of new oxide-based heterostructures for use in QCL devices", 15th Photonics Workshop, Book of abstracts p. 16, Kopaonik, March 2022.

Дана 07. 10. 2022. године кандидат Александар Атић полагао је испит о подобности теме и кандидата (докторски испит) пред Комисијом у саставу: др Витомир Милановић, професор емеритус, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет; др Горан Глигорић, 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; др Никола Вуковић, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет. Оцена комисије је да је кандидат Александар Атић на том испиту добио оцену: **задовољно**.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Током писања овог Извештаја, Комисија је узела у обзир све претходно наведене чињенице и резултате досадашњег научноистраживачког рада кандидата Александра Атића. Анализом досадашњег рада, Комисија је стекла увид у кандидатове способности за научноистраживачки рад као и могућности да током израде дисертације на предложену тему оствари резултате који ће бити вредновани од стране међународне научне заједнице. Став Комисије је позитиван и након детаљног образложења саме теме, Комисија предлаже да она буде усвојена, као и да кандидат добије могућност да настави са изработом саме докторске дисертације.

2. Предмет и циљ истраживања

Проучавање оптичких прелаза између везаних стања у проводној зони полупроводничких структура на бази квантних јама веома је значајно за развој направа као што су диоде са резонантним тунеловањем, детектори инфрацрвеног зрачења, квантни каскадни ласери итд. [1]–[4]. Уз помоћ прецизног моделовања, енергија ових прелаза може се подешавати тако да обезбеди широк опсег вредности за детекцију/емисију које су атрактивне за примене, како у блиској и средњој инфрацрвеној, тако и у терахерцној области спектра [5]–[14]. За терахерцни део спектра који одговара фреквенцијама између 1 THz и 10 THz, односно таласним дужинама од 30 μm до 300 μm , везује се појам „терахерцог процепа“ (енг. terahertz gap) који означава чињеницу да су направе за генерисање и детекцију зрачења у овом опсегу недовољно доступне [15]. Најзаступљенији полупроводнички материјал за реализацију THz квантних каскадних ласера је GaAs, али испољава стандардни проблем III-V једињења а то је недовољно висока радна температура услед великих нерадијативних губитака [14], [16]. Испитивање нових система материјала и одговарајућих унутарзонских прелаза у њима неопходно је за решавање овог проблема, за проширење опсега радних параметара постојећих типова направа, као и за дизајнирање и реализацију нових направа [17].

Полупроводници са великим енергетским процепом представљају нову област истраживања, где интензивне активности обухватају синтезу различитих материјала и њихових комбинација, испитивање физичких особина, реализацију направа и примене у електроници, оптоелектроници и квантној електроници [18]. У поређењу са силицијумом и III-V једињењима, развој ових материјала и одговарајућих направа је у повоју. Интересовање за полупроводнике са великим енергетским процепом раније је подстакло истраживања II-VI материјала и AlGaIn/GaN система [19]–[22]. Међутим II-VI једињења се заснивају на комплексним кватернарним легурама, док се код стандардног c-GaN јављају јака унутрашња поларизациона поља што компликује дизајн и синтезу оваквих структура [23]. Код неполарног GaN не постоје унутрашња поља, али је нарастање врло захтевно и ограничена је величина вејфера, што је врло непогодно за реализацију направа [24], [25]. Познато је да

експерименталним резултатима у области нових материјала уобичајено претходе теоријски прорачуни чија улога је предвиђање особина тих материјала и њихових хетероструктура, прорачун електронске структуре, утицаја допаната и слично.

Предмет истраживања ове дисертације су електронска структура и оптичке особине хетероструктура на бази квантних јама, реализованих уз помоћ оксидних материјала са великим енергетским процепом (на примерима ZnO/ZnMgO и $\text{AlGa}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$ хетероструктура), као и испитивање могућности за реализацију направа као што су квантни каскадни ласери и/или детектори инфрацрвеног зрачења. ZnO/ZnMgO структуре су перспективне за реализацију терахерцних емитера за собну радну температуру захваљујући повољним вредностима параметара, првенствено већој резонантној енергији лонгитудиналних оптичких фонона у односу на GaAs . Ради се о структурама чија је примена за квантне каскадне ласере тек у зачетку, стога развијање детаљног теоријског модела и одређивање параметара структуре који обезбеђују емисију у THz опсегу спектра, представљају врло актуелан проблем. Галијум оксид (Ga_2O_3) поседује ултра велики енергетски процеп и његове јединствене особине су мотив за интензивно истраживање будућих направа, посебно када су у питању легуре са алуминијумом ($(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$). У дисертацији ће бити разматране структуре на бази квантних јама за емисију и/или детекцију зрачења у инфрацрвеној области спектра.

Циљ истраживања је формирање теоријског модела за прорачуне електронске структуре и оптичких особина полупроводничких наноструктура на бази оксидних полупроводника са великим енергетским процепом. Дати модел и резултујући програмски код треба да омогуће ефикасну реализацију квантних каскадних ласера на бази ZnO/ZnMgO комбинације, као и детектора инфрацрвеног зрачења заснованих на $\text{AlGa}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$.

Значај истраживања огледа се у обезбеђивању детаљног и прецизног описа електронске структуре и процену параметарског простора за дизајнирање емитера/детектора заснованих на новим оксидним материјалима. Испитивање утицаја параметара на енергије унутарзонски прелаза, брзине расејања на фононима и оптичко појачање, допринеће процени апликативног потенцијала будућих направа на бази поменутих материјала и њиховом оптимизованом дизајну. Резултати добијени у оквиру дисертације обезбедиће једноставније разматрање нових комбинација материјала као кандидата за ефикасне емитере или детекторе инфрацрвеног зрачења

Релевантни библиографски извори:

- [1] J. Faist, *Quantum Cascade Lasers*. OUP Oxford, 2013.
- [2] G. Isiћ, J. Radovanović, and V. Milanović, "Anisotropic spin-dependent electron tunneling in a triple-barrier resonant tunneling diode," *J. Appl. Phys.*, vol. 102, no. 12, p. 123704, Dec. 2007, doi: 10.1063/1.2825401.
- [3] C. Jirauschek and T. Kubis, "Modeling techniques for quantum cascade lasers," *Appl. Phys. Rev.*, vol. 1, no. 1, p. 011307, Mar. 2014, doi: 10.1063/1.4863665.
- [4] N. Vuković, J. Radovanović, V. Milanović, and D. L. Boiko, "Numerical study of Risken–Nummedal–Graham–Haken instability in mid-infrared Fabry–Pérot quantum cascade lasers," *Opt. Quantum Electron.*, vol. 52, no. 2, p. 91, Feb. 2020, doi: 10.1007/s11082-020-2210-4.
- [5] J. Radovanović, N. Vuković, and V. Milanović, "Global Optimization Methods for the Design of MIR-THz QCLs Applied to Explosives Detection," in *NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics*, 2021, pp. 71–86. doi: 10.1007/978-94-024-2082-1_6.
- [6] J. Radovanović, 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.*, vol. 40, no. 17, pp. 5066–5070, Sep. 2007, doi: 10.1088/0022-3727/40/17/010.
- [7] J. Radovanović, V. Milanović, Z. Ikonić, and D. Indjin, "Optimization of spin-filtering properties in diluted magnetic semiconductor heterostructures," *J. Appl. Phys.*, vol. 99, no. 7,

- p. 073905, Apr. 2006, doi: 10.1063/1.2188052.
- [8] N. Vukovic, J. Radovanovic, V. Milanovic, and D. L. Boiko, "Analytical expression for Risken-Nummedal-Graham-Haken instability threshold in quantum cascade lasers," *Opt. Express*, vol. 24, no. 23, p. 26911, Nov. 2016, doi: 10.1364/OE.24.026911.
 - [9] N. Vukovic, J. Radovanovic, V. Milanovic, and D. L. Boiko, "Multimode RNGH instabilities of Fabry-Pérot cavity QCLs: impact of diffusion," *Opt. Quantum Electron.*, vol. 48, no. 4, p. 254, Apr. 2016, doi: 10.1007/s11082-016-0515-0.
 - [10] N. N. Vukovic, J. Radovanovic, V. Milanovic, and D. L. Boiko, "Low-Threshold RNGH Instabilities in Quantum Cascade Lasers," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 23, no. 6, pp. 1–16, Nov. 2017, doi: 10.1109/JSTQE.2017.2699139.
 - [11] M. Dubajić, A. Daničić, N. Vuković, V. Milanović, and J. Radovanović, "Optimization of cubic GaN/AlGaIn quantum cascade structures for negative refraction in the THz spectral range," *Opt. Quantum Electron.*, vol. 50, no. 10, p. 373, Oct. 2018, doi: 10.1007/s11082-018-1639-1.
 - [12] A. Gajić, J. Radovanović, N. Vuković, V. Milanović, and D. L. Boiko, "Theoretical approach to quantum cascade micro-laser broadband multimode emission in strong magnetic fields," *Phys. Lett. A*, vol. 387, p. 127007, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.physleta.2020.127007.
 - [13] N. Vukovic, J. Radovanovic, and V. Milanovic, "Enhanced modeling of band nonparabolicity with application to a mid-IR quantum cascade laser structure," *Phys. Scr.*, vol. T162, p. 014014, Sep. 2014, doi: 10.1088/0031-8949/2014/T162/014014.
 - [14] E. Bellotti and R. Paiella, "Numerical Simulation of ZnO-Based Terahertz Quantum Cascade Lasers," *J. Electron. Mater.*, vol. 39, no. 7, pp. 1097–1103, Jul. 2010, doi: 10.1007/s11664-010-1206-4.
 - [15] R. Köhler *et al.*, "Terahertz semiconductor-heterostructure laser," *Nature*, vol. 417, no. 6885, pp. 156–159, 2002, doi: 10.1038/417156a.
 - [16] M. Lee and M. C. Wanke, "Searching for a solid-state terahertz technology," *Science*, vol. 316, no. 5821, pp. 64–65, 2007, doi: 10.1126/science.1141012.
 - [17] N. Vuković, J. Radovanović, and V. Milanović, "Refined modelling of anisotropy influence on the optical gain in Mid-IR quantum cascade lasers," *Opt. Quantum Electron.*, vol. 54, no. 6, p. 380, Jun. 2022, doi: 10.1007/s11082-022-03742-4.
 - [18] M. Higashiwaki, R. Kaplar, J. Pernot, and H. Zhao, "Ultrawide bandgap semiconductors," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 118, no. 20, p. 200401, May 2021, doi: 10.1063/5.0055292.
 - [19] C. Gmachl, H. M. Ng, and A. Y. Cho, "Intersubband absorption in GaN/AlGaIn multiple quantum wells in the wavelength range of $\lambda \sim 1.75\text{--}4.2\text{ }\mu\text{m}$," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 77, no. 3, pp. 334–336, Jul. 2000, doi: 10.1063/1.126968.
 - [20] C. Gmachl, H. M. Ng, S.-N. George Chu, and A. Y. Cho, "Intersubband absorption at $\lambda \sim 1.55\text{ }\mu\text{m}$ in well- and modulation-doped GaN/AlGaIn multiple quantum wells with superlattice barriers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 77, no. 23, pp. 3722–3724, Dec. 2000, doi: 10.1063/1.1332108.
 - [21] J. Radovanovic, V. Milanovic, Z. Ikonic, D. Indjin, V. Jovanovic, and P. Harrison, "Optimal design of gan-algan bragg-confined structures for intersubband absorption in the near-infrared spectral range," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 39, no. 10, pp. 1297–1304, Oct. 2003, doi: 10.1109/JQE.2003.817584.
 - [22] N. Suzuki and N. Iizuka, "Feasibility Study on Ultrafast Nonlinear Optical Properties of 1.55- μm Intersubband Transition in AlGaIn/GaN Quantum Wells," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 36, no. Part 2, No. 8A, pp. L1006–L1008, Aug. 1997, doi: 10.1143/JJAP.36.L1006.
 - [23] M. Shirazi-HD *et al.*, "Dramatic enhancement of near-infrared intersubband absorption in c-plane AlInN/GaN superlattices," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 108, no. 12, p. 121108, Mar. 2016, doi: 10.1063/1.4944847.
 - [24] A. Radosavljević, J. Radovanović, V. Milanović, and D. Indjin, "Cubic GaN/AlGaIn based quantum wells optimized for applications to tunable mid-infrared photodetectors," *Opt. Quantum Electron.*, vol. 47, no. 4, pp. 865–872, Apr. 2015, doi: 10.1007/s11082-014-0016-y.

- [25] A. Radosavljević, J. Radovanović, and V. Milanović, "Optimization of cubic GaN/AlGaIn quantum well-based structures for intersubband absorption in the infrared spectral range," *Solid State Commun.*, vol. 182, pp. 38–42, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.ssc.2013.12.006.

3. Полазне хипотезе

У истраживању се полази се од следећих хипотеза:

- Направе за емитовање/детекцију инфрацрвеног зрачења засноване на стандардним материјалима као што је GaAs имају фундаментална ограничења у погледу радних таласних дужина и радне температуре. Максимална таласна дужина ограничена је вредношћу дисконтинуитета проводне зоне, док су у погледу рада на великим таласним дужинама ограничавајући фактор у погледу радне температуре нерадијативни механизми прелаза, првенствено расејање на лонгитудиналним оптичким фононима.
- Квантни каскадни ласери су тренутно најперспективније направе за рад у терахерцном делу електромагнетног спектра, међутим њихова радна температура далеко је од собне. Разлог је у блискости резонанте енергије лонгитудиналних оптички (ЛО) фонона у GaAs са енергијом ласерског прелаза, што доводи до смањења оптичког појачања.
- Цинк оксид (ZnO) поседује директан и широк енергетски процеп (3.37 eV) и већу енергију ЛО фонона (0.72 meV), што га чини погодним за реализацију емитера/детектора значења у терахерцној области спектра. Квантни каскадни ласер реализован уз помоћ полупроводничких легура овог материјала има потенцијал за функционисање на собној температури.
- Оптичке и транспортне особине полупроводника могу се модулисати допирањем и легирањем, што проширује опсег примена материјала. Комбиновањем са MgO, енергетски процеп се повећава од 3.37 eV за чист ZnO ка 6.4 eV за чист MgO, уз задржавање хексагоналне вурцитне структуре. Тако добијена легура ZnMgO је добар материјал за баријерне слојеве.
- Поларне особине ZnO се такође морају узети у разматрање приликом анализе хетероструктура. Спонтана поларизација дуж с-правца може изазвати кривљење проводне зоне, што може имати неповољан утицај на перформансе направа, па ће у дисертацији бити разматране само структуре реализоване у неполярној оријентацији (m-правац нарастања).
- Галијум оксид (Ga₂O₃) један је од перспективних материјала за примену у инфрацрвеном делу спектра због веома велике вредности енергетског процепца (4.8 eV) и могућности да се комбинује са алуминијумом у хетероспојеве (Al_xGa_{1-x})₂O₃/Ga₂O₃, што обезбеђује реализацију квантних јама велике дубине, као и због лакоће n-допирања.

4. Научне методе истраживања

У оквиру дисертације електронска структура проводне зоне биће одређивана решавањем Schrödinger-ове једначине методом гађања (енгл. shooting). Нумеричко решавање система Schrödinger-ове и Poisson-ове једначине биће извршено применом самосагласног поступка. Добијени резултати за енергије унутарзонских прелаза у квантним јамама прво ће бити упоређени са експерименталним резултатима који су доступни у литератури како би се прецизније утврдиле вредности параметара материјала. Затим ће бити анализирано како промена геометријских параметара и дизајна вишеструке квантне јаме на бази ZnMgO/ZnO утиче на матричне елементе прелаза и оптичку апсорпцију. Након тога, биће спроведена анализа релевантних механизма расејања и извршен нумерички прорачун за процену профила структуре који би одговарао активној области квантног каскадног ласера. За одређивање расподеле носилаца по релевантним нивоима активне области биће коришћено решавање система брзинских једначина или метод матрица густине, у зависности од прелиминарних резултата. Затим ће бити извршен прорачун оптичког појачања у структури која је предвиђена за емисију зрачења у терахерцној области спектра. Оптимизација профила

структуре у смислу максимизације појачања биће реализована систематском варијацијом геометријских параметара. По завршеној фази истраживања везаној за ZnMgO/ZnO , поступак ће делимично бити поновљен за структуре на бази $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$. Код овог типа материјала, анализираће се могућности за реализације унутарзонских прелаза у широком опсегу таласних дужина у оквиру инфрацрвеног дела спектра, ради процене потенцијала овог новог типа хетероструктура за реализацију детектора.

5. Очекивани научни допринос

Очекивани научни доприноси ове докторске дисертације су:

- Биће формиран детаљан теоријски модел за прорачун електронске структуре квантних јама на бази оксидних полупроводника са великом вредношћу енергетског процепа.
- Биће спроведена анализа утицаја геометријских параметара структуре на електронске и оптичке особине вишеструких квантних јама на бази ZnMgO/ZnO и $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$
- Биће формиран теоријски модел за прорачун брзина расејања на оптичким фононима код овог типа структура.
- Биће реализован теоријски модел и програмски код за прорачун оптичког појачања квантног каскадног ласера на бази ZnMgO/ZnO
- Биће предложени оптимизовани дизајн структуре засноване на комбинацији ZnMgO/ZnO за реализацију активне области квантног каскадног ласера у терахерцној области спектра.
- Биће спроведена анализа вишеструких квантних јама реализованих помоћу $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$ и оцена могућности њихове примене за реализацију унутарзонских детектора инфрацрвеног зрачења у широком опсегу таласних дужина.

6. План истраживања и структура рада

У оквиру истраживања на тему предметне дисертације, планирани су следећи кораци:

- Упознавање са релевантном литературом и доступним параметрима материјала за моделовање квантних јама заснованих на оксидним материјалима са великим енергетским процепом.
- Самосагласни прорачун електронске структуре двоструке и троструке квантне јаме на бази ZnMgO/ZnO и поређење добијених резултата са вредностима из литературе. Селекција финалних вредности параметара материјала за коришћење у наставку прорачуна.
- Анализа утицаја геометријских параметара (ширине слојева, састав материјала баријере) као и нивоа допирања на енергије унутарзонских прелаза у проводној зони и одговарајуће матричне елементе прелаза.
- Прорачун фракционе апсорпције у ZnMgO/ZnO квантним јамама.
- Упознавање са постојећим моделима квантних каскадних ласера на бази материјала са великим енергетским процепом.
- Проучавање нерадијативних процеса расејања и избор релевантних механизма који ће бити укључени у модел.
- Формирање теоријског модела за прорачун брзина расејања на лонгитудиналним оптичким фононима, као и додатних механизма расејања уколико су значајни за посматрану структуру.
- Моделовање оптичког појачања квантног каскадног ласера и прорачун концентрације електрона по нивоима структуре решавањем система брзинских једначина.
- Оптимизација параметара активне области квантног каскадног ласера на бази ZnMgO/ZnO
- Самосагласни прорачун електронске структуре двоструке и троструке квантне јаме на бази $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$ и селекција параметара материјала.
- Прорачун апсорпције у вишеструким квантним јамама на бази $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$ и испитивање зависности фракционе апсорпције од геометријских параметара структуре и могућности примене као детектора инфрацрвеног зрачења.

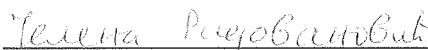
7. Закључак и предлог

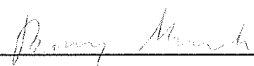
Током писања овог Извештаја Комисија је узела у обзир све релевантне чињенице које формирају слику о подобности теме и кандидата за реализацију предвиђених истраживања. Имајући у виду резултате досадашњег истраживачког рада кандидата Александра Атића, Комисија је стекла утисак да кандидат јесте способан за научноистраживачки рад као и за реализацију предвиђених истраживања. Такође, анализирајући предложену тему под називом „Моделовање квантних наноструктура заснованих на оксидним полупроводницима са великим енергетским проценом“, на енглеском “*Modeling of quantum nanostructures based on wide bandgap oxide semiconductors*” у контексту тренутно релевантних научних истраживања, Комисија је у потпуности сагласна да оваква тема задовољава све услове подобности за докторску дисертацију. Уз то, Комисија констатује да ова тема припада ужој научној области *Физичка Електроника*, као и да је Електротехнички факултет Универзитета у Београду матичан за ову научну област. За ментора израде докторске дисертације Комисија предлаже др Јелену Радовановић, редовног професора Електротехничког факултета Универзитета у Београду. У контексту овог предлога, уз Извештај је приложен списак радова проф. др Јелене Радовановић који је квалификују за ментора.

Коначно у закључку овог Извештаја, а имајући у виду све наведено, Комисија има част да Наставно-научном већу Електротехничког Факултета Универзитета у Београду предложи да прихвати тему докторске дисертације „Моделовање квантних наноструктура заснованих на оксидним полупроводницима са великим енергетским проценом“, на енглеском “*Modeling of quantum nanostructures based on wide bandgap oxide semiconductors*” и да кандидат Александру Атићу омогући да приступи њеној изради.

У Београду, 25.10. 2022. године.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ


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


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


др Горан Глигорић, 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


др Никола Вуковић, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет