

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата Милана Жежеља за израду докторске дисертације

Одлуком 5043/09-1 бр. од 11. јула 2016. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Милана Жежеља за израду докторске дисертације и научне заснованости теме **„Моделовање и оптимизација транспортних процеса у савременим наноелектронским уређајима”** (енг. **“Modeling and optimization of transport processes in modern nanoelectronic devices”**¹).

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Милан Жежељ је рођен 24. марта 1985. године у Земуну. Завршио је Математичку гимназију у Београду 2004. године са освојеном бронзаном медаљом на 35-тој Међународној олимпијади из физике. Исте године уписује Електротехнички факултет у Београду. Дипломирао је на Одсеку за електронику 2008. године са просечном оценом 9,96 као студент генерације. Мастер студије је завршио на истом факултету и одсеку 2009. године са просечном оценом 10,00. Исте године је уписао докторске студије на модулу Наноелектроника и фотоника.

1.2. Сечено научноистраживачко искуство

Кандидат Милан Жежељ уписао је докторске студије школске 2009/2010. године. По истеку законског рока за завршетак докторских академских студија, на захтев студента, одобрено је продужење рока за завршетак ових студија за још два семестра, сагласно члану 92. став 4 Статута Универзитета у Београду.

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

1. Оптимизација и инжењеринг наноструктурних параметара (оцена 10, ЕСПБ: 9)
2. Нумеричка анализа (оцена 10, ЕСПБ: 9)

¹ Дисертација ће бити писана на енглеском језику

3. Оптичке особине полупроводничких хетероструктура (оцена 10, ЕСПБ: 9)
4. Транспортни процеси у наноелектроници и фотоници (оцена 10, ЕСПБ: 9)
5. Електричне и оптичке карактеристике материјала у наноелектроници и фотоници (оцена 10, ЕСПБ: 9)
6. Скенирајућа микроскопија у нанонауци и нанотехнологији (оцена 10, ЕСПБ: 9)
7. Увод у научни рад (оцена 10, ЕСПБ: 6)
8. Оптичелектронске мерне методе (оцена 10, ЕСПБ: 9)
9. Моделовање наноструктура (оцена 10, ЕСПБ: 9)
10. Специјалне функције (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 Ненад Вукмировић, виши научни сарадник, Универзитет у Београду – Институт за физику
3. др Бранко Малешевић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

Јавно усмено излагање је одржано 12. јула 2016. године при чему је добио оцену “задовољно”.

Кандидат је почетком новембра 2009. године започео истраживачки рад на Институту за физику у Лабораторији за Примену рачунара у науци. Од 01. фебруара до 31. децембра 2010. године је као стипендиста-докторант Министарства за науку и технолошки развој Републике Србије ангажован на пројекту основних истраживања: „Моделирање и нумеричке симулације сложених физичких система“ (број: ОИ 141035). Од 01. јануара 2011. године је запослен на Институту за физику и ангажован на два пројекта Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије: “Моделирање и нумеричке симулације сложених вишечестичних система” (број: ОИ 171017) и “Наноструктурни мултифункционални материјали и нанокомпозити” (број: ИИИ 45018). У звање истраживач сарадник изабран је 28. новембра 2011. године. Од 01. децембра 2009. године до 01. децембра 2012. године кандидат је био ангажован на SCOPES пројекту Швајцарске националне научне фондације: “Примене нанокристалног порозног анатас TiO_2 у заштити животне средине: процес синтезе и проучавање транспортних карактеристика” (број: IZ73Z0–128169). У школској 2011/2012. години кандидат је био члан Државне комисије за такмичења ученика средњих школа из физике као коаутор задатака за 3. разред и Српску физичку олимпијаду. Учествовао је на више међународних конференција. Објавио је један рад у међународном часопису изузетних вредности (категорија M21a), три рада у врхунским међународним часописима (категорија M21), један рад у тематском зборнику водећег међународног значаја (категорија M13) и шест саопштења са међународних скупова штампана у изводу (категорија M34).

Радови у међународним часописима изузетних вредности (M21a):

1. Smiljanić J., Žeželj M., Milanović V., Radovanović J., Stanković I. E.: *MATLAB-based Program for Optimization of Quantum Cascade Laser Active Region Parameters and Calculation of Output Characteristics in Magnetic Field*, Comput. Phys. Commun., Vol 185, No 3, 2014, pp. 998 – 1006 (DOI: 10.1016/j.cpc.2013.10.025, IF (2014): 3.112, ISSN: 0010-4655).

Радови у врхунским међународним часописима (M21):

1. Žeželj M., Milanović V., Radovanović J., Stanković I. E.: *Influence of Interface Roughness Scattering on Output Characteristics of GaAs/AlGaAs Quantum Cascade Laser in a Magnetic Field*, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol 44, No 32, 2011, pp. 325105-1 – 325105-7 (DOI: 10.1088/0022-3727/44/32/325105, IF (2011): 2.544, ISSN: 0022-3727).
2. Žeželj M., Stanković I. E., Belić A.: *Finite-size Scaling in Asymmetric Systems of Percolating Sticks*, Phys. Rev. E, Vol 85, No 2, 2012, pp. 021101-1 – 021101-6 (DOI: 10.1103/PhysRevE.85.021101, IF (2012): 2.313, ISSN: 1539-3755).
3. Žeželj M., Stanković I. E.: *From Percolating to Dense Random Stick Networks: Conductivity Model Investigation*, Phys. Rev. B, Vol 86, No 13, 2012, pp. 134202-1 – 134202-6 (DOI: 10.1103/PhysRevB.86.134202, IF (2012): 3.767, ISSN: 1098-0121).

Радови у тематским зборницима водећег међународног значаја (M13):

1. Stanković I. E., Žeželj M., Smiljanić J., Belić A.: *Modelling of Disaster Spreading Dynamics*, in High-Performance Computing Infrastructure for South East Europe's Research Communities, Springer Book Series on Modeling and Optimization in Science and Technologies, Vol 2, 2014, pp. 31 – 42 (DOI: 10.1007/978-3-319-01520-0_4, ISSN: 2196-7326, ISBN: 978-3-319-01519-4).

Саопштења са међународног скупа штампана у изводу (M34):

1. Žeželj M., Stanković I. E., Belić A.: *Resistance in Percolating Quasi 1D and 2D Networks of Nanofibers*, 75th Annual Meeting of the DPG and Combined DPG Spring Meeting, Dresden, Germany, 13 – 18 March 2011, Poster DY 40.17, Conference Book, p. 334 (ISSN: 0420-0195).
2. Žeželj M., Stanković I. E., Milanović V., Radovanović J.: *Influence of Interface Roughness on Relaxation Rates and Optical Gain in a Quantum Cascade Laser*, 75th Annual Meeting of the DPG and Combined DPG Spring Meeting, Dresden, Germany, 13 – 18 March 2011, Poster HL 85.54, Conference Book, p. 376 (ISSN: 0420-0195).
3. Žeželj M., Stanković I. E.: *Investigation of Influence of Finite-size Scaling and Aspect Ratio on Stick Percolation*, XVIII National Symposium on Condensed Matter Physics – SFKM 2011, Belgrade, Serbia, 18 – 22 April 2011, Poster 35, Book of Abstracts, p. 103 (ISSN:-, ISBN:-).
4. Žeželj M., Stanković I. E., Belić A.: *Investigation of Interplay Between Finite-size Scaling and Aspect Ratio in Continuum Percolating Networks*, 8th Liquid Matter Conference, Vienna, Austria, 6 – 10 September 2011, Poster P4.67, Conference Book, p. 245 (ISBN: 2-914771-71-1).

5. Stanković I. E., Belić A., Žeželj M.: *Aggregation Kinetics of Short-range Attractive Particles: Brownian Dynamics Simulations vs Smoluchowski Equation*, 8th Liquid Matter Conference, Vienna, Austria, 6 – 10 September 2011, Poster P8.55, Conference Book, p. 279 (ISBN: 2-914771-71-1).
6. Žeželj M., Stanković I. E., Belić A.: *Study of Transistor Performance of Carbon Nanotube Networks*, 76th Annual Conference of the DPG and Spring Meeting of the Condensed Matter Section, Berlin, Germany, 25 – 30 March 2012, Presentation DY 2.9, Conference Book, p. 187 (ISSN: 0420-0195).

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 Милан Жежељ подобан кандидат за израду докторске дисертације на тему: „Моделовање и оптимизација транспортних процеса у савременим наноелектронским уређајима” (енг. “Modeling and optimization of transport processes in modern nanoelectronic devices”). 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

Предмет истраживања кандидата су транспортни процеси у комплексним наноелектронским системима као што су: прозирне електроде са наножицама, транзистори са угљеничним нанотубама и квантни каскадни ласери у магнетном пољу. Функционалност савремених наноелектронских уређаја се не може описати без примене одговарајућих статистичких метода и модела неопходних за разумевање различитих транспортних процеса. Зато ће кандидат развијати и интегрисати различите приступе: алгоритме за детекцију структуре, теорију перколације, методе конјугованих градијената и методе за глобалну оптимизацију.

Циљ истраживања је одредити и оптимизовати утицај структурних и геометријских параметара на транспортна својства савремених наноелектронских уређаја. За прозирне електроде са насумично распоређеним металним наножицама потребно је развити модел којим би се описала електрична проводност мреже у зависности од концентрације и проводности наножица, проводности контаката и величине система. За неуређене мреже угљеничних нанотуба циљ је одредити утицај структурних и геометријских параметара (дужина и концентрација нанотуба, облик и величина канала) на електронски транспорт транзистора. На основу тога потребно је одредити оптималне вредности наведених параметара у циљу добијања жељених електричних својстава транзистора без примене било каквих додатних поступака селекције или уређења нанотуба током и/или након процеса синтезе. Такође, за полупроводничке ласере на бази квантних јама, као што су квантни каскадни ласери, потребно је одредити оптималне вредности структурних и геометријских параметри (димензије и структуру слојева у активној области и интензитет магнетног поља) којима би се постигли ефекти максималног оптичког појачања активне области.

Прозирни проводници на бази неуређених мрежа са металним наножицама налазе примену у уређајима као што су соларне ћелије, органске ЛЕД диоде, екрани осетљиви на додир, итд. Њихова електрична проводност се нелинеарно повећава са променом концентрације наножица у зависности да ли је концентрација испод, у близини или далеко од прага

перколације, док прозирност опада са растом концентрације. Свеобухватан модел који би описао електричну проводност мреже у функцији од концентрације наножица узимајући у обзир њихову проводност, проводност контаката и величину система до сада није наведен у литератури.

Литература:

1. Hovi J.-P., Aharony A.: *Scaling and Universality in the Spanning Probability for Percolation*, Phys. Rev. E, Vol 53, No 1, 1996, pp. 235 – 253.
2. Li J., Zhang S.-L.: *Finite-size Scaling in Stick Percolation*, Phys. Rev. E, Vol 80, No 4, 2009, pp. 040104-1 – 040104-4.
3. Keblinski P., Cleri F.: *Contact Resistance in Percolating Networks*, Phys. Rev. B, Vol 69, No 18, 2004, pp. 184201-1 – 184201-4.
4. Bergin S. M., Chen Y.-H., Rathmell A. R., Charbonneau P., Li Z.-Y., Wiley B. J.: *The Effect of Nanowire Length and Diameter on the Properties of Transparent, Conducting Nanowire Films*, Nanoscale, Vol 4, 2012, pp. 1996 – 2004.
5. Mutiso R. M., Sherrott M. C., Rathmell A. R., Wiley B. J., Winey K. I.: *Integrating Simulations and Experiments To Predict Sheet Resistance and Optical Transmittance in Nanowire Films for Transparent Conductors*, ACS Nano, Vol 7, No 9, 2013, pp. 7654 – 7663.
6. Langley D., Giusti G., Mayousse C., Celle C., Bellet D., Simonato J.-P.: *Flexible Transparent Conductive Materials Based on Silver Nanowire Networks: A Review*, Nanotechnology, Vol 24, No 45, 2013, pp. 452001-1 – 452001-20.
7. Bellew A. T., Manning H. G., Gomes da Rocha C., Ferreira M. S., Boland J. J.: *Resistance of Single Ag Nanowire Junctions and Their Role in the Conductivity of Nanowire Networks*, ACS Nano, Vol 9, No 11, 2015, pp. 11422 – 11429.
8. Gomes da Rocha C., Manning H. G., O'Callaghan C., Ritter C., Bellew A. T., Boland J. J., Ferreira M. S.: *Ultimate Conductivity Performance in Metallic Nanowire Networks*, Nanoscale, Vol 7, 2015, pp. 13011 – 13016.
9. Balberg I., Azulay D., Goldstein Y., Jedrzejewski J.: *Possible Origin of the Smaller-than-universal Percolation-conductivity Exponent in the Continuum*, Phys. Rev. E, Vol 93, No 6, 2016, pp. 062132-1 – 062132-7.

Угљеничне нанотубе су материјали са потенцијално великом применом у електронским уређајима као што транзистори, сензори и оптоелектронски уређаји првенствено због добре покретљивости носилаца наелектрисања на собној температури. Приликом производње транзистора формирају се дводимензионалне мреже угљеничних нанотуба са насумично распоређеним нанотубама од којих су приближно 2/3 нанотуба полупроводне, а преостале металне које не мењају своју проводност под утицајем напона на гејту. Негативан утицај металних нанотуба на електрична својства транзистора због велике вероватноће директног спајања сорса и дрејна, тј. перколације кроз металне нанотубе, представља тренутно највећу препреку за њихову ефикасну производњу. Различити поступци елиминације металних нанотуба током или након производње транзистора најчешће оштећују преостале нанотубе и додају различите нечистоће, што значајно смањује транспортна и електрична својства

транзистора и повећава трошкове њихове производње. Кандидат ће показати да се негативан утицај металних нанотуба може превазићи избором одговарајућег облика и величине канала. Такође, биће анализиран утицај величине канала транзистора на одступања његових електричних карактеристика при различитим насумичним реализацијама мреже нанотуба. Циљ је развити аналитички модел за одређивање оптималне концентрације нанотуба у зависности од њихове дужине и димензије канала транзистора. Поред тога, биће испитан ефекат промене дужине нанотуба на транспортна својства мреже, почев од веома кратких нанотуба код којих је доминантан балистички транспорт електрона, до веома дугачких код којих доминира дифузни транспорт.

Литература:

1. Snow E. S., Novak J. P., Campbell P. M., Park D.: *Random Networks of Carbon Nanotubes as an Electronic Material*, Appl. Phys. Lett., Vol 82, No 13, 2003, pp. 2145 – 2147.
2. Kumar S., Pimparkar N., Murthy J. Y., Alam M. A.: *Theory of Transfer Characteristics of Nanotube Network Transistors*, Appl. Phys. Lett., Vol 88, No 12, 2006, pp. 123505-1 – 123505-3.
3. Cao Q., Kim H.-S., Pimparkar N., Kulkarni J. P., Wang C., Shim M., Roy K., Alam M. A., Rogers J. A.: *Medium-scale Carbon Nanotube Thin-film Integrated Circuits on Flexible Plastic Substrates*, Nature (London), Vol 454, 2008, pp. 495 – 500.
4. Hecht D. S., Hu L., Irvin G.: *Emerging Transparent Electrodes Based on Thin Films of Carbon Nanotubes, Graphene, and Metallic Nanostructures*, Adv. Mater., Vol 23, 2011, pp. 1482 – 1513.
5. De Volder M. F. L., Tawfick S. H., Baughman R. H., Hart A. J.: *Carbon Nanotubes: Present and Future Commercial Applications*, Science, Vol. 339, 2013, pp. 535 – 539.
6. Che Y., Chen H., Gui H., Liu J., Liu B., Zhou C.: *Review of Carbon Nanotube Nanoelectronics and Macroelectronics*, Semicond. Sci. Technol., Vol 29, No 7, 2014, pp. 073001-1 – 073001-17.
7. Zaumseil J.: *Single-walled Carbon Nanotube Networks for Flexible and Printed Electronics*, Semicond. Sci. Technol., Vol 30, No 7, 2015, pp. 074001-1 – 074001-20.
8. Li J., Pandey G. P.: *Advanced Physical Chemistry of Carbon Nanotubes*, Annu. Rev. Phys. Chem., Vol 66, 2015, pp. 331 – 356.
9. Liu N., Yun K. N., Yu H.-Y., Shim J. H., Lee C. J.: *High-performance Carbon Nanotube Thin-film Transistors on Flexible Paper Substrates*, Appl. Phys. Lett., Vol 106, No 10, 2015, pp. 103106-1 – 103106-5.

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, а може се додатно модулисати променом интензитета спољашњег магнетног поља. Сматра се да су брзине ових унутарзонских електронских прелаза доминантно одређене расејањем електрон-лонгитудинални оптички фонон. Међутим, кандидат ће показати да расејање електрона на површинским неравнинама између слојева активне области значајно

утиче на рад квантног каскадног ласера. Биће показано да расејање електрона на неравнинама слојева постаје доминантније при слабијим магнетним пољима и да се за оптимизацију оптичког појачања, посебно при слабом магнетном пољу, мора узети у обзир и наведени ефекат. На основу тога биће развијен нумерички модел за оптимизацију димензије и структуре слојева у активној области у циљу емитовања светлости са унапред дефинисаном таласном дужином.

Литература:

1. Faist J., Capasso F., Sivco D. L., Sirtori C., Hutchinson A. L., Cho A. Y.: *Quantum Cascade Laser*, Science, Vol 264, 1994, pp. 553 – 556.
2. Gmachl C., Capasso F., Sivco D. L., Cho A. Y.: *Recent Progress in Quantum Cascade Lasers and Applications*, Rep. Prog. Phys., Vol 64, No 11, 2001, pp. 1533 – 1601.
3. Leuliet A., Vasanelli A., Wade A., Fedorov G., Smirnov D., Bastard G., Sirtori C.: *Electron Scattering Spectroscopy by a High Magnetic Field in Quantum Cascade Lasers*, Phys. Rev. B, Vol 73, No 8, 2006, pp. 085311-1 – 085311-9.
4. Radovanović J., Milanović V., Ikonić Z., Indjin D., Harrison P.: *Electron-phonon Relaxation Rates and Optical Gain in a Quantum Cascade Laser in a Magnetic Field*, J. Appl. Phys., Vol 97, No 10, 2005, pp. 103109-1 – 103109-5.
5. Daničić A., Radovanović J., Milanović V., Indjin D., Ikonić Z.: *Optimization and Magnetic-field Tunability of Quantum Cascade Laser for Applications in Trace Gas Detection and Monitoring*, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol 43, No 4, 2010, pp. 045101-1 – 045101-8.
6. Jirauschek C., Kubis T.: *Modeling Techniques for Quantum Cascade Lasers*, Appl. Phys. Rev., Vol 1, No 1, 2014, pp. 011307-1 – 011307-51.
7. Faist J.: *Quantum Cascade Lasers*, 1st ed., Oxford University Press, Oxford, 2013 (ISBN: 9780198528241).
8. Gajić A., Radovanović J., Milanović V., Indjin D., Ikonić Z.: *Genetic Algorithm Applied to the Optimization of Quantum Cascade Lasers with Second Harmonic Generation*, J. Appl. Phys., Vol 115, No 5, 2014, pp. 053712-1 – 053712-7.
9. Daničić A., Radovanović J., Milanović V., Indjin D., Ikonić Z.: *Magnetic field Effects on Thz Quantum Cascade Laser: A Comparative Analysis of Three and Four Quantum Well Based Active Region Design*, Physica E, Vol 81, 2016, pp. 275 – 280.

3. Полазне хипотезе

Хипотезе које ће бити испитиване и провераване у овом истраживању су следеће:

1. Моменти расподеле вероватноће перколације (перколациони моменти) су одређени различитим експонентима за симетричне и асиметричне системе.
2. Експонент степене зависности електричне проводности неуређене мреже наножица од њихове концентрације није константан на основу чега се може претпоставити да је зависност сложенија.

3. Када је концентрација угљеничних нанотуба мала транзистор не проводи, док је за велику концентрацију транзистор кратко спојен кроз металне нанотубе, на основу чега се може претпоставити да постоји оптималан опсег концентрација нанотуба унутар кога транзистор проводи само кроз полупроводне нанотубе.
4. Транспортна својства реалних комплексних мрежа као што су прозирне електроде са наножицама и транзистори са угљеничним нанотубама могу се у режиму једносмерних струја моделовати мрежом отпорника, чиме се омогућава линеаризација система.
5. Појединачни елементи насумичне мреже (наножице или нанотубе) директно интерагују само са елементима који су у њиховој непосредној близини због чега је матрица система ретка, чиме се рачунарско време потребно за решавање система са великим бројем непознатих (до 10^8) значајно редукује.
6. Решавање нелинеарних брзинских једначина се итеративним поступком може свести на сукцесивно решавање система линеарних једначина, што омогућава ефикасно израчунавање расподеле носилаца наелектрисања по енергетским нивоима квантног каскадног ласера чак и за мале интензитете магнетног поља, тј. велики број енергетских нивоа.
7. За ефикасно решавање великог система линеарних једначина у сва три наведена случаја могу се применити методе конјугованих градијената.

4. Научне методе истраживања

Сви резултати током израде дисертације биће добијени помоћу симулација и нумеричких прорачуна. Алгоритми за моделовање транспортних процеса комплексних система се могу грубо поделити на два дела: генерисање структуре система и рачунање транспортних карактеристика генерисане структуре.

Дужина наножица и угљеничних нанотуба је много већа од њиховог пречника тако да се њихове неуређене мреже могу моделовати насумично распоређеним штапићима занемарљиве дебљине. За генерисање неуређених мрежа неопходно је применити Монте Карло метод који помоћу псеудо-случајних бројева генерише позиције штапића у оквиру правоугаоне површине која представља основу електроде или канал транзистора. За потребу генерисања неуређених мрежа биће развијен код у програмском језику C.

Када је правоугаона основа система већа од појединачних штапића за транспорт носилаца наелектрисања кроз систем неопходно је да постоји перколациона путања која се састоји од више штапића који међусобно интерагују и тиме успостављају перколациони кластер. За потребе утврђивања вероватноће и прага перколације биће развијен алгоритам који се заснива на додавању новог штапића у систем, интеграцији свих постојећих кластера са којима нови штапић интерагује у један нови кластер и провера да ли је новоформирани кластер перколациони. За потребу имплементације описаног алгоритма биће развијен код у програмском језику C.

Електрична проводност појединачних штапића се моделује проводношћу која зависи од њихове дужине (балистички или дифузни транспорт), док се контакти моделују различитим отпорницима у зависности да ли су штапићи који међусобно интерагују полупроводни или

метални. Електрична проводности целе мреже се добија применом Кирхофових закона и решавањем система линеарних једначина са великим бројем непознатих. За потребе ефикасног решавања система линеарних једначина биће коришћен итеративни метод конјугованих градијената развијен у програмском језику C. У циљу убрзавања конвергенције биће коришћено Јакобијево прекондиционирање. За обраду резултата биће развијени кодови у програмском пакету MATLAB.

Прорачун електронске структуре квантног каскадног ласера поларисаног путем спољашњег електричног поља у одсуству магнетног поља биће извршен помоћу методе гађања. Овај метод директно одређује сопствене вредности енергије и таласне функције система у зависности од димензија и састава полупроводничких слојева активне области и интензитета примењеног електричног поља. Брзине расејања електрона при прелазима између Ландауових нивоа у присуству магнетног поља услед интеракције са лонгитудиналним оптичким фононима и површинским неравнинама ће бити добијене помоћу нумеричких прорачуна заснованих на развијеном моделу, при чему ће се за просторну расподелу неравнина претпоставити Гаусова корелациона функција. За оптимизацију оптичког појачања ће се користити алгоритам за симулирано одгревање. Нелинеарне брзинске једначине ће се решавати итеративно тако да се у свакој итерацији решава систем линеарних једначина. За рачунање електронске структуре, брзина расејања, оптимизацију оптичког појачања и решавање брзинских једначина биће развијени кодови у програмском пакету MATLAB.

5. Очекивани научни допринос

Очекивани научни допринос се може поделити у следеће ставке:

- Испитаће се утицај коначне величине система на перколациона својства насумично распоређених штапића (нанотуба, наножица) у правоугаоним системима са променљивим односом дужине и ширине.
- Предложиће се генерализована функција скалирања перколационих момената са величином система за дводимензионалне системе насумично распоређених штапића. Утврдиће се како експоненти и коефицијенти скалирања правоугаоног система зависе од односа његове дужине и ширине. Показаће се да брзине конвергенције перколационих момената са повећањем величине система зависе од парности њихових коефицијената скалирања. Показаће се да се вероватноћа перколације може моделовати Гаусовом функцијом грешке са параметрима добијеним користећи предложене функције скалирања за прва два перколациона момента.
- Предложиће се аналитички модел зависности електричне проводности неуређене мреже наножица од њихове концентрације. Утврдиће се да степени закон коришћен у литератури описује проводност система само за концентрације које су у непосредној близини перколационог прага. Показаће се да је предложени аналитички модел применљив на неуређене мреже наножица у широком опсегу њихових концентрација.
- Предложиће се метод за одређивање оптималних опсега концентрације и дужине нанотуба, ширине и дужине канала у оквиру којих се неуређена мрежа угљеничних нанотуба понаша као транзистор са униформним транспортним и прекидачким карактеристикама. Показаће се да предложени метод омогућава ефикасну производњу транзистора са практично прихватљивим транспортним и прекидачким својствима користећи минималан број производних корака.

- Показаће се да присуство површинских неравнина у квантном каскадном ласеру значајно утиче на излазне карактеристике ласера. Утврдиће се да код структура од интереса урачунавање овог типа расејања не доводи до појаве нових резонантних пикова у оптичком појачању, већ само до модификовања постојећих пикова.

6. План истраживања и структура рада

Потребно је да се кандидат прво упозна са литературом из области транспортних процеса, Монте Карло симулација и метода, теорије перколације и метода за прорачун електронске структуре полупроводничких материјала. Такође, потребно је да савлада рачунарске вештине, помоћу којих ће моћи да реши нумеричке проблеме у склопу свог истраживања.

У првој фази кандидат ће развити код заснован на Монте Карло методи помоћу којег ће генерисати неуређене мреже штапића на различитим квадратним и правоугаоним основама. За сваку од генерисаних основа биће одређена расподела вероватноће перколације у зависности од концентрације штапића, као и одговарајући перколациони моменти. На основу тога ће бити потребно одредити зависност између геометријских параметара (величине и облика система) и перколационих карактеристика система. На основу добијених резултата кандидат ће показати да симетрични и асиметрични системи имају различите експоненте скалирања са величином система.

У другој фази ће кандидат развити код за ефикасно решавање система линеарних једначина са више од 10^7 непознатих. Користећи развијени код кандидат ће испитати како електрична проводност насумично распоређених нанोजица зависи од њихове концентрације и проводности, проводности контаката и величине система. На основу тога кандидат ће развити аналитички модел којим би се проводност система повезала са наведеним параметрима. Користећи развијени модел биће дискутована међузависност проводности и прозирности електрода са неуређеним мрежама нанोजица у функцији њихове дужине и пречника.

У следећој фази кандидат ће на основу развијеног модела за перколационе моменте одредити оптималан опсег концентрација угљеничних нанотуба при којима се успоставља перколациона путања само кроз полупроводне нанотубе транзистора. Користећи развијени код кандидат ће испитати како струја укључења и однос струје укључења и искључења транзистора зависе од структурних и геометријских параметара транзистора. Утврдиће се оптималне димензије канала транзистора и дужине нанотуба при којима се истовремено постиже велика струја укључења и велики однос струје укључења и искључења.

У последњој фази кандидат ће применити развијени код за израчунавање расподеле носилаца наелектрисања по енергетским нивоима квантног каскадног ласера у присуству врло јаког спољашњег магнетног поља, јачине и до 60 Т, на температури до 300 К. Биће дискутовано како излазне карактеристике ласера зависе од расејања на површинским неравнинама и лонгитудиналним оптичким фононима при различитим интензитетима магнетног поља и различитим температурама. Биће развијен ефикасан нумерички алгоритам за одређивање структуре и димензија слојева активне области у циљу добијања максималног оптичког појачања квантног каскадног ласера на унапред дефинисаној таласној дужини и температури узимајући у обзир све релевантне механизме расејања.

7. Закључак и предлог

Наведени научни резултати кандидата Милана Жежеља из области предложене теме докторске дисертације потврђују значај и актуелност предмета истраживања. Резултати имају изражену нумеричку компоненту и за њихову реализацију су били потребни значајни рачунарски ресурси доступни на Институту за физику у Лабораторији за примену рачунара у науци. Након увида у наведене 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 изузетне резултате постигнуте током истраживања на докторским студијама.

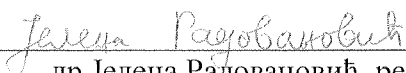
Такође, Комисија је мишљења да је предложена тема докторске дисертације „Моделовање и оптимизација транспортних процеса у савременим наноелектронским уређајима” (енг. “Modeling and optimization of transport processes in modern nanoelectronic devices”) подобна у смислу наведених циљева рада, очекиваних резултата и научних доприноса, имајући у виду актуелна истраживања у одговарајућој области и могућност њене практичне примене.

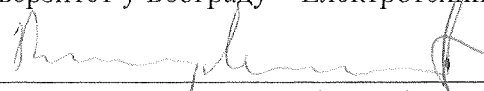
Комисија констатује да предложена тема припада области Физичке електронике за коју је Електротехнички факултет у Београд матичан и за ментора рада се предлаже др Јелена Радовановић, редовни професор, која је запослена на Електротехничком факултету у Београду. Због тога је уз овај извештај приложен и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

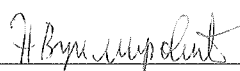
Узимајући у обзир чињенице наведене у овом извештају, Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду да прихвати тему докторске дисертације „Моделовање и оптимизација транспортних процеса у савременим наноелектронским уређајима” (енг. “Modeling and optimization of transport processes in modern nanoelectronic devices”) и да кандидату Милану Жежељу омогући приступ њеној изради.

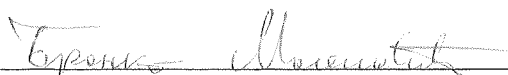
Београд, 25. август 2016. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ


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


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


др Ненад Вукмировић, виши научни сарадник
Универзитет у Београду – Институт за физику


др Бранко Малешевић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

