

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Уроша Ралевића

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду бр. 5007/10-3 од 24. фебруара 2017. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Уроша Ралевића под насловом

Nanoscopy and applications of two-dimensional and quasi-two-dimensional systems

Наноскопија и примене дводимензионалних и квази дводимензионалних система

После прегледа достављене дисертације и других пратећих материјала и разговора са кандидатом, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат Урош Ралевић је 17. децембра 2010. уписао докторске академске студије Електротехнике и рачунарства, модул Наноелектроника и фотоника, на Електротехничком факултету Универзитета у Београду.

Кандидат је 9. марта 2016. године пријавио тему за израду докторске дисертације под називом "Nanoscopy and applications of two-dimensional and quasi-two-dimensional systems" ("Наноскопија и примене дводимензионалних и квази дводимензионалних система").

Комисија за студије трећег степена је 15. марта 2016. године разматрала предлог теме за израду докторске дисертације и предлог Комисије о оцени подобности теме и кандидата упутила Наставно-научном већу на усвајање.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета је на седници одржаној 29. марта 2016. године (одлука бр. 5007/10-1 од 29. марта 2016.) именovalo Комисију за оцену услова и прихватања теме докторске дисертације у саставу:

1. др Витомир Милановић, професор емеритус, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду
2. др Горан Исић, научни сарадник, Институт за физику, Универзитет у Београду

3. др Милка Потребих, ванредни професор, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду
4. др Милан Тадић, редовни професор, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду
5. др Дејан Гвоздић, редовни професор, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду

За ментора је предложена:

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

Јавна усмена одбрана предложене теме докторске дисертације обављена је 1. априла 2016. године на Електротехничком факултету, пред именованом комисијом. Комисија је закључила да је кандидат на јавној усменој одбрани предложене теме докторске дисертације задовољио услове за израду поменутог. Ова одлука је подржана од четири члана Комисије, проф. Витомира Милановића, научног сарадника Горана Исића, проф. Милке Потребих и проф. Милана Тадића, док је проф. Дејан Гвоздић био против ове одлуке.

Комисија за студије трећег степена је 26. маја 2016. године разматрала извештај Комисије за оцену услова и прихватања теме докторске дисертације кандидата, који садржи издвојено мишљење проф. Дејана Гвоздића, и извештај са издвојеним мишљењем поднела Наставно-научном већу Електротехничког факултета.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета усвојило је Извештај комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације кандидата на седници одржаној 5. јула 2016. године (одлука бр. 5007/10-2).

На седници одржаној 19. септембра 2016. године, Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду (одлука бр. 61206-4365/2-16) дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације кандидата под насловом "Nanoscopy and applications of two-dimensional and quasi-two-dimensional systems" ("Наноскопија и примене дводимензионалних и квази дводимензионалних система").

На основу одлуке Наставно-научног већа бр. 3058/2 од 28. децембра 2010. године, Студијски програм је започео у пролећном семестру школске 2010/2011, па се рок за завршетак докторских академских студија рачуна од почетка тог семестра, сагласно Статуту Универзитета у Београду и Статуту Електротехничког факултета. 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 Статуту Универзитета у Београду.

Кандидат је 2. фебруара 2017. године предао на преглед и оцену своју докторску дисертацију.

Комисија за студије трећег степена потврдила је 7. фебруара 2017. године испуњеност свих потребних услова и Научно-наставном већу Електротехничког факултета поднела предлог за именовање комисије за преглед и оцену докторске дисертације кандидата. На седници бр. 810 од 14. фебруара 2017. године, Наставно-научно веће Електротехничког факултета именovalo је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације (бр. одлуке 5007/10-3 од 24. фебруара 2017. године) у саставу:

1. др Јелена Радовановић, редовни професор, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду
2. др Витомир Милановић, професор емеритус, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду
3. др Горан Исић, научни сарадник, Институт за физику, Универзитет у Београду
4. др Милан Тадић, редовни професор, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду
5. др Милка Потребих, ванредни професор, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација кандидата Уроша Ралевића припада области физичке електронике за коју је матичан Електротехнички факултет у Београду. Ментор дисертације др Јелена Радовановић, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду активно се бави истраживањем из наведене научне области. Др Јелена Радовановић је до сада објавила 85 радова у међународним часописима са SCI листе у оквиру поменуте области.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Кандидат Урош Ралевић рођен је у Мајданпеку 26. маја 1986. године. Гимназију је завршио 2005. године, такође, у Мајданпеку. Електротехнички факултет у Београду уписао је 2005. године и дипломирао на смеру за Наноелектронику, оптоелектронику и ласерску технику 2009. године са просеком 8,24. Мастер студије уписао је 2009. године, такође, на Електротехничком факултету у Београду на смеру за Наноелектронику, оптоелектронику и ласерску технику и успешно их завршио 2010. године са просечном оценом 10,00. Након завршетка мастер студија, 2010. године уписао је докторске студије на Електротехничком факултету на модулу за Наноелектронику и фотонику. Од 1. јануара 2011. запослен је на Институту за физику у Београду у оквиру националног пројекта основних истраживања „Физика уређених наноструктура и нових материјала“, бр. ОИ171005, који финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја. До сада је учествовао на једном европском FP7 пројекту, неколико пројеката билатералне сарадње и неколико COST акција.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Дисертација под насловом "Nanoscopy and applications of two-dimensional and quasi-two-dimensional systems" (Наноскопија и примене дводимензионалних и квази-дводимензионалних система) написана је на 124 стране куцаног текста на енглеском језику, са 82 слике и 31 нумерисаном једначином. По форми и структури одговара Упутству за формирање репозиторијума докторских дисертација Универзитета у Београду од 14. децембра 2011. године. Дисертација садржи насловну страну на енглеском и српском језику, захвалницу, резиме на енглеском и српском језику, садржај, 7 поглавља, 2 прилога, списак коришћене литературе који обухвата 140 библиографске референце, списак публикација кандидата, кратку биографију кандидата и попуњене изјаве о ауторству, коришћењу и истоветности штампане и електронске верзије докторског рада. Наслови поглавља су:

1. Introduction
2. Methods
3. Charge density modulations of the two-dimensional electron gas in cerium tritelluride

4. Kelvin probe force microscopy and applications of two-dimensional charge carriers in graphene
5. Optical spectroscopy of two-dimensional excitons in molybdenum disulfide monolayers
6. Application of surface plasmons and highly localised electromagnetic fields in SERS study of metal-dye complexes
7. Summary

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом поглављу је најпре уведен појам ниско димензионалних система уопште и дат кратак преглед њихових основних карактеристика и значај у области фундаменталне и примењене физике. Затим је дат пресек конкретних дводимензионалних односно квазидводимензионалних система које је кандидат проучавао, уз навођење кључних особина и начина реализације у различитим материјалима. Уводно поглавље се завршава прегледом структуре остатка дисертације.

У другом поглављу су представљене методе које је кандидат користио за проучавање поменутих система. Усвојена је основна подела на експерименталне методе, назване методама наноскопије, и теоријско-нумеричке методе. Први део овог поглавља обухвата опис основних принципа на којима се заснива скенирајућа микроскопија. Затим је дат опис подгрупа овог скупа микроскопских метода укључујући скенирајућу тунелску микроскопију, микроскопију на бази атомских сила, микроскопију на бази електростатичких сила и Келвинову скенирајућу микроскопију. Након тога је дат опис спектрофотометрије и Раманове спектроскопије које припадају методама оптичке спектроскопије. Опис теоријско-нумеричких метода дат у другом делу поглавља обухвата опис методе полова рефлексије и методе коначних елемената, као и осврт на проблеме који су њима решавани.

У трећем поглављу проучаван је дводимензионални талас густине наелектрисања у церијум трителуриду на собној температури. Приказани су експериментални резултати добијени методом скенирајуће тунелске микроскопије који укључују топографске слике, слике тунелске струје, криве диференцијалне проводности мерене у појединим тачкама на узорку, заједно са Рамановим спектрима површине узорка. Анализом експерименталних података добијених за различите вредности параметара преднапона и струје тунеловања одређени су карактеристични параметри којима се може описати талас густине наелектрисања: таласни вектор и енергетски процеп који се јавља услед њиховог постојања. Показано је и постојање ефекта мешања таласних вектора атомске решетке и ове модулације. На крају, утврђено је да се талас густине наелектрисања јавља заједно са одговарајућом модулацијом решетке планарног слоја телурових атома.

У првом делу четвртог поглавља проучавани су утицаји из спољашње средине на дводимензионалне носиоце наелектрисања у графену методама микроскопије на бази атомских сила, Келвинове скенирајуће микроскопије и микроскопије на бази електростатичких сила. Превасходно је испитиван квалитет ексфолираних графенских узорака методом микроскопије на бази атомских сила. Анализом одговарајућих топографских и фазних слика нађено је да се током фабрикације графенских узорака значајан број различитих адсорбаната задржава на површини графена. У наставку је дат опис примене Келвинове микроскопије у карактеризацији графена и релевантих параметара који се мере, као што је контактна потенцијална разлика. Анализом измерене контактне потенцијалне разлике утврђено да супстрат на коме се графен налази заједно са претходно нађеним адсорбантима доводи до просторних варијација контактне потенцијалне разлике и последично до просторних варијација нивоа допирања (положаја Фермијевог нивоа) у графену. Овај део четвртог поглавља завршава се анализом контактне потенцијалне разлике графенских узорака који су изложени односно изоловани од спољашње средине. Испитивани су узорци припремљени у конфигурацији задњег гејта, која омогућава промену концентрације носилаца применом напона гејта. На основу измерене контактне потенцијалне

разлике нађено је да фактори из спољашње средине, поларни молекули воде пре свега, доводе до нестабилности електронске концентрације, односно положаја Фермијевог нивоа, у неизолованом графену, и поред примењеног напона гејта од неколико волти. Код изолованог графена је установљена значајно мања осетљивост на спољашње утицаје. Затим је на примеру фиктивне оптоелектронске направе на бази графена у конфигурацији задњег гејта илустровано како нестабилности положаја Фермијевог нивоа могу да узрокују нестабилности у раду овакве направе. У другом делу четвртог поглавља разматран је утицај графена на вођене модове оптичких таласовода помоћу теоријско-нумеричких метода рефлексије полова и коначних елемената. На основу анализе вођених модова планарних и жичаних силицијумских таласовода без и у присуству графена утврђено је да графен узрокује мале модификације у константама пропагације поменутих модова. Помоћу одговарајуће теорије пертурбација, модификација константе пропагације мода је представљена као производ оптичке проводности графена и параметра који представља снагу спрезања датог мода и графена, а који зависи од геометријских параметара система. У наставку је проучавана зависност параметра спрезања од геометрије таласовода. Затим је демонстрирана могућност примене система графен-оптички таласовод у електро-абсорптивним и електро-рефрактивним оптичким модулаторима.

У петом поглављу је проучаван утицај кластера металних наночестица на фотолуминесценцију дводимензионалних екситона у монослојевима и танким слојевима молибден дисулфида. На почетку овог поглавља анализирана је фотолуминесценција А и Б екситона узорака који нису функционализовани кластерима металних наночестица. Установљено је да А и Б екситонски пикови испољавају насумичне промене спектралне ширине и позиције у оквиру узорака различитих дебљина. Постојање ових варијација приписано је утицају механичких деформација и различитих адсорбаната (на и испод површине ових узорака) који су идентификовани методом микроскопије на бази атомских сила. Са друге стране, утврђено је да интензитет луминесценције ова два пика не испољава значајније варијације у оквиру узорака различитих дебљина и да опада са порастом дебљине. Потом су анализирана фотолуминесцентна својства монослојних и вишеслојних узорака молибден дисулфида у присуству кластера металних наночестица. Анализом одговарајућих спектра уочено је да појачани Раман спектри молекула који се налазе на површини наночестица, а чија је сврха заштита наночестица, маскирају луминесцентни Б пик. Због тога је овај пик изостављен из даље анализе. Са друге стране, показано је благо појачање интензитета А пика, без значајнијих модификација његове ширине и спектралне позиције. Интерпретација експерименталних резултата је затим спроведена помоћу нумеричких прорачуна расејања раванских таласа на кластерима металних наночестица. На основу резултата нумеричких прорачуна, утврђено је да је слабо појачање интензитета А пика последица слабог спрезања локализованих електромагнетних поља кластера наночестица и молибден дисулфида. На крају, предложена је конфигурација у којој се поменута интеракција може побољшати.

У шестом поглављу проучавана је примена површинских плазмона кластера металних наночестица у детекцији и проучавању адсорпције молекула тијацијанинске боје на површину ових кластера методом површином подстакнуте Раманове спектроскопије. Кластери металних наночестица на површини субстрата су превасходно идентификовани методама микроскопије на бази атомских сила и Раманове спектроскопије. Анализом појачаних Раман спектра утврђено је да се молекули боје адсорбују на површину наночестица, с тим да је процес адсорпције отежан присуством цитратних анјона који су иницијално везани за површину наночестица. На основу нумеричких прорачуна расејања раванских таласа на кластерима металних наночестица утврђено је да већина појачаног Раман сигнала долази из нанопроцепа између суседних честица које формирају кластере. У седмом поглављу су сумирани закључци дисертације.

У прилозима су приказана додатна мерења и додатни нумерички прорачуни, коришћени при анализи резултата у поглављима 4 и 5.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Дводимензионални системи, попут дводимензионалног електронског гаса у метал-оксид-полупроводник структурама, деценијама уназад имају значајну примену у полупроводничким електронским направама. Пошто се њихова израда ослања на скупу технологију за нарастање ултратанких полупроводничких слојева и због чињенице да се добијени дводимензионални гас формира на хетероспојевима унутар структуре, распрострањеност и примене оваквих система су ограничене. Откриће графена и сличних дводимензионалних материјала 2004. године довело је до велике експанзије истраживања нискодимензионалних система који су механички и хемијски стабилни али чије су физичке карактеристике, попут електричних и оптичких, веома осетљиве на амбијенталне услове. Дводимензионални материјали представљају фундаментално нов тип чврстог стања материје што значи да се у будућности могу очекивати открића начина њихове експлоатације којих нема у постојећим технологијама. Области потенцијалне примене ових материјала и система који су у њима реализовани су многобројне и обухватајући електронику, оптоелектронику, сензоре, биофизику као и примене у изради композитних материјала. Посебна важна карактеристика дводимензионалних материјала, а самим тим и система који су у њима реализовани, јесте могућност њиховог спрезања са другим системима, као што су плазмонске нано честице, што проширује спектар интересантних феномена који се могу проучавати као и број могућих примена ових система. У том смислу, докторска дисертација кандидата се бави веома актуелном проблематиком дводимензионалних система (електрона, шупљина, екситона и таласа густине наелектрисања) реализованих у дводимензионалним и слојевитим материјалима (церијум трителурид, графен, молибден дисулфид) и њихове потенцијалне примене укључујући примену графена у оптичким модулаторима, као и применама површинских плазмона кластера металних наночестица у детекцији молекула боје помоћу површином подстакнуте Раманове спектроскопије. Савременост дисертације се огледа и кроз референце цитиране у дисертацији, где је приметан број чланака објављених у најпрестижнијим научним часописима пре не више од 5 година. Оригиналност докторске дисертације кандидата првенствено се огледа у њеним научним доприносима. Поред тога, оригиналност ове дисертације проистиче из приступа којим је спроведено истраживање, а који подразумева комбинацију различитих експерименталних и теоријско-нумеричких метода.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Дисертација обухвата опсежан преглед релевантне литературе: 140 библиографске референце из реномираних међународних научних часописа, укључујући и радове чији је кандидат аутор или коаутор. Избор референци и њихово цитирање у тексту су извршени на адекватан начин тако да дисертација даје репрезентативан приказ области односно контекста у коме је кандидат вршио своје истраживање.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Резултати приказани у овој докторској дисертацији добијени су применом ширег скупа научних метода које се могу поделити на експерименталне и теоријско-нумеричке. У оквиру експерименталних метода коришћене су технике скенирајуће микроскопије и оптичке спектроскопије.

Скенирајућа микроскопија обухвата фамилију различитих метода чија је заједничка особина да се мерење заснива на праћењу интеракције једне нанометарски оштре пробе (енг.

tip) postavljene na konzolu mikronskih dimenzija koja se kreće po površini uzorka a kojom se upravlja preko odgovarajućeg elektronskog kontrolera. Metode skenirajuće mikroskopiје коришћене у дисертацији су:

1. Скенирајућа тунелска микроскопија (СТМ) у ултрависоком вакууму

У случају СТМ методе, кретање конзоле се контролише повратном спрегом везаном за струју тунеловања између пробе и узорка. Ово је најосетљивији тип скенирајуће микроскопије, примењив само на проводне узорке, којим се ангстремска латерална резолуција може постићи чак и у амбијенталним условима, што је последица експоненцијалне зависности интензитета струје тунеловања од удаљености узорка. Због ових карактеристика, СТМ је идеална техника за директну опсервацију таласа густине наелектрисања у церијум трителуриду. Због реактивности површине и ради постизања најбоље могуће просторне резолуције, мерења церијум трителурида су вршена у ултрависоком вакууму.

2. Микроскопија на бази атомских сила (АФМ од енг. atomic force microscopy)

АФМ обухвата потфамилију неколико метода скенирајуће микроскопије који се називају АФМ модovima и у којима се контрола вертикалног положаја пробе ослања на "атомске силе" (термин који обухвата Ван дер Валсове силе, дипол-дипол интеракцију, електростатичке силе, итд.) што значи да је, за разлику од СТМа, АФМ примењив и на непроводне узорке. Од расположивих АФМ модова, кандидат је користио контактни и полуконтактни мод за испитивање дводимензионалних система, пре свега графена и молибден дисулфида.

3. Келвинову скенирајућу микроскопију (КПФМ од енг. Kelvin probe force microscopy) и микроскопију на бази електричних сила (ЕФМ од енг. electrostatic force microscopy)

Ови типови скенирајуће микроскопије представљају варијанте АФМ методе у којима се детектује дугодометна електрична сила између пробе и узорка или градијент ове силе. Обе методе прилагођене су за мерење локалне контактне потенцијалне разлике између типа и узорка, с тим да се у КПФМу ова величина мери директно а у ЕФМу индиректно посредством промене фазе осцилација врха. Кандидат је користио КПФМ и ЕФМ методе ради испитивања варијације контактне потенцијалне разлике графена у присуству различитих нанообјеката и слојева, као и ефекте који се јављају услед промене гејт напона на графену.

Методе оптичке спектроскопије које је кандидат користио у својој докторској дисертацији су спектрофотометрија и Раманова спектроскопија и површином подстакнута Раманова спектроскопија (СЕРС од енг. surface-enhanced Raman spectroscopy)

1. Спектрофотометрија

Спектрофотометрија обухвата спектрално разложено мерење интензитета еластично расејане (рефлектоване или трансмитоване) светлости приликом осветљавања узорка широкопојасним снопом. Овом методом су испитиване оптичке особине колоидних плазмонских наночестица добијених хемијским путем намењених СЕРС мерењима тијацијанинске боје и молибден дисулфида

2. Раманова спектроскопија

Ова спектроскопска метода обухвата мерење нееластично расејање ласерске светлости на оптичким фононима (у случају кристала) односно вибрационим модовима (у случају молекула или аморфних материјала) на основу којих се често може установити хемијски састав испитиваног узорка. За разлику од комплементарне методе инфрацрвене спектроскопије у којој се светлост еластично расејава на вибрационим модовима, детекција сигнала у Рамановој спектроскопији подразумева оптику видљивих таласних дужина, што је чини посебно погодном за проучавање микро- и наноструктурираних узорака, имајући у виду да дифракциони лимит дозвољава резолуцију од око 300 нанометара у видљивом спектру, док је за инфрацрвене таласне дужине овај лимит реда величине 5 микрометара. Кандидат је ову методу користио претежно за испитивање броја слојева дводимензионалних материјала, за испитивање њиховог квалитета и чистоте и, коначно, за микроскопска мерења луминисценције молибден дисулфида и испитивање њене модификације услед екситације локализованих површинских плазмона у металним наночестицама.

3. Површином подстакнута Раманова спектроскопија (СЕРС од енгл. surface-enhanced Raman spectroscopy)

СЕРС представља посебан вид Раманове спектроскопије засноване на великом појачању електричног поља на површини металних наночестица, изазваног екситацијом површинских плазмона односно оштрим ивицама металних наноструктура. СЕРС је погодан за мерење фонона и вибрационих модова веома малих количина материјала који се налазе у близини плазмонске наночестице због тога што је појачање Раман сигнала молекула сразмерно четвртог степена појачања локалног електричног поља, чиме је могуће постићи појачање сигнала од преко шест редова величине. СЕРС се најчешће користи за ултраосетљиву детекцију молекула адсорбованих на металне наночестице. Ова метода коришћена је у Рамановој наноспектроскопији молибден дисулфида и молекула тијацијанинске боје.

Теоријско-нумеричке методе обухватају развој неколико специфичних теоријских модела и њихову имплементацију у софтверском пакету MATLAB и софтверском пакету COMSOL Multiphysics намењеном за решавање парцијалних диференцијалних једначина методом коначних елемената. Конкретно:

1. Метод полова рефлексије

Овај метод се користи за прорачун својствених модова у таласоводима са губицима и подразумева израчунавање коефицијента рефлексије за равански талас који пада на слојевити (планарни) систем формулисан тако да даје математички исправне резултате за произвољну комплексну вредност компоненте таласног вектора у равни. Својствени таласни вектор и одговарајући мод се одређују као полови у одзиву система (рефлексије) тј. оне вредности таласног броја за које коефицијент рефлексије дивергира. Прорачун коефицијента рефлексије је реализован методом трансфер матрица.

2. Модална анализа система са губицима коришћењем COMSOL Multiphysics пакета

За потребе нумеричког прорачуна вођених модова у тракастим силицијумским таласоводима са губицима коришћен је COMSOL Multiphysics пакет у формулацији својственог проблема.

3. Решавање проблема расејавања коришћењем COMSOL Multiphysics пакета

Тродимензионални проблем расејавања раванског таласа на металним наночестицама депонованих на молибден дисулфид или покривеним танким слојем тијацијаниске боје на силицијумском субстрату са танким слојем силицијум диоксида је изучаван решавањем Максвелових једначина имплементираних у COMSOL Multiphysics пакету и граничних услова који адекватно описују инцидентни талас и уз дефинисање одговарајућих апсорпционих слојева (енг. perfectly matched layer) тако да је добијено решење егзактно, тј. не захтева увођење било каквих апроксимација.

3.4. Применљивост остварених резултата

Таласи густине наелектрисања представљају основно стање система у коме се јавља периодична модулација електронске густине која је праћена одговарајућим преуређењем атома у кристалној решетки материјала. Ови системи су предмет проучавања већ неколико деценија, а тачан механизам њиховог настајања и њихове особине у појединим системима још увек су веома актуелне теме у области физичке електронике чврстог стања. С обзиром на фундаментални значај таласа густине наелектрисања, резултати које је кандидат постигао у оквиру своје дисертације могу допринети бољем разумевању природе ових екситација.

Интерес према фундаменталним истраживањима графена у различитим областима савремене физичке електронике се заснива на његовим специфичним електронским и оптичким особинама, у великој мери условљених његовим π електронима. Модификација електронских и оптичких особина графена применом напона гејта омогућава велики број примена у областима електронике, плазмонице, нанооптике и оптоелектронике. У основи ефекта се налази промена Фермијевог нивоа у графену, најчешће у конфигурацијама задњег и горњег гејта. Према томе, резултати које је кандидат приказао у својој дисертацији се могу применити у конструкцији квалитетнијих направа на бази графена, а специфично оптичких модулатора на бази графена.

Монослојеви полупроводних дихалкогенида прелазних метала су, за разлику од балка, директни полупроводници, што их чини веома добрим кандидатима за примене у нанофотоници. Чињеница да луминисценција потиче од екситона указује да су ови системи веома погодни за фундаментална истраживања екситона, и начина на који се они могу спрезати са другим системима. Одатле, резултати ове дисертације везани за утицај металних нанообјеката на фотолуминисценцију монослоја молибден дисулфида могу имати значајан допринос у области физичке електронике чврстог стања и у другим областима где су овакве интеракције релевантне.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Током рада на научној теми дисертације, кандидат је овладао коришћењем већег броја експерименталних метода укључујући различите модове скенирајуће микрокопије и оптичке спектроскопије, као и нумеричким методама за решавање Максвелових једначина, што је показатељ афинитета ка научном раду и тежње за сталним усавршавањем. Кроз припрему резултата за чланке у врхунским међународним часописима, и самостално формирање иницијалног концепта чланака на којима је први аутор, видљиво је да је кандидат овладао способношћу критичке анализе резултата и њиховог представљања. Предмет и циљеви истраживања су у дисертацији јасно дефинисани, јасно су представљене методе које су коришћене, а добијени резултати су на одговарајући начин приказани, анализирани и дискутовани. На основу тога се закључује да је кандидат овладао научно-истраживачком методологијом и показао способност за самосталан научни рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

У оквиру дисертације остварени су следећи научни доприноси:

- Утврђени су параметри који одређују талас густине наелектрисања у церијум трителуриду, енергетски процеп и његова таласна дужина, на собној температури.
- Утврђено је да талас густине наелектрисања у церијум трителуриду на собној температури коегзистира са периодичном реорганизацијом телурових атома у оквиру којих је ово стање реализовано.
- Утврђено је да се изолацијом графена помоћу нанометарски танког заштитног оксидног слоја постиже стабилности промене контактне потенцијалне разлике која је пропорционална положају Фермијевог нивоа у графену.
- Утврђено је да графен модификује константе пропагације вођених модова оптичких таласовода и да се те модификације могу проценити помоћу теорије пертурбација кроз производ оптичке проводности графена и параметра снаге спрезања, који зависи од геометријских особина таласовода без графена и положаја графена спрам одговарајућих модова.
- Показана је примена система графен-оптички таласовод у оптичим модулаторима и утврђено је да оптичке карактеристике оваквих направа доминантно зависе од квалитета оптичких особина графена.
- Утврђено је да електрична поља кластера сребрних сферних и кубних наночестица доводе до слабог појачања А екситонског пика у луминесценцији монослојева и танких слојева молибден дисулфида.
- Утврђено је да је слабо спрезање електричних поља плазмонских наночестица и екситонске луминесценције условљено slabим интензитетом компоненте електричног поља која је паралелна равни молибден дисулфида, а са којом је спрезање једино могуће.
- Утврђено је да електрична поља кластера наночестица имају јаке компоненте које су нормалне на површину поменутих кластера, као и да је електрично поље најјаче у нанопроцепима између суседних наночестица у кластеру.
- Утврђено је да се ефекат појачања Раманових модова молекула цитрата и поливинил пиролидона (који су иницијално налазе на површини металних нано честица), као и молекула тијацијанинске боје (чија је адсорпција посебно проучавана) доминантно манифестује на местима где су поља кластера металних наночестица најјача, тј. у нанопроцепима између суседних наночестица у кластеру.
- Утврђено је да се адсорпија тијацијанинске боје на површину кластера металних наночестица дешава али под отежаним околностима услед постојања молекула цитрата на површини металних наночестица.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Постојеће студије базиране на употреби скенирајуће тунелске микроскопије баве се детаљним проучавањем таласа густине наелектрисања у тербијум трителуриду на

температури од 6 K и церијум трителуриду на 77 K. С обзиром, да је талас густине наелектрисања у церијум трителуриду робустно стање које постоји у опсегу температура од 77 K до 500 K, и да не постоје детаљне студије скенирајућом тунелском микроскопијом истог на собној температури, резултати кандидата представљају значајан допринос у разумевању начина на који се талас густине наелектрисања у телуридима ретких земаља манифестује на собној температури. Посебан допринос представљају резултати којима се утврђује преуређење телурових атома у оквиру планарне решетке у којој се налази талас густине наелектрисања. Наиме, у литератури постоје индиректни докази о поменутом преуређењу атома телура базирани на анализи дифракције X зрака на кристалима телурида ретких земаља. У том смислу директна опсервација ове појаве приказана у дисертацији кандидата, која претходно није виђена помоћу скенирајуће тунелске микроскопије, представља значајан помак у разумевању таласа густине наелектрисања у поменутим материјалима.

У литератури је познато да природа графена доводи до велике осетљивости на непосредно окружење што често узрокује нежељене модификације његових електронских и оптичких особина. У том смислу, резултати истраживања утицаја нанометарски танког слоја изолатора (сафир) депонованог на графен, приказани у докторској дисертацији кандидата, имају значајан допринос у конструкцији квалитетнијих направа на бази графена, пошто је показано да заштитни слој повећава стабилност положаја Фермијевог нивоа у графену при промени напона гејта. Поред тога, демонстрација да се промене контактне потенцијалне разлике и фазе електростатичке силе између графена и врха скенирајућег микроскопа могу пратити испод поменутог изолационог слоја даје одређени допринос даљем развоју примене Келвинове скенирајуће микроскопије и микроскопије на бази електричних сила на сличне системе.

У литератури је показано да се спрезањем графена и оптичких таласовода могу конструисати различите оптоелектронске направе одличних перформанси, укључујући електрооптичке модулаторе, поларизаторе и фотодетекторе. У односу на досадашња истраживања, утицај графена на константу пропагације вођених модова оптичких таласовода је у овој дисертацији описан производом проводности графена и параметра снаге спрезања, чиме се значајно упрошћава анализа оптичких карактеристика система графен-таласовод што је и показано на примеру графенских електрооптичких модулатора. На основу овог приступа, директно је показано да квалитет оптичких особина графена има доминантнији утицај од параметра снаге спрезања на практична ограничења ових направа. У том смислу, ови резултати имају значајан допринос у конструкцији електрооптичких модулатора на бази графена.

У литератури је познато да се луминисценција екситона прелазних метал дихалкогенида може модификовати (појачати) спрезањем са електричним пољима металних наночестица. У односу на претходна истраживања, која проучавају утицај електричних поља појединачних наночестица на луминисценцију екситона у монослојевима молибден дисулфида, кандидат је разматрао утицај електричних поља кластера наночестица различитих облика на луминесцентна својства екситона поменутог материјала. Стога, резултати који су представљени у дисертацији представљају оригиналан допринос и напредак у односу на постојећа сазнања о овим системима.

Кластери металних наночестица су познати као добри појачавачи Рамановог сигнала анализата који се налази у њиховој непосредној близини. За разлику од претходних истраживања, у овој дисертацији је показано да већински део појачаног Рамановог сигнала анализата (молекула цитрата, поливинил пиролидона или тијацијанинске боје) долази из нанопроцепа између суседних честица у кластеру без обзира на облик и величину кластера. Такође, у односу на претходне студије адсорпције тијацијанинске боје на површину металних наночестица које су иницијално покривене молекулима цитрата, у овој дисертацији је директно показано да молекули цитрата отежавају адсорпцију поменуте боје. У том смислу, ови резултати представљају јединствен допринос бољем разумевању методе

површином подстакнуте Раманове спектроскопије и механизма адсорпције тијацијанинске боје на површину металних наночестица.

4.3. Верификација научних доприноса

Током свог досадашњег истраживачког рада кандидат је био аутор или коаутор 14 публикација у часописима од међународног значаја (7 публикација у часописима M21 категорије, 4 публикације у часописима M22 категорије и 3 публикације у часописима M23 категорије). Поред тога кандидат је аутор/коаутор на 19 саопштења са међународних скупова штампаних у изводу (категирија M34) и 2 саопштења са скупова националног значаја штампаних у изводу (M64). Доприноси објављени у референцама 1, 2, 4, 15, 17, 18, 21, 21, 34 представљају главне резултате истраживања који су изложени у докторској дисертацији кандидата. Остале референце које су наведене такође имају допринос докторској дисертацији кандидата у смислу да је кроз обиман рад у оквиру одговарајућих истраживања кандидат стекао значајно искуство у примени различитих експерименталних метода на широк спектар материјала (укључујући дводимензионалне материјале) као и искуство у формирању оптичких модела у случају графена, која су била неопходна за реализацију резултата приказаних у дисертацији.

Радови у врхунским међународним часописима (M21)

1. Ralević U., Lazarević N., Baum A., Eiter H.-M., Hackl R., Giraldo-Gallo P., Fisher I. R., Petrovic C., Gajić R., Popović Z. V.: *Charge density wave modulation and gap measurements in CeTe₃*, Phys. Rev. B, Vol 94, No 16, 2016, pp. 165132-1-165132-9, (DOI: 10.1103/PhysRevB.94.165132, IF: 3.718, ISSN:2469-9950)
2. Ralević U., Isić G., Vasić B., Gvozdić D., Gajić R.: *Role of waveguide geometry in graphene-based electro-absorptive optical modulators*, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol 48, No 35, 2015, pp. 355102-1 - 355102-9 (DOI: 10.1088/0022-3727/48/35/355102, IF: 2.772, ISSN: 0022-3727).
3. Ralević U., Isić G., Vasić B., Gajić R.: *Modulating light with graphene embedded into an optical waveguide*, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol 47, No 33, 2014, pp. 335101-1 – 335101-9 (DOI: 10.1088/0022-3727/47/33/335101, IF: 2.721, ISSN: 0022-3727).
4. Beltaos A., Kovačević A. G., Matković A., Ralević U., Savić-Šević S., Jovanović Dj., Jelenković B. M., Gajić R.: *Femtosecond laser induced periodic surface structures on multi-layer graphene*, J. Appl. Phys., Vol 116, No 20, 2014, pp. 204306-1 – 204306-6 (DOI: 10.1063/1.4902950, IF: 2.183, ISSN: 0021-8979).
5. Vasić B., Kratzer M., Matković A., Nevosad A., Ralević U., Jovanović Dj., Ganser C., Teichert C., Gajić R.: *Atomic force microscopy based manipulation of graphene using dynamic plowing lithography*, Nanotechnology, Vol 24, No 1, 2013, pp. 015303-1 – 015303-9 (DOI: 10.1088/0957-4484/24/1/015303, IF: 3.672, ISSN: 0957-4484).
6. Matković A., Ralević U., Chhikara M., Jakovljević M. M., Jovanović Dj., Bratina G., Gajić R.: *Influence of transfer residue on the optical properties of chemical vapor deposited graphene investigated through spectroscopic ellipsometry*, J. Appl. Phys., Vol 114, No 9, 2013, pp. 093505-1 – 093505-5 (DOI: 10.1063/1.4819967, IF: 2.185, ISSN: 0021-8979).
7. Matković A., Beltaos A., Milićević M., Ralević U., Vasić B., Jovanović Dj., Gajić R., *Spectroscopic imaging ellipsometry and Fano resonance modeling of graphene*, J. Appl.

Радови у истакнутим међународним часописима (M22)

8. Kilanski L., Górska M., Ślawska-Waniewska A., Lewińska S., Szymczak R., Dynowska E., Podgórní A., Dobrowolski W., Ralević U., Gajić R.: *High temperature magnetic order in $Zn_{1-x}Mn_xSnSb_2+MnSb$ nanocomposite ferromagnetic semiconductors* J. Phys. Condens. Matter, Vol 28, No. 33, 2016, pp. 336004 -1-336004 -10 (DOI:10.1088/0953-8984/28/33/336004, IF: 2.209, ISSN: 0953-8984)
9. Gilić M., Petrović M., Kostić R., Stojanović D., Barudžija T., Mitrić M., Romčević N., Ralević U., Trajić J., Romčević M., Yahia I. S.: *Structural and optical properties of $CuSe_2$ nanocrystals formed in thin solid $Cu-Se$ film*, Infrared Phys. Technol., Vol 76, No-, 2016, 276–284 (DOI: 10.1016/j.infrared.2016.03.008, IF: 1.588, ISSN: 1350-4495).
10. Matković A., Chhikara M., Milićević M., Ralević U., Vasić B., Jovanović Dj., Belić M. R., Bratina G., Gajić R.: *Influence of a gold substrate on the optical properties of graphene*, J. Appl. Phys., Vol 117, No 1, 2015, pp. 015305-1 - 015305-9 (DOI: 10.1063/1.4905242, IF: 2.101, ISSN: 0021-8979).
11. Kratzer M., Klima S., Teichert C., Vasić B., Matković A., Ralević U., Gajić R.: *Temperature dependent growth morphologies of parahexaphenyl on SiO_2 supported exfoliated graphene*, J. Vac. Sci. Technol. B, Vol 31, No 4, 2013, pp. 04D114-1 – 04D114-7 (DOI: 10.1116/1.4813895, IF: 1.358, ISSN: 1071-1023).

Радови у међународним часописима (M23)

12. Beltaos A., Kovačević A. G., Matković A., Ralević U., Jovanović Dj., Jelenković B., Gajić R.: *Damage effects on multi-layer graphene from femtosecond laser interaction*, Phys. Scripta, Vol 2014, No T162, 2014, pp. 014015-1 – 014015-5 (DOI: 10.1088/0031-8949/2014/T162/014015, IF: 1.126, ISSN: 0031-8949).
13. Stojanović D., Matković A., Aškračić S., Beltaos A., Ralević U., Jovanović Dj., Bajuk-Bogdanović D., Holclajtner-Antunović I., Gajić R.: *Raman spectroscopy of graphene: doping and mapping*, Phys. Scripta, Vol 2013, No T157, 2013, pp. 014010-1 – 014010-4 (DOI: 10.1088/0031-8949/2013/T157/014010, IF: 1.296, ISSN: 0031-8949).
14. Matković A., Ralević U., Isić G., Jakovljević M. M., Vasić B., Milošević I., Marković D., Gajić R.: *Spectroscopic ellipsometry and the Fano resonance modeling of graphene optical parameters*, Phys. Scripta, Vol 2012, No T149, 2012, pp. 014069-1 – 014069-3 (DOI: 10.1088/0031-8949/2012/T149/014069, IF: 1.032, ISSN: 0031-8949).

Саопштења са међународних скупова штампаних у изводу (M34)

15. Ralević U., Isić G., Musić M., Bogdanović U., Vodnik V., Gajić R., *Influence of silver nanoparticle clusters on photoluminescence of single and few layer MoS_2* , Optical Nanospectroscopy III, Rome, Italy, 22-25 March 2016, Conference book, pp. 147-148 (ISBN: 978-88-8080-207-5)

16. Isić G., Ralević U., Laban B. B., Vodnik V., Vasić V., Aškrabić S., Gajić R., *Study of thiocyanine dye J-aggregates on single silver nanoparticle assemblies by surface enhanced Raman scattering and atomic force microscopy*, Optical Nanospectroscopy II, Dublin, Ireland 18-20 March 2015, Conference Book, pp. 37.
17. Ralević U., Isić G., Laban B. B., Vodnik V., Vasić V., Gajić R.,: *Surface enhanced Raman spectroscopy of thiocyanine dye J aggregates on single silver nanoaggregates*, Photonica 2015, Belgrade, Serbia, 24-28 August 2015, Book of Abstracts, pp. 97-98 (ISBN: 978-86-7306-131-3).
18. Ralević U., Lazarević N., Hu R., Petrović Č., Gajić R., Popović Z., *Charge density wave in CeTe₃ - A scanning microscopy study*, The 19th Symposium on Condensed Matter Physics, Belgrade, Serbia, 7-11 september 2015, Book of Abstracts, pp. 102.
19. Teichert C., Kratzer M., Hlawacek G., Khokhar F., van Gastl R., Vasić B., Ralević U., Gajić R., Bayer B. C., Hofmann S., *Organic thin film growth on various graphene substrates*, The 19th Symposium on Condensed Matter Physics, Belgrade, Serbia, 7-11 September 2015, Book of Abstracts, pp. 57.
20. Kovačević A. G., Petrović S., Matković A., Ralević U., Beltaos A., Perusko D., Vasić B., Gajić R., Jelenković B. M., *Surface nanostructures on surface of multilayered thin films induced by femtosecond laser beam*, Photonica 2015, Belgrade, Serbia, 24-28 August 2015, Book of Abstracts, pp. 206 (ISBN: 978-86-7306-131-3).
21. Ralević U., Isić G., Laban B. B., Vodnik V., Vasić V., Gajić R., *Study of thiocyanine dye J-aggregates on single silver nanoparticle assemblies by surface enhanced Raman scattering and atomic force microscopy*, DokDok 2015, Eisenach, Germany, 11-15 October 2015, DokDok 2015-Proceedings, pp. 105-106.
22. Ralević U., Vasić B., Matković A., Milićević M., Chhikara M., Bratina G., Gajić R., *Investigation of doping and strain in graphene using scanning probe microscopy and Raman imaging*, 73 Iuvsta Workshop In Eisenerz: Nanostructures on two-dimensional solids, Eisenerz, Austria, 22-26 September 2014, pp. 74.
23. Kovačević A. G., Beltaos A., Matković A., Ralević U., Krmpot A., Savić-Šević S., Pantelić D. V., Gajić R., Jelenković B. M., *Nanoparticles generation and regrouping through the interaction of femtosecond laser beam with few-layer graphene*, Photonica 2013, Belgrade, Serbia, 26-30 August 2013, Book of Abstracts, pp. 93 (ISBN: 978-86-82441-36-6).
24. Matković A., Ralević U., Chhikara M., Jakovljević M. M., Jovanović Dj., Bratina G., Gajić R., *Spectroscopic ellipsometry of chemical vapor deposited graphene transferred onto a dielectric substrate*, Photonica 2013, Belgrade, Serbia, 26-30 August 2013, Book of Abstracts, pp.103 (ISBN: 978-86-82441-36-6).
25. Beltaos A., Kovačević A. G., Matković A., Ralević U., Jovanović Dj., Jelenković B. M., Gajić R., *Damage effects on few-layer graphene from femtosecond laser interaction*, Photonica 2013, Belgrade, Serbia, 26-30 August 2013, Book of Abstracts, pp. 85 (ISBN: 978-86-82441-36-6).
26. Isić G., Vasić B., Matković A., Ralević U., Beltaos A., Spasenović M., Gajić R., *Plasmonic resonances in the infrared spectra of nanostructured graphene*, Graphene 2012, Belgium, 10-13 April 2012, Book of Abstracts, pp. 206 (ISBN: BI-665/2012).

27. Matković A., Beltaos A., Ralević U., Jakovljević M.M., Isić G., Vasić B., Jovanović Dj., Lazić Z., Smiljanić M.M., Vasiljević-Radović D., Gajić R., Graphene 2012, *Spectroscopic ellipsometry measurements of doped graphene*, Belgium, 10-13 April 2012, Book of Abstracts, pp. 208.
 28. Isić G., Ralević U., Vasić B., Jakovljević M., Gajić R., *Plasmons in arrays of graphene ribbons*, International Conference on Metamaterials and Dissemination Workshop 2012, Germany, 3-4 July 2012, Book of Abstracts, pp.32.
 29. Ralević U., Milošević M., Vasić B., Andjus P., Gajić R., *Visual Analysis of Astrocytes in Vitro using Atomic Force Microscopy*, Regional Biophysics Conference, Kladovo, Serbia, 3-7 September 2012.
 30. Vasić B., Kratzer M., Matković A., Nevesad A., Ralević U., Jovanović Dj., Ganser C., Teichert C., Gajić R., *AFM lithography of graphene using dynamic plowing*, International Conference on Nanoscience + Technology ICN+T 2012, France, 23-27 July 2012, Book of Abstracts, pp. 147 (ISBN: 2-914771-77-0).
 31. Matković A., Ralević U., Isić G., Jakovljević M., Gajić R., *Optical Characterization of Single Layer and Few Layer Graphene*, Imaginenano 2011, Bilbao, Spain, 11-14 April 2011 (ISBN: BI-943/2011).
 32. Vasić B., Matković A., Ralević U., Gajić R., *Scanning Probe Microscopy of Graphene*, XVIII Symposium on Condensed Matter Physics, Belgrade, Serbia, 18-22 April 2011, Book of Abstracts, pp. 74 (ISBN:-).
 33. Matković A., Ralević U., Isić G., Jakovljević M., Vasić B., Jovanović Dj., Milošević I., Marković D., Gajić R., *Spectroscopic Ellipsometry and Fano Resonance Modeling of Graphene Optical Parameters*, Photonica 2011, Belgrade, Serbia, 29 August – 2 September 2011, Book of Abstracts, pp. 81-82 (ISBN: 978-86-7306-110-8).
- Саопштења са скупова националног значаја штампаних у изводу (M64)
34. Ralević U., Vasić B., Matković A., Gorbachev R., Gajić R., *Atomic force microscopy and Kelvin probe force microscopy measurements of single and few layer graphene*, 13th Young Researchers Conference: Material Science and Engineering, Belgrade, Serbia, 10-12 December 2014, Book of Abstracts, pp. 46 (ISBN: 978-86-80321-30-1).
 35. Ralević U., Milosević M., Vasić B., Andus P., Gajić R., *Skenirajuća Mikroskopija Atomskih Sila – Proučavanje Morfologije Membrana Astrocita Amiotrofične Lateralne Skleroze*, Šesta Radionica Fotonike 2013, Serbia, 4-8 March 2013, Book of Abstracts, pp. 25 (ISBN: 978-86-82441-35-9).

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу свега наведеног, Комисија констатује да докторска дисертација Уроша Ралевића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, под насловом *Nanoscopy and applications of two-dimensional and quasi-two-dimensional systems* ("Наноскопија и примене дводимензионалних и квази дводимензионалних система") испуњава све формалне и суштинске услове предвиђене Законом о високом образовању, као и прописима Универзитета у Београду и Електротехничког факултета.

Докторска дисертација кандидата се бави веома актуелном проблематиком дводимензионалних система (електрона, шупљина, екситона и таласа густине наелектрисања) реализованих у дводимензионалним и слојевитим материјалима (церијум трителурид, графен, молибден дисулфид) и њихове потенцијалне примене укључујући примену графена у оптичким модулаторима, као и применама површинских плазмона кластера металних наночестица у детекцији молекула боје помоћу површином подстакнуте Раманове спектроскопије. У дисертацији су утврђени параметри који одређују талас густине наелектрисања у церијум трителуриду на собној температури, који коегзистира са периодичном реорганизацијом телурових атома. Затим, показано је да се изолацијом графена помоћу нанометарски танког заштитног оксидног слоја постиже стабилности промене контактне потенцијалне разлике која је пропорционална положају Фермијевог нивоа у графену. Утврђено је да графен модификује константе пропагације вођених модова оптичких таласовода и да се те модификације могу проценити помоћу теорије пертурбација кроз производ оптичке проводности графена и параметра снаге спрезања. Показана је примена система графен-оптички таласовод у оптичким модулаторима и утврђено је да оптичке карактеристике оваквих направа доминантно зависе од оптичког квалитета графена. Утврђено је да електрична поља кластера сребрних сферних и кубних наночестица доводе до слабог појачања А екситонског пика у луминесценцији монослојева и танких слојева молибден дисулфида због слабог спрезања електричних поља плазмонских наночестица и екситонске луминесценције. На крају, показано је да се адсорпија тијацијанинске боје на површину кластера металних наночестица дешава али под отежаним околностима услед постојања молекула цитрата на површини металних наночестица.

На основу увида у докторску дисертацију и радове кандидата, Комисија констатује да дисертација представља оригиналан и савремен научни допринос а да је кандидат током израде дисертације јасно показао способност за самосталан научно-истраживачи рад.

Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета да се докторска дисертација под насловом Nanoscopy and applications of two-dimensional and quasi-two-dimensional systems" ("Наноскопија и примене дводимензионалних и квази-дводимензионалних система") кандидата Уроша Ралевића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

Београд, 24. март 2017. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

Јелена Радовановић

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

Витомир Милановић

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

Горан Исић

др Горан Исић, научни сарадник
Универзитет у Београду – Институт за физику

Милан Тадић

др Милан Тадић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

Милка Потребих

др Милка Потребих, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет