

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Марка М. Грујића, мастер инж. ел. и рач.

Одлуком бр. 5003/10-3 од 14.01.2015. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Марка М. Грујића под насловом

**“Испољавање сопствених и индукованих
магнетских својстава графенских наноструктура”**

**[“Manifestations of intrinsic and induced
magnetic properties of graphene nanostructures”]**

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

Марко М. Грујић је докторске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду уписао школске 2010/2011. године (15.12.2010.). Докторску дисертацију под насловом “Испољавање сопствених и индукованих магнетских својстава графенских наноструктура” (“Manifestations of intrinsic and induced magnetic properties of graphene nanostructures”) кандидат је пријавио Комисији за студије III степена Електротехничког факултета 10.4.2014. Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду је на седници одржаној 26.5.2014. године, одлуком бр. 5003/10-1, именovalo Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације у саставу: др Милан Тадић (ментор), редовни професор, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду, dr. François M. Peeters (ментор), full professor, Department of Physics, University of Antwerp, др Јелена Радовановић, ванредни професор, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду, др Небојша Ромчевић, научни саветник, Институт за физику, Универзитет у Београду и др Дејан Тошић, редовни професор, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду. Извештај комисије је усвојен на седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета одржаној 8.7.2014. Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду је 15.9.2014. године дало сагласност на предлог теме докторске дисертације (Одлука бр. 61206-3842/2-14).

Кандидат је 10.12.2014. године предао урађену дисертацију на преглед и оцену. На основу предлога Комисије за студије III степена од 16.12.2014. године, Наставно-научно веће Електротехничког факултета у Београду је на седници одржаној 23.12.2014. године, одлуком бр. 5003/10-3 од 14.1.2015., именovalo Комисију за оцену услова и прихватања докторске дисертације у саставу: др Милан Тадић, редовни професор, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду, dr. François M. Peeters, full professor, Department of Physics, University of Antwerp, др Дејан Раковић, редовни професор, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду, dr. Bart Partoens, full professor, Department of Physics, University of Antwerp и др Владимир Арсоки, доцент, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација припада научној области Електротехнике и рачунарства и ужој научној области Наноелектронике и фотоники за коју је Електротехнички факултет у Београду матични. Такође, део докторске дисертације је урађен на Универзитету у Антверпену, где је кандидат примљен на студијски програм докторских студија Наука: Физика (поље истраживања: нанофизика). Са Универзитетом у Антверпену потписан је споразум о изradi заједничког доктората заведен на Електротехничком факултету 11.7.2014. под бројем 1311.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Марко Грујић, мастер инж. електротехнике и рачунарства, рођен је 25.01.1987. године у Београду. На Електротехнички факултет Универзитета у Београду, Одсек физичка електроника, уписао се 2005. године, а дипломирао је септембра 2009. године на Смеру за наноелектронику, оптоелектронику и ласерску технику са просечном оценом 9,70. За постигнути успех током основних студија добио је награду за најбољег студента Одсека за физичку електронику 2009. године. Од септембра до новембра 2009. године на Универзитету у Антверпену је спровео истраживање из области моделовања графенских квантних тачака. Октобра 2009. године уписао је мастер студије на Модулу за наноелектронику, оптоелектронику и ласерску технику Електротехничког факултета у Београду. Све предмете је положио са оценом 10, а октобра 2010. године одбранио је мастер рад под насловом “Електронска структура графенских квантних тачака у нормалном магнетском пољу”.

Марко Грујић је студент докторских студија на Модулу за наноелектронику и фотонику Електротехничког факултета у Београду од децембра 2010. године. Све предмете на докторским студијама је положио са оценом 10, а 6.6.2014. године положио је докторски испит у оквиру процедуре пријаве теме докторске дисертације под насловом “Испољавање сопствених и индукованих магнетских својстава графенских наноструктура”. Израда докторске дисертације кандидата се спроводи у оквиру споразума између Универзитета у Београду, Универзитета у Антверпену и Електротехничког факултета о изradi заједничког доктората. Током докторских студија, кандидат је више пута посетио Групу за теорију кондензоване материје Департамента за физику Универзитета у Антверпену.

Марко Грујић је запослен на Електротехничком факултету у Београду од јануара 2011. Тренутно је ангажован као истраживач-сарадник на пројекту “Оптоелектронски нанодимензиони системи – пут ка примени”, ИИИ 45003, код Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије. До сада је публикувао 5 радова у часописима са СЦИ листе (4 рада су у категорији M21 и 1 рад је у категорији M23) и 1 рад у категорији M24. Поред тога, презентовао је 1 рад на међународној конференцији и 1 рад на конференцији националног значаја, за који је добио награду за најбољи рад младог аутора. На свим до сада публикованим радовима, Марко Грујић је првопотписани аутор.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација је написана на енглеском језику, на 145 страна и садржи 38 слика. Дисертација садржи насловне стране на енглеском и српском језику, страну са информацијама о ментору и члановима Комисије за преглед, оцену и одбрану дисертације, изјаве захвалности и резиме (на енглеском и српском) и садржај. Након садржаја следи текст дисертације, који је подељен у седам поглавља: 1. Introduction, 2. Theoretical models and graphene nanoribbons, 3. Electronic and optical properties of circular graphene quantum dots in a magnetic field, 4. Antiferromagnetism in hexagonal graphene structures, 5. Orbital magnetic moments in insulating Dirac systems, 6. Spin-valley filtering in strained graphene heterostructures and 7. Conclusion. Дисертација садржи списак коришћене литературе (183 референце) и кратку биографију аутора са списком радова. Уз дисертацију су приложене и Изјава о ауторству, Изјава о истоветности штапане и електронске верзије докторског рада, као и Изјава о коришћењу.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом поглављу дат је теоријски увод у основна физичка својства графена. Зонска структура овог материјала је анализирана помоћу метода јаке везе (ТБМ), који омогућава експлицитно узимање у обзир атомске конфигурације, како у унутрашњости тако и на ивицама графенских наноструктура. Резултати за нискоенергетска стања добијени помоћу метода јаке везе могу се аналитички интерпретирати и показано је да су ова стања добро описана Дираковом једначином за ултрарелативистичке фермионе. Поред овога, у првом поглављу су детаљно анализирани две тополошки различите изолаторске фазе које се могу појавити у саћастој решетки. На крају овог поглавља приказано је како магнетско поље утиче на електронска и шупљинска стања у графену, а особине Ландауовог спектра су укратко дискутоване.

У другом поглављу су представљени теоријски модели коришћени у дисертацији: Хабардов модел и метод неравнотежних Гринових функција (НЕГФ). Хабардов модел представља проширење метода јаке везе које узима у обзир интеракцију између електрона различитих спинова на орбиталама истог угљениковог атома. НЕГФ је изузетно користан формализам квантног транспорта помоћу кога се на једноставан и реалистичан начин узима у обзир утицај несавршености, као што су дефекти, допирање и утицај локалних магнетских момената на транспортна својства графенских структура. Поред тога, у другом поглављу приказано је како се електронска својства модификују помоћу конфинирања електрона у нанотракама. Показано је да се електронске структуре нанотрака са фотеластим и цикцак завршецима разликују. Такође је показано да се антиферомагнетска фаза појављује код нанотрака са цикцак ивицама.

У трећем поглављу су представљени резултати моделовања Ландауових нивоа у кружним графенским квантним тачкама помоћу Дирак-Вејлове једначине. Посебна пажња је посвећена разматрању утицаја конфинирања носилаца на електронски спектар. За моделовање различитих електронских структура квантних тачака са различитим обликом ивица коришћена су два типа граничних услова: цикцак и гранични услов бесконачне масе. Дискутована је појава дијамагнетизма у графенским квантним тачкама, која је повезана са скакајућим орбитама и на тај начин је зависна од облика ивице. Резултати добијени помоћу Дирак-Вејловог приступа су упоређени са резултатима ТБМ-а. Показано је да се континуални Дирак-Вејлов модел за гранични услов бесконачне масе врло добро слаже са резултатима прорачуна по методу јаке везе.

У четвртном поглављу истражено је унутрашње магнетско уређење графенских наноструктура у одсуству спољашњих поља. Указано је да велика густина стања на цикцак

ивицама може да доведе до спонтаног антиферромагнетског уређења у графенским квантним тачкама. За опис оваквог сопственог магнетског уређења коришћен је Хабардов модел. Конкретно је анализирана појава антифероманетизма у графенским квантним прстеновима, са освртом на промене густине стања и локалне густине магнетских момената са унутрашњим пречником прстена. Детаљно су разматрани утицаји различитих типова спољних и унутрашњих ивица прстенова, као и утицај несавршености на магнетско уређење.

Пето поглавље се бави графеном са вештачки индукованим магнетским особинама, што је тема од изузетног интереса у областима истраживања графена и дводимензионих материјала. Оваква ситуација је последица недавних достигнућа у области ван дер Валсових хетероструктура, које се добијају вертикалним слагањем различитих 2Д материјала. Овакве структуре се могу дизајнирати у складу са жељеном применом. У дисертацији су посебно анализирани ефекти индуковане масе и спин-орбитне интеракције (СОИ) на енергетски спектар и транспортна својства. Најперспективнији начин за индуковање масе носилаца су хетероструктуре графена са бор нитридом, док је за увећање СОИ предложено коришћење различитих супстрата и допирање адатомима. Када је било маса било СОИ различита од нуле у графену, долази до појаве Паулијевих парамагнетских момената, повезаних са саморотацијом Блохових таласа у близини Диракових долина. За случај индуковане масе и/или СОИ у дисертацији је анализирана баријера на коју је примењено спољашње магнетско поље. Помоћу континуалног приступа испитан је утицај интеракције између магнетских момената на трансмисиону карактеристику и проводност. Показано је да се разлика проводности два спина увећава са повећањем магнетског поља. Ови резултати су упоређени са резултатима добијеним помоћу НЕГФ-а и добијено је добро слагање између два приступа.

Предложен је модел електронске трансмисије кроз напегнуте графенске баријере са вештачки изазваном масом електрона, а резултати овог прорачуна су приказани у шестом поглављу. Напрезање се у графену манифестује као псеудоманетско поље, које је слично реалном магнетском пољу са обрнутим знаком у супротним долинама и стога је инваријантно у односу на инверзију времена. С друге стране, ако је СОИ у графену довољно јака, графен постаје тополошки изолатор, са нетривијалним тополошким енергетским процепом, док маса носилаца различита од нуле доводи до појаве тривијалног енергетског процепа. Када су и СОИ и маса различити од нуле, ефекти услед тополошки тривијалног и тополошки нетривијалног процепа се комбинују. Због специфичне графенске решетке, ови ефекти зависе и од спина и од долиноског броја. Одређене су трансмисионе карактеристике пропагације електрона кроз графенску баријеру у функцији упадне енергије и упадног угла електрона. Анализиран је утицај спина и долине на електронску трансмисију.

Коначно, у седмом поглављу дат је преглед главних резултата изнетих у дисертацији и формулисани су најважнији закључци о испољавању магнетских својстава у електронској структури и транспортним особинама графенских наноструктура. Напоследку, укратко је изнето виђење развоја области истраживања у будућности.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Вероватно најзначајнији замајац привредног, економског, научног па и културног развоја људске цивилизације после другог светског рата јесте експоненцијални развој рачунарских ресурса. Ово је најбоље исказано у Муровом закону, који тврди да се број транзистора на чипу удвостручава сваких 18 месеци. У 2015. години Муров закон ће напунити 50 година, што је без преседана у људској историји за емпиријски закон којим се предвиђају трендови у будућности, посебно због експоненцијалног карактера овог закона. Развој полупроводничке индустрије је довео до “гранања” овог закона, тако да се различите пројекције дају за будући развој полупроводничких меморија, процесора, радиофреквентних

интегрисаних кола, фотонских сензора итд. Штавише, вероватно се овај закон може применити на било коју људску делатност чији је развој суштински заснован на технолошким иновацијама. Међутим, због експоненцијалног раста и неизбежних физичких ограничења на атомском нивоу, може се наслутити престанак важења овог закона у индустрији полупроводника.

Да би се избегле тешкоће које настају услед скалирања полупроводничких направа, у последње време интензивно се ради на развоју нових технологија и употреби нових материјала. Један од тих материјала је графен, материјал који је покренуо мини револуцију у физици чврстог стања у претходној деценији, која је захтевала развој нових концепата и теорија. Изузетни допринос А. Гејма и К. Новоселова развоју ове области награђен је Нобеловом наградом за физику 2010. Графен је познат по својим изванредним својствима и први је откривени дводимензиони материјал. Други дводимензиони материјали пронађени након открића графена су силицен, германен, хексагонални бор нитрид, молибден дисулфид итд.

Електронски процеси у графену (и сличним материјалима) су специфични и могу се описати помоћу Диракове једначине за ултрарелативистичке честице. Све до недавно ова једначина није коришћена у физици чврстог стања и наноелектроници. Могућност реализације нових направа на бази графена је међутим привукла велики број истраживача широм света, који су развили нове теоријске концепте, који по комплексности значајно превазилазе концепт заснован на Дираковој једначини. Све ове активности су довеле до експлозивног развоја области, која је постала једна од најактуелнијих на почетку 21. века, како у фундаменталној тако и у примењеној науци.

На основу наведених чињеница, може се констатовати да дисертација кандидата у потпуности задовољава услов савремености. Поред тога, након анализе садржаја тезе, као и релевантних публикација кандидата, закључује се да дисертација испуњава и услов оригиналности, као што се очекује од докторске дисертације. Кандидат је првопотписани аутор на свим својим радовима који су објављени у водећим међународним часописима и послужили су као основ за формирање трећег, четвртог, петог и шестог поглавља.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Кандидат је детаљно упознат са савременом литературом из области истраживања, што се огледа у 183 референце наведене у библиографији. Велики број наведених референци је публикован у водећим међународним часописима, као што су *Nature*, *Science*, *Physical Review Letters* и *Physical Review B*. Сви радови су уско повезани са облашћу истраживања, а међу њима се налази и 5 радова кандидата.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Током рада на докторској дисертацији, кандидат је био упознат са релевантном литературом и показао је да влада научном облашћу и облашћу истраживања на завидном нивоу. Током истраживања коришћене су следеће методе:

- Главни метод којим је анализирана већина споменутих проблема је решавање Дирак-Вејлове једначине. Добра особина ове методе је да она даје аналитичка решења, која се у битним детаљима слажу са решењима добијеним помоћу метода јаке везе. Поред тога, овај приступ показује задовољавајућу тачност у већини практичних ситуација.
- Поред континуалног приступа коришћен је и дискретни приступ по методу јаке везе. Овај метод на једноставан начин омогућава узимање у обзир детаљне атомске конфигурације графенских наноструктура и нанонаправа и једначине овог метода се једноставно нумерички решавају. Међутим, практичне примене овог метода су ограничене на системе сачињене од малог броја атома.

- Електрон-електрон интеракција је описана помоћу Хабардовог модела. Користећи терминологију секундарног квантовања, Хабардов модел је квартичан (садржи четири оператора анихилације-креације), па је прилично захтеван и непрактичан за конкретну употребу. Хабардов модел је стога у дисертацији имплементиран користећи апроксимацију средњег поља, која претпоставља да електрон датог спина интерагује са средњом вредношћу концентрације електрона супротног спина на истом атомском месту. Због овог поједностављења спроводи се самосагласни поступак, тако што прорачун започиње са претпостављеним произвољним магнетским уређењем, а затим се релевантне једначине итерирају све док промена добијених концентрација електрона у две итерације заредом не постане занемарљива.
- За моделовање транспортних карактеристика, поред континуалног модела коришћен је НЕГФ формализам. У континуалном моделу транспортне карактеристике се добијају решавањем интеграла функција које зависе од коефицијента трансмисије. С друге стране, НЕГФ имплементира концепт метода јаке везе и стога пружа увид у анализирани систем на атомском нивоу. Недостатак НЕГФ-а је да не даје јасну и транспарентну теоријску слику добијених резултата. Уколико се, међутим, НЕГФ комбинује са континуалним моделом, транспортне особине анализираних система могу се изузетно детаљно објаснити, што је приступ коришћен у дисертацији.
- Сви наведени методи су имплементирани помоћу програма написаних у програмским пакетима Matlab и Mathematica.

Методологија коришћена у овој тези је у складу са стандардима научног истраживања, што је резултовало коректним решењем проблема дефинисаних у дисертацији. Сprovedена је систематска и свеобухватна анализа добијених решења.

3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати добијени током рада на овој докторској дисертацији представљају важан теоријски допринос савременим истраживањима у физичкој електроници графена и његових примена. Дисертација доприноси разумевању особина графенских наноструктура. Дисертација се посебно бави ефектима магнетског поља и магнетизма на електронску структуру и транспортне особине наноуправа. Сазнања до којих се дошло током израде дисертације су значајан допринос применама у наноелектроници и спинтроници. Да би се овај циљ у потпуности остварио, неопходно је да се технологија израде графенских управа унапреди до нивоа на коме је могуће ефикасно контролисати њихова транспортна својства. Огроман напредак у области истраживања је већ остварен и могу се предвидети примене графена високих перформанси у наноелектроници, наномагнетизму и спинтроници. Уз то мишљења смо да ова дисертација представља значајан допринос новој области *долиноетронике*.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат је детаљно упознат са најсавременијим достигнућима у области истраживања. На основу детаљног увида у дисертацију, може се закључити да је кандидат успешно савладао теорију и методологију до нивоа да је оспособљен за самостални научноистраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Будући да је рад приказан у дисертацији теоријског карактера, сви доприноси су исказани у облику извођења одређених израза, имплементације развијене теорије на рачунару, нумеричких прорачуна и анализе добијених резултата. Могу се уочити следећи научни доприноси докторске дисертације кандидата:

- Извођење Ландауовог спектра, као и процена валидности различитих типова граничних услова примењених на решавање Дирак-Вејлове једначине за електроне у кружној графенској квантној тачки. Уочене су разлике спектра Ландауових нивоа у графенским квантним тачкама за цикцак гранични услов и гранични услов бесконачне масе. Показано је да се резултати добијени помоћу континуалног модела добро слажу са резултатима прорачуна по методу јаке везе.
- Пронађена је антиферромагнетска фаза у шестоугаоним графенским квантним прстеновима са цикцак унутрашњом ивицом. Нађено је да расподела магнетских момената зависи од типа спољашње ивице и да се јаче антиферромагнетско уређење јавља код прстенова него код тачака. Ово је објашњено специфичном хибридизацијом суседних стања на унутрашњој ивици прстена.
- У баријерама у изолаторским Дираковим материјалима уочени су орбитални магнетски моменти услед топологије зонске структуре. Показано је да спин-орбитна интеракција доводи до ове појаве, али су ови моменти спрегнути са спином, а не са долином, што је случај код обичног енергетског процепа у материјалима са саћастом решетком изазваног масом носилаца различитом од нуле.
- Утицај орбиталних магнетских момената на магнетотранспорт манифестује се у осцилацијама енергетски зависне проводности у функцији енергије. Овакво понашање је приписано специфичним резонантним стањима у анализираној баријери у графену.
- Предложена је направа названа спин-долински филтар, која је базирана на напрегнутој графенској баријери, што је принципски остварљиво помоћу ван дер Валсових хетероструктура. Комбинација СОИ и недостатка просторне симетрије у масивном графену доводи до спин-долински зависног енергетског процепа. Поред тога, утврђено је да се филтрирање може контролисати помоћу напона и напрезања.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Истраживачки рад кандидата Марка М. Грујића обухвата модерну научну проблематику у фундаменталној и примењеној физици кондензованог стања и наноелектроници. Истраживање је засновано на савременим теоријским и експерименталним резултатима који су објављени у најистакнутијим међународним научним часописима. Циљ дисертације је био да пружи решења важних проблема у теорији електронске структуре графенских квантних тачака, да истражи магнетизам у графенским наноструктурама и да понуди смернице за примену графена у наноелектроници и спинтроници. Након разматрања полазних хипотеза, циљева истраживања и добијених резултата, уочава се да је кандидат успешно савладао проблематику и одговорио на сва важна питања која су се појавила током рада на дисертацији. Развијени теоријски модели представљају значајне научне доприносе истраживању графена и дводимензионих материјала.

4.3. Верификација научних доприноса

У току рада на дисертацији, Марко М. Грујић је објавио 5 радова у међународним часописима са SCI листе. Од тога 4 рада су публикована у часописима категорије M21 и 1

рад у часопису категорије M23. Кандидат је такође објавио 1 рад у категорији M24, 1 рад у категорији M33 и 1 рад у категорији M63.

Категорија M21:

1. **M. M. Grujić**, M. Ž. Tadić, F. M. Peeters, “Spin-Valley Filtering in Strained Graphene Structures with Artificially Induced Carrier Mass and Spin-Orbit Coupling”, *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, Vol. 113, 046601 (5 p.) 2014 (**IF: 7.728**) (ISSN: 0031-9007) (DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.046601).
2. **M. M. Grujić**, M. Ž. Tadić, F. M. Peeters, “Orbital magnetic moments in Dirac systems: Impact on magnetotransport in grapheme van der Waals heterostructures”, *PHYSICAL REVIEW B*, Vol. 90, 205408 (10 p.), 2014 (**IF: 3,664**) (ISSN: 1098-0121) (DOI: 10.1103/PhysRevB.90.205408).
3. **M. Grujić**, M. Tadić, F. M. Peeters, “Antiferromagnetism in hexagonal graphene structures: Rings versus dots”, *PHYSICAL REVIEW B*, Vol. 87, 085434 (6 p.), 2013 (**IF: 3,664**) (ISSN: 1098-0121) (DOI: 10.1103/PhysRevB.87.085434).
4. **M. Grujić**, M. Zarenia, A. Chaves, M. Tadić, G. Farias, F. M. Peeters, “Electronic and optical properties of a circular graphene quantum dot in a magnetic field: Influence of the boundary conditions”, *PHYSICAL REVIEW B*, Vol. 84, 205441 (12 p.), 2011 (**IF: 3,691**) (ISSN: 1098-0121) (DOI: 10.1103/PhysRevB.84.205441).

Категорија M23:

1. **M. Grujić**, M. Zarenia, M. Tadić, F. M. Peeters, “Interband optical absorption in a circular graphene quantum dot”, *PHYSICA SCRIPTA*, Vol. T149, 014056 (4 p.), 2012 (**IF: 1.204**) (ISSN: 0031-8949) (DOI: 10.1088/0031-8949/2012/T149/014056).

Категорија M24:

1. **M. Grujić**, M. Tadić, “Electronic states and optical transitions in a graphene quantum dot in a normal magnetic field”, *SERBIAN JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING*, Vol. 8, pp. 53-62, 2011 (ISSN 1451-4869) (DOI: 10.2298/SJEE1101053G).

Категорија M33:

1. **M. M. Grujić**, M. Ž. Tadić, F. M. Peeters, “Pauli paramagnetism and spin-valley filtering in graphene van der Waals heterostructures”, *Proceedings of 1st International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN 2014)*, Vrnjačka Banja, pp. MOI2.1.1-6, 2-5. jun 2014.

Категорија M63:

1. **M. Grujić**, M. Tadić, “Elektronska stanja i optički prelazi u grafenskoj kvantnoj tački u normalnom magnetnom polju”, *Zbornik radova 54. Konferencije ETRAN*, Donji Milanovac, Rad MO3.4, 7-10. jun 2010.

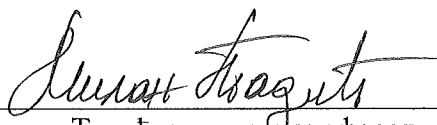
5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидата Марка М. Грујића, мастер инж. ел. и рач., садржи савремене и оригиналне научне доприносе. Дисертација се бави како својственим тако и индукованим магнетским својствима графенских наноструктура. Моделована је електронска структура графенских квантних тачака и нађена је појава дијамагнетизма у њима. Истражена је и појава магнетског уређења у графенским квантним прстеновима и квантним тачкама. Нађено је да облик и величина ивице прстена имају пресудан утицај на распоред и вредност магнетских момената. Показано је да орбитални магнетски моменти спрегнути са спином услед спин-орбитне интеракције у ван дер Валсовим хетероструктурама доводе до ренормализације Ландеовог g -фактора. Такође је приказана њихова дуалност са долињским спрегнутим магнетским моментима у саћастим решеткама без инверзионе симетрије. Трансмисионе особине баријере се огледају у резонантном понашању проводности са енергијом. Предложен је спин-долињски филтар и анализиране су његове особине. Добијени резултати су важни за примену графенских наноструктура у наноелектроници и спинтроници. Сви добијени резултати су објављени у релевантним међународним часописима са SCI листе.

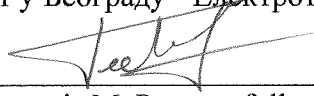
На основу свега претходно изреченог, Комисија за преглед и оцену дисертације констатује да је Марко М. Грујић испунио све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Стога са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета да докторску дисертацију под називом *“Испољаванье сопствених и индукованих магнетских својстава графенских наноструктура”* (*“Manifestations of intrinsic and induced magnetic properties of graphene nanostructures”*) прихвати, изложи на увид јавности и упути Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду на коначно усвајање и давање одобрења кандидату да приступи усменој одбрани.

У Београду и
Антверпену, 29.1.2015.

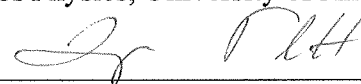
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



Др Милан Тадић, редовни професор
Универзитет у Београду - Електротехнички факултет



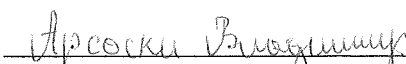
Dr. François M. Peeters, full professor
Department of Physics, University of Antwerp, Belgium



Др Дејан Раковић, редовни професор
Универзитет у Београду-Електротехнички факултет



Dr. Bart Partoens, full professor
Department of Physics, University of Antwerp, Belgium



Др Владимир Арсоки, доцент
Универзитет у Београду-Електротехнички факултет