

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Душана Б. Топаловића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета бр. 5008/13-3 од 18.09.2020. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Душана Б. Топаловића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, под насловом

„Анализа и моделовање електронских стања у HgTe наноструктурама“

(„Analysis and modeling of electron states in HgTe 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

Кандидат Душан Б. Топаловић је уписао докторске студије у школској 2013/14. години на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, студијски програм Електротехника и рачунарство, модул Наноелектроника и фотоника. Током студија положио је све испите (10) са просечном оценом 10,00 и испунио све обавезе везане за студијски истраживачки рад које су прописане студијским програмом сакупивши предвиђених 120 ЕСПБ.

Душан Б. Топаловић је пријавио тему докторске дисертације 28.11.2019. године под радним насловом „Анализа и моделовање електронских стања у HgTe наноструктурама“ („Analysis and modeling of electron states in HgTe nanostructures“).

Комисија за студије трећег степена Електротехничког факултета Универзитета у Београду разматрала је 03.12.2019. године предлог теме за израду докторске дисертације и упутила Наставно-научном већу Електротехничког факултета предлог за именовање Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације.

Наставно научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду је на седници бр. 846 10.12.2019. године именovalo Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 5008/13-1 од 19.09.2019. године) у саставу:

- др Милан Тадић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
- др Петар Лукић, редовни професор, Универзитет у Београду – Машински факултет,
- др Владимир Рајовић, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
- др Јелена Радовановић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет и

- др Петар Матавуљ, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.

За ментора докторске дисертације је предложен

- др Владимир Арсоки, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.

Јавна усмена одбрана предложене теме докторске дисертације на Електротехничком факултету Универзитета у Београду је обављена 27.12.2019. године. На одбрани су били присутни сви чланови Комисије. Комисија је донела закључак да је кандидат Душан Б. Топаловић на јавној усменој одбрани предложене теме докторске дисертације добио оцену „задовољно“. Комисија је заједно са предложеним ментором докторске дисертације др Владимиром Арсоким, ванредним професором Електротехничког факултета Универзитета Београду, сачинила Извештај о оцени подобности теме и кандидата. Извештај је предат 27.01.2020. године.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду је на седници бр.848 одржаној 11.02.2020. године усвојило Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 5008/13-2 од 11.02.2020. године).

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације Душана Б. Топаловића, под насловом „Анализа и моделовање електронских стања у HgTe наноструктурама“ („Analysis and modeling of electron states in HgTe nanostructures“) дана 24.02.2020. године (Одлука бр. 61206-750/2-20 од 24.02.2020. године).

Душан Б. Топаловић је 08.07.2020. године предао на преглед и оцену урађену докторску дисертацију под насловом „Анализа и моделовање електронских стања у HgTe наноструктурама“ („Analysis and modeling of electron states in HgTe nanostructures“).

Комисија за студије трећег степена Електротехничког факултета Универзитета у Београду је 14.07.2020. године потврдила је испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду је на седници бр. 852 одржаној 08.09.2020. године именovalo је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације (Одлука бр. 5008/13-3 од 18.09.2020. године), у саставу:

- др Владимир Арсоки, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
- др Милан Тадић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
- др Петар Лукић, редовни професор, Универзитет у Београду – Машински факултет,
- др Јелена Радовановић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,
- др Петар Матавуљ, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет и
- др Владимир Рајовић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација под насловом „Анализа и моделовање електронских стања у HgTe наноструктурама“ припада научној области Електротехника и рачунарство, ужа научна

област Наноелектроника и фотоника, за коју је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду.

Ментор кандидата је др Владимир Арсоски, ванредни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду, члан Катедре за микроелектронику и техничку физику. Изабран је у звање ванредног професора и држи наставу на основним, мастер и докторским студијама из области Наноелектронике и фотонике при Катедри за микроелектронику и техничку физику. Активно се бави истраживањем из наведене научне области и аутор је или коаутор већег броја радова са SCI листе, који га квалификују за вођење ове докторске дисертације.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Душан (Бранислав) Топаловић рођен је 28.03.1989. године у Прибоју. Основну школу и гимназију је завршио у Новој Вароши као носилац Вукове дипломе. Основне академске студије на Електротехничком факултету у Београду, студијски програм Електротехника и рачунарство, уписао је 2008. године. Дипломирао је 29.06.2012. године на одсеку за Физичку електронику, смер Наноелектроника, оптоелектроника и ласерска техника, са просечном оценом 8,64 и одбрањеним завршним радом „Упоредна анализа методе коначних разлика и методе коначних елемената за решавање Шредингерове једначине у раванској геометрији“, чиме је стекао стручно звање дипломирани инжењер електротехнике и рачунарства. Мастер академске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, студијски програм Електротехника и рачунарство, модул Наноелектроника и фотоника, уписао је 2013. године. Мастер академске студије је завршио 03.07.2013. године, са просечном оценом 10,00, одбранивши завршни рад „Спин-орбитна интеракција у валентној зони полупроводничке квантне јаме“, чиме је стекао стручно звање мастер инжењер електротехнике и рачунарства. Докторске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, модул Наноелектроника и фотоника уписао је 2013. године. Положио је све испите са просечном оценом 10,00 и испунио све обавезе прописане студијским програмом сакупивши предвиђених 120 ЕСПБ.

Од 01.10.2013. године запослен је у Лабораторији за заштиту од зрачења и заштиту животне средине, Института за нуклеарне науке „Винча“, Универзитета у Београду. У звање истраживач сарадник је изабран 02.04.2015. године, а реизабран 26.04.2018. године. Научно-истраживачки рад Душана Б. Топаловића се одвија у оквиру области наноелектронике. У ужем смислу посебно је заинтересован за проучавање егзистенције стања тополошког изолатора у наносистемама различите димензионалности и геометрије који се базирају на HgTe и фосфорену. Поред научно-истраживачког рада Душан Б. Топаловић учествује и у активностима Лабораторије за заштиту од зрачења и заштиту животне средине, Института за нуклеарне науке „Винча“. У лабораторији је ангажован на истраживању оптималних метода калибрације сензора за широку примену помоћу метода вештачке интелигенције. Током досадашњег научно-истраживачког рада објавио је шест (6) радова у часописима са импакт фактором (четири категорије M21 и два категорије M22), један (1) рад у часопису категорије M24 и преко тридесет (30) радова на домаћим и међународним конференцијама. Од школске 2018/19. године ангажован је приликом извођења наставе на Машинском факултету, Универзитета у Београду, на предмету Електротехника, на катедри за Физику и електротехнику. Добитник је награде за најбољи рад младог истраживача у оквиру стручне секције Микроелектроника и оптоелектроника, 57. ЕТРАН конференције, Златибор, јун 3-6, 2013. године. Додатна усавршавања је стекао као гостујући истраживач на Департману за физику, Универзитета у Антверпену, Антверпен, Белгија и у Норвешком институту за истраживање ваздуха, Кјелер, Норвешка. Служи се енглеским језиком.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација под насловом „Анализа и моделовање електронских стања у HgTe наноструктурама“ је написана на српском језику при чему је коришћено ћирилично писмо. По форми и структури одговара Упутству за обликовање докторске дисертације и Упутству за формирање репозиторијума докторских дисертација Универзитета у Београду од 2019. године. Докторска дисертација има укупно 109 страна тематског текста и прилога са укупно 8 табела, 57 слика и списком од 230 библиографских референци. У овај број нису урачунате насловне стране на српском и енглеском језику и почетних 15 страна које укључују: страну са подацима о ментору и члановима комисије, страну са изразима захвалности, сажетак на српском и енглеском језику, садржај, списак слика и списак табела. Докторска дисертација се састоји из пет (5) тематских поглавља, списка литературе и девет (9) прилога. Тематска поглавља су организована у следећем редоследу:

1. Увод,
2. Методи израчунавања електронских особина HgTe наноструктура,
3. Подешавање енергетског процепа у HgTe/Cd_xHg_{1-x}Te асиметричним квантним јамама,
4. Електронска стања у 2Д HgTe наноструктурама у присуству нормалног магнетског поља,
5. Закључак.

Након прегледа коришћене литературе налази се део са прилозима (Прилог 1-9). На самом крају дисертације, налази се биографија аутора и три неопходне изјаве (Изјава о ауторству, Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и Изјава о коришћењу).

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом поглављу је дат преглед наноструктура које се базирају на жива-телурид (хемијска ознака: HgTe) једињењу. Систематски су представљене технолошке процедуре за њихову израду и дат је преглед основних особина HgTe и CdTe једињења, као и Cd_xHg_{1-x}Te легуре.

У другом поглављу је најпре анализирана вишезонска **k·p** теорија која је коришћена за моделовање електронских и шупљинских стања у двоструким квантним јамама. Описан је **k·p** модел за случај масивног полупроводника и процедура за укључивање утицаја спин-орбитне интеракције. Помоћу теорије пертурбација у присуству квазидегенерације формиран је модел који експлицитно описује проводну зону, док је утицај осталих зона урачунат применом Левдинове теорије пертурбација. Детаљно је анализиран осмозонски **k·p** модел као и поступак укључивања утицаја напрезања, спољашњег електричног и магнетског поља у оквиру овог модела. Напрезање је моделовано коришћењем Бир-Пикусовог формализма. Утицај електричног поља је урачунат кроз модификацију дијагоналних чланова **k·p** Хамилтонијана, док је магнетско поље моделовано коришћењем Пајерлсове замене и Хамилтонијана који описује Земанов ефекат. Затим је описан метод јаке везе који веродостојно описује електронску структуру у читавој Брилуеновој зони. У оквиру формализма метода јаке везе, детаљно је објашњена двоцентарска апроксимација и формиран је једночестични модел за кристале са сфалеритном кристалном структуром у који је укључен ефекат спин-орбитне интеракције.

У трећем поглављу су представљени резултати за HgTe/Cd_xHg_{1-x}Te симетричне и асиметричне двоструке квантне јаме са [001] правцем нарастања. Дати су резултати помоћу којих се квантификује утицај напрезања, спољашњег електричног и магнетског поља на електронска и шупљинска стања у двоструким квантним јамама. Резултати су добијени коришћењем осмозонског Кејновог **k·p** модела. За примену граничних услова на местима

хетероспоја коришћена су Бартова симетризациона правила како би се избегла појава лажних решења. Приказано је формирања својственог проблема и решавања помоћу методе која користи развој анвелопних функција у базис раванских таласа. Показано је да се прелаз из полуметалног у нетривијално изолаторско стање код вишеструких асиметричних квантних јама може ефикасно контролисати подешавањем односа дебљина јамског материјала. У двоструким квантним јамама је установљено да постоји просторна раздвојеност између стања са дна проводне и врха валентне зоне и да промена моларног удела у баријерама може имати значајан утицај на зонску структуру и услове за тополошки прелаз.

У четвртном поглављу су представљени резултати за електронске и оптичке особине дводимензионалних (2Д) HgTe квантних тачака и прстенова. Резултати су добијени на основу емпиријског метода јаке везе у $sp^3d^5s^*$ базисном скупу. Нумеричке вредности матричних елемената у моделу су дефинисане параметризацијом за масивни HgTe материјал, а онда су резултати параметризације примењени на 2Д структуре. У емпиријском моделу јаке везе занемарени су матрични елементи који потичу од троцентарских интеграла. Такође, слично као и код $k \cdot p$ модела, укључен је утицај спин-орбитне интеракције. Дејство магнетског поља је моделовано преко Пајерлсове замене, док је за моделовање оптичке апсорпције коришћена уобичајена интраорбитална апроксимација. Пронађене су интензивне Ахаронов-Бомове осцилације стања у проводној и валентној зони код нанопрстенова, као и осцилације енергије ивичних стања код квантних прстенова и тачака одређених ивица. Установљено је да највећи допринос спектру апсорпције дају ивична стања са интензивним пиковима у терахерцној области.

У петом поглављу су сумирана истраживања из докторске дисертације и наведени су њени најважнији научни доприноси.

Након прегледа релевантне литературе, дисертација је допуњена низом прилога којима су тематска поглавља растеређена од табеларних приказа коришћених параметара и низа теоријских извођења. У Прилогу 1 и 2 су представљени зонски параметри за HgTe и CdTe и параметри метода јаке везе по Слејтер-Костеровој нотацији, редом. У Прилогу 3 је дат списак двоцентарских интеграла између различитих орбитала из $sp^3d^5s^*$ базисног скупа. У Прилогу 4 је изведена Блохова теорема, док су у Прилогу 5 представљене основе теорије анвелопних функција. У Прилозима 6 и 7 су описане теорија пертурбација независних од времена и Левдинова пертурбациона теорија, редом. У Прилогу 8 су дата решења Шредингерове једначине написане за атоме сличне водониковом, док је у Прилогу 9 анализиран поједностављен модел електронских стања за двоатомски молекул.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација припада модерној области наноелектронике у којој се проучавају електронска, оптичка и транспортна својства *полупроводничких квантних наноструктура*, које имају бар једну димензију мању од 100 nm и у којима доминирају квантно-механички ефекти. У докторској дисертацији су проучене асиметричне двоструке HgTe/Cd_xHg_{1-x}Te квантне јаме, 2Д HgTe нанотачке (квантне тачке) и 2Д HgTe нанопрстенови (квантни прстенови).

Већ дужи низ година тополошка уређеност привлачи велику пажњу научне јавности због примене у откривању и класификацији нових фаза материје. Коришћењем тополошког уређења, уместо уобичајене Ландауове теорије о нарушавању симетрије, откривана је нова квантна фаза материје која се назива тополошки изолатор. За разлику од обичног изолатора, тополошки изолатор поседује енергетски процеп у балку и стања локализована по ивицама (површини) која су заштићена симетријом заснованој на инверзији времена. Под одређеним условима, наноструктуре које се базирају на HgTe једињењу се могу наћи у стању

двоструки холлов ефект, који се још назива и квантни спински Холлов (енгл. *Quantum Spin Hall-QSH*) изолатор.

Поједностављени ефективни теоријски модели предвиђају постојање QSH стања у $\text{HgTe/Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ квантним јамама. Нумерички резултати су показали да око вредности ширине јама од приближно $d_c=6,3$ nm долази до инверзије проводне и валентне зоне. То је указало на могуће промене квантне фазе из стања нормалног изолатора у стање тополошког изолатора. Даља истраживања су показала могућност прелаза у нетривијална тополошка стања и код сложенијих HgTe наноструктура, попут симетричних двоструких квантних јама које се заснивају на $\text{HgTe/Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ хетероспоју. У симетричним структурама тополошка транзиција се може контролисати помоћу спољашњег електричног поља. Међутим, амплитуда поља неопходна за промену квантне фазе може довести до електричног пробоја материјала и трајног механичког оштећења. Због тога је у докторској дисертацији, анализирана алтернатива која се односи на увођење асиметрије у структуру. Присуство асиметрије доводи до отварања процепа, што ефективно смањује амплитуду поља неопходну за тополошку транзицију. Логичан наставак истраживања у овој области је анализа асиметричних двоструких $\text{HgTe/Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ квантних јама. У дисертацији је детаљно анализиран утицај асиметрије на зонску структуру и резултати су објављени у истакнутом међународном часопису и представљени у оквиру дисертације.

Недавна теоријска истраживања имплицирају да наноструктуре засноване на монослоју HgTe могу поседовати нетривијалну тополошку фазу када се изложе дејству тензионог напрезања у равни наноструктуре. На основу анализе фононске дисперзије монослоја HgTe показано је да постоји динамичка стабилност овог материјала у 2Д форми, што отвара могућност реализације танкослојних HgTe направа. За разлику од најпознатијег 2Д материјала графена, монослој HgTe није савршено планаран јер су атоми Hg и Te померени у нормалном правцу у односу на раван у чијој се пројекцији формира структура облика пчелињег саћа. Нове технологије производње 2Д материјала указују на могућност фабрикације наноскопских HgTe квантних тачака и прстенова реда десетак нанометара. Теоријски је показано да у структурама овако малих димензија постоји неколико механизма за манифестацију Ахаронов-Бомовог ефекта. Као наставак актуелних истраживања у овој области, анализирана су електронска и оптичка својства 2Д HgTe квантних тачака и прстенова различите геометрије. Анализирана је могућност контроле електронских и оптичких својстава подешавањем облика наноструктуре, типа ивица и интензитета спољашњег магнетског поља. Резултати приказани у оквиру ове дисертације су објављени у врхунском међународном часопису.

На основу наведених чињеница, може се констатовати да докторска дисертација у потпуности задовољава услов савремености. Анализом садржаја дисертације, као и релевантних радова кандидата, установљено је да дисертација задовољава потребне услове оригиналности, што је верификовано публикавањем радова у међународним часописима (видети секцију 4.3). Кандидат је првopotписани аутор на оба рада који су послужили као основ за формирање трећег и четвртог тематског поглавља ове дисертације.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде докторске дисертације, кандидат се детаљно упознао са релевантном и актуелном литературом из уже научне области истраживања, што се огледа у 230 референци које су наведене у библиографији. Значајан део цитираних радова је новијег датума, а у списку референци се налазе и радови чији је аутор или коаутор Душан Топаловић.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Методологија истраживања у оквиру приложене докторске дисертације је спроведена по следећим фазама:

- Извршен је детаљан преглед литературе везане за технологије производње HgTe наноструктура и ефекте који су предмет истраживања докторске дисертације;
- Релевантни резултати објављени у литератури су анализирани, сумирани и систематизовани, на основу чега су дефинисани: предмет, циљеви и полазне хипотезе докторске дисертације;
- На основу анализе постојећих резултата, дефинисани су интересантни облици и састави наноструктура за истраживање;
- Формиран је модел једночестичних стања на основу вишезонске **k-p** теорије за структуре типа квантне јаме. У оквиру ове теорије, укупна таласна функција је приказана као линеарна комбинација Блохових таласних функција у центру Брилуенове зоне. Овај метод се првенствено користи за приближан опис зонске структуре масивних полупроводника, али се, уз извесне апроксимације, може ефикасно применити за анализу полупроводничких наноструктура. У докторској дисертацији је коришћен осмозонски Кејнов **k-p** модел у којем је сваки слој HgTe/Cd_xHg_{1-x}Te асиметричне двоструке јаме описан скупом од осам спрегнутих диференцијалних једначина. Претпостављено је да су зонски параметри HgTe и Cd_xHg_{1-x}Te степенасте функције координате. Потенцијални проблеми, везани за стрме границе хетероспојева, су решени применом Бартових симетризационих правила;
- Вишезонски **k-p** метод може веродостојно да опише зонску структуру само у околини Г тачке, што није задовољавајуће за наноструктуре код којих постоји јако конфинирање у све три димензије. Због тога су за анализу нанотачака и нанопрстенова оформљени модели засновани на методи јаке везе. Правилним избором базисног скупа и параметара, овај модел може добро да опише зонску структуру у целој Брилуеновој зони. Параметри који су коришћени у методи јаке везе су добијени „фитовањем“ на две референтне зонске структуре: 1) у Г тачки, на зонску структуру добијену **k-p** методом, 2) у остатку Брилуенове зоне, на зонску структуру добијену у GW апроксимацији. У дисертацији је коришћен базис $sp^3d^5s^*$ орбитала у Слејтер-Костеровој нотацији, где су скокови ограничени на најближе суседне атоме. У модел је укључена и спин-орбитна интеракција. Утицај магнетског поља је урачунат помоћу Пајерлсове замене. Ова метода је заснована на модификацији чланови Хамилтонијана, који се односе на прелазе електрона између атомских стања, увођењем фазног помераја зависног од магнетског вектор потенцијала. Оптичка апсорпција је одређена укључивањем само интраорбиталних чланова, што представља довољно добру апроксимацију за опис оптичког спектра;
- У циљу нумеричке имплементације одабраних модела зонске структуре формиран су програмски кодови у PYTHON програмском језику и MATLAB софтверском пакету;
- Анализирани су резултати електронских и оптичких својстава одабраних наноструктура у присуству спољашњег електричног и магнетског поља;
- Резултати ове дисертације су упоређени са доступним експерименталним резултатима из релевантних референци.

Научне методе примењене у докторској дисертацији у потпуности одговарају стандардима научноистраживачког рада, што је резултовало коректним решењима проблема који су дефинисани у оквиру докторске дисертације. Урађена је систематска и свеобухватна анализа и дискусија добијених резултата.

3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати докторске дисертације представљају значајан теоријски допринос савременој области физичке електронике наноструктура које се базирају на HgTe једињењу. Дисертација се посебно бави ефектима напрезања, спољашњег електричног и магнетског поља на електронске и оптичке особине HgTe наноструктура. Сазнања до којих се дошло у

докторској дисертацији могу представљати значајан допринос применама у наноелектроници, оптоелектроници, спинтроници и квантној информатици. Иницијални резултати указују на псеудоспински базирану физику у асиметричним квантним јамама, која је слична оној у двослојном графену без долињске дегенерације. Ово отвара могућност за примену $\text{HgTe}/\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ хетероструктура у реализацији нових тополошких спинских транзистора са ефектом поља. Са друге стране, истраживања у докторској дисертацији указују на појаву дискретних стања око Фермијевог нивоа и на постојање неколико механизма за манифестацију Ахаронов-Бомовог ефекта у 2Д наноструктурама. Због тога би истражене 2Д HgTe наноструктуре могле да имају велику примену у савременим оптоелектронским уређајима који раде у инфрацрвеном делу оптичког спектра, као и за модерне квантне интерферометре.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат Душан Топаловић је у својој докторској дисертацији показао систематичност, способност да препозна потенцијалне проблеме из релевантне научне области и да на свеобухватан начин спроведе истраживања која дају задовољавајуће одговоре на постављене научне хипотезе. Констатујемо да је кандидат успешно савладао методологију и одговорио на постављене изазове који су дефинисани на почетку израде докторске дисертације. Доприноси докторске дисертације су савремени и оригинални, чиме се потврђује способност кандидата за самосталан научноистраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Научни доприноси кандидата Душана Топаловића остварени у току рада на докторској дисертацији су следећи:

- На систематичан и детаљан начин су презентована својства и технике израде наноструктура од HgTe једињења које поседује тополошка својства;
- Формиран је модел електронских стања у $\text{HgTe}/\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ асиметричним двоструким квантним јамама;
- Демонстрирано је да се прелаз из полуметалног у нетривијално изолаторско стање код вишеструких асиметричних квантих јама може ефикасно контролисати подешавањем односа дебљина јамског материјала;
- Показано је да у двоструким јамама постоји просторна раздвојеност између стања са дна проводне и врха валентне зоне. Такође је показано да промена моларног удела у баријерама, која утиче на спрезање јама, може имати значајан утицај на зонску структуру и тополошке прелазе;
- Формиран је једночестични модел електронских стања у 2Д HgTe квантним тачкама и квантним прстеновима заснован на методи јаке везе;
- Анализиране су електронска структура и оптичке особине једнослојних квантних тачака и прстенова различитог облика и димензија у присуству спољашњег магнетског поља;
- Показано је да у нанотачкама и нанопрстеновима постоји велики утицај ивичних стања на оптичку апсорпцију у терахерцној области, која се може фино подешавати применом магнетског поља;
- Нумерички резултати су указали на постојање интензивних Ахаронов-Бомових осцилација стања у проводној и валентној зони код нанопрстенова;
- За одређене ивице наноструктуре откривена су специфична ивична стања која су локализована дуж читавих ивица 2Д наноструктуре. Код оваквих стања постоје

Ахаронов-Бомове осцилације, чак и у једнострукто повезаној структури попут квантне тачке.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Истраживање кандидата Душана Топаловића је засновано на модерним теоријским и експерименталним резултатима који су објављени у најистакнутијим међународним часописима. Циљеви докторске дисертације су били да се по први пут теоријски истраже електронска и оптичка својства асиметричних $\text{HgTe}/\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ двоструких квантних јама, као и 2Д HgTe нанотачака и нанопрстенова. Након сагледавања полазних хипотеза, циљева истраживања и остварених резултата, констатујемо да је кандидата успешно одговорио на сва битна питања која су се појавила током израде докторске дисертације. Резултати истраживања из докторске дисертације представљају значајан научни допринос у оквиру области наноелектронике, што је верификовано њиховим публиковањем у престижним часописима са СЦИ листе.

4.3. Верификација научних доприноса

Научни доприноси презентовани у докторској дисертацији су верификовани у следећим објављеним радовима:

Категорија M21:

1. **Topalović, D. B.**, Arsoski, V. V., Tadić, M. Ž., Peeters, F. M.: Confined electron states in two-dimensional HgTe in magnetic field: Quantum dot versus quantum ring behavior, *Physical Review B*, vol. 100, iss. 12, pp. 125304-1-9, 2019 (**IF=3.736**) (ISSN 2469-9950).

Категорија M22:

1. **Topalović, D. B.**, Arsoski, V. V., Tadić, M. Ž., Peeters, F. M.: Asymmetric versus symmetric $\text{HgTe}/\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ double quantum wells: band gap tuning without electric field, *Journal of Applied Physics*, vol. 128, iss. 6, pp. 064301-1-8, 2020 (**IF=2.286**) (ISSN 0021-8979).

Категорија M33:

1. **Topalović, D. B.**, Arsoski, V. V., Tadić, M. Ž., Peeters, F. M.: "Detection of helical edge states in square shaped HgTe quantum dots", *Proceedings of 4th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering, IcETRAN 2017*, Kladovo, Serbia, 2017, pp. MOI3.3-1-5 (ISBN 978-86-7466-692-0).

Категорија M34:

1. **Topalović, D. B.**, Arsoski, V. V., Tadić, M. Ž., Peeters, F. M.: "Tunable quantum phase transitions in asymmetric $\text{HgTe}/\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ double quantum wells", *Abstracts of tutorial, keynote, invited lectures, progress reports and contributed papers of The Seventh International School and Conference on Photonics, Photonica 2019*, Belgrade, Serbia, 2019, pp. 109 (ISBN 978-86-7306-153-5).
2. **Topalović, D. B.**, Arsoski, V. V., Tadić, M. Ž., Peeters, F. M.: "Magnetic-field dependence of the electronic and optical properties of hexagonal-shaped 2D HgTe quantum dots and quantum rings", *The 20th Symposium on Condensed Matter Physics, SFKM 2019*, Belgrade, Serbia, 2019, pp. 94.
3. **Topalović, D. B.**, Arsoski, V. V., Čukarić, N. A., Tadić, M. Ž.: "Electronic and optical properties of square HgTe quantum dot", *Abstracts of tutorial, keynote, invited lectures, progress reports and contributed papers of The Sixth International School and Conference on Photonics, Photonica 2017*, Belgrade, Serbia, 2017, pp. OM19-98 (ISBN 978-86-82441-46-5).

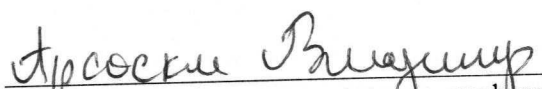
5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

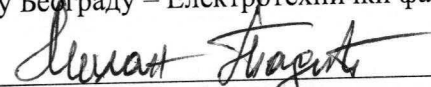
Докторска дисертација кандидата Душана Топаловића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, под насловом „Анализа и моделовање електронских стања у HgTe наноструктурама“, представља савремен и оригиналан научни допринос. Текст докторске дисертације је написан јасно и разумљиво, док је њен садржај добро организован. Циљеви дисертације су прецизно формулисани, а коришћена методологија у потпуности одговара стандардима научноистраживачког рада. Објављени резултати у најистакнутијим међународним часописима потврђују испуњеност дефинисаних циљева докторске дисертације и способност кандидата за самостално бављење научним радом.

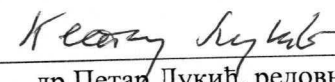
Комисија констатује да докторска дисертација кандидата Душана Топаловића испуњава све законске, формалне и суштинске услове, као и све критеријуме који се примењују приликом вредновања докторске дисертације на Универзитету у Београду и на Електротехничком факултету. Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација Душана Топаловића под насловом „Анализа и моделовање електронских стања у HgTe наноструктурама“, изложи на увид јавности, прихвати и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

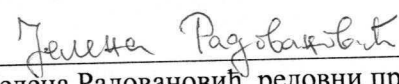
У Београду 29.09.2020. године.

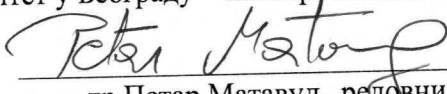
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

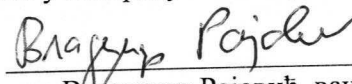

др Владимир Арсоки, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


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


др Петар Лукић, редовни професор
Универзитет у Београду – Машински факултет


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


др Петар Матавуљ, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Владимир Рајовић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет